

## ANÁLISIS DE INTERACCIÓN DINÁMICA SUELO-ESTRUCTURA ANTE LA INCIDENCIA DE ONDAS DE RAYLEIGH

### ANALYSIS OF DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION DUE TO THE INCIDENCE OF RAYLEIGH WAVES

**Adriano Trono<sup>a,b</sup>, Denis Lorenzón<sup>a,b</sup>, Federico Pinto<sup>a,b</sup> y Marcelo A. Ceballos<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT) – CONICET, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina. [idit@fcefyN.edu.ar](mailto:idit@fcefyN.edu.ar), <http://www.inv.idit.uncor.edu/>*

<sup>b</sup>*FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba, Av. Vélez Sársfield 1611, 5000 Córdoba, Argentina. [depestructuras@fcefyN.unc.edu.ar](mailto:depestructuras@fcefyN.unc.edu.ar), <http://www.efn.uncor.edu.ar>*

**Palabras clave:** Capa perfectamente acoplada (PML), Interacción Suelo-Estructura, Ondas de Rayleigh, Método de reducción del dominio.

**Resumen:** Es habitual en la práctica del diseño sísmo-resistente de estructuras suponer que el patrón de onda incidente es de cuerpo SH y de propagación vertical. Para zonas distantes del epicentro esta simplificación dista de la realidad ya que la mayor parte de la energía sísmica arriba al sitio en forma de ondas superficiales. Sin embargo, los códigos de elementos finitos comerciales todavía no tienen herramientas adecuadas para modelar la entrada y la salida de este tipo de ondas. Por este motivo se propone modelar la entrada de ondas mediante el método de reducción del dominio (Domain Reduction Method - DRM), y la salida de ondas mediante bordes absorbentes de capas perfectamente acopladas (Perfectly Matched Layer - PML). Esta combinación permite realizar un análisis de interacción dinámica suelo-estructura ante cualquier onda incidente en el dominio del tiempo, lo que permite incluir no-linealidades en el análisis. La verificación del método propuesto se hace comparando la solución analítica de la onda de Rayleigh con los resultados de un modelo de elementos finitos lineal de campo libre sometido al paso de dicha onda superficial.

**Keywords:** Perfect Matched Layer (PML), Soil Structure Interaction, Rayleigh Waves, Domain Reduction Method (DRM).

**Abstract.** The engineering practice of earthquake resistant design often relies on the assumption that the incident wave pattern consists in vertically propagating SH and P body waves. For structures at considerable distances from the epicenter, this simplification may not be applicable, since most of the seismic energy arrives at the site in the form of surface waves. Nevertheless, most commercial finite element codes still do not provide adequate tools in order to model these types of waves as input and far field radiation. For this reason, this paper proposes a technique that is able to account for incident waves input by means of the Domain Reduction Method (DRM), whereas the outgoing waves are represented by means of absorbing boundaries of Perfectly Matched Layers (PML). This combination allows the definition of a dynamic soil-structure interaction analysis subjected to any type of incoming waves in the time domain, as well as material non-linearities in the analysis. The verification of the proposed method is carried out by comparing the analytical solution of the Rayleigh wave with the results of a free-field linear finite element model subjected to the passage of such waves.

## 1. INTRODUCCIÓN

La primera parte de cualquier análisis de interacción suelo-estructura ante eventos sísmicos consiste en calcular el desplazamiento del campo libre, es decir, del medio físico en ausencia de la estructura. Habitualmente se asume que el movimiento de diseño ocurre en una ubicación específica conocida como punto de control, que una vez definido, permite calcular el movimiento del campo libre según el tipo de onda sísmica incidente. Un mismo movimiento en la superficie libre puede implicar movimientos muy diferentes en profundidad y con diferentes velocidades de propagación horizontal según el patrón de onda supuesto. Lo habitual en la práctica de la ingeniería civil es suponer que la onda incidente es de cuerpo SH y de propagación vertical. Para zonas distantes del epicentro esta simplificación dista de la realidad ya que la mayor parte de la energía sísmica arriba al sitio en forma de ondas superficiales de Rayleigh y de Love. Sin embargo, los programas de elementos finitos comerciales todavía no tienen herramientas adecuadas para modelar la entrada y la salida de este tipo de ondas.

Por este motivo se propone modelar la entrada de ondas mediante el método de reducción del dominio (Domain Reduction Method - DRM) propuesto por [Bielak et. al \(2003\)](#) y la salida de ondas mediante bordes absorbentes de capas perfectamente acopladas (Perfectly Matched Layer - PML). Estos bordes permiten absorber tanto ondas superficiales y ondas de cuerpo independiente del ángulo de incidencia.

Para poder resolver el modelo con bordes PML en el dominio del tiempo se utiliza el enfoque híbrido propuesto por [Kucukcoban y Kallivokas \(2013\)](#) que utiliza elementos mixtos en la capa de borde ensamblados a elementos finitos estándares en el modelo del sitio. Se utilizan los elementos mixtos propuestos por [Trono et. al \(2022\)](#) que utilizan funciones de forma de tensión discontinua y permiten aumentar la efectividad de absorción del borde en relación a los elementos mixtos PML de tensión continua.

Esta combinación entre DRM y PML permite realizar un análisis de interacción dinámica suelo-estructura ante cualquier onda incidente en el dominio del tiempo, lo que permite incluir no-linealidades en el análisis.

La verificación del método propuesto se hace comparando la solución analítica de la onda de Rayleigh con los resultados de un modelo numérico de campo libre sometido al paso de dicha onda superficial.

## 2. MÉTODO DE REDUCCIÓN DEL DOMINIO

El método de reducción del dominio ([Bielak et. al, 2003](#)) resuelve la entrada de ondas al modelo del sitio. Inicialmente se supone que existe un modelo de elementos finitos lo suficientemente grande como para incluir la falla sísmica ([Figura 1 a](#)). Dicho dominio se subdivide en un dominio del sitio de interés  $\Omega$  y en un dominio externo  $\Omega^+$ . Ambos están divididos por la superficie de interfase  $\Gamma$ . El borde externo  $\Gamma^+$  se lo supone lo suficientemente alejado como para que las reflexiones no interfieran en la solución dentro de  $\Omega$ . Cuando se realiza la discretización espacial mediante elementos finitos del dominio completo, el sistema de ecuaciones resultante puede partitionarse de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} & 0 \\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} + M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{u}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} & 0 \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} + K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_b \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde  $M$  y  $K$  son las matrices de masa y rigidez,  $u$  es el vector desplazamiento, los subíndices  $i$ ,  $b$  y  $e$  se refieren a los nudos en la zona interior, sobre la interfase y en la zona exterior,

respectivamente, y los supra-índices  $\Omega$  y  $\Omega^+$  se refieren a los subdominios sobre los cuales las matrices están definidas. Para transmitir la excitación sísmica desde la falla hasta el contorno  $\Gamma$ , se considera el problema auxiliar mostrado en la **Figura 2 b** en el que la región exterior es idéntica al problema original y el dominio  $\Omega$  es remplazado por  $\Omega_0$  formado por suelo en ausencia de la estructura (conocido habitualmente como modelo de campo libre), y la fuerza aplicada en la falla sísmica es la misma. De manera análoga a lo hecho previamente pueden partitionarse las ecuaciones del problema auxiliar:

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega_0} & M_{ib}^{\Omega_0} & 0 \\ M_{bi}^{\Omega_0} & M_{bb}^{\Omega} + M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_i^0 \\ \ddot{u}_b^0 \\ \ddot{u}_e^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega_0} & K_{ib}^{\Omega_0} & 0 \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} + K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i^0 \\ u_b^0 \\ u_e^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde  $u_i^0, u_b^0$  y  $u_e^0$  son los vectores desplazamiento del modelo auxiliar y las matrices  $M$  y  $K$  están definidas en los dominios  $\Omega^+$  y  $\Omega_0$ . De esta manera puede despejarse el vector de cargas  $P_e$  en Ec. (2):

$$P_e = M_{eb}^{\Omega^+} \ddot{u}_b^0 + M_{ee}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^0 + K_{eb}^{\Omega^+} u_b^0 + K_{ee}^{\Omega^+} u_e^0 \quad (3)$$

Para simplificar el análisis **Bielak et al. (2003)** utilizan un enfoque mixto en términos de desplazamientos totales en  $\Omega$  y de desplazamientos relativos en  $\Omega^+$ . Para ello se usa la siguiente transformación de variables en el dominio exterior:

$$u_e = u_e^0 + w_e \quad (4)$$

donde el desplazamiento en  $\Omega^+$  queda expresado como la suma del desplazamiento de campo libre  $u_e^0$  y un desplazamiento relativo  $w_e$ . Reemplazando Ec. (4) y Ec. (3) en Ec. (1) y dejando del lado derecho los términos asociados al desplazamiento de campo libre:

$$\begin{bmatrix} M_{ii}^{\Omega} & M_{ib}^{\Omega} & 0 \\ M_{bi}^{\Omega} & M_{bb}^{\Omega} + M_{bb}^{\Omega^+} & M_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & M_{eb}^{\Omega^+} & M_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_i \\ \ddot{u}_b \\ \ddot{w}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{ii}^{\Omega} & K_{ib}^{\Omega} & 0 \\ K_{bi}^{\Omega} & K_{bb}^{\Omega} + K_{bb}^{\Omega^+} & K_{be}^{\Omega^+} \\ 0 & K_{eb}^{\Omega^+} & K_{ee}^{\Omega^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_b \\ w_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ P_b^{efec} \\ P_e^{efec} \end{bmatrix} \quad (5)$$

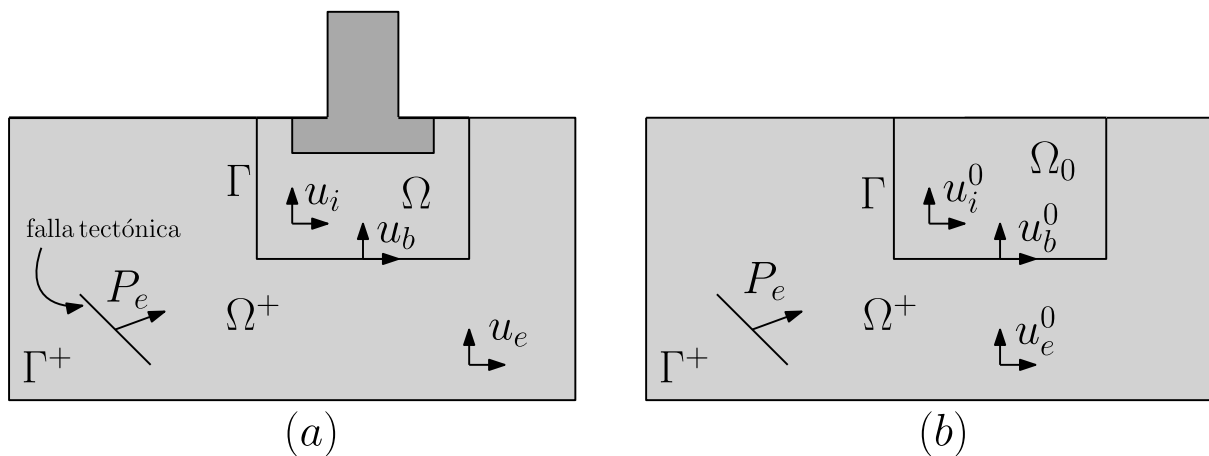


Figura 1: a) Región que incluye a la falla tectónica y a la estructura. b) Región en ausencia de la estructura.

Las matrices de masa y rigidez del sistema se conservan idénticas. Sin embargo, las fuerzas del lado derecho son reemplazadas por cargas efectivas que dependen exclusivamente del desplazamiento de campo libre:

$$P_b^{efec} = -M_{be}^{\Omega^+} \ddot{u}_e^0 - K_{be}^{\Omega^+} u_e^0, \quad P_e^{efec} = M_{eb}^{\Omega^+} \ddot{u}_b^0 + K_{eb}^{\Omega^+} u_b^0 \quad (6)$$

Estas fuerzas involucran las sub-matrices  $M_{be}^{\Omega^+}$ ,  $K_{be}^{\Omega^+}$ ,  $M_{eb}^{\Omega^+}$  y  $K_{eb}^{\Omega^+}$  que tienen solo coeficientes no nulos asociados a una capa de elementos finitos adyacente a  $\Gamma$  en  $\Omega^+$ . Este pequeño dominio se ubica entre  $\Gamma$  y una superficie exterior adyacente  $\Gamma_e$  (Figura 2 a). Por lo tanto, las fuerzas efectivas actúan únicamente en  $\Gamma$  y  $\Gamma_e$ , y el desplazamiento de campo libre requerido para el cálculo de las fuerzas efectivas son los desplazamientos y aceleraciones en  $\Gamma$  y  $\Gamma_e$ . Para evitar la resolución del modelo auxiliar pueden utilizarse soluciones analíticas de la onda incidente.

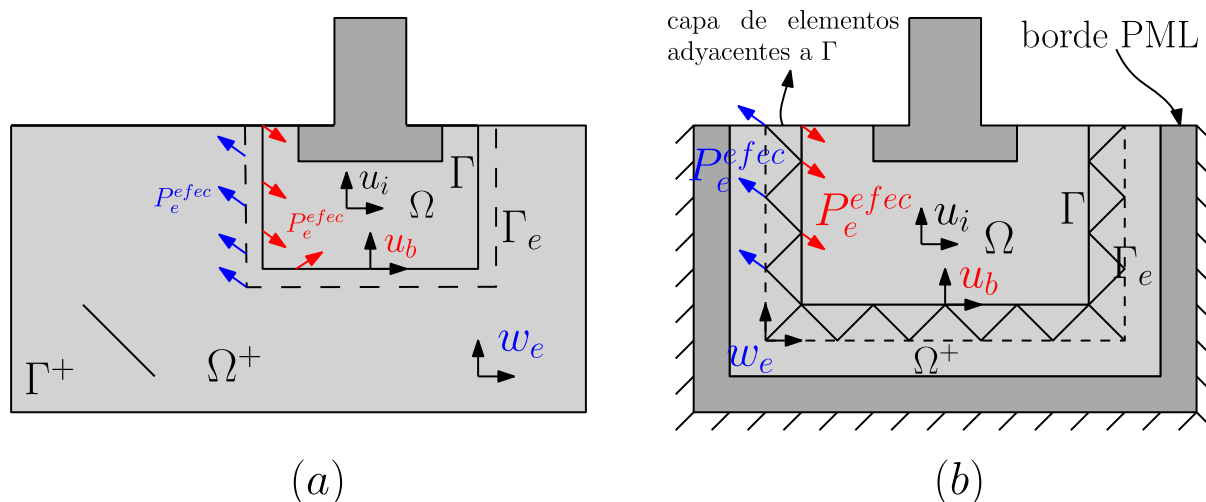


Figura 2: a) Modelo equivalente en términos de desplazamientos totales en  $\Omega$  y relativos en  $\Omega^+$  b) Modelo equivalente reducido mediante la utilización de bordes absorbentes.

Otra ventaja importante del método de reducción del dominio es que al aplicarse las cargas efectivas en  $\Gamma$  y  $\Gamma_e$  todas las ondas en la región  $\Omega^+$  del modelo equivalente serán salientes. Esto implica que el tamaño de la región  $\Omega^+$  puede reducirse considerablemente mediante la utilización de bordes absorbentes. En este trabajo se propone utilizar el método de reducción del dominio en combinación con bordes absorbentes PML (Figura 2 b).

Si en el modelo equivalente reducido mostrado en la Figura 2 b se omite la presencia de la estructura, se modela directamente el paso de las ondas por el campo libre. Si el tamaño del mallado es adecuado las fuerzas efectivas ingresan la onda al dominio  $\Omega$  y permiten su salida sin producir desplazamientos relativos  $w_e$  en  $\Omega^+$ . Es por eso que en este caso particular los bordes absorbentes tienen muy poca energía que absorber: solo absorben ondas salientes debidas a las deficiencias de modelación por tamaño de la discretización del modelo o longitud del paso de tiempo del integrador. Poursartip (2017) hace una verificación de los bordes PML realizando modelos del campo libre utilizando el DRM. Esto es cuestionable debido a que si el mallado y el paso de tiempo son adecuados, las ondas salientes son despreciables y en lugar de verificar los bordes PML se verifica la validez del método DRM. Esto se muestra en la sección 4.1.

## 2.1 Incidencia de ondas de Rayleigh

Como desplazamiento de campo libre se utiliza la solución analítica de la onda plana de Rayleigh en el semi espacio homogéneo. Sea  $V_S$  la velocidad de ondas de corte del suelo, la

velocidad de onda de Rayleigh  $V_R$  puede resolverse mediante la siguiente ecuación (Graff, 1975):

$$\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + \left(24 - 16\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^{-2}\right)\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - 16\left(1 - \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^{-2}\right) = 0 \quad (7)$$

donde  $\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$ , siendo  $V_P$  la velocidad de onda P y  $\nu$  el módulo de Poisson. De las 6 raíces de la Ec.(7) sólo es de interés la raíz real  $0 < \frac{V_R}{V_S} < 1$ . Una vez obtenida  $V_R$  a partir de dicha raíz puede obtenerse la solución del desplazamiento vertical y horizontal del suelo en el dominio de la frecuencia. Se normaliza la onda viajando en sentido positivo del eje  $x$  (Richart et. al, 1970) para que el desplazamiento horizontal en la superficie libre sea la señal de entrada:

$$U_0(x, y, \omega) = U_0(x_i, 0, \omega) \frac{-e^{qy} + \frac{2qs}{k^2} e^{sy}}{\frac{s^2}{k^2} + 1} e^{-ik(x-x_i)} \quad (8)$$

$$V_0(x, y, \omega) = i U_0(x_i, 0, \omega) \frac{\frac{2q}{k} e^{sy} - \frac{q}{k} e^{qy}}{\frac{s^2}{k^2} + 1} e^{-ik(x-x_i)} \quad (9)$$

donde  $y$  es ordenada,  $U$  y  $W$  son los desplazamientos horizontal y vertical,  $\omega$  es la frecuencia,  $k = \frac{\omega}{V_R}$  es el número de onda,  $s = k^2 - \frac{\omega^2}{V_S^2}$  y  $q^2 = k^2 - \frac{\omega^2}{V_P^2}$ .  $U_0(\omega)$  es la transformada de Fourier del desplazamiento horizontal  $u_0(x_i, 0, t)$  medido en la superficie en un punto ubicado a una distancia  $x_i$  del origen. Para conocer los desplazamientos  $u(x, y, t)$  y  $v(x, y, t)$  se debe aplicar la transformada inversa de Fourier de las Ecs. (8) y (9). Para la aplicación del DRM son de interés los desplazamientos de los nudos ubicados en  $\Gamma$  y  $\Gamma_e$ .

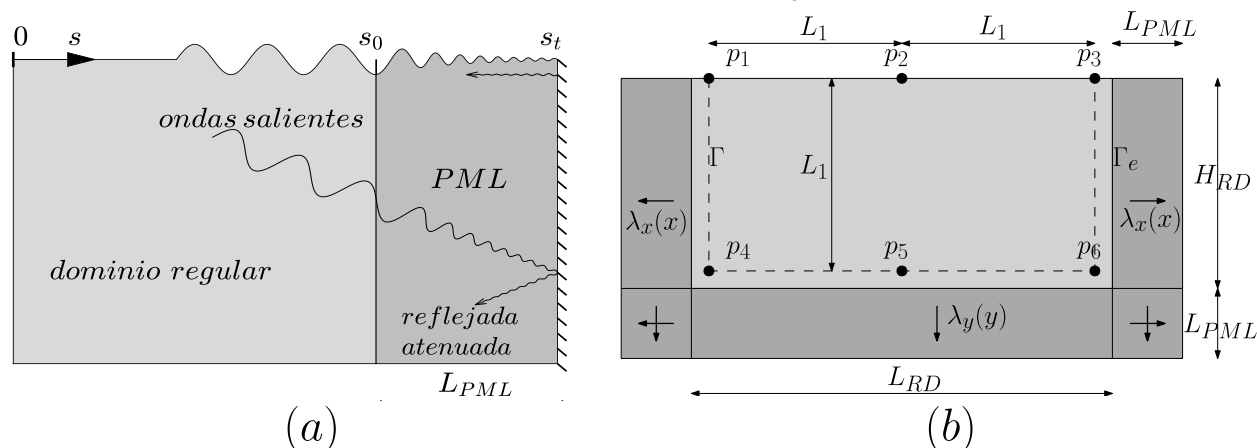


Figura 3: a) Borde PML en la dirección  $s$ . b) Esquema del modelo realizado para verificar el DRM.

### 3. BORDES ABSORBENTES PML

Para modelar la naturaleza infinita del problema, se colocan capas PML absorbentes en los bordes del dominio de interés, denominado dominio regular o interior. La zona PML consiste en un espacio deformado donde el vector posición se convierte en complejo mediante funciones de estiramiento que permiten establecer una correspondencia entre la coordenada geométrica y la posición. La función de estiramiento se adopta de siguiente la forma (Fathi et. al, 2014):

$$\lambda_s(s, \omega) = \alpha_s(s) + \frac{1}{i\omega} \beta_s(s) \quad (10)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia de excitación. Las funciones de escala y atenuación se definen como:

$$\alpha_s(s) = 1 + \alpha_0 \left( \frac{(s-s_0)n_s}{L_{PML}} \right)^2, \quad s_0 \leq s \leq s_t, \quad (11)$$

$$\beta_s(s) = \beta_0 \left( \frac{(s-s_0)n_s}{L_{PML}} \right)^2, \quad s_0 \leq s \leq s_t, \quad (12)$$

$s$  es la coordenada perpendicular al borde (ver Figura 3 a),  $\alpha_0$  y  $\beta_0$  determinan el valor que alcanzará la función de estiramiento en el borde externo del dominio estirado y se utilizan como parámetros de ajuste.  $L_{PML} = s_t - s_0$  es el espesor de la capa absorbente y  $n_s$  es la componente en la dirección  $s$  del versor saliente perpendicular al borde. Basu et al. (2003) obtienen los valores óptimos de los parámetros de ajuste para problemas unidimensionales:

$$\alpha_0 = \frac{(n+1)r_0}{2L_{PML}} \log\left(\frac{1}{R}\right), \quad \beta_0 = \frac{(m+1)V_c}{2L_{PML}} \log\left(\frac{1}{R}\right), \quad s_0 \leq s \leq s_t \quad (13)$$

donde  $R$  es el coeficiente de reflexión,  $r_0$  es una longitud característica del problema y  $V_c$  es la velocidad de propagación característica. Lo habitual es extender estos valores para casos bidimensionales. Como longitud característica  $r_0$  Zhang et. al (2019) adoptan el tamaño medio del elemento finito. Como velocidad característica puede utilizarse  $V_p, V_s$  o  $V_R$ . Esta elección no modifica considerablemente la efectividad de absorción del borde. Se recomienda utilizar  $V_s$  como velocidad característica por cuestiones de estabilidad intrínseca del medio PML.

Se utiliza el elemento PML mixto simétrico con funciones de tensión discontinua propuesto por Trono et. al (2022). Dadas las matrices del sistema en deformación plana del dominio regular,  $\mathbf{M}^{RD}$ ,  $\mathbf{C}^{RD}$  y  $\mathbf{K}^{RD}$ , se utilizan las matrices del elemento mixto para implementar las matrices de la PML,  $\mathbf{M}^{PML}$ ,  $\mathbf{C}^{PML}$  y  $\mathbf{K}^{PML}$ , y obtener un sistema general de ecuaciones mediante el ensamble:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}\mathbf{d} = \mathbf{f} \quad (14)$$

$\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{K}$  son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez del dominio completo (regular y PML). La esquematización del ensamble del sistema de ecuaciones puede consultarse en Trono et. al (2021). El sistema se reordena a través de la representación en espacios de estado y se resuelve mediante integración numérica de Runge-Kutta de cuarto orden a paso de tiempo constante.

## 4. MODELOS NUMÉRICOS Y RESULTADOS

### 4.1 Verificación del DRM en semi espacio homogéneo

En primera instancia, para verificar el DRM se modela el paso de ondas de Rayleigh por una región de un semi espacio homogéneo de roca blanda mediante elementos finitos en

deformación plana. El ingreso de ondas de Rayleigh se hace mediante la aplicación de fuerzas efectivas en los contornos  $\Gamma$  y  $\Gamma_e$ . La solución obtenida mediante integración numérica del modelo se compara con la solución analítica en los puntos de control  $p_1$  a  $p_6$  (Figura 3 b). Se trata de roca blanda con velocidad de ondas de corte  $V_s = 1500 \text{ m/s}$ , densidad  $\rho_R = 2,3 \text{ t/m}^3$  y módulo de Poisson  $\nu_R = 0,25$ . Se supone un desplazamiento horizontal en afloramiento rocoso con forma de sombrero mexicano wavelet que puede verse como  $u$  en los puntos  $p_1, p_2$  y  $p_3$  en la Figura 4. Las dimensiones del modelo son  $L_{RD} = 200 \text{ m}$ ,  $H_{RD} = 30 \text{ m}$ ,  $L_1 = 90 \text{ m}$  y  $L_{PML} = 10 \text{ m}$  (Figura 3 b). Se utilizan mallados regulares de elementos cuadriláteros de tamaños  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$  ( $es_1$ ) y  $2,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$  ( $es_2$ ). Se utiliza el integrador de Runge-Kutta de cuarto orden de paso de tiempo constante  $dt = 1,25 \times 10^{-4} \text{ s}$ . En la Figura 4 se comparan los desplazamientos horizontal y vertical en los puntos  $p_1$  a  $p_6$  obtenidos con la malla de  $es_2$ .

El resultado de la modelación numérica es satisfactorio ya que no puede apreciarse a simple vista la diferencia con la solución analítica. En la Figura 6 a se muestra la configuración deformada del modelo con elementos  $es_1$  cada 512 pasos de tiempo. Puede observarse que los bordes absorbentes no se desplazan debido a que las fuerzas efectivas absorben de manera “exacta” las ondas salientes. En el tiempo  $t = 0,15988 \text{ s}$  se observa como las fuerzas efectivas actúan deformando los elementos regulares del borde izquierdo para permitir el ingreso de la onda. En el tiempo  $t = 0,35187 \text{ s}$  se observa que las fuerzas efectivas actúan deformando los elementos regulares del borde derecho para permitir la salida de la onda sin producir desplazamientos relativos en el dominio exterior. Además, la fila inferior de elementos regulares tiene deformaciones significativas por causa de las fuerzas efectivas.

#### 4.2 Estructura masiva

A modo de ejemplo se coloca una estructura masiva de hormigón de sección rectangular ( $20 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ ) fundada a los 10 m sobre la roca blanda. El hormigón tiene velocidad de ondas de corte  $V_s^H = 3000 \text{ m/s}$ , módulo de Poisson  $\nu^H = 0,19$  y densidad  $2,4 \text{ t/m}^3$ . En la Figura 6 b se observa que existen rebotes asociados a la presencia de la estructura y que los bordes PML ubicados en el dominio exterior absorben los desplazamientos relativos respecto del movimiento de campo libre. Por este motivo ha sido incrementado el espesor de la PML a  $L_{PML} = 20 \text{ m}$ , para que haya al menos 4 elementos en el espesor del borde.

#### 4.3 Amplificación por estrato de suelo

Es sabido que la presencia del suelo sobre la roca produce una modificación del movimiento sísmico en la superficie libre. Resulta de interés analizar la amplificación que se produce en un estrato de suelo cuando arriba una onda de Rayleigh por la roca. Esto puede ser utilizado como paso intermedio para conocer el desplazamiento de campo libre. Es decir, el DRM puede aplicarse en dos pasos en cascada: el primero para conocer el desplazamiento del perfil de suelos sobre la roca y el segundo para hacer el análisis de interacción suelo-estructura. En la Figura 5 se muestra un esquema del modelo utilizado para realizar el análisis de amplificación. La transición entre el afloramiento rocoso y el estrato de suelo se simplifica mediante un escalón en el modelo. Esta discontinuidad produce un tren de onda P y S que se propaga horizontalmente por el estrato de suelos. Se analiza el caso de un estrato de suelo homogéneo de espesor  $H_s = 20 \text{ m}$ , con  $V_s = 293 \text{ m/s}$ ,  $\nu_s = 0,3$  y  $\rho_s = 1,9 \text{ t/m}^3$ . La roca utilizada es la misma que en la sección 4.1. El punto de control  $p_s$  se ubica lo suficientemente alejado de los

extremos izquierdo y derecho para que las ondas  $P$  y  $S$  debidas a los rebotes en las interfaces verticales entre la roca y el suelo no interfieran en la solución. El modelo tiene dimensiones  $L_S = 400\text{ m}$  y  $L_{PML} = 10\text{ m}$  y el punto  $p_s$  se ubica a una distancia de  $L_p = 270\text{ m}$  del borde derecho. Se utiliza una malla regular de elementos cuadriláteros de  $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$  de lado.

En la Figura 6 se comparan los desplazamientos horizontal y vertical del punto  $p_s$  con la solución analítica del paso de la onda de Rayleigh por afloramiento rocoso. Se observa una modificación del pulso y que la amplificación no es relevante en este caso.

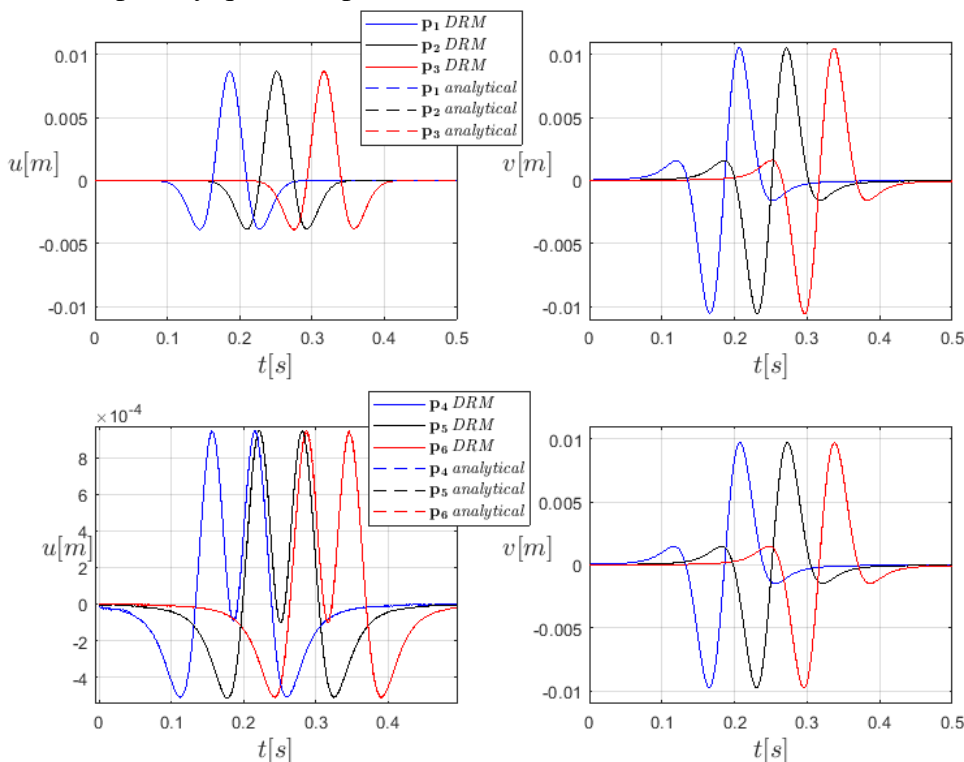


Figura 4: Desplazamientos horizontal y vertical en los puntos de control  $p_1$  a  $p_6$  (elemento finito de  $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ ).

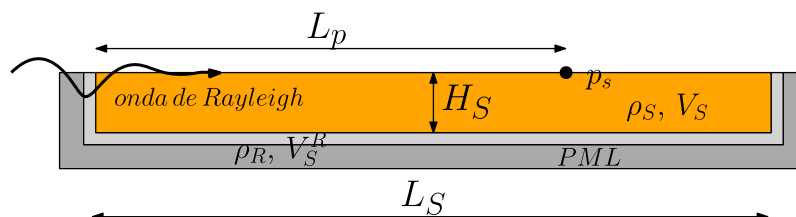


Figura 5: Estrato de suelo sobre roca con bordes PML.

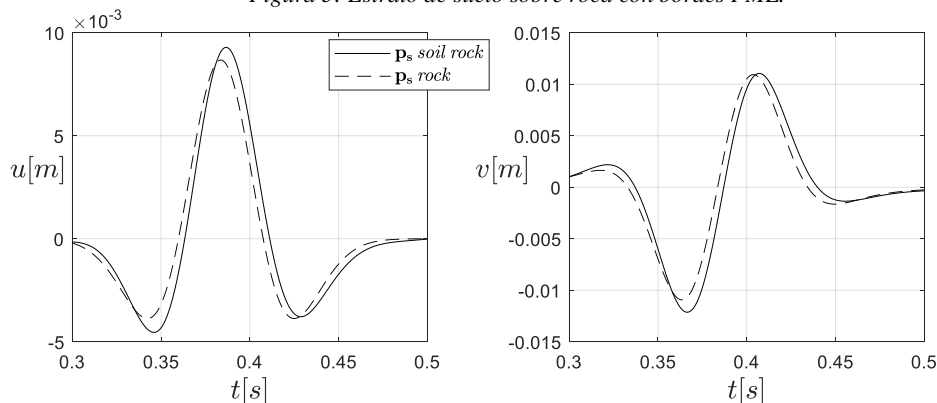


Figura 6: Modificación del desplazamiento en superficie libre por presencia de estrato de suelo de  $20\text{ m}$  de espesor (elemento finito de  $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ ).



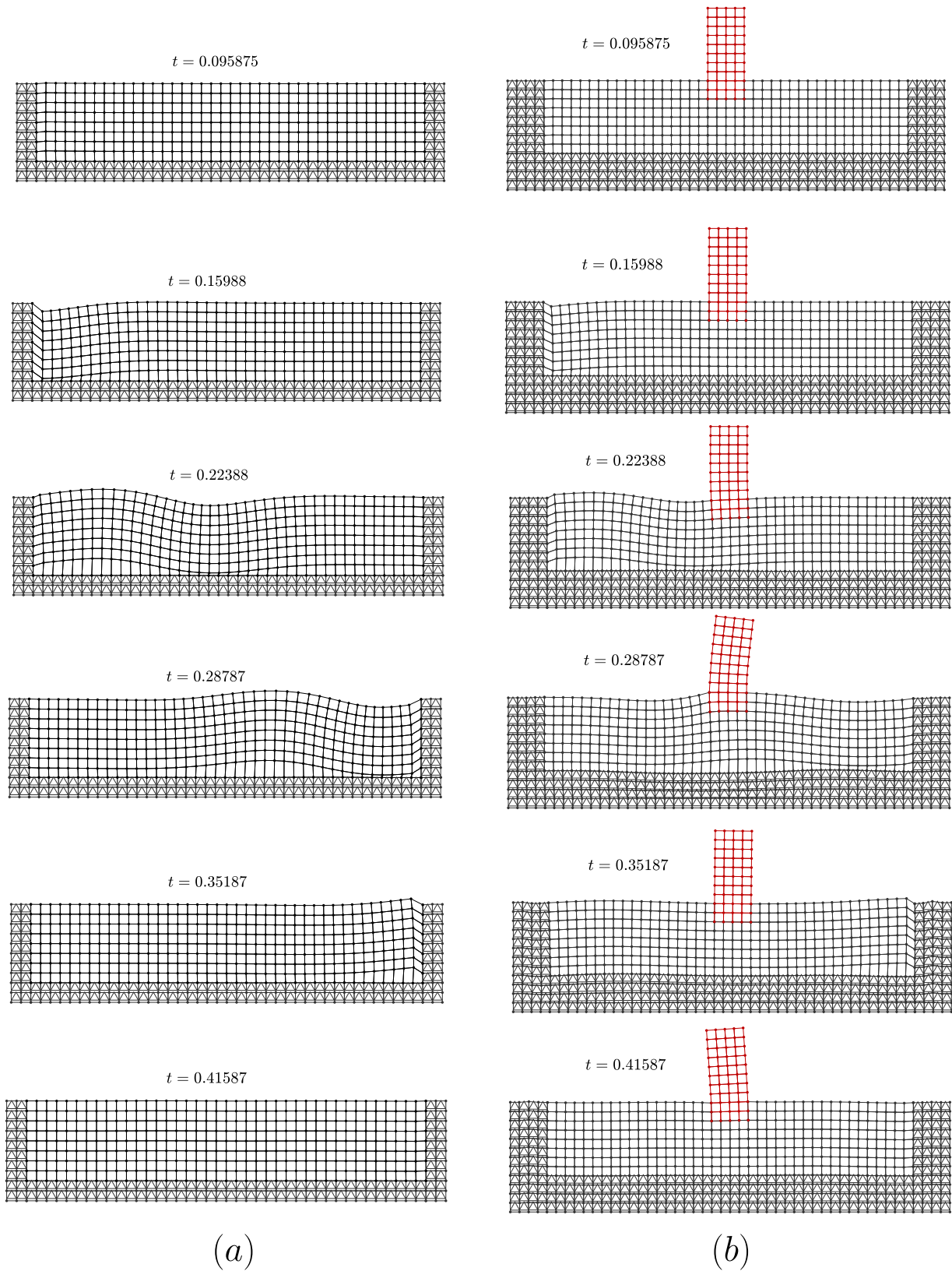


Figura 7: a) Resultados del modelo utilizado para verificar el DRM (factor de escala 400). Se muestran resultados de la modelación cada 512 pasos de tiempo constante (elemento finito de  $5m \times 5m$ ). b) Estructura masiva apoyada sobre la roca (elemento finito de  $5m \times 5m$  - factor de escala 400).

## 5. CONCLUSIONES

Se realiza una verificación del DRM comparando los resultados de modelos de elementos finitos planos con la solución analítica de la onda de Rayleigh. Los resultados demuestran que el desempeño del DRM para ingresar ondas al modelo del sitio es satisfactorio.

A través de ejemplos se explica el rol que cumplen las fuerzas efectivas del DRM y los bordes absorbentes PML. El DRM es una sub - estructuración que permite modelar el ingreso y parte de la salida de ondas que provienen desde fuera del modelo del sitio. Debido a que la presencia de la estructura produce rebotes de ondas de todo tipo, es necesaria la colocación de bordes absorbentes PML para absorber los desplazamientos relativos respecto del movimiento de campo libre.

El enfoque presentado permite modelar problemas de interacción dinámica suelo-estructura ante el paso de ondas de Rayleigh a partir del movimiento horizontal en afloramiento rocoso. En sitios alejados del epicentro la mayor parte de la energía que arriba al sitio lo hace en forma de ondas de Rayleigh. Este procedimiento permitiría verificar estructuras existentes ante el paso de este tipo de ondas y en caso de ser relevante, incorporar este estado de carga en el diseño sismo-resistente.

Cuando existen estratos de suelo sobre la roca, obtener las condiciones de borde laterales es costoso computacionalmente debido a que es necesario aplicar un modelo de elementos finitos previo. Queda pendiente investigar de qué manera se puede mejorar este procedimiento.

## REFERENCIAS

- Basu, U. y Chopra, A.K., Perfectly matched layers for time-harmonic elastodynamics of unbounded domains: theory and finite-element implementation, *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 192, 1337-1375 (2003).
- Bielak, J. Loukakis, K., Yoshiaki, H. Yoshimura, C., Domain reduction method for three-dimensional earthquake modeling in localized regions, part I: theory, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93, No.2 pp.817-824. 2003.
- Fathi, A., Poursartip, B., Kallivokas L. F. Time-domain hybrid formulations for wave simulations in three-dimensional PML-truncated heterogeneous media. *International Journal for Numerical Methods in engineering*, 10.1002/nme.4780, 2014.
- Graff K.F. Wave motion in elastic solids. *Dover Publications Inc. New York*. ISBN 0-486-66745-6, 1975.
- Kucukcoban S. y Kallivokas, L.F. A symmetric hybrid formulation for transient wave simulations in PML-truncated heterogeneous media. *Wave Motion*, 50, 57-79 (2013).
- Poursartip B. Topographic amplification of seismic motion. *Dissertation for the degree of doctor of philosophy*, The University of Texas at Austin, 2017.
- Richart F. E., Hall J.R., Woods R. D. Vibrations of soils and foundations. *Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*, 1970.
- Trono A., Brewer A.T., Pinto F., Ceballos M. A.: Bordes absorbentes de capas perfectamente acopladas mediante elementos finitos mixtos. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, Vol XXXIX, 2022.
- Trono A., Lorenzón D., Pinto F., Ceballos M. A.: Absorción de ondas elásticas mediante capas perfectamente acopladas. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, Vol XXXVIII, págs 685-694, 2021.
- Zhang, W. Esmaeilzadeh Seylabi, E., Taciroglu E., An ABAQUS toolbox for soil-structure interaction analysis. *Computer and Geotechnics*, 114, 103143 (2019).