

# **DETERMINACIÓN DE INTEGRIDAD EN PILOTES CON CABEZAL HORMIGONADOS IN-SITU**

por

**MATÍAS FERNÁNDEZ HURST**  
Ingeniero Civil

Tesis presentada como requisito parcial para acceder al grado académico de  
**MAGISTER EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**  
de la  
Universidad Nacional de Tucumán

Director: Mg. Ing. Oscar Dip  
Director Asociado: Mg. Ing. José Rodolfo Barlek

Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología  
Universidad Nacional de Tucumán

San Miguel de Tucumán

**Agosto de 2016**

## RESUMEN

Debido a los crecientes requerimientos constructivos y a los avances tecnológicos alcanzados, la utilización de ensayos no destructivos para efectuar el control de calidad de fundaciones profundas ha logrado una amplia aceptación durante los últimos años. En particular, los métodos de bajas deformaciones (eco sónico y respuesta impulsiva) han sido ampliamente utilizados para comprobar la longitud y detectar defectos en pilotes hormigonados in-situ (por ejemplo, estrechamientos de la sección transversal, agrietamiento, vacíos, sectores con material de mala calidad, etc.) y, en menor medida, en elementos prefabricados e hincados.

En general, las pruebas de integridad se llevan a cabo sobre pilotes aislados. Sin embargo, los estudios para rehabilitación de construcciones antiguas requieren la estimación de las características de fundaciones en servicio, en las que la presencia de un cabezal u otra estructura hace que la cabeza de los pilotes se encuentre inaccesible e introduce incertidumbres en la interpretación de los resultados.

El objetivo de esta tesis es estudiar experimental y numéricamente la factibilidad de los métodos antes mencionados para evaluar la longitud y la integridad de pilotes perforados de hormigón armado, vinculados mediante una estructura superior a modo de cabezal. Para ello, se planificó una serie de ensayos sobre un grupo de pilotes construidos a tal fin, de modo que la geometría y dimensiones fueran conocidas con la mayor exactitud posible. A algunos de los mismos se le incorporaron diferentes defectos. Se realizó la medición de aceleraciones en la cabeza y sobre el cabezal, a partir de la sollicitación provocada por una carga impulsiva.

Se desarrolló un modelo numérico apropiado para simular el problema en cuestión, el cual presentó varias ventajas respecto de los comúnmente adoptados en la bibliografía sobre el tema. El mismo permitió representar adecuadamente al sistema, lo cual posibilitó realizar algunas predicciones que luego fueron verificadas en los estudios de campo. Se obtuvieron resultados satisfactorios a partir de los ensayos de integridad llevados a cabo sobre la estructura completa, especialmente en lo que se refiere a estimación de la longitud total de los pilotes, incluso en proximidades del límite superior de esbeltez recomendado en la bibliografía para dichos métodos.

## ABSTRACT

Nondestructive evaluation techniques have gained wide acceptance in recent years to carry out quality control of deep foundations, due to the combination of construction requirements and technological advances. In particular, small strain methods (sonic echo and impulse response) have been extensively used to check lengths and detect flaws in drilled shafts (e.g. necking, cracking, void, poor quality material, etc.) and, to a lesser extent, to driven concrete piles.

Integrity testing is commonly performed on isolated piles. Nowadays, the need to estimate the conditions of in-service foundations has arisen as a result of rehabilitation studies of old buildings. When evaluating existing foundations, the presence of a pile cap or other structure makes the pile heads inaccessible and introduces uncertainties in the interpretation of results.

The purpose of this thesis is thus to study experimental and numerically the ability of the aforementioned methods in evaluating the length and integrity of cast in place concrete piles under inaccessible-head conditions. To accomplish this goal, a series of tests was planned. Construction of the shafts was closely monitored so that the geometry and dimensions of the piles could be known with as much accuracy as possible. Simulated defects were incorporated to some of them. Acceleration caused by impulsive load was recorded, before and after the construction of a pile cap.

An appropriate numerical model was developed for the problem in study. The model presented several advantages over those commonly adopted in the literature on the subject. It allowed to represent adequately the system and make some predictions that were later verified in field studies. Satisfactory results were obtained from integrity tests carried out on the entire structure, particularly regarding the estimation of the overall length of the piles, even near the upper limit of slenderness recommended in the literature for such methods.

## AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todas las personas que, de alguna u otra manera, colaboraron e hicieron posible el desarrollo de mi formación a nivel de posgrado a través de la Maestría en Ingeniería Estructural.

En primer lugar a la Dra. Bibiana Luccioni, Directora Académica de la carrera, por brindarme la oportunidad y por su absoluta predisposición frente a cualquier inconveniente o consulta. Me siento un afortunado de haber podido conocerla y aprender, más allá de cuestiones académicas, su forma de trabajar y manejarse dentro de una institución.

A los docentes de la Universidad Nacional de Tucumán involucrados en los cursos, por su dedicación para abordar un conjunto de temas de un nivel académico elevado y por su disponibilidad y paciencia al momento de despejar cualquier duda.

A mi Director, el Ing. Oscar Dip, por acompañarme y orientarme durante todo el desarrollo de mi tesis, facilitándome las herramientas y transmitiéndome los conocimientos indispensables para llevar a cabo la investigación. Me siento en la obligación de resaltar su buena disposición y presencia incondicional al momento de confeccionar la estructura de estudio. Su participación resultó fundamental, desde la logística hasta la materialización en concreto de la misma. Asimismo, su ayuda al momento de realizar los ensayos, a partir de su vasta experiencia en el tema, fue de mucha importancia para lograr entender y analizar correctamente el fenómeno. Simplemente palabras de agradecimiento para con su persona por la responsabilidad y entusiasmo con que se manejó.

A mi Co-Director, el Ing. José Rodolfo Barlek, como Director del Proyecto CIUNT: “Evaluación y Rehabilitación de Puntos”, dentro del cual se enmarca el presente tema de tesis, a través del cual se solventó una gran parte de los gastos asociados al trabajo de investigación realizado.

Al Director del Instituto de Estructuras, el Ing. Enrique Galíndez, porque el apoyo económico y técnico recibido resultó imprescindible para que pudiera culminar mis estudios. A través de los servicios a terceros me han otorgado una beca de ayuda económica durante toda mi estadía en la ciudad y han colaborado para solventar el costo de los materiales involucrados en el proceso constructivo.

La construcción de los pilotes también merece un agradecimiento muy especial. La misma no hubiera sido posible sin la invaluable colaboración del Ing. Alberto Pascual y la empresa PERFOSUELO, quienes pusieron a disposición su herramienta de trabajo para que se pudieran realizar las excavaciones y me brindaron el asesoramiento técnico necesario. En este sentido también una mención especial a Felipe Ortega, técnico de PERFOSUELO, por su trabajo incansable y colaboración durante la excavación y hormigonado de los elementos estructurales. Realmente ha sido un placer haber podido trabajar con una persona tan experimentada en la práctica de obra.

Al personal no docente y profesionales de apoyo del Laboratorio de Estructuras. Entre ellos a Daniel Torielli y Javier Batalla por su cooperación en los trabajos complementarios y ensayos experimentales durante el desarrollo de la tesis. Vale recalcar su buen humor y predisposición para conmigo. Por otra parte también a la Srta. Amelia Campos, por la ayuda brindada en los trámites burocráticos y la disponibilidad ante cualquier consulta. Finalmente al Ing. Sergio Contino, quien contribuyó mediante la puesta a punto del instrumental de medición.

Al Laboratorio de Materiales de la FACET-UNT, por facilitarme los recursos técnicos y académicos que resultaron de mucha importancia para la campaña experimental.

Otro agradecimiento especial, por aportar parte de su conocimiento y su tiempo durante la realización de los ensayos complementarios, es para el Dr. Ing. Andrés Isla Calderón.

A la Comisión de Supervisión, por el tiempo y la dedicación con que respondieron a todas las inquietudes que se me plantearon durante mi trabajo.

Al Dr. Ing. Ricardo Schiava, Director del Proyecto de Investigación: “Estudio del Comportamiento de Materiales y Estructuras con Énfasis en Problemas Locales con Materiales”, dentro del Instituto de Materiales, Estructuras y Construcciones de la Universidad Nacional de Santiago del Estero, por su contribución desinteresada y plena confianza al prestar el equipo PILETEST empleado para complementar y enriquecer los ensayos experimentales.

A mis compañeros de la XIV Maestría: los Ings. Agustín Demagistri, Marcos Gerez Albornoz, Fabián Fiengo Pérez y José Luis Álvarez. A todos ellos quiero expresar mi más genuino agradecimiento por haberse puesto a disposición para realizar la construcción de la estructura que resultó esencial en mi trabajo de tesis. Sinceramente estoy convencido de que sin su ayuda eso no hubiera sido posible. Asimismo, les agradezco por haber contado con su compañía durante estos dos años, no solo en los cursos y largas horas compartidas en la oficina, sino también por los encuentros fuera del ámbito académico y por su disponibilidad cuando solicité cualquier tipo de ayuda.

Al resto de los colegas del Instituto de Estructuras, por recibirme de la mejor manera y haberme hecho sentir parte de la institución. Muchas gracias por todos los momentos compartidos.

Finalmente quiero agradecer a mi familia y amigos de toda la vida. Esta nueva etapa no ha resultado para nada sencilla, siendo un cambio brusco el salir del lugar en el que había vivido siempre y encontrarme con una realidad distinta, lejos de mis afectos. Sentir su presencia y contar con su apoyo me dio la fuerza necesaria para no flaquear en los momentos difíciles y seguir adelante, enfocándome en el objetivo principal de culminar mis estudios.

# ÍNDICE

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Definición del problema .....	1
1.2. Objetivo .....	2
1.3. Metodología.....	2
1.4. Hipótesis.....	3
1.5. Contenido de la tesis.....	3
Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE .....	5
2.1. Antecedentes.....	5
2.2. Métodos de ensayo de integridad estructural .....	6
2.2.1. Método sísmico “cross-hole” .....	7
2.2.2. Método sísmico “single-hole” .....	10
2.2.3. Método sísmico paralelo.....	10
2.2.4. Métodos de bajas deformaciones.....	12
2.2.5. Método de altas deformaciones .....	16
2.2.6. Método térmico.....	17
2.3. Comentarios finales .....	21
Capítulo 3: MODELACIÓN NUMÉRICA.....	23
3.1. Definición del problema .....	23
3.2. Geometría .....	23
3.3. Condición de carga .....	24
3.4. Propiedades de los materiales.....	25
3.5. Modelos numéricos para pilotes aislados .....	26
3.5.1. Modelo unidimensional .....	26
3.5.2. Modelo bidimensional .....	27
3.5.3. Modelo tridimensional.....	28
3.6. Resolución de las ecuaciones de movimiento .....	30
3.7. Análisis de la respuesta .....	31
3.7.1. Análisis en el dominio del tiempo .....	31
3.7.2. Análisis en el dominio de la frecuencia.....	32
3.8. Pilotes aislados .....	33

---

3.8.1. Casos de análisis .....	33
3.8.2. Comparación de resultados .....	37
3.9. Pilotes con cabezal .....	55
3.9.1. Modelo numérico .....	55
3.9.2. Análisis de resultados .....	57
Capítulo 4: ANÁLISIS EXPERIMENTAL .....	62
4.1. Introducción.....	62
4.2. Descripción.....	62
4.3. Resultados de ensayos experimentales complementarios .....	64
4.4. Prueba de carga.....	64
4.5. Ensayos de integridad.....	66
4.5.1. Equipamiento e instrumental .....	66
4.5.2. Procedimiento de ensayo .....	68
4.5.3. Resultados obtenidos .....	69
Capítulo 5: COMPARACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL .....	84
5.1. Introducción.....	84
5.2. Pilotes aislados .....	85
5.3. Pilotes con cabezal .....	87
Capítulo 6: CONCLUSIONES.....	89
6.1. Modelos numéricos .....	89
6.2. Ensayos experimentales.....	90
6.3. Desarrollos futuros .....	92
Anexo A: PROCESO CONSTRUCTIVO .....	93
A.1. Pilotes individuales.....	93
A.1.1. Preparativos.....	93
A.1.2. Excavación.....	96
A.1.3. Hormigonado .....	98
A.2. Cabezal .....	102
A.2.1. Preparativos.....	102
A.2.2. Excavación.....	103
A.2.3. Hormigonado .....	105
Anexo B: ENSAYOS EXPERIMENTALES COMPLEMENTARIOS .....	109
B.1. Ensayos de compresión y módulo de elasticidad.....	109

B.2. Determinación de la densidad del hormigón .....	117
B.3. Ensayo de ultrasonido .....	118
B.4. Prueba de carga.....	119
REFERENCIAS .....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Equipamiento necesario .....	7
<b>Figura 2.2:</b> Ensayo mediante el método ultrasónico “cross-hole”. (a) Transmisor y receptor ubicados a diferentes profundidades. (b) Vista en planta de la posición de los tubos y las posibles combinaciones (Paikowsky y Chernauskas, 2003) .....	8
<b>Figura 2.3:</b> Registros típicos de un ensayo (Sellountou y Alvarez, 2013).....	9
<b>Figura 2.4:</b> Gráfico de tomografía mostrando los defectos (Sellountou y Alvarez, 2013).....	9
<b>Figura 2.5:</b> Método ultrasónico “single-hole” (Paikowsky y Chernauskas, 2003).....	10
<b>Figura 2.6:</b> Ensayo sísmico paralelo. (a) Martillo instrumentado y receptor a diferentes profundidades. (b) Señal registrada en cada posición (Paikowsky y Chernauskas, 2003) .....	11
<b>Figura 2.7:</b> Típico gráfico del arribo de la onda con la profundidad (Huang y Ni, 2012).....	12
<b>Figura 2.8:</b> Esquema del instrumental necesario para la realización del ensayo (Paikowsky y Chernauskas, 2003) .....	13
<b>Figura 2.9:</b> Propagación y reflexiones de la onda en función del tiempo y la profundidad (Paikowsky y Chernauskas, 2003) .....	14
<b>Figura 2.10:</b> Gráfico de movilidad de un ensayo realizado con el método de respuesta impulsiva (Paikowsky y Chernauskas, 2003) .....	15
<b>Figura 2.11:</b> Esquema de un ensayo con el método de altas deformaciones (Paikowsky y Chernauskas, 2003) .....	17
<b>Figura 2.12:</b> Sonda térmica (izquierda) y equipamiento para el ensayo (derecha).....	18
<b>Figura 2.13:</b> Cables térmicos anclados a la armadura (izquierda) y unidades de recolección de datos conectadas a los cables (derecha) .....	18
<b>Figura 2.14:</b> Caída de temperatura debido a la presencia de un defecto (Sellountou y Alvarez, 2013).....	19
<b>Figura 2.15:</b> Diferencia de temperatura entre dos cables diametralmente opuestos debido a una armadura descentrada (Sellountou y Alvarez, 2013) .....	20
<b>Figura 2.16:</b> Salidas obtenidas con el método: gráfica del radio con la profundidad (izquierda) y vista 3D (derecha) (Sellountou y Alvarez, 2013).....	21
<b>Figura 3.1:</b> Geometría de pilote con reducción simétrica de la sección (Liao y Roesset, 1997)	24
<b>Figura 3.2:</b> Impacto sinusoidal de medio ciclo de duración (Liao y Roesset, 1997).....	24
<b>Figura 3.3:</b> Modelo de elementos finitos unidimensional (Ezeberry, 2003).....	27
<b>Figura 3.4:</b> Elemento finito sólido axisimétrico (Manual SAP2000, 2010) .....	28
<b>Figura 3.5:</b> Modelo de elementos finitos axisimétrico (Liao y Roesset, 1997) .....	28
<b>Figura 3.6:</b> Elemento finito sólido tridimensional (Manual SAP2000, 2010).....	29
<b>Figura 3.7:</b> Mallado para región circular (Manual SAP2000, 2010) .....	29
<b>Figura 3.8:</b> Espectro de desplazamientos de un pilote (Liao y Roesset, 1997) .....	32

<b>Figura 3.9:</b> Gráfico de movilidad (Liao y Roesset, 1997) .....	33
<b>Figura 3.10:</b> Modelo de elementos finitos unidimensional.....	34
<b>Figura 3.11:</b> Modelo de elementos finitos axisimétrico (intacto y defectuoso).....	35
<b>Figura 3.12:</b> Análisis de convergencia.....	36
<b>Figura 3.13:</b> Modelo de elementos finitos tridimensional propuesto .....	36
<b>Figura 3.14:</b> Defectos simétrico y asimétrico modelados .....	37
<b>Figura 3.15:</b> Gráficos de aceleración - Pilote intacto.....	38
<b>Figura 3.16:</b> Gráficos de velocidad - Pilote intacto .....	38
<b>Figura 3.17:</b> Gráficos de desplazamiento - Pilote intacto .....	39
<b>Figura 3.18:</b> Gráficos de aceleración filtrados - Pilote intacto .....	40
<b>Figura 3.19:</b> Gráficos de velocidad filtrados - Pilote intacto .....	40
<b>Figura 3.20:</b> Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilote intacto.....	41
<b>Figura 3.21:</b> Gráficos de aceleración filtrados y amplificados - Pilote intacto.....	43
<b>Figura 3.22:</b> Espectros de aceleración - Pilote intacto .....	43
<b>Figura 3.23:</b> Espectros de velocidad - Pilote intacto.....	44
<b>Figura 3.24:</b> Espectros de desplazamiento - Pilote intacto .....	44
<b>Figura 3.25:</b> Espectro de la carga.....	45
<b>Figura 3.26:</b> Gráficos de movilidad - Pilote intacto.....	45
<b>Figura 3.27:</b> Gráficos de aceleración filtrados - Pilote con defecto simétrico.....	47
<b>Figura 3.28:</b> Gráficos de velocidad filtrados - Pilote con defecto simétrico .....	47
<b>Figura 3.29:</b> Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilote con defecto simétrico .....	48
<b>Figura 3.30:</b> Espectros de aceleración - Pilote con defecto simétrico .....	49
<b>Figura 3.31:</b> Espectros de velocidad - Pilote con defecto simétrico .....	50
<b>Figura 3.32:</b> Espectros de desplazamiento - Pilote con defecto simétrico.....	50
<b>Figura 3.33:</b> Gráficos de movilidad - Pilote con defecto simétrico .....	51
<b>Figura 3.34:</b> Gráficos de aceleración filtrados - Pilote con defecto asimétrico .....	52
<b>Figura 3.35:</b> Gráficos de velocidad filtrados - Pilote con defecto asimétrico.....	53
<b>Figura 3.36:</b> Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilote con defecto asimétrico .....	53
<b>Figura 3.37:</b> Gráficos de movilidad - Pilote con defecto asimétrico .....	54
<b>Figura 3.38:</b> Mallado realizado para el cabezal .....	55
<b>Figura 3.39:</b> Modelo de elementos finitos de la estructura analizada.....	56
<b>Figura 3.40:</b> Detalle del cabezal y puntos de aplicación de la cargas.....	56
<b>Figura 3.41:</b> Gráficos de aceleración filtrados - Pilotes con cabezal.....	57
<b>Figura 3.42:</b> Gráficos de velocidad filtrados - Pilotes con cabezal.....	58
<b>Figura 3.43:</b> Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilotes con cabezal .....	59
<b>Figura 3.44:</b> Espectros de aceleración - Pilotes con cabezal .....	60

<b>Figura 3.45:</b> Espectros de velocidad - Pilotes con cabezal .....	60
<b>Figura 3.46:</b> Espectros de desplazamiento - Pilotes con cabezal.....	61
<b>Figura 3.47:</b> Gráficos de movilidad - Pilotes con cabezal .....	61
<b>Figura 4.1:</b> Geometría y disposición de los pilotes y sus defectos .....	63
<b>Figura 4.2:</b> Geometría y armadura del cabezal .....	64
<b>Figura 4.3:</b> Prueba de carga .....	65
<b>Figura 4.4:</b> Registros atenuados de los potenciómetros de 50 mm.....	65
<b>Figura 4.5:</b> Martillos utilizados.....	66
<b>Figura 4.6:</b> Acelerómetro (izquierda), amplificador (centro) y placa de adquisición de datos (derecha).....	67
<b>Figura 4.7:</b> Equipo PILETEST .....	68
<b>Figura 4.8:</b> Realización de los ensayos de integridad.....	69
<b>Figura 4.9:</b> Pruebas con el equipo PILETEST .....	69
<b>Figura 4.10:</b> Pilote N°1 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°1 - Gráficos de aceleración.....	70
<b>Figura 4.11:</b> Pilote N°1 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°1 - Registro y espectro de la carga .....	71
<b>Figura 4.12:</b> Pilote N°1 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°1 - Gráfico de movilidad.....	71
<b>Figura 4.13:</b> Pilote N°2 aislado, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°4 - Gráficos de aceleración.....	72
<b>Figura 4.14:</b> Pilote N°2 aislado, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°4 - Gráfico de velocidad .....	72
<b>Figura 4.15:</b> Pilote N°2 aislado, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°4 - Espectro de aceleración.....	73
<b>Figura 4.16:</b> Pilote N°3 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°4 - Gráficos de aceleración.....	73
<b>Figura 4.17:</b> Pilote N°1 aislado, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad .....	74
<b>Figura 4.18:</b> Pilote N°2 aislado, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad .....	74
<b>Figura 4.19:</b> Pilote N°3 aislado, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad .....	75
<b>Figura 4.20:</b> Pilote N°1 con cabezal, martillo no instrumentado, serie N°1, golpe N°2 - Gráficos de aceleración.....	75
<b>Figura 4.21:</b> Pilote N°2 con cabezal, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°1 - Gráficos de aceleración.....	76
<b>Figura 4.22:</b> Pilote N°2 con cabezal, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°1 - Gráfico de velocidad.....	76
<b>Figura 4.23:</b> Pilote N°3 con cabezal, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°4 - Gráficos de aceleración.....	77
<b>Figura 4.24:</b> Pilote N°1 con cabezal, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.....	77
<b>Figura 4.25:</b> Pilote N°2 con cabezal, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.....	78

<b>Figura 4.26:</b> Pilote N°3 con cabezal, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.....	78
<b>Figura 5.1:</b> Pilote N°1 aislado, serie N°1, golpe N°1 (izquierda), pilote N°2 aislado, serie N°1, golpe N°4 (centro) y pilote N°3 aislado, serie N°1, golpe N°4 (derecha) - Registros de la carga .	85
<b>Figura 5.2:</b> Pilote N°1 aislado - Comparación numérico-experimental.....	85
<b>Figura 5.3:</b> Pilote N°2 aislado - Comparación numérico-experimental.....	86
<b>Figura 5.4:</b> Pilote N°3 aislado - Comparación numérico-experimental.....	86
<b>Figura 5.5:</b> Pilote N°1 con cabezal, serie N°1, golpe N°2 (izquierda), pilote N°2 con cabezal, serie N°1, golpe N°2 (centro) y pilote N°3 con cabezal, serie N°1, golpe N°4 (derecha) - Registros de la carga.....	87
<b>Figura 5.6:</b> Pilote N°1 con cabezal - Comparación numérico-experimental.....	87
<b>Figura 5.7:</b> Pilote N°2 con cabezal - Comparación numérico-experimental.....	88
<b>Figura 5.8:</b> Pilote N°3 con cabezal - Comparación numérico-experimental.....	88
<b>Figura A.1:</b> Confección de las armaduras.....	93
<b>Figura A.2:</b> Estructura de contención .....	94
<b>Figura A.3:</b> Colocación del poliuretano expandido .....	94
<b>Figura A.4:</b> Materialización de los defectos .....	94
<b>Figura A.5:</b> Armaduras con y sin defectos.....	95
<b>Figura A.6:</b> Cañerías y embudo para el hormigonado .....	95
<b>Figura A.7:</b> Varillas roscadas con sus anclajes.....	96
<b>Figura A.8:</b> Máquina pilotera utilizada.....	97
<b>Figura A.9:</b> Retiro y limpieza del helicoides.....	97
<b>Figura A.10:</b> Descenso y empalme de las armaduras .....	98
<b>Figura A.11:</b> Excavaciones finalizadas y armaduras ubicadas en posición.....	98
<b>Figura A.12:</b> Descenso de la cañería y ubicación del embudo .....	99
<b>Figura A.13:</b> Vertido de los materiales dentro de la hormigonera.....	100
<b>Figura A.14:</b> Vertido del hormigón dentro de la cañería .....	100
<b>Figura A.15:</b> Fin del hormigonado y colocación de las varillas roscadas .....	100
<b>Figura A.16:</b> Excavación y limpieza.....	101
<b>Figura A.17:</b> Pilotes hormigonados .....	101
<b>Figura A.18:</b> Detalle de los fustes.....	101
<b>Figura A.19:</b> Confección de la armadura.....	102
<b>Figura A.20:</b> Detalle de la armadura.....	102
<b>Figura A.21:</b> Confección del encofrado.....	103
<b>Figura A.22:</b> Excavación entre fustes .....	103
<b>Figura A.23:</b> Desmochado de los pilotes .....	104
<b>Figura A.24:</b> Superficie expuesta de los pilotes y barras longitudinales .....	104
<b>Figura A.25:</b> Cortado de las barras de anclaje .....	105

---

<b>Figura A.26:</b> Excavación previa al hormigonado .....	105
<b>Figura A.27:</b> Descenso de la armadura .....	105
<b>Figura A.28:</b> Ubicación del encofrado.....	106
<b>Figura A.29:</b> Detalle de la armadura y el encofrado .....	106
<b>Figura A.30:</b> Confeccionado del hormigón .....	107
<b>Figura A.31:</b> Proceso de hormigonado .....	107
<b>Figura A.32:</b> Avance del hormigón dentro del encofrado .....	107
<b>Figura A.33:</b> Detalle del cabezal.....	108
<b>Figura B.1:</b> Moldeo y curado de las probetas .....	109
<b>Figura B.2:</b> Combinación compresómetro - extensómetro .....	110
<b>Figura B.3:</b> Instrumentos para la medición de desplazamientos.....	111
<b>Figura B.4:</b> Prensa utilizada para los ensayos.....	111
<b>Figura B.5:</b> Entorno gráfico del software utilizado .....	111
<b>Figura B.6:</b> Tensión vs. deformación promedio de los LVDT .....	114
<b>Figura B.7:</b> Tensión vs. deformación vertical medida con el compresómetro .....	115
<b>Figura B.8:</b> Curvas tensión vs. deformación hasta la falla .....	116
<b>Figura B.9:</b> Ejemplos de falla en las probetas.....	117
<b>Figura B.10:</b> Ensayo de ultrasonido.....	119
<b>Figura B.11:</b> Gato, bomba hidráulica y celda de carga.....	119
<b>Figura B.12:</b> Estructura soporte .....	120
<b>Figura B.13:</b> Celda y gato ubicados en posición.....	120
<b>Figura B.14:</b> Esquema de ensayo.....	120
<b>Figura B.15:</b> Estructura complementaria .....	121
<b>Figura B.16:</b> Instrumentos de medición.....	121
<b>Figura B.17:</b> Aplicación de la carga y lectura de las deformaciones.....	121
<b>Figura B.18:</b> Fisuras al finalizar el ensayo.....	122
<b>Figura B.19:</b> Registros atenuados de los potenciómetros de 50 mm. ....	123
<b>Figura B.20:</b> Registros atenuados de los potenciómetros de 100 mm. ....	123
<b>Figura B.21:</b> Registros de los flexímetros.....	124

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1:</b> Propiedades y velocidades de onda correspondientes a cada material .....	26
<b>Tabla 3.2:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilote intacto .....	40
<b>Tabla 3.3:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilote intacto.....	41
<b>Tabla 3.4:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilote intacto .....	41
<b>Tabla 3.5:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de movilidad - Pilote intacto .....	46
<b>Tabla 3.6:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilote con defecto simétrico .....	47
<b>Tabla 3.7:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilote con defecto simétrico .....	48
<b>Tabla 3.8:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilote con defecto simétrico .....	48
<b>Tabla 3.9:</b> Resultados obtenidos a partir de los espectros del modelo bidimensional - Pilote con defecto simétrico .....	50
<b>Tabla 3.10:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de movilidad - Pilote con defecto simétrico .....	51
<b>Tabla 3.11:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilote con defecto asimétrico .....	52
<b>Tabla 3.12:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilote con defecto asimétrico .....	53
<b>Tabla 3.13:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilote con defecto asimétrico .....	54
<b>Tabla 3.14:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de movilidad - Pilote con defecto asimétrico .....	55
<b>Tabla 3.15:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilotes con cabezal..	57
<b>Tabla 3.16:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilotes con cabezal ....	58
<b>Tabla 3.17:</b> Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilotes con cabezal .....	59
<b>Tabla 4.1:</b> Pilote N°1 aislado.....	79
<b>Tabla 4.2:</b> Pilote N°2 aislado.....	79
<b>Tabla 4.3:</b> Pilote N°3 aislado.....	80
<b>Tabla 4.4:</b> Pilote N°1 con cabezal .....	80
<b>Tabla 4.5:</b> Pilote N°2 con cabezal .....	81
<b>Tabla 4.6:</b> Pilote N°3 con cabezal .....	81
<b>Tabla 4.7:</b> Resultados obtenidos con el equipo PILETEST .....	82

---

<b>Tabla 4.8:</b> Resumen de resultados.....	83
<b>Tabla A.1:</b> Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón H21 de consistencia fluida.....	99
<b>Tabla B.1:</b> Resultados de los ensayos de compresión y módulo de elasticidad.....	112
<b>Tabla B.2:</b> Resultados de los ensayos de compresión en las probetas del cabezal.....	117
<b>Tabla B.3:</b> Resultados de la determinación de la densidad del hormigón.....	118
<b>Tabla B.4:</b> Resultados del ensayo de ultrasonido.....	119

# NOTACIÓN

## Escalares

$A$	Sección transversal del pilote
$b_i$	Coefficientes que definen la función de amplificación
$c_v$	Coefficiente de amortiguamiento, por unidad de longitud, de los amortiguadores ubicados a lo largo del pilote
$C_h$	Coefficiente de amortiguamiento de los amortiguadores horizontales ubicados en la base del pilote
$C_v$	Coefficiente de amortiguamiento de los amortiguadores verticales ubicados en la base del pilote
$D$	Diámetro del pilote
$E$	Módulo de elasticidad o de Young
$f$	Variable frecuencia
$f_{amp}(t)$	Función de amplificación
$f'_c$	Resistencia característica
$f'_{cm}$	Media aritmética de los resultados de los ensayos de resistencia
$F_H$	Ubicación de los defectos
$F_L$	Extensión de los defectos
$F_R$	Reducción en el radio
$g$	Aceleración de la gravedad
$G$	Módulo de elasticidad transversal o de corte
$kb_h$	Coefficiente de balasto horizontal
$kb_v$	Coefficiente de balasto vertical
$k_v$	Constante elástica, por unidad de longitud, de los resortes ubicados a lo largo del pilote
$K_h$	Constante elástica de los resortes horizontales ubicados en la base del pilote
$K_v$	Constante elástica de los resortes verticales ubicados en la base del pilote
$L$	Longitud total del pilote
$M$	Movilidad
$p(t)$	Carga dinámica
$p_0$	Amplitud de la carga
$\bar{p}_0$	Valor complejo de la transformada de Fourier de la carga
$P$	Valor máximo en la zona estacionaria del gráfico de movilidad

---

$Q$	Valor mínimo en la zona estacionaria del gráfico de movilidad
$r_p$	Radio del pilote
$R$	Valor promedio en la zona estacionaria del gráfico de movilidad
$s_n$	Desviación estándar de los resultados de los ensayos de resistencia
$t$	Variable tiempo
$t_p$	Distribución de Student
$T_d$	Duración de la carga
$V$	Velocidad de propagación de ondas
$V_p$	Velocidad de propagación de ondas de compresión en un sólido tridimensional infinito
$V_R$	Velocidad de propagación de las ondas de Rayleigh en un sólido tridimensional infinito
$V_S$	Velocidad de propagación de ondas de corte en un sólido tridimensional infinito
$V_0$	Valor complejo de la transformada de Fourier de la velocidad
$V_{1D}$	Velocidad de propagación de ondas longitudinales unidimensionales en una barra
$Z$	Impedancia mecánica
$\gamma$	Peso específico
$\Delta f$	Intervalo de frecuencia
$\Delta t$	Intervalo de tiempo
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Densidad de masa
$\bar{\omega}$	Frecuencia circular de la carga

### Vectores y matrices

<b>C</b>	Matriz de amortiguamiento
<b>K</b>	Matriz de rigidez
<b>M</b>	Matriz de masa
<b>R</b>	Vector de cargas aplicadas externamente a la estructura
<b>U</b>	Vector de desplazamientos
<b>Ū</b>	Vector de velocidades
<b>Û</b>	Vector de aceleraciones

# Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1. Definición del problema

La fundación por medio de pilotes, ya sea excavados y hormigonados in-situ como prefabricados e hincados, es un tipo de fundación muy común en toda clase de estructuras en el mundo entero. Sin embargo, en nuestro medio hasta hace algunos años era una forma de fundación que, si bien se utilizaba para estructuras de puentes, no se veía como alternativa económicamente viable para el caso de edificios. En los últimos 15 años se produjo un fuerte incremento en su implementación, no sólo como forma de sustentación de muchos de los edificios construidos en nuestra región, sino también para apoyo de pedestales de maquinarias pesadas, torres de electricidad, como medio de recalce para construcciones antiguas y para refuerzo de pilas de puentes con cimentación insuficiente. Por lo general, los mismos no se ubican de manera aislada, sino que se vinculan mediante otra estructura como puede ser una viga, una platea de fundación o un cabezal.

Cuando se opta por este tipo de cimentaciones suele ser importante estimar, por un lado, la capacidad portante de los pilotes y por otro, la integridad estructural de los mismos. Los elementos prefabricados pueden resultar dañados durante el hincado, produciéndose fisuras de magnitud considerable, mientras que los construidos in-situ son susceptibles a presentar discontinuidades o defectos producto de fallas en el método utilizado para la excavación y el hormigonado. En ambos casos, estos defectos pueden afectar la capacidad de carga. Por otra parte, en ciertas circunstancias surgen dudas debido a la falta de información sobre estructuras existentes cuando se requiere adjudicarles un nuevo uso o aumentar las cargas de diseño.

Las pruebas de carga, por su parte, son una herramienta muy valiosa para la determinación del comportamiento bajo carga de servicio de fundaciones profundas. Básicamente consisten en aplicar una carga vertical de compresión y registrar los desplazamientos provocados por la misma. Los dos métodos más comunes para determinar la capacidad portante de este tipo de estructuras son las pruebas de carga estáticas y dinámicas.

Con respecto a la integridad estructural, un problema muy importante en este tipo de fundaciones es la posibilidad de realizar un control de calidad luego de construidas, ya que las mismas quedan cubiertas por el suelo en su totalidad. Existen técnicas tradicionales para verificar las fundaciones con pilotes, pero actualmente con el avance alcanzado por las computadoras y los equipos de adquisición de datos, se han desarrollado varios métodos que, a pesar de que cada uno presenta ciertas limitaciones, resultan confiables a la hora de evaluar la longitud real y de detectar posibles defectos en pilotes aislados, permitiendo obtener resultados seguros y económicos. Los mismos han sido ampliamente probados en el caso de elementos individuales, pero no así para un grupo de pilotes vinculados entre sí a través de un cabezal.

En el presente trabajo se propone realizar ensayos dinámicos mediante uno de dichos métodos

para determinar la integridad de pilotes aislados, en una primera etapa, y luego de construida una estructura que actúe a modo de cabezal, a fin de evaluar las diferencias que se presenten entre uno y otro caso.

El método empleado se basa en la generación de una onda axial de compresión a partir del golpe de un martillo en la cabeza del pilote. Mediante la adquisición e interpretación de los registros dinámicos de carga y respuesta es posible obtener información acerca de las dimensiones físicas, la continuidad y consistencia de los materiales utilizados, la calidad del suelo circundante, etc.

## 1.2. Objetivo

Desde hace años, los ensayos no destructivos han logrado una gran aceptación en el control de calidad y la cuantificación de dimensiones de pilotes. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han orientado hacia la evaluación de la integridad de elementos nuevos, en los que es posible el acceso a la cabeza. Sólo es factible encontrar un número reducido de casos bien documentados (Gassman y Finno, 2000; Huang y Ni, 2012) en los que se investiguen las limitaciones y la aplicabilidad del método para determinar la longitud e integridad de pilotes vinculados mediante una estructura superior.

Asimismo, a pesar de que este tipo de pruebas son relativamente fáciles de realizar, la interpretación de la información obtenida resulta por lo general dificultosa. En particular, la geometría de los pilotes con cabezal resulta más compleja que la de uno sólo de ellos, por lo que la onda generada sobre la superficie puede verse afectada por reflexiones desde los bordes del cabezal o desde defectos existentes en el mismo, dificultando la interpretación de la señal registrada.

Por lo mencionado anteriormente, el objetivo del presente trabajo consiste en investigar numérica y experimentalmente la validez de los ensayos dinámicos para evaluar la longitud e integridad de pilotes hormigonados in-situ vinculados mediante un cabezal.

Los objetivos parciales consisten en:

- Realizar una comparación acerca de las ventajas y limitaciones de los métodos mayormente adoptados en la práctica para llevar a cabo los ensayos de integridad en pilotes.
- Desarrollar una técnica numérico-experimental adecuada para la identificación de diferentes tipos de anomalías, aplicable no sólo a pilotes aislados, sino también a elementos vinculados por un cabezal.
- Determinar las limitaciones y la posibilidad de utilizar el método en el caso de que se deban realizar ensayos directamente sobre el cabezal.
- Contrastar los resultados obtenidos a partir de los modelos numéricos confeccionados y los medidos en los ensayos realizados en campo.

## 1.3. Metodología

A partir de la medición de aceleraciones en la cabeza y el cabezal, luego de una excitación

producto de una carga impulsiva, se busca determinar la longitud real, verificar la integridad de los pilotes sanos y detectar distintos tipos de defectos inducidos adrede en algunos de ellos. Los ensayos se realizan, en primer lugar, individualmente sobre cada elemento estructural y, en una etapa posterior, sobre el cabezal, con el fin de comparar los resultados obtenidos en ambos casos y evaluar la factibilidad del método en este último.

A su vez, se pretende modelar numéricamente cada uno de los pilotes, considerando el suelo circundante así como la estructura completa de fundación, de forma similar a la ensayada. Se analiza la respuesta de los mismos sometidos a cargas de impacto, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

#### **1.4. Hipótesis**

Se admite la validez de la teoría de propagación de ondas elásticas en un medio continuo. Se considera que la carga impulsiva aplicada tiene una energía tal que induce deformaciones muy pequeñas en el pilote y en su cabezal, pero suficiente como para generar registros mensurables de la reflexión de la onda en la superficie de los mismos, lo cual permite considerar el comportamiento del material como elástico lineal, siendo válido el principio de superposición de efectos.

#### **1.5. Contenido de la tesis**

La presente tesis se encuentra dividida en seis capítulos y dos anexos, siendo el contenido de cada uno de ellos:

##### **Capítulo 1: Introducción**

Se presenta el problema a estudiar, teniendo en cuenta la importancia de su consideración, y se mencionan los objetivos del trabajo y la hipótesis general considerada.

##### **Capítulo 2: Estado del Arte**

Se realiza un resumen histórico acerca de las investigaciones científicas que forman la base del estado del conocimiento actual sobre el tema en estudio. A continuación se clasifican y detallan los métodos existentes en la bibliografía para la determinación de integridad en fundaciones profundas, evaluando sus ventajas y limitaciones.

##### **Capítulo 3: Modelación Numérica**

Se utiliza un programa comercial para llevar a cabo un análisis teórico del problema, previo a la realización de los ensayos experimentales. Se modelan numéricamente pilotes individuales, con y sin defectos, para luego analizar el caso en el que se encuentran vinculados mediante un cabezal. Se comparan los modelos de elementos finitos que se encuentran con mayor frecuencia en la literatura y se adapta uno de ellos a fin de que pueda ser aplicado adecuadamente al problema en cuestión. Se incluye el efecto del suelo de fundación y se analiza la respuesta dinámica, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, producto de la aplicación

de una carga de impacto.

#### **Capítulo 4: Análisis Experimental**

Se describe el trabajo experimental llevado a cabo sobre un grupo de pilotes hormigonados in-situ, algunos de los cuales poseían defectos provocados de manera intencional, tanto de manera aislada como una vez vinculados mediante un cabezal. Se comentan los resultados de los ensayos complementarios y de una prueba de carga realizada. Se detalla el procedimiento de ensayo adoptado para evaluar la integridad estructural, describiendo el instrumental y equipamiento utilizado. Finalmente se presentan algunas de las respuestas dinámicas procesadas y los resultados de campo obtenidos.

#### **Capítulo 5: Comparación Numérico-Experimental**

Con el objetivo de efectuar un contraste de resultados se reproducen de forma numérica, a partir del modelo desarrollado, los ensayos realizados sobre los distintos pilotes, con y sin la presencia del cabezal. Se adoptan los parámetros medidos para definir el hormigón, se ingresa el golpe registrado en cada caso y se representan las características del suelo de acuerdo a lo observado en el terreno.

#### **Capítulo 6: Conclusiones**

Se resumen las conclusiones formuladas a partir del análisis efectuado sobre los modelos numéricos y los ensayos experimentales. Asimismo se presentan las líneas de investigación que se considera deberán constituir la base al momento de encarar los desarrollos futuros en relación con el tema.

#### **Anexo A: Proceso Constructivo**

Se describen las tareas llevadas a cabo con el fin de materializar la estructura formada por un conjunto de tres pilotes vinculados mediante un cabezal, indicando los trabajos previos y el procedimiento adoptado para la excavación y para el hormigonado.

#### **Anexo B: Ensayos Experimentales Complementarios**

Constituye una extensión del Capítulo 4, en el cual se detallan los ensayos realizados que no forman parte del objetivo principal de esta tesis, pero que permitieron obtener información adicional muy valiosa para caracterizar el sistema sobre el cual se estaba trabajando. Los mismos incluyen la determinación de la resistencia a compresión, módulo de elasticidad y densidad de las probetas extraídas durante el hormigonado, la velocidad de propagación de ondas en el material medida con un equipo de ultrasonido portátil y la capacidad de uno de los elementos a partir de una prueba de carga.

En la parte final, bajo el título de Referencias, se presentan los datos completos de la bibliografía utilizada, según el orden alfabético por apellido del autor principal, indicando el año de publicación. Algunas palabras permanecen en su idioma original debido a la falta de traducción en literatura en español y al uso corriente de las mismas.

## Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Antecedentes

Probablemente el primer trabajo publicado sobre ensayos dinámicos en pilotes fue el realizado por Paquet (1968), que utilizó métodos basados en el análisis de vibraciones sobre elementos de hormigón armado. Casi simultáneamente, en Hungría, Dvorak (1969) publicó un artículo sobre la determinación de la longitud de pilotes de hormigón premoldeados utilizando un equipo sísmico básico. Posteriormente, Briad (1970) realizó un estudio acerca del control de pilotes mediante un método dinámico en el que sugirió la utilización de una excitación armónica estacionaria (variando la frecuencia de excitación).

Sin embargo, el trabajo publicado por Davis y Dunn (1974), introduciendo el concepto de admitancia mecánica como un medio efectivo para la determinación de la longitud y el área transversal de pilotes, fue el que dio un real quiebre dentro de los métodos de detección de integridad.

Luego, Davis y Robertson (1976) extendieron el procedimiento para la determinación de la rigidez en la cabeza de pilotes. Higgs y Robertson (1979), trabajando con el Dr. Davis, comenzaron a idear un ensayo dinámico sugiriendo el uso de una carga de impacto en lugar de la excitación armónica estacionaria. Higgs y Baxter (1987) continuaron con el desarrollo de esta técnica presentando un método rápido y eficiente.

En el campo de la simulación numérica, Lee et. al. (1988) desarrollaron un modelo de elementos finitos unidimensional para representar el problema de propagación de ondas en pilotes hormigonados in-situ, planteando una alternativa al modelo de Smith (1960) y proporcionando los coeficientes de los resortes y amortiguadores que, actuando en paralelo, intentan simular el efecto del suelo circundante, los cuales siguen siendo utilizados en las publicaciones actuales. Liao y Roesset (1997) analizaron la integridad de pilotes sanos y defectuosos, empleando modelación numérica bidimensional axisimétrica, aplicando el método de los elementos finitos.

Fernández Tadeo y Téllez García (2000) presentaron un trabajo en el Simposio de la Sociedad Española de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, donde expusieron la situación en España sobre el uso de ensayos de integridad en pilotes hasta ese momento. Gassman y Finno (2000) analizaron la aplicabilidad de los métodos no destructivos para evaluar fundaciones profundas con cabezales, tanto numérica como experimentalmente, obteniendo una frecuencia de corte para el método de respuesta impulsiva.

En el año 2001, en el Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán” de la Universidad Nacional de Tucumán se comenzó con una investigación sobre el tema que se plasmó en la tesis de maestría del Ing. Ezeberry (2003), en la que se compararon resultados experimentales con los obtenidos numéricamente, incluyendo el efecto de la interacción suelo-estructura. Se trabajó

sobre pilotes prefabricados hincados y depositados sin hincar, y se propuso una función de amplificación para facilitar el análisis de los resultados de los ensayo.

Kim et. al. (2002) realizaron un estudio paramétrico en modelos a escala reducida de pilotes, por medio del método de eco impacto, en forma experimental y numérica, reproduciendo una serie de defectos. Este último trabajo incluyó defectos no simétricos y se analizó el problema en ambos dominios (tiempo y frecuencia). Debe destacarse que los defectos no simétricos no fueron modelados en forma numérica.

Davis (2003) publicó un trabajo sobre la evolución de los ensayos no destructivos de respuesta impulsiva entre los años 1985 y 2001 en los Estados Unidos. Paralelamente, Paikowsky y Chernauskas (2003) realizaron una revisión detallada acerca de los métodos para la determinación de integridad en fundaciones profundas, presentando casos históricos a modo de ejemplo.

Mullins y Kranc (2007) presentaron un nuevo método para la evaluación de integridad basado en la medición de la temperatura durante el curado del hormigón, el cual ha adquirido una gran aceptación debido a su rapidez de ejecución y a sus resultados concluyentes.

Chai y Wei (2008) investigaron los efectos de las ondas tridimensionales en la respuesta medida sobre la cabeza de un pilote sometido a una carga impulsiva, comparando la teoría unidimensional con los resultados de simulaciones numéricas realizadas con modelos axisimétricos.

Huang et. al. (2010) publicaron dos trabajos acerca de la capacidad de los métodos de bajas deformaciones para evaluar la ubicación y el tamaño del menor defecto identificable en pilotes hormigonados in-situ, mediante simulación numérica, utilizando un modelo bidimensional axisimétrico y considerando diferentes tipos de suelo.

En lo que respecta a la determinación de integridad de un grupo de pilotes vinculados mediante un cabezal, el estudio experimental más completo fue el realizado por Huang y Ni (2012), quienes utilizaron los métodos eco sónico, de respuesta impulsiva y sísmico paralelo para calcular la longitud y detectar defectos, tanto simétricos como asimétricos, en pilotes hincados.

Entre las últimas publicaciones relacionadas con el tema se puede citar un interesante trabajo de Xuanming et. al. (2014), en el que se presentó una solución analítica a la propagación de una onda elástica en un pilote tubular debido a una carga puntual transitoria, teniendo en cuenta el efecto del suelo, utilizando el modelo de Winkler, y considerando que para ese caso no son aplicables las teorías de propagación unidireccionales.

## **2.2. Métodos de ensayo de integridad estructural**

A continuación se describen los métodos mayormente utilizados en la actualidad para el control de la integridad en pilotes. Los mismos se diferencian de acuerdo al tipo de medición que se realiza sobre las ondas, es decir, por transmisión directa o por reflexión superficial. Para estos últimos, sólo se tiene en cuenta el caso en que la excitación en la cabeza es del tipo impulsiva. Se incluye otro tipo de método que ha sido desarrollado recientemente y que posee una gran proyección a futuro. Esta clasificación no pretende ser totalmente abarcadora, sino que considera

algunos de los métodos más importantes existentes en la literatura.

Métodos de transmisión directa:

- ✓ Método ultrasónico “cross-hole”
- ✓ Método ultrasónico “single-hole”
- ✓ Método sísmico paralelo

Métodos de reflexión superficial:

- ✓ Métodos de bajas deformaciones (eco sónico y de respuesta impulsiva)
- ✓ Método de altas deformaciones

Otros métodos:

- ✓ Método térmico

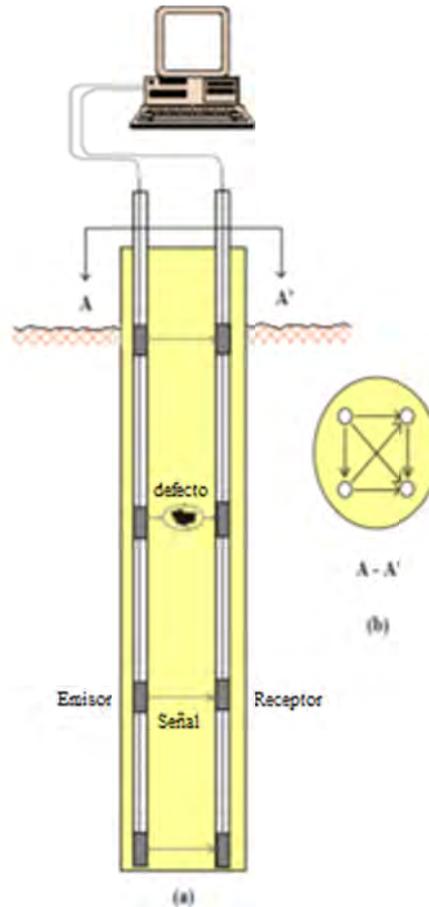
### 2.2.1. Método ultrasónico “cross-hole”

Es un método que se utiliza para evaluar la calidad del material en pilotes hormigonados in-situ. Se utiliza un transductor piezoeléctrico para generar una señal que se propague como una onda de sonido (de elevada frecuencia) dentro del hormigón y otro transductor para detectar dicha señal. Cada uno de ellos se ubica dentro de un tubo vertical metálico o plástico, los cuales se deben sujetar a la armadura previamente al hormigonado. Los mismos deben llenarse con agua al momento de realizar el ensayo, debido a que la misma actúa como un medio de interface entre el transductor y el tubo.

Los transductores de transmisión y recepción se desplazan hasta el fondo de cada tubo y se ubican asegurándose de que se encuentren en el mismo plano horizontal. En ese momento el emisor genera un pulso ultrasónico que es detectado por el receptor en el tubo adyacente. Los dos transductores se elevan simultáneamente a una velocidad constante y se toman lecturas a intervalos regulares de distancia (25 a 50 mm.), hasta alcanzar la superficie del pilote. Este proceso se repite para todas las posibles combinaciones de pares de tubos (perimetrales y diagonales). La Figura 2.1 muestra el instrumental necesario para realizar el ensayo y en la Figura 2.2 se puede observar un esquema del ensayo, con una disposición típica de tubos.



Figura 2.1: Equipamiento necesario.



**Figura 2.2:** Ensayo mediante el método ultrasónico “cross-hole”. (a) Transmisor y receptor ubicados a diferentes profundidades. (b) Vista en planta de la posición de los tubos y las posibles combinaciones (Paikowsky y Chernauskas, 2003).

El método se basa en registrar el tiempo que tarda una onda ultrasónica en propagarse desde el emisor hasta el receptor. El tiempo medido es función de la distancia entre los transductores y de las características del medio atravesado. Debido a que la separación entre los dos tubos es conocida, es posible calcular la velocidad de la onda en el hormigón. En el caso de que existan defectos tales como inclusiones de tierra, oquedades, coqueras u otros que provoquen un aumento en el tiempo de recorrido de las ondas, en la gráfica del ensayo quedará reflejada la variación y la profundidad donde se suponen presentes dichos defectos.

Los datos son almacenados de manera digital en el equipo y las gráficas pueden ser impresas directamente en la obra o revisadas en el gabinete. A su vez, también es posible graficar la energía recibida en cada señal, en los diferentes puntos de medición. Esta información se utiliza para comparar las señales de una zona con otra donde se registre una menor energía o un retardo en el tiempo, detectándose de esta forma sectores con baja calidad de hormigón y/o defectos. El método se encuentra detallado en la norma **ASTM D6760**.

La Figura 2.3 muestra un registro realizado mediante este método. Una particularidad del mismo es que permite, mediante el uso de un procedimiento de tomografía matemática, exhibir los resultados a través de imágenes en dos o tres dimensiones, tal como se adjunta, a modo de ejemplo, en la Figura 2.4.

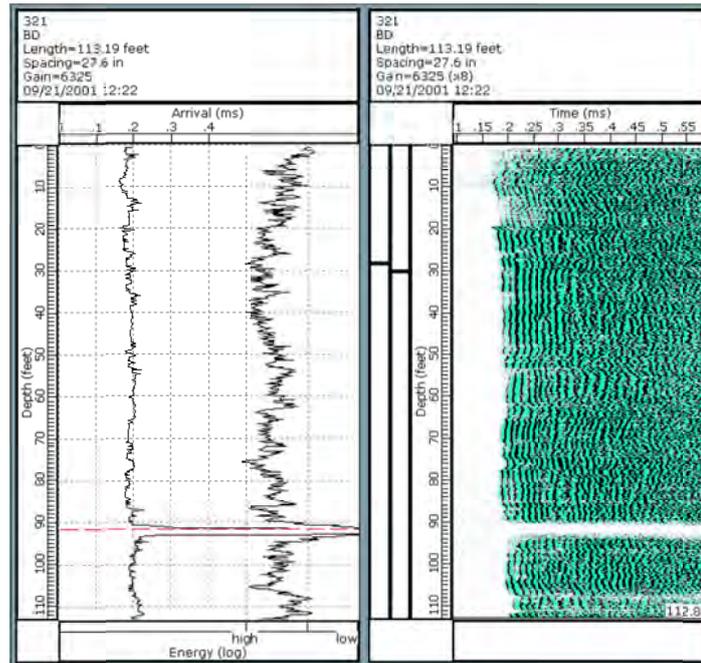


Figura 2.3: Registros típicos de un ensayo (Sellountou y Alvarez, 2013).

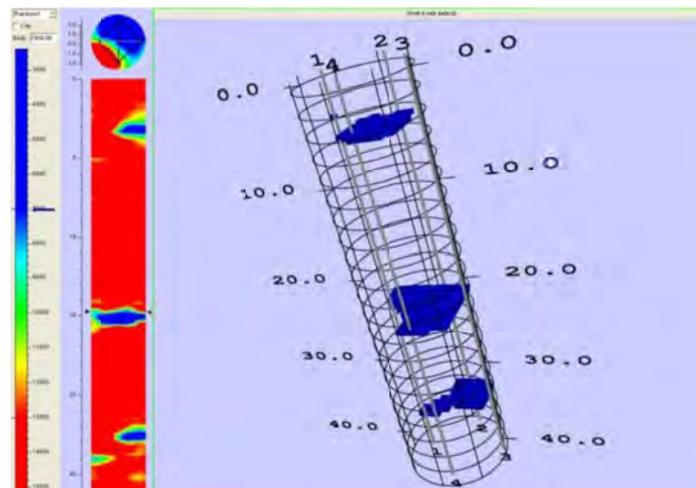


Figura 2.4: Gráfico de tomografía mostrando los defectos (Sellountou y Alvarez, 2013).

Las ventajas de este método son que efectúa una evaluación directa de la integridad del pilote y que ofrece la posibilidad de ubicar los transductores a diferentes alturas a fin de obtener un mayor número de señales, permitiendo la realización de una tomografía de las zonas más afectadas. Como limitación se puede mencionar que sólo es posible detectar defectos cuando éstos se encuentran entre dos tubos. A su vez, sólo es posible utilizarlo en pilotes excavados, en los cuales se deben instalar tuberías de acceso antes de realizar el hormigonado. Es por ello que el método no resulta del todo eficiente cuando se debe inspeccionar un gran número de elementos en una obra, por lo que en general sólo se lleva a cabo el control puntual de algunos de ellos.

### 2.2.2. Método ultrasónico “single-hole”

Este método es una variante del anteriormente descrito, en el cual el emisor y el receptor se encuentran dentro de un mismo tubo y la señal viaja en dirección vertical (ver Figura 2.5). Se debe mencionar que en este caso solamente se pueden detectar los defectos adyacentes al tubo y sólo es utilizado cuando necesita efectuarse la inspección de una estructura una vez finalizada su construcción. Debido a los altos costos de perforación, se realiza un único agujero (generalmente por el centro) hasta el fondo del pilote o por debajo de la profundidad donde se supone ubicado el defecto, dentro del cual se deslizan los transductores.

También es posible utilizarlo como complemento del método anterior a fin de localizar exactamente la posición de un defecto identificado a una cierta profundidad, es decir, distinguir si el mismo se encuentra cerca de algún tubo o en el medio de dos de ellos.

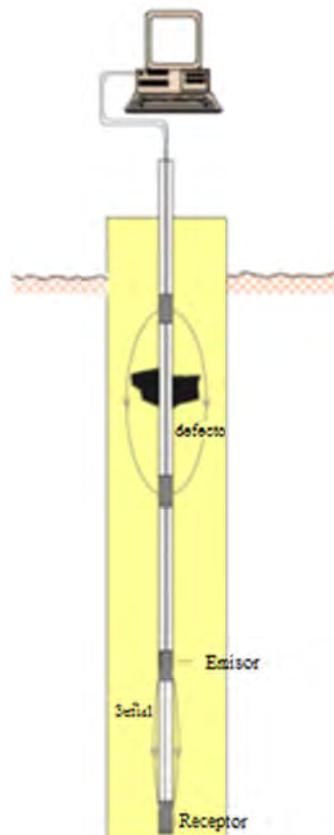


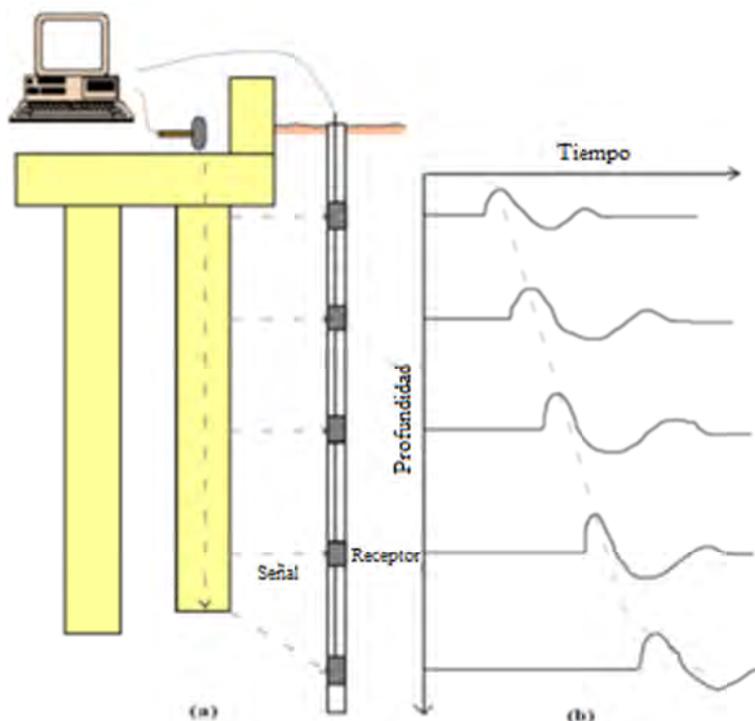
Figura 2.5: Método ultrasónico “single-hole” (Paikowsky y Chernauskas, 2003).

### 2.2.3. Método sísmico paralelo

Se trata de otra alternativa al método ultrasónico “cross-hole” y fue desarrollado originalmente para evaluar la longitud de fundaciones profundas antiguas. A pesar de que permite identificar grandes vacíos o salientes a lo largo del borde del pilote, generalmente no se lo utiliza para localizar defectos, sino para estimar la longitud total del elemento.

Tal como se puede observar en la Figura 2.6, el proceso consta de perforar un hueco en el suelo en un sector adyacente a la fundación existente, usualmente a unos 50 cm. a 1 m. del eje la

misma. Se debe excavar hasta una profundidad mayor a la ubicación estimada del extremo inferior, a fin de asegurarse un registro completo del perfil de cimentación. Luego se introduce un tubo de PVC tapado y se lo rodea de lodo bentonítico o lechada de cemento para que actúe a modo de enlace entre el tubo y las paredes de la perforación.



**Figura 2.6:** Ensayo sísmico paralelo. (a) Martillo instrumentado y receptor a diferentes profundidades.  
(b) Señal registrada en cada posición (Paikowsky y Chernauskas, 2003).

A continuación, de forma similar a los métodos anteriores, se debe llenar el tubo con agua limpia y ubicar un transductor del tipo receptor en el fondo del mismo para luego ir subiéndolo en intervalos de distancia constantes. Para cada posición del mismo, se debe golpear la superficie superior de la fundación mediante un martillo instrumentado, a fin de enviar un pulso a lo largo del pilote y el suelo tal que pueda ser detectado por el transductor. Es posible confeccionar un perfil con el tiempo de arribo de las señales, de la forma en que se detalla en Figura 2.7. Un cambio en la tasa de dicho tiempo indica la presencia de un gran defecto o el final del pilote.

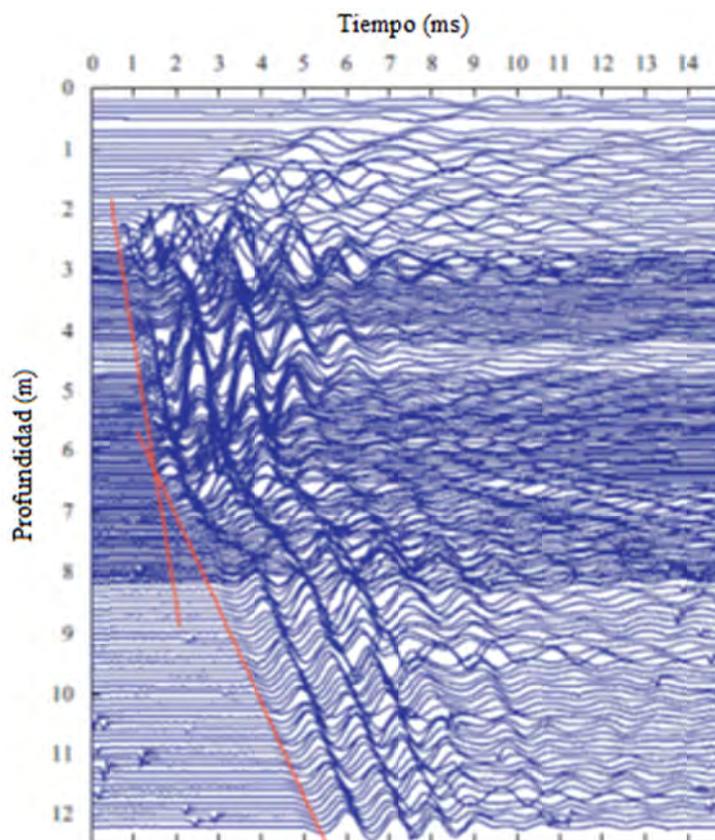


Figura 2.7: Típico gráfico del arribo de la onda con la profundidad (Huang y Ni, 2012).

La ventaja más significativa de este método es que permite inspeccionar cualquier tipo de fundación profunda, siempre que el agujero perforado se encuentre cerca de la misma. Particularmente, se ha demostrado que resulta muy adecuado para obtener la longitud de pilotes vinculados mediante cabezal (Huang y Ni, 2012). Sin embargo, resulta un método muy costoso debido a la perforación que se debe realizar y muy ineficiente en el caso de tener que efectuarse una gran cantidad de ensayos. Por lo tanto, por lo general se utiliza para determinar la profundidad de fundaciones particulares cuando los otros métodos, especialmente los de reflexión superficial, fracasan, y no como un control de rutina.

#### 2.2.4. Métodos de bajas deformaciones

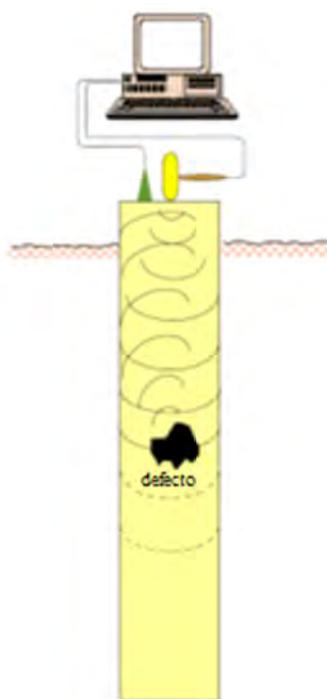
Se trata de métodos que inducen pequeñas deformaciones en el pilote y permiten realizar un análisis de la respuesta tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, dando lugar a una clasificación de los mismos. Los mismos se encuentran detallados en la norma **ASTM D5882**.

En el caso de que la respuesta sea analizada en el dominio del tiempo, el método se denomina como “eco sónico”. En la Figura 2.8 se presenta un esquema del equipamiento utilizado en el ensayo. Tal como se puede observar, el mismo consta de un acelerómetro de alta frecuencia, un martillo de mano y una unidad de procesamiento y almacenamiento de la información.

El primer paso es la preparación de la cabeza del pilote. Una vez limpia, sobre la superficie del hormigón endurecido se fija un acelerómetro. Luego, a una distancia determinada, se aplica

un impacto con un martillo de mano. El golpe envía una onda de compresión a lo largo del fuste, la cual es reflejada por las discontinuidades del elemento estructural, por su punta, por cambios de sección o por variaciones en el terreno que lo rodea. Un acelerómetro capta los registros temporales del movimiento de la cabeza del pilote, para varios impactos. Esta señal es amplificada y digitalizada por un sistema electrónico e integrada a velocidad.

Dicho registro indica la rapidez con la cual el material de la superficie, en el punto de medición, se movió debido al impacto del martillo y a las ondas reflejadas a lo largo del elemento. El mismo puede ser procesado adicionalmente mediante el uso de algoritmos que mejoran la señal a través del filtrado y la amplificación. Esta manipulación permite reducir el efecto del ruido no deseado y mejorar la gráfica de velocidad en el caso de reflexiones débiles desde la punta, ayudando de ese modo a la interpretación de los resultados.

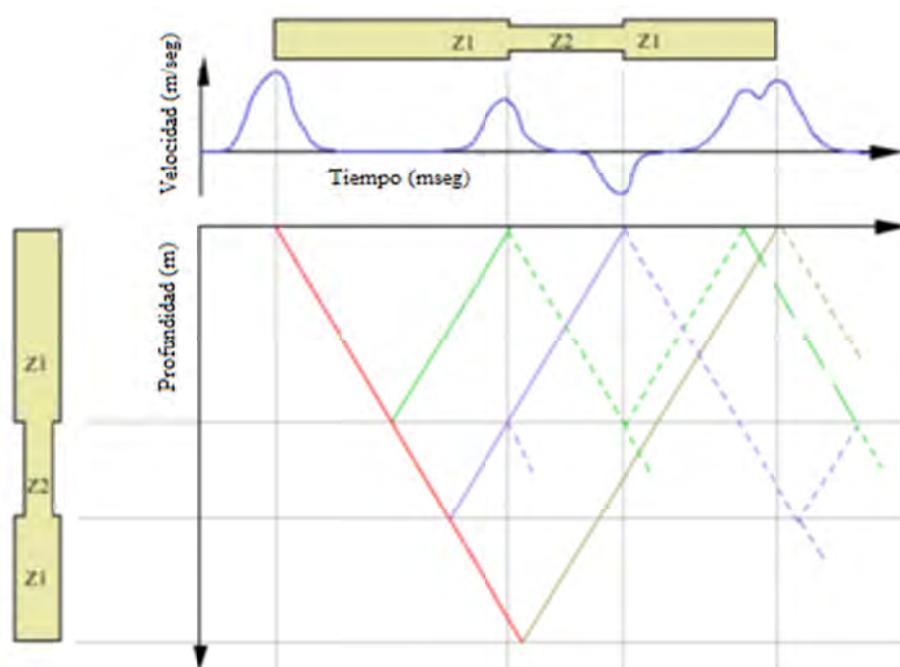


**Figura 2.8:** Esquema del instrumental necesario para la realización del ensayo (Paikowsky y Chernauskas, 2003).

Un parámetro utilizado para medir la resistencia del pilote al pulso dinámico es la impedancia mecánica, la cual es definida, en este caso, como:

$$Z = EA/V \quad (2.1)$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad del hormigón,  $A$  la sección transversal y  $V$  la velocidad de propagación de ondas en el material. Cualquier variación en la impedancia del sistema (cambios en la sección transversal del pilote, en la densidad del hormigón y/o en la resistencia del suelo circundante) genera reflexiones de ondas que se propagan de retorno hacia la cabeza del pilote. La Figura 2.9 ilustra la relación entre las variaciones en la impedancia y la señal registrada en la superficie.



**Figura 2.9:** Propagación y reflexiones de la onda en función del tiempo y la profundidad (Paikowsky y Chernauskas, 2003).

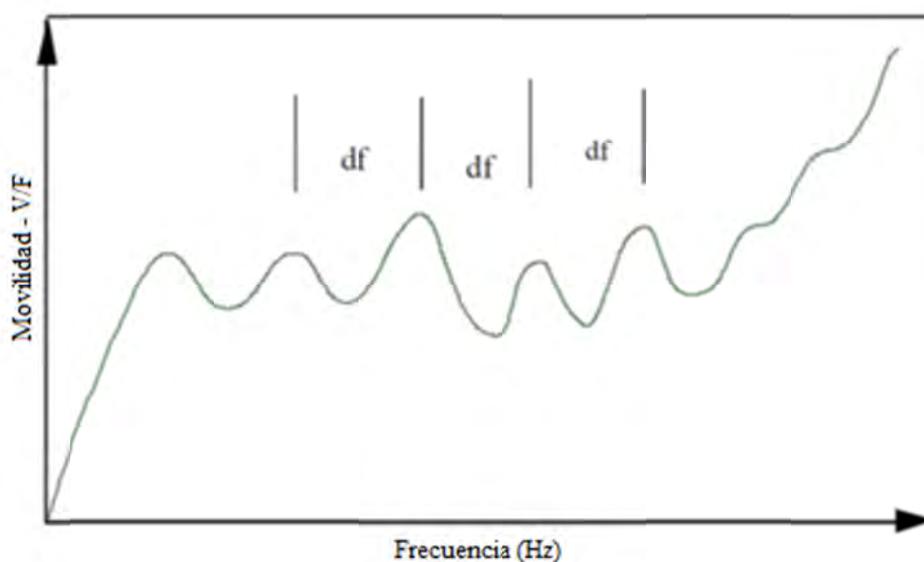
Mediante la inspección del registro de velocidad se pueden localizar dichos cambios de impedancia e identificar posibles defectos existentes, como ser ensanchamientos o estrechamientos de la sección transversal, vacíos o discontinuidades en el material, cambios en la resistencia del sistema pilote-suelo (por ejemplo al pasar de un estrato a otro), etc. A su vez, es posible observar la reflexión desde la punta del pilote, que debe ocurrir en un tiempo de  $2L/V$ , siendo  $L$  la longitud del mismo.

Una de las tareas más difíciles de la interpretación del gráfico de velocidad es la de distinguir entre las reflexiones debido a defectos y aquellas producto de cambios en la resistencia del suelo. Cuando las características del suelo son conocidas o se pueden deducir a partir de los registros obtenidos en ciertos pilotes de “referencia” intactos, los elementos defectuosos o dañados se logran identificar a partir del contraste entre las respuestas dinámicas. De esta manera, la forma más confiable para utilizar el método es mediante la comparación de un gran número de pruebas llevadas a cabo en el mismo sitio. Aquellos pilotes que presenten una diferencia respecto a la mayoría deberán ser inspeccionados con mayor detalle.

La cuantificación detallada de los defectos es difícil, si no imposible, por lo que generalmente se prioriza la detección y localización de los mismos. Asimismo, los efectos de cambios en la resistencia del suelo son difíciles de determinar, aún con el uso de señales adicionales y la aplicación de métodos más sofisticados.

En el método de “respuesta impulsiva”, por su parte, el análisis de los datos obtenidos del ensayo es realizado en el dominio de la frecuencia. En este caso, resulta necesario que el martillo esté equipado con una celda de carga, que sirve para medir la fuerza que interviene en el impacto como una función del tiempo.

Las señales de carga y velocidad pueden ser convertidas del dominio del tiempo al de la frecuencia, empleando la Transformada de Fourier. Luego, el espectro de velocidad es dividido por el de carga lo cual genera un gráfico denominado de “movilidad”, que se presenta como una función de la frecuencia. En el mismo aparecen picos notables que sirven para identificar las frecuencias fundamentales del sistema, las cuales se encuentran relacionadas con la longitud del pilote. Además, en el rango de frecuencias más bajo, se puede calcular un módulo de rigidez dinámico, que coincide con la inversa de la pendiente inicial. Un ejemplo de gráfico de movilidad se puede observar en la Figura 2.10.



**Figura 2.10:** Gráfico de movilidad de un ensayo realizado con el método de respuesta impulsiva (Paikowsky y Chernauskas, 2003).

En bajas frecuencias, los efectos inerciales disminuyen y esto hace que el sistema pilote-suelo se comporte como un resorte (respuesta lineal). El módulo de rigidez dinámico proporciona un buen indicio acerca de la interacción entre el suelo y la fundación. En suelos blandos o sueltos y en pilotes que contienen vacíos o discontinuidades, se obtienen valores bajos de dicho módulo.

La existencia de un bulbo (ensanchamiento de la sección transversal a una determinada profundidad) implica que la rigidez a ser obtenida debe ser más alta que en el caso de un pilote normal y lo contrario sucede si existe un cuello (estrechamiento de la sección). Vale aclarar que la rigidez dinámica tiene significado físico solamente si la movilidad es lineal en el tramo inicial de la curva (Rausche et. al., 1992).

Resumiendo, el método provee una medida de la homogeneidad del hormigón en el pilote y da información acerca de la performance del mismo (Higgs y Robertson, 1979; Davis, 2003). Además de estimar la longitud, suministra el valor del módulo de rigidez dinámico, que constituye una información muy útil acerca de la calidad del elemento. A partir de la comparación entre los valores teóricos y los reales se puede deducir información acerca de la integridad del mismo.

La principal ventaja de los métodos de ensayo recientemente descritos es su simplicidad de

ejecución, su rapidez y su bajo costo por ensayo, ya que no requieren de ninguna instalación adicional. De esta forma, por lo general permiten inspeccionar todos los elementos presentes en un determinado sitio. Son muy versátiles, ya que pueden efectuarse sobre distintos tipos de fundaciones profundas, con diferentes materiales. Bajo ciertas condiciones, tal es el caso que se presenta en este trabajo, se pueden aplicar a pilotes que han sido cubiertos por una estructura (viga o cabezal, por ejemplo).

La mayor limitación es que la técnica resulta generalmente eficaz para pilotes con una longitud de 20 a 30 veces su diámetro, dependiendo de las condiciones del suelo. A medida que la relación longitud/diámetro se hace mayor o los suelos se hacen muy rígidos se puede hacer dificultosa, y a veces imposible, la detección de defectos (Lilley, 2000). En caso de alcanzarse una relación crítica, las señales se atenúan a tal punto que los picos de reflexión dejan de observarse.

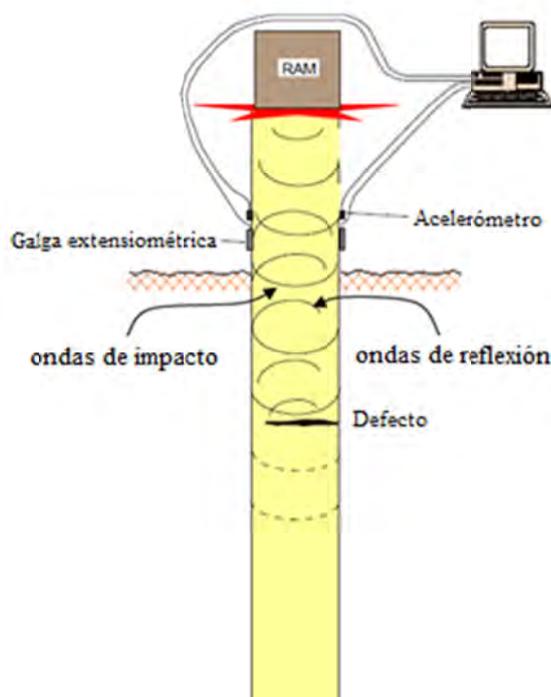
A su vez, existe un tamaño mínimo del defecto que puede ser detectado. Si en el pilote se presentan varios defectos, probablemente los únicos que puedan ser apreciados son los superiores.

La interpretación de los resultados se basa en el conocimiento de la longitud del elemento o de la velocidad de onda en el hormigón. En el caso de pilotes excavados, la edad mínima del hormigón en el momento del ensayo es de siete días, de modo que se asegure una rigidez suficiente como para que la onda se propague a elevadas velocidades.

Finalmente, a pesar de que los métodos de bajas deformaciones permiten una estimación del comportamiento estático, no se pueda determinar con precisión la capacidad portante del pilote. A diferencia de las mediciones dinámicas que se obtienen durante el hincado o las pruebas de carga estáticas, estos ensayos no afectan la resistencia de la fundación analizada.

### **2.2.5. Método de altas deformaciones**

Se trata de un método de ensayo dinámico que se emplea fundamentalmente para evaluar la capacidad de carga y la facilidad de hincado de pilotes prefabricados. Se utiliza, a su vez, para obtener la capacidad portante de aquellos perforados y hormigonados in-situ. Cuando el martillo de hincado golpea la cabeza del pilote produce grandes deformaciones en el mismo y genera una onda que se propaga hacia abajo, tal como se ilustra en la Figura 2.11.



**Figura 2.11:** Esquema de un ensayo con el método de altas deformaciones (Paikowsky y Chernauskas, 2003).

La resistencia del suelo o los cambios en la impedancia del pilote (debido a las variaciones en el material o en la geometría) provocan ondas de reflexión que se registran en la superficie, de manera similar a lo explicado para los métodos de bajas deformaciones. El equipamiento típico para este tipo de ensayos consta de dos acelerómetros y dos transductores de deformación, ubicados sobre lados opuestos del pilote, cerca de su cabeza.

Siendo conocidas las propiedades del material y la geometría en el punto de medición, la deformación es convertida a carga mientras que la aceleración es integrada en función del tiempo a fin de obtener un registro de velocidad. Dichas señales de fuerza y velocidad pueden utilizarse para evaluar la integridad de la fundación. Entretanto no haya ningún cambio en la impedancia y las cargas externas (de fricción) se mantengan inactivas, la fuerza y la velocidad seguirán siendo proporcionales.

La ventaja de este método sobre los de bajas deformaciones es la capacidad que posee para cuantificar la importancia estructural de una discontinuidad. Mientras que la señal de estos últimos indica una discontinuidad completa para cualquier tipo de fisura a lo largo del pilote, la onda de alta deformación pasa a través de la misma permitiendo su transformación a una carga de compresión que indica con exactitud la capacidad portante del elemento. Para un mayor detalle se puede recurrir a la norma **ASTM D4945**.

### 2.2.6. Método térmico

Se trata de un método de ensayo no destructivo muy prometedor para la evaluación de integridad de pilotes de hormigón que ha sido desarrollado recientemente. Se basa en la realización de mediciones de la temperatura durante el curado del hormigón fresco a lo largo de la profundidad, y presenta notables ventajas respecto a los métodos tradicionales.

Las mediciones de temperatura se pueden efectuar insertando una sonda térmica a lo largo de tubos de acceso (Mullins y Kranc, 2007), similares a los utilizados para el método ultrasónico “cross-hole” (ver Figura 2.12); o mediante cables térmicos previamente vinculados a la armadura (Piscsalko et. al., 2013), los cuales contienen sensores ubicados igualmente espaciados a lo largo de su longitud, y que quedan embebidos en el hormigón una vez construido el pilote, tal como se puede apreciar en la Figura 2.13.



**Figura 2.12:** Sonda térmica (izquierda) y equipamiento para el ensayo (derecha).



**Figura 2.13:** Cables térmicos anclados a la armadura (izquierda) y unidades de recolección de datos conectadas a los cables (derecha).

El ensayo consiste en monitorear continuamente la temperatura a intervalos fijos de tiempo, ya sea descendiendo la sonda a velocidad constante por los tubos o de manera automática en cada uno de los cables. El mismo se debe llevar a cabo entre las 12 y 48 horas posteriores a la finalización del hormigonado, dependiendo del diámetro y la calidad del hormigón.

A cada profundidad se promedian todas las lecturas entre sí y, junto con los datos del volumen total de hormigón, son usadas para determinar la forma general del pilote, como una función de la profundidad. Durante el proceso de curado del hormigón se genera una temperatura elevada dentro del elemento. La distribución de la misma en una sección transversal resulta más

cálida cerca del centro, decreciendo hacia los bordes, y depende del diámetro, de la dosificación y la calidad del hormigón y de las condiciones del suelo circundante. La presencia de un defecto puede producir una reducción local en la temperatura cerca del mismo, debido a un menor contenido de cemento en dicha zona.

Cualquier registro de temperatura que sea menor al promedio indicará sectores con una reducción en el volumen del material (defectos) o con una calidad de hormigón pobre. Por el contrario, cualquier área donde la medición de temperatura resulte superior al promedio presentará salientes o protuberancias, debidas a la presencia de un mayor volumen de hormigón.

Adicionalmente a la determinación de la integridad estructural, el método también permite detectar potenciales pérdidas de alineación de la armadura, comparando mediciones diametralmente opuestas con el promedio. Si uno de los valores se encuentra por encima y el otro por debajo de dicho valor, la armadura no será concéntrica con el pilote, debido a que el sector donde se registre la mayor temperatura se encontrará más cerca del centro que el otro. Esto permite obtener información acerca del recubrimiento existente en el caso de armaduras desalineadas.

Las situaciones anteriores se ejemplifican en las Figuras 2.14 y 2.15, en las cuales se presentan registros de la variación de la temperatura con la profundidad. En la primera de ellas se puede observar la presencia de un defecto y la segunda indica un desplazamiento de la armadura respecto al centro del pilote.

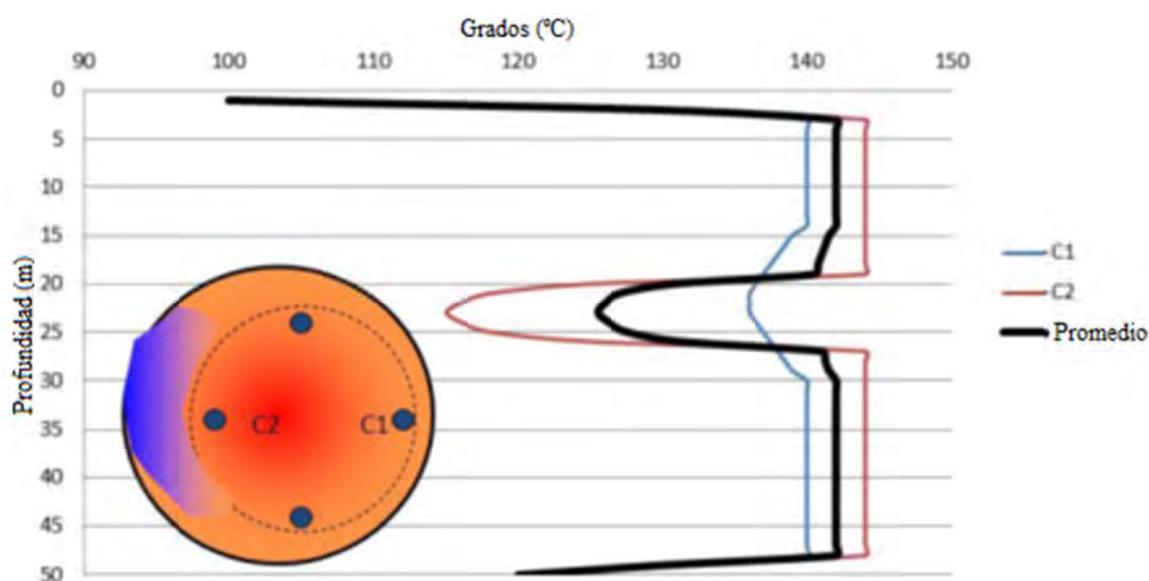
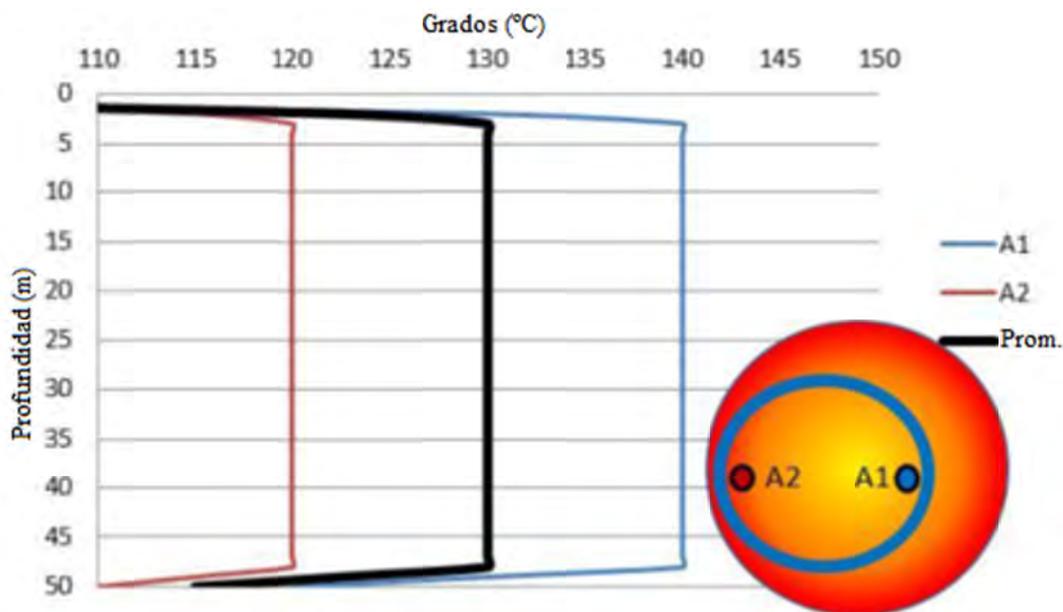


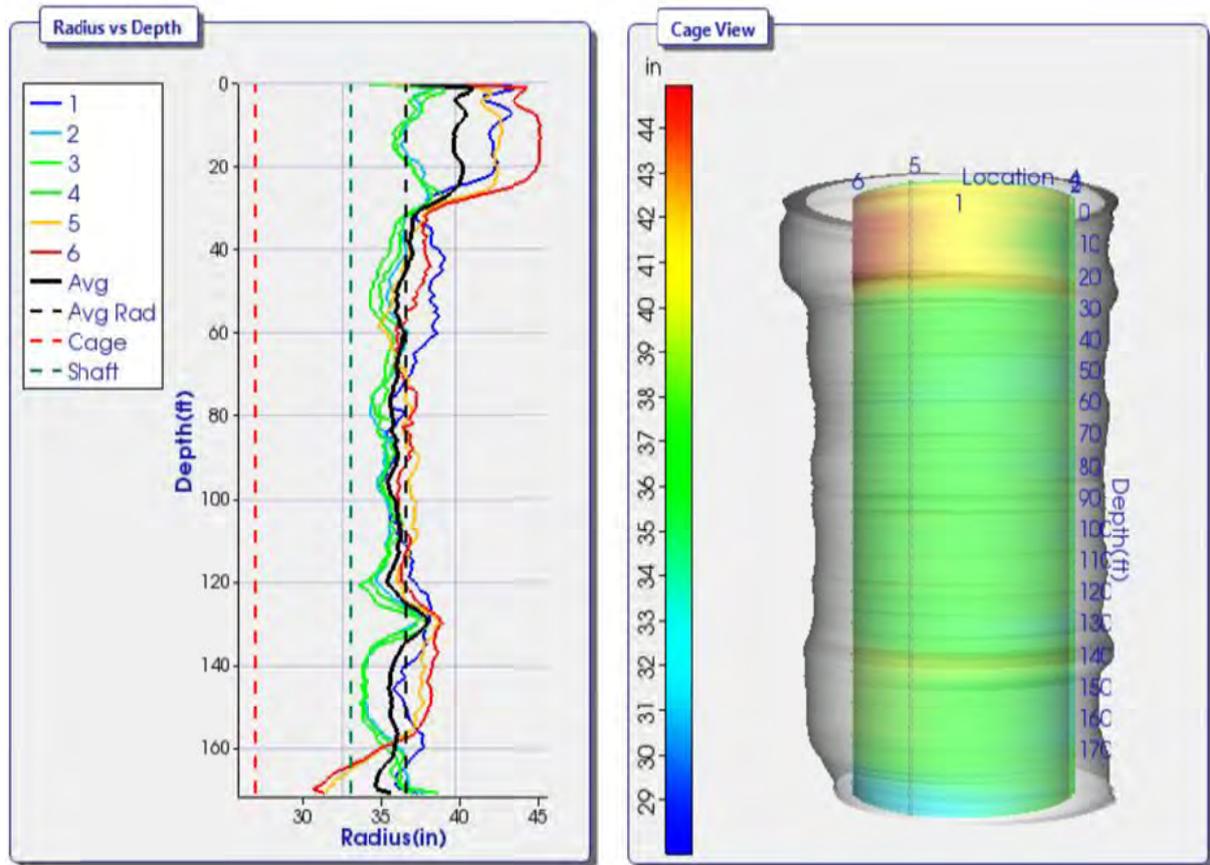
Figura 2.14: Caída de temperatura debido a la presencia de un defecto (Sellountou y Alvarez, 2013).



**Figura 2.15:** Diferencia de temperatura entre dos cables diametralmente opuestos debido a una armadura descentrada (Sellountou y Alvarez, 2013).

A modo de comentario final se puede mencionar que, por lo general, se recomienda utilizar una unidad de medición (sonda o cable térmico) por cada 25 o 30 cm. de diámetro del pilote. Las mismas deberán ubicarse igualmente espaciadas a lo largo del perímetro de la armadura. Se recomienda utilizar un número par de tubos o cables, con pares colocados diametralmente opuestos entre sí, a fin de determinar correctamente cualquier desplazamiento lateral de la armadura, si lo hubiera.

De esta forma, será posible realizar un perfil de integridad térmico a partir de la información recolectada en diferentes puntos de cada sección transversal. Cualquier anomalía mayor o igual al 10% del área se podrá detectar desde diferentes unidades de medición, mientras que defectos menores sólo serán captados desde la posición más cercana. A partir del registro completo de temperatura y la información del hormigón es posible realizar un gráfico de la variación del radio del pilote con la profundidad y estimar la ubicación de la armadura dentro del mismo, lo cual se puede plasmar en una vista 3D para una mejor visualización, como se adjunta en la Figura 2.16.



**Figura 2.16:** Salidas obtenidas con el método: gráfica del radio con la profundidad (izquierda) y vista 3D (derecha) (Sellountou y Alvarez, 2013).

Como una de las principales ventajas del método se debe mencionar que permite la evaluación completa de la sección transversal del pilote, tanto dentro como fuera del perímetro de la armadura, en toda su longitud, situación muy difícil de conseguir con el resto de los métodos. Además, es posible obtener información de la alineación y el desplazamiento de la armadura longitudinal y del recubrimiento de hormigón. Esto es importante porque, aunque los defectos pueden no estar presentes en el núcleo del elemento, el recubrimiento puede encontrarse reducido más allá de un límite aceptable debido a la excentricidad de la armadura.

Debido a que el ensayo depende de la hidratación del hormigón, los resultados pueden ser obtenidos en aproximadamente 24 a 48 hs. luego de la construcción del pilote, resultando una gran ventaja frente a los otros métodos, ya que permite acelerar el proceso de construcción. A su vez, el método no se encuentra limitado para ningún valor de la relación longitud-diámetro, por lo que cualquier pilote puede ser evaluado independientemente de sus dimensiones.

### 2.3. Comentarios finales

Una vez repasados los métodos existentes para la evaluación de integridad de fundaciones profundas, se pudo observar que tanto las fortalezas como las limitaciones de los mismos están relacionadas con su eficacia, tiempo (en preparación, control e interpretación de la información) y costos asociados. En general, los métodos de transmisión directa requieren una preparación

considerable y pueden proporcionar una mayor precisión en la zona circundante a los tubos. Por su parte, los métodos de reflexión superficial requieren sólo un mínimo de preparación, pero están limitados en su rango de operación y en la precisión alcanzada. Finalmente, el método térmico es una herramienta reciente y resulta muy prometedora debido a que no presenta muchas de las limitaciones asociadas al resto de los métodos y brinda información adicional muy útil.

El método de ensayo seleccionado en cada caso, por lo tanto, debe ser evaluado teniendo en cuenta la cantidad y la calidad de los resultados esperados. La capacidad de un método para detectar una anomalía debe ser examinada a la luz de la influencia de los defectos en la capacidad de servicio de la fundación.

Los ensayos de integridad constituyen una potente herramienta de trabajo para determinar experimentalmente la existencia de defectos en pilotes. En algunos casos, los resultados de las pruebas sirven para rechazar los mismos, mientras que en otros se utilizan para volver a evaluarlos o rediseñarlos. Con frecuencia, se las lleva a cabo para confirmar defectos esperados.

En el presente trabajo de investigación se utilizó el método de bajas deformaciones para realizar los ensayos experimentales, ya que el interés fundamental radica en determinar su aplicabilidad en el caso de que se desee evaluar la integridad de pilotes vinculados mediante un cabezal.

## Capítulo 3: MODELACIÓN NUMÉRICA

### 3.1. Definición del problema

En primer lugar se utilizó un modelo numérico para representar a un pilote individual inserto en el terreno. El sistema debía involucrar dos clases de medios continuos, por un lado, el elemento estructural de hormigón armado y, por el otro, el suelo. Se intentó reproducir, lo más adecuadamente posible, las características de dichos materiales, la geometría y los defectos de los pilotes que posteriormente se construirían en el terreno. Se aplicó una excitación del tipo impulsiva en la cabeza y se midió la respuesta dinámica sobre la misma, simulando los métodos de bajas deformaciones.

A continuación, se utilizaron los resultados y conclusiones obtenidas de dichos modelos para desarrollar la estructura de fundación completa, es decir, los pilotes vinculados mediante un cabezal.

Para el caso de pilotes aislados, se pueden encontrar en la bibliografía dos clases de modelos: el modelo unidimensional, en el que se emplean elementos finitos de tipo barra, aprovechando las características geométricas y físicas del problema en cuestión; y el modelo bidimensional, en donde se utilizan elementos finitos axisimétricos para representar pilotes de sección circular.

En este trabajo se propone un modelo sólido tridimensional para el pilote, adaptando la forma de simular el efecto del suelo circundante del modelo unidimensional, tal como se verá más adelante. Este último proporciona ciertas ventajas con respecto a la modelación de defectos no simétricos y permite vincular los elementos individuales a una estructura superior, a fin de analizar su influencia.

### 3.2. Geometría

Se modelaron pilotes de sección circular completamente enterrados en el terreno, tanto sanos como defectuosos. Para los mismos se adoptó un diámetro de  $D = 30$  cm. ( $r_p = 15$  cm.) y una longitud total de  $L = 12$  m. (relación  $L/D = 40$ ). Se consideró un defecto de tipo cuello simétrico a la mitad de su longitud ( $F_H = 6$  m.), con una reducción en el radio de  $F_R = 7.5$  cm. y una extensión de  $F_L = 0.40$  m. (ver dimensiones en Figura 3.1). Finalmente se confeccionó un defecto de las mismas dimensiones, pero sólo en un cuarto del perímetro, a fin de representar un desmoronamiento de la excavación, aprovechando las posibilidades que brinda el modelo tridimensional.

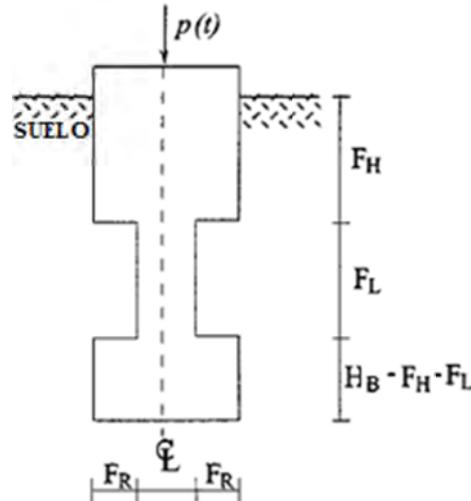


Figura 3.1: Geometría de pilote con reducción simétrica de la sección (Liao y Roesset, 1997).

### 3.3. Condición de carga

La carga dinámica  $p(t)$  utilizada en este trabajo se encuentra definida como una función del tiempo de la siguiente forma (Liao y Roesset, 1997):

$$p(t) = \begin{cases} p_0 \text{sen}(\bar{\omega}t) & 0 \leq t \leq T_d \\ 0 & t > T_d \end{cases} \quad (3.1)$$

donde  $\bar{\omega} = \pi/T_d$ . Esto representa un impacto sinusoidal de medio ciclo de duración con un período  $2T_d$  y una amplitud  $p_0$ , como se puede observar en la Figura 3.2.

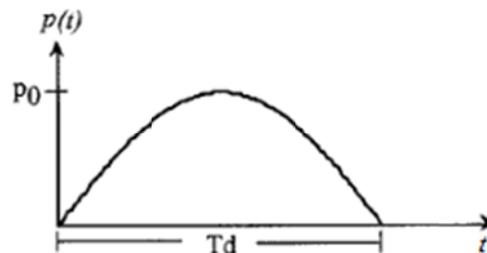


Figura 3.2: Impacto sinusoidal de medio ciclo de duración (Liao y Roesset, 1997).

En el trabajo de Fernández Tadeo y Téllez García (2000) se detallan algunos parámetros característicos del ensayo eco sónico. En el mismo se indica que para martillos con masa de entre 0.5 y 5 kg. es posible alcanzar una fuerza máxima de entre 2000 y 20000 N., con una duración de 0.5 a 2 ms. El efecto de la duración y la amplitud del impacto en la respuesta dinámica de pilotes de estas dimensiones fue investigada por Ezeberry (2003), el cual determinó que, a medida que se incrementa la magnitud y se disminuye la duración de la carga, la amplitud de la respuesta aumenta. Esto implica que la posibilidad de captar el regreso de la onda es mayor.

En este trabajo se decidió aplicar un pulso de  $T_d = 1$  ms. ( $10^{-3}$  seg.) de duración y una amplitud de  $p_0 = 5000$  N.

### 3.4. Propiedades de los materiales

El ensayo, debido a su naturaleza no destructiva, induce en el pilote muy bajas deformaciones, por lo que es factible aplicar la ley de Hooke. Los parámetros materiales a ser definidos en este caso son: el módulo de elasticidad  $E$ , el coeficiente de Poisson  $\nu$  y la densidad de masa  $\rho$ . Otros parámetros, como el módulo de corte  $G$  y el peso específico  $\gamma$ , están relacionados con los anteriores a través de las siguientes ecuaciones:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (3.2)$$

$$\gamma = \rho g \quad (3.3)$$

siendo  $g$  la aceleración de la gravedad.

A partir de los valores anteriores es posible calcular las velocidades de propagación de ondas que, para el caso de materiales elásticos lineales, resultan una constante del material. En un sólido tridimensional infinito existen tres clases de ondas, la onda  $P$  (o de compresión o volumétrica), la onda  $S$  (o de corte), y la onda de Rayleigh:

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (3.4)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}} \quad (3.5)$$

$$V_R = \alpha \cdot V_S \quad (3.6)$$

donde  $\alpha$  es una función del coeficiente de Poisson. Para  $\nu = 0.2$  y  $0.4$ ,  $\alpha = 0.9111$  y  $0.9423$ , respectivamente (Liao y Roesset, 1997).

Por su parte, la velocidad de propagación de ondas longitudinales unidimensionales en una barra es la provista por la teoría de vibraciones axiales (Richart et. al., 1970) y resulta:

$$V_{1D} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.7)$$

Se consideró un suelo cohesivo consistente de baja plasticidad (suelo tipo II según CIRSOC 103). Los parámetros físicos adoptados en esta sección y las respectivas velocidades de onda resultantes, en cada uno de los materiales involucrados, se resumen en la Tabla 3.1 (los subíndices  $h$  y  $s$  representan al hormigón y al suelo, respectivamente):

**Tabla 3.1:** Propiedades y velocidades de onda correspondientes a cada material.

Hormigón				Suelo			
$E_h$	$3.908 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	$V_{ID}$	4035 m/seg	$E_s$	$1.68 \times 10^8 \text{ N/m}^2$	$V_{ID}$	306 m/seg
$\nu_h$	0.20	$V_P$	4254 m/seg	$\nu_s$	0.40	$V_P$	447 m/seg
$G_h$	$1.628 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$	$V_S$	2605 m/seg	$G_s$	$6 \times 10^7 \text{ N/m}^2$	$V_S$	183 m/seg
$\rho_h$	$2400 \text{ kg/m}^3$	$V_R$	2373 m/seg	$\rho_s$	$1800 \text{ kg/m}^3$	$V_R$	172 m/seg
$\gamma_h$	$23536 \text{ N/m}^3$			$\gamma_s$	$17652 \text{ N/m}^3$		

### 3.5. Modelos numéricos para pilotes aislados

#### 3.5.1. Modelo unidimensional

Este tipo de modelación utiliza elementos finitos de tipo barra. Como los mismos se encuentran sometidos únicamente a deformaciones axiales, sólo se considera el grado de libertad coincidente con la dirección vertical. Se puede representar un pilote con sección circular o de cualquier otra geometría, siempre y cuando se respete la simetría con respecto al eje vertical.

Las únicas vibraciones que se consideran en la respuesta dinámica son las longitudinales, lo que implica que se desprecia la contribución de las ondas laterales, tanto en el hormigón como en el suelo. Es decir, se supone solamente la propagación de una onda axial con una velocidad similar a la obtenida en barras (ec. (3.7)).

Para simular el efecto del suelo circundante se ubican resortes y amortiguadores, actuando en paralelo, en los nodos de los elementos en donde, además, se concentra la masa de los mismos. Las constantes correspondientes fueron derivadas utilizando la teoría elasto-dinámica (Lee et. al., 1988) y se pueden calcular en función de las propiedades del terreno y de la geometría del pilote:

$$k_v = 2.3G_s \tag{3.8}$$

$$c_v = 2\pi\rho_s V_s r_p \tag{3.9}$$

Los coeficientes presentados en (3.8) y (3.9) se encuentran expresados por unidad de longitud y determinan, respectivamente, los valores de rigidez elástica y amortiguamiento de los vínculos a ser colocados a lo largo del pilote. Vale aclarar que  $V_s$  corresponde a la velocidad de corte en el suelo ( $V_s = \sqrt{G_s/\rho_s}$ ).

Por su parte, el suelo ubicado por debajo de la base se modela usando un resorte y un amortiguador actuando en paralelo sobre el nodo inferior. Los coeficientes fueron obtenidos a partir de la suposición de un disco rígido sin masa ubicado en la superficie de un semiespacio elástico (Lysmer y Richart, 1966), y se pueden encontrar en detalle en las referencias (Lee et. al., 1988; Wolf, 1997; Liao y Roesset, 1997). La suposición realizada no es correcta desde un punto de vista estricto, sin embargo, el error introducido con esta simplificación es pequeño (Liao y Roesset, 1997).

De esta forma, es posible computar dichos valores mediante las siguientes ecuaciones:

$$K_v = 4G_s r_p / (1 - \nu_s) \tag{3.10}$$

$$C_v = 0.85K_v r_p / V_s \quad (3.11)$$

En ambos casos, sólo se considera el amortiguamiento por radiación o geométrico, por la propagación de ondas hacia el infinito. El amortiguamiento interno del pilote y el suelo, en ensayos de bajas deformaciones, se supone insignificante y por lo tanto se desprecia (Liao y Roesset, 1997, Kim et. al., 2002).

En la Figura 3.3 se adjunta un esquema del modelo unidimensional anteriormente descrito:

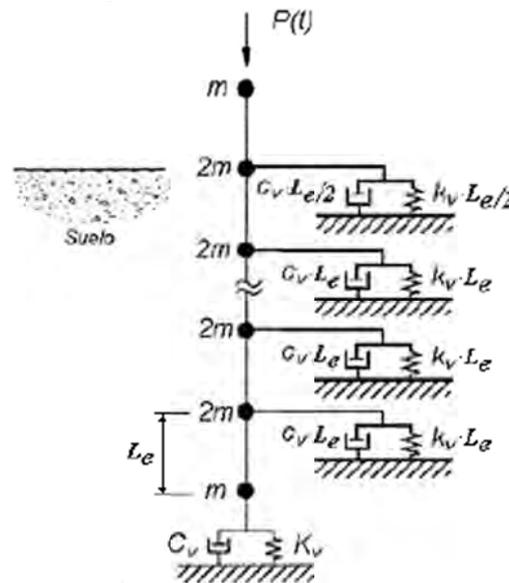


Figura 3.3: Modelo de elementos finitos unidimensional (Ezeberry, 2003).

### 3.5.2. Modelo bidimensional

Una forma sencilla de representar un sólido tridimensional de revolución es mediante un modelo plano, haciendo uso de la formulación axisimétrica. La misma consiste en modelar una sección transversal representativa del sólido. El dominio completo del problema puede ser obtenido rotando dicha sección 360° alrededor del eje de simetría, como se observa en la Figura 3.4. Sin embargo, presenta ciertas limitaciones ya que sólo permite analizar pilotes de sección circular y no es posible representar defectos ni cargas asimétricas.

La ventaja de este modelo es que simula el comportamiento conjunto del pilote y el suelo circundante, tal como se puede apreciar en la Figura 3.5. Se debe considerar un dominio lo suficientemente grande como para evitar que las ondas reflejadas por los bordes regresen a la ubicación del receptor dentro del lapso de tiempo de interés.

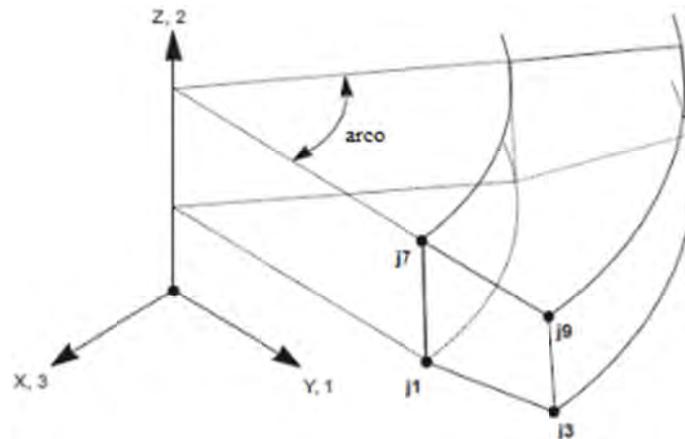


Figura 3.4: Elemento finito sólido axisimétrico (Manual SAP2000, 2010).

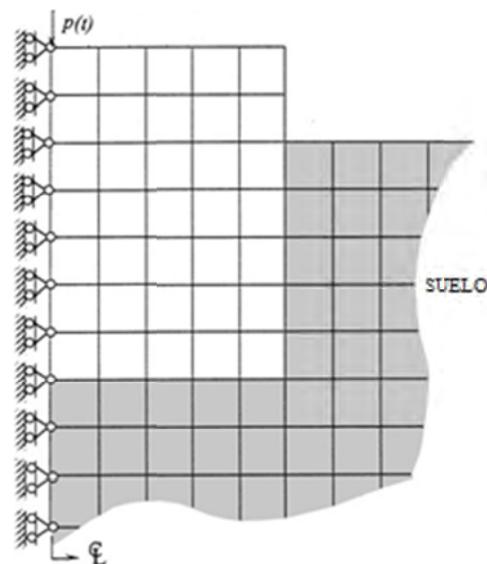


Figura 3.5: Modelo de elementos finitos axisimétrico (Liao y Roesset, 1997).

### 3.5.3. Modelo tridimensional

El mismo se encuentra conformado por elementos finitos sólidos (ver Figura 3.6) y permite representar la situación más general posible. Para confeccionar la sección circular del pilote se utiliza un mallado constituido completamente por elementos de base cuadrangular, tal como se puede observar en la Figura 3.7.

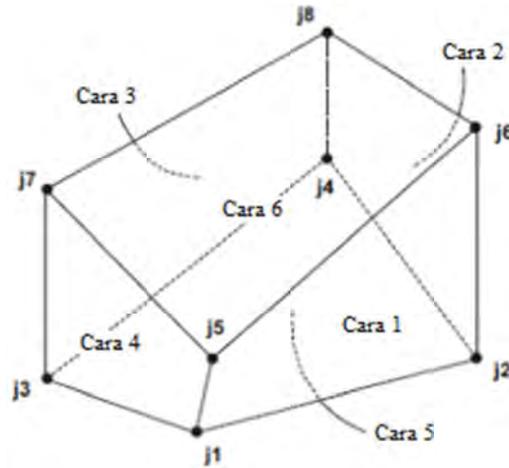


Figura 3.6: Elemento finito sólido tridimensional (Manual SAP2000, 2010).

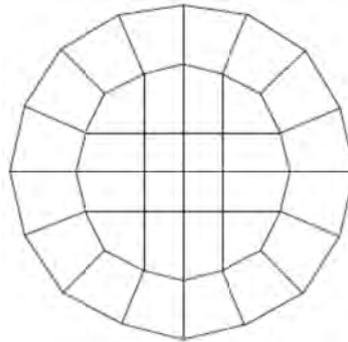


Figura 3.7: Mallado para región circular (Manual SAP2000, 2010).

Este tipo de modelación permite representar cualquier clase de sección transversal, aplicar cargas y reproducir defectos asimétricos y considerar el suelo ubicado en el lateral y por debajo del pilote, salvando ciertas limitaciones de los modelos anteriores. Sin embargo, estos modelos resultan computacionalmente ineficientes y costosos, debido a la gran cantidad de elementos necesarios para reproducir adecuadamente el problema.

Para solucionar este inconveniente se desarrolló un modelo análogo al unidimensional, en el que se construyó el pilote utilizando elementos finitos sólidos tridimensionales y se colocó un conjunto de resortes y amortiguadores en el lateral y en la base del mismo para simular la interacción con el suelo.

En el caso de los vínculos ubicados en el lateral, se utilizaron los mismos valores que los calculados para el modelo unidimensional, pero se distribuyeron de manera equitativa en todos los nodos del perímetro.

En lo que respecta al sustento en la punta del pilote, adicionalmente a los vínculos verticales presentados anteriormente, se colocaron resortes y amortiguadores actuando en la dirección horizontal, cuyos coeficientes se calculan de la siguiente forma (Wolf, 1997):

$$K_h = 8G_s r_p / (2 - \nu_s) \quad (3.12)$$

$$C_h = 0.58 K_h r_p / V_s \quad (3.13)$$

Los mismos fueron ubicados en todos los nodos de la base y su valor fue estimado en función del área tributaria de cada uno, respecto de la sección transversal total del pilote.

### 3.6. Resolución de las ecuaciones de movimiento

La ecuación de equilibrio que gobierna la respuesta dinámica lineal de un sistema de elementos finitos (Bathe, 2006) es:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{R} \quad (3.14)$$

donde  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{K}$  son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente;  $\mathbf{R}$  es el vector de cargas aplicadas externamente a la estructura; y  $\mathbf{U}$ ,  $\dot{\mathbf{U}}$  y  $\ddot{\mathbf{U}}$  son los vectores de desplazamiento, velocidad y aceleración del ensamblaje de elementos finitos.

Matemáticamente, la ecuación (3.14) representa un sistema de ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden y, en principio, la solución podría obtenerse por cualquier procedimiento estándar para la solución de ecuaciones diferenciales a coeficientes constantes. Sin embargo, dichos procedimientos pueden volverse muy costosos si el orden de las matrices es grande.

Los métodos de resolución de las ecuaciones de movimiento que se utilizan en el análisis de elementos finitos son dos: el de integración directa y el de superposición modal. A pesar de que ambas técnicas puedan parecer muy diferentes a primera vista, en realidad se encuentran íntimamente relacionadas, por lo que la elección de un método o el otro debe ser determinada únicamente por su efectividad numérica (Bathe, 2006).

En algunos casos puede resultar ventajoso utilizar los métodos de integración directa, frente al de superposición modal, debido a que estos no requieren la evaluación de los modos de vibración (frecuencias y formas modales), que resulta una tarea computacional muy importante en sistemas con de muchos grados de libertad. En general, la integración directa tiende a ser más útil en el cálculo de la respuesta de estructuras grandes y complejas sometidas a cargas impulsivas de corta duración, que tienden a excitar muchos modos de vibración, pero que requieren sólo la evaluación de una historia de respuesta corta (Clough y Penzien, 2003), como es el caso del problema que se considera en el presente trabajo.

En los métodos de integración directa, la ecuación (3.14) se integra utilizando un procedimiento numérico paso a paso, sin realizar ninguna transformación previa. En esencia, la integración numérica directa se basa en dos principios. En primer lugar, en vez de intentar satisfacer la ecuación (3.14) en cualquier tiempo  $t$ , se pretende evaluar la respuesta para una serie de pequeños intervalos de tiempo  $\Delta t$ , generalmente adoptados de igual magnitud por una conveniencia computacional. Esto implica que, básicamente, el equilibrio (estático) se logra en un número discreto de tiempos dentro del intervalo total de la solución. Por lo tanto, todas las técnicas de solución empleadas en el análisis estático pueden también utilizarse eficientemente en la integración directa. El segundo concepto en que se basan estos métodos es que se debe asumir una variación de los desplazamientos, velocidades y aceleración dentro de cada intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Es dicha forma de variación la que determina la precisión, la estabilidad y el costo

de la solución (Bathe, 2006; Clough y Penzien, 2003).

Una observación importante es que el costo del procedimiento de integración directa, es decir, el número de operaciones requeridas, es directamente proporcional al número de pasos de tiempo necesarios para la solución. Por este motivo, la elección de un paso de tiempo apropiado es de mucha importancia. Por un lado, este debe ser lo suficientemente pequeño como para proveer una buena precisión en los resultados pero, por el otro, no debe ser menor de lo necesario de modo de no encarecer en gran medida la resolución (Bathe, 2006). A su vez, se debe tener en cuenta la historia de carga y la estabilidad del método elegido.

En este trabajo, se decidió utilizar el método de Newmark (Bathe, 2006; Clough y Penzien, 2003), en el cual se adoptan las siguientes suposiciones:

$${}^{t+\Delta t}\dot{\mathbf{U}} = {}^t\dot{\mathbf{U}} + [(1 - \gamma) {}^t\ddot{\mathbf{U}} + \gamma {}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{U}}]\Delta t \quad (3.15)$$

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U} = {}^t\mathbf{U} + {}^t\dot{\mathbf{U}}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right) {}^t\ddot{\mathbf{U}} + \beta {}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{U}}\right]\Delta t^2 \quad (3.16)$$

donde  $\beta$  y  $\gamma$  son parámetros que se eligen a fin de obtener precisión y estabilidad en la integración. Los superíndices  $t$  y  $t + \Delta t$  se ubican a la izquierda del vector que varía en forma temporal (respuesta dinámica).

Adicionalmente a las ecuaciones anteriores, se debe considerar la ecuación de equilibrio en el tiempo  $t + \Delta t$ :

$$\mathbf{M} {}^{t+\Delta t}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C} {}^{t+\Delta t}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K} {}^{t+\Delta t}\mathbf{U} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} \quad (3.17)$$

Cuando  $\gamma = \frac{1}{2}$  y  $\beta = \frac{1}{4}$  el método coincide con el de la aceleración media constante, también llamado regla del trapecio. En este caso, el proceso de integración resulta incondicionalmente estable, lo cual implica que, sin importar el intervalo de tiempo adoptado, la convergencia de la solución está asegurada.

De esta manera, la elección del mismo se debió hacer de manera tal de representar adecuadamente la carga actuante y obtener una precisión aceptable en los resultados. Teniendo en cuenta lo anterior, en los modelos analizados en este trabajo se adoptó un valor de  $\Delta t = 10^{-5}$  seg.

### 3.7. Análisis de la respuesta

Tal como se mencionó en la sección 2.2.4, los registros obtenidos en la cabeza del pilote pueden ser analizados tanto en el dominio del tiempo (método eco sónico) como en el de la frecuencia (método de respuesta impulsiva). A continuación se describen de forma genérica ambas posibilidades, detallando los gráficos y las fórmulas utilizadas.

#### 3.7.1. Análisis en el dominio del tiempo

El mismo consiste en detectar, dentro de los registros de aceleración, velocidad y/o desplazamiento, el inicio de la propagación de la onda de compresión generada por la carga de

impacto, y las sucesivas reflexiones producidas por los cambios en la impedancia del sistema.

En general, las reflexiones relativamente bien definidas se atribuyen a cambios de sección transversal, mientras que las de menor amplitud se suponen producto de variaciones en la resistencia del suelo circundante. Si se conocen relativamente bien las características del terreno, se pueden localizar defectos ubicados a lo largo del pilote, así como determinar la longitud real del mismo.

A partir de la diferencia de tiempos entre dichos puntos es posible calcular las distancias correspondientes, mediante la siguiente expresión:

$$L = \frac{V_{1D}\Delta t}{2} \quad (3.18)$$

### 3.7.2. Análisis en el dominio de la frecuencia

En este caso, los registros temporales discretos deben ser transformados al dominio de la frecuencia mediante la utilización de la transformada discreta de Fourier (Clough y Penzien, 2003), obteniéndose así los espectros correspondientes, también en forma discreta.

Dichos espectros exhiben una serie de picos asociados con las frecuencias naturales del pilote, y con el tiempo que le lleva a las ondas longitudinales viajar desde el punto de impacto hasta los sectores en los que se producen las reflexiones y regresar nuevamente a la superficie. Mediante la identificación de los mismos, se pueden estimar ciertos parámetros físicos del elemento.

Si se conoce la velocidad de propagación de ondas en el hormigón, a partir de los intervalos de frecuencia entre dos picos consecutivos se pueden obtener las diferentes longitudes, utilizando ecuación que se muestra a continuación, la cual se deriva a partir del estudio de propagación de ondas en barras (Richart et. al., 1970):

$$L = \frac{V_{1D}}{2\Delta f} \quad (3.19)$$

En la Figura 3.8 se puede apreciar, a modo de ejemplo, un espectro de desplazamientos típico con la identificación de los sucesivos picos.

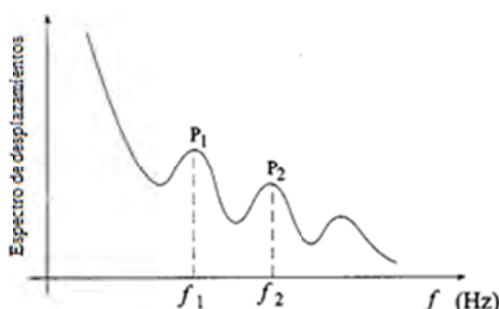


Figura 3.8: Espectro de desplazamientos de un pilote (Liao y Roeset, 1997).

Cuando el pilote se encuentra inserto en el terreno, el movimiento del mismo se ve amortiguado. A medida que el suelo es más denso y el pilote más largo, existe una mayor atenuación, de modo tal que la amplitud entre máximos y mínimos se reduce, tornando

difícil la detección de los picos.

En este sentido, puede resultar más ventajosa la utilización de los gráficos de movilidad. Los mismos se obtienen realizando el cociente entre los espectros de la respuesta en velocidad y la carga que solicita al sistema. Para ello se debe, además de la velocidad, registrar la variación de la carga en el tiempo y transformar el registro al dominio de la frecuencia. De esta forma, la movilidad se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$M = \left| \frac{V_0}{\bar{p}_0} \right| \quad (3.20)$$

donde  $V_0$  y  $\bar{p}_0$  son, respectivamente, los valores complejos de la transformada de Fourier de la velocidad y la carga de impacto a cada frecuencia específica. El operador  $||$  representa el valor absoluto.

En los gráficos resultantes existe una región lineal en el rango de frecuencias más bajas, seguida de una zona de transición y una última donde la respuesta es estacionaria, tal como se observa en la Figura 3.9. En este último sector, se pueden identificar valores máximos ( $P$ ) y mínimos ( $Q$ ), alternando alrededor de un promedio ( $R = \sqrt{PQ}$ ).

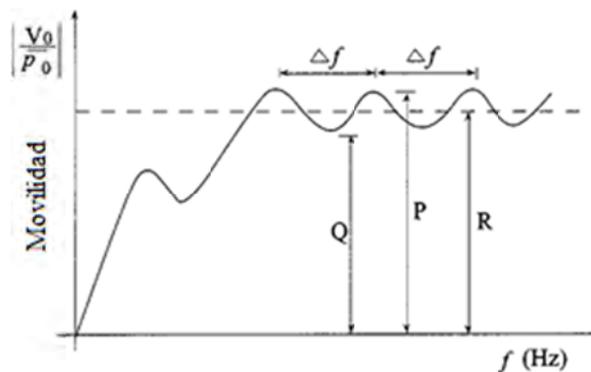


Figura 3.9: Gráfico de movilidad (Liao y Roesset, 1997).

Estos gráficos presentan ciertas ventajas sobre los espectros de los registros, debido a que la forma del espectro de carga amplifica la curva en la región de frecuencias elevadas, lo cual ayuda a detectar más fácilmente los picos. A su vez, permiten estimar el área de la sección transversal del pilote como:

$$A = \frac{1}{R \rho_h V_{1D}} \quad (3.21)$$

### 3.8. Pilotes aislados

#### 3.8.1. Casos de análisis

Los resultados numéricos fueron obtenidos mediante la utilización del programa de elementos finitos SAP 2000 versión 14. A fin de representar el pilote de manera aislada, teniendo en consideración el suelo circundante, se plantearon modelos de elementos finitos

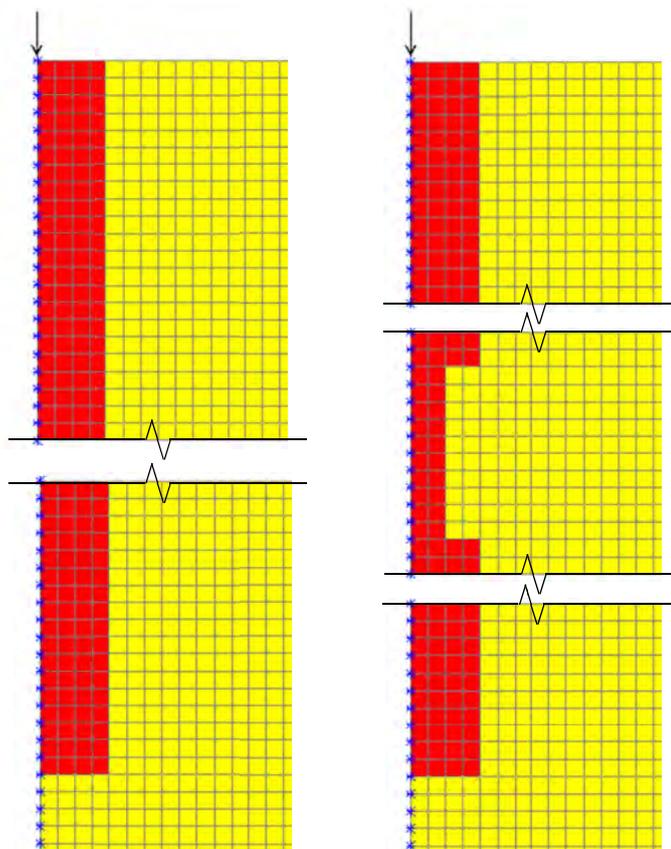
unidimensionales, bidimensionales (axisimétricos) y tridimensionales. Se consideró, a su vez, la existencia de defectos que produjeran la reducción de la sección transversal, tanto de forma simétrica como asimétrica, en una zona determinada. El tamaño de los elementos se eligió en función de la geometría del pilote y de los defectos considerados, procurando mantener una relación de dimensiones lo más uniforme posible.

En primer lugar, se trabajó con el modelo unidimensional, utilizando elementos finitos isoparamétricos de dos nodos, de longitud constante, aplicando en cada nodo la masa concentrada correspondiente a los elementos que concurrían al mismo, además de un resorte y un amortiguador cuyas constantes fueron calculadas de acuerdo a lo explicado en el apartado 3.5.1. Se consideró, en una primera etapa, el pilote intacto, y luego se lo modeló con un defecto del tipo cuello simétrico, respetando las dimensiones especificadas en la sección 3.2. En la Figura 3.10 se puede observar una captura de pantalla del programa con el modelo en cuestión:



**Figura 3.10:** Modelo de elementos finitos unidimensional.

A continuación, tal como se explicó en la sección 3.5.2, se realizó un modelo bidimensional axisimétrico, empleando elementos finitos isoparamétricos de cuatro nodos. Se modeló la fundación así como el suelo utilizando una malla de elementos cuadrados. De la misma forma que lo expresado anteriormente, se confeccionaron pilotes sanos y con defectos simétricos, tal como se puede observar en la Figura 3.11.



**Figura 3.11:** Modelo de elementos finitos axisimétrico (intacto y defectuoso).

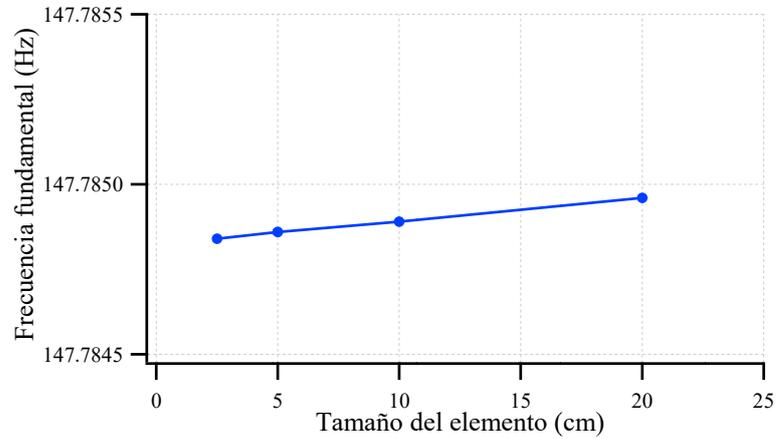
A pesar de que los modelos anteriores resultan muy atractivos, debido a su simplicidad de construcción y a su eficiencia computacional, presentan algunas limitaciones que los convierten en inviables para ser utilizados en el presente trabajo, más que a modo de comparación. En primer lugar, no permiten la representación de defectos no simétricos. A su vez, y esta es la razón por la cual se ha descartado su aplicación en el problema, no es posible simular con estos modelos la estructura completa de pilotes vinculados mediante un cabezal.

Por lo tanto, resultó necesario recurrir a un modelo tridimensional con el objeto de salvar las deficiencias que presentaban los anteriores. Para ello, a fin de simular el efecto del suelo ubicado en el lateral y por debajo del pilote, se propuso adaptar los vínculos descriptos para el caso unidimensional.

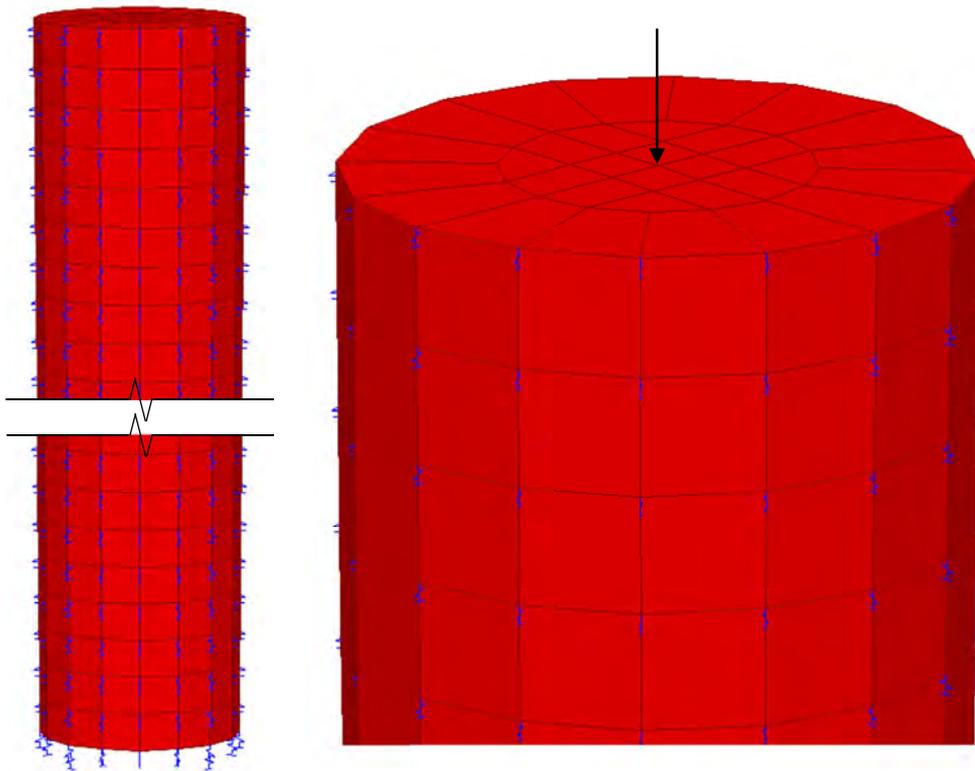
Se modeló el elemento estructural aislado utilizando elementos finitos isoparamétricos de ocho nodos. El tamaño de los elementos finitos en la dirección vertical se seleccionó en 5 cm., teniendo en cuenta el valor adoptado por Ezeberry (2003). Para verificar el correcto comportamiento del modelo resultante se realizó un análisis de convergencia acerca de la primera frecuencia de vibración vertical, para diferentes longitudes de los elementos, el cual se exhibe en la Figura 3.12.

Se distribuyeron los resortes y amortiguadores a lo largo de la superficie lateral, cuyas constantes se obtuvieron dividiendo los coeficientes calculados con las ecuaciones (3.8) y (3.9) por el número de nodos del perímetro. De la misma manera, se colocaron vínculos en los nodos de la cara inferior, cuyos valores fueron determinados en función de los coeficientes presentados

en las ecuaciones (3.10) a (3.13) y del área tributaria de cada nodo, en relación a la superficie total. En la Figura 3.13 se presenta el mallado utilizado en el modelo y la ubicación de los resortes y amortiguadores (vale aclarar que ambos se ingresan al programa a través de un sólo vínculo que los incluye).



**Figura 3.12:** Análisis de convergencia.



**Figura 3.13:** Modelo de elementos finitos tridimensional propuesto.

De acuerdo con lo que se detalló en la sección 3.2, y como se puede apreciar en la Figura 3.14, se modelaron dos defectos a una profundidad fijada. El primero consistió en una reducción simétrica de la mitad del radio, a lo largo de una altura determinada, y el segundo de iguales dimensiones, pero sólo abarcando un cuarto del perímetro del pilote.

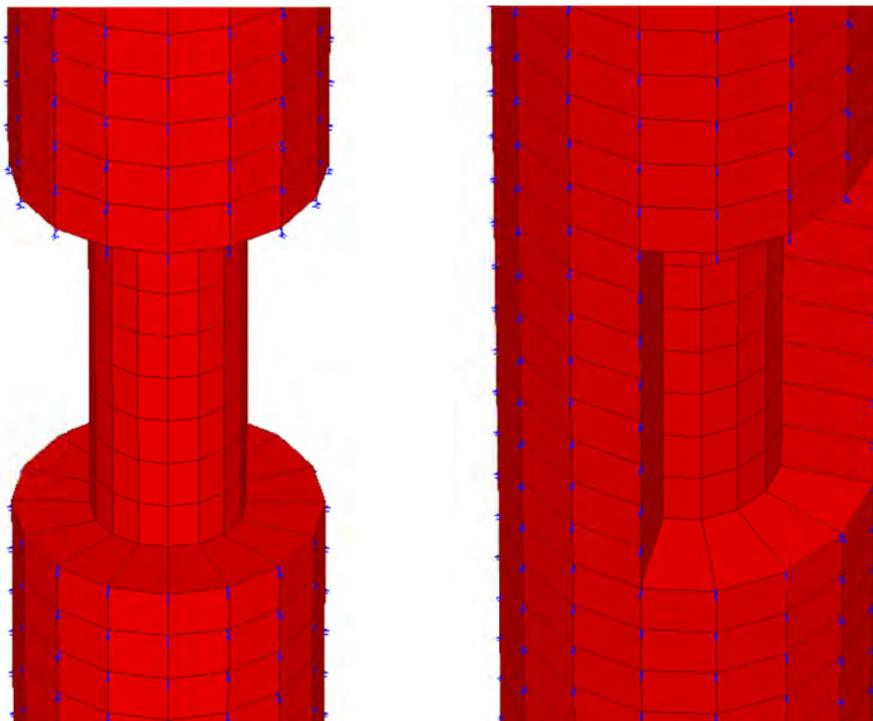


Figura 3.14: Defectos simétrico y asimétrico modelados.

Tal como se indica en las figuras anteriores, en todos los casos la carga se aplicó en forma puntual en un nodo coincidente con el eje del pilote y ubicado sobre la cabeza del mismo. Esto hizo que el área en la cual se distribuyó la misma haya sido diferente para cada uno de los modelos. En el modelo unidimensional, por ejemplo, dicha área coincidió con la del pilote, y en los modelos más complejos resultó ser una función del número y tamaño de los elementos finitos que rodeaban al nodo en cuestión. Sin embargo, a pesar de esto, y como se podrá observar más adelante, no se apreciaron diferencias significativas entre los resultados obtenidos con uno y otros modelos, lo que confirmó la validez de aplicar la carga en forma distribuida en el modelo unidimensional.

En todos los casos, la medición de los parámetros dinámicos (aceleración, velocidad y desplazamiento) se llevó a cabo en un nodo sobre la superficie ubicado en la mitad del radio, a excepción del modelo unidimensional que, por razones obvias, se debió realizar en el nodo coincidente con el de la aplicación de la carga.

Teniendo en cuenta la longitud del pilote, la carga aplicada y la velocidad de propagación de las ondas en el hormigón, la duración total del evento se seleccionó en 0.01 seg., con el objetivo de abarcar dentro del mismo la primera reflexión desde la punta.

### 3.8.2. Comparación de resultados

A continuación se presentan las respuestas dinámicas que se obtuvieron de los modelos numéricos anteriormente descritos, para el pilote intacto. En las Figuras 3.15 a 3.17 se pueden apreciar los registros de aceleración, velocidad y desplazamiento registrados en la cabeza, en función del tiempo.

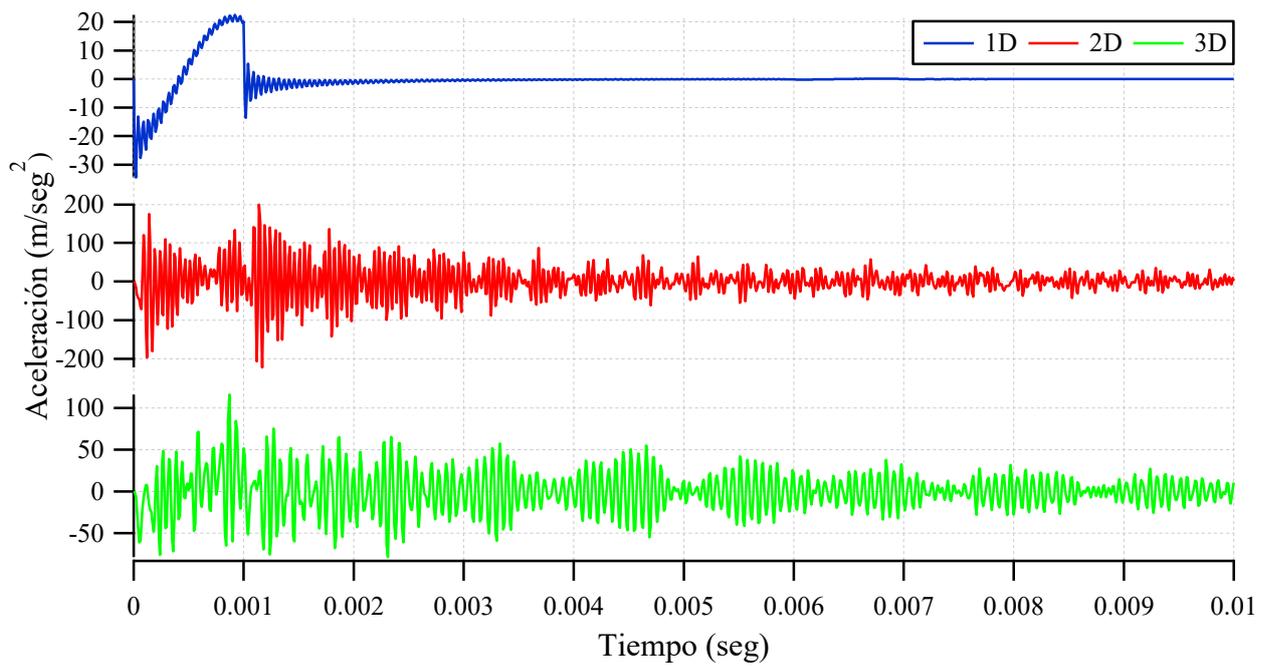


Figura 3.15: Gráficos de aceleración - Pilote intacto.

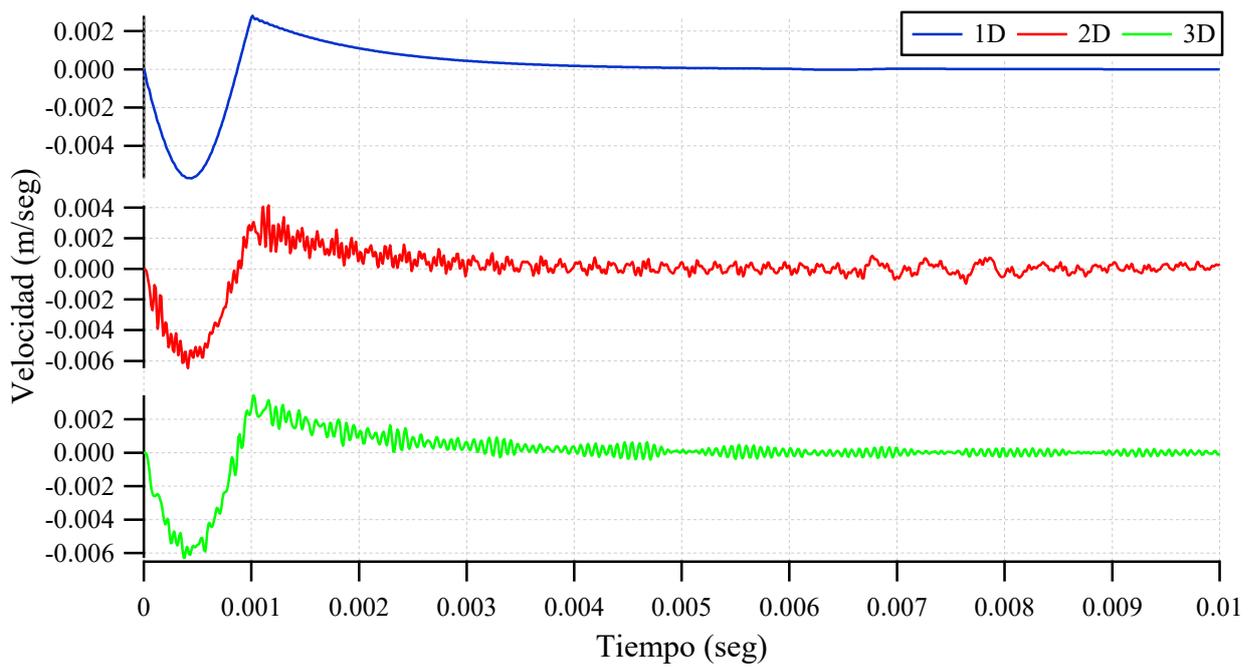


Figura 3.16: Gráficos de velocidad - Pilote intacto.

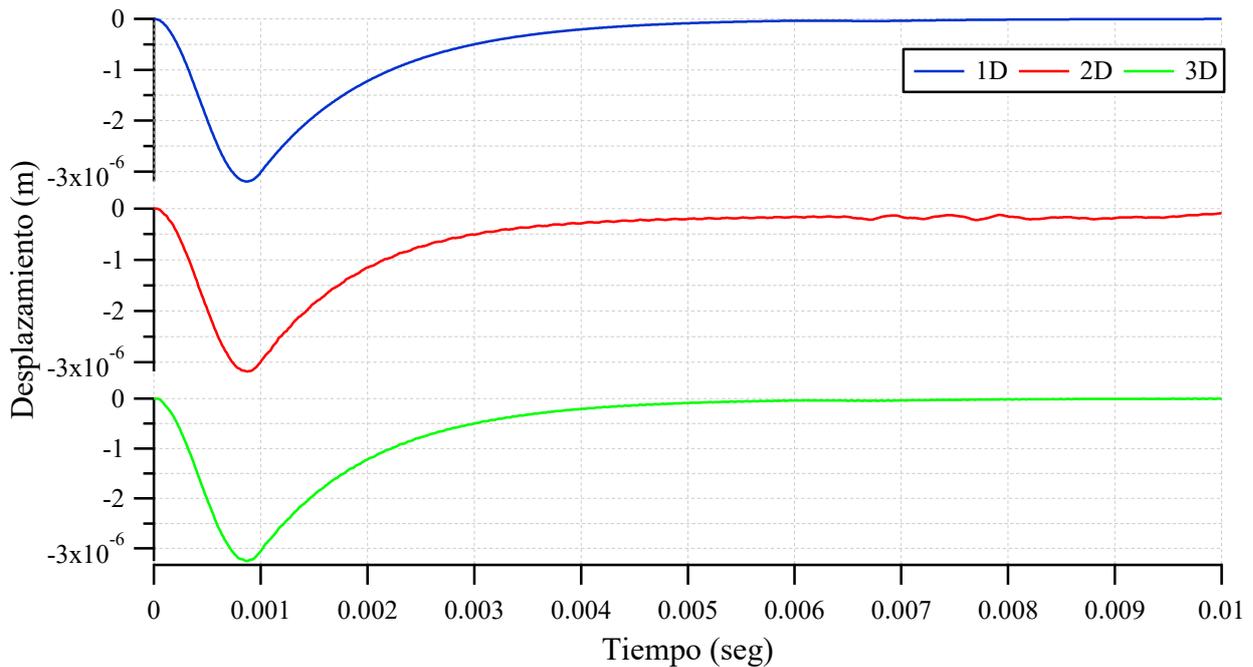


Figura 3.17: Gráficos de desplazamiento - Pilote intacto.

Como se puede observar en los gráficos anteriores, especialmente en los registros de aceleración, los modelos bidimensional y tridimensional exhiben vibraciones de elevada frecuencia, que no aparecen en el modelo unidimensional. Esto se debe en parte a la discretización de elementos finitos adoptada, pero fundamentalmente a los efectos combinados de reflexiones y refracciones de la onda desde los límites laterales y la interface (Liao y Roesset, 1997).

A fin de clarificar la respuesta se utilizó un filtro de “pasa baja”, lo cual implica que se consideran únicamente las componentes de frecuencia por debajo de un cierto valor denominado “frecuencia de corte”. Para ello, los registros en el dominio del tiempo fueron transformados al de la frecuencia utilizando la transformada discreta de Fourier (Clough y Penzien, 2003), donde se eliminaron las componentes mayores a la mencionada frecuencia y luego se recuperaron utilizando la transformada inversa. En este caso se decidió utilizar como corte la mayor frecuencia significativa contenida en la carga que, como se verá más adelante, resultó ser de 1500 Hz.

Los gráficos de aceleración, velocidad y desplazamiento filtrados se muestran en las Figuras 3.18 a 3.20. En ellos se puede observar que, una vez filtradas, las tres ondas coinciden casi exactamente. Se realizó un acercamiento en el intervalo dentro del cual se debía identificar el regreso de la onda producido por la reflexión desde la punta del pilote. A su vez, se marcaron los instantes de tiempo en los que se registraron los valores máximos y mínimos, provocados por la aplicación carga y las reflexiones. A partir de la diferencia de tiempo entre dos picos es posible calcular la longitud del pilote utilizando la ecuación (3.18). Los resultados obtenidos a partir de las curvas de aceleración, velocidad y desplazamiento, para cada modelo, se adjuntan en las Tablas 3.2, 3.3 y 3.4, respectivamente.

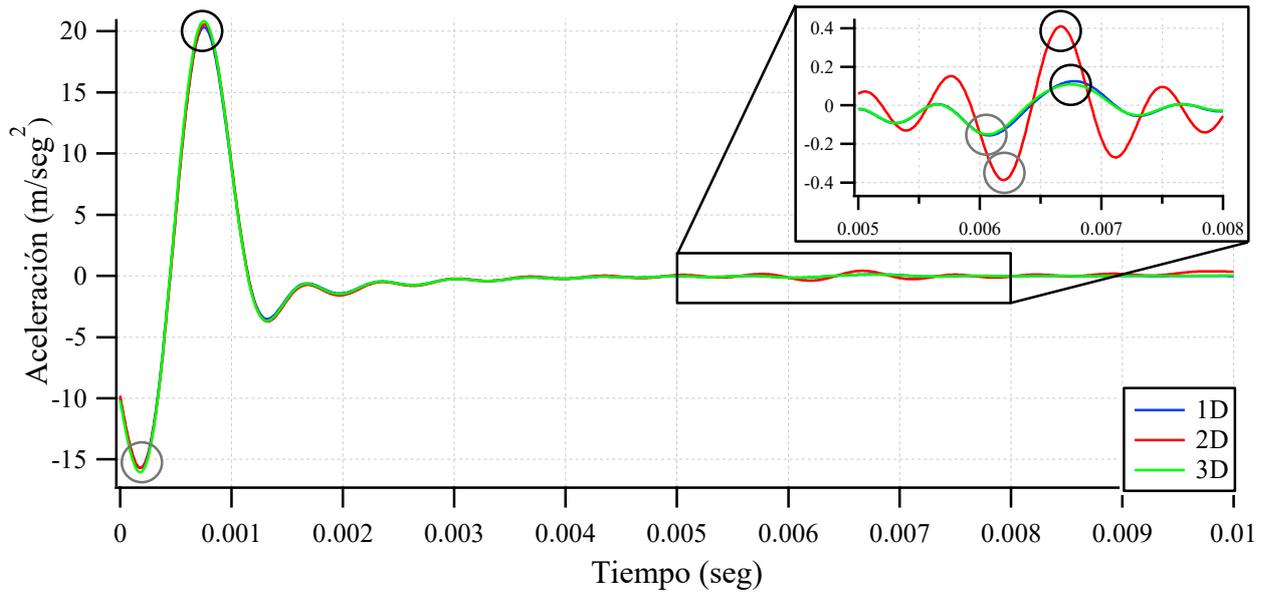


Figura 3.18: Gráficos de aceleración filtrados - Pilote intacto.

Tabla 3.2: Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilote intacto.

Modelo	Entre	Longitud (m)	Error (%)
1D	Máximos	12.17	1.4
	Mínimos	11.90	0.8
2D	Máximos	11.92	0.7
	Mínimos	12.15	1.3
3D	Máximos	12.11	0.9
	Mínimos	11.86	1.2

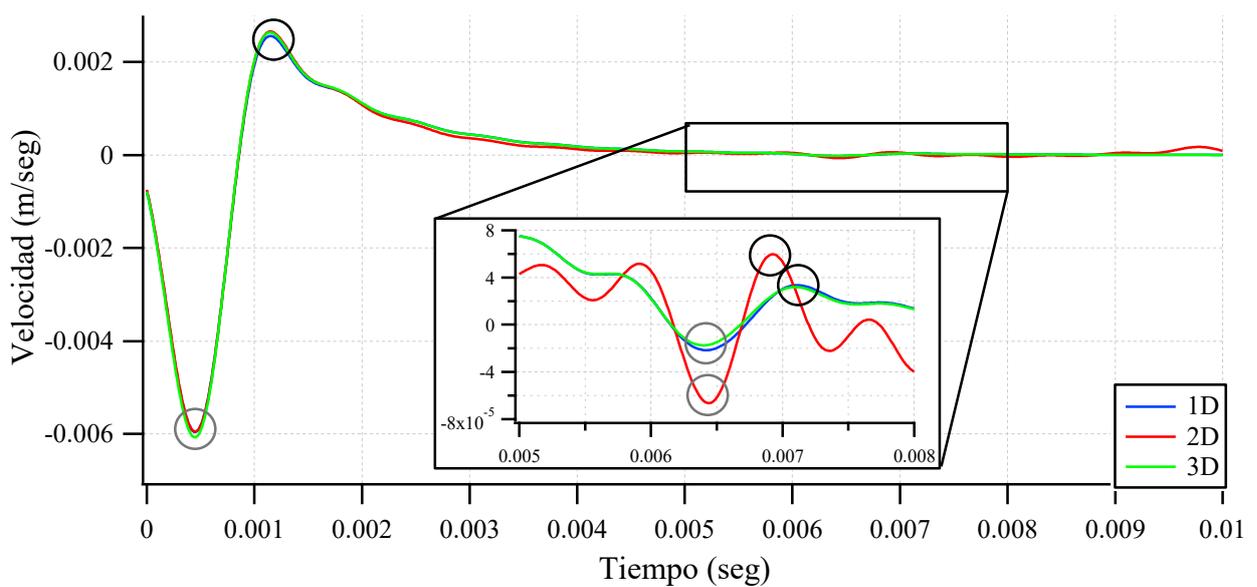
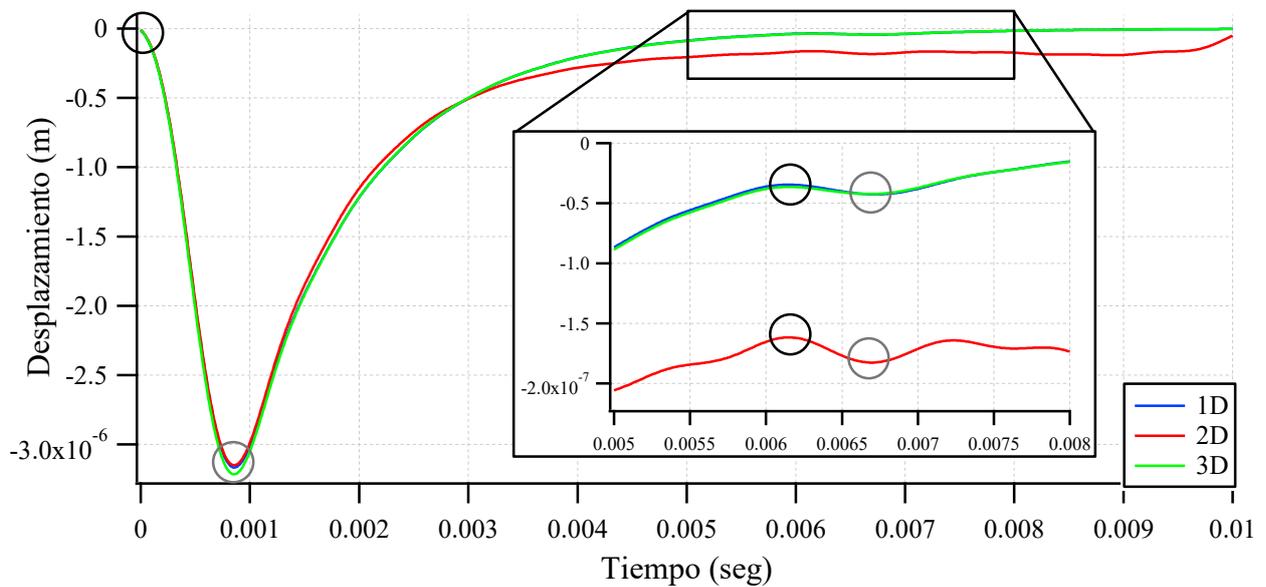


Figura 3.19: Gráficos de velocidad filtrados - Pilote intacto.

**Tabla 3.3:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilote intacto.

Modelo	Entre	Longitud (m)	Error (%)
1D	Máximos	12.03	0.2
	Mínimos	12.05	0.4
2D	Máximos	11.66	2.8
	Mínimos	12.09	0.7
3D	Máximos	12.00	0.0
	Mínimos	12.00	0.0



**Figura 3.20:** Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilote intacto.

**Tabla 3.4:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilote intacto.

Modelo	Entre	Longitud (m)	Error (%)
1D	Máximos	12.41	3.4
	Mínimos	11.82	1.5
2D	Máximos	12.41	3.4
	Mínimos	11.78	1.8
3D	Máximos	12.41	3.4
	Mínimos	11.76	2.0

En general, se obtuvo una buena concordancia entre el valor real y los calculados en los diferentes modelos, considerando los picos máximos y mínimos de los registros filtrados. Los errores cometidos no superan el 4%.

Se considera importante destacar que la presencia del suelo circundante al pilote provoca la

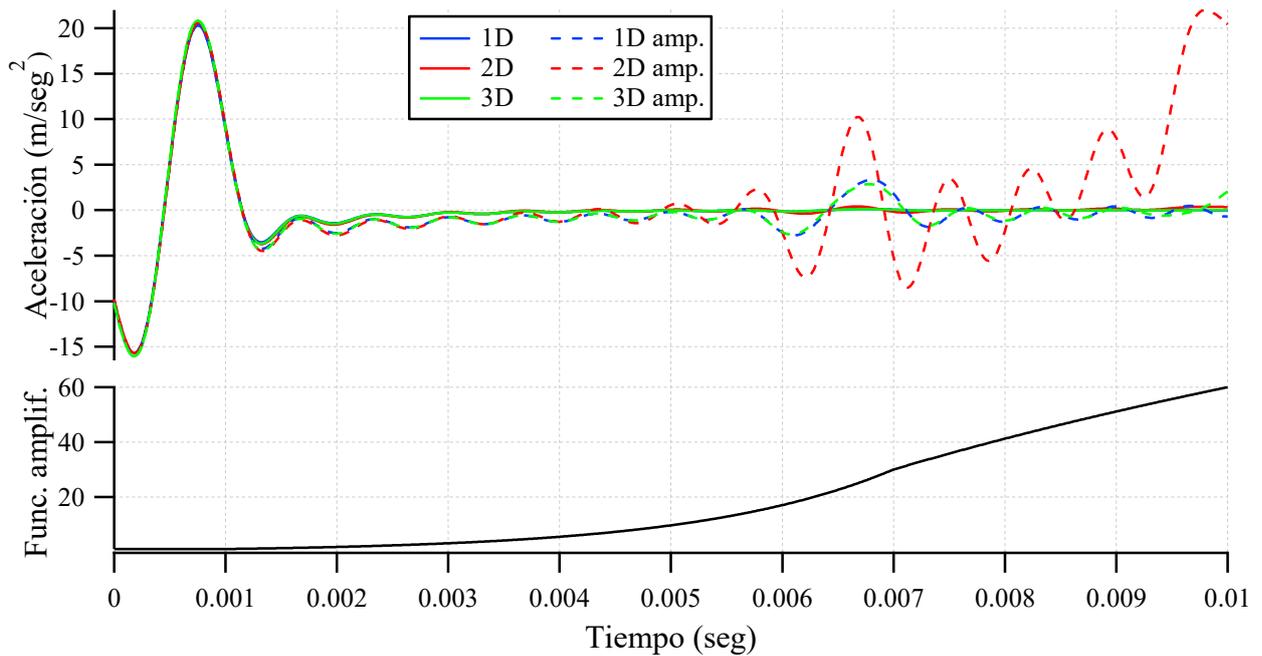
disipación de una parte de la energía inducida por el impacto, debido al amortiguamiento geométrico existente. Esto se ve reflejado en los registros anteriores como una gran atenuación en la amplitud de las reflexiones que, en condición de vinculación libre, alcanzarían valores extremos similares, o incluso mayores, a los iniciales.

Para salvar dicha dificultad, resulta necesario amplificar los registros a partir del instante en el que finaliza la aplicación de la carga. En este trabajo se decide utilizar una función de amplificación desarrollada por Ezeberry (2003). La misma consiste en la combinación de funciones elementales: una constante de valor unitario, una función exponencial y una función logarítmica, de la siguiente forma:

$$f_{amp}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T_0 \\ b_0 \exp(b_1 t) & T_0 \leq t \leq T_1 \\ b_2 + b_3 \ln(t) & T_1 \leq t \leq T_2 \end{cases} \quad (3.22)$$

Dicha función multiplica directamente al registro que se desea amplificar. Los valores numéricos de los coeficientes  $b_i$  ( $i = 0, 1, 2$  y  $3$ ) se adoptan del siguiente modo: la función exponencial comienza con un valor unitario en el instante  $T_0$  y alcanza un cierto valor en  $T_1$ . El valor de  $T_1$  depende en gran medida del momento en el que ocurre la reflexión de la onda. La función exponencial tiende a tener un crecimiento abrupto hacia el final del período comprendido entre  $T_0$  y  $T_1$ , y es por ello que para evitar una distorsión exagerada de los registros se continúa con una función logarítmica. El valor de  $T_2$  puede ser elegido arbitrariamente, pero generalmente se lo adopta coincidente con el final del evento (Ezeberry, 2003).

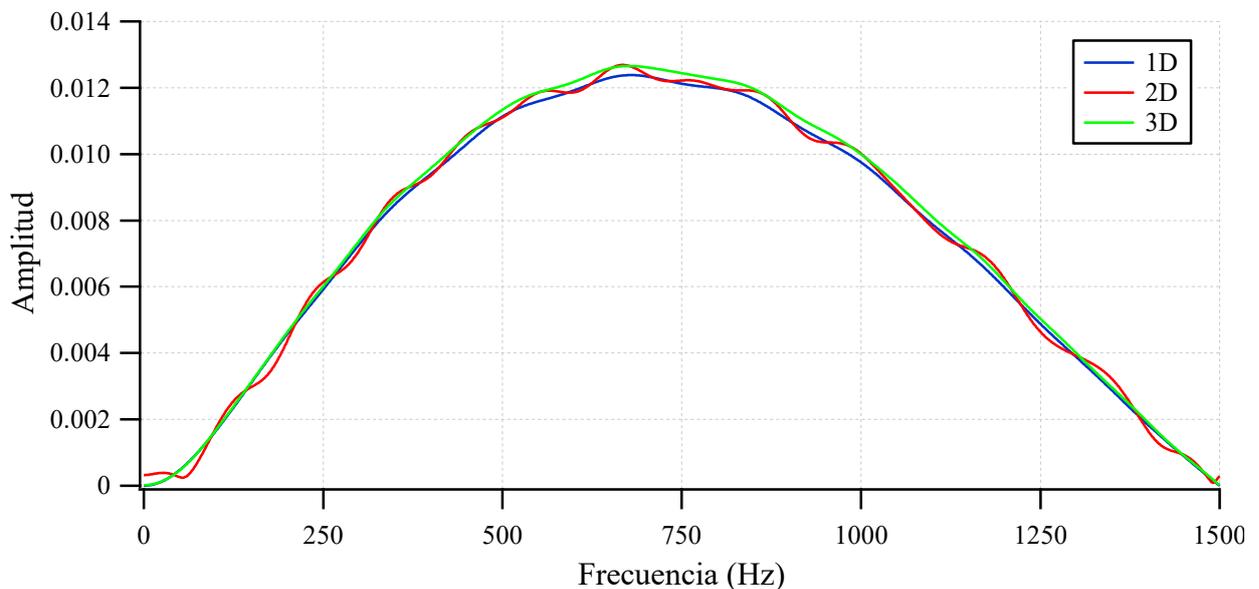
A modo de ejemplo se presentan en la Figura 3.21 los registros de aceleración filtrados correspondientes a la Figura 3.18 y se superponen, en línea de trazo, las respectivas curvas amplificadas. En el sector inferior se puede apreciar la función de amplificación adoptada en este caso.



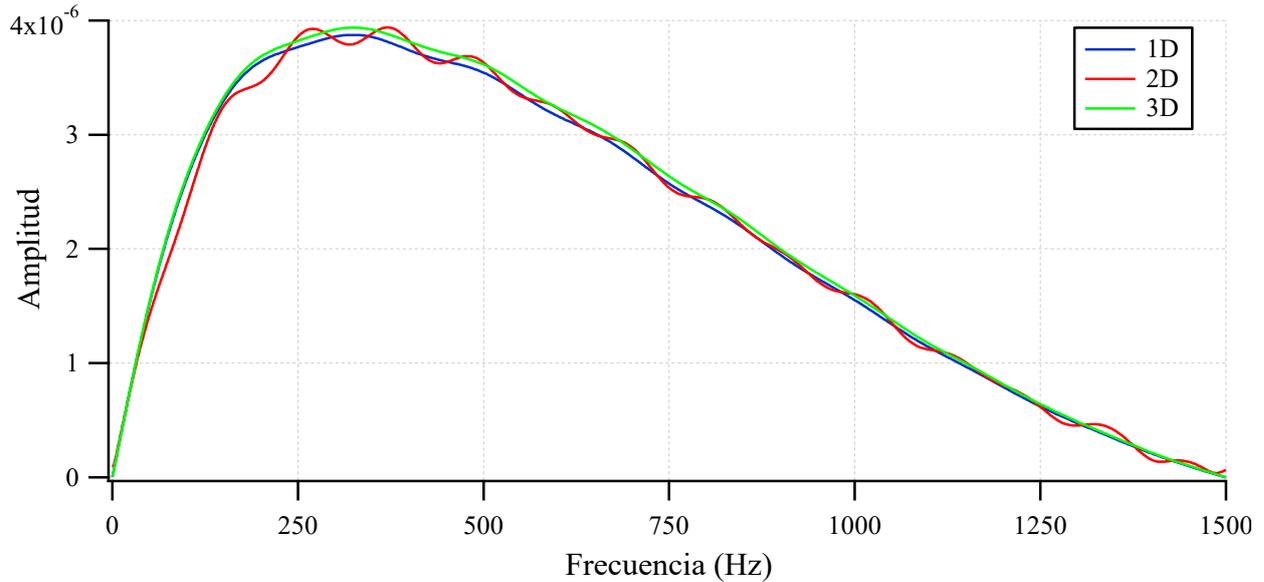
**Figura 3.21:** Gráficos de aceleración filtrados y amplificados - Pilote intacto.

Resulta evidente que, una vez amplificados los registros, es posible identificar a simple vista el regreso de la onda desde el extremo inferior del pilote. También se observa que en el modelo bidimensional se produce una gran distorsión de la curva a partir de dicho instante de tiempo.

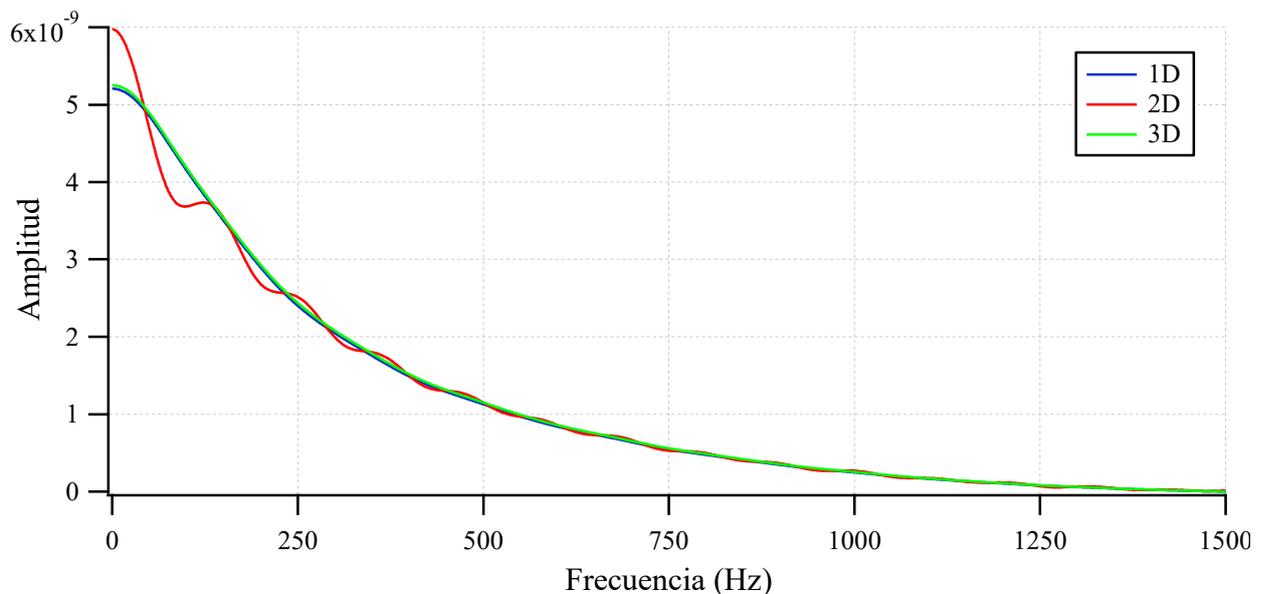
A continuación, las respuestas temporales de aceleración, velocidad y desplazamiento anteriores fueron transformados al dominio de la frecuencia, mediante el uso de la transformada discreta de Fourier (Clough y Penzien, 2003). Los espectros obtenidos de esa forma se adjuntan en las Figuras 3.22 a 3.24 e indican el peso relativo de cada componente de frecuencia en la cantidad transformada.



**Figura 3.22:** Espectros de aceleración - Pilote intacto.



**Figura 3.23:** Espectros de velocidad - Pilote intacto.



**Figura 3.24:** Espectros de desplazamiento - Pilote intacto.

En las gráficas anteriores se puede observar que, para los modelos unidimensional y tridimensional, resulta muy dificultoso detectar los picos de frecuencia, debido al efecto de atenuación provocado por el amortiguamiento del sistema pilote-suelo. En el modelo bidimensional se exhiben algunos picos, sin embargo no fue posible calcular valores confiables de la longitud del pilote a partir de la diferencia de frecuencia entre ellos.

A fin de realizar el gráfico de movilidad es necesario determinar en primer lugar el espectro de la carga que excita al sistema, en este caso un pulso dinámico de 1 ms. de duración y 5000 N. de amplitud. El mismo se presenta en la Figura 3.25 y se puede advertir la presencia de una “frecuencia de corte” a los 1500 Hz., que establece el valor máximo a ser excitado por el impacto sin que se presenten discontinuidades.

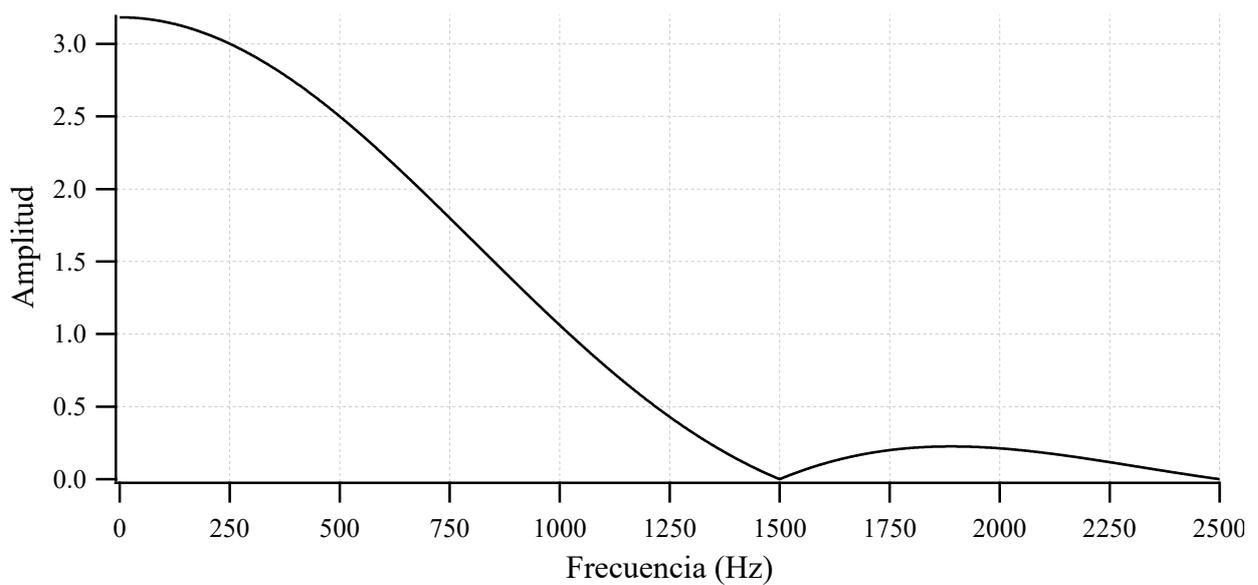


Figura 3.25: Espectro de la carga.

Dividiendo las amplitudes de los espectros de velocidad y de carga, para cada valor de frecuencia, se pudo obtener el gráfico de movilidad. En la Figura 3.26 se presentan las curvas correspondientes a cada uno de los modelos. Se realizó un acercamiento en la zona de interés (región de respuesta estacionaria) para los modelos unidimensional y tridimensional, a fin de observar más claramente los picos de frecuencia.

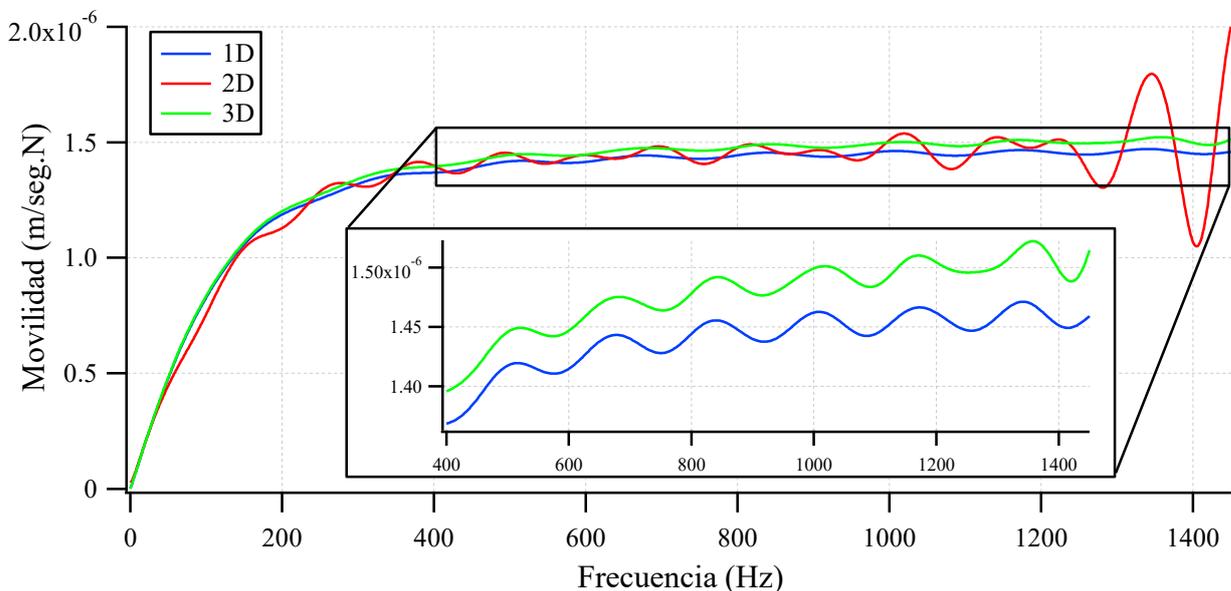


Figura 3.26: Gráficos de movilidad - Pilote intacto.

Vale aclarar que en el modelo bidimensional, a diferencia de los otros dos, los picos de frecuencia son detectables a simple vista pero resultan muy irregulares, aumentando mucho su amplitud para las frecuencias más altas. A partir de los valores máximos y mínimos de los gráficos de movilidad fue posible estimar la longitud y la sección transversal del pilote, haciendo uso de las ecuaciones (3.19) y (3.21), respectivamente. El promedio de los valores calculados

para cada modelo se presenta en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de movilidad - Pilote intacto.

Modelo	Entre	Longitud (m)	Error (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Error (%)
1D	Máximos	12.23	1.9	0.072	1.9
	Mínimos	12.02	0.2		
2D	Máximos	19.23	60.3	0.073	3.3
	Mínimos	18.68	55.7		
3D	Máximos	12.11	0.9	0.070	1.0
	Mínimos	11.95	0.4		

A excepción de las longitudes arrojadas por el modelo bidimensional, se puede observar que el resto de los resultados se aproximan a los reales. Se comprueba de esta forma la ventaja que presenta el gráfico de movilidad respecto a los espectros de los registros de aceleración, velocidad y desplazamiento, ya que permite detectar más claramente la ubicación de los picos y provee estimaciones confiables no sólo de la longitud, sino también de la sección transversal del pilote.

A continuación se analizan los resultados obtenidos de los modelos con la presencia de un defecto del tipo “cuello” (reducción simétrica de la sección) en la mitad de su longitud. En las Figuras 3.27 a 3.29 se pueden observar los registros filtrados de aceleración, velocidad y desplazamiento, para cada uno de los modelos descritos anteriormente.

Sobre ellos se realizaron dos acercamientos, uno para poder apreciar la primera reflexión, producto del cambio de impedancia debido a la presencia del defecto, y el otro para mostrar el regreso de la onda desde la punta del pilote. Se calculó la profundidad a la que se encontraba el defecto y la longitud total teórica a partir de los valores máximos y mínimos locales observados en las curvas, los cuales se resumen en las Tablas 3.6 a 3.8.

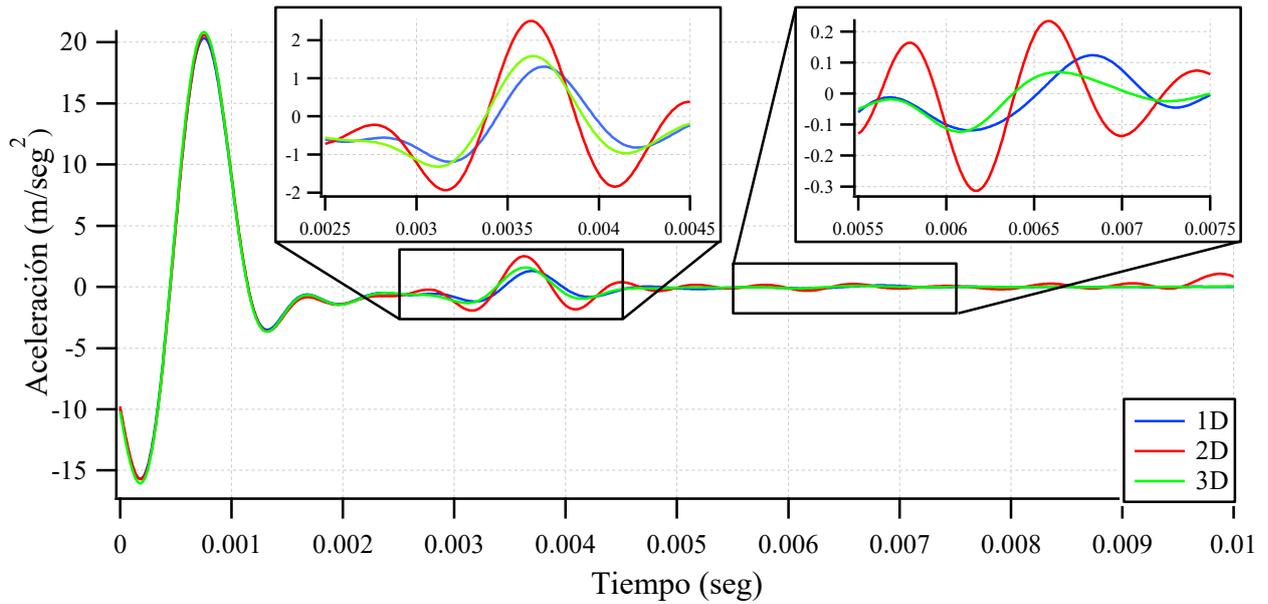


Figura 3.27: Gráficos de aceleración filtrados - Pilote con defecto simétrico.

Tabla 3.6: Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilote con defecto simétrico.

Modelo	Entre	Defecto (m)	Error (%)	Longitud (m)	Error (%)
1D	Máximos	5.95	0.8	12.27	2.3
	Mínimos	6.05	0.8	12.03	0.2
2D	Máximos	5.79	3.5	11.74	2.2
	Mínimos	6.01	0.2	12.09	0.7
3D	Máximos	5.83	2.8	11.86	1.2
	Mínimos	5.93	1.2	11.90	0.8

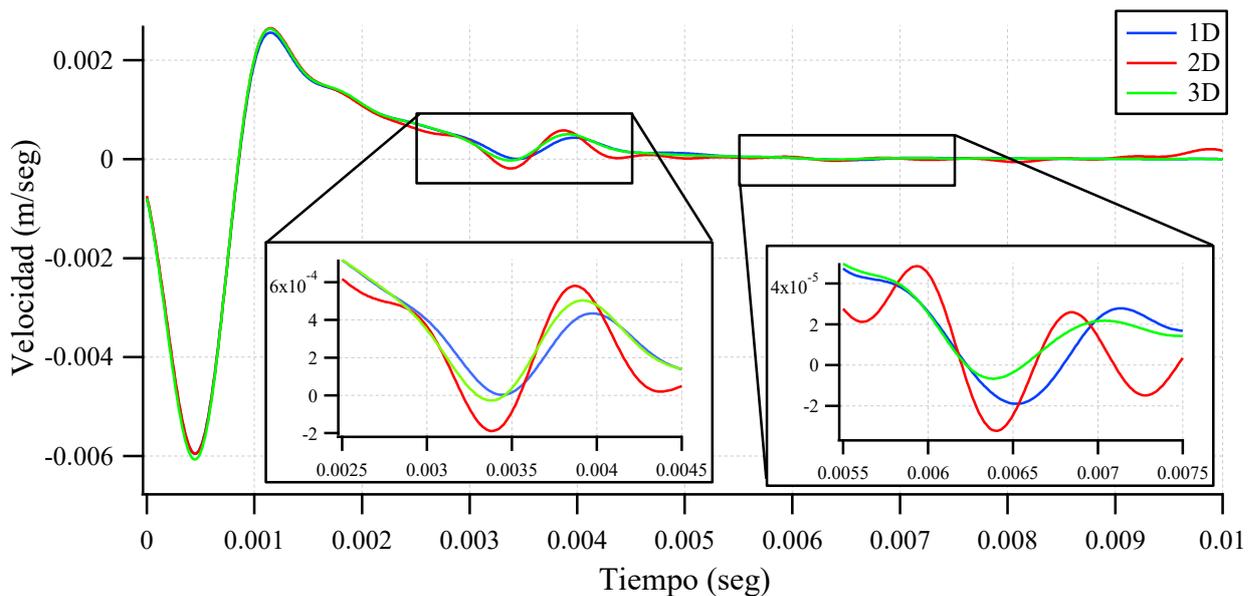
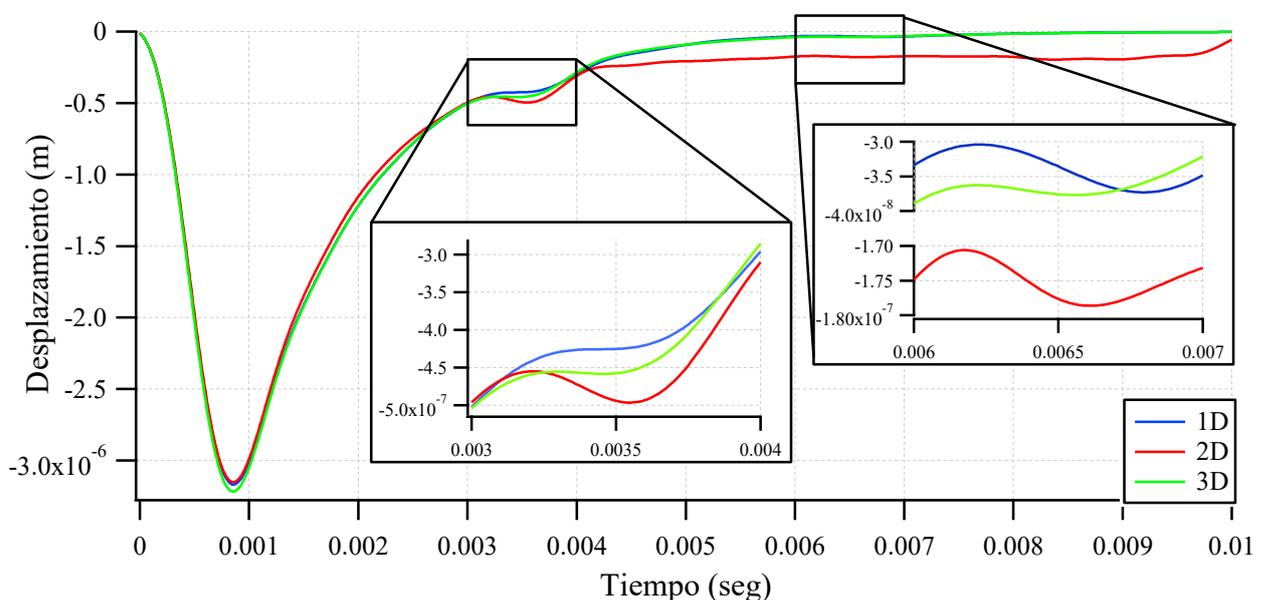


Figura 3.28: Gráficos de velocidad filtrados - Pilote con defecto simétrico.

**Tabla 3.7:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilote con defecto simétrico.

Modelo	Entre	Defecto (m)	Error (%)	Longitud (m)	Error (%)
1D	Máximos	5.69	5.2	12.07	0.6
	Mínimos	6.03	0.5	12.25	2.1
2D	Máximos	5.49	8.5	11.50	4.2
	Mínimos	5.91	1.5	12.00	0.0
3D	Máximos	5.59	6.8	11.88	1.0
	Mínimos	5.91	1.5	11.96	0.3



**Figura 3.29:** Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilote con defecto simétrico.

**Tabla 3.8:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilote con defecto simétrico.

Modelo	Entre	Defecto (m)	Error (%)	Longitud (m)	Error (%)
1D	Máximos	-	-	12.57	4.8
	Mínimos	-	-	11.98	0.2
2D	Máximos	6.48	8.0	12.47	3.9
	Mínimos	5.43	9.5	11.60	3.3
3D	Máximos	6.66	11.0	12.55	4.6
	Mínimos	5.27	12.2	11.52	4.0

Como se puede apreciar, los valores calculados coinciden en gran medida con los reales. En la curva de desplazamiento del modelo unidimensional no se llega a distinguir el valor máximo ni el mínimo, en el sector donde debería registrar la reflexión producto de la presencia del defecto. Sin embargo, se observa claramente un punto de inflexión en dicha zona.

Se puede concluir que, en este caso, los gráficos temporales resultan muy atractivos debido a que permiten detectar la presencia del defecto en cuestión, a la vez de arrojar una buena aproximación de la longitud total del elemento.

Transformando los registros anteriores al dominio de la frecuencia se pudieron confeccionar los respectivos espectros (Figuras 3.30 a 3.32). En este caso se observan con mayor claridad los cambios de forma de las curvas. Sin embargo, en los modelos unidimensional y tridimensional no fue fácil identificar los picos de frecuencia. Por lo tanto, únicamente se pudo predecir la ubicación del defecto a partir de las curvas correspondientes al modelo axisimétrico, a partir de los intervalos de frecuencia entre los valores máximos y mínimos que se resaltan en las curvas, con un error máximo menor al 10%. Los resultados se adjuntan en la Tabla 3.9, siendo cada uno de ellos un promedio de las distancias calculadas entre picos sucesivos.

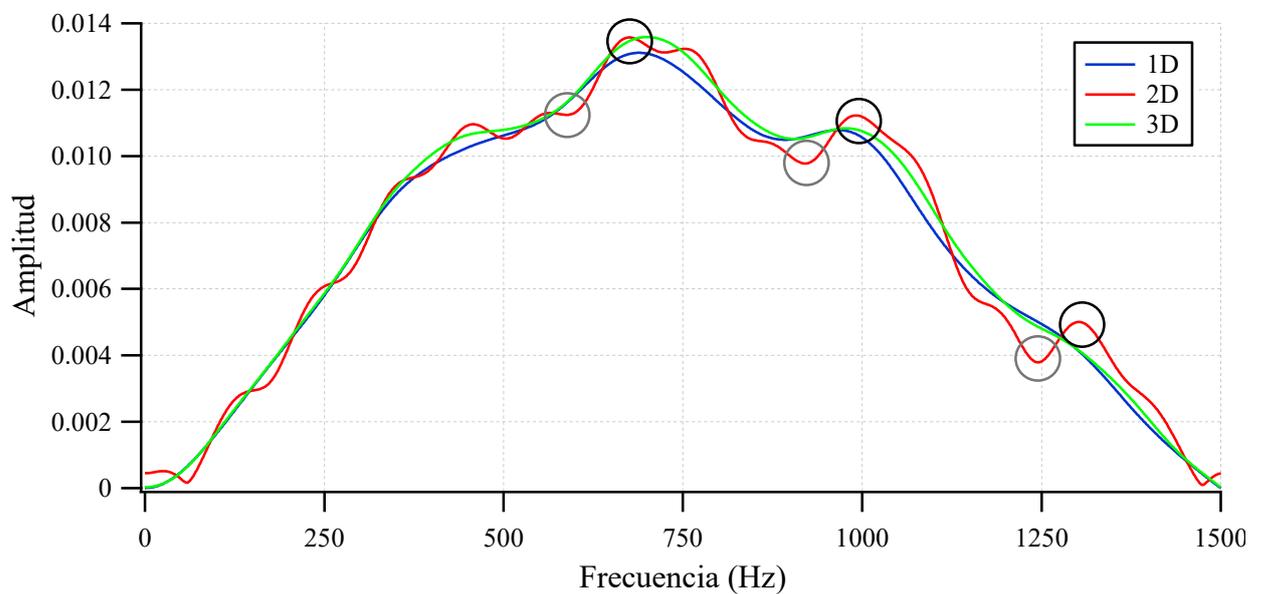
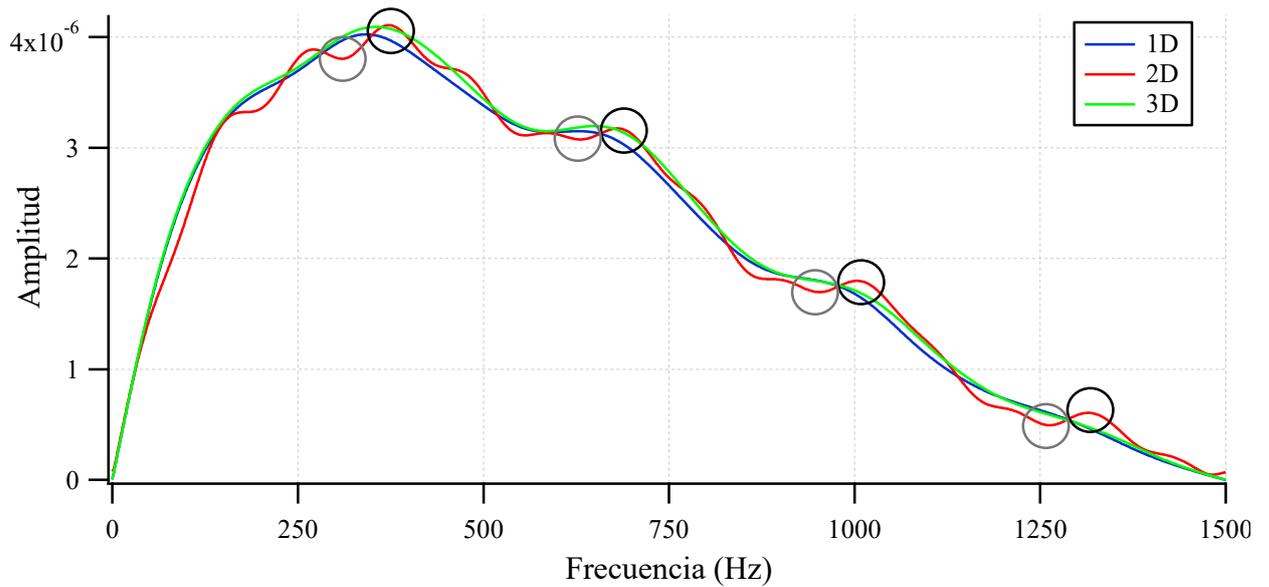
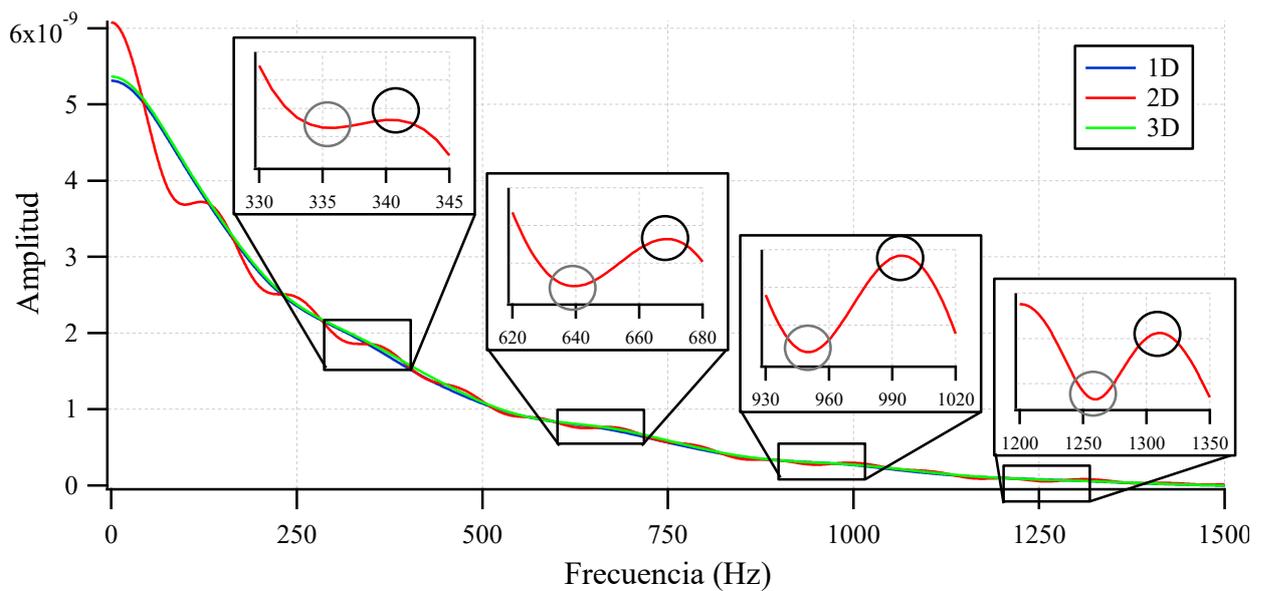


Figura 3.30: Espectros de aceleración - Pilote con defecto simétrico.



**Figura 3.31:** Espectros de velocidad - Pilote con defecto simétrico.



**Figura 3.32:** Espectros de desplazamiento - Pilote con defecto simétrico.

**Tabla 3.9:** Resultados obtenidos a partir de los espectros del modelo bidimensional - Pilote con defecto simétrico.

Espectro	Entre	Defecto (m)	Error (%)
Aceleración	Máximos	6.44	7.3
	Mínimos	6.14	2.3
Velocidad	Máximos	6.42	7.0
	Mínimos	6.35	5.8
Desplazamiento	Máximos	6.24	4.0
	Mínimos	6.55	9.2

Finalmente, se realizaron los gráficos de movilidad (Figura 3.33) para los distintos modelos. De los mismos fue posible calcular la profundidad media a la cual se encontraba el defecto, con un error de aproximadamente un 5% (ver Tabla 3.10). Vale aclarar que la curva correspondiente al modelo bidimensional presentó una gran cantidad de oscilaciones, motivo por el cual se indican los puntos considerados a los fines del cálculo. La Tabla 3.10 muestra, a su vez, que la sección transversal calculada empleando la ecuación (3.21) resulta muy similar a la del pilote intacto.

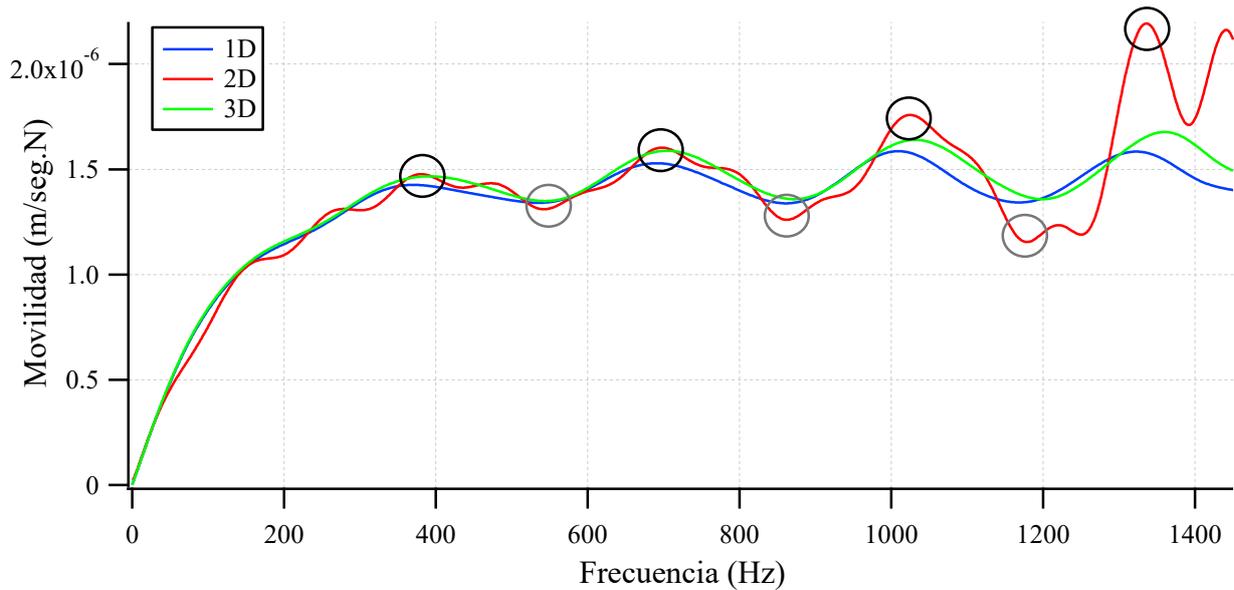


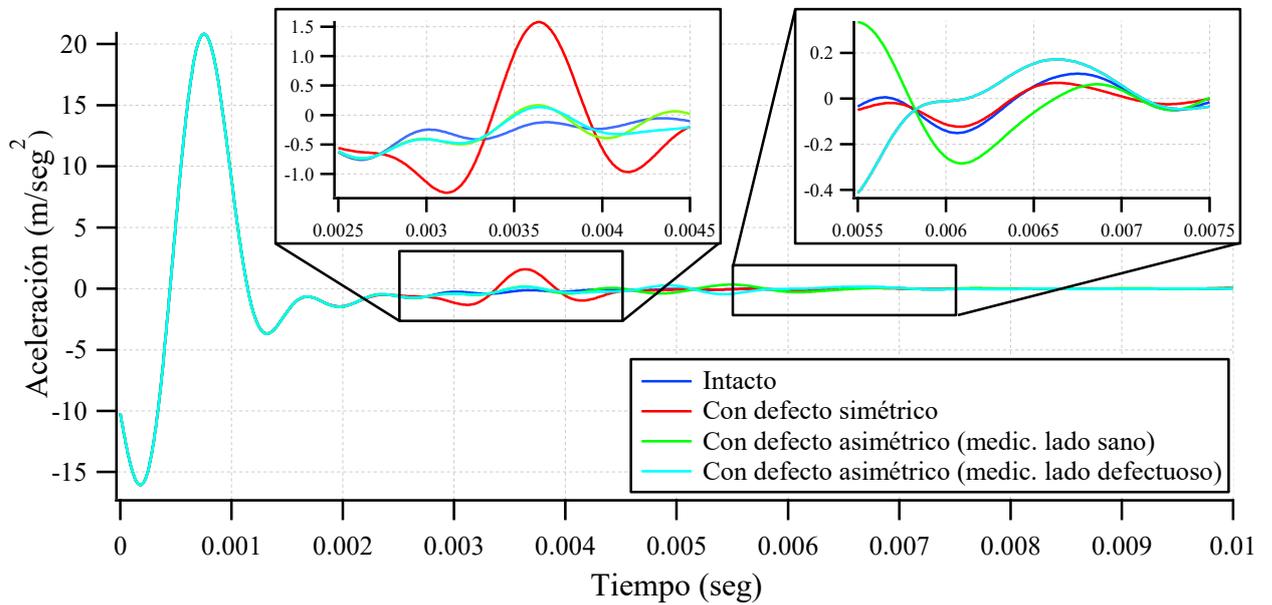
Figura 3.33: Gráficos de movilidad - Pilote con defecto simétrico.

Tabla 3.10: Resultados obtenidos a partir de los gráficos de movilidad - Pilote con defecto simétrico.

Modelo	Entre	Defecto (m)	Error (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Error (%)
1D	Máximos	6.35	5.8	0.073	3.3
	Mínimos	6.38	6.3		
2D	Máximos	6.33	5.5	0.069	2.4
	Mínimos	6.33	5.5		
3D	Máximos	6.25	4.2	0.071	0.4
	Mínimos	6.16	2.7		

Como se explicó anteriormente, al pilote con la presencia de un defecto asimétrico sólo fue posible representarlo mediante el modelo tridimensional. En este caso, se realizó la medición de los parámetros temporales tanto del lado en el que se encontraba el mismo como en el lado opuesto (siempre a una distancia de la mitad del radio del centro). Los gráficos filtrados obtenidos de dichas mediciones se pueden apreciar en las Figuras 3.34 a 3.36, en las que se han superpuesto las correspondientes al pilote sano y con defecto simétrico, a fin de compararlas. De igual forma que en los casos anteriores, se realizaron acercamientos en las zonas de interés. En

las Tablas 3.11 a 3.13 se adjuntan los valores calculados a partir de la ubicación de los picos máximos y mínimos.



**Figura 3.34:** Gráficos de aceleración filtrados - Pilote con defecto asimétrico.

**Tabla 3.11:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilote con defecto asimétrico.

Medición	Entre	Defecto (m)	Error (%)	Longitud (m)	Error (%)
Lado sano	Máximos	5.81	3.2	12.33	2.8
	Mínimos	6.09	1.5	11.92	0.7
Lado defectuoso	Máximos	5.83	2.8	11.86	1.2
	Mínimos	6.07	1.2	11.74	2.2

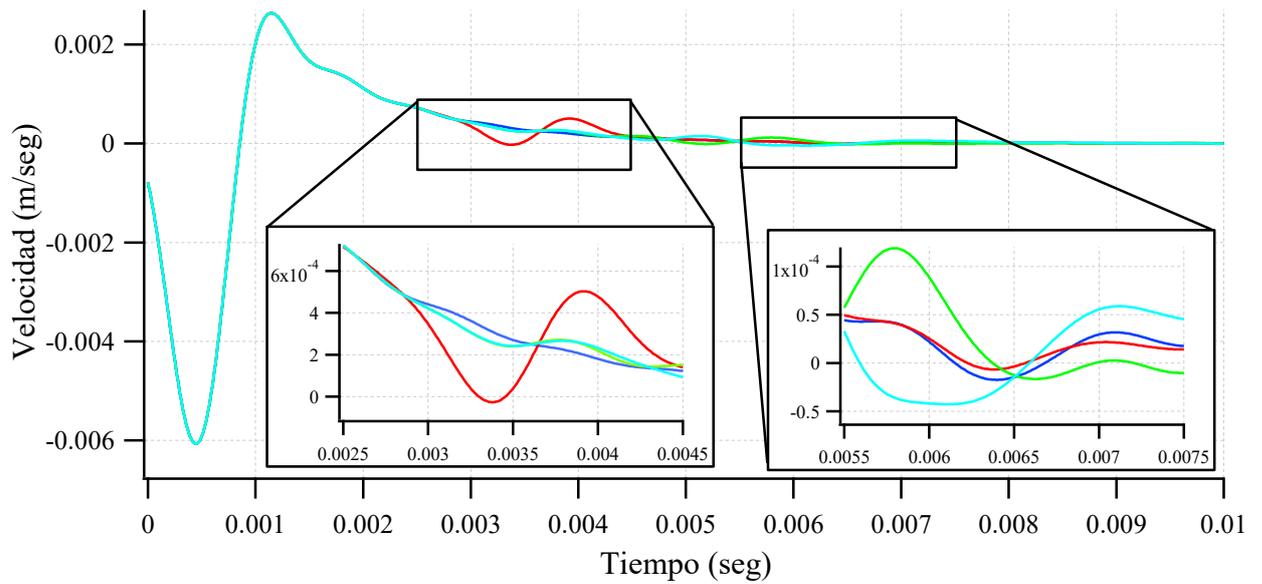


Figura 3.35: Gráficos de velocidad filtrados - Pilote con defecto asimétrico.

Tabla 3.12: Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilote con defecto asimétrico.

Medición	Entre	Defecto (m)	Error (%)	Longitud (m)	Error (%)
Lado sano	Máximos	5.29	11.8	11.98	0.2
	Mínimos	6.13	2.2	12.45	3.7
Lado defectuoso	Máximos	5.33	11.2	12.05	0.4
	Mínimos	6.17	2.8	11.42	4.8

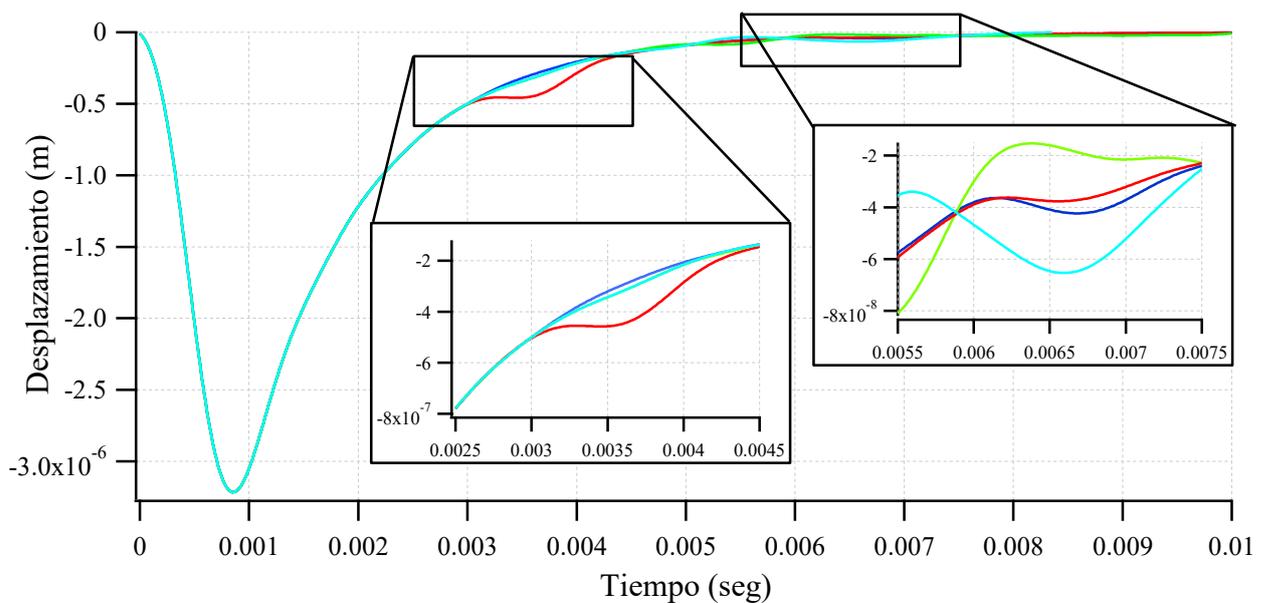


Figura 3.36: Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilote con defecto asimétrico.

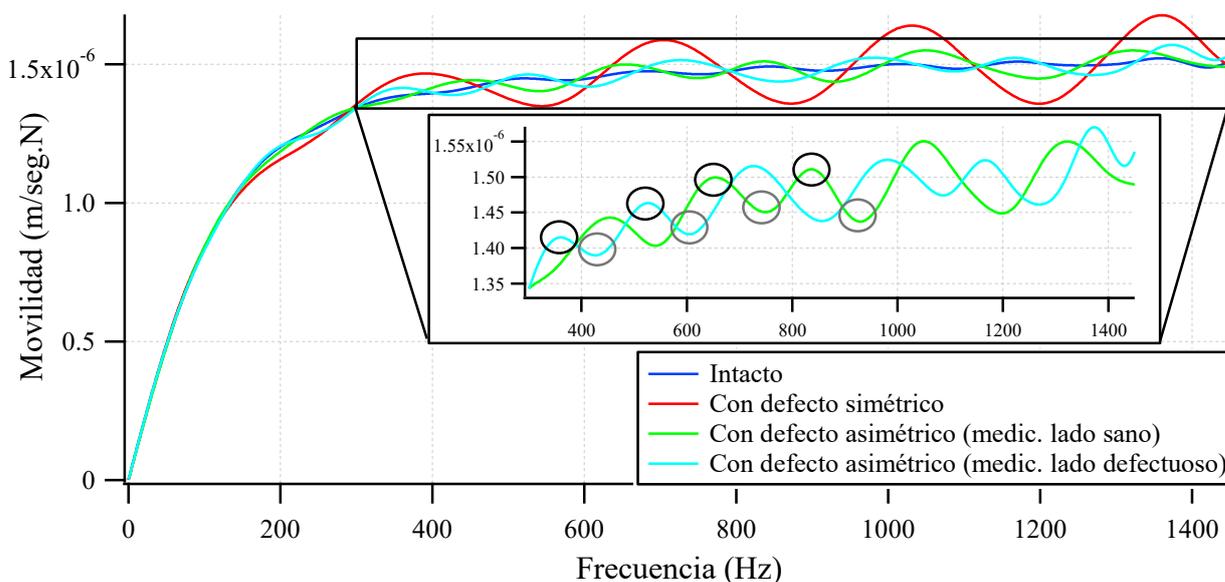
**Tabla 3.13:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilote con defecto asimétrico.

Medición	Entre	Longitud (m)	Error (%)
Lado sano	Máximos	12.87	7.2
	Mínimos	12.37	3.1
Lado defectuoso	Máximos	11.28	6.0
	Mínimos	11.58	3.5

En las curvas de aceleración y velocidad resulta sencillo detectar la reflexión producida por la presencia del defecto, ya que las mismas se separan de la que corresponde al pilote intacto, midiendo tanto sobre el lado sano como sobre el defectuoso. Sin embargo, la amplitud de las ondas es menor al caso del pilote con el defecto completo y los valores calculados menos precisos. En los gráficos de desplazamiento se observa una pequeña desviación de las curvas en la zona donde debería encontrarse la reflexión producto del defecto, pero no fue posible calcular ningún valor.

A partir de la primera reflexión se puede ver que las curvas que corresponden a mediciones sobre lados opuestos del pilote se separan y comienzan a oscilar con una mayor amplitud. De todos modos, se logró calcular la longitud total del elemento con un error menor al 10%.

Los gráficos de movilidad obtenidos a partir de los registros de velocidad anteriores se presentan en la Figura 3.37. En ellos se observa que, para el caso del defecto asimétrico, no existe una coincidencia entre las curvas correspondientes a los dos puntos de medición adoptados. Asimismo, los picos de dichas curvas no se encuentran igualmente espaciados, lo cual dificulta el cálculo de valores precisos. Solamente fue posible obtener una buena aproximación de la longitud total y el área transversal del pilote a partir de algunos valores máximos y mínimos sucesivos, los que se resaltan en la gráfica, para cada caso (ver Tabla 3.14).



**Figura 3.37:** Gráficos de movilidad - Pilote con defecto asimétrico.

**Tabla 3.14:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de movilidad - Pilote con defecto asimétrico.

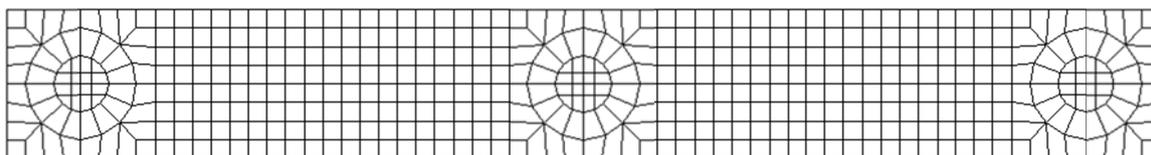
Medición	Entre	Longitud (m)	Error (%)	Area (m <sup>2</sup> )	Error (%)
Lado sano	Máximos	11.09	7.6	0.070	1.0
	Mínimos	11.21	6.6		
Lado defectuoso	Máximos	12.08	0.7	0.070	1.0
	Mínimos	11.27	6.1		

### 3.9. Pilotes con cabezal

#### 3.9.1. Modelo numérico

Se utilizó el modelo tridimensional detallado en la sección 3.8.1 para representar la estructura completa de pilotes vinculados mediante un cabezal. Se dispusieron siguiendo una línea y separados cada 1.35 m. (entre los centros). En los extremos se ubicaron los pilotes defectuosos (con defectos simétrico y asimétrico, respectivamente), quedando el pilote sano al centro. Las dimensiones del cabezal fueron adoptadas de modo tal que sobresaliera 5 cm. a cada lado de los pilotes, con una altura igual al ancho, resultando de 0.40 x 0.40 x 3.10 m. Vale aclarar que la distancia entre la cara superior del cabezal y la punta de los pilotes siguió siendo de 12 m.

La confección del modelo se realizó mediante elementos finitos sólidos de ocho nodos, de 5 cm de lado. La transición de malla entre los pilotes y el cabezal se puede apreciar en la Figura 3.38.

**Figura 3.38:** Mallado realizado para el cabezal.

En la Figura 3.39 se presenta la estructura completa modelada en el programa de cálculo. Se aplicó la carga presentada en la sección 3.3 sucesivamente sobre el centro de cada pilote (ver Figura 3.40), sobre la superficie superior del cabezal y se obtuvieron, para cada caso, los registros temporales en puntos ubicados a una distancia igual a la mitad del radio de los pilotes.

Se consideró que el cabezal se encontraba completamente enterrado en el terreno. A fin de simular su influencia se colocaron resortes actuando en dirección vertical en los nodos de la cara inferior y en dirección horizontal en los nodos de las caras verticales. Se supusieron los siguientes valores para el coeficiente de balasto vertical y horizontal:

$$kb_v = 50 \text{ MN/m}^3$$

$$kb_h = 30 \text{ MN/m}^3$$

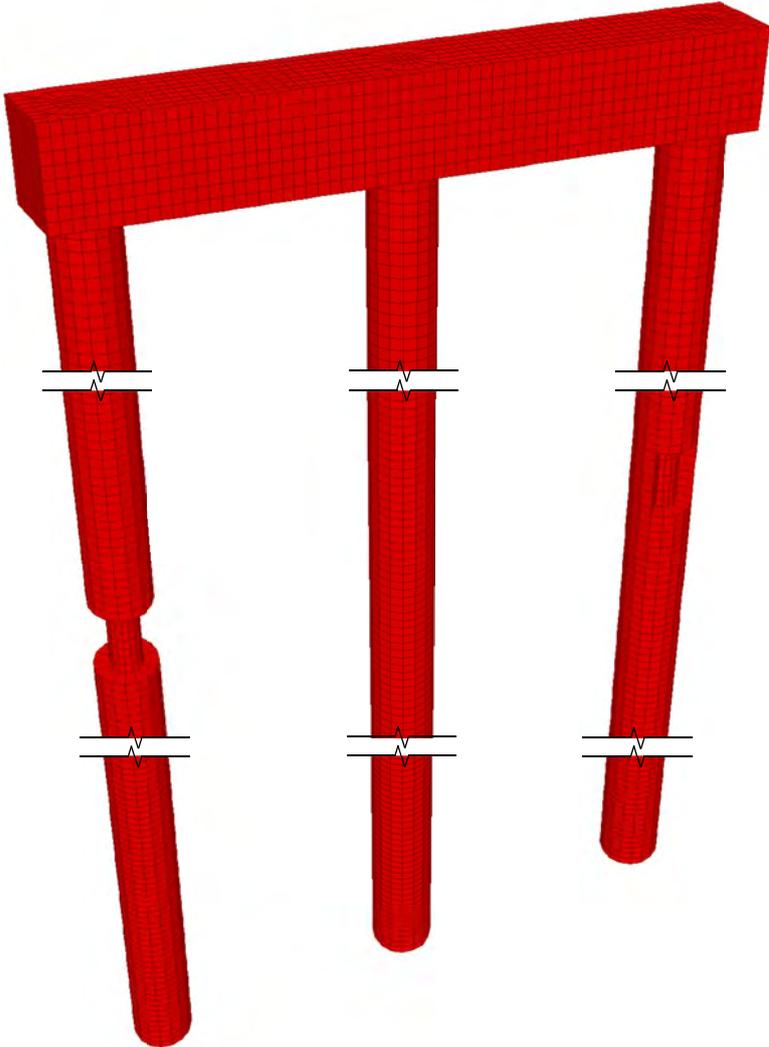


Figura 3.39: Modelo de elementos finitos de la estructura analizada.

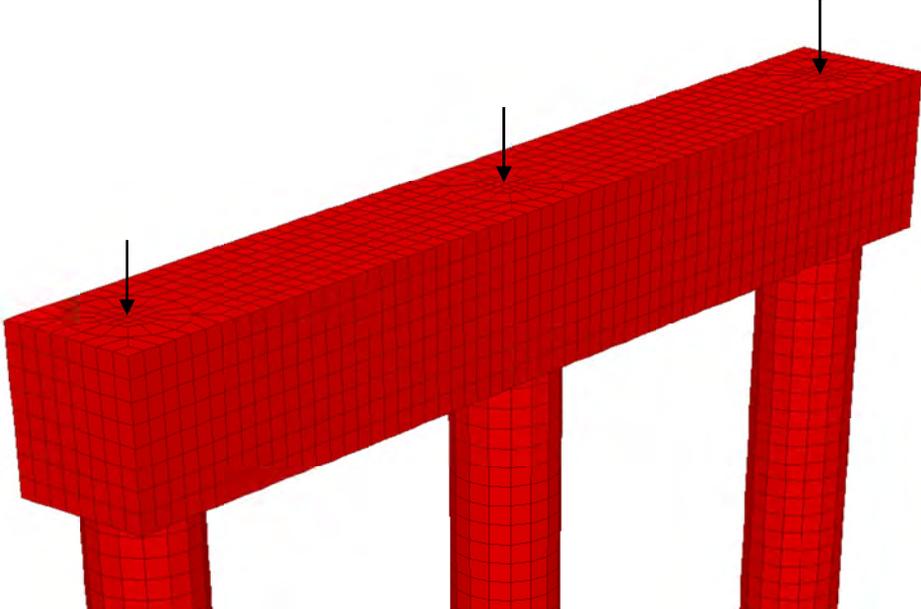
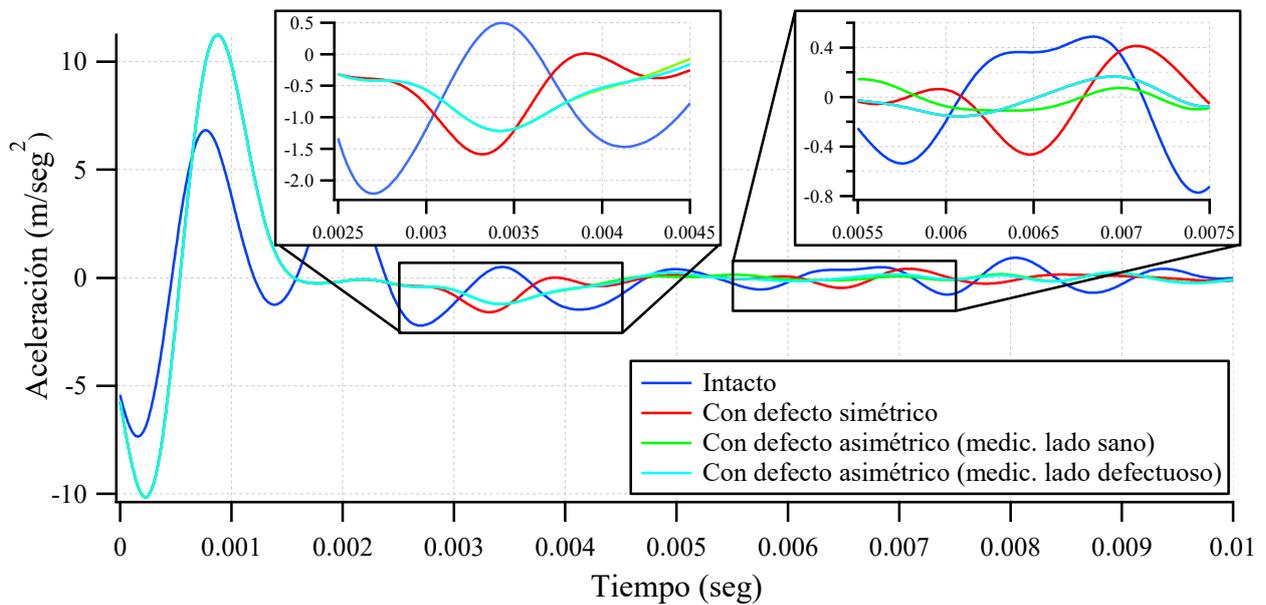


Figura 3.40: Detalle del cabezal y puntos de aplicación de la cargas.

**3.9.2. Análisis de resultados**

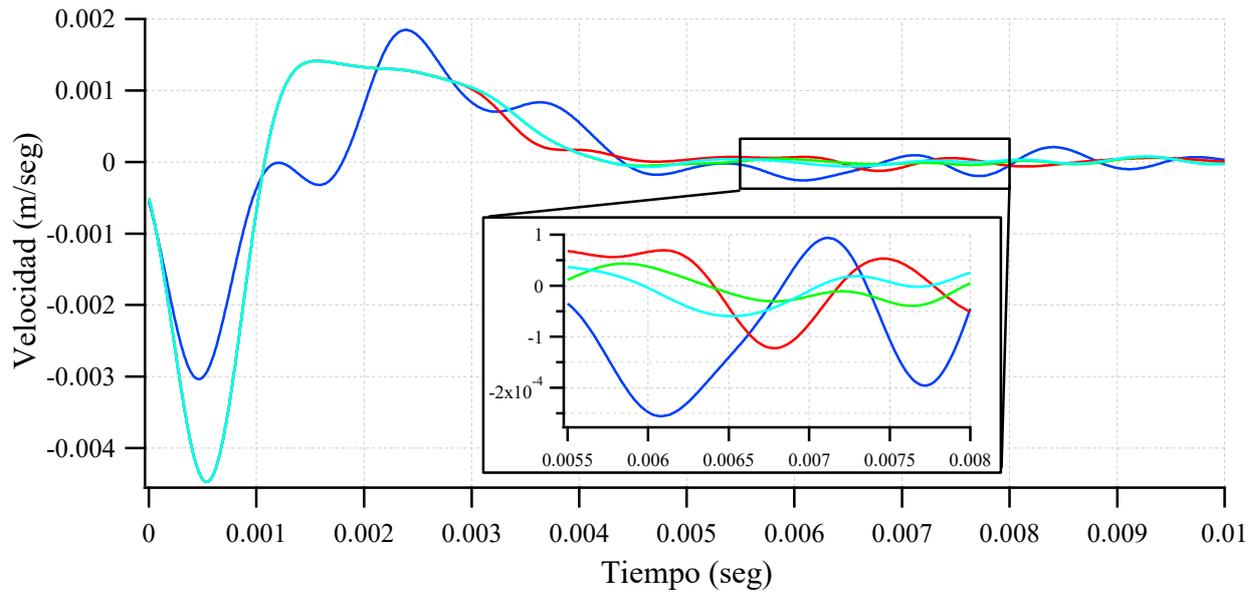
En las Figuras 3.41, 3.42 y 3.43 se pueden observar, respectivamente, los registros de aceleración, velocidad y desplazamiento medidos sobre la superficie del cabezal, en coincidencia con la ubicación de cada pilote. Los mismos ya se encuentran filtrados con una frecuencia de corte de 1500 Hz. Sobre el pilote que presentaba un defecto del tipo asimétrico se consideró la respuesta tanto sobre el lado sano y como sobre el que se encontraba el defecto. En la medida que fue posible, se calculó la longitud de los mismos y la posición en la que se ubicaba el defecto, en los que no se encontraban intactos. Dichos valores se adjuntan en las Tablas 3.15 a 3.17.



**Figura 3.41:** Gráficos de aceleración filtrados - Pilotes con cabezal.

**Tabla 3.15:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de aceleración - Pilotes con cabezal.

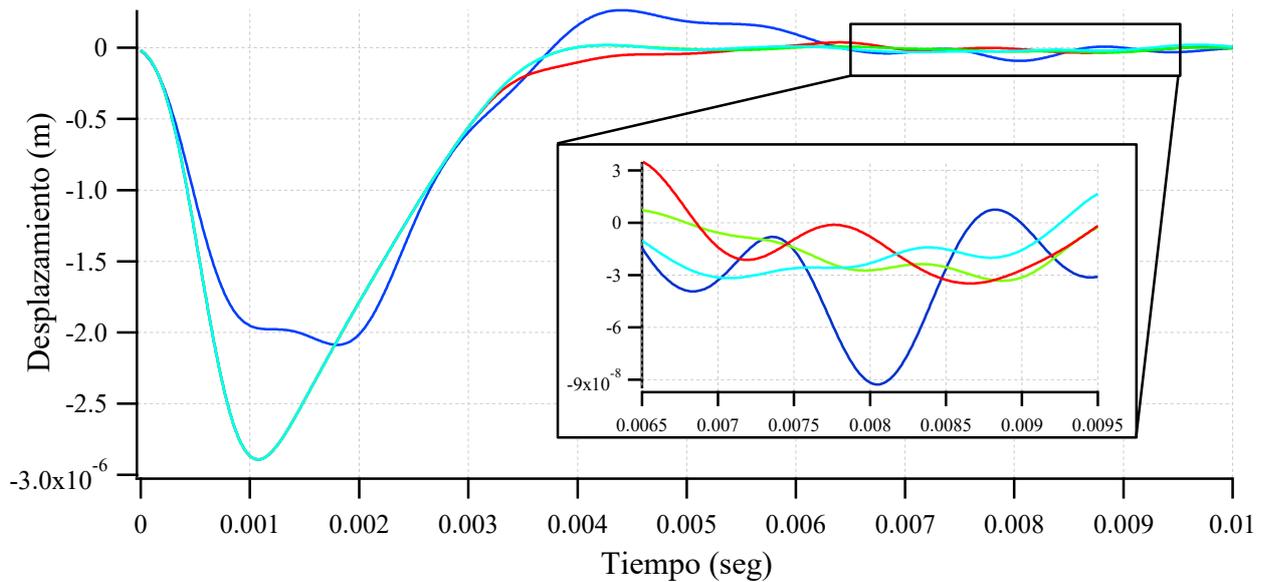
Pilote	Entre	Defecto (m)	Error (%)	Longitud (m)	Error (%)
Intacto	Máximos	-	-	12.25	2.1
	Mínimos	-	-	11.28	6.0
Con defecto simétrico	Máximos	6.11	1.8	12.51	4.3
	Mínimos	6.23	3.8	12.61	5.1
Con defecto asimétrico Medic. lado sano	Máximos	-	-	12.33	2.8
	Mínimos	6.44	7.3	12.39	3.3
Con defecto asimétrico Medic. lado defectuoso	Máximos	-	-	12.25	2.1
	Mínimos	6.44	7.3	11.80	1.7



**Figura 3.42:** Gráficos de velocidad filtrados - Pilotes con cabezal.

**Tabla 3.16:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de velocidad - Pilotes con cabezal.

Pilote	Entre	Longitud (m)	Error (%)
Intacto	Máximos	11.94	0.5
	Mínimos	11.34	5.5
Con defecto simétrico	Máximos	11.90	0.8
	Mínimos	12.59	4.9
Con defecto asimétrico Medic. lado sano	Máximos	11.40	5.0
	Mínimos	12.59	4.9
Con defecto asimétrico Medic. lado defectuoso	Máximos	11.56	3.7
	Mínimos	12.07	0.6



**Figura 3.43:** Gráficos de desplazamiento filtrados - Pilotes con cabezal.

**Tabla 3.17:** Resultados obtenidos a partir de los gráficos de desplazamiento - Pilotes con cabezal.

Pilote	Entre	Longitud (m)	Error (%)
Intacto	Mínimos	12.61	5.1
Con defecto simétrico	Mínimos	12.33	2.8
Con defecto asimétrico Medic. lado sano	Mínimos	13.90	15.8
Con defecto asimétrico Medic. lado defectuoso	Mínimos	12.09	0.7

Como se puede apreciar en las gráficas anteriores, los registros se encuentran distorsionados respecto a los análogos en el caso de pilotes individuales. En especial, se observa claramente que el pilote central, en este caso el intacto, es el que se ve afectado en mayor medida por la influencia del cabezal. Asimismo, siguió siendo posible detectar algunas reflexiones y calcular la longitud total con una exactitud aceptable. Con respecto a la detección de los defectos, únicamente se logró estimar la profundidad a la que se encontraban mediante las curvas de aceleración.

Por otra parte, se construyeron los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento (Figuras 3.44, 3.45 y 3.46, respectivamente) y los gráficos de movilidad (Figura 3.47), para cada uno de los casos analizados. En ellos se observan varios picos, pero estos no se encuentran ubicados a intervalos regulares, por lo que se vuelve muy dificultoso obtener resultados confiables a partir de los mismos. También resulta evidente que las curvas más irregulares y alejadas de la situación de pilote aislado son las correspondientes al elemento central.

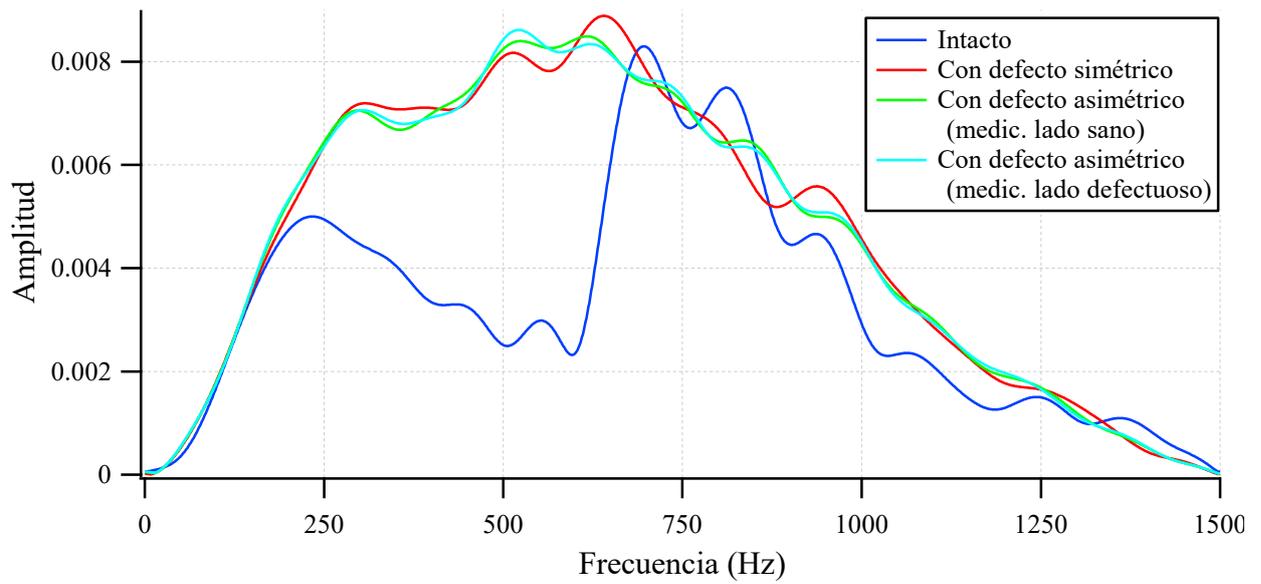


Figura 3.44: Espectros de aceleración - Pilotes con cabezal.

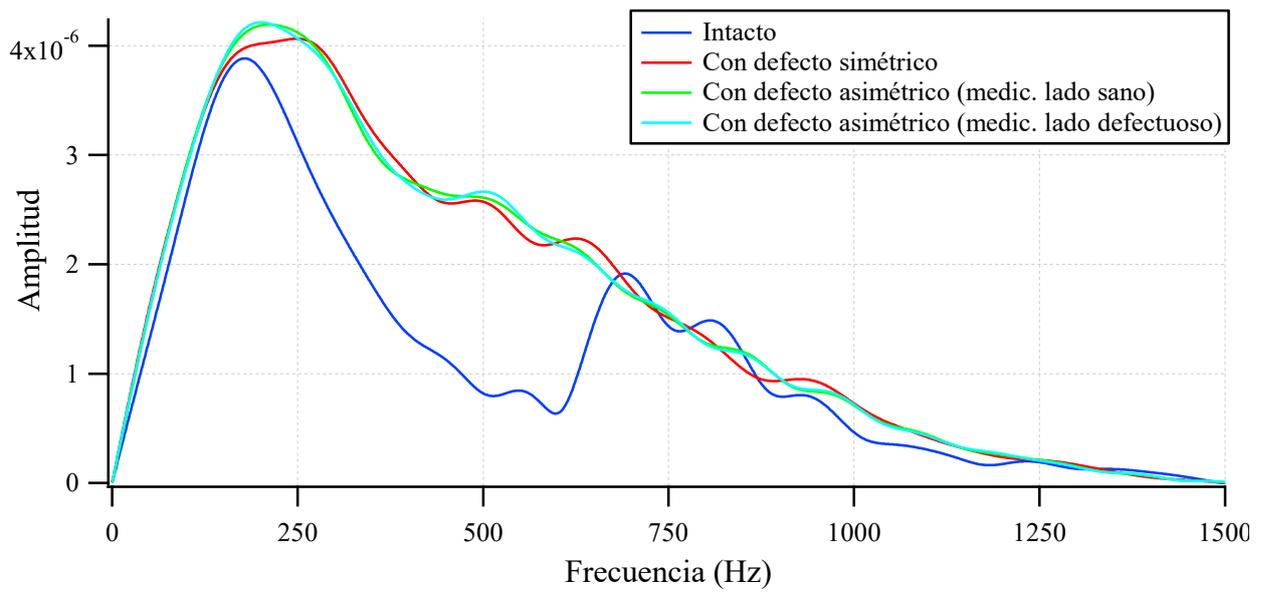


Figura 3.45: Espectros de velocidad - Pilotes con cabezal.

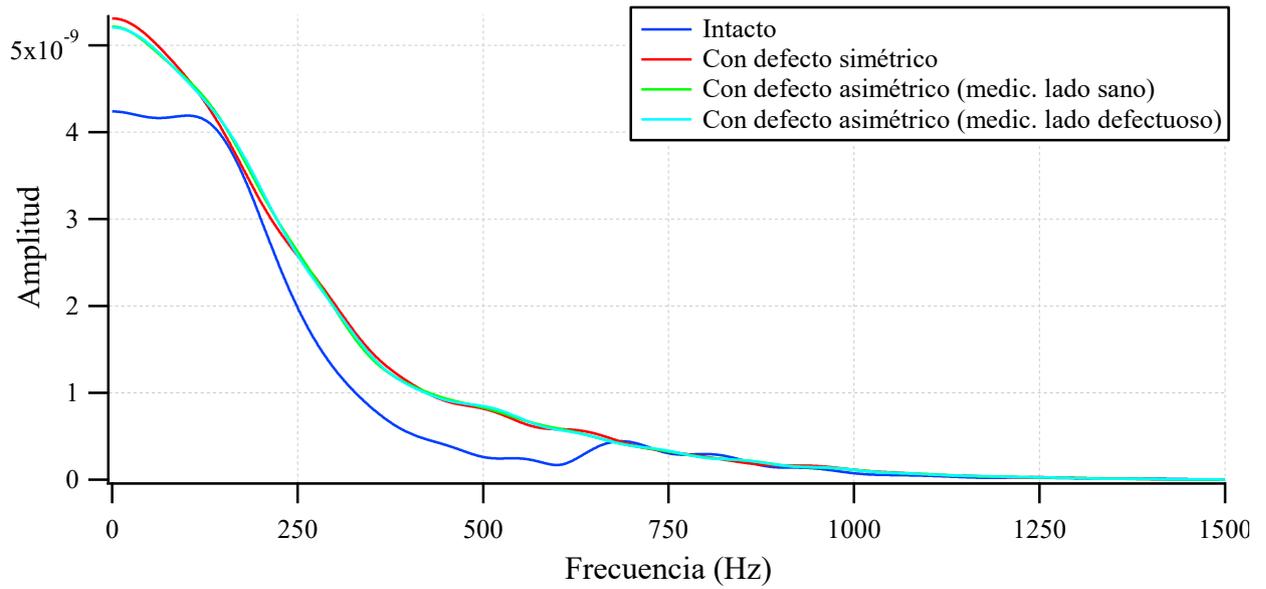


Figura 3.46: Espectros de desplazamiento - Pilotes con cabezal.

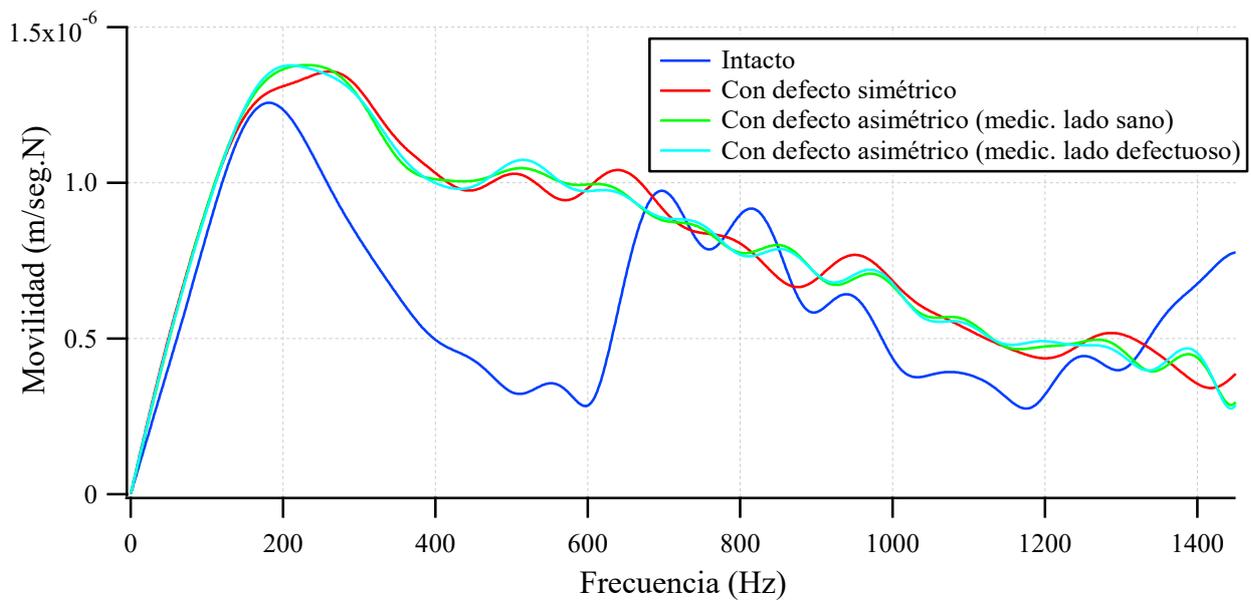


Figura 3.47: Gráficos de movilidad - Pilotes con cabezal.

## Capítulo 4: ANÁLISIS EXPERIMENTAL

### 4.1. Introducción

Con el fin de evaluar la factibilidad de los métodos de integridad de bajas deformaciones en la detección de defectos y en la estimación de la longitud de pilotes individuales y vinculados se procedió a materializar en el terreno una estructura para tal fin. El hormigonado de la misma se realizó en dos etapas: una inicial en la que se confeccionaron los pilotes, a dos de los cuales se le indujeron anomalías, y una posterior en la que se realizó la vinculación de los mismos mediante un cabezal.

### 4.2. Descripción

Tal como se mencionó anteriormente, y como se puede apreciar en la Figura 4.1, se excavaron y hormigonaron 3 pilotes circulares de aproximadamente 12 m. de largo y 30 cm. de diámetro, equidistantes entre sí una distancia de 1.35 m. La armadura de cada uno de ellos constaba de 6 barras longitudinales de acero de 12 mm. de diámetro y estribos circulares de 6 mm. espaciados cada 20 cm.

Sobre dos de ellos se generaron defectos que ocasionaran una reducción tanto simétrica como asimétrica de su sección transversal, iniciándose a una profundidad de 6 m. por debajo de la superficie. En el pilote N°1 se produjo un estrechamiento de 15 cm. de diámetro y 40 cm. de largo. Por su parte, el defecto del pilote N°3 era de las mismas dimensiones, pero abarcaba únicamente un cuarto del perímetro. El pilote N°2 se encontraba intacto.

Posteriormente, se vincularon los 3 pilotes mediante una estructura superior que actuaba a modo de cabezal. Dada la disposición de los elementos se decidió por una viga de 40 cm. de base, 40 cm. de altura y 3.10 m. de largo, tal como se puede observar en la Figura 4.2. La armadura de la misma constaba de 3 barras de 12 mm. superior e inferior, una barra de 8 mm. por cara como de armadura de piel y estribos de 6 mm. de diámetro espaciados cada 20 cm.

El proceso completo para la construcción de la estructura de pilotes vinculados por medio de un cabezal se encuentra detallado en el Anexo A.

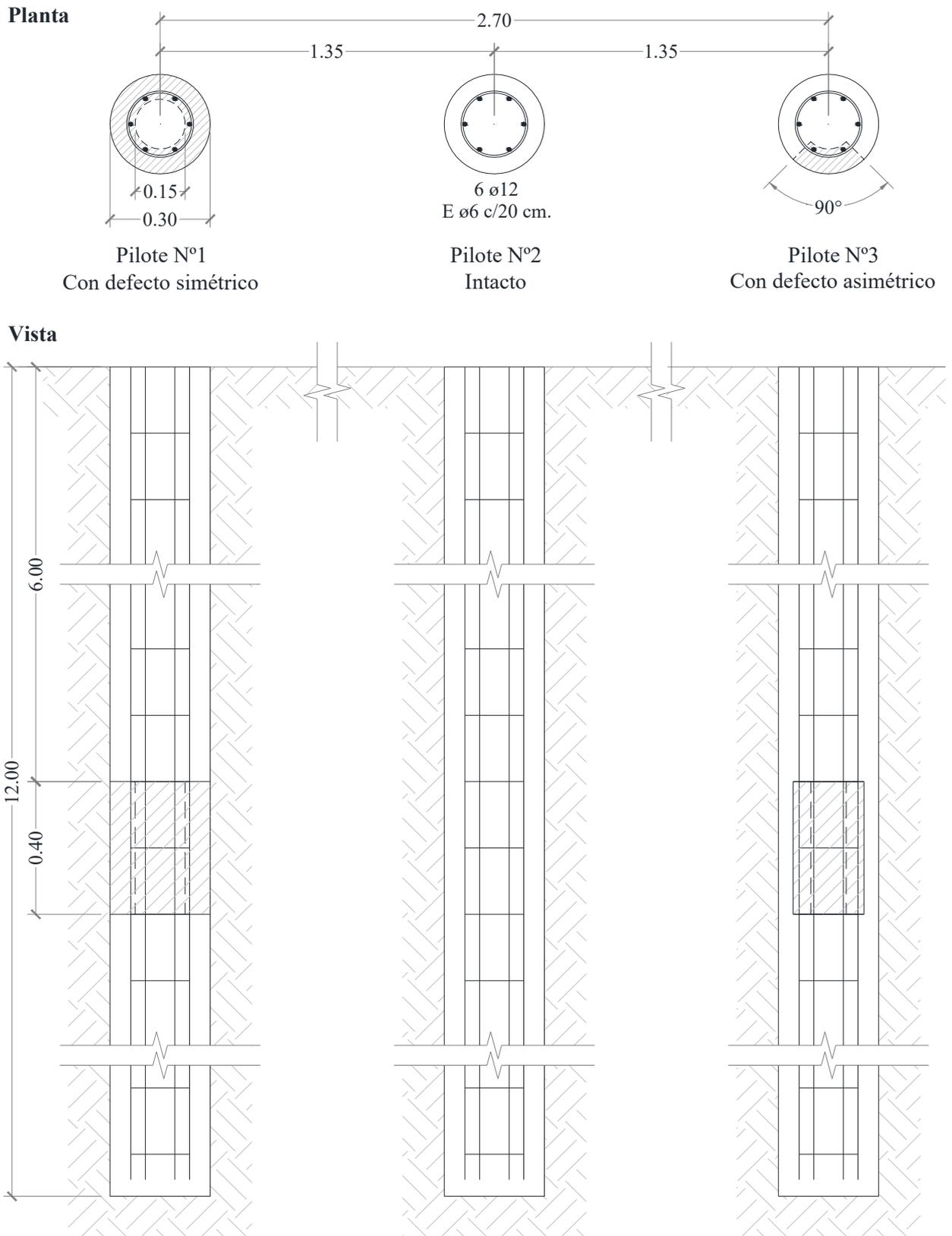


Figura 4.1: Geometría y disposición de los pilotes y sus defectos.

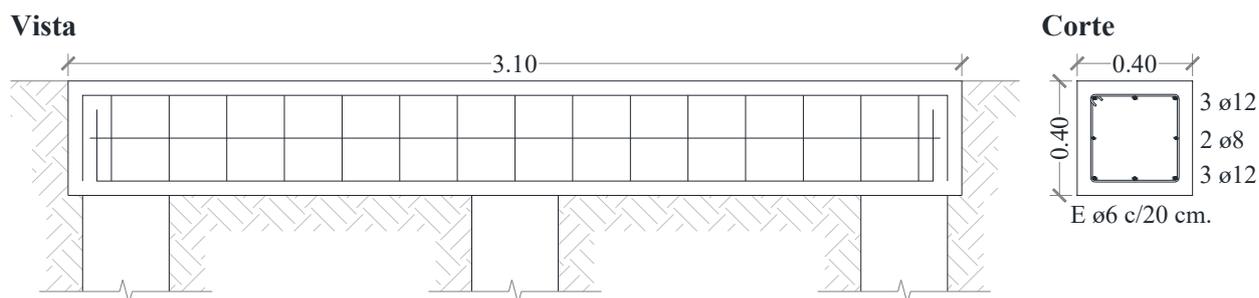


Figura 4.2: Geometría y armadura del cabezal.

### 4.3. Resultados de ensayos experimentales complementarios

Tal como se describe en el Anexo B, se realizaron ensayos de compresión y módulo de elasticidad sobre probetas confeccionadas con el material correspondiente a cada uno de los pilotes y al cabezal. Los resultados, las curvas y las fotos de estos ensayos se presentan en dicho Anexo.

La resistencia a compresión promedio de las probetas extraídas durante el hormigonado de los tres pilotes resultó de 23.56 MPa., con una desviación estándar de 2.95. De esta forma, la resistencia característica se estimó en 18 MPa. El promedio del módulo de elasticidad medido fue de 33378 MPa. y la densidad media de 2317 kg/m<sup>3</sup>.

Con dichos valores fue posible calcular la velocidad de propagación de ondas longitudinales unidimensionales, utilizando la ec. (3.7), que resultó de 3795 m/seg. Por otra parte, se realizó un ensayo de ultrasonido directo sobre la superficie lateral del pilote central (ver Anexo B), el cual arrojó una velocidad de 4363 m/seg. Debido a la discordancia entre dichos valores, se optó por utilizar para los ensayos de integridad un valor aproximado al promedio entre ambos, de 4000 m/seg, el cual es frecuentemente recomendado en la bibliografía cuando no se cuenta con información fehaciente acerca del hormigón.

### 4.4. Prueba de carga

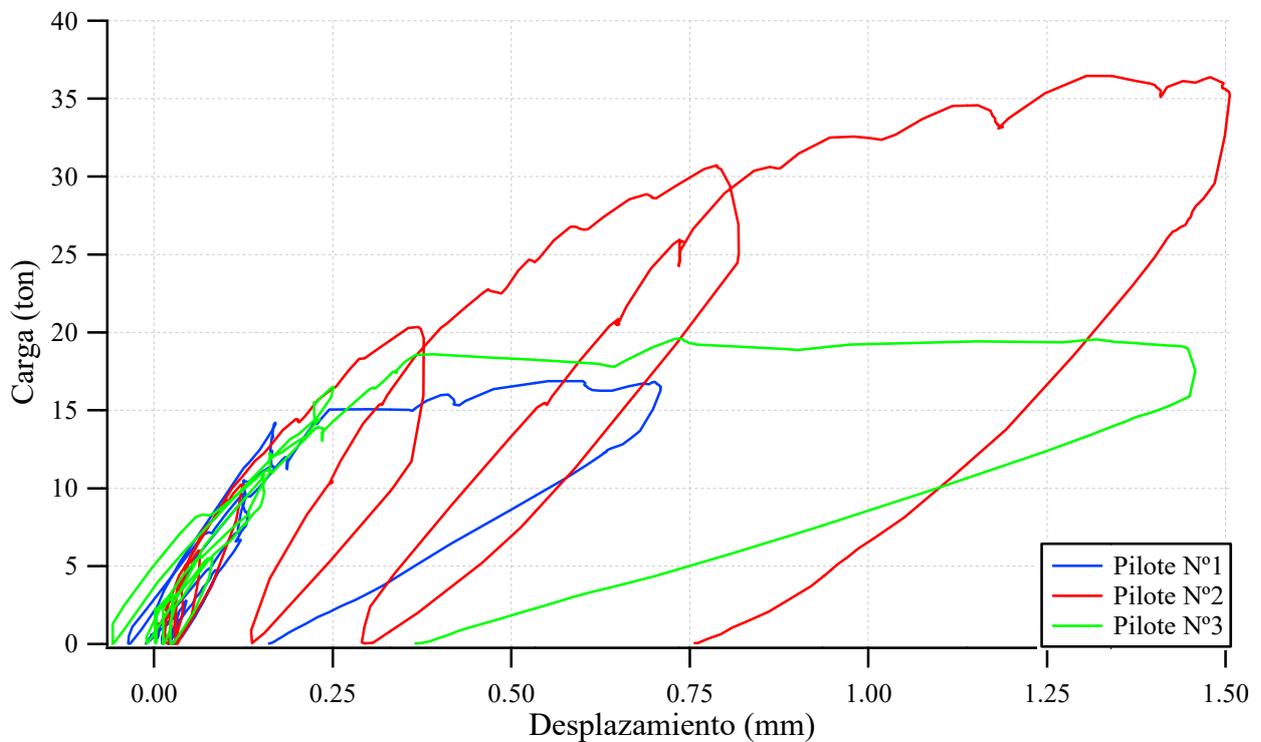
Se realizó una prueba de carga estática sobre el pilote central (Figura 4.3), aprovechando los elementos hormigonados. Esto es de mucha importancia debido a que, hasta el momento, no se encontraba información a nivel local sobre este tipo de ensayo en pilotes de las dimensiones proyectadas.

El equipamiento utilizado y el procedimiento empleado se describen en el Anexo B. La carga se aplicó en forma incremental y se realizaron varios ciclos de descarga intermedios. Durante todo el ensayo se registraron las deformaciones en la cabeza de los pilotes.



**Figura 4.3:** Prueba de carga.

En la Figura 4.4 se presentan las gráficas de carga vs. desplazamiento, previamente atenuadas, correspondientes a los 3 pilotes involucrados en el ensayo y medidos con los potenciómetros de 50 mm. de rango (ver Anexo B). Vale aclarar que la carga registrada en los pilotes extremos es de tracción mientras que el central se encontraba sometido a compresión. Asimismo, los desplazamientos son en sentido contrario entre unos y otro pilote. Para una mejor visualización de la información se superpusieron las curvas en un mismo sistema de ejes coordenados. Para obtener la fuerza reactiva en los pilotes de tracción se consideró la distancia existente entre el centro de las varillas roscadas y el eje del pilote central, donde se aplicó la carga.



**Figura 4.4:** Registros atenuados de los potenciómetros de 50 mm.

Como se puede observar, hacia el final del ensayo los pilotes de tracción aumentaron mucho su deformación casi sin un consecuente aumento en la carga, lo cual indica que los mismos se

encontraban trabajando prácticamente al límite de su capacidad.

#### 4.5. Ensayos de integridad

Se realizó la medición de aceleraciones sobre la cabeza de los pilotes ubicados de forma aislada y, posteriormente, sobre el cabezal que los vinculaba. La sollicitación se llevó a cabo mediante una carga impulsiva provocada por el impacto de un martillo de masa calibrada, registrando la excitación en algunos casos. Con ello se buscaba detectar la posición de los defectos inducidos y determinar la longitud real de cada elemento, realizando el análisis tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, y evaluar la influencia del conjunto pilotes-cabezal en el método.

##### 4.5.1. Equipamiento e instrumental

El instrumental utilizado para la realización de los ensayos se detalla a continuación:

- **Martillo**

Se utilizaron básicamente dos martillos para excitar la estructura. El primero de ellos no instrumentado, con una masa variable entre 0.95 y 2.10 kg., una punta acrílica y un mango de madera (Figura 4.5, izquierda). El segundo se encontraba provisto de una celda de carga (transductor de fuerza), la cual permitía registrar el impulso generado, a partir de la medición de la variación del voltaje con el tiempo (Figura 4.5, derecha). Poseía puntas de plástico y mango metálico. La masa total del mismo era de 1.50 kg.

La magnitud del impacto depende tanto de la masa del martillo como de la velocidad con la cual el mismo impacta al pilote. El operario influye en ambos factores pues su brazo adiciona masa y provee de velocidad al martillo en el momento de golpear a la estructura.



Figura 4.5: Martillos utilizados.

- **Acelerómetro**

Se emplearon dos tipos de acelerómetros de marca KYOWA, de 5 y de 10 g de capacidad de medición. Los mismos se conectaban al amplificador por medio de cables coaxiales, con el objeto de reducir la existencia de ruido en la señal que puede surgir de cualquier fuente electromagnética que alcance a los cables en su recorrido hacia el amplificador. La sensibilidad

transversal de ambos transductores era del 2%.

- **Amplificador**

Se trataba de un amplificador marca KYOWA modelo DPM-612B, de 8 canales. Su rol era elevar la magnitud de las señales generadas por los transductores (acelerómetros y celda de carga) a niveles superiores, de modo tal que éstas pudieran ser suministradas al analizador con una magnitud suficientemente grande como para realizar las lecturas adecuadamente. El voltaje máximo soportado por el equipo era de 5V.

- **Analizador**

La función de este equipo es captar los valores medidos por los transductores, con el objetivo de determinar la historia de excitación y de respuesta. Los registros, en diferencias de voltaje, obtenidos a partir de los transductores y amplificados convenientemente, eran capturados por una placa de adquisición de datos, para luego ser procesados matemáticamente con un software específico. Una vez digitalizados y almacenados, se podía realizar un análisis completo.

Se utilizó una placa de adquisición de datos (analógica-digital) marca MEASUREMENT COMPUTING modelo USB-1616FS, de 16 canales. La misma recibía los registros amplificados desde los transductores y los convertía a una forma digital, es decir, datos que pudieran ser manipulados por un ordenador. La diferencia de voltaje máxima de la señal de entrada no debía superar los 10 V. De esta forma, el amplificador jugaba un rol esencial a la hora realizar los ensayos pues, además de amplificar convenientemente la señal, funcionaba como salvaguarda de la placa.

Esta última se encontraba conectada por medio de un puerto USB a una PC portátil, sobre la cual se visualizaban los registros. Para el almacenamiento e interpretación de los datos digitales se utilizó el software DYNTEST, desarrollado en el proyecto de investigación donde se encuadra este trabajo, el cual se encontraba codificado dentro del entorno del programa MATLAB.

Los instrumentos antes mencionados se ilustran en la Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Acelerómetro (izquierda), amplificador (centro) y placa de adquisición de datos (derecha).

Con el objetivo de contrastar los resultados, se realizaron ensayos análogos mediante un equipo comercial marca PILETEST. Como se puede observar en la Figura 4.7, el mismo se encontraba compuesto por un martillo de mano liviano, con puntas de plástico, un transductor con conexión USB, que incluía un acelerómetro de 100 mV/g de sensibilidad, un amplificador y

un conversor de señal analógica a digital, y un software para el procesamiento y visualización de la información. Este equipo presenta la ventaja de ser muy versátil, liviano y rápido, necesitando poco instrumental adicional (únicamente una PC portátil o tablet) y pudiendo ser operado por una sola persona. Dependiendo del diámetro y el tipo de suelo, permite inspeccionar pilotes de entre 2 y 100 m. de largo. Sin embargo, la principal restricción que presenta este tipo de equipos comerciales es que no le otorgan al usuario la libertad de extraer los datos medidos por el acelerómetro, sino que procesan la información y arrojan los resultados de manera automática.



Figura 4.7: Equipo PILETEST.

#### 4.5.2. Procedimiento de ensayo

En primer lugar se debía limpiar la zona en la que se ubicarían los transductores de aceleración, ya sea sobre la cabeza de los pilotes, tanto a ras del terreno natural como al nivel de la excavación, una vez desmochados, o en la superficie expuesta del cabezal. Los acelerómetros KYOWA se fijaban mediante un adhesivo instantáneo, mientras que al utilizar el equipo PILETEST se cubría la cara inferior del transductor con una masilla especial antes de apoyarlo sobre el hormigón.

A continuación se golpeaba con el martillo adoptado en cada caso, en lugares cercanos a los puntos de medición. Se realizaron ensayos colocando los acelerómetros en distintos sectores y golpeando con diferentes masas, variando el punto de impacto y la intensidad. Los registros ya amplificados y convertidos se visualizaban en una PC portátil emplazada próxima a la estructura. La tasa de adquisición adoptada fue de 50000 datos por segundo, dando como resultado un intervalo de tiempo de  $2 \times 10^{-5}$  seg.

En el caso del equipo comercial, el software se encargaba de integrar a velocidad la medición correspondiente a cada golpe, para luego normalizar y promediar automáticamente las curvas obtenidas, con el fin de presentar una gráfica final.

Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran ejemplos de los ensayos llevadas a cabo con los distintos equipos e instrumentos disponibles, sobre la cabeza y el cabezal de los pilotes.



Figura 4.8: Realización de los ensayos de integridad.



Figura 4.9: Pruebas con el equipo PILETEST.

#### 4.5.3. Resultados obtenidos

A continuación se informan los resultados obtenidos con el acelerómetro de 10 *g*, con y sin medición de la sollicitación, debido a que resultaron ser los más representativos. En todos los casos se ubicó el transductor en el eje vertical de cada pilote, sobre la cabeza o el cabezal, según correspondía. Sobre la cabeza de los pilotes extremos se debió desplazar unos centímetros debido a la presencia de los anclajes.

Se utilizaron los dos martillos descritos anteriormente, adoptándose la masa mayor para el no instrumentado. Se generaron golpes a una distancia de 7.5 a 15 cm. del acelerómetro, en 4 puntos equidistantes 90° entre sí. Se realizaron dos series de registros, aumentando la intensidad de los impactos en la segunda, respecto de la primera.

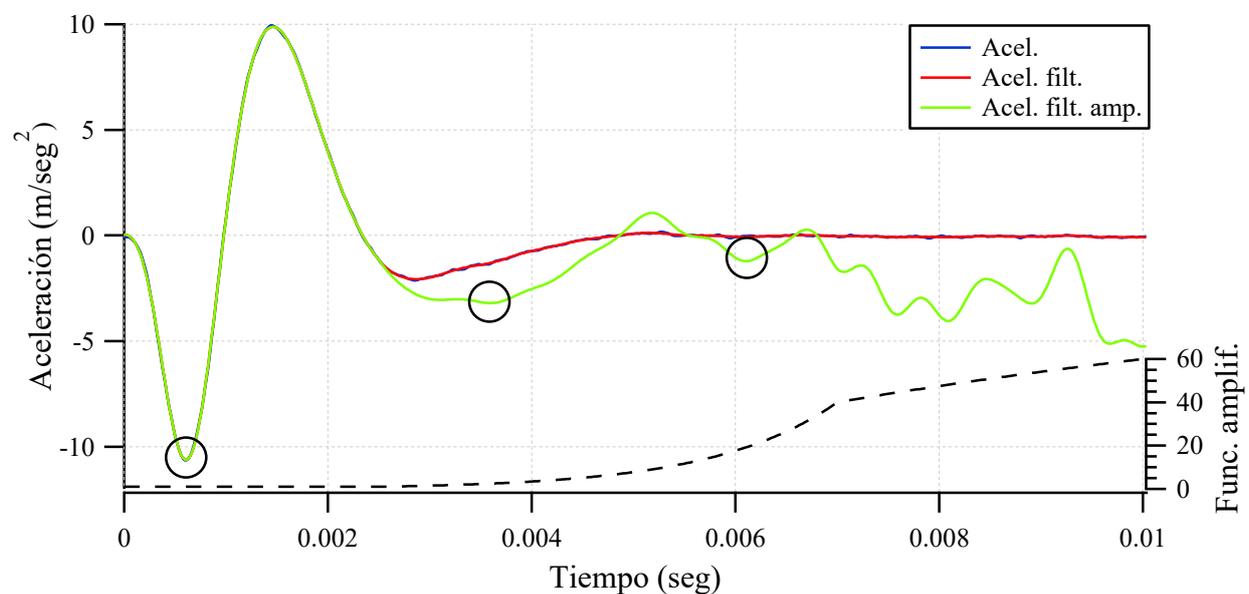
Las señales originales fueron filtradas utilizando un filtro de tipo “pasa baja”, seleccionando una frecuencia de corte adecuada para cada registro. A continuación, se las amplificó utilizando la función descrita en la ec. (3.22). De esta forma, fue posible trabajar con curvas más suaves y acentuadas que las originales, pudiendo detectarse con mayor facilidad las reflexiones de la onda desde los defectos y la punta del pilote.

A su vez, los registros originales de aceleración fueron integrados a velocidad y luego a desplazamiento a fin de realizar un análisis completo. Finalmente, los mismos fueron convertidos al dominio de la frecuencia utilizando la transformada de Fourier. En los casos donde se midió la excitación simultáneamente con la respuesta, fue posible aplicar el método de respuesta impulsiva, a través de los gráficos de movilidad.

Se presentan, a modo de ejemplo, algunas de las curvas resultantes luego del procesamiento de la información recopilada durante los ensayos. Los resultados obtenidos se resumen en las tablas que se adjuntan al final del capítulo.

En la Figura 4.10 se muestran las curvas de aceleración original, filtrada y amplificada correspondientes a una de las pruebas llevadas a cabo sobre pilote N°1, utilizando el martillo instrumentado. Dentro de la misma se superpuso la función de amplificación adoptada en este caso, cuya ordenada se puede medir sobre un eje adicional ubicado a la derecha.

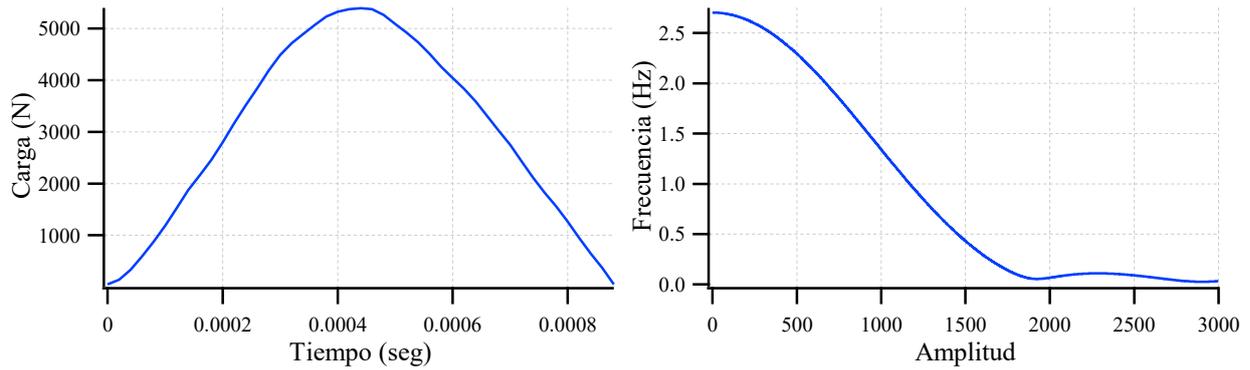
Se resaltaron los instantes de tiempo en los que se pudieron observar las reflexiones provenientes de la punta y del defecto, los cuales fueron comparados con el valor mínimo registrado durante la aplicación de la carga, a fin de calcular las respectivas longitudes.



**Figura 4.10:** Pilote N°1 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°1 - Gráficos de aceleración.

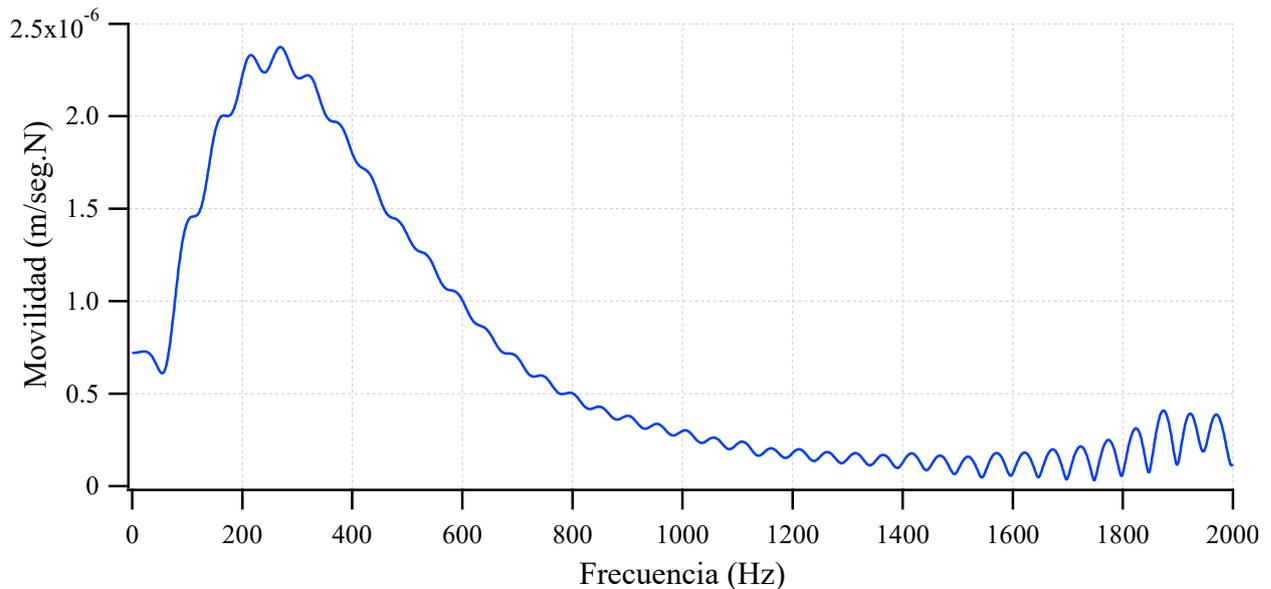
Se puede observar que el registro obtenido, una vez filtrado y amplificado, continúa siendo irregular respecto a lo que indica la teoría del método. Sin embargo, conociendo la profundidad a la que se encontraba el defecto y la longitud total aproximada, fue posible predecir los sectores del gráfico en los que se debía identificar el regreso de la onda.

Por su parte, la Figura 4.11 muestra la carga de impacto registrada por la celda ubicada en el martillo. En el espectro de la misma se evidencia la existencia de una frecuencia de corte cercana a los 2000 Hz.



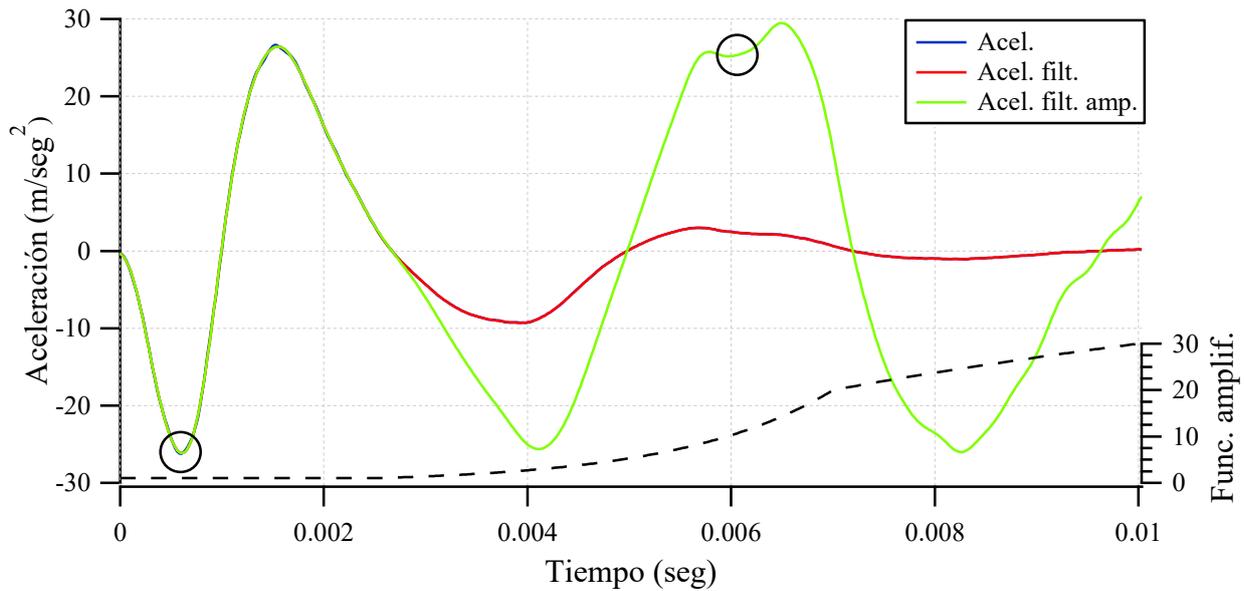
**Figura 4.11:** Pilote N°1 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°1 - Registro y espectro de la carga.

Realizando la división entre los espectros de velocidad y carga, para un determinado intervalo de frecuencias, se obtuvo el gráfico de movilidad que se presenta en la Figura 4.12. Sin embargo, no resultó posible calcular resultados confiables ya que la forma de la curva no fue la esperada y los picos se encontraban ubicados muy próximos entre sí.



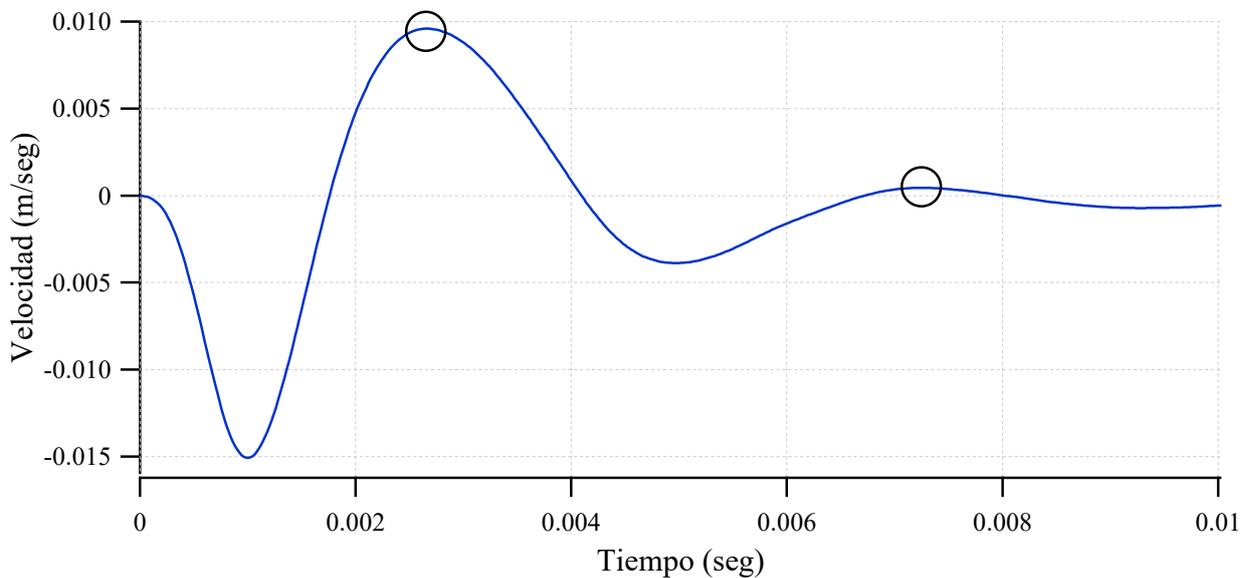
**Figura 4.12:** Pilote N°1 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°1 - Gráfico de movilidad.

En la Figura 4.13 se presenta uno de los registros de aceleración correspondientes al pilote intacto, generado por una excitación provocada por el martillo no instrumentado. En este caso se pudo detectar con mayor claridad el instante de tiempo en el que ocurrió el regreso de la onda desde la punta.



**Figura 4.13:** Pilote N°2 aislado, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°4 - Gráficos de aceleración.

Integrando la curva original se obtuvo la variación de la velocidad en el tiempo, tal como se puede ver en la Figura 4.14. En dicho gráfico se marcaron los picos utilizados para calcular la longitud del elemento en cuestión, a partir de la diferencia de tiempo entre ambos.

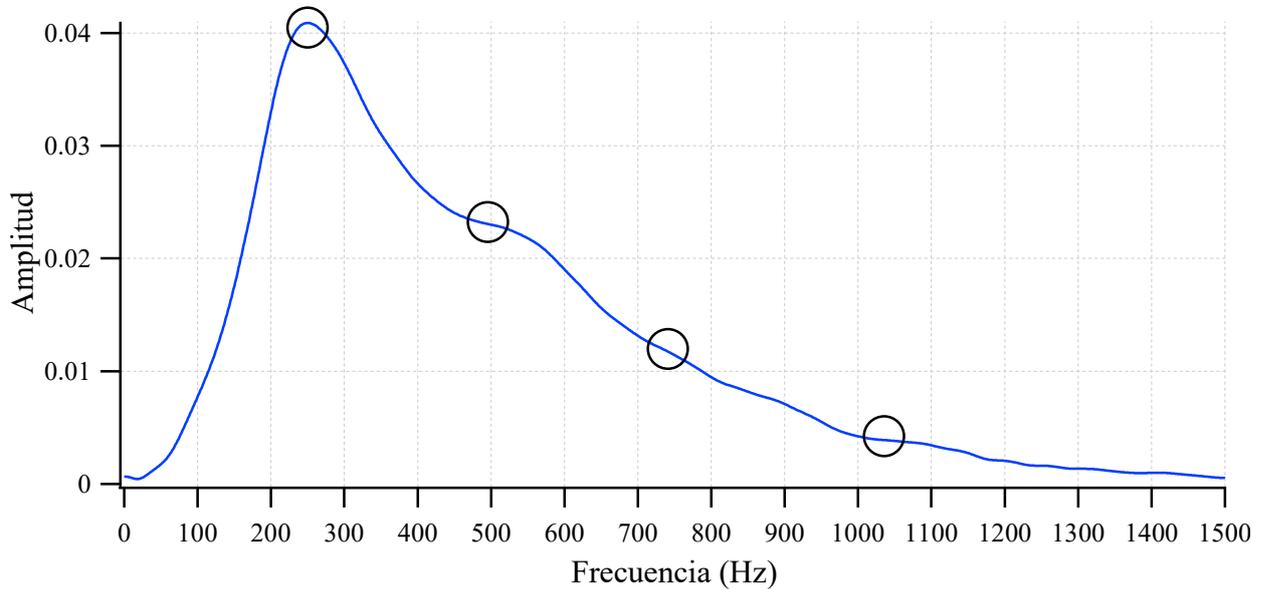


**Figura 4.14:** Pilote N°2 aislado, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°4 - Gráfico de velocidad.

Se procedió a transformar la respuesta temporal de aceleración al dominio de la frecuencia, mediante el uso de la transformada discreta de Fourier. El espectro resultante se adjunta en la Figura 4.15. Se pudo detectar un primer pico y algunos cambios de forma posteriores, en sectores espaciados aproximadamente 250 Hz. entre sí, lo cual daría como resultado una longitud de 8 m., muy distante de la real.

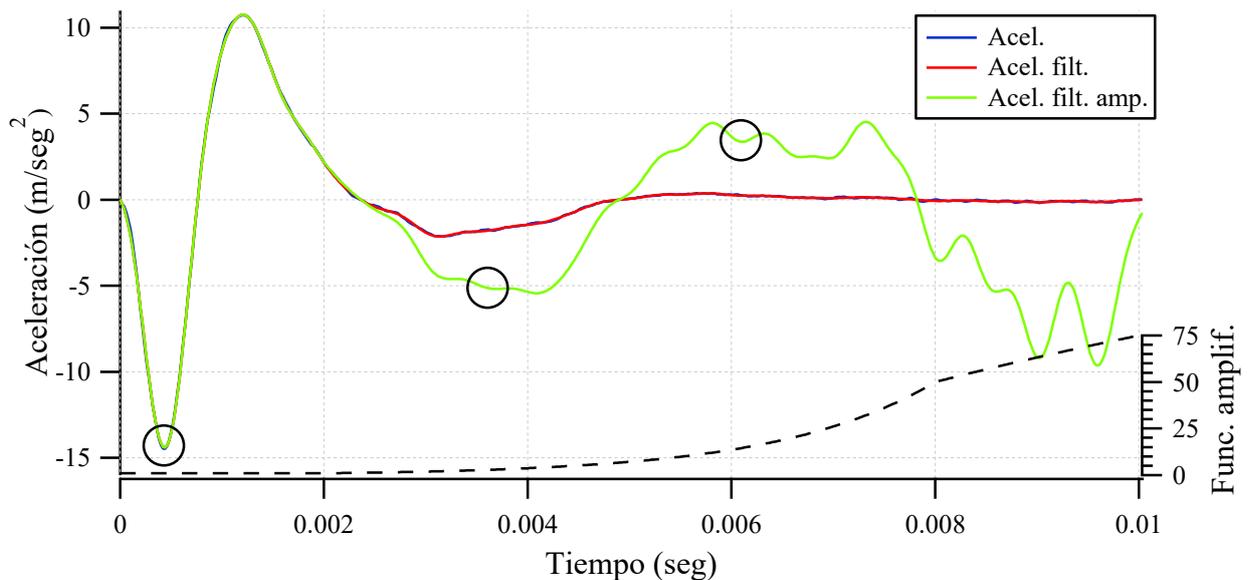
Vale la pena aclarar que la obtención de resultados confiables a partir de los espectros fue casi imposible. Únicamente se pudo apreciar la aparición de variaciones significativas en las curvas

en los casos en que fue posible introducir una gran cantidad de energía al sistema, lo cual se logró golpeando con el martillo de mayor masa y suministrándolo de una gran velocidad en el momento previo a realizar el impacto.



**Figura 4.15:** Pilote N°2 aislado, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°4 - Espectro de aceleración.

Finalmente, se presenta en la Figura 4.16 uno de los registros obtenidos al ensayar el pilote con el defecto asimétrico. Una vez filtrados y amplificadas, en algunos de ellos fue posible calcular la profundidad aproximada a la que se encontraba la anomalía y el largo total. Tal como era de esperar, se pudo observar que golpeando del lado en el que se encontraba la misma, resultaba más evidente la aparición de la primera reflexión.



**Figura 4.16:** Pilote N°3 aislado, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°4 - Gráficos de aceleración.

Por otra parte, en las Figuras 4.17 a 4.19 se adjuntan algunas de las curvas generadas por el

equipo comercial, para los tres pilotes ensayados de manera aislada. En la parte derecha de los mismos se pueden apreciar los registros correspondientes a los sucesivos golpes. Como se mencionó anteriormente, el software se encarga de normalizarlas y promediarlas entre sí, arrojando la gráfica resultante. También se pueden observar los parámetros adoptados, entre ellos la velocidad de propagación de ondas, la amplificación y el filtro. En línea de trazos se superpone la función de amplificación resultante.

En este caso los registros obtenidos tampoco resultaron regulares, por lo que su interpretación no fue sencilla. Sobre las gráficas se indicó el punto en el que ocurrió la reflexión desde la punta del pilote y la respectiva longitud estimada. A su vez, en las curvas correspondientes a los pilotes N°1 y 3 se pueden apreciar un punto de inflexión en las zonas donde se deberían encontrar los defectos.

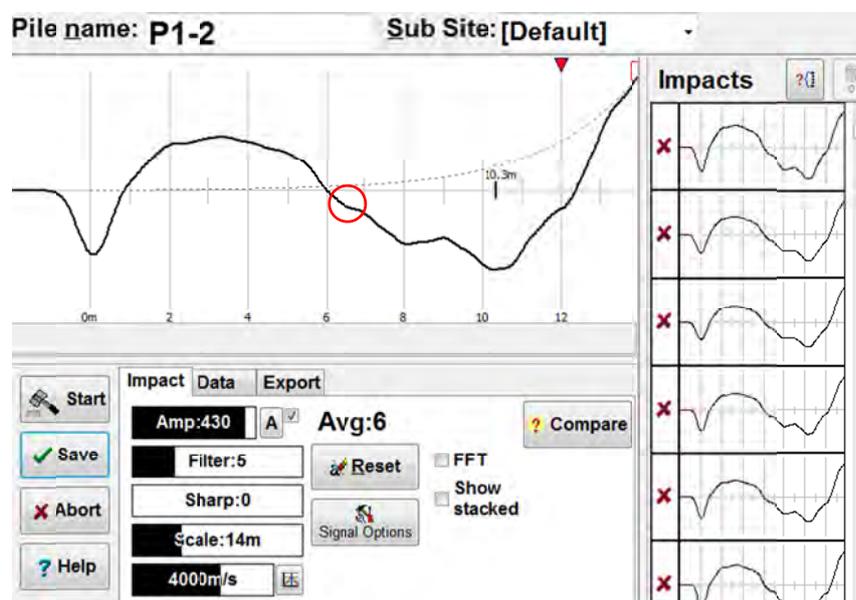


Figura 4.17: Pilote N°1 aislado, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.

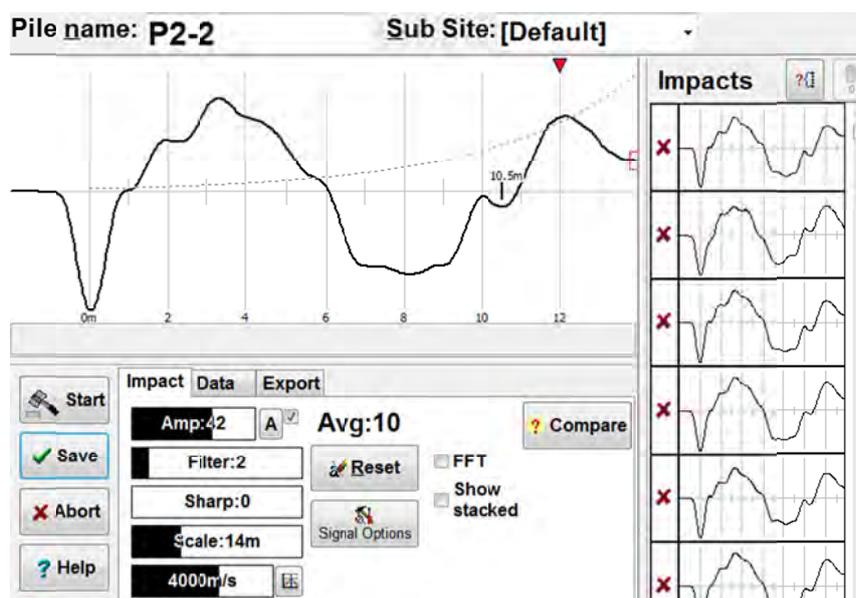


Figura 4.18: Pilote N°2 aislado, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.

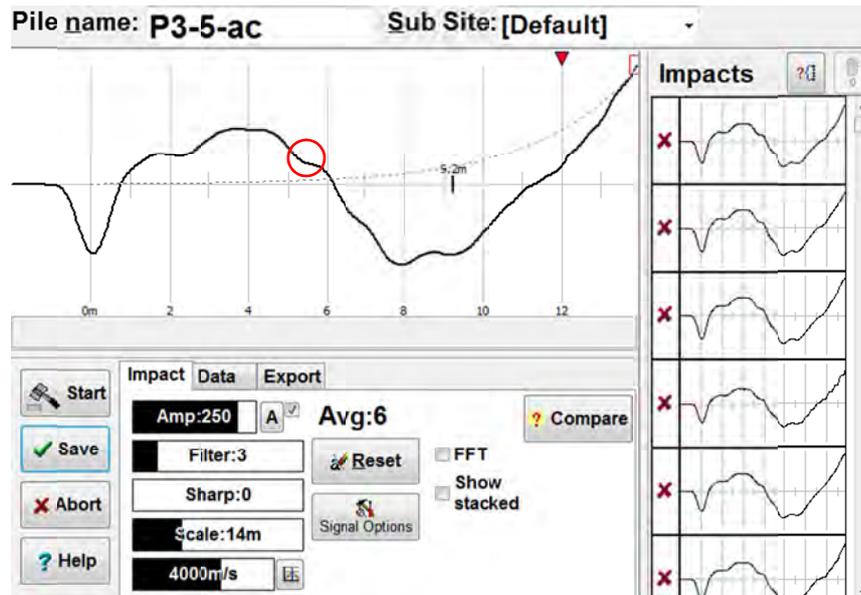


Figura 4.19: Pilote N°3 aislado, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.

A fin de determinar la influencia de la estructura superior al momento de realizar las pruebas, se muestran a continuación algunos de los registros obtenidos luego de impactar sobre la superficie del cabezal.

La Figura 4.20 corresponde al ensayo realizado sobre la proyección del pilote N°1. En ella se pueden detectar dos picos posteriores a la aplicación de la carga, provocados por el retorno de la onda producto de los cambios de impedancia del sistema, como ser la presencia del defecto y el extremo inferior del elemento. Como se puede observar, la forma de las curvas no difiere en gran medida de las análogas para el caso de pilotes aislados y la identificación de las reflexiones no resulta dificultosa, conociendo de antemano el sector en el que se debían encontrar.

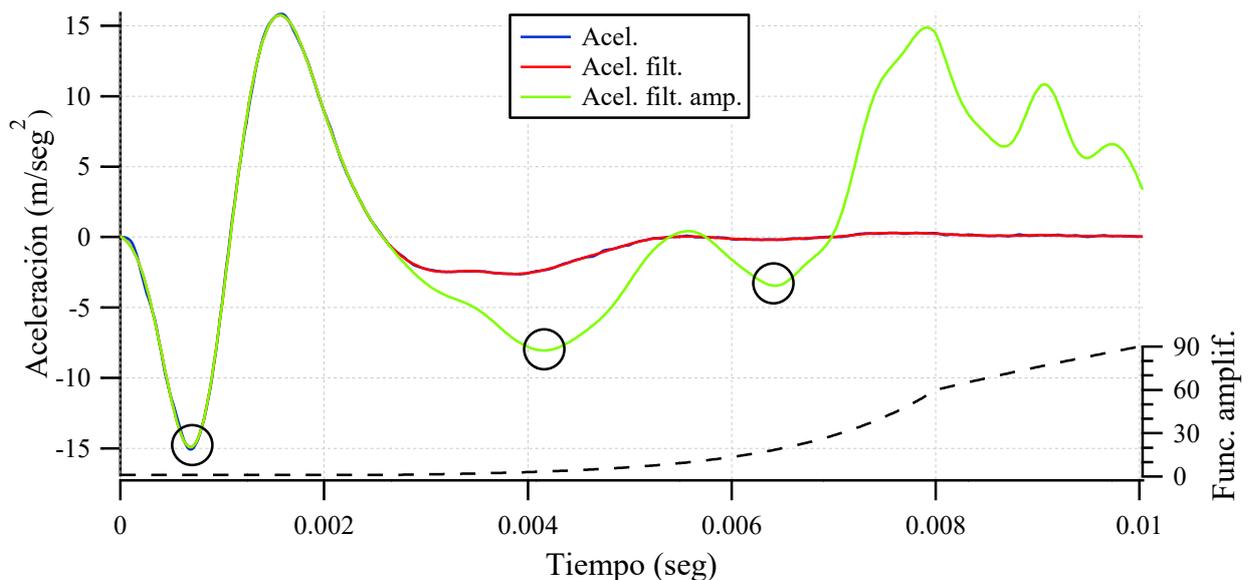
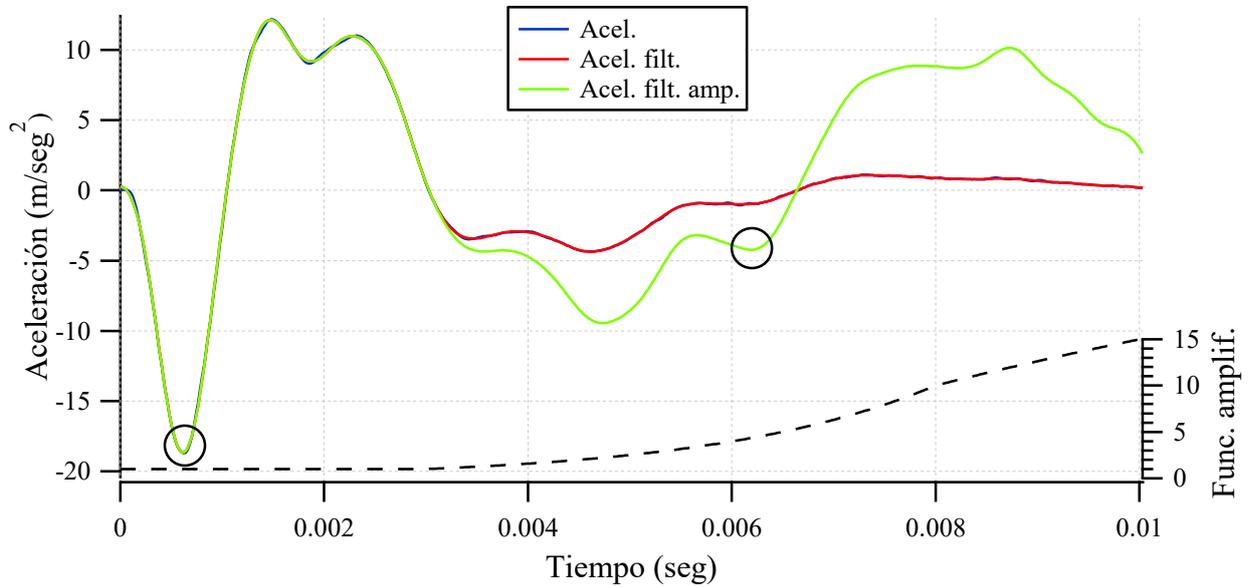
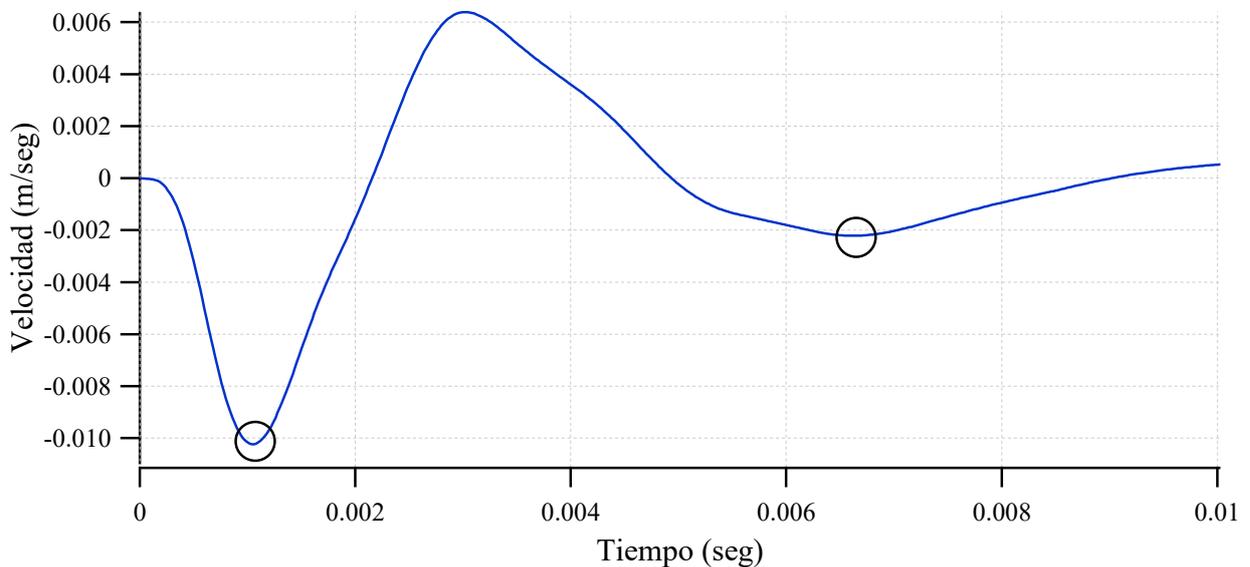


Figura 4.20: Pilote N°1 con cabezal, martillo no instrumentado, serie N°1, golpe N°2 - Gráficos de aceleración.

En las Figuras 4.21 y 4.22 se adjuntan los gráficos temporales de aceleración y velocidad para el pilote central. Resulta evidente que los registros medidos en este caso fueron los que se vieron más distorsionados. Sin embargo, como se verá más adelante, fue posible obtener resultados confiables de la longitud total del elemento.

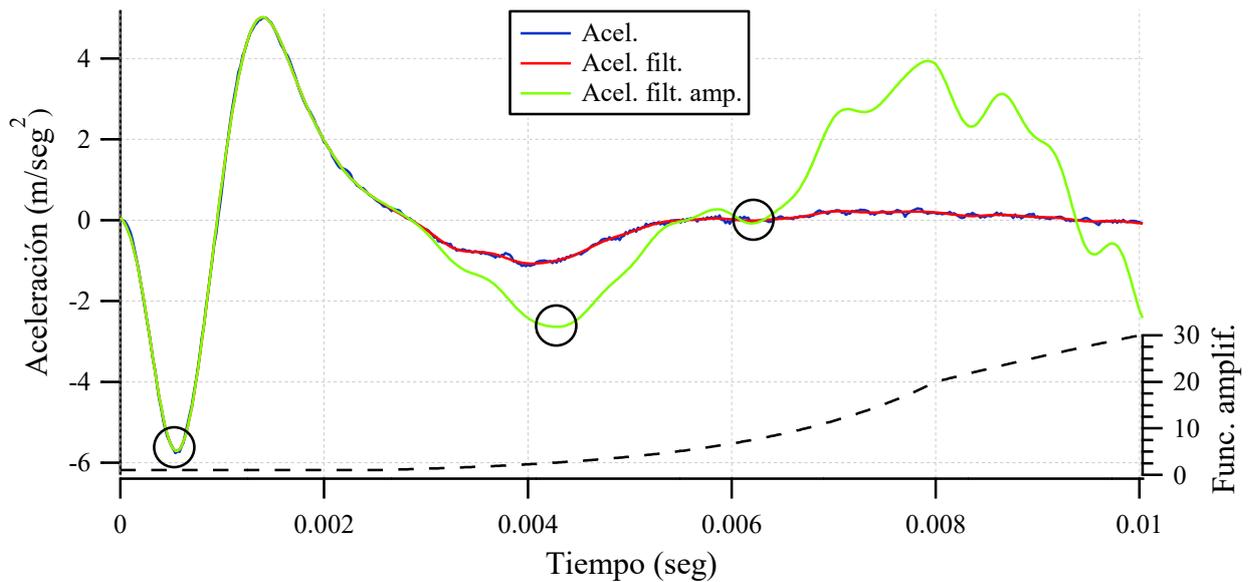


**Figura 4.21:** Pilote N°2 con cabezal, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°1 - Gráficos de aceleración.



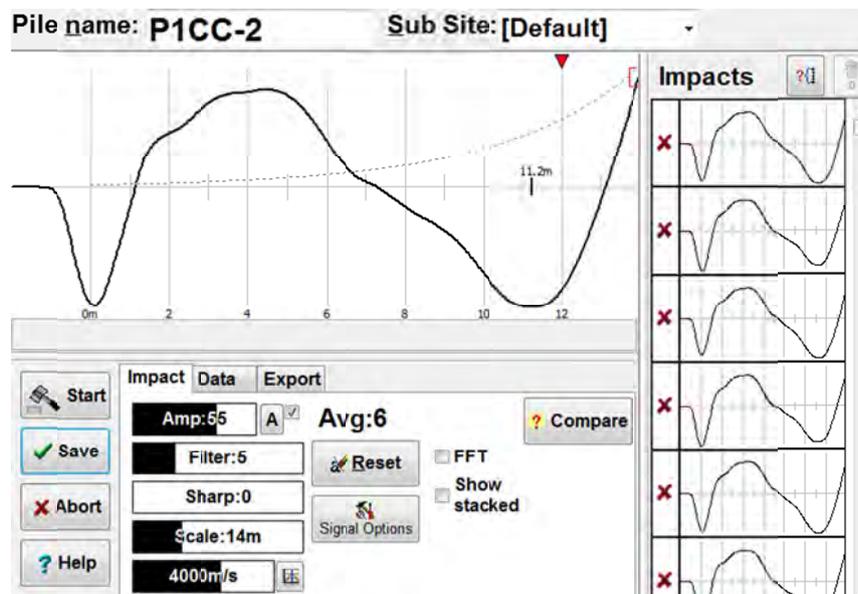
**Figura 4.22:** Pilote N°2 con cabezal, martillo no instrumentado, serie N°2, golpe N°1 - Gráfico de velocidad.

Por último, se presenta una de las respuestas provocadas por la aplicación de una carga de impacto con el martillo instrumentado sobre el pilote N°3 (Figura 4.23). El golpe se efectuó del lado en el que se encontraba el defecto, lo cual facilitó la detección del mismo.



**Figura 4.23:** Pilote N°3 con cabezal, martillo instrumentado, serie N°1, golpe N°4 - Gráficos de aceleración.

Las Figuras 4.24 a 4.26 intentan ejemplificar los gráficos de velocidad obtenidos con el equipo PILETEST al momento de realizar los ensayos sobre cada uno de los pilotes, una vez construido el cabezal. En este caso se puede observar que la detección de las reflexiones provenientes desde la punta de los elementos fue evidente, no así la identificación de los defectos, que resultó imposible. De forma similar a lo anteriormente resaltado, se produjo un mayor número de oscilaciones en la respuesta medida sobre el pilote central, siendo este el más afectado por la presencia de la estructura superior.



**Figura 4.24:** Pilote N°1 con cabezal, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.

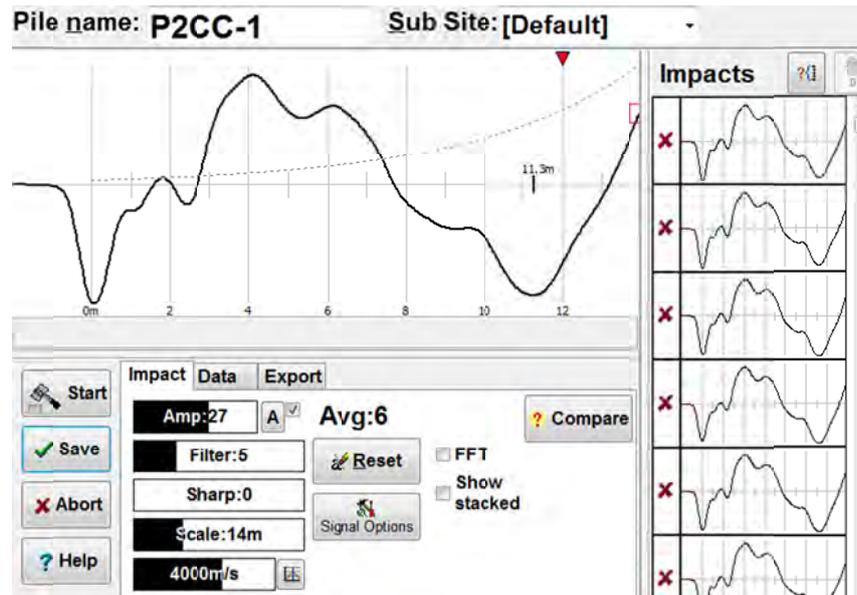


Figura 4.25: Pilote N°2 con cabezal, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.

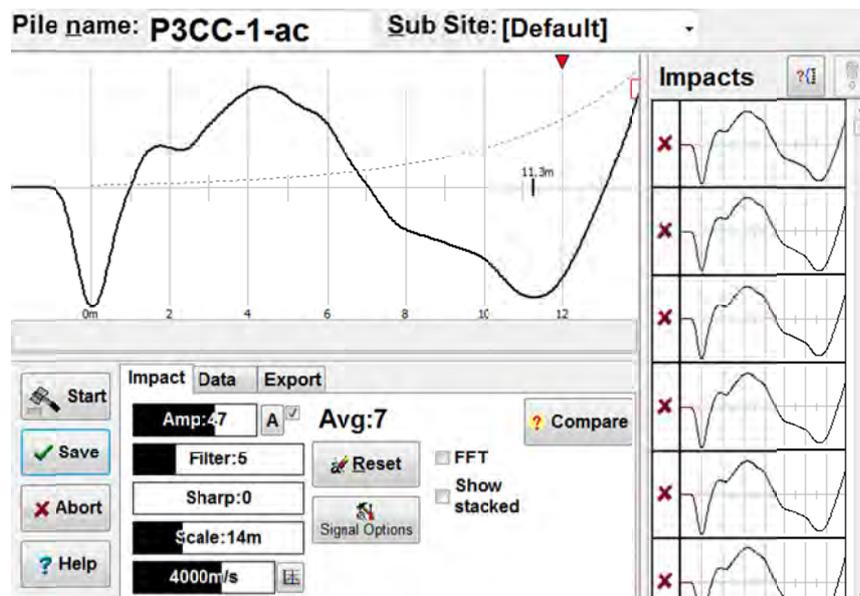


Figura 4.26: Pilote N°3 con cabezal, equipo PILETEST - Gráfico de velocidad.

En las Tablas 4.1 a 4.6 se incluye la totalidad de los valores calculados a partir de los registros temporales de aceleración y velocidad, en base a los ensayos realizados sobre cada pilote, tanto para el caso en que se encontraban aislados como vinculados mediante el cabezal. A su vez, se detalla el martillo utilizado en cada caso, el valor adoptado como frecuencia de corte y el error cometido al estimar la ubicación de los defectos.

Por su parte, la Tabla N° 4.7 muestra los valores de longitud total arrojados por el software del equipo comercial. Para finalizar, en la Tabla 4.8 se presenta el promedio de los resultados, indicando el coeficiente de variación correspondiente.

**Tabla 4.1:** Pilote N°1 aislado.

Martillo	Serie N°	Golpe N°	Frec. Corte (Hz)	Defecto (m)	Error (%)	L acel. (m)	L veloc. (m)
No inst.	1	1	3000	-	-	10.72	9.76
		2	3000	5.68	5.33	11.20	9.92
		3	3000	5.80	3.33	10.68	11.04
		4	3000	-	-	10.88	11.16
	2	1	3000	5.96	0.67	10.72	9.44
		2	3000	5.56	7.33	10.32	10.28
		3	3000	5.76	4.00	10.76	11.40
		4	3000	5.92	1.33	10.68	11.96
Instrum.	1	1	2000	6.00	0.00	11.00	10.20
		2	2500	5.92	1.33	12.84	10.24
		3	2000	5.88	2.00	12.04	10.84
		4	1800	5.84	2.67	10.40	11.32
	2	1	2000	6.12	2.00	10.88	9.76
		2	2500	5.96	0.67	10.52	10.64
		3	2000	6.04	0.67	10.24	10.92
		4	2000	6.08	1.33	10.40	10.48

**Tabla 4.2:** Pilote N°2 aislado.

Martillo	Serie N°	Golpe N°	Frec. Corte (Hz)	Defecto (m)	Error (%)	L acel. (m)	L veloc. (m)
No inst.	1	1	3000	-	-	10.64	9.16
		2	3000	-	-	11.16	9.20
		3	3000	-	-	11.32	9.16
		4	3000	-	-	11.24	9.12
	2	1	3000	-	-	10.84	9.20
		2	3000	-	-	10.96	9.08
		3	3000	-	-	10.96	9.12
		4	3000	-	-	10.76	9.20
Instrum.	1	1	2000	-	-	10.80	9.08
		2	2000	-	-	10.60	9.12
		3	2000	-	-	10.96	9.20
		4	2000	-	-	10.72	9.04
	2	1	2000	-	-	10.88	9.00
		2	2500	-	-	11.08	9.20
		3	2500	-	-	10.72	9.32
		4	2000	-	-	10.84	9.04

**Tabla 4.3:** Pilote N°3 aislado.

Martillo	Serie N°	Golpe N°	Frec. Corte (Hz)	Defecto (m)	Error (%)	L acel. (m)	L veloc. (m)
No inst.	1	1	3000	7.16	19.33	-	12.80
		2	3000	-	-	10.56	9.56
		3	3000	7.08	18.00	10.60	11.16
		4	3000	7.36	22.67	11.56	11.68
	2	1	3000	6.96	16.00	-	11.96
		2	3000	6.76	12.67	10.72	9.56
		3	3000	7.16	19.33	10.96	11.00
		4	3000	7.24	20.67	11.56	11.40
Instrum.	1	1	2000	7.00	16.67	11.40	13.16
		2	2000	6.40	6.67	-	10.60
		3	2000	6.44	7.33	11.32	11.76
		4	2000	6.48	8.00	11.32	11.16
	2	1	1800	6.84	14.00	11.56	13.52
		2	1600	6.56	9.33	-	8.64
		3	2000	6.44	7.33	11.16	11.12
		4	2000	6.44	7.33	11.48	11.24

**Tabla 4.4:** Pilote N°1 con cabezal.

Martillo	Serie N°	Golpe N°	Frec. Corte (Hz)	Defecto (m)	Error (%)	L acel. (m)	L veloc. (m)
No inst.	1	1	1800	-	-	10.80	11.32
		2	1800	6.32	5.33	11.48	11.48
		3	1800	7.00	16.67	12.08	11.76
		4	1800	6.60	10.00	11.60	11.64
	2	1	1800	-	-	11.48	11.52
		2	1800	6.28	4.67	11.28	11.20
		3	1800	6.84	14.00	11.52	10.84
		4	1800	6.16	2.67	11.00	11.04
Instrum.	1	1	1800	5.88	2.00	10.36	11.08
		2	1800	6.44	7.33	10.88	10.72
		3	1800	6.68	11.33	11.76	11.16
		4	1800	6.16	2.67	10.36	10.64
	2	1	1800	-	-	10.48	10.84
		2	1800	6.64	10.67	11.04	10.88
		3	1800	6.92	15.33	11.32	11.08
		4	1800	6.24	4.00	11.40	11.00

**Tabla 4.5:** Pilote N°2 con cabezal.

Martillo	Serie N°	Golpe N°	Frec. Corte (Hz)	Defecto (m)	Error (%)	L acel. (m)	L veloc. (m)
No inst.	1	1	1800	-	-	11.04	10.96
		2	1800	-	-	11.36	11.32
		3	1800	-	-	11.04	11.36
		4	1800	-	-	11.20	11.16
	2	1	1800	-	-	11.12	11.16
		2	1800	-	-	11.36	11.44
		3	1800	-	-	11.40	11.36
		4	1800	-	-	11.24	11.12
Instrum.	1	1	1800	-	-	11.12	11.00
		2	1800	-	-	11.12	11.12
		3	1800	-	-	11.32	11.32
		4	1800	-	-	11.12	11.24
	2	1	1800	-	-	10.88	10.96
		2	1800	-	-	11.20	11.24
		3	1800	-	-	11.40	11.52
		4	1800	-	-	11.24	11.20

**Tabla 4.6:** Pilote N°3 con cabezal.

Martillo	Serie N°	Golpe N°	Frec. Corte (Hz)	Defecto (m)	Error (%)	L acel. (m)	L veloc. (m)
No inst.	1	1	1800	-	-	11.60	11.12
		2	1800	-	-	11.28	10.92
		3	1800	-	-	10.92	10.72
		4	1800	-	-	10.96	10.64
	2	1	1800	-	-	11.76	11.20
		2	1800	-	-	11.36	10.88
		3	1800	-	-	10.44	10.64
		4	1800	-	-	11.28	10.64
Instrum.	1	1	1800	-	-	11.20	10.72
		2	1800	-	-	11.92	11.24
		3	1800	-	-	10.64	11.04
		4	1800	6.96	16.00	11.28	10.68
	2	1	1800	-	-	11.40	10.64
		2	1800	-	-	11.00	11.00
		3	1800	-	-	11.04	10.60
		4	1800	7.12	18.67	11.04	10.64

**Tabla 4.7:** Resultados obtenidos con el equipo PILETEST.

Pilote N°	Estado	Ensayo N°	Longitud (m)
1	Aislado	1	10.40
		2	10.30
		3	10.00
		4	10.30
		5	10.20
		6	9.90
		7	10.10
		8	10.40
		9	10.40
	Con cabezal	1	11.30
		2	11.20
		3	10.90
		4	11.30
		5	11.20
2	Aislado	1	10.50
		2	10.50
		3	10.60
		4	10.60
	Con cabezal	1	11.30
		2	11.30
		3	11.30
		4	11.30
3	Aislado	1	9.20
		2	9.00
		3	9.50
		4	9.70
		5	9.20
		6	9.10
		7	9.20
		8	9.50
		9	9.60
	Con cabezal	1	11.30
		2	11.30
		3	11.20
		4	11.20
		5	11.40
6		11.40	
7		11.50	

**Tabla 4.8:** Resumen de resultados.

Pilote N°	Estado	Martillo	Defecto (m)	Coef. var.	Error (%)	L acel. (m)	Coef. var.	L veloc. (m)	Coef. var.	L PILETEST (m)	Coef. var.
1	Aislado	No inst.	5.78	0.15	3.67	10.75	0.24	10.62	0.90	10.22	0.19
		Instrum.	5.98	0.10	0.33	11.04	0.93	10.55	0.49		
	Con cabezal	No inst.	6.53	0.34	8.83	11.41	0.39	11.35	0.31	11.18	0.16
		Instrum.	6.42	0.36	7.05	10.95	0.52	10.93	0.19		
2	Aislado	No inst.	-	-	-	10.99	0.24	9.16	0.05	10.55	0.06
		Instrum.	-	-	-	10.83	0.15	9.13	0.11		
	Con cabezal	No inst.	-	-	-	11.22	0.15	11.24	0.16	11.30	0.00
		Instrum.	-	-	-	11.18	0.16	11.20	0.18		
3	Aislado	No inst.	7.10	0.20	18.38	10.99	0.46	11.14	1.12	9.33	0.24
		Instrum.	6.58	0.22	9.58	11.37	0.14	11.40	1.52		
	Con cabezal	No inst.	-	-	-	11.20	0.42	10.85	0.22	11.33	0.11
		Instrum.	7.04	0.11	17.33	11.19	0.37	10.82	0.24		

Se puede apreciar en las tablas anteriores que, a pesar de que los registros medidos no indicaban claramente la ubicación de las reflexiones, en general se pudieron obtener resultados bastante similares entre los diferentes ensayos. Incluso en las mediciones realizadas sobre la estructura completa se observó una buena concordancia entre los valores calculados para cada golpe realizado, con uno u otro martillo, tanto a partir de los registros de aceleración como de velocidad.

Vale aclarar que, para los registros de velocidad, los resultados más coherentes en el caso de pilotes aislados se obtuvieron entre picos máximos de las curvas, mientras que en el análisis sobre el cabezal se midió la diferencia de tiempo entre mínimos, como se puede observar en las Figuras 4.14 y 4.22 respectivamente. Las longitudes calculadas a partir de las curvas de velocidad en el pilote N°2 aislado resultaron muy alejadas del resto y por lo tanto se descartan.

Tal como era de esperar, la detección de los defectos resultó más sencilla en el pilote que poseía una reducción simétrica de la sección transversal, obteniéndose valores más cercanos al esperado. Asimismo, la identificación de las anomalías se tornó dificultosa para el caso en que los elementos se encontraban vinculados mediante el cabezal, apenas siendo perceptible el defecto asimétrico en unos pocos registros.

El equipo PILETEST arrojó valores dispares comparando los ensayos realizados en los pilotes aislados con los llevados a cabo sobre el cabezal. En el primer caso resultaron inferiores a lo esperado, en cambio, los obtenidos en las últimas pruebas fueron más representativos de la situación real.

## Capítulo 5: COMPARACIÓN NUMÉRICO-EXPERIMENTAL

### 5.1. Introducción

Se procedió a simular numéricamente algunos de los ensayos realizados sobre los pilotes, tanto ubicados de manera aislada como vinculados mediante el cabezal. Para ello se utilizó el modelo tridimensional de elementos finitos descrito en el Capítulo 3. Las características del hormigón se adoptaron de acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos complementarios llevados a cabo sobre las probetas confeccionadas junto con los pilotes. Los vínculos ubicados a lo largo de la superficie lateral y en la base se definieron a partir de valores de referencia (Bowles, 1997) para un suelo cohesivo blando (tipo III de acuerdo al CIRSOC 103), como el que se observó durante las excavaciones (ver Anexo A). Los mismos fueron divididos en dos grupos, teniendo en cuenta los sectores del pilote que se encontraba sobre la napa freática y por debajo de la misma (ver Anexo A). Los parámetros físicos considerados se resumen a continuación:

Hormigón:

$$E_h = 3.3378 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$\nu_h = 0.20$$

$$\rho_h = 2317 \text{ kg/m}^3$$

Suelo sobre napa:

$$E_s = 3 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

$$\nu_s = 0.38$$

$$\rho_s = 1750 \text{ kg/m}^3$$

$$kb_v = 30 \text{ MN/m}^3$$

$$kb_h = 15 \text{ MN/m}^3$$

Suelo bajo napa:

$$E_s = 3 \times 10^7 \text{ N/m}^2$$

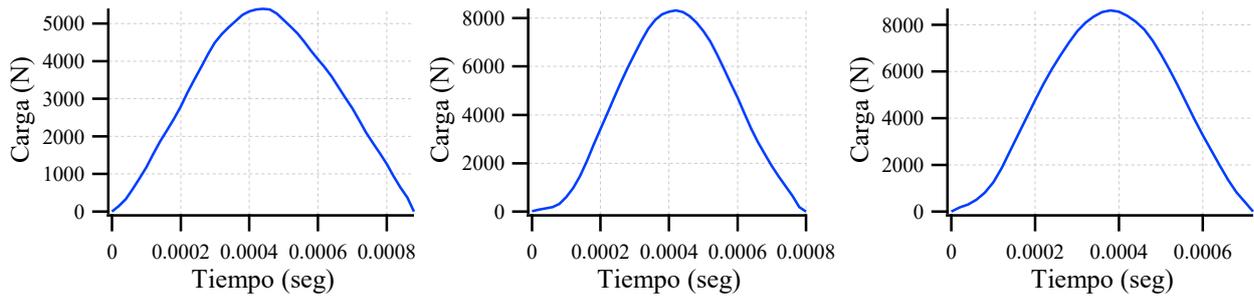
$$\nu_s = 0.49$$

$$\rho_s = 2000 \text{ kg/m}^3$$

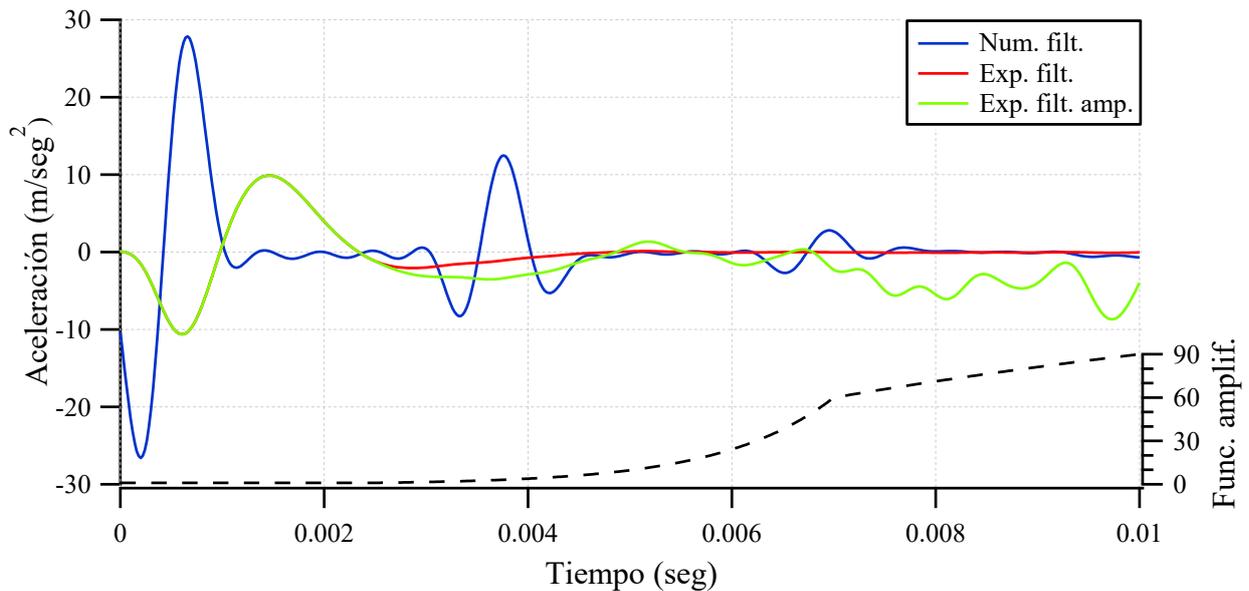
Se introdujeron al programa de elementos finitos las cargas impulsivas registradas por el martillo instrumentado en el golpe seleccionado y se analizó la respuesta de cada pilote. El incremento temporal utilizado fue equivalente al adoptado para los ensayos de campo, resultando un valor de  $\Delta t = 2 \times 10^{-5} \text{ seg}$ .

### 5.2. Pilotes aislados

En la Figura 5.1 se presentan las cargas medidas al impactar sobre cada uno de los elementos aislados. El contraste entre las curvas de aceleración numéricas y experimentales se puede observar en las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4, para los pilotes N°1, 2 y 3, respectivamente. La frecuencia de corte para filtrar los registros numéricos se seleccionó en base al espectro de la carga correspondiente. Las mediciones experimentales se presentan filtradas y amplificadas, de acuerdo con la función indicada en el sector inferior de cada gráfico.



**Figura 5.1:** Pilote N°1 aislado, serie N°1, golpe N°1 (izquierda), pilote N°2 aislado, serie N°1, golpe N°4 (centro) y pilote N°3 aislado, serie N°1, golpe N°4 (derecha) - Registros de la carga.



**Figura 5.2:** Pilote N°1 aislado - Comparación numérico-experimental.

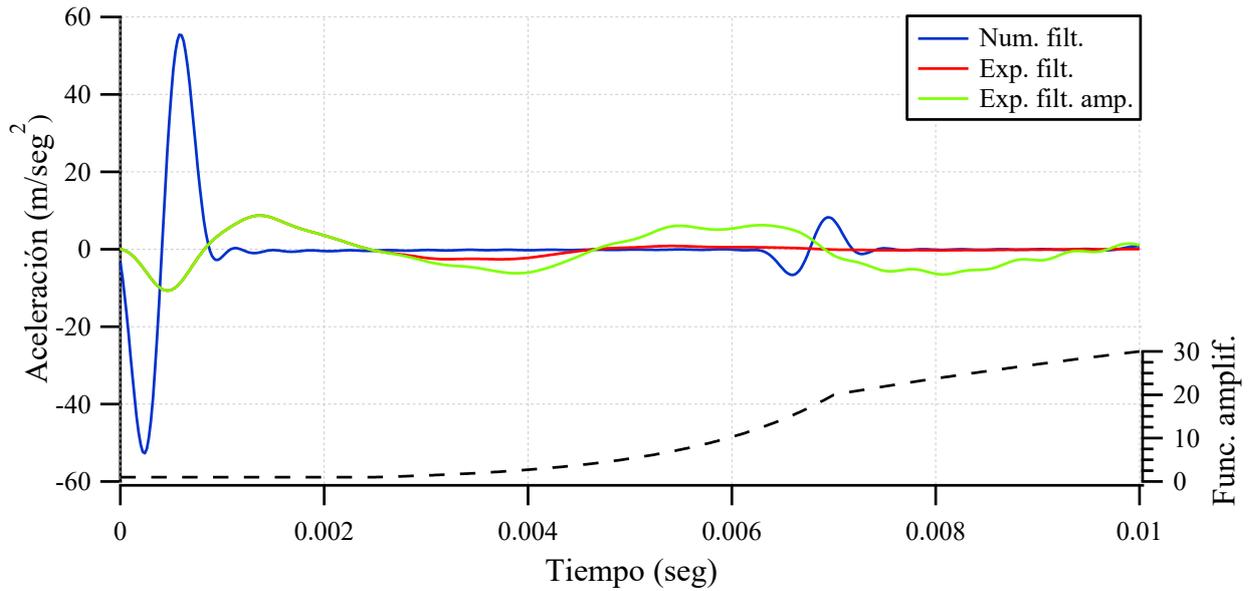


Figura 5.3: Pilote N°2 aislado - Comparación numérico-experimental.

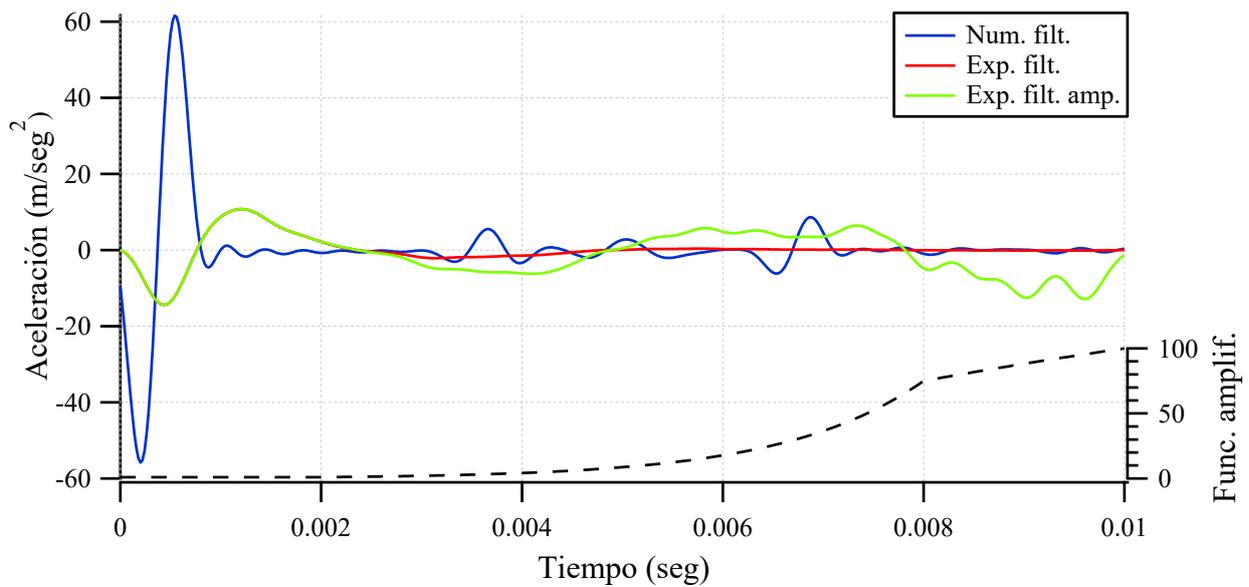
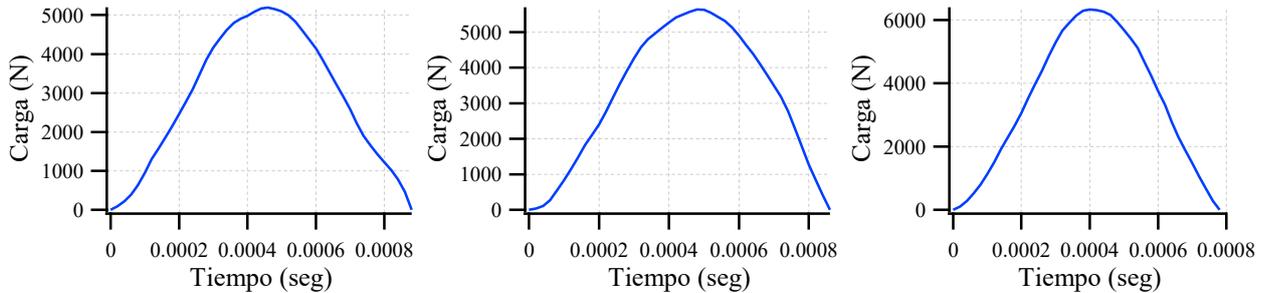


Figura 5.4: Pilote N°3 aislado - Comparación numérico-experimental.

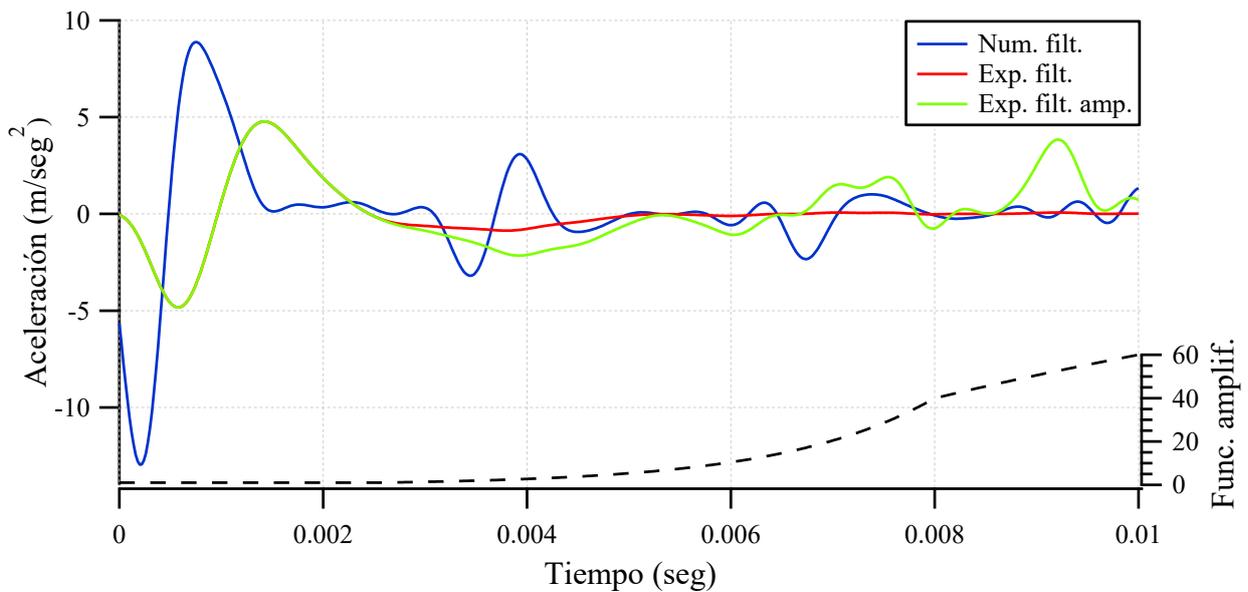
De los gráficos anteriores se puede inferir que no existe una coincidencia exacta entre los registros arrojados por las simulaciones y los obtenidos en las pruebas de campo. En primer lugar, se aprecia claramente la diferencia en que se evidencia el efecto del golpe en los primeros instantes de tiempo, tanto en lo que respecta a amplitud como a duración de la respuesta. A su vez, la atenuación producida por el suelo es mucho mayor en el caso del ensayo experimental en comparación con el correspondiente modelo numérico, en cuyas curvas se logran distinguir a simple vista las reflexiones, sin la necesidad de amplificación.

### 5.3. Pilotes con cabezal

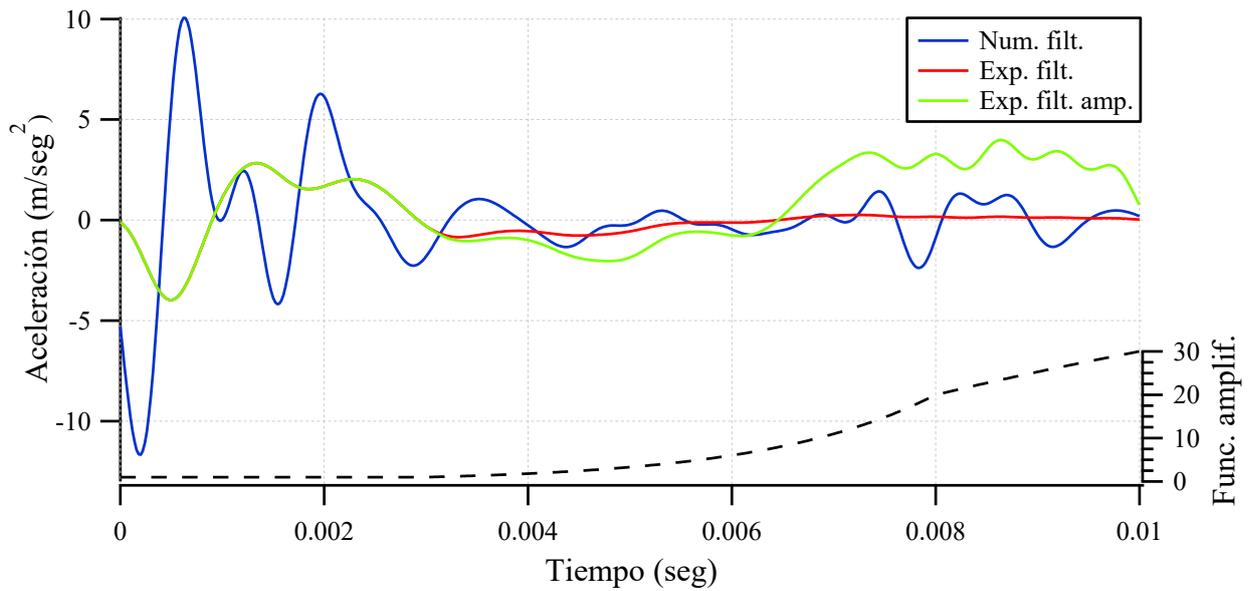
Por su parte, los golpes registrados en los ensayos realizados sobre el cabezal, para cada uno de los pilotes, se pueden apreciar en la Figura 5.5. De manera análoga al caso anterior, en las Figuras 5.6 a 5.8 se superponen las respuestas obtenidas numérica y experimentalmente a partir de dichos impactos.



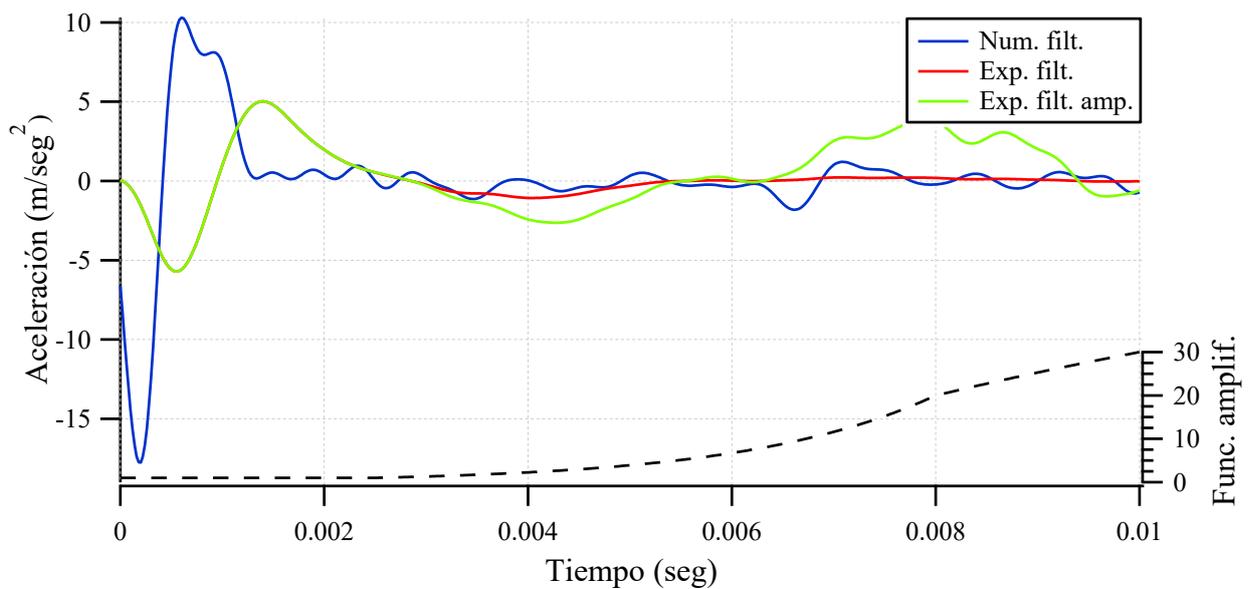
**Figura 5.5:** Pilote N°1 con cabezal, serie N°1, golpe N°2 (izquierda), pilote N°2 con cabezal, serie N°1, golpe N°2 (centro) y pilote N°3 con cabezal, serie N°1, golpe N°4 (derecha) - Registros de la carga.



**Figura 5.6:** Pilote N°1 con cabezal - Comparación numérico-experimental.



**Figura 5.7:** Pilote N°2 con cabezal - Comparación numérico-experimental.



**Figura 5.8:** Pilote N°3 con cabezal - Comparación numérico-experimental.

Como primera observación se puede mencionar que la masa del cabezal absorbe parte de la energía de impacto (Huang y Ni, 2012). Esto se pone de manifiesto al comparar la amplitud de los picos iniciales de las curvas numéricas y experimentales de los pilotes con cabezal, con la correspondiente a elementos aislados. A pesar de que las cargas medidas sobre el cabezal fueron un poco inferiores a las aplicadas sobre la cabeza de los pilotes, los valores máximos y mínimos de aceleraciones registrados resultaron muchos menores.

En este caso tampoco se obtuvo una buena correlación al superponer los gráficos extraídos del modelo numérico y los arrojados por los ensayos experimentales. Esta diferencia se supone producto, por un lado, de las simplificaciones asumidas en la simulación numérica y, por el otro, de limitaciones propias de las pruebas de campo.

## Capítulo 6: CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un estudio experimental y numérico acerca de la integridad estructural de pilotes de hormigón armado, tanto ubicados de manera aislada como vinculados mediante un cabezal, con el objetivo principal de identificar ciertas anomalías presentes en algunos de ellos y estimar la longitud real de los mismos. Se buscaba evaluar la factibilidad de uno de los métodos comúnmente utilizados en la práctica para el caso en que no sea posible acceder a la cabeza del elemento a ensayar.

En este contexto se confeccionó un grupo de tres pilotes, a dos de los cuales se les introdujeron defectos adrede, y luego se los vinculó mediante una estructura superior de hormigón armado. Por otra parte, se desarrolló un modelo numérico tridimensional, con el fin de poder representar, de manera completa, el sistema involucrado en los ensayos de campo. Las conclusiones más significativas se resumen a continuación.

### 6.1. Modelos numéricos

Respecto a la modelación implementada para simular el problema, se pudo verificar que la misma condujo a respuestas que coincidían casi exactamente con los modelos adoptados frecuentemente en la bibliografía consultada, particularmente con el unidimensional, el cual posee una amplia aceptación en publicaciones sobre el tema.

A pesar de ser computacionalmente más costoso, el modelo tridimensional presentaba la ventaja de ser el único que permitía introducir defectos del tipo asimétrico y daba la libertad respecto a la aplicación de la carga y la medición de las respuestas en diferentes nodos de la superficie. Una vez verificada, esta modelación resultó muy útil para simular el problema que se debía resolver.

La utilización del filtro de tipo “pasa baja” resultó de mucha utilidad, reduciendo considerablemente el efecto de las vibraciones de elevada frecuencia que aparecían en algunos de los registros obtenidos.

Se pudo observar que el efecto de amortiguamiento del suelo provocó una gran atenuación de la onda, dificultando la detección de las reflexiones. En este sentido, es de destacar la importancia de emplear funciones de amplificación. En particular, la utilizada en este trabajo resulta muy atractiva debido a que permite acentuar las curvas en las zonas de interés, evitando una distorsión innecesaria de los registros.

Se pudieron obtener resultados aproximados a los esperados al analizar en el dominio del tiempo las respuestas correspondientes a pilotes aislados intactos y con un defecto del tipo cuello simétrico. Del estudio realizado sobre el modelo con una reducción de la sección sólo en un cuarto de su perímetro, se pudo concluir que los gráficos temporales, medidos tanto del lado sano como del defectuoso, condujeron a valores con un error aceptable. Como resulta lógico

pensar, el menor tamaño de la anomalía provocó que la amplitud de las reflexiones fuera menor al caso del defecto completo.

Al graficar los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento, salvo en un caso puntual, no fue posible individualizar los picos de frecuencia. Por lo tanto, vale la pena recalcar la ventaja de recurrir a los gráficos de movilidad, ya que los mismos permitieron calcular con una precisión aceptable, no solo la dimensión vertical, sino también la sección transversal de los elementos analizados. Como limitación se debe decir que, a diferencia de los registros temporales, estas curvas no fueron capaces de predecir, simultáneamente, la longitud total y la ubicación de los defectos.

Al estudiar numéricamente la influencia del cabezal sobre los registros generados por la aplicación de una carga de impacto sobre el eje de cada uno de los pilotes, se pudo observar que las respuestas, tanto analizadas en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, se vieron alteradas respecto a las análogas para el caso en que se realizó el análisis de manera aislada. Particularmente, las curvas correspondientes al elemento central, debido a la rigidez introducida por la estructura a ambos lados del mismo, fueron las que se vieron más distorsionadas.

De todas formas, se pudieron identificar las reflexiones de la onda producto de los cambios de impedancia del sistema y calcular algunos valores de interés con una exactitud aceptable, fundamentalmente a partir de los gráficos de aceleración. En este caso, la interpretación de la información en el dominio de la frecuencia no resultó fructífera, ya que no se pudieron obtener resultados confiables.

## 6.2. Ensayos experimentales

Con relación a los registros obtenidos a partir de los ensayos de integridad llevados a cabo sobre los pilotes, tanto sobre la cabeza como sobre el cabezal, se pudo apreciar que los mismos resultaron muy irregulares, incluso luego de ser filtrados. Esto se debió a que la relación longitud/diámetro se adoptó cercana al límite superior indicado para el método. En casos como este, tanto los cambios de sección transversal a lo largo del elemento como la variación en el perfil del suelo, afectan notablemente la respuesta estructural.

También se observó que el intervalo de tiempo necesario para detectar adecuadamente las reflexiones y reproducir de forma confiable la carga actuante debía ser pequeño, por lo que se procedió a adoptar la mayor tasa de adquisición de datos que permitía la placa utilizada.

Luego de probar variantes respecto a la masa con la que se impactaba, el lugar del golpe, la capacidad del acelerómetro empleado y su ubicación, sobre los pilotes aislados, fue posible arribar a resultados contundentes, y con una dispersión aceptable, basándose en las curvas de aceleración y velocidad en función del tiempo.

En este sentido, es de destacar el hecho de que, midiendo simultáneamente con los acelerómetros de 5 y 10 g de capacidad, al aplicar un determinado impulso, los registros obtenidos de los mismos no resultaron coincidentes. Se supone que esto se debió a que el mecanismo interno no es equivalente en ambos y a que la inercia propia de cada uno pudo haber afectado su comportamiento.

Fue posible comprobar experimentalmente que no influye significativamente en la respuesta,

el hecho de colocar el transductor cerca del eje del pilote y golpear a unos centímetros del mismo, es decir, a la inversa de lo que sugiere la norma y las publicaciones acerca del método. Esto permite fijar el acelerómetro y realizar golpes en diferentes lugares a fin de comparar los registros.

La detección del defecto asimétrico resultó más evidente cuando se generaron los impactos o se realizaron las mediciones sobre la proyección del mismo en la cabeza del pilote o el cabezal. En este sentido se puede inducir que, si el registro obtenido de golpear o medir en una determinada posición difiere del resto, es posible que en dicho sector del elemento exista una anomalía.

No se observó una variación significativa al procesar los registros de las pruebas realizadas sobre la cara expuesta de los pilotes una vez desmochados, respecto a los originalmente medidos a nivel de terreno natural. Tampoco fue posible detectar la diferencia de longitud de los pilotes, que era de 40 cm. aproximadamente, debido a que este valor se encontraba dentro del orden de error propio del método para las dimensiones existentes.

La identificación de las reflexiones, en general, no fue del todo clara, aun sabiendo de antemano los intervalos de tiempo en los que se debían poner en evidencia. En general, las curvas presentaron un gran número de oscilaciones, por lo que cualquier otro pico podría haberse confundido con el regreso de la onda.

Se considera recomendable filtrar los registros de aceleración captados directamente por los transductores, debido a que de esa forma se logra suavizar en gran medida las curvas, facilitando la interpretación de los resultados. Sin embargo, se debe seleccionar cuidadosamente la frecuencia de corte, pues un valor bajo de esta ocasionará la pérdida de información muy valiosa.

La amplificación de las señales al multiplicarlas por una función ajustada para cada respuesta resultó de mucha utilidad al momento de identificar las variaciones más significativas de los registros, lo cual era prácticamente imperceptible a simple vista. Como contrapartida, se puede mencionar que al amplificar las curvas, se produjo un desplazamiento lateral de los picos producto de las reflexiones, en mayor o menor medida según el caso, lo cual puede llevar a adoptar intervalos de tiempo, y por consiguiente dimensiones, un poco mayores a las reales. Para salvar esta dificultad, puede resultar productivo realizar acercamientos en las zonas de los gráficos donde se prevé que ocurran las reflexiones y trabajar sobre los valores filtrados únicamente.

La conversión de los registros al dominio de la frecuencia y la utilización del método de respuesta impulsiva mediante los gráficos de movilidad, aprovechando la medición simultánea de los parámetros de entrada y salida, no permitió enriquecer los resultados producto del análisis temporal. Los gráficos obtenidos no tuvieron la forma prevista por la bibliografía y los modelos numéricos. La única conclusión que se pudo elaborar al respecto fue que, mientras se introduzca mayor cantidad de energía al sistema, más pronunciadas serán las variaciones en las respuestas analizadas de esta manera.

La velocidad de propagación de ondas en el hormigón constituye un parámetro importante al analizar el fenómeno asociado al problema en cuestión. Sin embargo, su determinación no resultó para nada sencilla. A pesar de que se realizaron diferentes ensayos para aproximarla, no

fue posible obtener valores absolutamente confiables, por lo que se la debió estimar.

La carga registrada por la celda adosada a uno de los martillos resultó coherente, tanto en amplitud como en duración, teniendo en cuenta lo expuesto en la literatura. Sin embargo, no resultó concordante con la respuesta medida con el acelerómetro, lo cual se puso en evidencia al momento de realizar el contraste entre los modelos numéricos y los ensayos experimentales.

Para concluir, respecto a lo que se considera el principal aporte del presente trabajo, se debe mencionar que fue posible arribar a resultados más que satisfactorios mediante la realización de ensayos sobre la estructura de cabezal. Si bien no resultó tan sencilla ni precisa la detección de los defectos, se obtuvieron curvas y se calcularon valores muy similares a los análogos en el caso de pilotes aislados, lo cual valida la utilización del método para este tipo de situaciones, incluso en elementos con una relación de dimensiones elevada. Los registros que se vieron afectados en mayor medida debido a la presencia de la estructura superior fueron los correspondientes al pilote central, lo cual coincide con lo predicho por la simulación numérica.

### **6.3. Desarrollos futuros**

La incorporación de un martillo provisto de una celda de carga al instrumental existente resulta un hecho muy atractivo, ya que permite contrastar los resultados mediante la utilización de dos métodos de bajas deformaciones, como son el eco sónico y el de respuesta impulsiva. Por lo tanto, se considera de gran importancia continuar investigando acerca de la factibilidad de este último, verificando la correcta calibración de la celda para cargas dinámicas, tanto en amplitud como en tiempo de duración, y aplicándolo a pilotes con una relación longitud/diámetro menor.

Por otra parte, sería interesante indagar sobre la discrepancia entre las respuestas registradas con los acelerómetros de distinta capacidad, identificando cuál resulta el más apropiado para ser adoptado en cada caso.

A partir de las curvas y los resultados experimentales obtenidos en este trabajo, apoyándose en estudios de suelo realizados sobre la zona en la que se encuentra la estructura, se podrá ajustar adecuadamente los parámetros de entrada del modelo numérico, a fin de calibrarlo y que pueda resultar útil para simular cualquier otro problema similar.

También se propone modelar la estructura con otros programas computacionales, como por ejemplo ANSYS, para ver si se logra alcanzar una mejor coincidencia con los ensayos experimentales.

Finalmente, queda pendiente la realización de ensayos sobre pilotes con esbelteces menores y/o con otro tipo de cabezal, variando la forma y dimensiones del mismo. Puntualmente, resulta atractivo proyectar cabezales de mayor relación de rigidez con los pilotes, a fin de continuar estudiando su influencia.

## Anexo A: PROCESO CONSTRUCTIVO

### A.1. Pilotes individuales

#### A.1.1. Preparativos

Los trabajos comenzaron en el taller, en donde se cortaron las barras longitudinales y se confeccionaron los estribos, que luego fueron atados a las mismas según la separación establecida (ver Figura A.1). A fin de poder manejarla con mayor facilidad, la armadura de cada pilote se dividió en dos tramos de 6 m. cada uno, los cuales fueron empalmados al momento de descenderla dentro de la excavación, como se explicará más adelante.



**Figura A.1:** Confección de las armaduras.

A continuación se debió buscar el modo de materializar las imperfecciones deseadas, ocupando el espacio correspondiente a las mismas con un material de propiedades diferentes al de los pilotes. Se debió tener presente el proceso de hormigonado que, entre otras cosas, debía ser continuo desde el fondo de la excavación hasta el nivel superficial.

Para ello se decidió utilizar poliuretano expandido, ya que se trata de un material cuya densidad resulta mucho menor a la del hormigón, no es soluble en agua y posee una adherencia tal que le permitiría mantenerse vinculada a las barras longitudinales de la armadura en la posición deseada.

Fue necesaria la construcción de una estructura de contención que actuara a modo de camisa interior y exterior, generando de esta forma un molde capaz de contener al material durante su expansión. Con ese fin se vincularon a la armadura dos tubos de pvc, cada uno de la longitud y el diámetro previstos para los defectos, como se observa en la Figura A.2.

A continuación se procedió a rellenar parte del volumen contenido por los mismos con el poliuretano y a esperar que se expandiera hasta cubrirlo en su totalidad. El resultado de dicho proceso se puede ver en la Figura A.3. Finalmente se retiró la camisa exterior y se eliminó el

material sobrante, quedando así constituidos los defectos con la forma y el tamaño previsto, tal como observa en detalle en la Figura A.4. En la Figura A.5 se pueden apreciar las armaduras para los distintos pilotes, con y sin defectos, según corresponda.



**Figura A.2:** Estructura de contención.



**Figura A.3:** Colocación del poliuretano expandido.



**Figura A.4:** Materialización de los defectos.



**Figura A.5:** Armaduras con y sin defectos.

Para llevar a cabo correctamente el proceso de hormigonado resultó necesario confeccionar una cañería desmontable de un diámetro tal que no interfiriera con la armadura ni con los defectos y que, a su vez, permitiera que el material fluyera con facilidad dentro de ella hasta el final de la excavación. Por lo tanto se emplearon tubos de pvc de 100 mm. de diámetro y se ensamblaron, utilizando cuplas, en tramos de aproximadamente 1.30 m. hasta superar el largo de 12 m. previsto para los pilotes. A su vez, se confeccionó un embudo tal que permitiera realizar cómodamente el vaciado del hormigón en el extremo superior de la cañería. La Figura A.6 ilustra lo descrito anteriormente.



**Figura A.6:** Cañerías y embudo para el hormigonado.

Finalmente, y teniendo en cuenta la posterior realización de una prueba de carga en el pilote central, se previó la colocación de una varilla roscada de 1 ½" de diámetro y 1 m. de largo sobre cada uno de los elementos extremos, una vez finalizado el hormigonado. Las mismas debían quedar totalmente fuera del pilote, por lo que, para asegurar el anclaje con el hormigón, se soldaron cuatro barras de 16 mm. de diámetro a cada una de ellas. La longitud de anclaje y las dimensiones del cordón de soldadura se calcularon de acuerdo a la carga máxima prevista a ser suministrada durante el ensayo. En la Figura A.7 se pueden apreciar las varillas antes mencionadas con las barras de anclaje soldadas.



**Figura A.7:** Varillas roscadas con sus anclajes.

### A.1.2. Excavación

La perforación de los pilotes se realizó utilizando la máquina que se presenta en la Figura A.8. La misma constaba de una unidad principal montada sobre ruedas, encargada de transportar una pluma desmontable en dos tramos. Sobre ella se desplazaba un motor giratorio, sostenido por un cable de acero trenzado, cuyo movimiento se accionaba a través de un sistema de control.

Una vez ubicada en posición, se separaba del suelo apoyándose en cuatro patas hidráulicas que le brindaban una mayor estabilidad. Mediante un sistema también hidráulico, se elevaba la pluma hasta quedar completamente vertical. Se hacía descender el motor y se conectaba al mismo un helicoide de aproximadamente 1,50 m. de longitud y 30 cm. de diámetro. Este debía quedar apoyado sobre el terreno en el centro de la perforación.

Para iniciar la excavación era necesario poner en marcha y liberar el motor para que, descendiendo por propio peso, impulsara al helicoide hacia abajo mientras realizaba el movimiento circular. Una vez que había descendido en su totalidad se detenía el motor y se elevaba hasta lograr retirar y limpiar la hélice, quitando el material excavado, tal como se ejemplifica en la Figura A.9. El procedimiento anterior se debía continuar hasta llegar a la profundidad deseada, en este caso 12 m. Para alcanzar dicho nivel era necesario ir acoplado barras por sobre el helicoide a medida que se iba descendiendo en la perforación.

A modo de comentario final, se puede recalcar que la aparición de la napa freática se produjo aproximadamente a los 6 m. de profundidad. Por otra parte, el suelo extraído resultó homogéneo en toda la longitud, tratándose de una arcilla cohesiva, por lo que no fue necesario recurrir a la utilización de bentonita para evitar que las paredes de las excavaciones se desmoronaran.



**Figura A.8:** Máquina pilotera utilizada.



**Figura A.9:** Retiro y limpieza del helicoides.

Concluidas las excavaciones, la etapa posterior consistió en la colocación de las armaduras dentro de las mismas. Para ello se recurrió al guinche de la pilotera, enganchando el primer tramo de armadura del estribo superior y elevándolo por encima de cada perforación. Luego se lo descendía hasta que la longitud prevista para realizar el empalme quedara por sobre el nivel del terreno, en este caso 80 cm. aproximadamente. Se debía repetir el mismo procedimiento con el otro tramo de armadura, es decir, elevarlo hasta que las barras longitudinales coincidieran con las del tramo inferior. A continuación se materializaba el empalme de ambos tramos, ubicando los estribos faltantes y atando las barras longitudinales entre sí. Para concluir, se descendía la totalidad de la armadura dentro de la perforación.

El proceso antes descrito se puede observar en la secuencia de imágenes de la Figura A.10. Por su parte, la Figura A.11 muestra las excavaciones realizadas, con las armaduras ubicadas en su interior.



Figura A.10: Descenso y empalme de las armaduras.



Figura A.11: Excavaciones finalizadas y armaduras ubicadas en posición.

### A.1.3. Hormigonado

Se realizó un hormigón in situ utilizando cemento del tipo CPC30, canto rodado de 1:3" como agregado grueso y arena común como agregado fino. La dosificación empleada (ver Tabla A.1) correspondía a un hormigón H21 de consistencia fluida, es decir, asentamiento de entre 15 y 18 cm., que es lo recomendado para este tipo de estructuras. Se utilizó una hormigonera de volteo de 200 lts. de capacidad, propiedad del Instituto de Estructuras.

El proceso de hormigonado comenzaba descendiendo dentro de la perforación, y por entre los estribos de la armadura, la cañería descrita en la sección A.1.1, hasta llegar al fondo de la excavación. Sobre el extremo superior se ubicaba el embudo, tal como se observa en la Figura A.12.

**Tabla A.1:** Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón H21 de consistencia fluida.

Agua	178 lts.
Cemento	350 kg.
Agregado fino	743 kg.
Agregado grueso	1114 kg.

**Figura A.12:** Descenso de la cañería y ubicación del embudo.

Tanto las bolsas de cemento como los áridos debieron ser trasladados hasta un lugar adyacente a las perforaciones, donde se encontraba ubicada la hormigonera. Una vez allí se volcaban dentro de la misma en las proporciones obtenidas de la dosificación (ver Figura A.13). Finalmente se agregaba el agua y se mezclaba hasta obtener un material homogéneo. Se debió agregar una mayor cantidad de agua de la prevista, para que el hormigón tuviera una tabajabilidad tal que le permitiera fluir con facilidad dentro de la cañería.

En consecuencia, se vio afectada la relación agua-cemento y por consiguiente la resistencia del hormigón, como se podrá observar en el Anexo B. Sin embargo, a los fines de los ensayos de integridad, el requisito más importante era que el material fuera homogéneo, por lo que se priorizó dicha condición y se modificó la dosificación de igual forma para todos los pilotes y para el cabezal.

La mezcla resultante se vertía dentro de una batea y desde allí se introducía por el embudo utilizando baldes, tal como se puede observar en la Figura A.14. Resultaba necesario elevar y descender la cañería a fin que el material fluyera adecuadamente y, a medida que se iba avanzando con el proceso, era necesario ir retirando los sucesivos tramos.

El hormigonado no se debía interrumpir en ningún momento y se continuaba hasta que se lograba desalojar la totalidad del agua, la cual ascendía por diferencia de densidad. En ese momento se colocaba, si correspondía, la varilla roscada dentro del hormigón fresco, en el centro de la perforación, y se la verticalizaba utilizando un nivel de burbuja (Figura A.15).

Vale aclarar que para llenar completamente cada excavación fue necesario confeccionar aproximadamente 7 ½ pastones por pilote. Asimismo, resulta necesario recalcar que la profundidad a la que descendió la cañería hasta apoyarse en el fondo de la excavación fue,

respectivamente para los pilotes N°1, 2 y 3, 10.70 m., 11.40 m. y 11.60 m. Durante el colado de los pilotes extremos, se produjo el atasco del material dentro del tubo, por lo que se debió extraer buena parte de su longitud a fin de destaparlo. Al volver a ubicar la cañería, ésta descendió hasta una profundidad de 9.40 m. en el pilote N°1 y 8.30 m. en el pilote N°3. Esta información es importante de destacar debido a que en dichos sectores puede haberse llegado a presentar una discontinuidad en el elemento estructural por la entrada de agua o barro. El pilote central, por su parte, pudo ser hormigonado en toda su extensión sin interrupción alguna.



**Figura A.13:** Vertido de los materiales dentro de la hormigonera.



**Figura A.14:** Vertido del hormigón dentro de la cañería.



**Figura A.15:** Fin del hormigonado y colocación de las varillas roscadas.

Pasado un mes desde la finalización del hormigonado, y con el material ya endurecido, se procedió a excavar la superficie circundante a los pilotes, a fin de retirar el material suelto y exponer el fuste de los mismos (Figura A.16). En las Figuras A.17 y A.18 se puede apreciar en detalle los tres elementos hormigonados y los fustes al nivel del terreno.



**Figura A.16:** Excavación y limpieza.



**Figura A.17:** Pilotes hormigonados.



**Figura A.18:** Detalle de los fustes.

## A.2. Cabezal

### A.2.1. Preparativos

La armadura se confeccionó en el taller, donde se cortaron las barras del largo deseado, se doblaron los estribos y se ataron a las anteriores (Figura A.19). En la Figura A.20 es posible apreciar la armadura culminada y algunos detalles de las terminaciones.

A continuación se procedió a fabricar el encofrado, para lo cual se utilizó madera del tipo MDF. Se cortaron y unieron los tramos hasta obtener un cajón de las dimensiones previstas para la superficie lateral del cabezal. Se colocaron algunos listones intermedios a fin de asegurar que se mantuviera la forma durante el traslado del mismo y el posterior hormigonado. La confección del encofrado se puede observar en la Figura A.21.



Figura A.19: Confección de la armadura.



Figura A.20: Detalle de la armadura.



**Figura A.21:** Confección del encofrado.

### A.2.2. Excavación

Resultaba necesario completar la excavación entre los fustes de los pilotes hasta alcanzar la profundidad proyectada. La misma se realizó manualmente y el resultado de dicho proceso se puede observar en la Figura A.22.

A continuación, se procedió a desmochar los pilotes, lo cual implicaba demoler el hormigón hasta el nivel de la rasante del terreno, dejando expuestas las barras longitudinales. Para ello se utilizaron dos martillos, uno rotopercutor marca Dewalt (Figura A.23, izquierda y centro) y otro del tipo demoledor marca Gamma (Figura A.23, derecha).

La superficie expuesta de los pilotes, una vez finalizado el desencabezado, se puede apreciar en la Figura A.24. A su vez, en ella se observan las barras longitudinales que sobresalían por encima del nivel inferior de la excavación, y que resultaban necesarias para asegurar la continuidad estructural.



**Figura A.22:** Excavación entre fustes.



**Figura A.23:** Desmochado de los pilotes.



**Figura A.24:** Superficie expuesta de los pilotes y barras longitudinales.

Vale aclarar que, concluido del proceso anteriormente descrito, también quedaron al descubierto las barras de anclaje correspondientes a las varillas roscadas, en los pilotes extremos. Las mismas fueron cortadas utilizando un soldador, tal como se describe en la Figura A.25.

La Figura A.26 intenta mostrar el estado en el que se encontraba la excavación antes de comenzar con el hormigonado del cabezal. En esta situación se midieron los diámetros de los pilotes, obteniéndose valores de entre 26 y 32 cm., y la distancia entre centros, que resultó de 136.50 cm. y 117.50, respectivamente entre los pilotes N°1 y 2 y N°2 y 3. La nivelación realizada sobre las barras longitudinales arrojó como conclusión que los defectos se encontraban 10 y 15 cm. por debajo de lo previsto, para los pilotes N°1 y 3 respectivamente.



**Figura A.25:** Cortado de las barras de anclaje.



**Figura A.26:** Excavación previa al hormigonado.

### A.2.3. Hormigonado

Previo al comienzo de las tareas de hormigonado de la estructura superior que vinculaba a los tres pilotes, se debió descender la armadura dentro de la excavación (Figura A.27) y ubicar el encofrado rodeando la misma. Como se puede observar en la Figura A.28, se rellenó y compactó el sector adyacente al mismo a fin de evitar que se deformara por la presión generada al verter el material dentro. La Figura A.29 pretende ilustrar la armadura y el encofrado en su posición final.



**Figura A.27:** Descenso de la armadura.



**Figura A.28:** Ubicación del encofrado.



**Figura A.29:** Detalle de la armadura y el encofrado.

Al igual que en el caso de los pilotes, el hormigón se confeccionó utilizando una hormigonera de volteo, que se ubicó en un sector cercano a la excavación. Tal como se puede observar en la Figura A.30, se introdujo el cemento y los agregados dentro de ella y, luego del mezclado con la cantidad de agua prevista hasta homogeneizar el contenido, se procedió a volcar el material dentro de una batea.

El mismo se trasladó mediante baldes y se descargó dentro del encofrado. A medida que se avanzaba con el proceso, se iba vibrando el hormigón para su compactación. Finalmente, una vez alcanzado el nivel superior, se procedió a enrasar la superficie para que resultara lo más plana posible. El procedimiento completo se puede apreciar en la Figura A.31. Por su parte, la Figura A.32 muestra el avance del material hasta alcanzar la disposición final. Resultó necesario confeccionar 4  $\frac{1}{2}$  pastones para llenar completamente el cabezal. El curado se llevó a cabo humedeciendo y cubriendo con plástico la superficie expuesta.



**Figura A.30:** Confeccionado del hormigón.



**Figura A.31:** Proceso de hormigonado.



**Figura A.32:** Avance del hormigón dentro del encofrado.

Para concluir, en la Figura A.33 se puede apreciar el cabezal construido, sobre el cual se marcó la ubicación de los centros de los pilotes y su proyección vertical. Las dimensiones finales del mismo fueron 302 cm. de largo y 41 cm. de ancho. La nivelación realizada arrojó una diferencia de entre 1.30 y 2.30 cm. comparando el nivel original de la cabeza de los pilotes con la correspondiente ubicación en la superficie del cabezal.



Figura A.33: Detalle del cabezal.

## Anexo B: ENSAYOS EXPERIMENTALES COMPLEMENTARIOS

### B.1. Ensayos de compresión y módulo de elasticidad

Durante el hormigonado de cada pilote se moldearon 3 probetas, siguiendo el procedimiento previsto por la norma **ASTM C192**, correspondientes a los pastones 2<sup>do</sup>, 4<sup>to</sup> y 6<sup>to</sup>, respectivamente. Las mismas eran cilíndricas, de 15 cm. de diámetro y 30 cm. de altura. Se cubrieron con un nylon para evitar la evaporación del agua y fueron desmoldadas a las 24 hs. Finalmente se ubicaron completamente sumergidas en agua a fin de proceder con el curado de las mismas, hasta el momento de ensayarlas. Lo anterior se ejemplifica en la Figura B.1.



**Figura B.1:** Moldeo y curado de las probetas.

Al momento de llevar a cabo los ensayos sobre las mismas, y con el fin de medir los desplazamientos vertical y horizontal durante el proceso de carga, se utilizó un elemento que resulta de una combinación entre un compresómetro y un extensómetro, tal como lo especifica la norma **ASTM C469**. A partir de los valores unitarios de deformación longitudinal y transversal, y la carga correspondiente, fue posible calcular el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson.

En la Figura B.2 se aprecia el instrumento utilizado y la forma en la que se lo vinculó a cada probeta a ensayar. El mismo se encontraba compuesto por tres anillos, el inferior fijado rígidamente al espécimen y los otros sólo en dos puntos diametralmente opuestos, de manera que tuvieran libertad de rotación.

Los anillos superior e inferior se fijaban en un punto mediante una barra pivote, para mantener la distancia constante entre ambos. En el punto opuesto de la circunferencia del anillo superior, el cambio de distancia entre los dos era igual a la suma del desplazamiento debido a la deformación del espécimen y el que se producía por la rotación del anillo con respecto a la barra pivote. Como las distancias de la barra pivote y de la línea de base de medida al plano vertical que contenía a los dos puntos de soporte eran iguales, la deformación equivalía a la mitad de la

lectura.

El tercer anillo, consistente de dos segmentos iguales, se encontraba localizado a la mitad entre los dos anillos extremos y fijado al espécimen en dos puntos diametralmente opuestos. El mismo estaba articulado en un punto, lo que posibilitaba medir el cambio de diámetro. Al igual que en el caso anterior, las distancias entre ambos puntos y el plano vertical que pasaba por los puntos de soporte del anillo intermedio resultaban idénticas, por lo tanto el desplazamiento transversal del espécimen era igual a la mitad de la lectura.



**Figura B.2:** Combinación compresómetro - extensómetro.

Los desplazamientos se registraron con LVDT de 5 mm. de rango y  $0,5 \mu\text{m}$ . de sensibilidad. Los mismos fueron ubicados y fijados a los anillos superior e intermedio, en los puntos de medición correspondientes. A su vez, y con el objetivo de contrastar resultados, se colocaron tres instrumentos directamente vinculados a las probetas, en el tercio central y dispuestos equidistantes a lo largo del perímetro. La Figura B.3 pretende mostrar disposición de los LVDT montados sobre cada espécimen.

Los ensayos se ejecutaron mediante una prensa INSTRON 8504 (ver Figura B.4). La carga se registró con una celda de una sensibilidad igual a 0,05 kN. En las cabezas de las probetas se usaron placas cuadradas de MDF (Medium Density Fibreboard, un aglomerado fabricado con fibras de madera) de 15 cm. de lado y 6 mm. de espesor, para distribuir la carga. La adquisición de datos se realizó mediante una placa USB-1616FS, con una frecuencia de 2 Hz. El procesamiento de los mismos se realizó mediante un software de adquisición y monitoreo desarrollado por Isla Calderón (2014). El entorno gráfico del mismo se puede apreciar en la Figura B.5.



Figura B.3: Instrumentos para la medición de desplazamientos.



Figura B.4: Prensa utilizada para los ensayos.

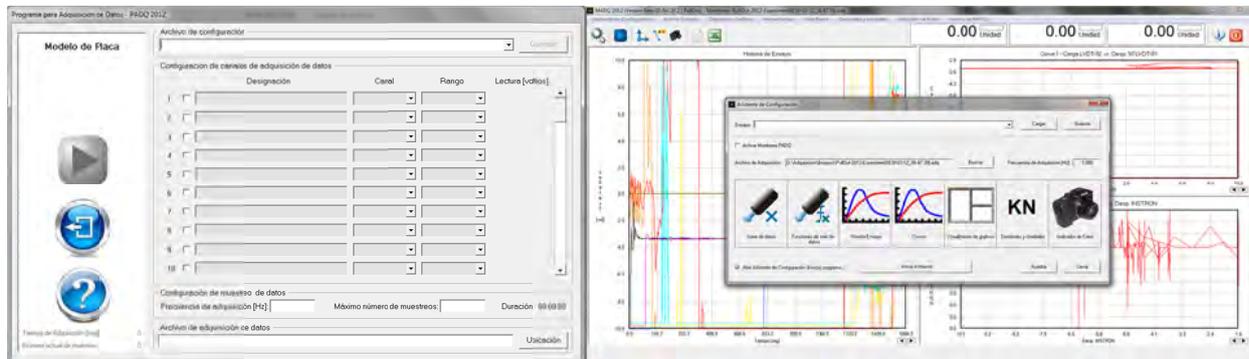


Figura B.5: Entorno gráfico del software utilizado.

El módulo de elasticidad del hormigón se calculó como se indica en la norma **ASTM C469**. Las mismas probetas que se usaron para determinar dicho módulo, posteriormente fueron ensayadas a compresión hasta la rotura, de acuerdo a la norma **ASTM C39**.

El ensayo se inició con control de carga, partiendo de un valor de fijación de 2 kN., y siguiendo con ciclos de carga y descarga. Los mismos se aplicaron a una velocidad de 2 kN/seg. hasta alcanzar un máximo igual al 40% de la carga de rotura (que se estimó en función del hormigón H21 proyectado) y luego retornando hasta los 2 kN. Se sometieron a cuatro ciclos durante los cuales se registró continuamente la fuerza y los desplazamientos. Finalizada la última

rampa de carga, se procedió a retirar todos los LVDT, con excepción del que se encontraba ubicado sobre el anillo superior (medición en la dirección vertical), y se pasó a control de desplazamientos hasta la rotura, a una velocidad de 0.2 mm/min. Los desplazamientos se midieron mediante el instrumento antes mencionado, a fin de poder obtener la curva tensión vs. deformación completa.

La deformación en cada punto se obtuvo en función de la longitud base correspondiente (distancia sobre la cual se midieron los desplazamientos). En el caso de los LVDT ubicados directamente sobre el espécimen, se consideró el promedio de la medición registrada por los tres instrumentos.

Se calculó el módulo de elasticidad como la pendiente de la recta definida por el valor promedio de los vértices superiores y el valor promedio de los vértices inferiores, correspondientes a los últimos tres ciclos de carga y descarga en las curvas tensión vs. deformación. El coeficiente de Poisson se determinó a partir de las curvas deformación transversal vs. deformación longitudinal, sin embargo, los valores obtenidos no fueron confiables, debido a que resultaron muy inferiores a lo previsto.

En la Tabla B.1 se adjuntan los valores de carga máxima registrada ( $P_{m\acute{a}x}$ ) para cada probeta, la resistencia correspondiente ( $f'_{ci}$ ), los módulos de elasticidad obtenidos mediante el promedio de los LVDT ubicados sobre el perímetro ( $E_{DM}$ ) y los calculados a partir del instrumento ubicado sobre el anillo superior ( $E_{DL}$ ). Como se puede observar, los ensayos se realizaron entre los 56 y 59 días posteriores al hormigonado.

**Tabla B.1:** Resultados de los ensayos de compresión y módulo de elasticidad.

Pilote N°	Probeta N°	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$f'_{ci}$ (MPa)	$E_{DM}$ (MPa)	$E_{DL}$ (MPa)	Edad (días)
1	1	437.21	24.74	33659	27941	59
	2	399.61	22.61	30837	31583	59
	3	371.31	21.01	33174	26940	59
2	4	496.03	28.07	32091	30592	58
	5	367.42	20.79	32485	25594	57
	6	500.00	28.29	35379	31044	57
3	7	382.77	21.66	30125	34788	57
	8	404.63	22.90	36444	29018	57
	9	388.14	21.96	36207	33455	56
			23.56	33378	30106	

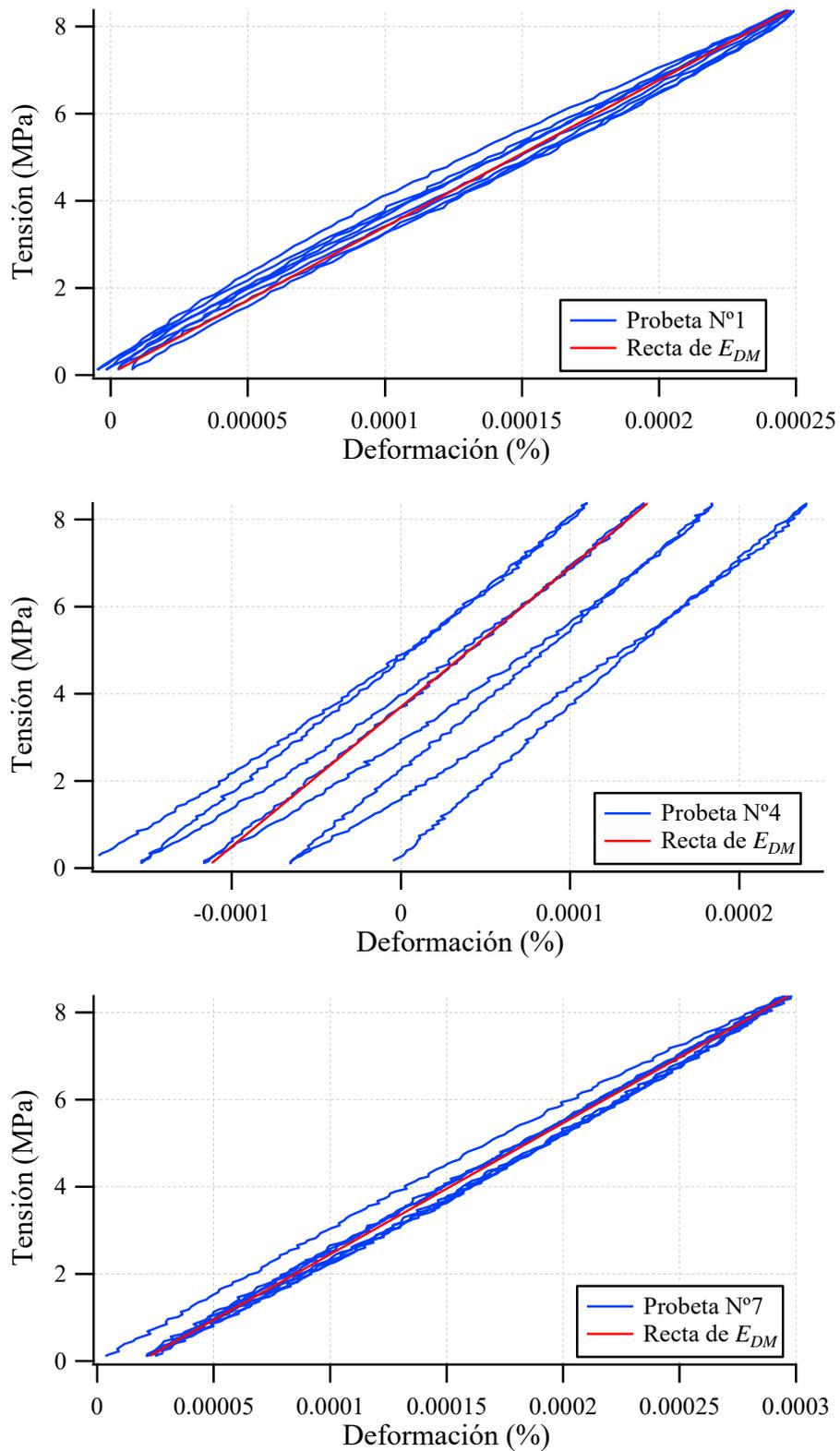
La resistencia característica  $f'_c$  se calculó mediante la expresión:

$$f'_c = f'_{cm} - t_{95} s_n \quad (\text{B.1})$$

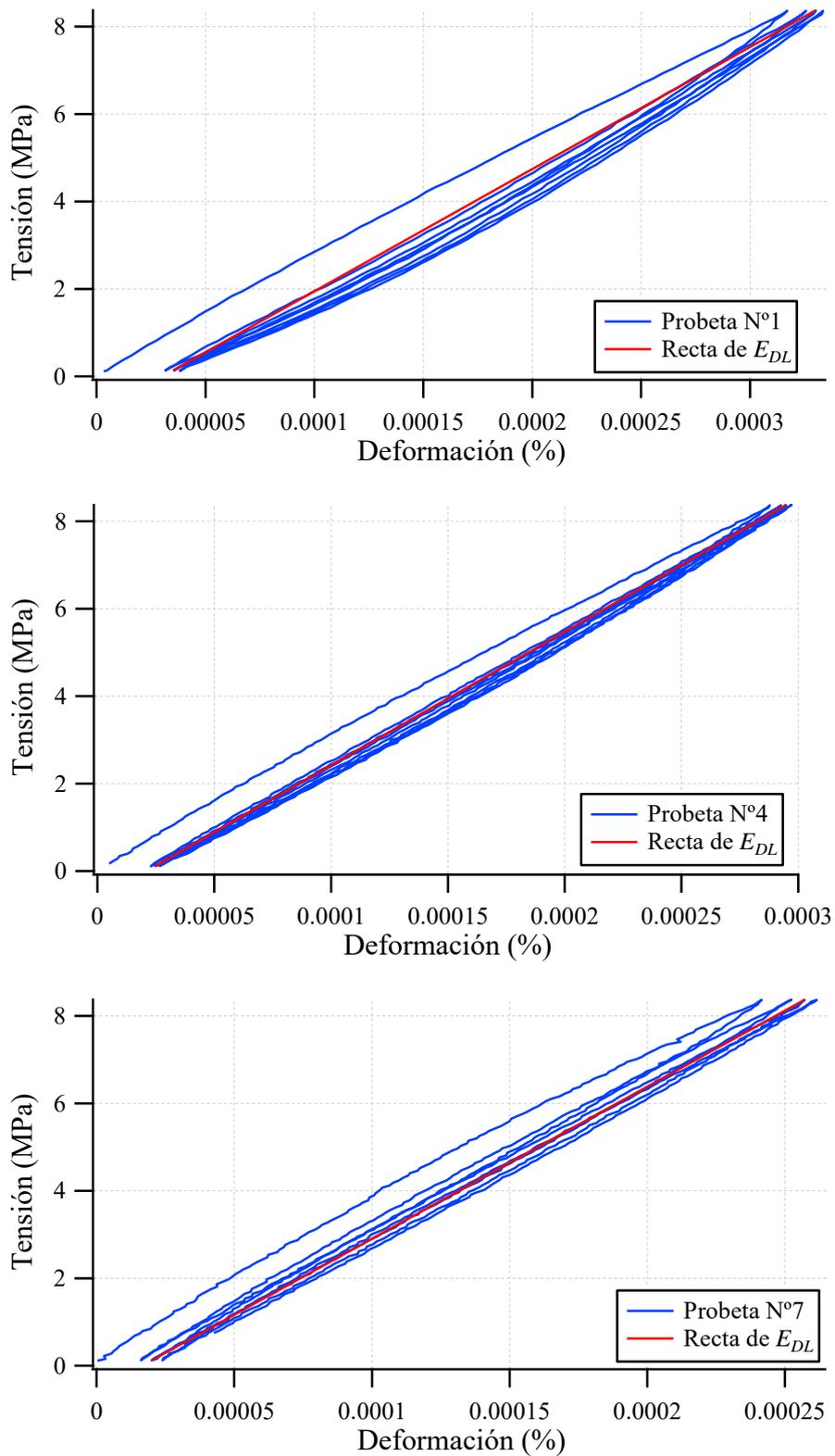
donde  $f'_{cm}$  es la media aritmética de los resultados de los ensayos de resistencia y  $s_n$  la desviación estándar correspondiente.  $t_{95}$  es el valor  $t_p$  de la distribución de Student para una probabilidad  $p = 95\%$ . Para 8 grados de libertad (9 muestras)  $t_{95} = 1.86$  (Isla Calderón, 2014).

De esta forma, para el caso en cuestión se obtuvo un valor de  $f'_c = 23.56 \text{ MPa} - 1.86 \times 2.87 = 18 \text{ MPa}$ .

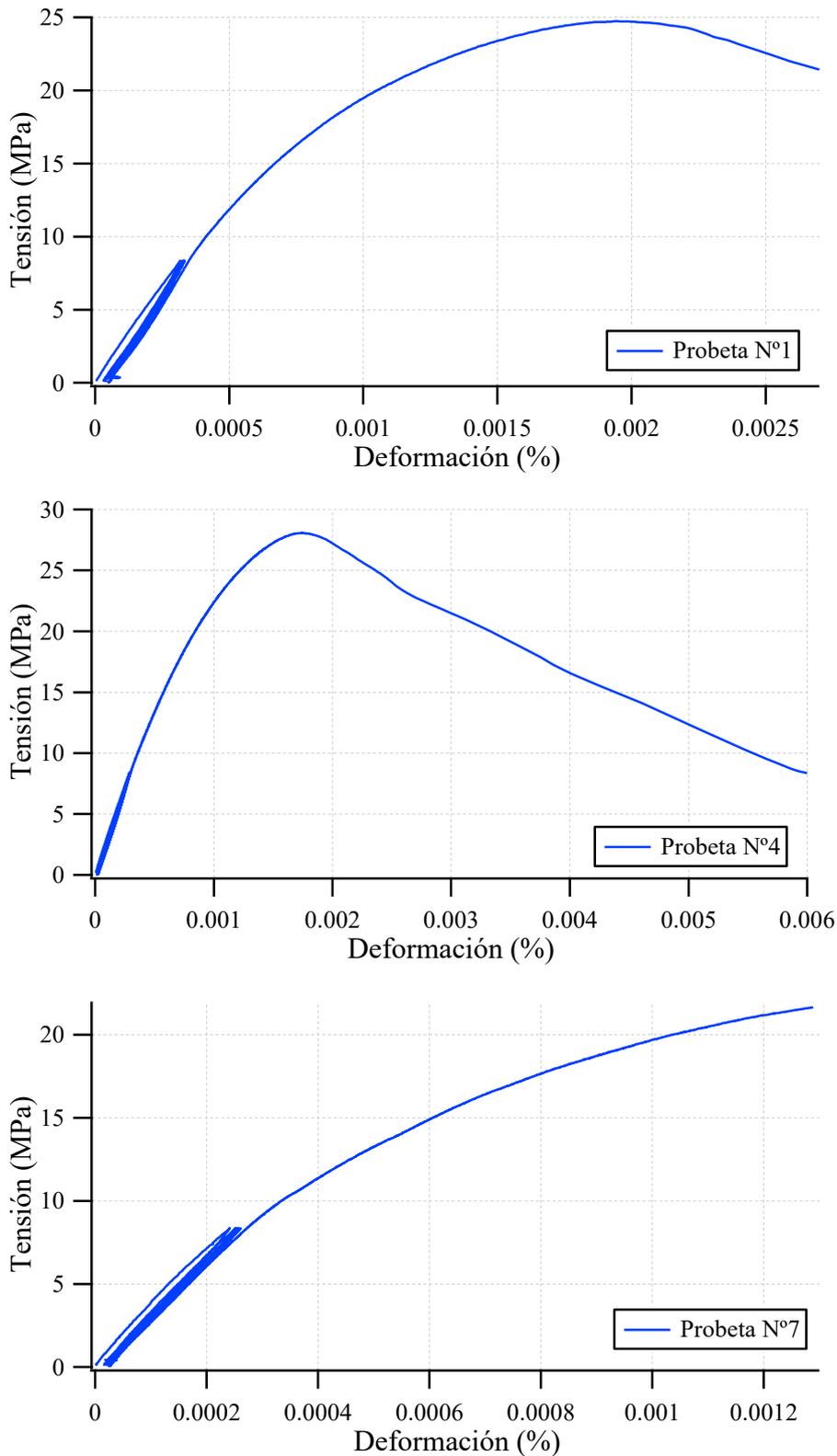
En las Figuras B.6 y B.7 se presentan, a modo de ejemplo, las curvas tensión vs. deformación utilizadas para la determinación del módulo de elasticidad correspondientes a las primeras probetas de cada pilote (Nº1, 4 y 7, respectivamente), en base a los registros de los instrumentos ubicados tanto en la superficie lateral como sobre el anillo superior del compresómetro. En ellas se superpuso la recta de la cual se obtuvo el módulo de elasticidad en cada caso. Por su parte, la Figura B.8 muestra las curvas registradas a lo largo de cada uno de los ensayos, hasta la falla del material. Como se mencionó anteriormente, las deformaciones corresponden a las mediciones realizadas con el LVDT ubicado entre los anillos extremos.



**Figura B.6:** Tensión vs. deformación promedio de los LVDT.



**Figura B.7:** Tensión vs. deformación vertical medida con el compresómetro.



**Figura B.8:** Curvas tensión vs. deformación hasta la falla.

Finalmente, en la Figura B.9 se puede observar el estado en el que se encontraron algunas de las probetas una vez alcanzada la falla del material.



**Figura B.9:** Ejemplos de falla en las probetas.

Por su parte, al momento del colado del cabezal se confeccionaron probetas en el 2<sup>do</sup>, 3<sup>er</sup> y 4<sup>to</sup> pastón, las cuales fueron sometidas a compresión a los 28 días. En la Tabla B.2 se presentan los valores de resistencia obtenidos a partir de los ensayos llevados a cabo de forma análoga a los anteriores. Vale aclarar que en este caso  $t_{95} = 2.92$ .

**Tabla B.2:** Resultados de los ensayos de compresión en las probetas del cabezal.

Probeta N°	$P_{m\acute{a}x}$ (kN)	$f'_{ci}$ (MPa)	$f'_{cm}$ (MPa)	$s_n$	$f'_c$ (MPa)
1	378.35	21.41	20.39	2.25	14
2	387.98	21.96			
3	314.68	17.81			

La probeta N°3 alcanzó una resistencia alejada del resto, con lo cual la resistencia característica se vio afectada, exhibiendo un valor inferior al esperado. Esta situación no resulta llamativa debido a que para la realización de los pastones 4<sup>to</sup> y 5<sup>to</sup> se utilizó cemento que estaba acopiado hacía más de 5 meses, por lo que puede no haberse encontrado en las mejores condiciones, ocasionando una reducción de la resistencia para la misma dosificación. Se puede observar que los resultados obtenidos para las probetas N°1 y 2 son similares a los alcanzados por los especímenes confeccionados al hormigonar los pilotes.

## B.2. Determinación de la densidad del hormigón

Para estimar la densidad del hormigón confeccionado para los pilotes se procedió a medir dos diámetros ortogonales entre sí ( $D_1$  y  $D_2$ ), a fin de promediarlos ( $D_{prom.}$ ), y la altura ( $h$ ) de cada una de las probetas moldeadas, luego del curado y previo a su rotura. Con dichas dimensiones fue posible calcular el volumen correspondiente. A su vez, se pesaron en una balanza y se determinó la densidad ( $\rho$ ) dividiendo ambos valores, tal como lo determina la norma **ASTM C39**. Los resultados obtenidos para cada una de las probetas y el promedio de los mismos se puede observar en la Tabla B.3.

**Tabla B.3:** Resultados de la determinación de la densidad del hormigón.

Pilote N°	Probeta N°	$h$ (mm)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$D_{prom.}$ (mm)	$Vol.$ (m <sup>3</sup> )	$Peso$ (kg)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
1	1	297	150.2	150.8	150.50	0.0053	12.35	2337
	2	308	150.4	150.7	150.55	0.0055	12.95	2362
	3	298	149.8	150.7	150.25	0.0053	12.10	2290
2	4	298	149.9	150.5	150.20	0.0053	12.25	2320
	5	298	149.9	150.4	150.15	0.0053	12.05	2284
	6	299	150.8	150.3	150.55	0.0053	12.35	2320
3	7	295	149.9	150.8	150.35	0.0052	12.05	2301
	8	296	149.9	150.1	150.00	0.0052	12.20	2332
	9	300	153.1	156.1	154.60	0.0056	13.00	2308
								2317

### B.3. Ensayo de ultrasonido

Se trata de un ensayo que permite obtener la velocidad de propagación de una onda de ultrasonido a través de una sección de hormigón. Se realizó una prueba directa en el pilote N°2, ya que se encontraba expuesta una porción considerable del fuste. Para ello se utilizó un equipo PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) marca MASTRAD, propiedad del Instituto de Estructuras, con un rango de medición de 0.1 a 9999  $\mu\text{seg.}$  y una sensibilidad de 0.1  $\mu\text{seg.}$  Al mismo se conectaron dos transductores, uno emisor de 54 KHz. de frecuencia y otro receptor. El primero generaba una onda ultrasónica en forma de pulso, que era captada por el segundo, y el equipo registraba la diferencia de tiempo entre ambos instantes.

A fin de iniciar el estudio, se procedió a calibrar del instrumento, para lo cual se colocaron los transductores debidamente engrasados en los extremos de la barra calibradora y por medio del botón de ajuste, que se encuentra al frente del aparato, se igualó la lectura al valor correspondiente a la barra calibradora utilizada, en este caso 25.7  $\mu\text{seg.}$

Acto seguido se colocaron los transductores sobre la superficie lateral del pilote, previamente pulida, en posiciones diametralmente opuestas y asegurándose de que no interfiriera ninguna de las barras entre ambos. Se registraron 3 valores del tiempo de propagación de la onda en el hormigón. En la Figura B.10 se observa el proceso antes descrito y el equipamiento utilizado.

Es posible calcular la velocidad de propagación de la onda dividiendo la distancia entre el punto de emisión y de recepción por el promedio de los tiempos de arribo. Por lo tanto, resultaba necesario conocer la separación entre los transductores. Para ello se procedió a medir el perímetro del pilote al nivel en el que se realizó el ensayo (aproximadamente 20 cm. por debajo de la cabeza), y así se pudo obtener el diámetro correspondiente. Los valores registrados y la velocidad calculada se adjuntan en la Tabla B.4.



Figura B.10: Ensayo de ultrasonido.

Tabla B.4: Resultados del ensayo de ultrasonido.

Pilote N°	Perim. (cm)	D (cm)	$t_i$ (μseg)	$t$ (μseg)	V (m/s)
2	116	37	84.5	84.6	4363
			84.8		
			84.6		

#### B.4. Prueba de carga

El equipo necesario para llevar a cabo la misma consistió en un gato de 50 ton. de capacidad, una bomba hidráulica y una celda de carga de 100 ton. (Figura B.11). Tal como se puede observar en la Figura B.12, la estructura soporte se materializó mediante dos perfiles UPN 30, los cuales se vincularon a los pilotes auxiliares de tracción, ubicados en los extremos. La celda y el gato se colocaron por encima del pilote central (ver Figura B.13), el cual sería sometido a la carga vertical de compresión. En la Figura B.14 se presenta un esquema del ensayo con las distancias, medidas en cm., entre los puntos de apoyo (eje de las varillas roscadas) y el de aplicación de la carga (centro del pilote N°2).



Figura B.11: Gato, bomba hidráulica y celda de carga,.



Figura B.12: Estructura soporte.



Figura B.13: Celda y gato ubicados en posición.

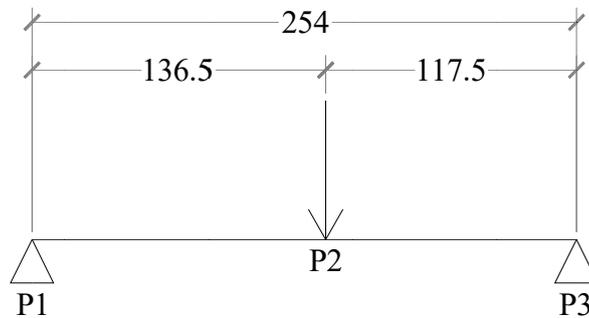


Figura B.14: Esquema de ensayo.

A su vez, resultó necesario montar una estructura complementaria, adecuadamente vinculada al terreno, a fin de colocar sobre ella los elementos de medición (ver Figura B.15). Sobre la cabeza de cada pilote se ubicaron dos extensómetros eléctricos tipo potenciómetros (uno de 50 mm. y el otro de 100 mm. de rango) y uno mecánico tipo flexímetro a dial de marca AMES, de 2” de rango en los pilotes extremos y 4” de rango en el central, todos de una sensibilidad de deformación de 0.001”. En la Figura B.16 se puede observar un detalle de la ubicación de los diferentes elementos de medición en cada uno de los pilotes.



**Figura B.15:** Estructura complementaria.



**Figura B.16:** Instrumentos de medición.

La carga fue aplicada mediante el gato a través del accionamiento de la bomba hidráulica y medida por la celda de carga, la cual se encontraba conectada a un amplificador de señales. Durante todo el ensayo se registraron deformaciones instantáneas a través de los potenciómetros y se tomaron lecturas de los flexímetros. Se controló la flecha de la viga mediante una regla metálica a fin de evitar que se ocasionara una deflexión importante en la misma. El proceso anterior se resume en la Figura B.17. Finalizada la prueba se pudo observar la aparición de grandes fisuras o grietas en el suelo circundante al fuste de los pilotes, tal como se adjunta en la Figura B.18.



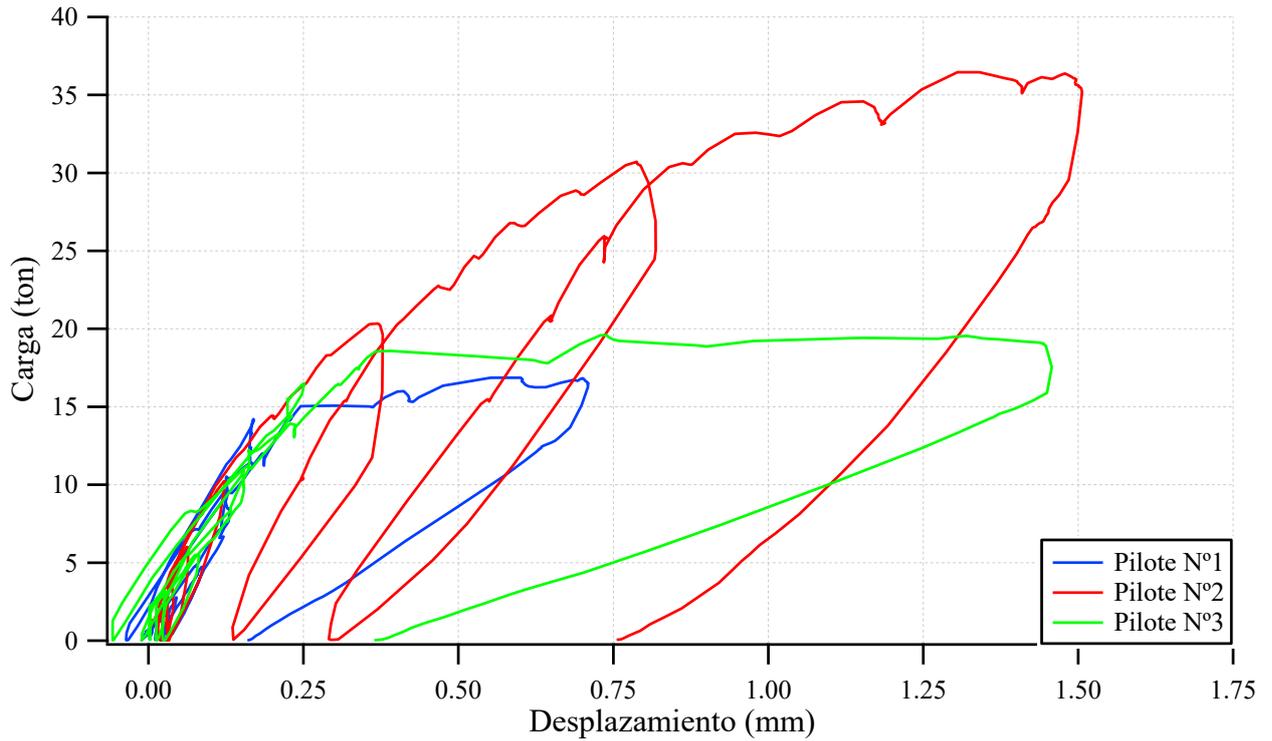
**Figura B.17:** Aplicación de la carga y lectura de las deformaciones.



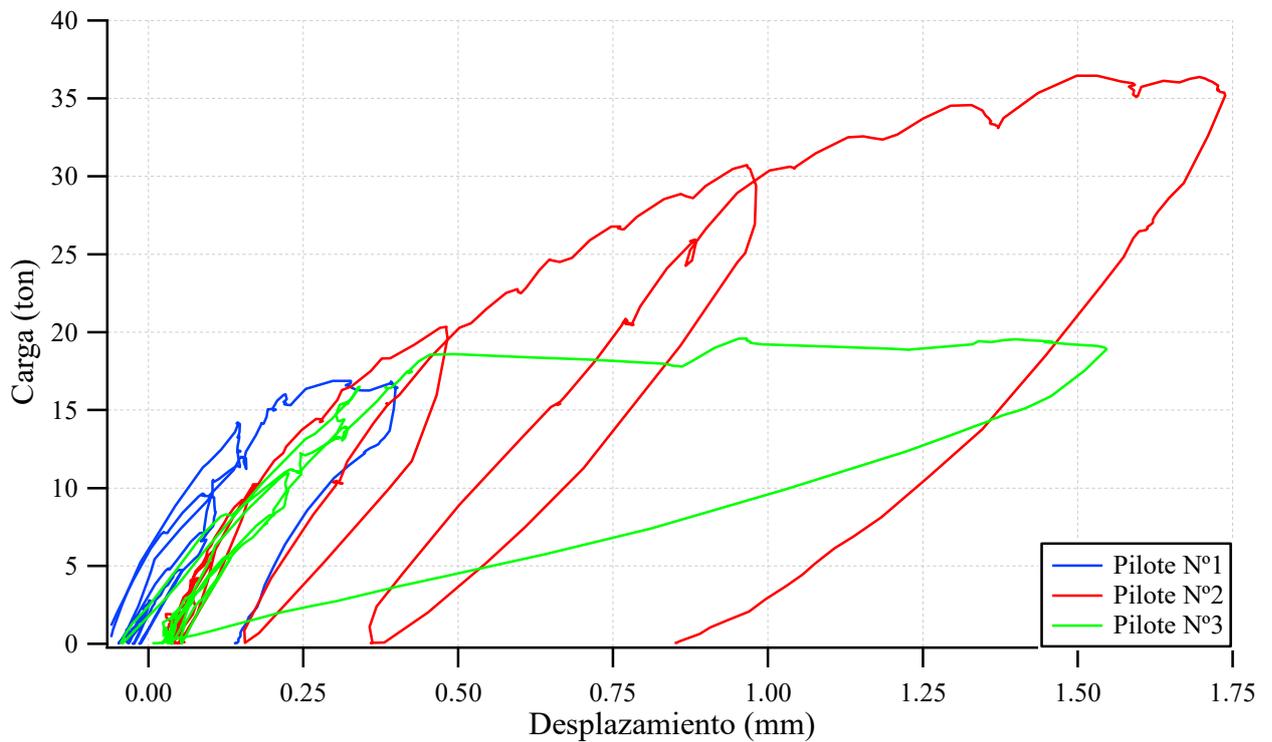
**Figura B.18:** Fisuras al finalizar el ensayo.

La adquisición de los datos se realizó mediante una placa USB-1616FS, con una frecuencia de escaneo de 4 Hz. El procesamiento de la información se realizó en tiempo real durante el ensayo mediante el software presentado en la sección B.1. Las curvas obtenidas resultaron muy irregulares, por lo tanto fue necesario recurrir a un algoritmo para su atenuación (Isla Calderón, 2014), el cual consistía en seleccionar un intervalo de lecturas y promediarlas, tanto en abscisas como en ordenadas. La cantidad de datos cada cuanto se determina un valor atenuado se llama paso de atenuación. En este caso se adaptó un valor de 50 lecturas. En la Figuras B.19 y B.20 se pueden observar las curvas atenuadas de carga vs. desplazamientos registrados con los potenciómetros de 50 y 100 mm. de rango, respectivamente, correspondientes a los 3 pilotes involucrados en el ensayo.

Finalmente, en la Figura B.21 se adjuntan los valores de desplazamiento medidos con los flexímetros ubicados en cada pilote, en función de la carga aplicada en dichos instantes de tiempo.



**Figura B.19:** Registros atenuados de los potenciómetros de 50 mm.



**Figura B.20:** Registros atenuados de los potenciómetros de 100 mm.

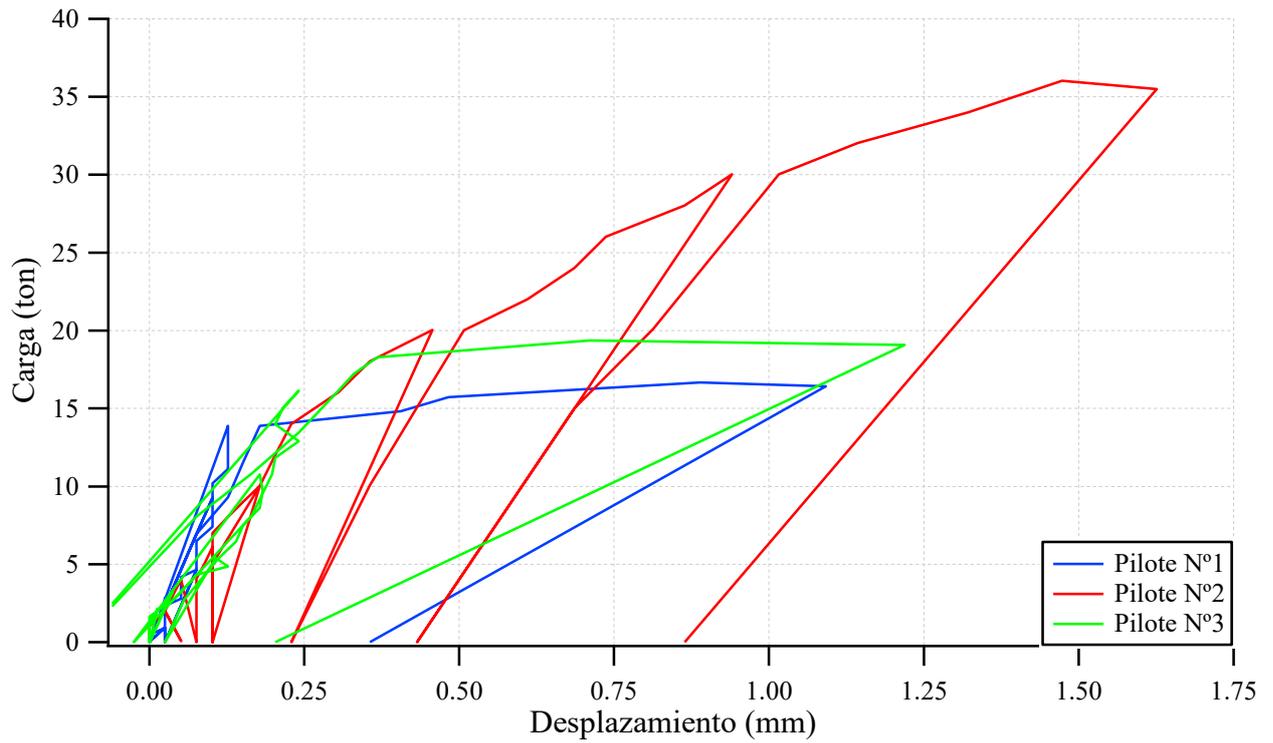


Figura B.21: Registros de los flexímetros.

## REFERENCIAS

- Bathe**, K. J., *“Finite Element Procedures”*, Prentice-Hall, Inc. (2006).
- Bowles**, J. E., J., *“Foundation Analysis and Design”*. McGraw-Hill Companies, Inc. (1997).
- Briad**, M., *“Controle des Pieux par la Methode des Vibrations”*. Ann, Inst. Tech. Batim 23 (270), 105-107 (1970).
- Chai**, H. Y. and Wei, C. F., *“Analysis of Wave Propagation in Piles”*. The 8th International Conference on the Application of Stress Wave Theory to piles, Lisbon (2008).
- Clough**, R. W. and Penzien, J., *“Dynamics of Structures”*. Computers & Structures, Inc. (2003).
- Davis**, A., *“The nondestructive impulse response test in North America: 1985-2001”*. Concrete, NDT&E International 36, 185-193 (2003).
- Davis**, A. and Dunn, C. S., *“From the theory to field experience with the non-destructive vibrations testing of piles”*, Proc. Instn Civil Eng., Part 2, 1974, 57, 571-593, Dec. 1974.
- Davis**, A. and Robertson, S.A., *“Vibration Testing of Pile”*. Struct. Eng. 54 (6), A7-A10 (1976).
- Dvroak**, A., *“Dynamic Tests of Piles & the Verification of Results by Static Loading Tests”*. Acad Technica, Scient. Hung., Vol. 64, pp 97-104 (1969).
- Ezeberry**, J. I., *“Determinación Dinámica de la Integridad de Pilotes”*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”, Noviembre de 2003.
- Fernandez Tadeo**, C. y Téllez García, E., *“Los Ensayos de Integridad Estructural de Pilotes. Situación Actual en España y Perspectivas”*. Simposio de la Sociedad Española de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica de las infraestructuras del transporte, Barcelona, Sept. 2000.
- Gassman**, S. L. and Finno, R. J., *“Cutoff Frequencies for Impulse Response Tests of Existing Foundations”*. Journal of Performance of Constructed Facilities, Feb. 2000.
- Higgs**, J. S. and Baxter, B. P., *“Single End Shock Test”*. JS Higgs & BP Baxter. Our World in Concrete, Singapore (1987).
- Higgs**, J. S. and Robertson, S. A., *“Integrity Testing of Concrete Piles by Shock Method”*. Concrete, Vol. 13, N°10, pp 31-33 (1979).
- Huang**, Y. N. and Ni, S. H., *“Experimental study for the evaluation of stress wave approaches on a group pile foundation”*. NDT&E International 47, 134–143 (2012).
- Huang**, Y. N., Ni, S. H., Lo, K. F. and Charng J. J., *“Assessment of identifiable defect size in a drilled shaft using sonic echo method Numerical simulation”*. Computers and Geotechnics 37, 757-768 (2010).
- Huang**, Y. N., Ni, S. H., Lo, K. F. and Charng J. J., *“Numerical Analysis of Flaw Sizes Detection in a Bored Pile Using Surface Reflection Method”*. Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference, Beijing, China, June 2010.

**Isla Calderón, F. A.**, “*Modelo Para Hormigones Reforzados con Fibras de Acero*”. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Tucumán, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Instituto de Estructuras “Ing. Arturo M. Guzmán”, Marzo de 2014.

**Kim, D. S., Kim, H. W. and Kim, W. C.**, “*Parametric study on the impact-echo method using mock-up shafts*”. NDT&E International 35, 595-608 (2002).

**Lee, S. L., Chow, Y. K., Karunaratne, G. P. and Wong, K. Y.**, “*Rational wave equation model for pile-driving analysis*”. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 3, March 1988.

**Liao, S.T. and Roesset, J. M.**, “*Dynamic Response of Intact Piles to Impulse Loads*”. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 21, 255-275 (1997).

**Liao, S.T. and Roesset, J. M.**, “*Identification of Defects in Piles through Dynamic Testing*”. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 21, 277-291 (1997).

**Lilley, D. M.**, “*Integrity Testing of Pile Foundations Using Axial Vibration*”. Proc. Inst. Ci. Engrs. Geotech Engng. Vol 143, pp. 225-234 (2000).

**Lysmer, J. M. and Richart, F. E.**, “*Dynamics response of footings to vertical loading*”. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, No. SM1, 65-91 (1966).

**Mullins, G. and Kranc, S.**, “*Thermal Integrity Testing of Drilled Shafts*”. Final Report, FDOT Project BD544-20, University of South Florida, May 2007.

**Paikowsky, S. G. and Chernauskas, L. R.**, “*Review Of Deep Foundations Integrity Testing Methods and Case Histories*”. BSCES-Geo-Institute Deep Foundation Seminar P1 (2003).

**Paquet, J.**, “*Etude Vibratoire des Pieux en Beton; Response Harmonique*”. Ann, Inst. Tech. Betón, 21 (245), 789-803 (1968).

**Piscsalko, G., Likins, G. E. and White, B.**, “*Non-Destructive Testing of Drilled Shafts – Current Practice and New Method*”. Proceedings from the International Bridge Conference: Pittsburg, PA, June 2013.

**Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D.** “*Vibrations of soils and foundations*”, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1970).

**SAP2000**, Manual del usuario (2010).

**Sellountou, A. and Alvarez, C.**, “*Thermal Integrity Profiling: A Recent Technological Advancement in Integrity Evaluation of Concrete Piles*”. Proceedings from the First International Conference, Seminar on Deep Foundations: Santa Cruz, Bolivia, April 2013.

**Xuanming, D., Hanlong, L., Gangqiang, K. and Changje, Z.**, “*Time-domain analysis of velocity waves in a pipe pile due to a transient point load*”. Computers and Geotechnics, Vol. 58, pp. 101-116, May 2014.

**Wolf, J. P.**, “*Spring – Dashpot – Mass models for foundations*”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, 931-949, Jan. 1997.