

Capítulo 1

Presentación.

1.1 INTRODUCCIÓN.

EL PROBLEMA DE LA INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA.

En los últimos años ha habido un creciente interés, por parte de los ingenieros estructurales, en el estudio de todos los factores que determinan la respuesta de las construcciones sometidas a acciones dinámicas.

El conocimiento preciso del efecto que el suelo o terreno ejerce sobre las cimentaciones, se establece en la actualidad como uno de los capítulos abiertos de investigación y estudio de mayor interés dentro de la ingeniería mecánica y civil debido a la influencia que el diseño de éstas (bien cimentaciones de máquinas pesadas, de edificaciones...) ejerce sobre el comportamiento de todo el conjunto estructural. Todo ello repercute en el correcto diseño de las cimentaciones, de vital importancia cuando están sometidas a solicitaciones dinámicas o bien están obligadas a cumplir ciertos requisitos de seguridad (centrales nucleares), confort (edificios altos), funcionalidad (maquinaria e instalaciones de precisión), y en general, en aquellas donde sea imperativo mantener las vibraciones dentro de unos límites determinados.

Los primeros estudios sobre estructuras sometidas a cargas dinámicas estaban destinados a conocer el comportamiento de éstas frente a sismos. El carácter aleatorio de dicha excitación, así como el alto grado de incertidumbre sobre muchos aspectos relacionados con el emplazamiento (propiedades geológicas, presencia de estratos, etc...), complican de forma importante el estudio del problema. Se establece un fenómeno de relación mutua que consiste en la influencia de la cimentación, y de toda la estructura, en la solicitación final que el sismo producirá sobre la construcción, así como una influencia directa en el diseño y dimensionamiento final de nuestra estructura en función de cómo afecte el terremoto sobre la construcción.

En cuanto a la respuesta de la superestructura, los efectos de interacción suelo-estructura (SSI) en edificios han sido objeto de estudio durante más de treinta años. Los trabajos pioneros en este área, que investigaron la influencia de la flexibilidad del suelo en el comportamiento dinámico de estructuras a cortante de una sola altura, fueron presentados por Parmelee [8], Perelman et al [9], Parmelee et al [10] y Sarrazin et al [11]. A partir de estos trabajos, Veletsos y Meek [3], y Bielak [12], propusieron, por separado, aproximaciones basadas en modelos monodimensionales dirigidos a ofrecer pautas para el diseño de estructuras. Estos autores utilizaron las funciones de impedancia que estaban disponibles en aquel momento, y que correspondían a placas rígidas superficiales de forma circular. Una década más tarde, Wolf presentó una recopilación de problemas de interacción

suelo-estructura en su libro [13]. Algunos trabajos posteriores ampliaron estos estudios y analizaron la influencia del grado de embebimiento de la cimentación, y de los fenómenos de interacción cinemática (e.g. [14-17]).

Es conocida la importancia que los fenómenos de interacción suelo-estructura tienen en el comportamiento dinámico de edificios. La evaluación correcta de la respuesta dinámica de estas y otras estructuras, requiere del desarrollo de modelos que incorporen de forma rigurosa la interacción entre la estructura y el terreno en el que se cimienta. Dichos fenómenos de interacción dependen de factores tales como: el tipo de cimentación, su geometría y grado de enterramiento, el tipo de suelo y su estratigrafía así como las características de la estructura.

Los valores de las funciones de impedancia dinámica del suelo, así como los factores de interacción cinemática, se han obtenido utilizando el código que resultó de la implementación de un modelo que ya había sido desarrollado en el seno de la División de Mecánica de Medios Continuos y Estructuras del Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Este Proyecto Fin de Carrera pretende contribuir, de forma modesta, en la comprensión de la influencia de fenómenos tales como la interacción suelo-estructura, el carácter espacial de la excitación, etc... en la respuesta sísmica de la estructura. El trabajo que aquí se presenta continúa la línea marcada por investigaciones previas incorporando al modelo tridimensional, entre otras cosas, la presencia de sólidos de naturaleza poroelástica.

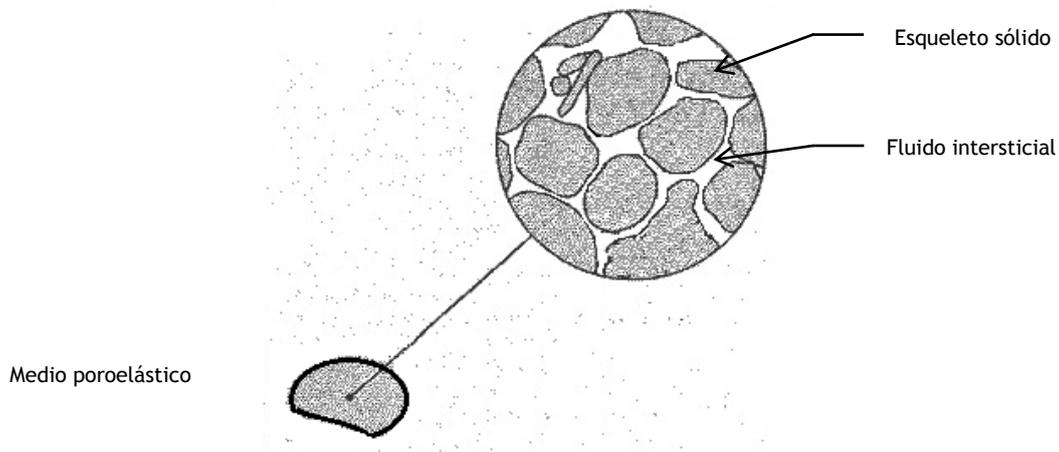


Figura 1.1 Sólido poroelástico de Biot.

La teoría que describe la propagación de ondas en un medio de estas características es bastante reciente y se debe a M.A. Biot (1956). El medio poroelástico de Biot es un material constituido por dos fases: un esqueleto sólido y un fluido que puede desplazarse a través del espacio intersticial creado por dicho esqueleto (Fig. 1.1). La teoría presenta un comportamiento acoplado de ambas fases que tiene en cuenta la disipación asociada a la viscosidad del fluido.

Existen fundamentalmente dos procedimientos de cálculo: Método directo y Método de Subestructuración o de los tres pasos. En el Método directo o de un paso, la estructura y el suelo se analizan conjuntamente. Todo el sistema se modela mediante un método directo cualquiera (MEF, MEC,...). La solución puede ser obtenida en el dominio del tiempo, procedimiento que permite tener en cuenta el comportamiento no lineal de la estructura y del suelo; o en el dominio de la

frecuencia, con el que se obtienen las funciones de transferencia para cada valor de la frecuencia de excitación mediante la resolución de un sistema de ecuaciones lineales, correspondientes a la transformada de Fourier de las ecuaciones de equilibrio

1.2 ALCANCE Y OBJETIVOS

Este proyecto tiene por objetivo, en primer lugar, abordar la formulación e implementación del Método de los Elementos de Contorno (MEC) al análisis de medios poroelásticos tridimensionales en el dominio de la frecuencia. Para ello, se hace uso de la formulación integral del problema propuesta por Domínguez (1991) en término de las variables independientes del problema. La aplicación posterior del MEC sobre esta relación integral, requiere disponer de una solución fundamental que pueda tratarse numéricamente de forma sencilla. El análisis de los términos de dicha solución fundamental y la identificación de sus componentes conflictivos, permite generalizar el procedimiento de integración, formulado previamente para el caso elástico, a este tipo de sólidos de manera simple. Los resultados obtenidos con el código de elementos de contorno presentan una elevada fiabilidad incluso en el rango de muy bajas frecuencias donde el comportamiento del medio poroso es básicamente el de un sólido elástico drenado.

En segundo lugar, se presenta un modelo del estudio aislado de cimentaciones embebidas, supuestamente rígidas y sin masa, en el sentido de obtener los desplazamiento de la cimentación, sus impedancias dinámicas (rigidez y amortiguamiento) y la respuesta de la estructura suponiéndola apoyada sobre las impedancias dinámicas, descansando todo ello sobre un semiespacio homogéneo. Gracias a un modelo que permite el acoplamiento de regiones rígidas, elásticas y poroelásticas, con un alto grado de generalidad, se aplica al estudio de la interacción suelo-estructura tridimensional, donde la excitación se presenta como un tren de ondas planas armónicas (P, SV, SH y de Rayleigh) con un ángulo de incidencia fijo. La representación integral del MEC se realiza sobre el campo difractado de forma tal que satisfaga las condiciones de radiación y solo sea necesario discretizar contornos cercanos al emplazamiento de la estructura.

La metodología seguida está basada en la técnica de subestructuración. Se consideran separadamente la estructura y el suelo. Es llamado Método de los tres pasos porque el procedimiento de análisis se basa en el cálculo sucesivo de tres problemas (figuras 1.2 a, b y c), cuyos apartados será el objetivo de este proyecto:

Paso 1. Interacción cinemática.

Determinación de los desplazamientos de la cimentación, considerada infinitamente rígida y sin masa y libre de la estructura apoyada en ella, sujeta a un tren de ondas incidentes a través del suelo, o a un movimiento del contorno provocado por la incidencia de las ondas sísmicas (sólo para el caso de estudios sísmicos). Es importante mencionar que se obtendrá una solución consistente con los resultados del método directo, generando traslaciones y rotaciones en una cimentación rígida embebida de masa despreciable.

Paso 2: Funciones de impedancia dinámica.

Las impedancias del suelo en función de la frecuencia se calculan, para una cimentación embebida, mediante procedimientos similares a los empleados en los métodos directos. El procedimiento consiste en someter a la base de la cimentación, supuesta infinitamente rígida y de masa despreciable, a rotaciones y desplazamientos armónicos estacionarios y unitarios, y determinar las reacciones correspondientes (términos de la matriz de rigidez).

Paso 3. Cálculo de la respuesta del sistema.

Una vez que el movimiento de excitación y las funciones de impedancia dinámica de la base son conocidas, el último paso se reduce a un simple análisis dinámico de un relativamente pequeño sistema de un grado de libertad. La resolución puede llevarse a cabo en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. Una solución en el dominio de la frecuencia es especialmente conveniente, dado que las impedancias son dependientes de la frecuencia.

Con todo esto, se obtendrá una solución numérica para evaluar los efectos de las cimentaciones embebidas sobre el período y amortiguamiento efectivos y la respuesta del sistema suelo-estructura. Se analiza un sistema simple similar al utilizado en la práctica para tener en cuenta los efectos de interacción inercial, incluyendo los efectos de interacción cinemática para el caso especialmente importante de ondas de transversales (de cizalla) incidiendo verticalmente. El período y amortiguamiento efectivos se obtienen estableciendo una equivalencia entre el sistema de interacción excitado por una entrada en el movimiento de la cimentación y un oscilador de reemplazo excitado por el movimiento del suelo libre. De esta manera, está permitido el uso de espectros de respuesta estándar, aplicable al período y amortiguamiento efectivos del sistema.

1.3 ESTADO DEL ARTE

El origen de los estudios de interacción suelo-estructura se remonta al segundo cuarto del siglo XX, estando basados en la concepción del suelo como medio elástico, utilizando una gran variedad de hipótesis simplificadoras, y diferentes métodos de cálculo.

Durante la primera mitad de este siglo, las cimentaciones de máquinas fueron diseñadas por medio de modelos muy simples; por ejemplo, modelos del tipo Winkler. Una revisión de estos métodos puede ser encontrada en los libros de Whitman y Richart (1967) y de Richart et al. (1970). El primer estudio de la rigidez de una cimentación representando el suelo como un semiespacio elástico y lineal, isótropo y homogéneo fue llevado a cabo por Reissner (1936). Este autor estudió la respuesta de una placa circular sobre la superficie del suelo sujeto a fuerzas verticales y horizontales armónicas, en el que se asumió una distribución uniforme de las tensiones bajo el disco. Conociendo que la distribución actual de tensiones estaba lejos de ser uniforme, en la mitad de los años 50, varios autores hicieron estudios asumiendo una cierta distribución de tensiones para cimentaciones rectangulares y circulares (Arnold et al., 1955; Bycroft, 1956). El problema de valor en el contorno mixto, con desplazamientos prescritos bajo la zapata rígida y tracciones nulas para el

resto de porción de la superficie, se estudiaron durante los 60 y los 70 (Paul, 1967; Veletsos y Wei, 1971; Luco y Westman, 1971). Fueron asumidas condiciones de contorno relajadas bajo la zapata. Varios trabajos fueron hechos usando también modelos de suelo viscoelásticos (Veletsos y Verbic, 1973).

Wong y Luco (1976) calcularon flexibilidades dinámicas (inversa de la rigidez) de cimentaciones superficiales rígidas y sin masa de forma arbitraria sobre semiespacio por división de la interfase suelo--cimentación en elementos rectangulares. Se consideró que las tracciones están uniformemente distribuidas dentro de los elementos y se obtuvo, por integración de la solución de Lamb (1904), una relación entre las tracciones sobre un elemento y los desplazamientos en la superficie del suelo. Este método es, de hecho, un método de elementos de contorno con una solución fundamental para semiespacios. No obstante, la integración de esta solución fundamental es bastante enrevesada y sólo pueden ser analizadas cimentaciones superficiales.

El análisis de la respuesta de las cimentaciones a ondas excitadoras teniendo en cuenta la interacción entre el suelo y la zapata es un problema de difracción de ondas elásticas. Esta clase de problemas para inclusiones y cavidades ha sido tratada por numerosos autores desde el principio de los años 70. La mayoría de las soluciones exactas existentes corresponden a modelos 2D antiplanos (Wong y Trifunac, 1974; Sánchez-Sesma y Rosenblueth, 1979). Wong y Luco, (1978) estudiaron la respuesta de cimentaciones superficiales 3D a ondas viajeras usando el mismo tipo de contorno antes mencionado. Usando procedimientos analíticos similares, Kobori, Minai y Shinozaki(1973) y Luco (1976a) estudiaron la respuesta torsional de estructuras axisimétricas descansando sobre la superficie ante ondas SH incidentes oblicuamente. Luco (1976b) continuó este estudio para el caso de cimentaciones semiesféricas

Se debería decir que durante los últimos 20 años, la más extendida de las técnicas numéricas para cálculo computacional de rigideces de cimentaciones ha sido el Método de los Elementos Finitos (MEF). El desarrollo de contornos absorbedores de energía para modelos 2D por Waas (1972) y problemas axisimétricos por Kausel (1974), hizo posible el análisis de cimentaciones descansando sobre, o embebidas en, suelos estratificados. Los modelos de elementos finitos, como ya hemos comentado, contienen consideraciones como la existencia de una base rígida en el fondo, o geometría de estratos paralelos extendidos hasta el infinito, que no es siempre realista. Además, los problemas dinámicos de interacción suelo–estructura 3D presentan importantes dificultades para modelos de elementos finitos debido al gran número de elementos implicados en el análisis, así como la falta de elementos infinitos del tipo a los existentes en 2D.

El Método de Elementos de Contorno es muy apropiado para problemas de interacción suelo-estructura. Regiones sin contorno son representadas con naturalidad. La radiación de ondas hacia el infinito se incluye automáticamente en el modelo, el cual se basa en una representación integral válida para regiones tanto internas como externas.

La formulación directa del MEC puede ser fácilmente aplicada para calcular rigideces dinámicas de cimentaciones. La formulación en el dominio de la frecuencia para obtener

Rigideces de cimentaciones rectangulares descansando sobre, o embebidas en, un semiespacio viscoelástico fue usada primero por Domínguez (1978a, b), Otternstreuer y Schmid (1981) y Otternstreuer (1982), siguiendo la misma aproximación para estudiar, respectivamente, rigideces dinámicas de cimentaciones y la interacción cruzada entre dos cimentaciones. Domínguez y Alarcón (1981a) investigan funciones de forma singulares en el estudio de cimentaciones rígidas. Domínguez (1981) y Domínguez y Abascal (1982) estudian el método de las imágenes aplicado al cálculo de rigideces estáticas y dinámicas de cimentaciones enterradas cuadradas tridimensionales. Así mismo, suelos no homogéneos han sido estudiados por Abascal (1984) y Abascal y Domínguez (1986). Apsel (1979) usó el MEC indirecto en combinación con funciones de Green semiexplícitas para calcular rigideces de cimentaciones circulares embebidas en un semiespacio estratificado. Rigideces dinámicas de cimentaciones circulares sobre la superficie o embebidas en suelos estratificados se han calculado usando el MEC directo por Gómez-Lera et al. (1985), Alarcón et al. (1989) y Emperador y Domínguez (1989). La respuesta sísmica de cimentaciones sobre suelos viscoelásticos no homogéneos ha sido estudiada en el dominio de la frecuencia por Domínguez y Abascal (1989). Karabalis y Beskos (1984) y Karabalis y Spyarakos (1984) calcularon rigideces dinámicas de cimentaciones superficiales excitadas por fuerzas no armónicas usando el MEC en el dominio del tiempo. También en el dominio del tiempo, Mohammadi y Karabalis (1990) estudió el uso de técnicas de discretización adaptativas y comparó condiciones de contorno “relajadas” frente a “no-relajadas”. El MEC ha sido también usado para calcular rigideces dinámicas de cimentaciones cuando existe separación suelo-estructura, por Spyarakos y Patel (1987), Hillmer y Schmid (1988), y Abascal y Domínguez (1990).

El MEC se aplicó a la difracción de ondas sísmicas por cimentaciones por Domínguez (1978b). Él estudió la respuesta de cimentaciones 3-D superficiales y embebidas frente a ondas SH, SV y P, asumiendo un suelo viscoelástico homogéneo. Spyarakos (1984) y Karabalis (1984) estudiaron la respuesta de ondas viajeras usando la formulación del MEC en el dominio del tiempo y asumiendo un suelo elástico y homogéneo. La respuesta sísmica de cimentaciones sobre suelos viscoelásticos no homogéneos ha sido estudiada en el dominio de la frecuencia por Domínguez y Abascal (1989).

Un problema de interacción suelo-estructura el cual recientemente ha recibido mucha atención es la respuesta sísmica de amortiguadores. En estos problemas, los efectos de interacción importantes tienen lugar no sólo entre el suelo y la estructura, sino también entre el agua y el suelo y entre el agua y la estructura. La teoría de la propagación de ondas en medios porosos saturados de fluido fue presentada por Biot (1956). Esta teoría, ampliamente aceptada, tiene en cuenta la compresibilidad de ambas fases, la disipación debido a la viscosidad del fluido, y el acoplamiento entre las tensiones y deformaciones del fluido. Basado en la teoría de Biot para el comportamiento dinámico de medios poroelásticos, Halpern (1982) y Halpern y Christiano (1986) fueron los primeros en obtener coeficientes de flexibilidad

(inversa de la rigidez) de cimentaciones superficiales tridimensionales rígidas sobre un semiespacio poroelástico. Integraron las funciones de Green sobre elementos en los que se dividía la interfase cimentación-terreno. Halpern y Christiano (1986) presentaron la flexibilidad vertical y de cabeceo para cimentaciones superficiales cuadradas. Kassir y Xu (1988) llevaron a cabo un estudio similar para problemas bidimensionales sobre semiespacio poroelástico. Trabajando con una configuración en dos dimensiones y asumiendo una densidad añadida de cero, obtuvieron expresiones de las funciones de Green en forma integral que resolvieron numéricamente. Los coeficientes de la matriz de rigidez fueron calculados por integración de las funciones de Green. En este estudio, Kassir y Xu asumieron una distribución de las tensiones de contacto con una variación como la raíz cuadrada de la distancia a los extremos. Sin embargo, esta aproximación se limita sólo a cimentaciones superficiales sobre semiespacio homogéneo.

Posteriormente, Bougacha et al. (1993a,b) obtuvo las rigideces dinámicas para cimentaciones superficiales y circulares en 2D sobre estrato poroelástico utilizando una aproximación del método de los elementos finitos (MEF), basado en el uso de modos de vibración semidiscretos espacialmente. La técnica está basada en un trabajo anterior de Tassoulas y Kausel (1933). La técnica presentada por Bougacha et al. (1993a,b) para medios poroelásticos representa un considerable avance, pero sin embargo, se limita sólo a cimentaciones superficiales sobre estrato horizontal que se apoya en una base rígida que se extiende hasta el infinito. La consideración de una densidad añadida de valor cero también se incluye en esta formulación. En lo que se refiere al MEC, usando una formulación de elementos de contorno en el dominio de Laplace, Chen y Dargush (1995), Chopra y Dargush (1995) y Dargush y Chopra (1996) obtuvieron también algunas funciones de impedancia para cimentaciones rígidas tridimensionales sobre suelos poroelásticos.

Posteriormente, Japón et al. (1997) presentaron un modelo bidimensional de elementos de contorno para el cálculo de rigideces dinámicas de cimentaciones sobre medio poroelástico. Esta técnica está basada en la formulación de elementos de contorno para medios poroelásticos obtenida por Domínguez (1991, 1992, 1993) y Cheng et al. (1991) después de desarrollar una formulación en ecuaciones integrales a partir de las ecuaciones diferenciales de Biot. El suelo bajo la cimentación podía estar compuesto de zonas viscoelásticas y poroelásticas, estando la interacción entre ellas rigurosamente representadas. Las condiciones de contacto entre la cimentación y el suelo debían ser de un tipo concreto (en lo referente al fluido, permeables o impermeables; en lo referente al esqueleto sólido, soldadas o relajadas). Aunque los resultados obtenidos son sólo para cimentaciones superficiales sobre semiespacio o sobre estrato apoyado sobre base de rigideces diferentes, la técnica es muy versátil y el análisis de cimentaciones embebidas y geometrías más complicadas sólo requerían una diferente malla de elementos de contorno. El modelo para medios poroelásticos incluye todos los términos de las ecuaciones de Biot (coeficiente de disipación, densidad añadida, etc.). La misma técnica se amplió para incluir regiones de agua y han sido usadas para el análisis de respuesta sísmica en presas de hormigón, teniendo en cuenta los efectos de sedimentos porosos en Domínguez et al. (1997).

Más recientemente, haciendo uso de esta formulación, aparecen una serie de artículos tratando de dar continuación a los trabajos anteriores. Así, Aznárez et al. (1999) sigue estudiando rigideces dinámicas (vertical, horizontal y cabeceo) todavía de cimentaciones superficiales, pero utilizando un modelos tridimensional. Por otra parte, Maeso et al. (1999), ya se enfrenta al casi de cimentaciones embebidas, para las cuales calculará la impedancia vertical, utilizando el mismo modelo que Aznárez.

El MEC está basado en formulaciones integrales de las teorías de elasticidad y potencial, las cuales aparecen al final del siglo XIX y comienzo del XX, más de cincuenta años antes de que la formulación diferencial de estos problemas hubiera sido establecida. El primer trabajo riguroso sobre ecuaciones integrales fue publicado por Fredholm (1905). Previamente, Somigliana (1889) había publicado una representación en ecuaciones integrales para elastoestática. Sesenta años más y, lo que es más importante, la aparición de los modernos computadores digitales, fueron necesarios para desarrollar métodos numéricos basados en la formulación de estos estudios clásicos.

El punto de inicio para la formulación directa del MEC puede ser fijado en tres artículos de Jaswon (1963), Symm (1963) y Jaswon y Ponter (1963) para problemas estáticos de potencial, y en el artículo de Rizzo (1967) para elastoestática. En estos artículos tanto la discretización del contorno, como el establecimiento de la solución numérica de la ecuación integral, transformándola en un sistema de ecuaciones algebraico, fueron realizadas por primera vez. Los trabajos de Lachat (1975) y Lachat y Watson (1916) significaron el siguiente avance importante en el desarrollo del MEC como técnica numérica consistente. Ellos incorporaron al MEC las funciones de forma, largamente usadas ya en el MEF, como una forma sistemática de representación de las variables en el contorno. El término Método de los Elementos de Contorno fue utilizado por primera vez en 1977. Apareció en al menos tres publicaciones que salieron a la luz ese año: el Ph. D. Tesis de Domínguez (1977) donde por primera vez el nombre apareció en español, un artículo de Banerjee y Butterfield (1977), el cual es parte de un libro basado en comunicaciones de una conferencia previa, y un artículo de Brebbia y Domínguez (1977), donde ellos relacionan el MEC con otras técnicas numéricas introduciendo una profunda interpretación residual. Existe alguna controversia con respecto a quien usó por primera vez el término o el acrónimo MEC. No es posible verificar cuál de las publicaciones anteriores se escribió primero, pero se puede asegurar que todas las personas involucradas en los mencionados escritos hablaron amigablemente del método y su nombre en Inglaterra al comienzo del año 1977 (Butterfield era profesor, Brebbia y Banerjee eran lectores, y Domínguez, era "persona invitada" finalizando su tesis doctoral). Más información sobre el MEC para elastoestática y problemas de potencial se pueden encontrar en los libros de Banerjee y Butterfield (1981), Brebbia et al (1984), Beskos (1937a, 1988), Brebbia y Domínguez (1989) y Hartman (1989).

El desarrollo del MEC en dinámica fue independiente de los antes mencionados trabajos de Jaswon, Ponter, Symm y Rizzo sobre la formulación directa del Método. Friendman y Shaw (1962) y Banaugh y Goldsmith (1963a, b) establecieron la primera solución numérica para problemas acústicos y elastodinámicos usando una formulación en ecuaciones integrales. Mucho de los ingredientes básicos del MEC

estaban plasmados en estos artículos antes o al mismo tiempo que los pioneros publicados por Jaswon en estática. Fue en 1968 cuando Cruse y Rizzo (1968) y Cruse (1968) derivaron el MEC directo en conjunción con la transformada de Laplace para resolver problemas transitorios elastodinámicos. El mismo año Wheeler y Sternberg (1968) establecieron las últimas bases teóricas del MEC en elastodinámica, en particular en esos aspectos relacionados a dominios infinitos. Años después, Manolis y Beskos (1981) mejoraron el Método de Cruse y Rizzo para problemas transitorios elastodinámicos en combinación con la transformada de Laplace.

La solución de problemas transitorios por medio de la transformada de Fourier y la formulación del MEC en el dominio de la frecuencia, fue obtenida por Niwa et al. (1975,1976). Domínguez (1978a, b) por primera vez estudió problemas dinámicos de interacción suelo-estructura usando la formulación del MEC en el dominio de la frecuencia.

La primera formulación general en el dominio del tiempo para elastodinámica en dos dimensiones fue presentada por Cole (1978); sin embargo, solo los casos antiplano y escalar fueron tratados en este escrito. Mansur (1983) y Mansur Y Brebbia (1982a, b, 1983, 1985) presentaron la formulación general en el dominio del tiempo y estudiaron en detalle la implementación para problemas de propagación de ondas escalares y elásticas en dos dimensiones. Antes (1985) completó el trabajo de Mansur incluyendo condiciones iniciales no nulas. Spyarakos (1984) y Spyarakos y Beskos (1986) presentaron una formulación diferente para problemas bidimensionales en el dominio del tiempo; sin embargo, como mostraron Gallego y Domínguez (1990) este es sólo un caso particular del anterior. Niwa et al, (1980) usó una formulación tridimensional para derivar un MEC en el dominio del tiempo para el análisis de problemas de deformación plana. Una aproximación similar fue usada por Manolis (1983) en un artículo en donde comparó el dominio del tiempo, el dominio de la frecuencia y las aproximaciones de la transformada de Laplace para la solución de problemas planos. La formulación en el dominio del tiempo y la implementación para elastodinámica en tres dimensiones fue estudiada por Karabalis y Beskos (1984), Karabalis et al. (1984) y Karabalis y Beskos (1985). Aplicaciones a problemas dinámicos de interacción suelo-estructura fueron presentadas en estos artículos. Nardini y Brebbia (1983, 1985) derivaron una aproximación en elementos de contorno para problemas dinámicos donde eran obtenidas una matriz de masa y una matriz de rigidez, utilizando la formulación estática. En lo que se llama aproximación de Reciprocidad Dual el sistema resultante de ecuaciones de equilibrio dinámicas se resuelve como en el MEF.

Hay algunos importantes campos de la dinámica continua donde el MEC ha tenido un destacado desarrollo debido a su aplicabilidad a ciertos tipos de problemas. Entre estos campos cabe mencionar como más característicos, la interacción dinámica suelo-estructura y fracturas dinámicas.

Información más amplia sobre el MEC para problemas dinámicos se puede encontrar en otros artículos como Domínguez y Alarcón (1981b), Geers (1983), Kobayashi (1987), Banerjee et al. (1987), Karabalis y Beskos (1987), Dominguez y Abascal (1987), Dravinsky (1988), Tassoulas (1988) y Domínguez (1993). Especial atención se debería prestar a los escritos de Beskos (1987b) y el libro de Manolis y Beskos (1988).

Tabla de contenido

Capítulo 1	1
Presentación.	1
1.1 INTRODUCCIÓN.	1
EL PROBLEMA DE LA INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA.	1
1.2 ALCANCE Y OBJETIVOS.....	3
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	4