

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMERICO DE LA
ACCION DE CARGAS EXPLOSIVAS SOBRE
ESTRUCTURAS Y SUELOS**

Abel Carlos Jacinto

Ingeniero en Construcciones
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

Tesis presentada en parcial cumplimiento para la obtención del
grado académico de

Magister en Ingeniería Estructural

Dirigida por

Dr. Ricardo Daniel Ambrosini

Comisión de Supervisión

Dr. Ricardo Daniel Ambrosini

Dr. Bibiana María Luccioni

Dr. Carlos Prato

**Laboratorio de Estructuras
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán**

San Miguel de Tucumán, Octubre de 1999.

*Dedico este trabajo a mis padres Carlos y Sara,
a mis hermanos Guillermina, Josefina y Sergio,
y a mi abuela Sara.*

INDICE

INDICE.....	I
RESUMEN.....	V
ABSTRACT.....	VI
AGRADECIMIENTOS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABLAS.....	XII
NOTACION.....	XIII

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1. Definición del problema.....	1
1.2. Objetivos básicos.....	4
1.3. Hipótesis principales.....	4
1.4. Contenidos de la tesis.....	5
1.5. Notación.....	6

CAPITULO 2: ANTECEDENTES PRINCIPALES

2.1. Introducción.....	7
2.2. Estructuras.....	8
2.2.1. Onda de presión reflejada.....	8
2.2.2. Onda de presión sobre estructuras.....	12
2.2.3. Efecto escudo de obstrucciones.....	13
2.2.4. Métodos de resolución de estructuras.....	14
2.2.4.1. Métodos de un grado de libertad.....	15
2.2.4.2. Métodos de múltiples grados de libertad.....	18
2.3. Suelos.....	22
2.3.1. Onda de presión sobre estructuras enterradas.....	22
2.3.2. Respuesta de estructuras enterradas.....	24
2.3.3. Formación de cráteres.....	25

CAPITULO 3: ANALISIS EXPERIMENTAL

3.1. Introducción..... 31

3.2. Descripción del análisis experimental 32

 3.2.1. Estructuras metálicas..... 32

 3.2.1.1. Placa metálica empotrada en la base (Placa A)..... 33

 3.2.1.2. Placa metálica empotrada en los cuatro bordes (Placa B)..... 35

 3.2.2. Estructura de hormigón 36

 3.2.3. Suelos..... 37

3.3. Sistema de registro..... 38

3.4. Resultados experimentales 39

 3.4.1. Estructuras metálicas 39

 3.4.1.1. Frecuencias naturales..... 40

 3.4.1.2. Registros experimentales de presión reflejada..... 40

 3.4.1.3. Registros experimentales de aceleración..... 50

 3.4.1.4. Determinación experimental del amortiguamiento 57

 3.4.2. Estructura de hormigón 58

 3.4.3. Suelos..... 59

 3.4.3.1. Propiedades mecánicas del suelo..... 59

 3.4.3.2. Resultados de los ensayos 59

 3.4.3.3. Procesamiento de los datos 61

CAPITULO 4: ANALISIS NUMERICO

4.1. Introducción..... 63

4.2. Descripción del análisis numérico 64

 4.2.1. Placa metálica empotrada en la base (Placa A)..... 65

 4.2.1.1. Análisis numérico de las frecuencias modales..... 65

 4.2.1.2. Análisis numérico del Ensayo 1 66

 4.2.1.3. Análisis numérico del Ensayo 2..... 73

 4.2.2. Placa metálica empotrada en los cuatro bordes (Placa B)..... 78

 4.2.2.1. Análisis numérico de las frecuencias modales..... 79

 4.2.2.2. Análisis numérico del Ensayo 1 80

CAPITULO 5: ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS

5.1. Introducción..... 84

5.2. Ondas de presión..... 85

5.3. Estructuras metálicas..... 86

 5.3.1. Comparación de aceleraciones para el Ensayo 1. Placa A..... 87

 5.3.2. Comparación de aceleraciones para el Ensayo 2. Placa A..... 89

 5.3.3. Comparación de aceleraciones para el Ensayo 1. Placa B..... 90

5.4. Suelos..... 94

CAPITULO 6: CONCLUSIONES

6.1. Introducción..... 98

6.2. Discusión y conclusiones..... 98

 6.2.1. Estructuras..... 99

 6.2.2. Suelos..... 100

6.3. Recomendaciones para trabajos futuros..... 100

APENDICE A: ONDA DE PRESION ORIGINADA POR EXPLOSIONES EN AIRE

A.1. Descripción de la onda de presión..... 102

A.2. Reflexión de la onda de presión en una superficie..... 103

A.3. Parámetros del frente de onda..... 106

A.4. Leyes de escala de la onda de presión..... 107

APENDICE B: DESARROLLO DE ECUACIONES

B.1. Métodos de un grado de libertad..... 109

 B.1.1. Factores de transformación..... 109

 B.1.2. Integración directa de la ecuación de movimiento..... 110

B.2. Métodos de múltiples grados de libertad..... 113

 B.2.1. Integración directa de las ecuaciones de movimiento..... 113

**APENDICE C: ONDA DE PRESION EN SUELOS ORIGINADA POR
EXPLOSIONES**

C.1. Acción de las explosiones en los suelos.....	116
C.2. Parámetros de explosiones en suelos.....	117
REFERENCIAS.....	119

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMERICO DE LA ACCION DE CARGAS EXPLOSIVAS SOBRE ESTRUCTURAS Y SUELOS

por Abel Carlos Jacinto

RESUMEN

Se presenta un análisis experimental a escala natural de dos placas metálicas de acero no rigidizadas con diferentes condiciones de sustentación, sometidas a la acción de ondas de presión originadas por la detonación de cargas explosivas. Se registra la variación temporal de la aceleración en distintos puntos de ambas placas y la presión generada por la onda explosiva en distintos puntos del recorrido de la misma y en correspondencia con la ubicación de las placas.

Se realiza un estudio numérico sobre modelos de las placas ensayadas a escala natural, usando el método de Elementos Finitos. Se analizan la influencia del número de modos de vibración que se consideran para el análisis y del tamaño de los elementos de la malla. Se comparan los valores computacionales cuando en el análisis se considera linealidad y no linealidad geométrica debido a grandes desplazamientos.

Se comparan los resultados experimentales y computacionales, y se obtienen conclusiones respecto a la modelación teórico-numérica de estructuras sometidas a cargas explosivas.

Se muestran los resultados para los diámetros y profundidades de los cráteres que se originan a partir de la detonación de explosivos apoyados y elevados sobre el suelo. Los resultados de los ensayos se comparan con los valores que se obtienen de aplicar fórmulas para la predicción del tamaño del cráter y con otros resultados experimentales, y se propone una fórmula empírica para el caso de cráteres generados por cargas pequeñas apoyadas en el suelo.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF STRUCTURES AND SOILS UNDER EXPLOSIVE LOAD ACTION

by Abel Carlos Jacinto

ABSTRACT

An experimental analysis at natural scale is presented on two non-stiffness metallic steel plates with different boundary conditions, subjected to the action of pressure waves originated by the detonation of explosive loads. The time history of the acceleration in different points of both plates is registered as well as the pressure generated by the explosive waves in different points of its path and in correspondence with the plates.

A numerical study of the model plates tested at natural scale, using the Finite Element method is developed. The influence of the number of natural modes that are considered for the analysis and the element size of the mesh are analysed. The computational results are compared, when linear and non linear geometric due to large displacements is considered in the analysis.

The experimental and computational results are compared, and conclusions regarding the numerical modelling of structures subjected to explosive loads are obtained.

The results for the diameters and depths of the craters originated by the detonation of explosives at ground level and above ground level are shown. The experimental results are compared with the values obtained of empirical formulas and with other tests results. Finally, an empirical formula is proposed for the case of craters generated by small explosive loads at ground level.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a las personas que de una u otra manera colaboraron para que pudiera llevar a cabo los cursos del postgrado Magister en Ingeniería Estructural y este trabajo de Tesis.

En primer lugar, quiero mencionar al Dr. Rodolfo Francisco Danesi, quien siempre se interesó no sólo por nuestra formación, sino también por nuestro bienestar, gesto muy valorable para quienes, como en mi caso, estuvimos distantes de nuestro lugar de origen.

Agradezco al Dr. Ricardo Daniel Ambrosini, Director de Tesis, su paciente dedicación y comprensión para guiar mis estudios, y por sobre todo, sus palabras de aliento durante la realización de este trabajo.

Al cuerpo de profesores del Magister agradezco la transmisión desinteresada de conocimientos y su dedicación durante los cursos.

A mis compañeros del VI Magister, Domingo Amín, Mariela Cordero, Ricardo Lorefice, Mariela Luege, Sergio Mohamed, María Inés Montanaro, Marcia Rizo Patrón, con quienes no sólo compartí horas de trabajo y estudio, sino también momentos fuera del Laboratorio, y que son una de las principales cosechas de mi paso por este lugar. A Oscar Curadelli, con quien compartimos esta experiencia con buen humor y en quien, más importante aún, encontré un amigo.

Agradezco a los compañeros de los otros Magister, los valiosos consejos que me brindaron, tanto en las conversaciones académicas como en las charlas de café.

Al personal técnico de apoyo, Sr. Eduardo Batalla, Sr. Daniel Torielli y Sr. Sergio Contino, su invaluable colaboración para llevar a cabo las tareas experimentales, dentro y fuera del Laboratorio. Al Sr. Ibarra su ayuda incondicional para realizar los ensayos de suelos y al personal del Laboratorio de Materiales, por la ejecución de los ensayos de hormigón. A la Srta. Amelia Campos y Sra. Teresa Jiménez, quiero agradecer su buen humor al recibirme cada mañana.

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a la Sra. María Dip, por haberme acogido en su casa en los últimos meses de mi estadía en Tucumán y hacerme sentir un integrante más de su familia.

A mis amigos de Olavarría, su constante apoyo, lo cual me permitió sentirlos cerca a pesar de la distancia.

Por último, toda mi gratitud a mi querida familia, a la que dedico este trabajo, y quien depositó en mi toda su confianza y su apoyo para la realización de esta empresa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Difracción de la onda de presión alrededor de una estructura simple.....	9
Figura 2.2.	Sobrepresión vs. tiempo sobre una estructura simple.....	9
Figura 2.3.	Definición de la onda de presión que actúa sobre la estructura.....	10
Figura 2.4.	Fuerza traslacional vs. tiempo sobre una estructura simple.....	11
Figura 2.5.	Interacción entre la onda de presión y una estructura.....	12
Figura 2.6.	Detonación cercana a la estructura.....	13
Figura 2.7.	Modificación de la onda de presión debido a una obstrucción.....	14
Figura 2.8.	Sistema dinámico equivalente de un grado de libertad.....	15
Figura 2.9.	Camino de propagación de la onda de tracción.....	22
Figura 2.10.	Onda de presión en el punto P.....	23
Figura 2.11.	Representación simplificada de la onda presión.....	24
Figura 2.12.	Movimiento horizontal de paredes y piso.....	25
Figura 2.13.	Esquema de un cráter.....	26
Figura 3.1.	Esquema del ensayo de las placas metálicas.....	32
Figura 3.2.	Vista general de la disposición de las placas metálicas.....	33
Figura 3.3.	Esquema de la Placa A.....	34
Figura 3.4.	Disposición de los acelerómetros y del amplificador.....	34
Figura 3.5.	Esquema de la Placa B.....	35
Figura 3.6.	Marco de sujeción de la Placa B. Disposición del acelerómetro y del sensor S4.....	35
Figura 3.7.	Esquema de la placa de hormigón.....	36
Figura 3.8.	Disposición de la carga explosiva sobre la losa.....	37
Figura 3.9.	Disposición de los explosivos para el ensayo de medición de cráteres.....	37
Figura 3.10.	Esquema de conexión de los dispositivos de registro.....	38
Figura 3.11.	Disposición de los sensores de presión.....	40
Figura 3.12.	Explosión de la carga de 0.8 Kg de TNT.....	41
Figura 3.13a.	Registro de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 1.....	41
Figura 3.13b.	Registro de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 1.....	42
Figura 3.13c.	Registro de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 1.....	42
Figura 3.13d.	Registro de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 1.....	43
Figura 3.14a.	Registros de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 2.....	43
Figura 3.14b.	Registros de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 2.....	44
Figura 3.14c.	Registros de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 2.....	44

Lista de Figuras

Figura 3.14d.Registros de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 2.....	45
Figura 3.15a. Registros de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 3.....	45
Figura 3.15b.Registros de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 3.....	46
Figura 3.15c.Registros de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 3.....	46
Figura 3.15d.Registros de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 3.....	47
Figura 3.16. Disposición de los sensores en el Ensayo 4.....	47
Figura 3.17a.Registros de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 4.....	48
Figura 3.17b.Registros de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 4.....	48
Figura 3.17c.Registros de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 4.....	49
Figura 3.17d.Registros de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 4.....	49
Figura 3.18a.Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 1.....	50
Figura 3.18b.Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 1.....	51
Figura 3.19. Registros de aceleración. Posición 1 y 2. Ensayo 1. Placa A.....	51
Figura 3.20. Registros de aceleración. Ensayo 1. Placa B.....	52
Figura 3.21a.Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 2.....	53
Figura 3.21b.Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 2.....	53
Figura 3.21c.Registros de aceleración. Posición 3. Placa A. Ensayo 2.....	54
Figura 3.22a.Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 3.....	54
Figura 3.22b.Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 3.....	55
Figura 3.22c.Registros de aceleración. Posición 3. Placa A. Ensayo 3.....	55
Figura 3.23a.Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 4.....	56
Figura 3.23b.Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 4.....	56
Figura 3.23c.Registros de aceleración. Posición 3. Placa A. Ensayo 3.....	57
Figura 3.24. Aspecto de la placa de hormigón después de las explosiones.....	58
Figura 3.25. Dimensiones determinadas experimentalmente para el cráter.....	60
Figura 3.26. Determinación del diámetro aparente del cráter.....	60
Figura 3.27. Diámetros experimentales vs. $[W \text{ (Kg)}]^{1/3}$	62
Figura 4.1. Modelo 1 de la Placa A.....	65
Figura 4.2. Presión resultante para el Ensayo 1.....	67
Figura 4.3. Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 1. Placa A. Ensayo 1.....	68
Figura 4.4. Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 1. Placa A. Ensayo 1.....	68
Figura 4.5. Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.....	69
Figura 4.6. Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.....	69
Figura 4.7. Resultados numéricos. Modelo 1. Ensayo 1. No linealidad geométrica.....	71

Lista de Figuras

Figura 4.8.	Comparación entre linealidad y no linealidad geométrica. Posición 2.	71
Figura 4.9.	Tensiones de von-Mises en la zona de empotramiento. Ensayo 1.	72
Figura 4.10.	Presión resultante en el Ensayo 2.	73
Figura 4.11.	Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.	74
Figura 4.12.	Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.	74
Figura 4.13.	Resultados numéricos para la Posición 3. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.	75
Figura 4.14.	Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.	75
Figura 4.15.	Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.	76
Figura 4.16.	Resultados numéricos para la Posición 3. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.	76
Figura 4.17.	Tensión de von-Mises en la zona de empotramiento. Ensayo 2.	78
Figura 4.18.	Modelo 1 de la Placa B.	78
Figura 4.19.	Resultados numéricos para 16 formas modales. Modelo 1. Ensayo 1.	80
Figura 4.20.	Resultados numéricos para 20 formas modales. Modelo 1. Ensayo 1.	81
Figura 4.21.	Resultados numéricos para 20 formas modales. Modelo 2. Ensayo 1.	82
Figura 4.22.	Tensiones de von-Mises en la zona central de la Placa B.	83
Figura 5.1.	Aceleración en la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.	87
Figura 5.2.	Aceleración en la Posición 2. No linealidad geométrica. Placa A. Ensayo 1.	88
Figura 5.3.	Aceleración en la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.	89
Figura 5.4.	Aceleración para 16 formas modales. Modelo 1. Placa B. Ensayo 1.	91
Figura 5.5.	Aceleración para 20 formas modales. Modelo 1. Placa B. Ensayo 1.	92
Figura 5.6.	Aceleración para 20 formas modales. Modelo 2. Placa B. Ensayo 1.	93
Figura 5.7.	Comparación entre los diámetros experimentales y la ecuación de Bull.	95
Figura 5.8.	Comparación entre los diámetros experimentales y la ecuación de Kinney.	95
Figura 5.9.	Comparación de diámetros experimentales. Explosivos apoyados.	96
Figura 5.10.	Comparación de diámetros experimentales. Explosivos elevados.	97
Figura 6.1.	Comparación de la respuesta para 16 y 20 modos. Placa B. Ensayo 1.	99
Figura A.1.	Sobrepresión y presión dinámica vs. tiempo, para una posición fija.	103
Figura A.2.	Onda de presión en la zona de reflexión regular.	104
Figura A.3.	Proceso de reflexión Mach.	105
Figura A.4.	Progreso de la reflexión Mach.	105
Figura B.1.	Sistema dinámico de un grado de libertad.	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1.	Peso de explosivo detonado en cada ensayo.....	33
Tabla 3.2.	Peso de explosivo detonado en cada posición.....	36
Tabla 3.3.	Correspondencia número-peso de Gelamón VF80.....	38
Tabla 3.4.	Registros experimentales de frecuencias modales.....	40
Tabla 3.5.	Valores pico de presión reflejada en los sensores.....	50
Tabla 3.6.	Coefficientes de amortiguamiento experimentales.....	57
Tabla 3.7.	Desplazamientos de la placa de hormigón.....	58
Tabla 3.8.	Propiedades mecánicas del suelo.....	59
Tabla 3.9.	Diámetros de los cráteres.....	61
Tabla 3.10.	Profundidades de los cráteres.....	61
Tabla 3.11.	Valores promedios de los diámetros y profundidad en el centro del cráter.....	62
Tabla 4.1.	Valores numéricos de las frecuencias. Placa A.....	66
Tabla 4.2.	Pico de aceleración inicial. Ensayo 1. Linealidad geométrica.....	70
Tabla 4.3.	Valores numéricos del pico de aceleración inicial. Ensayo 1.....	72
Tabla 4.4.	Pico de aceleración inicial. Ensayo 2. Linealidad geométrica.....	77
Tabla 4.5.	Valores numéricos de las frecuencias. Placa B.....	79
Tabla 4.6.	Comparación del pico de aceleración inicial. Placa B. Superposición modal.....	81
Tabla 4.7.	Pico de aceleración inicial. Placa B. Modelos 1 y 2.....	82
Tabla 5.1.	Comparación de los pico de presión reflejada.....	85
Tabla 5.2.	Comparación de velocidades del frente de onda.....	86
Tabla 5.3.	Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 1. Placa A. Ensayo 1.....	88
Tabla 5.4.	Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.....	88
Tabla 5.5.	Comparación del pico de aceleración. Ensayo 1. No linealidad geométrica.....	89
Tabla 5.6.	Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.....	90
Tabla 5.7.	Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.....	90
Tabla 5.8.	Comparación del pico de aceleración inicial. 16 modos. Modelo 1. Placa B.....	91
Tabla 5.9.	Comparación del pico de aceleración inicial. 20 modos. Modelo 1. Placa B.....	92
Tabla 5.10.	Comparación del pico de aceleración inicial. 20 modos. Modelo 2. Placa B.....	93
Tabla 5.11.	Diámetros de los cráteres para cargas apoyadas.....	94
Tabla 5.12.	Diámetros de los cráteres para cargas elevadas.....	96
Tabla 6.1.	Frecuencias naturales para los Modelos 1 y 2. Placas A y B.....	100

NOTACION

En este punto, se adjunta una lista de los símbolos utilizados en esta tesis, los que además se definen en el desarrollo de la misma. Estos tienen validez general, sin perjuicio de que, en algún punto de la misma, tengan un significado distinto, hecho que se mencionará expresamente en los mismos.

A	Area expuesta a la onda de presión.
a_0	Velocidad del sonido en el aire a presión ambiente.
B	Parámetro de la forma de onda de presión.
\mathbf{c}	Matriz de amortiguamiento del sistema.
c	Velocidad de propagación de la onda de presión en el suelo.
C_D	Coefficiente aerodinámico.
C_r	Coefficiente de reflexión.
D	Diámetro aparente del cráter.
d	Diámetro del cráter real.
d	Profundidad a la que está enterrado el explosivo.
D_h	Diámetro horizontal del cráter.
D_v	Diámetro vertical del cráter.
F_D	Fuerza aerodinámica sobre una estructura.
\mathbf{f}_D	Vector de fuerzas de amortiguamiento de un sistema de múltiples grados de libertad.
F_e	Fuerza que actúa sobre el sistema de un grado de libertad equivalente.
\mathbf{f}_I	Vector de fuerzas de inercia de un sistema de múltiples grados de libertad.
\mathbf{f}_S	Vector de fuerzas de rigidez de un sistema de múltiples grados de libertad.
H	Profundidad del cráter aparente.
i_0	Impulso de la onda de presión en el suelo.
i_s	Impulso específico de la onda de presión.
\mathbf{k}	Matriz de rigidez del sistema.
k_e	Rigidez del sistema de un grado de libertad equivalente.
\mathbf{m}	Matriz de masa del sistema.
M_e	Masa del sistema de un grado de libertad equivalente.
$p(t)$	Onda de presión resultante.
$\mathbf{p}(t)$	Vector de fuerzas exteriores que actúan sobre el sistema.
p_0	Presión incidente en el suelo.

Notación

p_s	Valor del pico de sobrepresión.
$p_s(t)$	Onda de sobrepresión.
$q_s(t)$	Onda de presión dinámica.
R	Radio del cráter.
S	Menor dimensión de la estructura sobre la que actúa la onda de presión.
t'	Duración de la onda de presión reflejada.
t_d	Duración de la onda de presión en el suelo.
t_{qs}	Duración de la fase positiva de la onda de presión dinámica.
t_r	Duración de la onda de presión reflejada en función del impulso reflejado.
t_s	Duración de la fase positiva de la onda de presión.
$U_{s\ exp}$	Velocidad experimental del frente de onda de presión.
U_s	Velocidad del frente de onda de presión.
v	Desplazamiento del sistema de un grado de libertad.
\ddot{v}	Aceleración del sistema de un grado de libertad.
\mathbf{v}	Vector de desplazamientos del sistema.
$\dot{\mathbf{v}}$	Vector de velocidades del sistema.
$\ddot{\mathbf{v}}$	Vector de aceleraciones del sistema.
v_m	Desplazamiento del muro de una estructura enterrada.
\dot{v}_m	Velocidad del muro de una estructura enterrada.
\ddot{v}_m	Aceleración del muro de una estructura enterrada.
v_p	Desplazamiento horizontal del piso de una estructura enterrada.
\dot{v}_p	Velocidad horizontal del piso de una estructura enterrada.
W	Peso de la carga explosiva detonada.
Z	Distancia escalada.
α_i	Angulo de incidencia de la onda de presión.
λ_c	Posición relativa del explosivo respecto a la superficie del suelo.
ρ	Densidad del suelo.
ρ_0	Densidad del aire a presión ambiente.
ξ	Coefficiente de amortiguamiento.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 DEFINICION DEL PROBLEMA

Los explosivos tienen múltiples aplicaciones útiles dentro de la Ingeniería, tales como, realizar excavaciones a cielo abierto, dar forma a excavaciones subterráneas dejando inalterada a la roca, dar forma a los metales en variadas aplicaciones. El uso apropiado del poder explosivo puede ahorrar grandes cantidades de dinero. Para ello se requieren conocer los fundamentos del funcionamiento de los mismos.

Las estructuras civiles no son generalmente diseñadas para resistir cargas dinámicas de muy corta duración y gran amplitud. Esas cargas pueden aparecer de muy variados orígenes, las que incluyen explosiones militares o industriales, impacto de vehículos o aviones, objetos despedidos o impacto de olas sobre estructuras marinas. Hasta hace muy poco tiempo, la consideración de cargas explosivas debidas a un ataque terrorista se limitaba principalmente a estructuras militares, centrales nucleares, embajadas, etc.

Desgraciadamente, las recientes explosiones en el World Trade Center de Nueva York y los sucesivos atentados en Rusia, causaron serios daños, demostrando que en el caso de algunas estructuras civiles el diseñador puede necesitar considerar cargas provenientes de ataques deliberados. También en nuestro país hay ejemplos desgraciados en este sentido. Sin embargo, hay varios tipos de cargas de distinto origen que pueden causar un daño similar, como puede ser la explosión accidental de combustible en refinerías de petróleo.

Estos casos ilustran la gran necesidad de información técnica para el mejoramiento de la seguridad estructural, tanto para estructuras militares, como civiles. Tanto es así que en los últimos cinco años se han formado el Comité 370 del American Concrete Institute (ACI) para *Efectos de Cargas Dinámicas Vibratorias y de Corta Duración* y un Comité de la American Society of Civil Engineering (ASCE) para *Diseño Estructural para Seguridad Física*.

En las últimas cinco décadas ha habido una intensa actividad de investigación en el campo de cargas de corta duración (impulsivas). Inicialmente, dichos trabajos fueron principalmente empíricos. Sin embargo, en los últimos años han comenzado trabajos de investigación más profundos e importantes. Esos estudios han demostrado que las cargas de corta duración y gran magnitud y los efectos inerciales asociados, tienen una gran influencia sobre la respuesta y pueden modificar substancialmente las propiedades del material. Esas cargas son aplicadas a las estructuras con tasas 1000 veces mayores que para el caso de carga sísmica y las frecuencias inducidas en la respuesta estructural son mucho más altas que para el caso de cargas convencionales.

Además, las cargas dinámicas de corta duración a menudo exhiben grandes variaciones espaciales y temporales produciendo severos gradientes de tensión en la estructura. Estas altas tasas de deformación, también afectan la resistencia y ductilidad de los materiales, los modos de falla y la resistencia y ductilidad de la estructura global. En general, prácticamente ninguna norma o código de construcción en el mundo, da guías de diseño para este tipo de cargas dinámicas.

Como se mencionó anteriormente, hay varios tipos de cargas dinámicas impulsivas como por ejemplo explosiones, impacto y vibraciones severas. El presente trabajo de tesis, se ocupa de un tipo particular de carga dinámica impulsiva: Explosiones. La palabra *explosión* se usa en sentido general para todas las reacciones químicas que pueden causar un substancial aumento de presión en el espacio circundante. Una explosión puede tomar la forma de una *deflagración* que genera una presión moderada de velocidad del orden de m./seg. o de una *detonación* que genera muy altas sobrepresiones en el espacio cercano con velocidades del orden de km./seg.

Definir la función de carga (fuerza o presión vs tiempo para diferentes lugares de la estructura) puede ser una tarea muy difícil para cualquier tipo de carga dinámica, lo que lleva

a realizar un significativo número de hipótesis sobre un gran número de variables aleatorias acopladas. Esto es particularmente verdadero para cargas explosivas.

El primer paso es determinar el origen potencial de la explosión. Mientras que, por un lado, pueden encontrarse guías industriales para la determinación de explosiones accidentales de origen químico, por otro lado, la determinación de cargas provenientes de un ataque deliberado es mucho más incierta y especulativo. Luego que el diseñador ha determinado la ubicación y la energía de una explosión potencial, se pueden predecir las cargas debidas a la explosión. Esas cargas de diseño, generalmente toman la forma de curvas presión-tiempo definiendo los valores de la carga pico y el impulso total. La forma y duración del pulso de presión cambiará según el origen y condiciones de la explosión. En el Apéndice A se describe detalladamente la onda de presión originada por explosiones en el aire.

Por otra parte, las cargas dinámicas asociadas con explosiones provocan velocidades de deformación en el material del orden de 10^{-1} a 10^3 seg^{-1} . Esas cargas extremas producen un comportamiento especial de los materiales afectados, siendo su principal característica grandes sobrerresistencias y un aumento de la rigidez. Este tipo de comportamiento dependiente de la velocidad de deformación debe ser incluido en los modelos teórico-numéricos. En general existen varios modelos de este tipo para acero, aunque pueden usarse métodos simplificados aumentando el valor de resistencia estática. En principio parecería que, si se ignoran estos efectos se estaría del lado de la seguridad pero, desafortunadamente, esto no siempre ocurre ya que, mientras que las predicciones de resistencia pueden ser conservativas, la respuesta de la estructura puede cambiar de dúctil a frágil debido a la naturaleza de la falla a tasas de carga muy altas.

Si la carga explosiva se encuentra ubicada muy cerca o en contacto con una estructura o material determinado, la presión ejercida en un área determinada es varias veces superior a la presión que puede soportar el material y se produce una desintegración del mismo en forma de polvo (brising). Este fenómeno no se presenta en las estructuras metálicas analizadas en este trabajo de Tesis, debido a que la magnitud y ubicación de las cargas, hacen que las mismas trabajen con linealidad física. En el caso de los cráteres en los suelos, el fenómeno se considera en forma empírica.

En el caso de explosiones intencionales, uno de los métodos fundamentales para la determinación de la cantidad de explosivo utilizada es la inspección del cráter generado por

dicha carga. La respuesta y el mecanismo de formación de cráteres debido a cargas explosivas es un problema muy complejo, debido a la naturaleza anisótropa y no lineal del material en cuestión, con gran variación de las propiedades de un lugar a otro, y con la incorporación de tres fases en la constitución del material: líquida, sólida y gaseosa.

Además, en el caso del cráter generado por explosiones, son muy importantes los resultados esperados para cargas elevadas sobre la superficie del mismo, libres o sobre vehículos, ya que este es el caso que generalmente se presenta en explosiones intencionales y la bibliografía sobre este tema es escasa o nula.

1.2 OBJETIVOS BASICOS

El objetivo general de la línea de investigación en la cual se enmarca este trabajo de Tesis es la formulación de recomendaciones de diseño de estructuras sometidas a cargas de explosiones.

Los objetivos parciales de esta tesis se pueden resumir en los puntos que se enumeran a continuación:

- Determinación de la variación temporal y espacial de la onda de presión sobre la superficie de estructuras y suelos, generada por la detonación de una carga explosiva.
- Determinación de los parámetros de importancia a tener en cuenta en la modelación teórica-numérica de este tipo de fenómenos.
- Determinación teórica y experimental de las dimensiones del cráter que se origina a partir de la detonación de cargas explosivas de distinto peso, apoyadas y elevadas sobre el suelo.

1.3 HIPOTESIS PRINCIPALES

Para la modelación numérica de las estructuras de acero analizadas en esta Tesis, se realizaron las hipótesis que se enumeran a continuación:

- Material elástico lineal.
- Pequeñas deformaciones y pequeños giros.

- Condiciones de contorno: en todos los casos de análisis se consideró empotramiento perfecto.

- No linealidad geométrica (grandes desplazamientos).

Se consideraron además, otras hipótesis que se explicitan en el momento de ser utilizadas.

1.4 CONTENIDOS DE LA TESIS

Se resumen en este punto los principales contenidos de los capítulos que forman esta tesis.

En el presente capítulo se presenta el problema a estudiar, se indican las hipótesis más importantes que se han considerado y se enumeran los objetivos parciales de este trabajo.

En el Capítulo 2 se desarrolla una descripción de la acción de las cargas producidas por explosiones sobre las construcciones civiles y los métodos para el cálculo de la respuesta dinámica de las estructuras. Por otro lado, se explica la mecánica de formación de los cráteres por cargas explosivas y se enumeran las ecuaciones disponibles para determinar las dimensiones de los mismos a partir del peso del explosivo detonado.

Se describe en el Capítulo 3, el estudio experimental llevado a cabo como parte del trabajo de tesis. Se muestran los registros experimentales de presión, las curvas de aceleración medidas sobre distintos puntos de las dos placas metálicas de acero ensayadas, y los diámetros de los cráteres que se originaron por la detonación de cargas explosivas de distinto peso, apoyadas y elevadas sobre el suelo.

En el Capítulo 4, se realiza un análisis numérico sobre dos modelos de cada una de las placas ensayadas a escala natural, utilizando el Método de los Elementos Finitos. Se usaron los programas ABAQUS/Standard 5.7-3 y COSMOS/M 1.71, y se obtuvieron las aceleraciones para los nodos que se correspondían con la posición de los acelerómetros en las placas durante los ensayos.

Los resultados que se obtuvieron en el análisis computacional, se compararon en el Capítulo 5 con los resultados experimentales. Por otra parte, se realizó un estudio comparativo entre los valores experimentales de ciertos parámetros de las ondas de presión

con los valores analíticos que surgen del uso de fórmulas y ábacos. Respecto a los cráteres, se contrastaron los valores experimentales con curvas propuestas en la literatura y con otros valores experimentales.

Por último, en el Capítulo 6, se indican las conclusiones que se obtuvieron a partir de la comparación de los resultados experimentales y numéricos.

1.5 NOTACION

En esta Tesis, los vectores se indican en letra negrita (**v**, **f**), las derivadas temporales se indican con puntos (\dot{v} , \ddot{v}).

En el desarrollo del trabajo la bibliografía se indica con el autor, en letra itálica, y el año. Luego, en las referencias, se encuentran los trabajos ordenados alfabéticamente por autor.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES PRINCIPALES

2.1. INTRODUCCION

Una de las primeras etapas de este trabajo de tesis, fue realizar una revisión del material bibliográfico que constituye la base del conocimiento en las áreas estudiadas. A partir de ello, en este capítulo, se pretende explicar cómo es la acción que se produce sobre las estructuras y los suelos, como consecuencia de la detonación de una carga explosiva, y hacer una reseña de los trabajos más importantes publicados sobre el tema en cuestión.

La respuesta estructural debido a cargas del tipo impulsivas originadas por explosiones, se puede calcular utilizando un método simplificado o un análisis más riguroso (*Biggs (1964)*).

En el método simplificado la estructura o sus partes componentes se representan por un modelo equivalente de un grado de libertad y la carga por una forma matemática simple (*Biggs (1964)*). En algunos casos, se pueden desacoplar las partes componentes de un sistema y analizarlas por separado (*Autoridad Regulatoria Nuclear (1998)*).

En el caso de un análisis más riguroso, la estructura se modela como un sistema de múltiples grados de libertad y se resuelve la ecuación de movimiento usando superposición modal o técnicas de integración directa.

En el caso de los suelos, el mecanismo de respuesta frente a cargas dinámicas es muy complejo, debido a la anisotropía y la naturaleza no lineal del material. Además, en el suelo, coexisten tres estados: sólido, líquido y gaseoso.

La mecánica de formación de los cráteres originados por la detonación de explosivos es de difícil modelación. Hasta el presente, los métodos utilizados para la determinación de las dimensiones de los mismos son empíricos. Los datos de experimentos de varios años se han recopilado en fórmulas y gráficos. Esta es una herramienta útil para determinar la cantidad de explosivo necesario para obtener una perforación de determinadas dimensiones o para estimar la cantidad y tipo de explosivo utilizado en un ataque terrorista. Muchas de las investigaciones están relacionadas con explosiones enterradas, se cuenta con pocos datos respecto a explosiones sobre el nivel del terreno, y prácticamente no hay datos para el caso de explosiones elevadas sobre el nivel del terreno.

Las características y parámetros más importantes de la onda de presión que se origina a partir de la detonación de una carga explosiva en el aire se describen en el Apéndice A.

2.2. ESTRUCTURAS

2.2.1. Onda de presión reflejada

Cuando la onda de presión incidente desde una explosión en el aire alcanza un medio más denso (tierra, agua, muro) se origina una onda reflejada. El valor del pico de presión reflejada dependerá del valor de la onda incidente y el ángulo al cual ésta alcanza a la superficie. La naturaleza de la superficie también tiene un efecto importante.

La Figura 2.1a muestra la localización del frente de presión sobre el techo y los lados de la estructura para distintos tiempos.

En la Figura 2.2a se observa que cuando la onda alcanza la cara frontal de la estructura, en el tiempo t_2 , se produce el pico de sobrepresión reflejada p_r . Esta presión disminuirá en un intervalo de tiempo $(t' - t_2)$, hasta que se hace igual a la presión $p(t)$ dada por:

$$p(t) = p_s(t) + q_s(t) \quad (2.1)$$

donde $p_s(t)$ es la sobrepresión y $q_s(t)$ es la presión dinámica del viento originado por la onda en el tiempo t . El tiempo t' está dado aproximadamente por:

$$t' = \frac{3S}{U_s} \tag{2.2}$$

donde S es la menor dimensión entre $B/2$ (B : ancho) y la altura H (Figura 2.1b) y U_s es la velocidad del frente de la onda de presión.

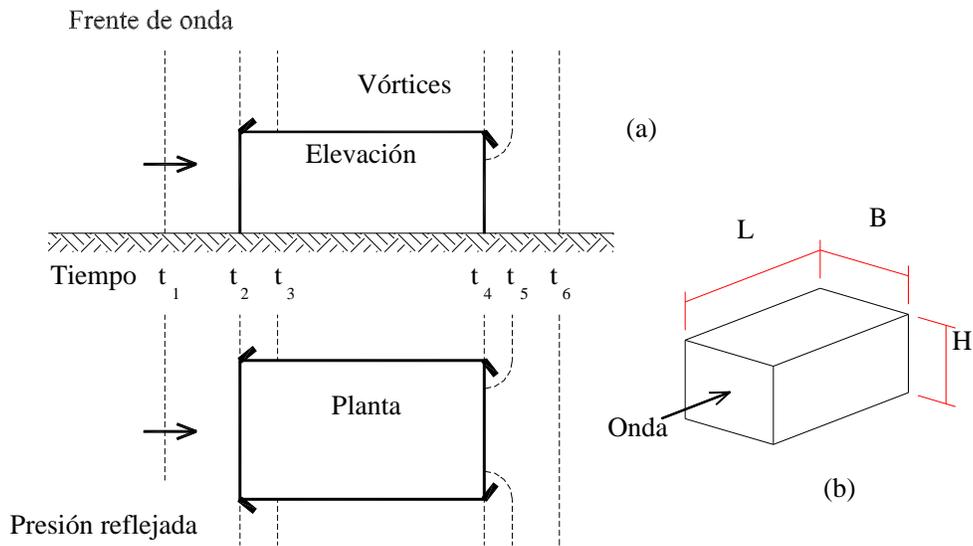


Figura 2.1. Difracción de la onda de presión alrededor de una estructura simple.

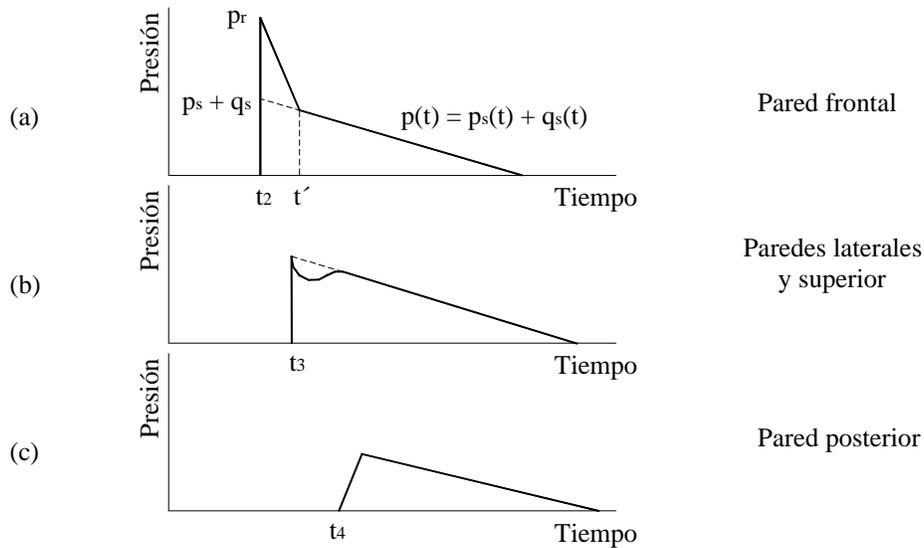


Figura 2.2. Sobrepresión vs. tiempo sobre una estructura simple.

Respecto a la variación de la onda de sobrepresión en el tiempo, se puede considerar una función de tipo exponencial como la de Friedlander (*Smith y Hetherington (1994)*), de la forma:

$$p(t) = p_s \left(1 - \frac{t}{t_s} \right) e^{-\frac{bt}{t_s}} \quad (2.3)$$

donde b es una constante positiva que se denomina parámetro de la forma de onda y es función del pico de sobrepresión. Otra forma, es una variación lineal, como se observa en la Figura 2.2a.

A la curva presión-tiempo sobre la pared frontal, se la compara con otra, que se construye usando el impulso de presión reflejada i_r y el pico de presión reflejada p_r . La duración t_r de la onda reflejada se calcula como (*Autoridad Regulatoria Nuclear (1998)*):

$$t_r = \frac{2i_r}{p_r} \quad (2.6)$$

En la Figura 2.3, se presenta en línea llena la curva que se construye considerando el tiempo t' dado por la ec. (2.1) y t_s que es la duración de la fase positiva de la onda de presión, y en línea punteada la curva que se construye a partir de i_r . Luego, ambas curvas se deben usar como carga sobre la estructura y adoptar la más desfavorable.

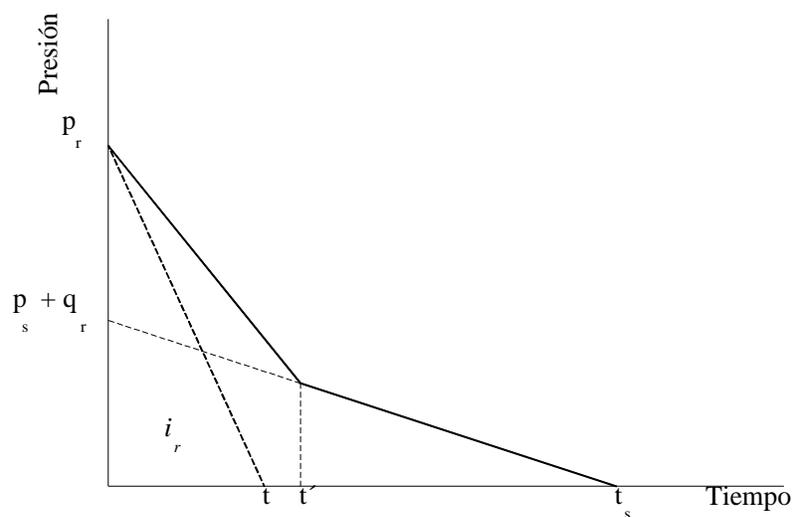


Figura 2.3. Definición de la onda de presión que actúa sobre la estructura

En la Figura 2.2b se ve que en las caras laterales y el techo, se produce una alteración en la curva de presión debido a los vórtices que se forman en la intersección de las caras con el techo. Las caras laterales están sujetas a la sobrepresión más la presión aerodinámica, la cual en este caso es negativa. La carga en la cara posterior alcanza su valor máximo después de un cierto tiempo del arribo del frente, debido a que la onda debe desplazarse hacia abajo y completar el proceso de difracción (Figura 2.3c). Este tiempo se puede aproximar por:

$$t = \frac{4S}{U_s} \quad (2.4)$$

Las Figuras 2.4a y 2.4b muestran la fuerza aerodinámica ejercida sobre la pared del frente y del fondo de la construcción. El valor de la misma está dado por:

$$F_D = C_D q_s(t) A \quad (2.5)$$

donde A es el área cargada y C_D es el coeficiente aerodinámico, función de la forma de la estructura.

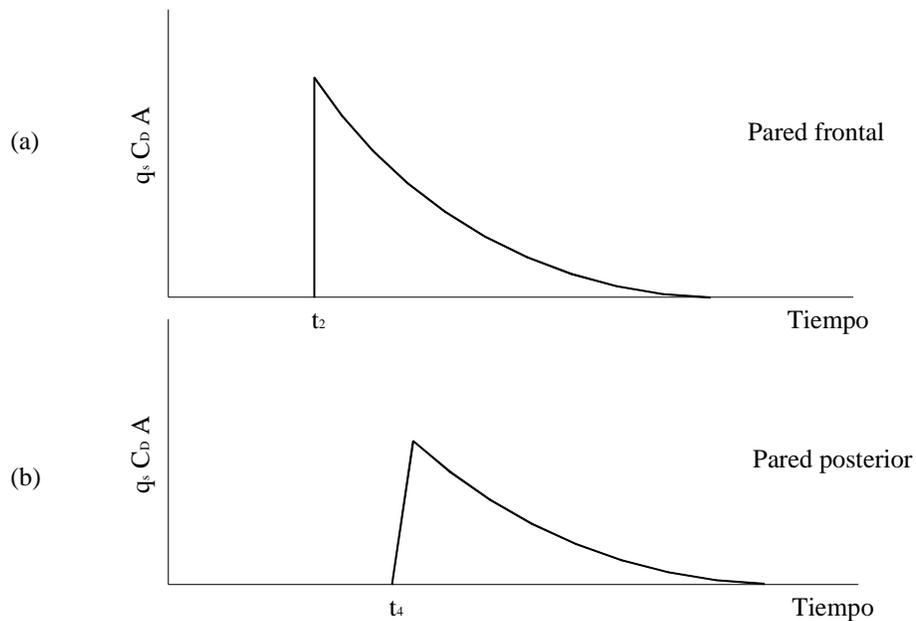


Figura 2.4. Fuerza traslacional vs. tiempo sobre una estructura simple.

2.2.2. Onda de presión sobre estructuras

Se pueden identificar tres tipos de interacción entre una estructura y la onda de presión que se origina por una explosión (Smith y Hetherington (1994)). El primero es la interacción de una onda de presión de gran escala que rodea a una estructura de grandes dimensiones y la comprime (Figura 2.5a). Habrá también una fuerza traslacional tendiente a mover la estructura lateralmente (fuerza aerodinámica), pero debido al tamaño y naturaleza de la misma, es poco probable que se desplace. Esta es una carga de difracción y la estructura se designa como *blanco de difracción*. La segunda categoría es cuando una onda de gran escala actúa contra una estructura pequeña (Figura 2.5b). En este caso, la onda la rodea y comprime con una presión de “aplastamiento” uniforme que actúa en todas las partes de la estructura. La misma se moverá debido a una fuerza traslacional originada por la carga aerodinámica. La estructura se designa como un *blanco aerodinámico*. El tercer caso es el de la detonación de una carga pequeña que actúa sobre una estructura de un tamaño considerable (Figura 2.5c). Probablemente en este caso, los componentes serán cargados en forma separada y la respuesta se deberá determinar de esa manera.

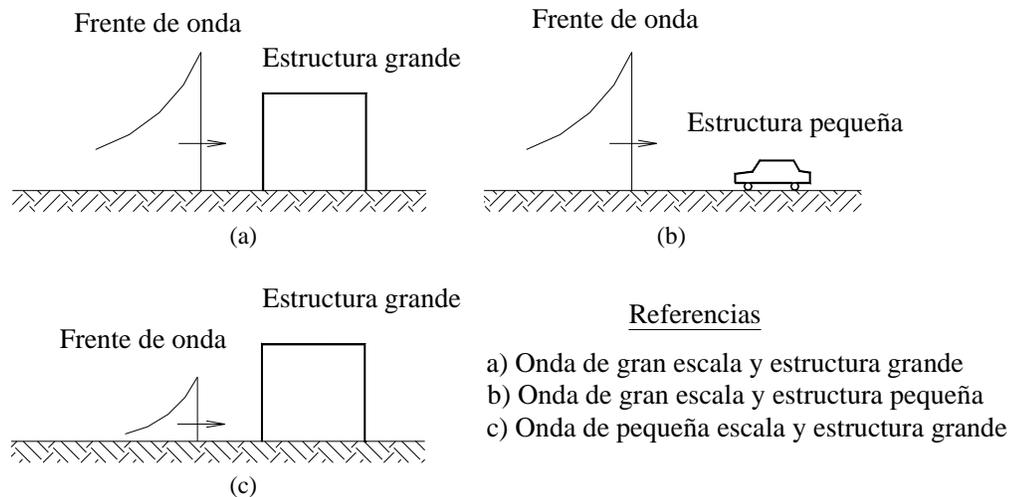


Figura 2.5. Interacción entre la onda de presión y una estructura.

En los dos primeros casos, la estructura experimenta dos componentes simultáneas de carga. La difracción de la onda alrededor de la estructura, la rodeará y originará una fuerza de aplastamiento normal sobre cada superficie expuesta. La componente de carga aerodinámica origina un empuje sobre el lado de la estructura que enfrenta a la onda, seguido por una fuerza

de succión sobre el lado opuesto, debido al paso de la presión dinámica alrededor y sobre la misma.

En aquellos casos en que la detonación se produzca relativamente cerca de la estructura, es decir, cuando la distancia desde la explosión a la obstrucción es menor que el ancho de ésta, la *Autoridad Regulatoria Nuclear* (1998) propone usar una curva presión-tiempo con los valores promedio de las cargas que actúan sobre una longitud D_e de la estructura igual a $(1.3R_a)$ (R_a es la distancia entre el lugar de detonación y el frente de la superficie de la estructura). En este caso, los valores de la presión y la duración, son los promedios de las cargas que actúan sobre los puntos 1 y 2 de la Figura 2.6. En este caso también se debe considerar el efecto de pulsos de presión cortos. Los valores de p_r y t_r son el promedio de los valores para las cargas que actúan en 1 y 2 (Figura 2.6).

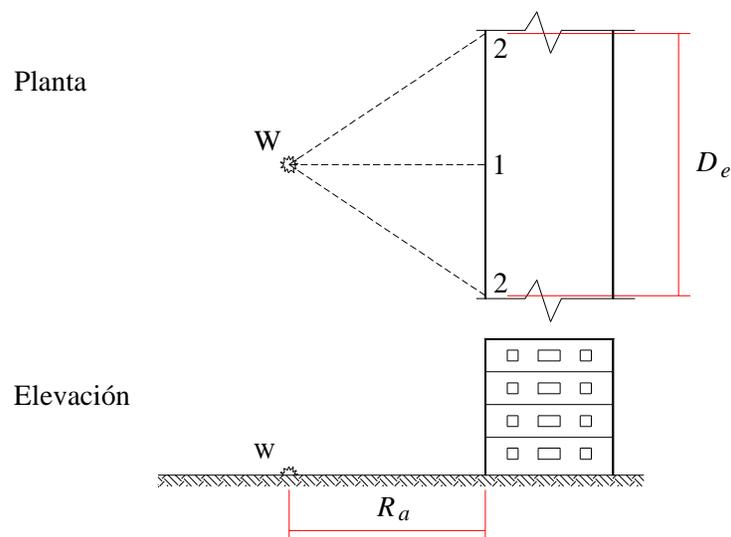


Figura 2.6. Detonación cercana a la estructura.

2.2.3. Efecto escudo debido a obstrucciones

Cuando una onda de presión alcanza una obstrucción o estructura escudo se reduce el valor de la onda de presión reflejada en la zona inmediatamente detrás del mismo. El valor de p_s no cambia, pero tarda algún tiempo en rodear a la estructura. Esto reduce la carga sobre las estructuras inmediatamente detrás de la obstrucción. Este fenómeno es bien descrito en la literatura en forma cualitativa, pero no hay información desde el punto de vista cuantitativo.

La estructura escudo debería tener una baja frecuencia de respuesta y alta ductilidad. Para propósitos de diseño se sugiere que el blanco ubicado en una zona definida por un ángulo de 45° detrás de la obstrucción (Figura 2.7) sea diseñado para un valor de p_r igual a $(0.8p_s)$. Luego que el efecto de la obstrucción ha pasado, la onda tiene los mismos parámetros como si el escudo no hubiera estado presente (Autoridad Regulatoria Nuclear (1998)).

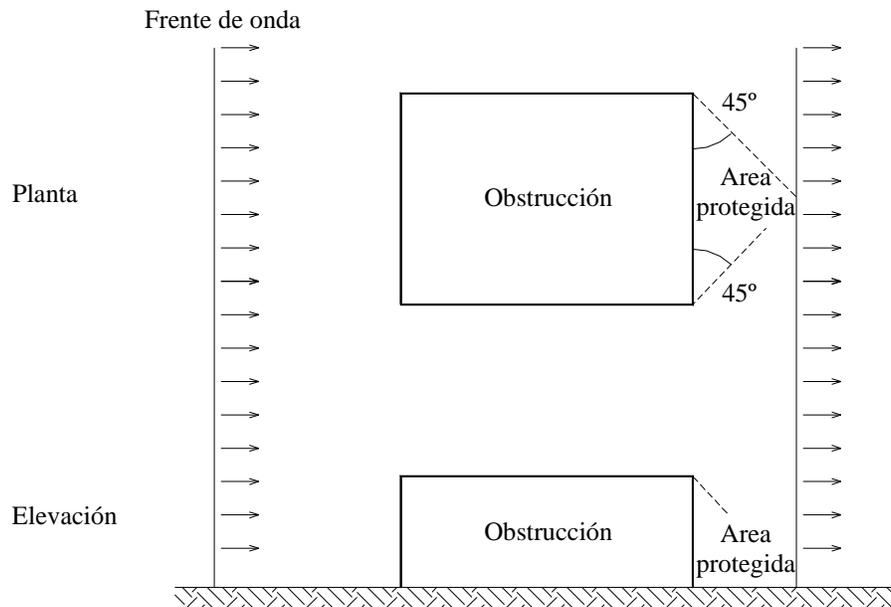


Figura 2.7. Modificación de la onda de presión debido a una obstrucción.

2.2.4. Métodos de resolución de estructuras

Hay varios métodos de resolución estructural simples en libros clásicos de dinámica estructural como en Biggs (1964) y Clough y Penzien (1975).

En los casos en que existe diferencia entre las rigideces de las partes componentes de un sistema (estructura resistente y paneles de cierre) es posible resolver el problema desacoplando las mismas y realizar el análisis en forma separada (Autoridad Regulatoria Nuclear (1998)).

Debido a que los picos de presión generados por ondas explosivas pueden tener valores muy grandes, a veces es necesario tener en cuenta los efectos de no linealidad física y geométrica. En cuanto a esta última, existen métodos basados en la ecuación de Lagrange,

como el propuesto por *Louca et al* (1998), que permiten realizar un análisis elástico con grandes desplazamientos.

En general, los análisis teóricos consideran condiciones de borde simples, y para modelar condiciones de apoyo semirrígidas se recurre al uso de resortes. En el trabajo de *Ellis y Tsui* (1997) se presenta una alternativa para determinar el valor de rigidez de los mismos. *Nurick et al* (1996), muestran la influencia de la forma del apoyo y la importancia de una adecuada modelación numérica de los mismos.

2.2.4.1. Métodos de un grado de libertad

Estos métodos idealizan en cierto grado la carga y la estructura. Comúnmente se reduce el sistema real a un sistema de un grado de libertad. En este caso, la posición del sistema en cualquier instante de tiempo se define por una única coordenada. El sistema se considera formado por un resorte y una masa (Figura 2.8). Esta es una representación adecuada para ciertos tipos de estructura reales (*Biggs* (1964)).

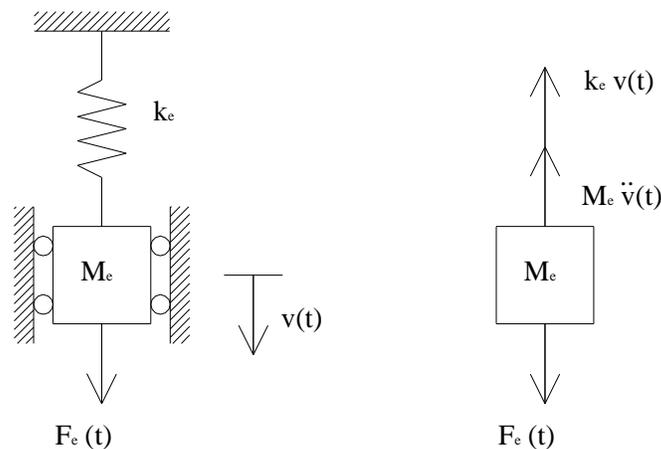


Figura 2.8. Sistema dinámico equivalente de un grado de libertad.

Para definir un sistema de un grado de libertad equivalente a la estructura real se deben determinar los parámetros M_e , k_e , F_e y la variación de la carga en el tiempo $f(t)$. Luego, el análisis dinámico se resuelve con los métodos aplicables a sistemas de un grado de libertad.

El sistema equivalente se elige de modo tal que el desplazamiento de la masa sea el mismo que el de un punto significativo de la estructura. Las fuerzas y tensiones en el sistema

idealizado no equivalen directamente a las mismas cantidades sobre la estructura real, pero conocidos los desplazamientos se determinan rápidamente. Como la escala del tiempo no se altera, la respuesta del sistema equivalente en términos de desplazamiento y tiempo es exactamente la misma que la del punto significativo de la estructura real.

Las reacciones de los elementos estructurales se deben obtener considerando el equilibrio dinámico del elemento completo.

a) Sistema equivalente

Para obtener el sistema equivalente, se introducen los *factores de transformación K*, que se obtienen considerando una forma deformada para la estructura real. Esta forma se toma igual a la que resulta de aplicar estáticamente la carga dinámica. Existen tablas con los factores de transformación, para distintos tipos de estructura y distintas condiciones de borde, que permiten convertir la estructura real en un sistema equivalente de un grado de libertad (*Biggs (1964)*).

Multiplicando la carga, masa, resistencia y rigidez de la estructura real por estos factores se obtienen los parámetros del sistema equivalente de un grado de libertad. En el punto B.1.1. del Apéndice B, se indica la forma de obtención de los coeficientes para una estructura que responde dentro del rango lineal.

b) Ecuación de movimiento

A partir de la transformación de la estructura real en un sistema de un grado de libertad, se puede escribir la ecuación de movimiento para el sistema de la Figura 2.8:

$$M_e \ddot{v} + k_e v = F_e(t) \quad (2.7)$$

donde

$$\ddot{v} = \frac{d^2 v}{dt^2} \quad (2.8)$$

es la aceleración del sistema y v es el desplazamiento.

Como los factores de transformación varían para cada rango de tensión (elástico, elasto-plástico, plástico), la solución completa requiere que cada caso se trate en forma separada.

c) Solución de la ecuación de movimiento

c1) Solución cerrada

La obtención de la solución que determina la variación del desplazamiento con el tiempo sólo es posible para sistemas simples sujetos a cargas cuya variación en el tiempo es sencilla.

A partir de la solución del problema para ciertos tipos de carga, se puede definir el factor de carga dinámico *FCD*, como la relación del desplazamiento dinámico en cualquier instante de tiempo respecto al desplazamiento que ocurriría si la carga se aplica estáticamente. Este factor es adimensional y no depende de la magnitud de la carga aplicada.

En muchos problemas prácticos es de interés el valor máximo del *FCD*. Existen gráficos que permiten determinar su valor en función de la forma de variación de la carga en el tiempo y de la relación t_d/T (*Biggs* (1964)), siendo t_d el tiempo de aplicación de la carga y T el período del sistema.

De esta manera, el problema dinámico se transforma en un problema estático donde la carga aplicada se determina como el valor de la carga dinámica multiplicada por el *FCD*.

c2) Integración directa

Este es un procedimiento por el cual la ecuación diferencial de movimiento se resuelve paso a paso, comenzando en el instante cero, cuando se conocen la velocidad y el desplazamiento. La escala de tiempo se divide en intervalos discretos, y se determinan sucesivamente los desplazamientos para cada estación de tiempo. La condición de equilibrio dinámico se establece en el comienzo y el final de cada intervalo, y se aproxima el movimiento del sistema durante el incremento de tiempo.

Hay muchos métodos disponibles que dan resultados aproximados, mejorando la precisión a medida que se reduce el intervalo de tiempo, aunque el número de cálculos aumenta. Se deben considerar tres factores en la selección del intervalo (*Clough y Penzien*

(1975)): (1) la tasa de variación de la carga aplicada, (2) la complejidad de las propiedades no lineales del amortiguamiento y la rigidez, (3) el período T de la estructura. En general, la elección del intervalo de tiempo dependerá del período de vibración de la estructura. Es común considerar una relación entre el intervalo de tiempo y el período de la estructura menor que $1/10$.

En el Apéndice B, en el punto B.1.2, se explica cómo obtener la fórmula incremental de equilibrio dinámico para sistemas de un grado de libertad y los posibles métodos de resolución de las mismas.

2.2.4.2. Métodos de múltiples grados de libertad

En la mayor parte de los casos, para describir adecuadamente la respuesta dinámica de una estructura, se debe formular el problema en términos de ecuaciones diferenciales parciales, ya que tanto las variables de posición como la variable tiempo son independientes.

Debido a que muy excepcionalmente puede determinarse la solución analítica exacta del sistema de ecuaciones planteado, para determinar la respuesta dinámica de una estructura, que posee infinitos grados de libertad, se recurre a una discretización de la misma.

Una forma de modelar la estructura es por medio de un *sistema de masas discretas*. En este caso, el sistema dinámico está constituido por un conjunto de masas conectadas entre sí, donde se considera concentrada la masa de la estructura. El número de grados de libertad es igual al número de movimientos independientes posibles, y no necesariamente debe coincidir con el número de masas.

Sin embargo, una de las formas más eficiente para analizar la respuesta estructural por medio de coordenadas discretas es la aproximación por el *Método de Elementos Finitos*. Este tipo de idealización se aplica a todo tipo de estructuras: pórticos, placas, problemas planos, sólidos tridimensionales. La base del método consiste en dividir la estructura en un conjunto apropiado de elementos, los cuales están interconectados entre sí a través de los nodos. Los grados de libertad de estos nodos constituyen los movimientos posibles del sistema.

a) Ecuaciones de movimiento

La ecuación de movimiento del modelo que representa la estructura se puede formular expresando el equilibrio de las fuerzas asociadas con cada uno de los grados de libertad considerados. En general, en cualquier punto o nodo i , las fuerzas que aparecen son la carga aplicada externamente $p_i(t)$ y las fuerzas de inercia f_{iI} , de amortiguamiento f_{iD} y elástica f_{iS} . Planteando el equilibrio para cada grado de libertad, se llega a la siguiente expresión en forma matricial:

$$\mathbf{f}_I + \mathbf{f}_D + \mathbf{f}_S = \mathbf{p}(t) \quad (2.9)$$

El vector de fuerzas elásticas se puede expresar como:

$$\mathbf{f}_S = \mathbf{k}\mathbf{v} \quad (2.10)$$

donde la matriz de rigidez de la estructura \mathbf{k} es la matriz de los coeficientes de rigidez k_{ij} (para el conjunto de desplazamientos considerados) y \mathbf{v} es el vector que representa la forma desplazada de la misma.

Para propósitos de análisis, se puede asumir que la disipación de energía en la estructura se puede considerar a través del amortiguamiento de tipo viscoso, representado por una fuerza opuesta pero proporcional a la velocidad. En este caso, el vector de fuerzas de amortiguamiento se puede expresar como:

$$\mathbf{f}_D = \mathbf{c}\dot{\mathbf{v}} \quad (2.11)$$

siendo $\dot{\mathbf{v}}$ el vector velocidad y \mathbf{c} la matriz de amortiguamiento de la estructura formada por los coeficientes de amortiguamiento c_{ij} .

En forma análoga, se puede escribir la expresión:

$$\mathbf{f}_I = \mathbf{m}\ddot{\mathbf{v}} \quad (2.12)$$

en la cual la matriz de masa de la estructura \mathbf{m} es la matriz de los coeficientes de masa m_{ij} y $\ddot{\mathbf{v}}$ es el vector aceleración.

Sustituyendo las ecs. (2.10), (2.11) y (2.12) en la ec. (2.9), se obtiene la expresión de equilibrio dinámico de la estructura considerando todos los grados de libertad:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{v}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{k}\mathbf{v} = \mathbf{p}(t) \quad (2.13)$$

La ecuación anterior expresa las N ecuaciones que describen el movimiento del sistema analizado.

Los sistemas pueden ser *acoplados*, en cuyo caso la determinación de la respuesta involucra la resolución simultánea del sistema de ecuaciones que describe el problema, o *desacoplados*, cuando las ecuaciones se pueden resolver en forma separada.

b) Solución de las ecuaciones de movimiento

b1) Método de superposición modal

La base del método es transformar el conjunto de N ecuaciones acopladas que describen el movimiento del sistema (ec. (2.13)), en un conjunto de N ecuaciones desacopladas. El movimiento del sistema se obtiene superponiendo la respuesta para cada uno de los modos normales, por lo este método sólo se limita a sistemas elásticos lineales.

Se define como modo normal a la forma en que podría vibrar libremente un sistema, manteniendo constante en el tiempo la relación entre los desplazamientos de dos masas o nodos cualquiera. Un sistema tiene exactamente el mismo número de modos normales o naturales que grados de libertad. Cada modo tiene asociado una frecuencia natural y una forma característica.

La propiedad fundamental que permite desacoplar las ecuaciones de movimiento, es que las formas modales de vibración cumplen las relaciones de ortogonalidad.

El amortiguamiento en estructuras tiene diferentes formas. Se debe a la fricción molecular interna del material, a la pérdida de energía asociada con el deslizamiento de conexiones estructurales. En otros casos puede ser debido a la resistencia al movimiento del aire u otros fluidos que rodean a la misma. En cualquier caso, el efecto es una fuerza que se opone al movimiento, y que disminuye la amplitud del movimiento.

Para poder desacoplar las ecuaciones de movimiento es necesario que la matriz de amortiguamiento también cumpla las condiciones de ortogonalidad. Con este fin, *Clough* y *Penzien* (1975) proponen una matriz \mathbf{c} proporcional a las matrices de masa y rigidez de la siguiente manera:

$$\mathbf{c} = \mathbf{m} \sum_b a_b [\mathbf{m}^{-1} \mathbf{k}]^b \equiv \sum_b \mathbf{c}_b \quad (2.14)$$

donde b indica la cantidad de términos que se consideran en la matriz.

El amortiguamiento de Rayleigh es un caso particular de la ec. (2.14). Sin embargo, ésta permite obtener una matriz de amortiguamiento donde un número de modos especificado tenga las relaciones de amortiguamiento deseadas.

Debido a que este método sólo es aplicable a sistemas lineales, solamente podrá ser utilizado en caso de que la presión incidente sobre la estructura sea pequeña.

b2) Integración directa

El método más general para la resolución de sistemas no lineales es la integración paso a paso de las ecuaciones acopladas de movimiento. La escala de tiempo se divide en pequeños intervalos, y la historia de la respuesta se determina en cada incremento como si se tratara de un sistema lineal que cambia sus propiedades en cada intervalo de tiempo. Este método también se aplica a estructuras lineales, en cuyo caso se simplifican los cálculos, porque no es necesario modificar las propiedades estructurales en cada paso. Una dificultad de este método es que la matriz de amortiguamiento \mathbf{c} se debe definir en forma explícita y no por los coeficientes de amortiguamiento modal. En general, el método más efectivo para derivar una matriz de amortiguamiento, es asumir coeficientes de amortiguamiento para todos los modos que se consideran importantes en la respuesta y calcular una matriz de amortiguamiento usando la ec. (2.14). Por otro lado, el hecho que la matriz de amortiguamiento deba ser explícita aumenta la generalidad del método de integración paso a paso sobre el de superposición modal, ya que la matriz no debe cumplir necesariamente la condición de ortogonalidad.

En el punto B.2.1 del Apéndice B, se describen brevemente los métodos de resolución del sistema de ecuaciones incrementales que describen el movimiento de los sistemas de múltiples grados de libertad.

2.3. SUELOS

En el Apéndice C, se describen los parámetros de la onda de presión que se genera en los suelos cuando se produce la detonación de una carga explosiva enterrada o cerca de la superficie.

2.3.1. Onda de presión sobre estructuras enterradas

Para determinar la respuesta estructural debido a explosiones en el suelo, se hacen algunas simplificaciones en la carga. La presión que experimenta una estructura durante la reflexión es mayor que la incidente. Se recomienda multiplicar por 1.5 los valores de la presión incidente para obtener el valor de la sobrepresión reflejada (*Smith y Hetherington* (1994)). El tiempo por el cual la sobrepresión reflejada actúa sobre un punto P de la estructura (Figura 2.9) se determina por el tiempo que tarda una onda de tracción para propagarse desde un borde libre de la estructura hasta el punto en cuestión, eliminando de ese modo la sobrepresión reflejada de compresión. Está dado por:

$$t_r = \frac{1}{c} \left(l_2 + \frac{l_3}{2} - l_1 \right) \quad (2.15)$$

donde l_1 , l_2 y l_3 se indican en la Figura 2.9 y c es la velocidad de propagación de la onda.

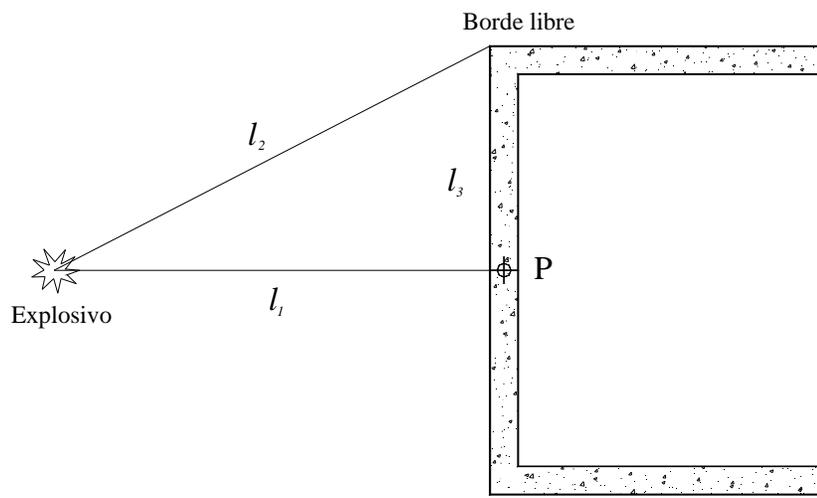


Figura 2.9. Camino de propagación de la onda de tracción.

La presión transitoria experimentada por el punto P se representa por el pulso de la Figura 2.10, en el cual

$$t_d = \frac{2i_0}{p_0} \quad (2.16)$$

donde i_0 y p_0 son los valores de impulso específico y presión incidente.

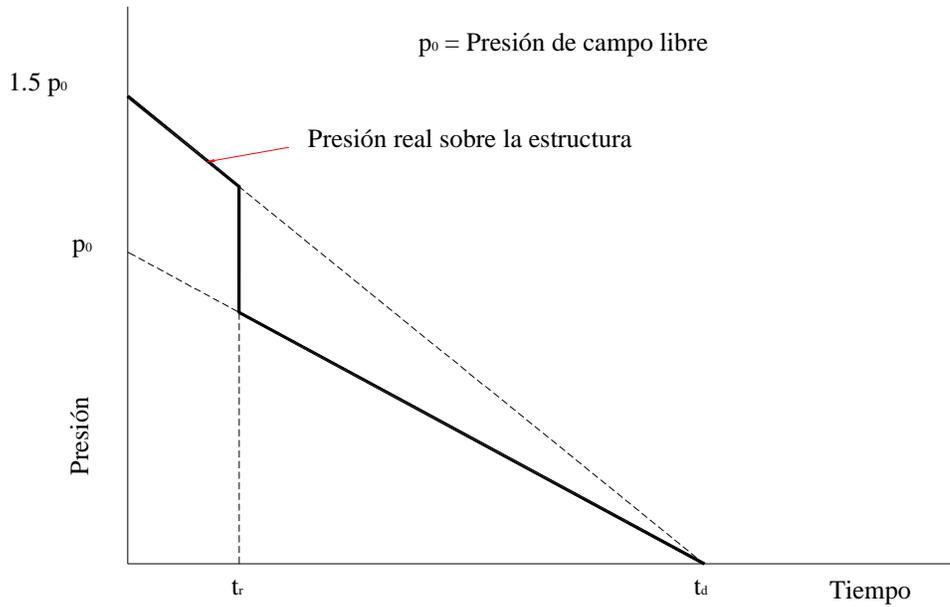


Figura 2.10. Onda de presión en el punto P .

En la práctica la sobrepresión reflejada desaparecerá rápidamente para puntos cerca del borde libre, mientras t_r será significativa para puntos cerca del centro de la pared. Por convención el pulso transitorio se simplifica aún más como se indica en la Figura 2.11. Los valores de t_r y t_d para una pared rectangular o losa de techo se determinan en el punto indicado en la figura.

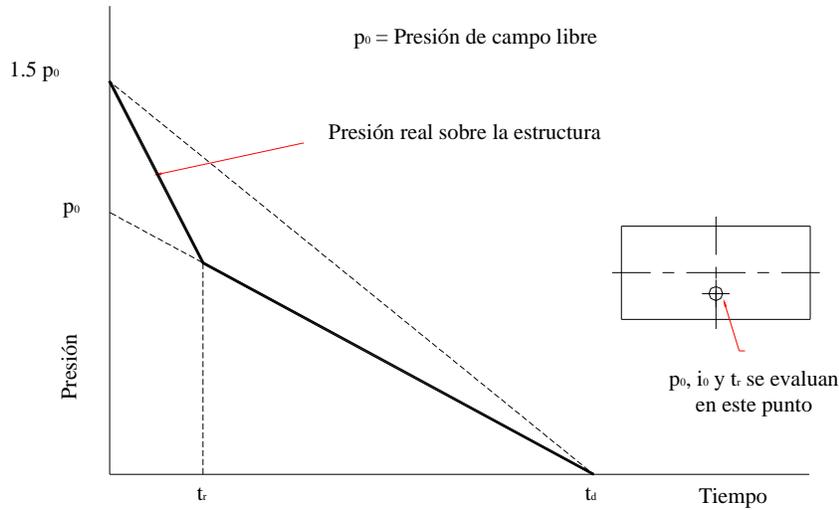


Figura 2.11. Representación simplificada de la onda presión.

2.3.2. Respuesta de estructuras enterradas

Existe un método simplificado que permite determinar los movimientos de las paredes y pisos de estructuras enterradas que son alcanzadas por una explosión (Smith y Hetherington (1994)).

Las siguientes expresiones permiten determinar el movimiento horizontal de una pared vertical (Figura 2.12):

$$v_m \leq 2v \qquad \dot{v}_m = 2\dot{v} \qquad \ddot{v}_m = \frac{2p_0}{m} \qquad (2.17)$$

donde v_m , \dot{v}_m y \ddot{v}_m son los desplazamientos, velocidad y aceleración del muro, y v , \dot{v} y p_0 son los valores de desplazamiento, velocidad y presión asociados con la explosión en el suelo.

Para el movimiento horizontal del piso, se pueden adoptar los valores de campo libre:

$$v_p = v \qquad \dot{v}_p = \dot{v} \qquad (2.18)$$

donde v_p y \dot{v}_p son el desplazamiento y velocidad horizontal del piso.

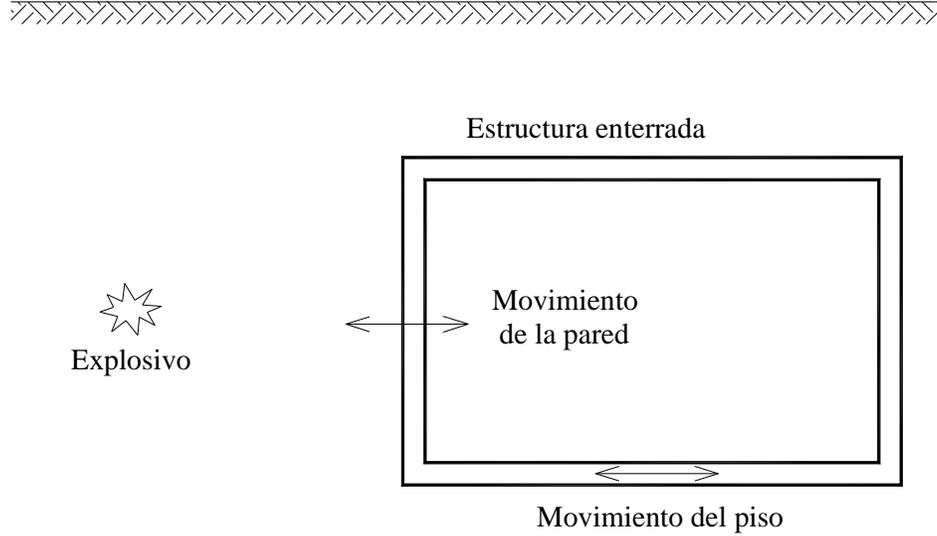


Figura 2.12. Movimiento horizontal de paredes y piso.

2.3.3. Formación de cráteres

Siempre que ocurre una explosión confinada en una masa de suelo se forma una cavidad. Si la explosión es relativamente cercana a la superficie, la cavidad ventila a la atmósfera y se forma un cráter. Por otra parte, las explosiones sobre la superficie pueden o no originar un cráter.

Se define como *cráter aparente* aquel que se observa a simple vista inmediatamente después de la explosión, y cuyo diámetro está dado por la distancia entre la parte alta del reborde que se forma en el perímetro. El término *cráter real* se refiere al cráter que se obtendría si se remueve el suelo suelto que cae dentro del cráter y el reborde, luego de la detonación del explosivo (Kinney y Graham (1985)).

La mecánica de la formación de cráteres por explosivos es compleja porque involucra la interacción de efectos gravitatorios, condiciones de carga transitorias y está relacionada con las propiedades físicas dinámicas del aire, el suelo y la interfase aire-suelo.

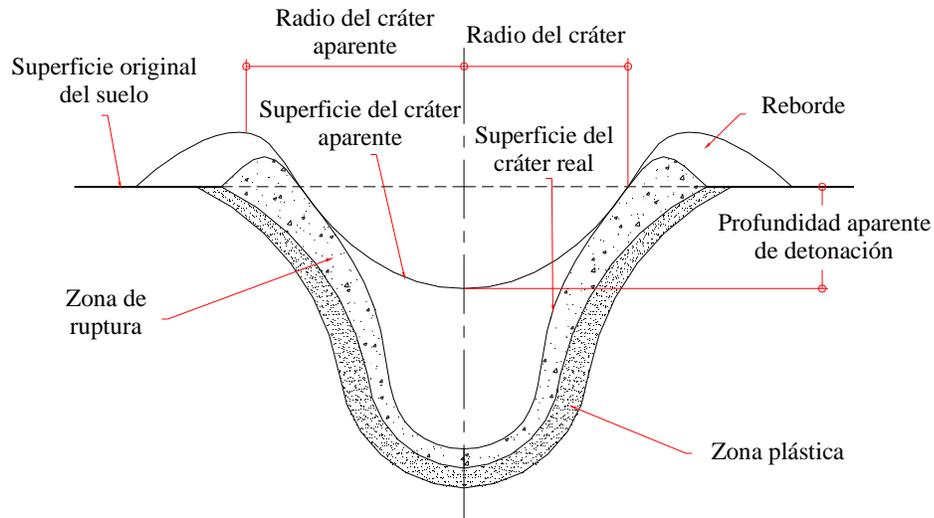


Figura 2.13. Esquema de un cráter.

Cuando detona un explosivo, se produce una onda de presión. En el caso que el explosivo esté enterrado o próximo a la superficie, se producirá una compresión, compactación y deformación plástica del suelo inmediatamente alrededor del lugar de detonación, junto con la formación de una cavidad esférica. En el frente de la onda de presión, el suelo se comprime debido al colapso de los poros. El suelo entonces se rompe en partículas y se expande. A medida que la onda se aleja desde el punto de detonación el pico de presión disminuye. Para presiones por encima de la resistencia a compresión dinámica del suelo, se produce la compactación y desplazamiento del mismo. Para presiones de onda inferiores al límite de compresión, se produce deformación permanente por flujo plástico hasta que la presión pico se hace inferior al límite plástico para el suelo.

En el caso de explosiones enterradas, cuando la onda de presión de compresión se mueve hacia afuera y encuentra la interfase aire-suelo, se genera una onda de tensión negativa que se propaga hacia adentro del suelo. A alguna profundidad, la suma de las dos ondas de tensión iguala la resistencia de tracción dinámica del suelo, éste se rompe en tracción y las piezas se desprenden violentamente. Esto produce una nueva superficie libre y más piezas se desprenden. Este proceso se llama descascaramiento y altera la resistencia del suelo.

Los factores más importantes en la determinación de la forma y tamaño del cráter son: la masa W del explosivo, la posición relativa λ_c y el medio en el que se detona. λ_c se define como (Bull y Woodford (1998)):

$$\lambda_c = \frac{l}{W^{1/3}} \quad (2.19)$$

donde l es la distancia del explosivo a la interfase aire-suelo (en pies) y W es el peso del explosivo equivalente en TNT (en libras). Cuando el explosivo detona por arriba de la interfase aire-suelo $\lambda_c < 0$, cuando la detonación ocurre en la interfase aire-suelo $\lambda_c = 0$ y cuando el explosivo detona debajo de la interfase aire-suelo $\lambda_c > 0$.

Para $\lambda_c > 0$ los efectos gravitacionales alteran el mecanismo de formación del cráter. Al incrementarse la profundidad de la detonación, la energía del explosivo debe enfrentar cantidades crecientes de suelo. Como consecuencia de ello, al aumentar λ_c el radio y la profundidad del cráter aparente aumentan hasta que se alcanza un cierto valor, a partir del cual empiezan a disminuir. El máximo cráter aparente se forma cuando $1.0 < \lambda_c < 1.5$. Cuando $-0.5 < \lambda_c < 2.0$ se forma un cráter de forma convencional.

Los ensayos de explosiones con formación de cráteres constituyen una herramienta apropiada para estudiar el fenómeno de la explosión, el comportamiento y poder destructivo de distintos explosivos y el comportamiento de distintos tipos de suelos y rocas frente a este tipo de carga (*Persson et al (1994)*).

Las investigaciones de las características de cráteres formados por explosiones están relacionadas con el análisis dimensional y razonamientos estadísticos. La ley de escala más aplicable es la de la raíz cúbica o de Hopkinson (*Saxe (1963)*). Según esta ley cualquier dimensión lineal del cráter se puede expresar como una constante multiplicada por $W^{1/3}$, donde W representa la masa de explosivo equivalente a TNT.

Aun los ensayos de cráteres realizados cuidadosamente tienen desviaciones en las dimensiones medidas de los mismos de $\pm 10\%$, mientras que son comunes diferencias entre $\pm 30\%$ a 40% .

Los datos experimentales indican que en suelos cohesivos con un contenido de humedad moderado, los diámetros de los cráteres en la dirección vertical D_v y horizontal D_h pueden evaluarse como (*Bull et al (1998)*):

$$D_v \text{ o } D_h (m) = (0.75 \text{ a } 1.07) [W(Kg)]^{1/3} \quad (2.20)$$

Chadwick (1964), por otro lado, sugiere:

$$D_v \text{ o } D_h(m) = (1.15 \text{ a } 1.197)[W(Kg)]^{1/3} \quad (2.21)$$

Baker (1985) presenta un estudio dimensional más completo para modelar el fenómeno de formación de cráteres en el caso de explosiones enterradas. Elige seis parámetros para definir este problema: el peso W de explosivo, la profundidad d a la que está enterrado el explosivo, el radio R del cráter resultante, la densidad ρ del suelo y dos parámetros de resistencia que caracterizan las propiedades del suelo: σ que tiene dimensiones de tensión y está relacionado con la resistencia del suelo, y K con dimensiones de fuerza por unidad de longitud al cubo, que tiene en cuenta los efectos gravitacionales. Un análisis dimensional permite descartar la densidad como variable y proponer la siguiente relación funcional:

$$\frac{R}{d} = f\left(\frac{W^{1/3}}{\sigma^{1/3}d}, \frac{W^{1/3}}{K^{1/4}d}\right) \quad (2.22)$$

Esta ecuación define un espacio tridimensional. La variable dependiente es el radio escalado del cráter, (R/d) . Las dos variables independientes son relaciones de energía. El numerador de ambas variables está relacionado con el peso de la carga explosiva. El denominador de la primer variable independiente está determinado por la energía de deformación por unidad de volumen, mientras que el de la segunda está determinado por la energía utilizada para vencer los efectos gravitacionales.

Lampson (1946) y *Morrey* (1952), han tratado de evaluar esta fórmula considerando la ley de escala $[W^{1/3}/(\sigma^{1/3}d)]$, despreciando los efectos gravitacionales, concluyendo que el radio del cráter será sobrestimado si se usan cargas pequeñas para hacer predicciones para cargas muy grandes.

Sedov (1959) y *Haskell* (1955) suponen que la influencia del suelo es despreciable. De este modo (R/d) es función sólo de $[W^{1/4}/(K^{1/4}d)]$. Se demuestra en este caso, que si se utilizan cargas pequeñas para predecir el diámetro del cráter correspondiente a cargas mayores, la ley de escala $W^{1/4}$ subestima el tamaño del cráter.

Chabai (1965) determinó que para explosiones relativamente pequeñas es más adecuada la potencia $1/3$ y para explosiones grandes $1/4$, recomendándose una potencia de

1/m comprendida entre 1/3 y 1/4. Mediante un análisis de regresión sobre datos experimentales concluyó que (R/d) aproximaba una función de $(W^{1/3.4}/d)$ en un suelo de desierto aluvional.

Baker (1985) determinó que la relación tridimensional original (ec. 2.21) se puede reducir a una relación bidimensional, a partir de la observación que las dos variables independientes forman una hipérbola rectangular para (R/d) constante. Esta relación, que incluye la resistencia del suelo y los efectos gravitacionales, utiliza un exponente $7/24=1/3.42$:

$$\frac{R}{d} = f\left(\frac{W^{7/24}}{\sigma^{1/6} K^{1/8} d}\right) \quad (2.23)$$

Si se representa (R/d) en función de $(W^{7/24}/d)$ se observa que esta relación ajusta mejor los resultados experimentales y se puede simplificar aproximadamente mediante dos líneas rectas, una línea de pendiente moderada para $(W^{7/24}/d) > 0.3$ y una línea muy inclinada para $(W^{7/24}/d) < 0.3$. En la zona $(W^{7/24}/d) < 0.3$, el radio escalado del cráter es sensible a pequeños cambios en el parámetro independiente, mientras que las condiciones experimentales están mejor condicionadas en la región $(W^{7/24}/d) > 0.3$. Se puede demostrar que el volumen normalizado y la profundidad del cráter escalan muy bien como funciones de $(W^{7/24}/d)$.

Se deduce que el peso específico (ρg) es la mejor medida para K y que (ρc^2) es la mejor medida para σ , donde c es la velocidad de propagación de ondas de corte en el suelo. Si se representan los resultados experimentales en un gráfico (R/d) en función de $[W^{7/24}/(\rho^{7/24} c^{1/3} g^{1/8} d)]$ se puede ver que los resultados tienen muy poca variabilidad.

En el caso de explosiones al ras del suelo, *Kinney* y *Graham* (1985) presentan un estudio estadístico de alrededor de 200 explosiones superficiales accidentales de gran tamaño que muestran un coeficiente de variación de 30%. A partir de dichos resultados se llega a la siguiente ecuación empírica para el diámetro del cráter:

$$D(m) = 0.8[W(Kg)]^{1/3} \quad (2.24)$$

El EMRTC (*Energic Materials Research Center of the Mineralogical and Technologic Institute of New Mexico*) realizó determinaciones experimentales para investigar

la forma de controlar el poder explosivo. Por ejemplo, en un vídeo de difusión, se presenta un cráter de 3.8 m. de diámetro originado por 250 Kg de TNT.

No se tiene conocimiento sobre resultados de cráteres producidos por explosiones ubicadas por encima del nivel del suelo. Ensayos realizados con carga elevada sobre la superficie (*Ambrosini et al* (1998)), demuestran que el tamaño de los cráteres es significativamente menor que para los casos de cargas superficiales o enterradas para igual peso de explosivo.

Por otra parte, es de creciente importancia la utilización de explosivos para la determinación de frecuencias naturales de estructuras de grandes dimensiones y para la generación de sismos artificiales para ensayo de prototipos. *Kono et al* (1997) realizan un estudio de predicción y referencia sobre un modelo a escala 1/6 de un reactor tipo ABWR para verificar la factibilidad de estos tipos de ensayos. *Varpasuo* (1997) realiza una comparación en el dominio de la frecuencia entre los resultados numéricos y experimentales de la respuesta del reactor tipo VVER, considerando la interacción suelo estructura. *Katona et al* (1997) presentan un estudio comparativo entre valores de ensayo y computacionales obtenidos para un reactor VVER-440/213, con el fin de validar los conceptos de idealización para la modelación de estructuras y del suelo.

CAPITULO 3***ANALISIS EXPERIMENTAL*****3.1. INTRODUCCION**

El presente trabajo de tesis se encuadra en una línea de investigación general del tema, y debido a la escasez de datos experimentales disponibles en la literatura, se hacía imprescindible contar con resultados propios confiables y que contuvieran la información necesaria para realizar análisis posteriores.

En el presente capítulo, se muestran una serie de resultados de ensayos sobre estructuras sencillas, de acero y de hormigón, y sobre el suelo, bajo la acción de cargas dinámicas impulsivas originadas por la detonación de cargas explosivas de distinto peso.

Se decidió comenzar los ensayos estructurales trabajando con un material de comportamiento conocido y de modelación sencilla, tal como el acero. Para ello, se realizó un estudio experimental, a escala real, sobre dos placas metálicas no rigidizadas con distintas condiciones de sustentación: una empotrada en el suelo y la otra empotrada en los cuatro bordes. Se muestran los registros de aceleración que se obtuvieron en distintos puntos de ambas placas y la presión generada por la onda explosiva en los puntos de ubicación de las mismas.

Por otro lado, se ensayó una placa de hormigón construida en el lugar y apoyada sobre el suelo. Se indican los resultados de los desplazamientos, luego de la detonación de cargas explosivas elevadas sobre la misma, de distinto peso.

Por último, se muestran los resultados obtenidos para la profundidad y los diámetros de los cráteres que se originaron a partir de la explosión de cargas apoyadas y elevadas sobre el suelo.

3.2. DESCRIPCION DEL ANALISIS EXPERIMENTAL

Los ensayos se realizaron en una finca privada, en las cercanías de la localidad de Las Cejas, distante 60 Km de la ciudad de San Miguel de Tucumán, dentro del territorio de la provincia de Tucumán. Es una zona plana, sin formaciones rocosas; normalmente destinada a la agricultura.

3.2.1. Estructuras metálicas

Como parte del programa de ensayos, se analizó la respuesta de dos placas metálicas no rigidizadas con diferentes condiciones de sustentación.

Se detonaron cuatro cargas explosivas apoyadas en el suelo, modificando el peso y la ubicación de las mismas respecto a las placas. En la Figura 3.1 se indica esquemáticamente la posición de cada uno de los explosivos, respecto a las placas metálicas.

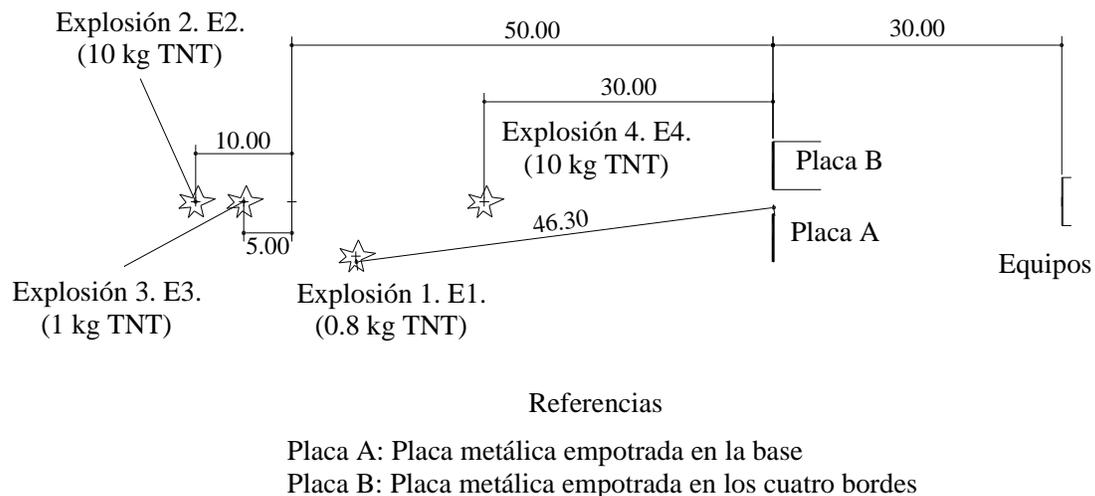


Figura 3.1. Esquema del ensayo de las placas metálicas.

En la Figura 3.2, se observa como se dispusieron las placas metálicas en el campo. También se muestra la ubicación de los sensores de presión respecto a las placas.



Figura 3.2. Vista general de la disposición de las placas metálicas.

En la Tabla 3.1, se indica el peso del explosivo utilizado en cada ensayo. Se detonaron cargas explosivas de Gelamón VF80 con una equivalencia en valor fuerza de 0.8 de TNT (*Fábrica Militar de Pólvoras y Explosivos "Villa María"* (1995), *Formby y Wharton* (1996)).

Ensayo	Gelamón (Kg)	TNT (Kg)
E1	1.00	0.80
E2	12.50	10.00
E3	1.25	1.00
E4	12.50	10.00

Tabla 3.1. Peso de explosivo detonado en cada ensayo.

3.2.1.1. Placa metálica empotrada en la base (Placa A)

La placa se empotró en su parte inferior a una base de hormigón de 1.2 x 1.0 x 0.4 m. Las dimensiones de la misma eran 1.0 x 1.5 m. y 2,1 mm. de espesor. En la Figura 3.3 se observa un esquema de la misma, y con 1, 2 y 3 se indican las posiciones donde se ubicaron los acelerómetros durante los ensayos.

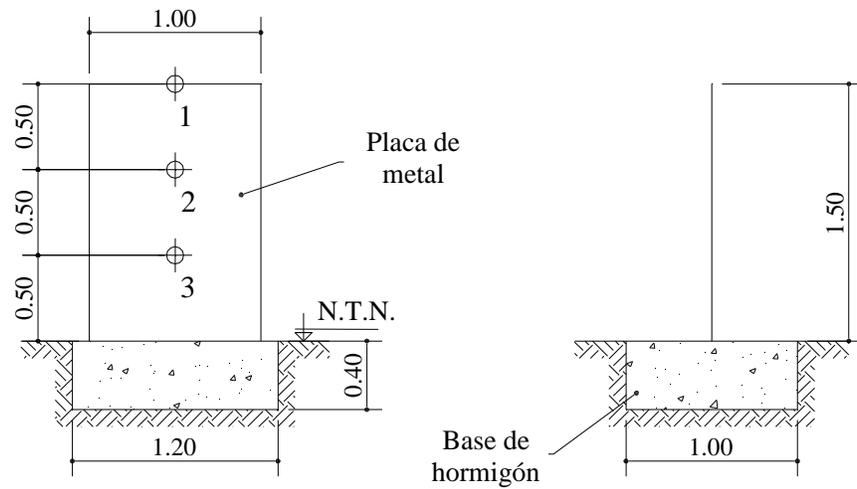


Figura 3.3. Esquema de la Placa A.

En la siguiente fotografía se observa la disposición de los acelerómetros en la Placa A y la caja que contiene a los amplificadores de deformación dinámica.

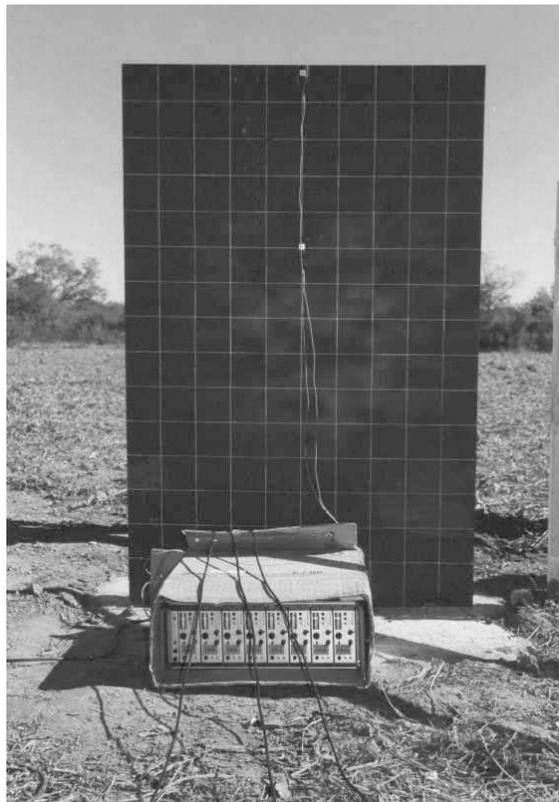


Figura 3.4. Disposición de los acelerómetros y del amplificador.

3.2.1.2. Placa metálica empotrada en los cuatro bordes (Placa B)

La placa se sujetó en los cuatro bordes a un marco metálico construido con perfiles normales INP 100, el cual se fijó al suelo por medio de bases de hormigón como se indica en la Figura 3.5. Para fijar la placa al marco, se utilizaron bulones y un contramarco. Las dimensiones de la misma eran 0.95 x 0.95 m. y 0.9 mm. de espesor. Para el ensayo se ubicó el acelerómetro en el centro de la placa.

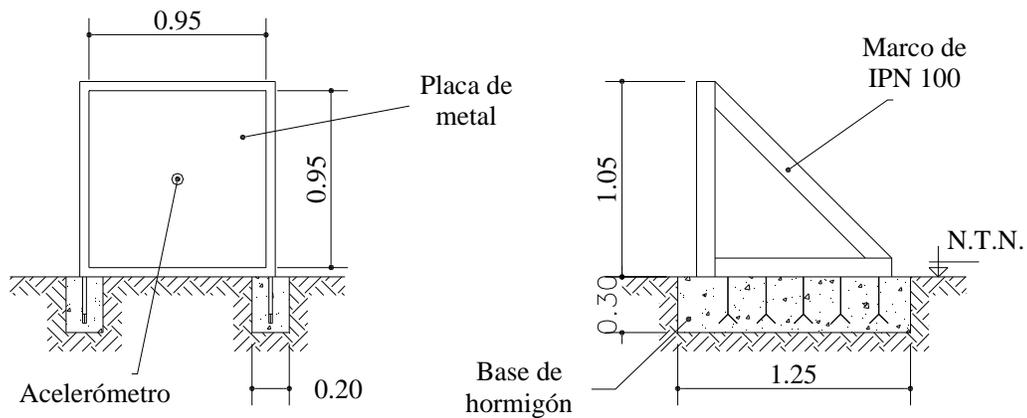


Figura 3.5. Esquema de la Placa B.

La Figura 3.6 muestra el marco de sujeción de la placa B (izquierda), y la disposición del acelerómetro y del sensor de presión S4 (derecha).

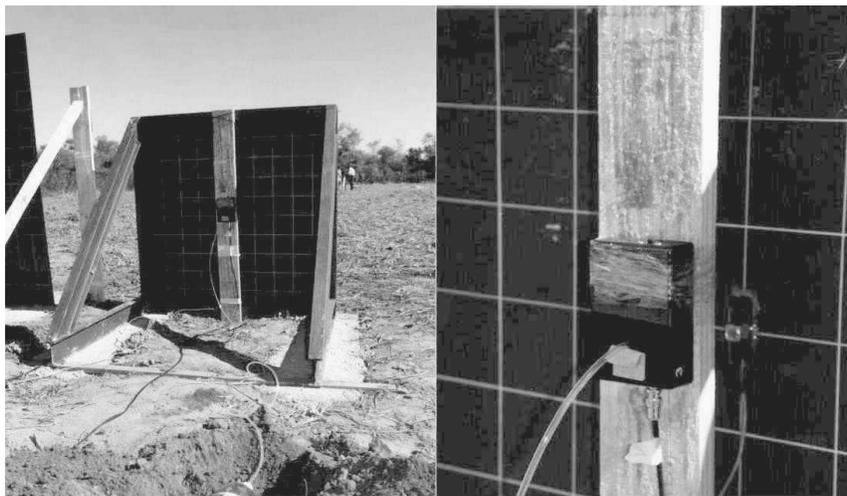


Figura 3.6. Marco de sujeción de la Placa B. Disposición del acelerómetro y del sensor S4.

3.2.2. Estructura de hormigón

La estructura de hormigón ensayada fue una placa de 3.0 x 1.5 m. y 0.15m. de espesor. Tenía una armadura constructiva, formada por una malla de hierros de 4.2 mm. de diámetro cada 0.15 m., ubicada a 0.05m desde el suelo. La resistencia promedio del hormigón usado para construirla fue 25 MPa (Figura 3.7).

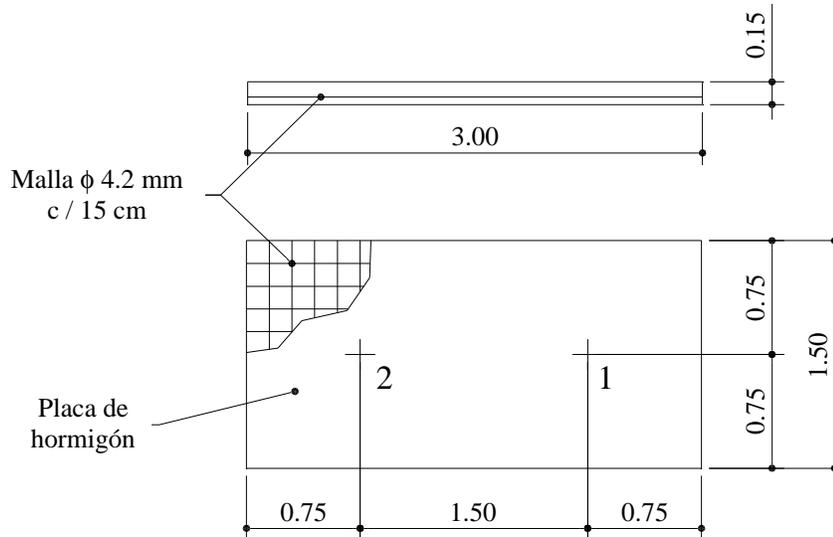


Figura 3.7. Esquema de la placa de hormigón.

Las cargas explosivas se ubicaron en las posiciones indicadas como 1 y 2 en la figura anterior. En la Tabla 3.2 se indica el peso de Gelamón VF80 detonado en cada caso.

Posición	Gelamón (Kg)	TNT (Kg)
1	6.25	5.00
2	12.5	10.00

Tabla 3.2. Peso de explosivo detonado en cada posición.

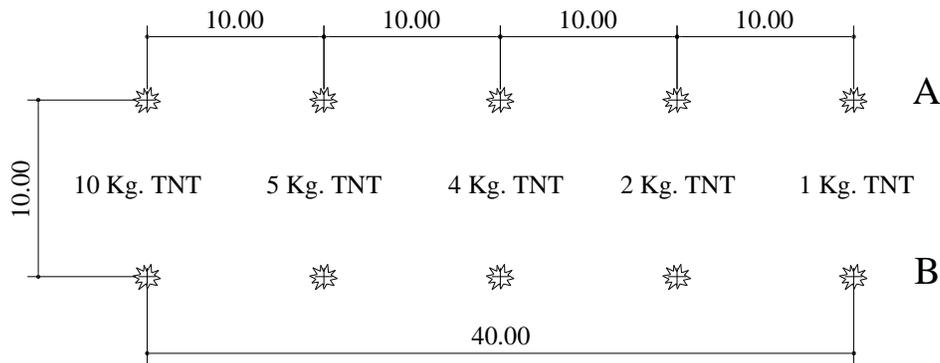
Las cargas se suspendieron a 0.50 m sobre el nivel de la losa mediante trípodes contruidos con de listones de madera de 1" x 1". En la Figura 3.8 se muestra el momento en el cual se preparaba el explosivo de 6.25 Kg.



Figura 3.8. Disposición de la carga explosiva sobre la losa.

3.2.3. Suelos

Los ensayos se desarrollaron en un área de 10 x 40 m, sobre la que se armó una grilla de 10 puntos donde se colocaron los explosivos. En la Figura 3.9 se muestra un croquis con la ubicación de los mismos.



Referencias

- A: Apoyado en el suelo
- B: Elevado 0.50 m. sobre el suelo

Figura 3.9. Disposición de los explosivos para el ensayo de medición de cráteres.

Para la identificación de cada ensayo se le asignó una letra, seguida de un número. La letra **A** indicaba que se trataba de una carga apoyada en el suelo, mientras la **B** que estaba elevada 0.50 m. respecto del suelo. Para lograr la separación de la carga desde la superficie se

emplearon trípodes contruidos con listones de madera de 1" x 1". En la Tabla 3.3 se indica el peso de Gelamón VF80 y el equivalente de TNT, que corresponde a cada número utilizado.

Número	Gelamón (Kg)	TNT (Kg)
1	1.25	1.00
2	2.50	2.00
4	5.00	4.00
7	8.75	7.00
10	12.50	10.00

Tabla 3.3. Correspondencia número-peso de Gelamón VF80.

Por ejemplo, **A4** indica que se trataba de una carga apoyada en el suelo de 5 Kg de Gelamón VF80, lo que equivale a 4 Kg de TNT.

3.3. SISTEMA DE REGISTRO

El sistema de medición utilizado en este análisis consistió básicamente de transductores de presión y acelerómetros. Los distintos tipos de sensores que constituyen el registro se escogieron en función de los cálculos numéricos previos, de donde se determinó el orden de magnitudes a medir.

La Figura 3.10 es un esquema sencillo donde se indica la forma en que se conectaron los distintos dispositivos durante el ensayo.

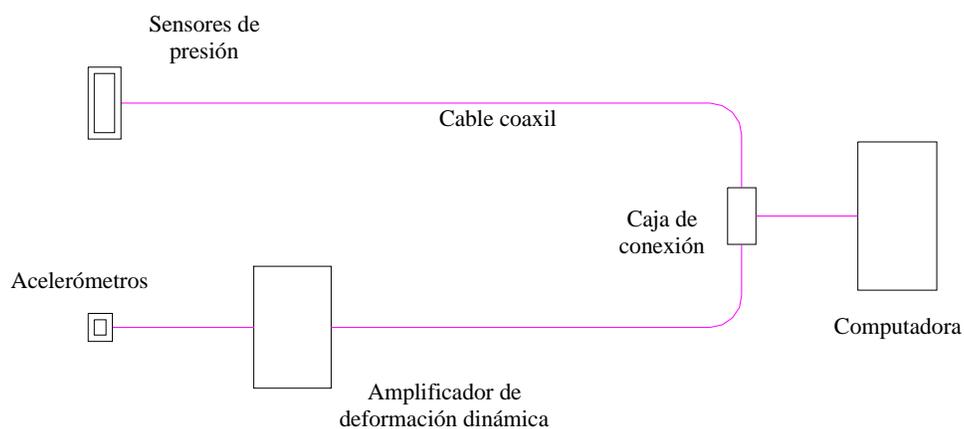


Figura 3.10. Esquema de conexión de los dispositivos de registro.

Para el registro de la aceleración se utilizaron acelerómetros marca KYOWA, tipo AS-GB de 5 G y 10 G. Los mismos se montaron sobre las placas metálicas usando cemento de contacto. El acelerómetro entrega una señal en tensión que se transforma en aceleración por medio de un coeficiente de calibración (KYOWA (1986)).

Cada acelerómetro se conectó a un amplificador de deformación dinámica KYOWA, modelo DPM-612B. El amplificador posee un sistema de autobalance y un filtro pasa-bajo para eliminar el rango de frecuencias que no se desee de la onda que se está registrando. Posee un sistema para ajuste de la sensibilidad de 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, x 100 $\mu\epsilon$ y OFF (KYOWA (1986)). La señal amplificada se condujo a través de un cable BNC hasta una caja de conexión (Figura 3.10).

Los sensores de presión 180PC son de tipo diferencial, marca Honeywell. La salida diferencial a escala full es de 5 V. Los sensores se conectaron por cable coaxial a una caja de conexión y desde ésta, a la placa de adquisición propiamente dicha. Estos entregan una salida en voltaje, proporcional a la presión aplicada. Poseen un canal activo, que registra la sobrepresión, y otro pasivo, que se conecta a una presión de referencia (Honeywell (1998)).

Los datos se registraron a través de una placa diferencial de control y adquisición de datos de 8 canales PCM-DAS16D/16, marca ComputerBoards. A operación normal consume 5V, tiene una resolución de 16 bit, un tiempo de conversión máximo de 10 μs (100 KHz) (ComputerBoards (1995)).

Esta placa estaba instalada en una computadora portátil marca Toshiba. El programa de adquisición de datos se desarrolló usando el lenguaje HP VEE 5.0 (Hewlett-Packard (1998)).

3.4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.4.1. Estructuras metálicas

El día del ensayo, se realizó el cableado y la colocación de los sensores en el lugar previsto. Se utilizaron 3 acelerómetros y 4 sensores de presión. Estos últimos se dispusieron según la Figura 3.11. Se efectuaron los ajustes necesarios en los equipos y se comenzaron a realizar los experimentos.

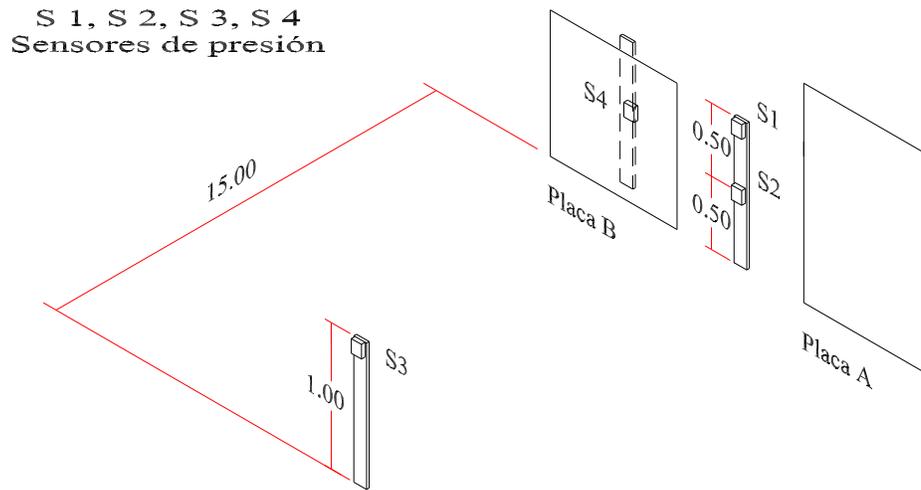


Figura 3.11. Disposición de los sensores de presión.

3.4.1.1. Frecuencias naturales

Antes de comenzar los ensayos con cargas explosivas, se realizó un ensayo de vibraciones libres con el fin de determinar los valores de las frecuencias naturales de ambas placas de acero. En la Tabla 3.4 se muestran los valores registrados.

Modo	Frecuencias (Hz)	
	Placa A	Placa B
1	0.6	6.1
2	1.2	29.5
3	4.8	38.8
4	6.0	54.1
5	20.7	72.3

Tabla 3.4. Registros experimentales de frecuencias modales.

3.4.1.2. Registros experimentales de presión reflejada

La Figura 3.12 corresponde a la detonación de la carga explosiva de 0.8 Kg de TNT.



Figura 3.12. Explosión de la carga de 0.8 Kg de TNT.

Para obtener la presión de referencia, cada sensor de presión se conectó a un recipiente cerrado. El equipo de registro de datos se activaba unos segundos antes de la detonación, debido al retardo que se producía en la respuesta de la computadora.

En las Figuras 3.13, se muestran los registros de presión reflejada del Ensayo 1, correspondientes a cada uno de los sensores de presión.

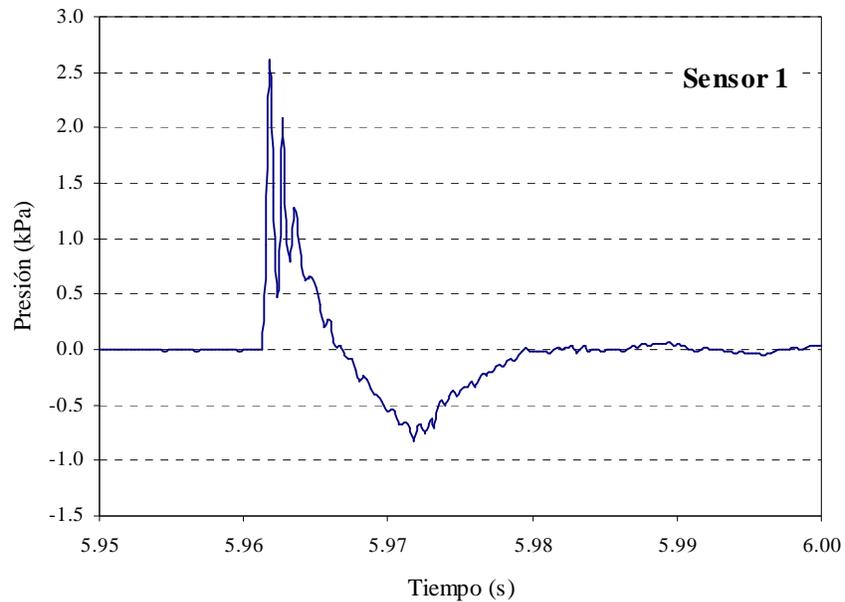


Figura 3.13a. Registro de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 1.

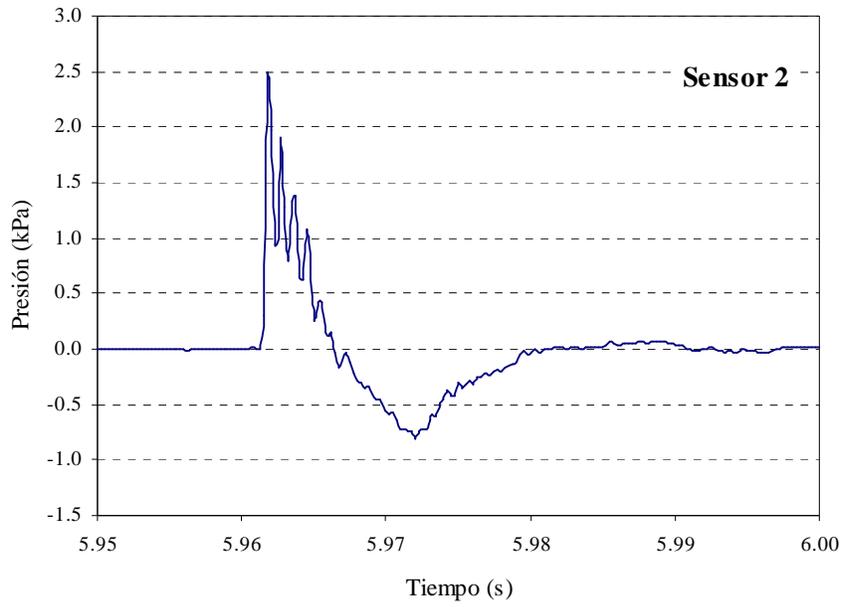


Figura 3.13b. Registro de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 1.

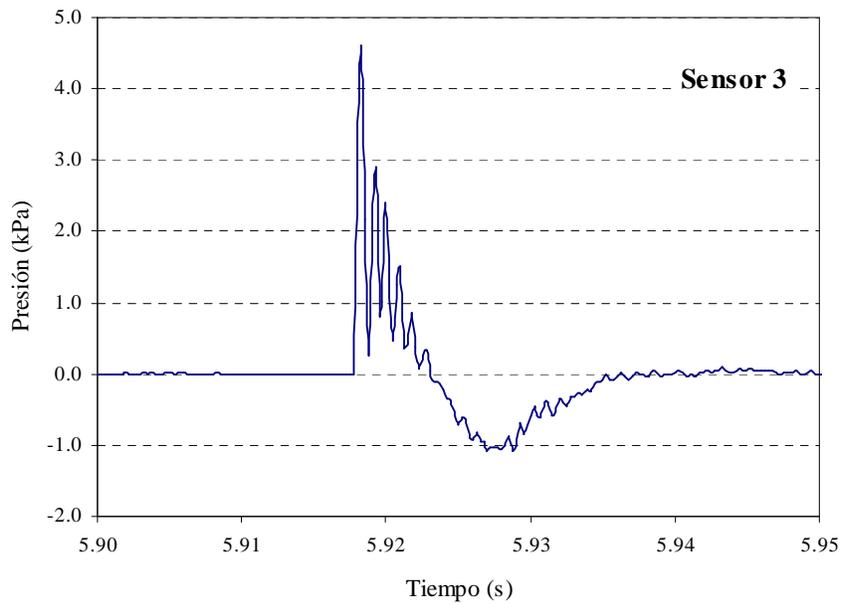


Figura 3.13c. Registro de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 1.

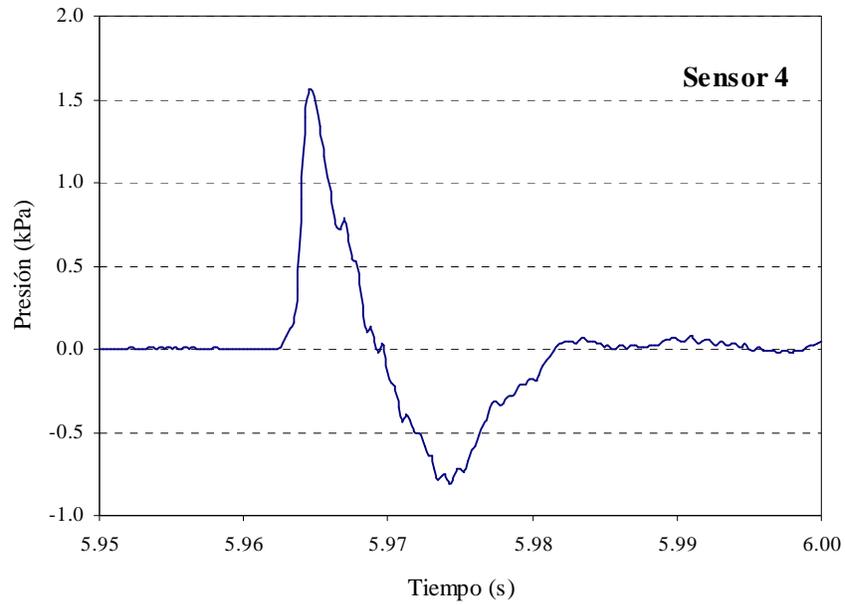


Figura 3.13d. Registro de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 1.

Las Figuras 3.14 contienen las mediciones experimentales de presión reflejada para cada sensor, correspondientes al Ensayo 2.

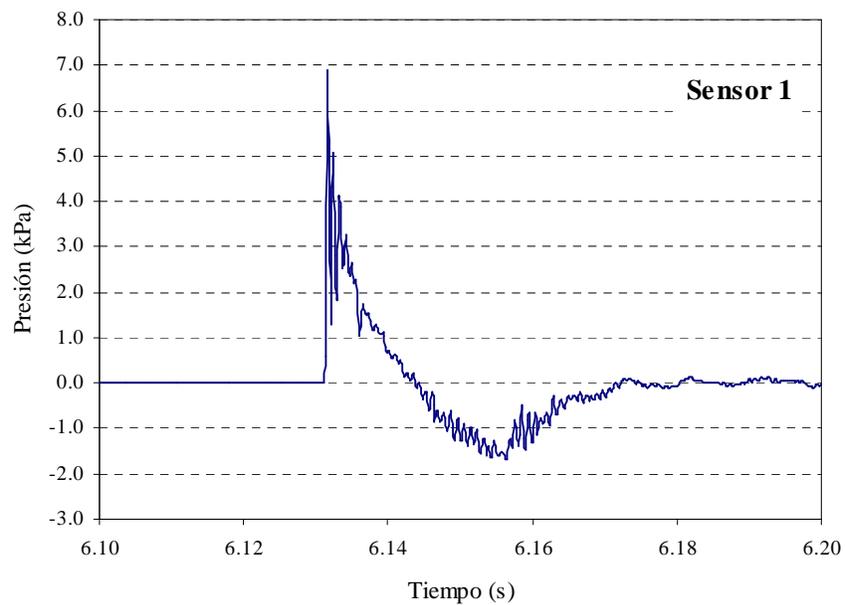


Figura 3.14a. Registros de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 2.

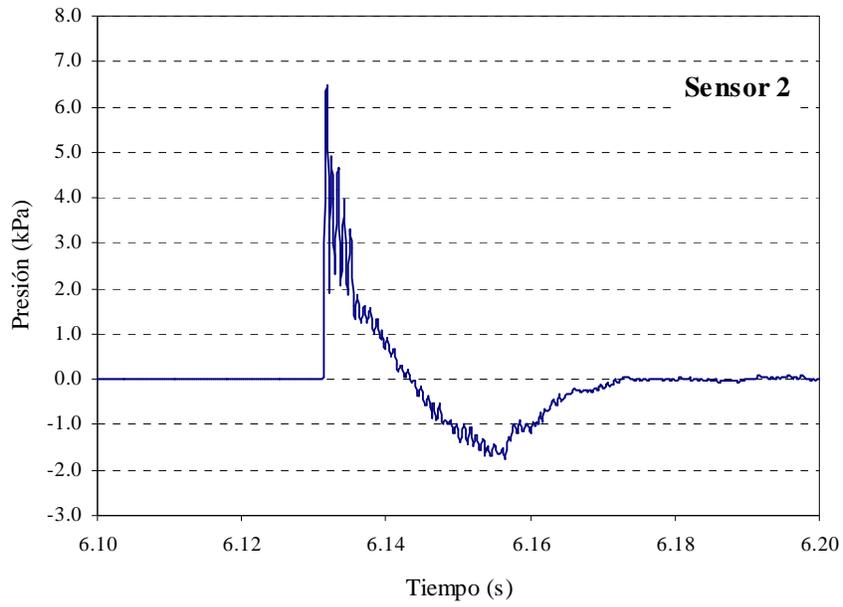


Figura 3.14b. Registros de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 2.

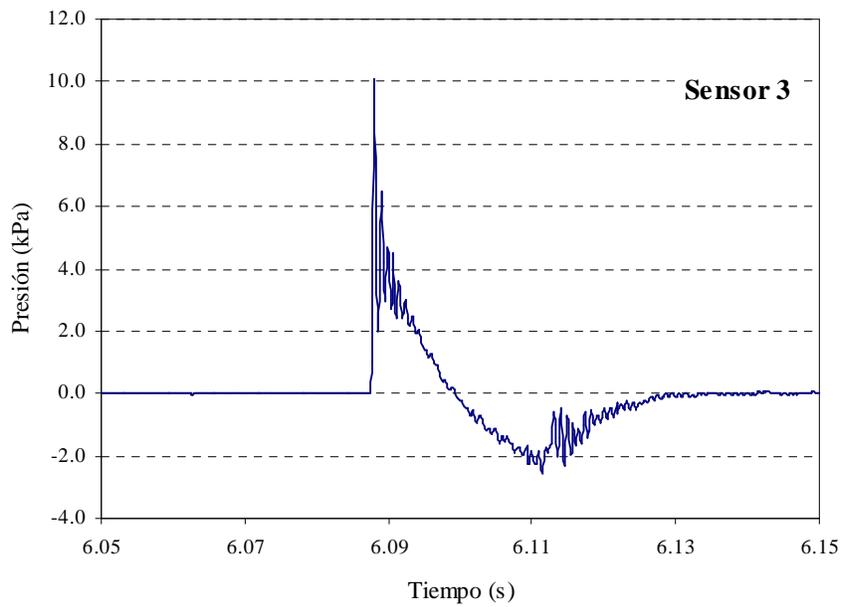


Figura 3.14c. Registros de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 2.

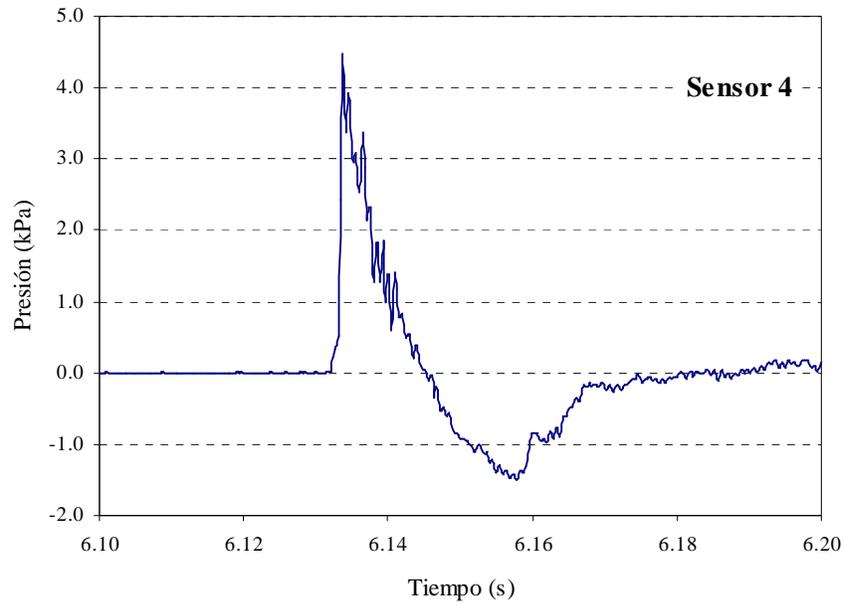


Figura 3.14d. Registros de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 2.

En las Figuras 3.15, se observan los valores de presión reflejada para el Ensayo 3, registrados en cada sensor de presión.

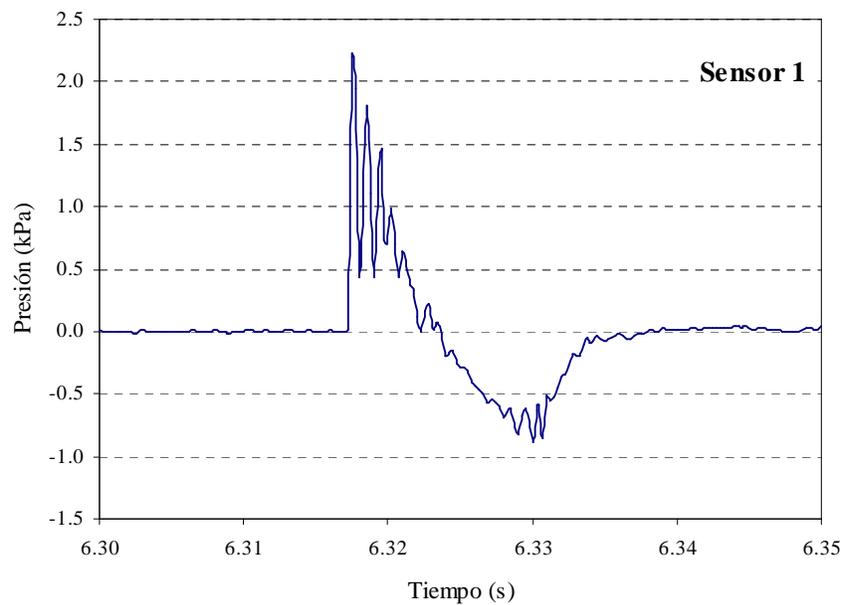


Figura 3.15a. Registros de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 3.

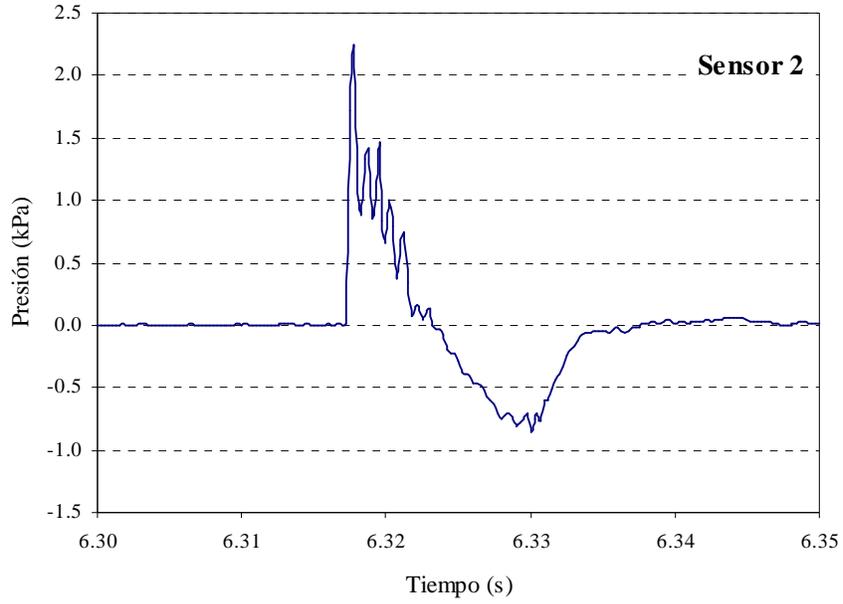


Figura 3.15b. Registros de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 3.

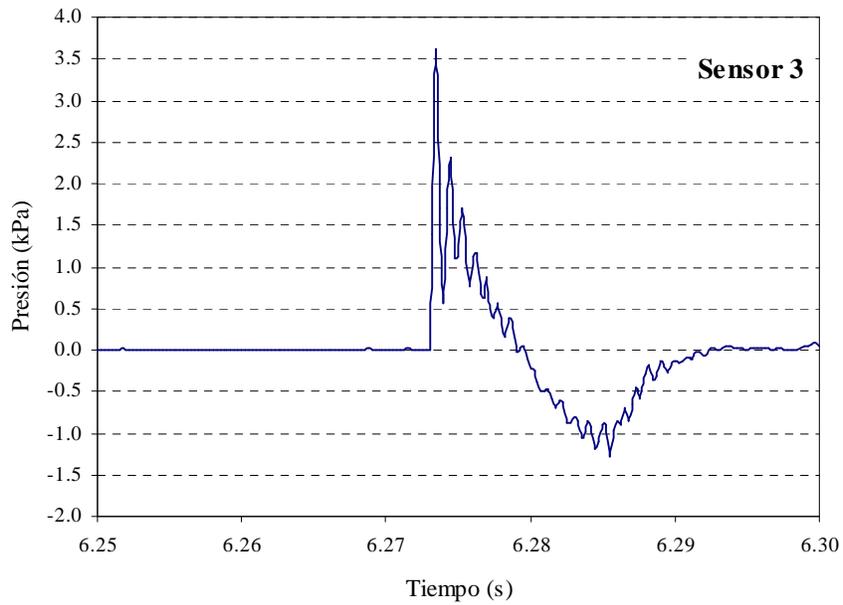


Figura 3.15c. Registros de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 3.

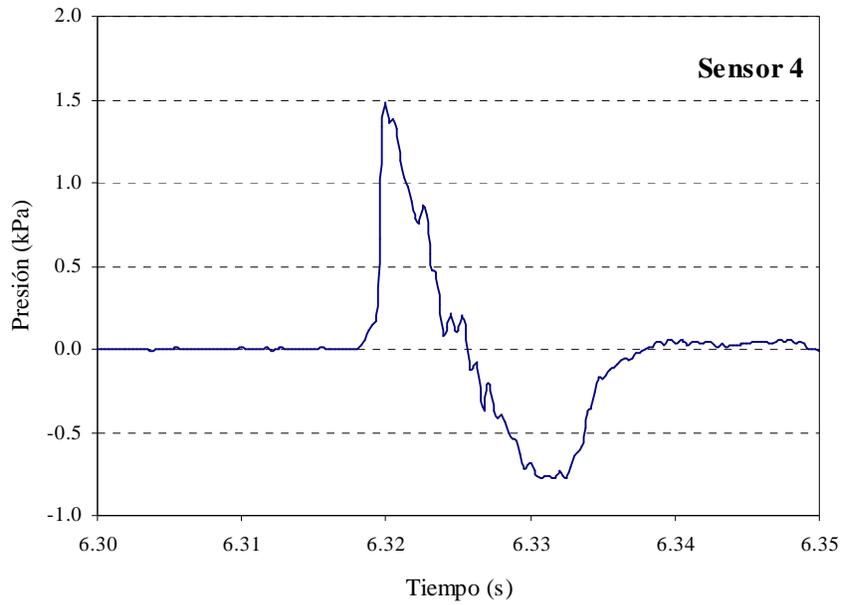


Figura 3.15d. Registros de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 3.

En la siguiente figura se indica la disposición de los sensores de presión para el Ensayo 4.

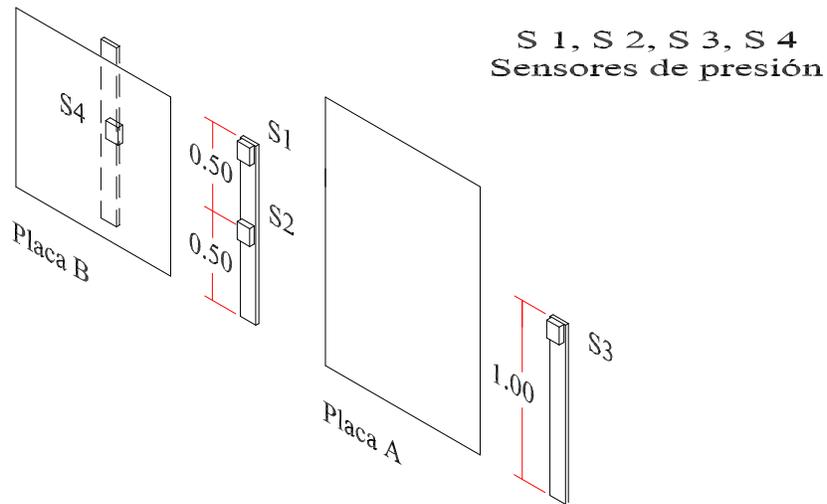


Figura 3.16. Disposición de los sensores en el Ensayo 4.

La Figura 3.17 muestra, para cada sensor, la presión reflejada que se midió en el Ensayo 4.

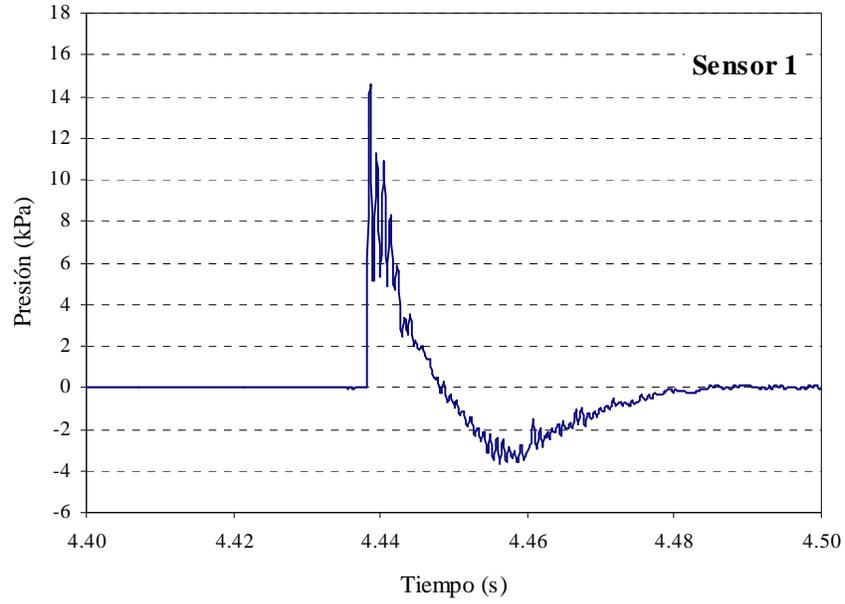


Figura 3.17a. Registros de presión reflejada. Sensor 1. Ensayo 4.

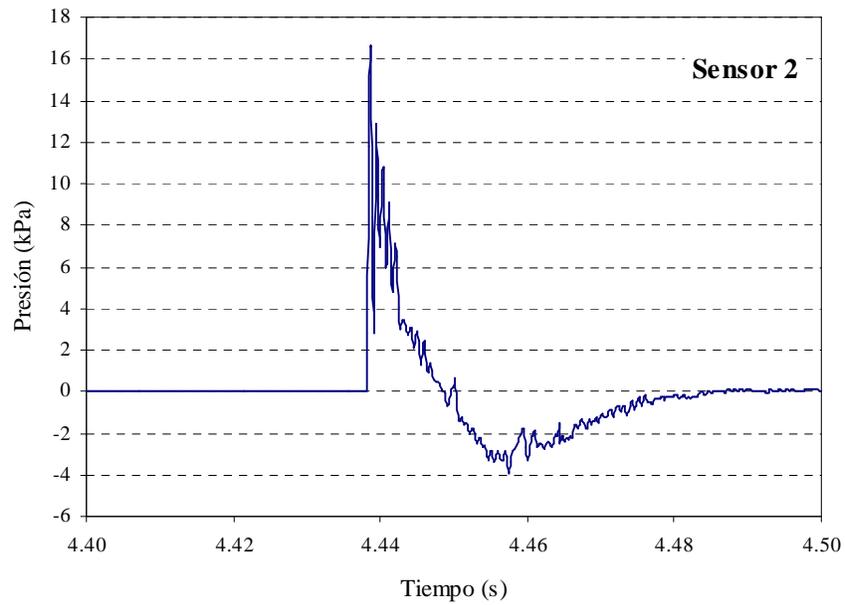


Figura 3.17b. Registros de presión reflejada. Sensor 2. Ensayo 4.

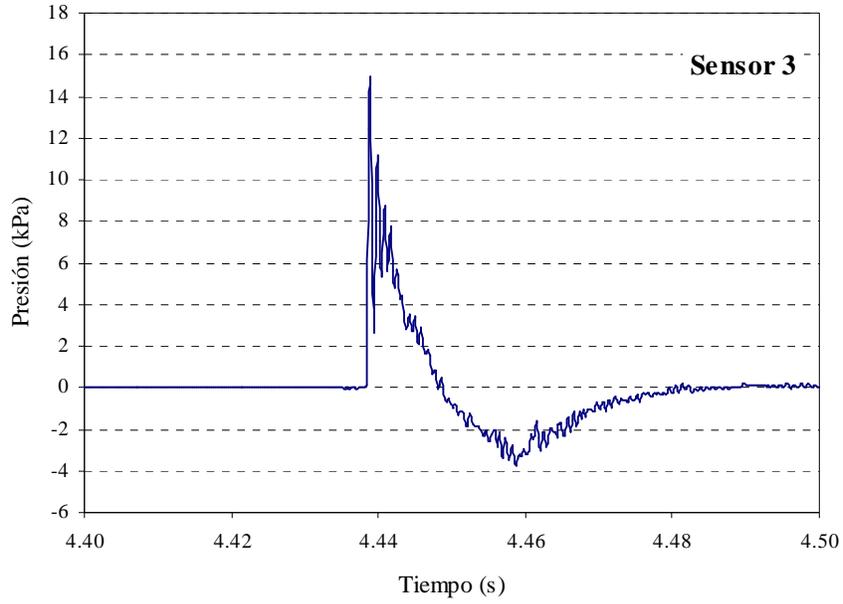


Figura 3.17c. Registros de presión reflejada. Sensor 3. Ensayo 4.

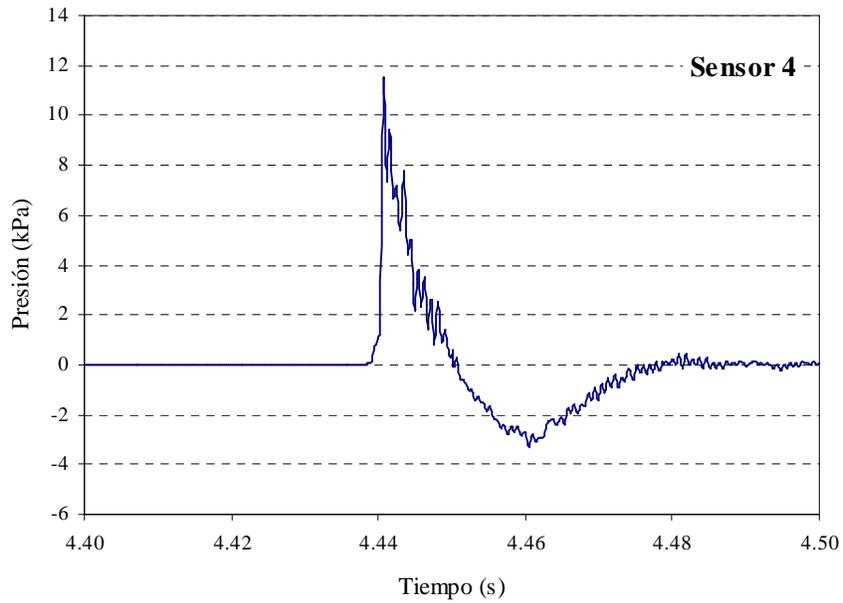


Figura 3.17d. Registros de presión reflejada. Sensor 4. Ensayo 4.

En todos los registros de presión correspondientes al Sensor 4, se observa que la onda de presión se muestra algo diferente a la forma de una onda ideal de presión originada por explosivos. Esto se debe, como se explicó en el punto 2.2.1., a que le toma un tiempo a la onda de presión moverse hacia abajo y completar el proceso de difracción.

La Tabla 3.5 contiene el valor pico de presión reflejada correspondiente a cada ensayo y a cada uno de los sensores.

Ensayo	Pico de presión reflejada (kPa)			
	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4
E1	2.62	2.43	4.60	1.56
E2	6.80	6.46	10.02	4.43
E3	2.20	2.25	3.62	1.49
E4	14.51	16.58	14.83	11.43

Tabla 3.5. Valores pico de presión reflejada en los sensores.

3.4.1.3. Registros experimentales de aceleración

Las Figuras 3.18 muestran los registros de aceleración para la Placa A, correspondientes al Ensayo 1. En la Figura 3.3 se indica la posición de cada acelerómetro en la placa.

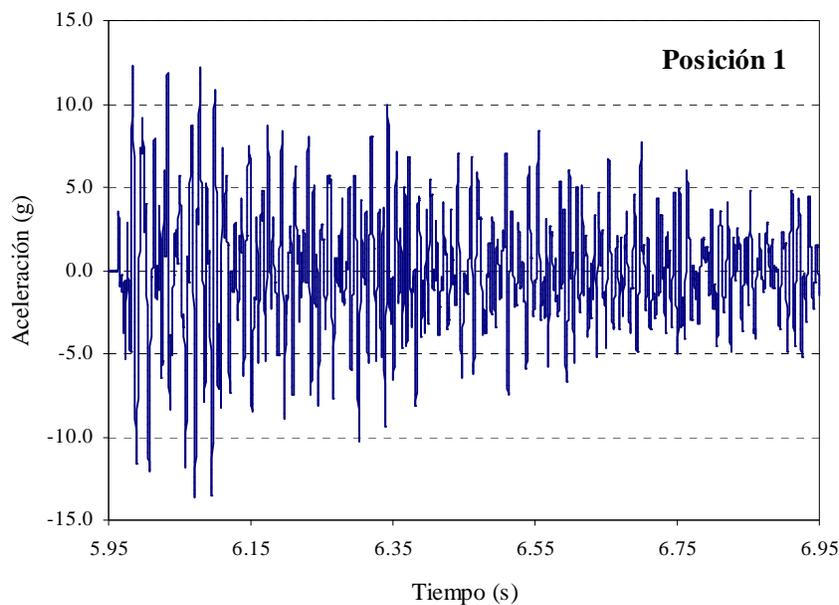


Figura 3.18a. Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 1.

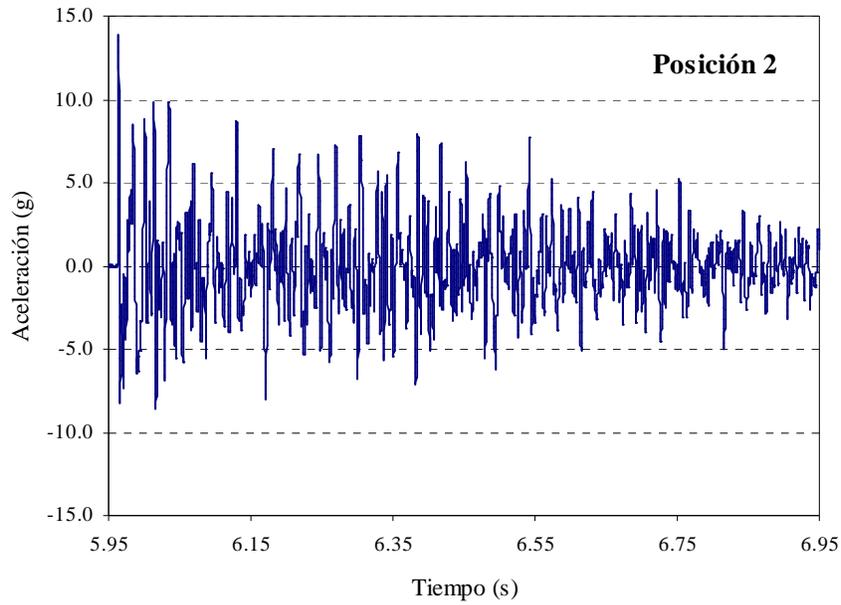


Figura 3.18b. Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 1

En la Figura 3.19, se han superpuesto las curvas de aceleración correspondientes a la Posición 1 y 2 de la Placa A.

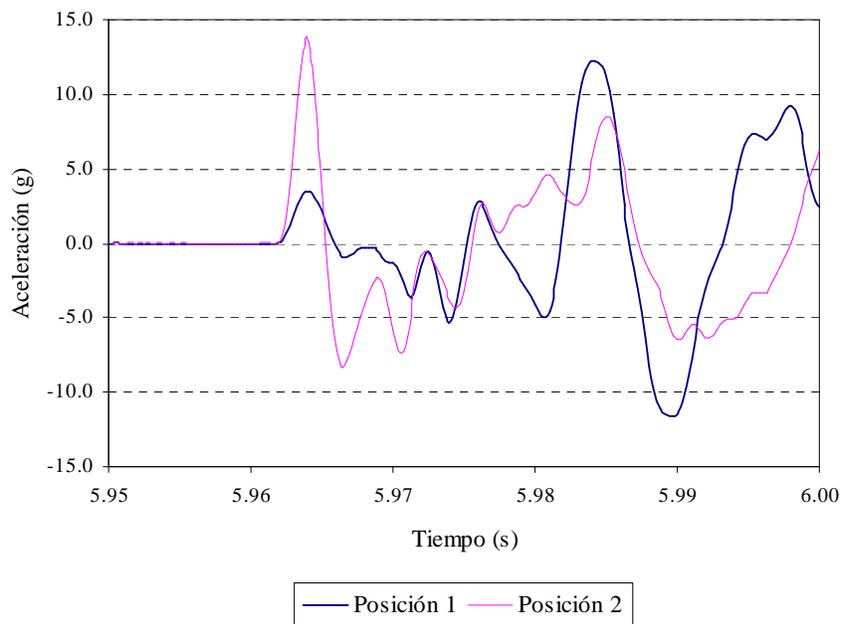


Figura 3.19. Registros de aceleración. Posición 1 y 2. Placa A. Ensayo 1.

Se observa en el gráfico anterior, que si bien los dos acelerómetros registraron señal de aceleración al mismo tiempo, el acelerómetro ubicado en la Posición 2 captó el pico, mientras que en el acelerómetro de la Posición 1 se captó primero una vibración menor y luego el valor pico de aceleración.

Se registró también la aceleración en el centro de la Placa B para el Ensayo 1. Los valores se indican en la Figura 3.20.

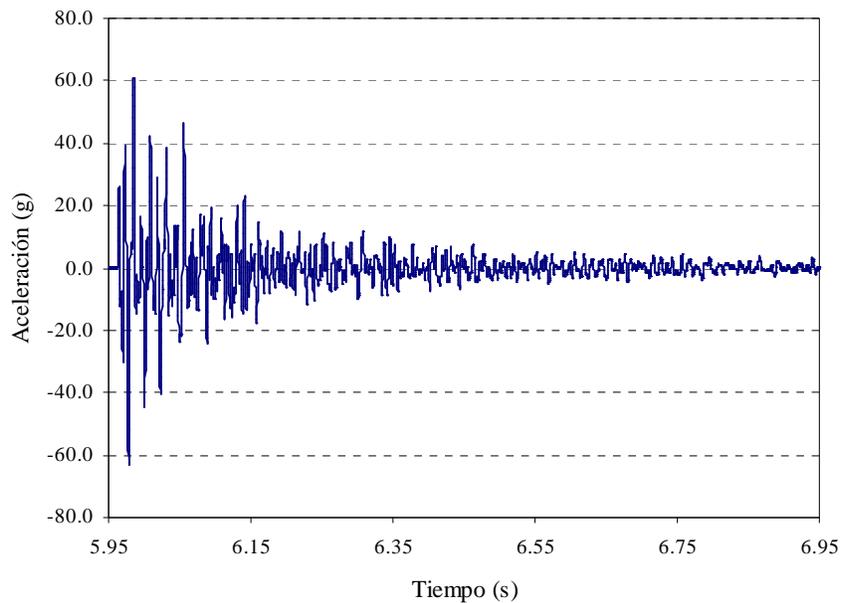


Figura 3.20. Registros de aceleración. Ensayo 1. Placa B.

Para los restantes ensayos, debido a que las predicciones numéricas indicaban que las magnitudes de aceleración en la Placa B eran muy altas, se decidió sólo registrar los valores de aceleración en la Placa A.

En las Figuras 3.21 se observan los valores de aceleración que se registraron durante el Ensayo 2.

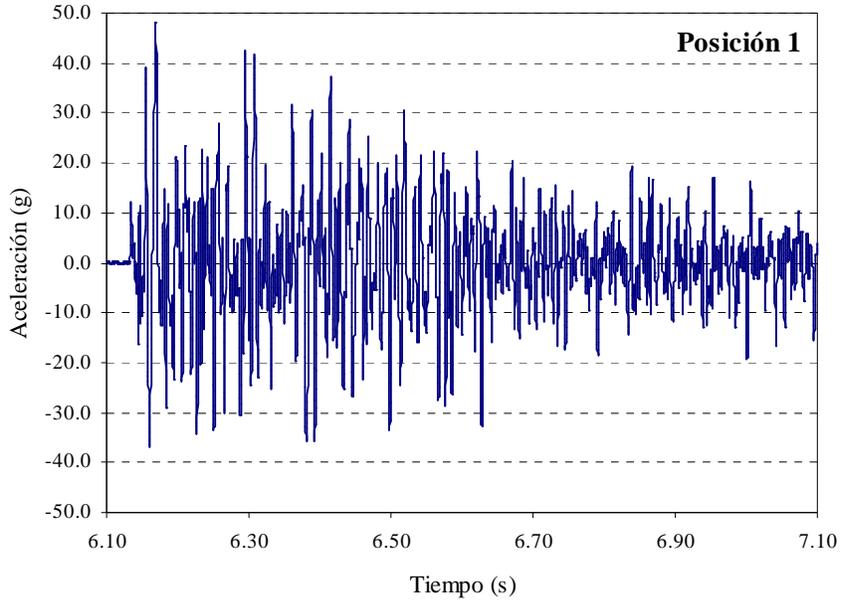


Figura 3.21a. Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 2.

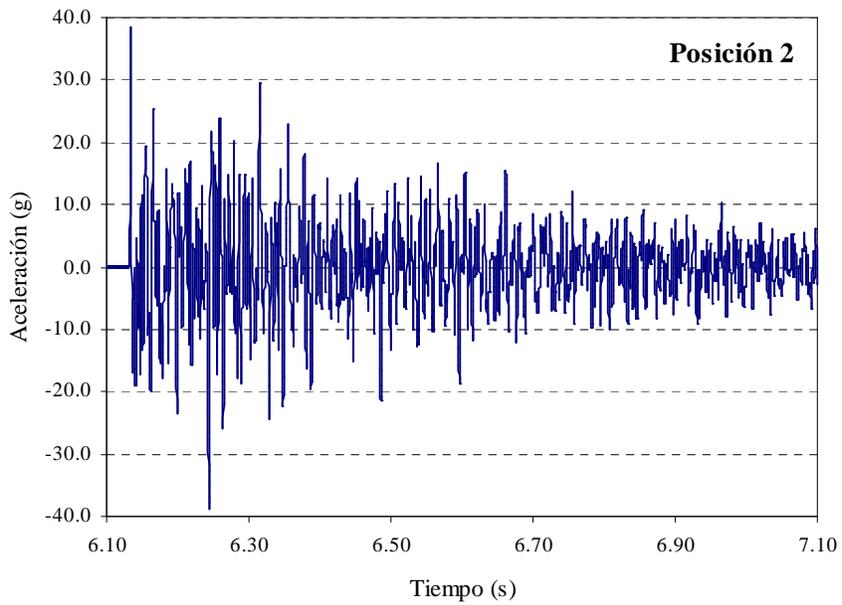


Figura 3.21b. Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 2.

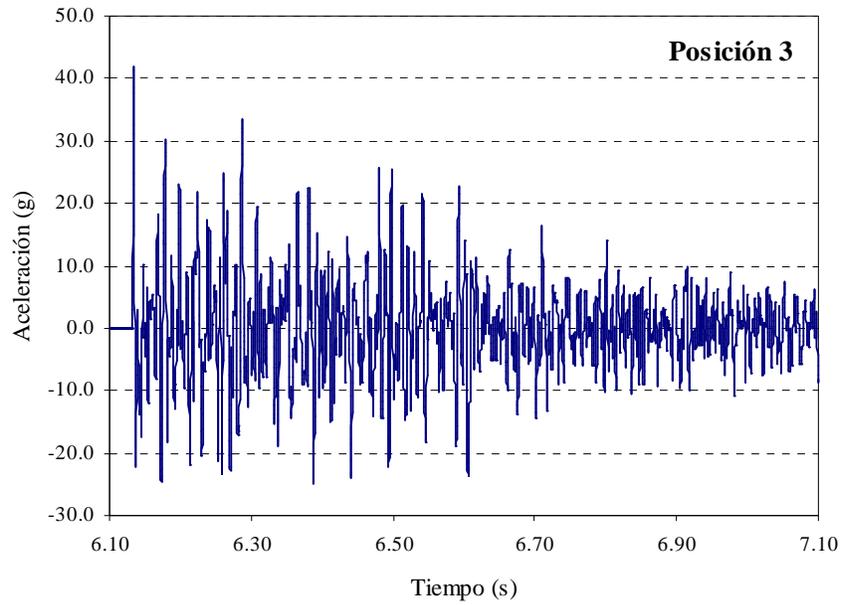


Figura 3.21c. Registros de aceleración. Posición 3. Placa A. Ensayo 2.

Las Figuras 3.22 muestran los valores de aceleración medidos en el Ensayo 3, para la Placa A.

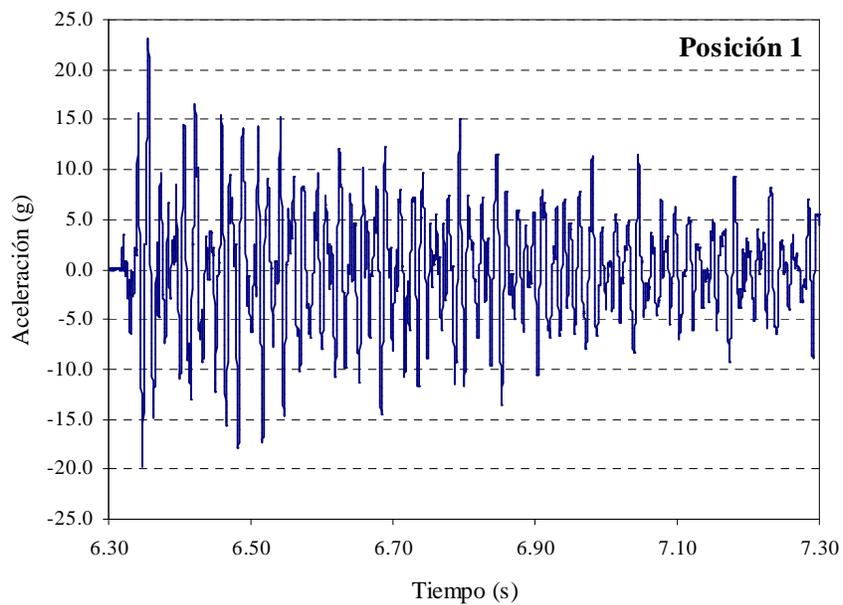


Figura 3.22a. Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 3.

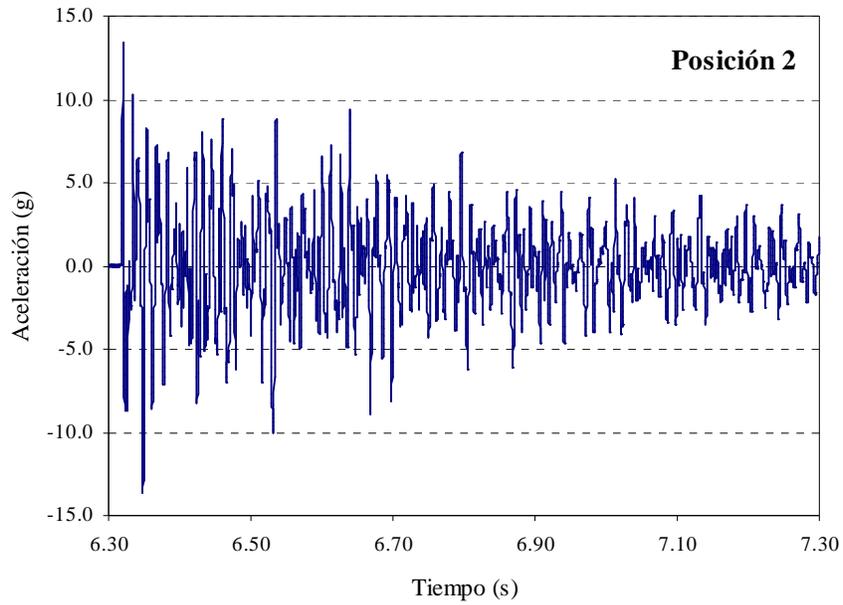


Figura 3.22b. Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 3.

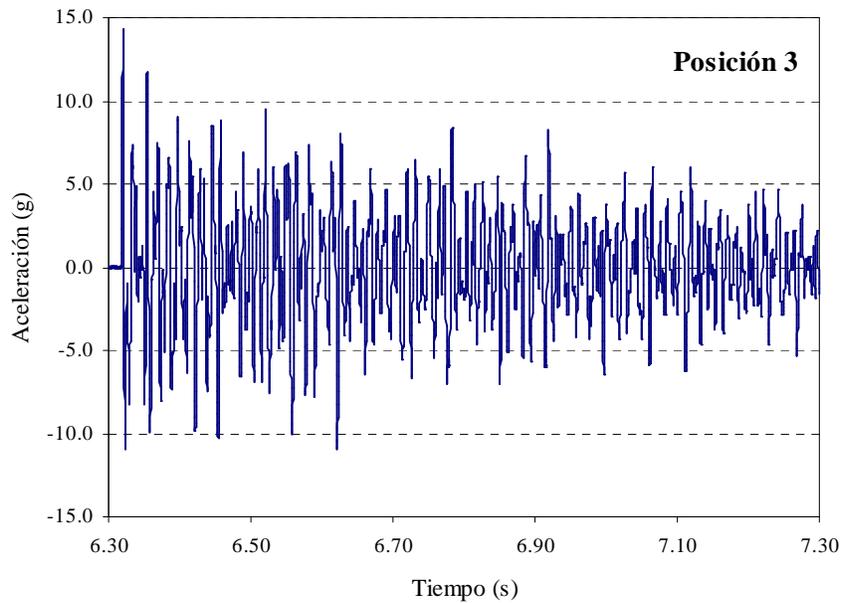


Figura 3.22c. Registros de aceleración. Posición 3. Placa A. Ensayo 3.

Como en el caso del Ensayo 1, se observa que para el Ensayo 2 y 3, los acelerómetros ubicados en la Posiciones 2 y 3 de la Placa A (Figura 3.3) registran el pico de aceleración inicial antes que el colocado en la Posición 1.

Los valores de aceleración para la Placa A, correspondientes al Ensayo 4, se observan en las Figuras 3.23. La curva registrada por el acelerómetro ubicado en la Posición 1, muestra el momento en el cual éste se despegó accidentalmente.

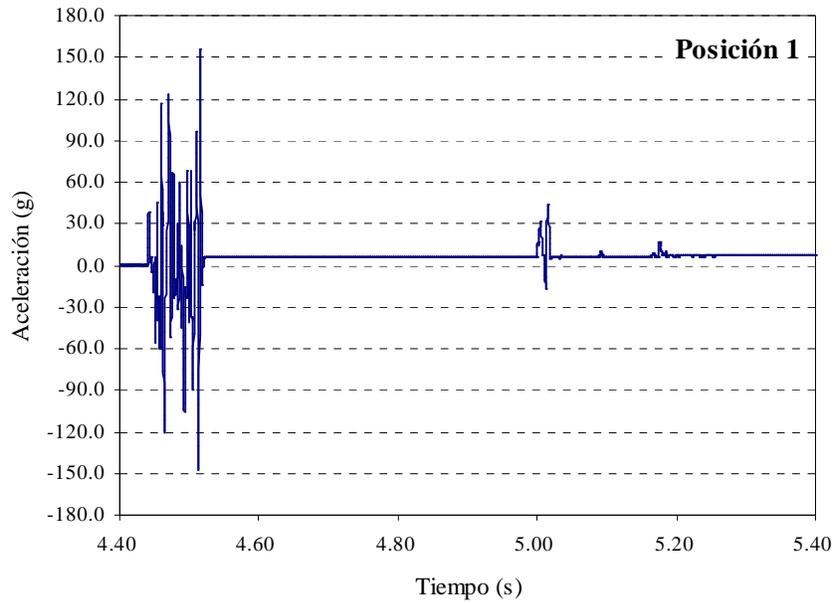


Figura 3.23a. Registros de aceleración. Posición 1. Placa A. Ensayo 4.

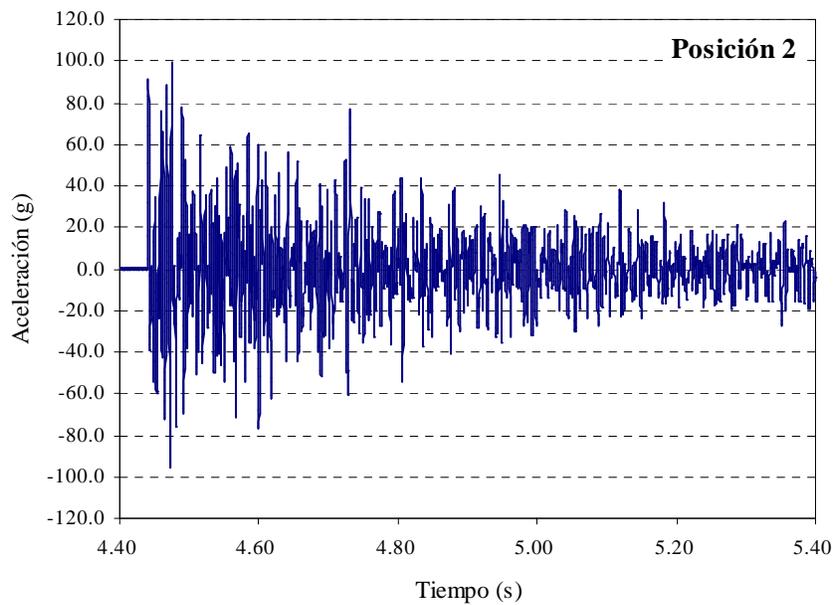


Figura 3.23b. Registros de aceleración. Posición 2. Placa A. Ensayo 4.

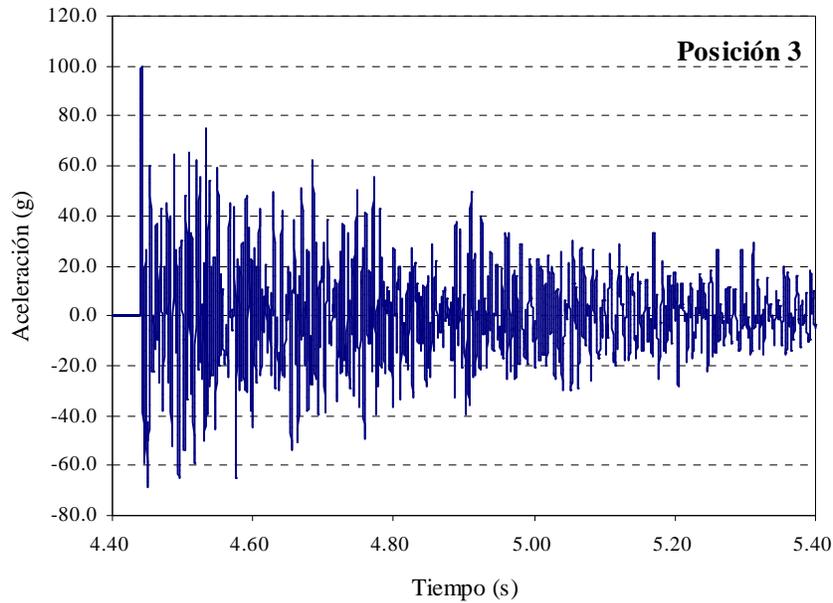


Figura 3.23c. Registros de aceleración. Posición 3. Placa A. Ensayo 4.

3.4.1.4. Determinación experimental del amortiguamiento

Se calculó el valor del coeficiente de amortiguamiento a utilizar para cada una de las placas, con el fin de contar con un valor adecuado para el mismo.

Se utilizaron los registros experimentales de aceleración para cada una de las placas y se aplicó el método del decremento logarítmico. El valor del coeficiente de amortiguamiento ξ está dado por (Clough y Penzien (1975)):

$$\xi = \frac{\ddot{v}_n - \ddot{v}_{n+m}}{2m\pi\ddot{v}_{n+m}} \quad (3.1)$$

donde \ddot{v}_n y \ddot{v}_{n+m} son los picos de aceleración en el tiempo t_n y t_{n+m} y m es el número de ciclos. En la siguiente tabla se indican los valores obtenidos.

Placa	ξ (%)
A	0.2
B	5.0

Tabla 3.6. Coeficientes de amortiguamiento experimentales.

La diferencia que se observa en un orden de magnitud entre los valores de los coeficientes de amortiguamiento experimentales, se puede explicar por en efecto del “amortiguamiento de contorno” (Woodhouse (1998)).

3.4.2. Estructura de hormigón

En la placa de hormigón, se midieron los desplazamientos en correspondencia con las posiciones donde se detonaron las cargas explosivas. Los mismos se indican en la Tabla 3.7.

Posición	Desplazamiento (cm)
1	2.5
2	5.3

Tabla 3.7. Desplazamientos de la placa de hormigón.

En la Figura 3.24 se puede observar el mapa de fisuras en la superficie de la losa luego que se produjeron las dos explosiones.

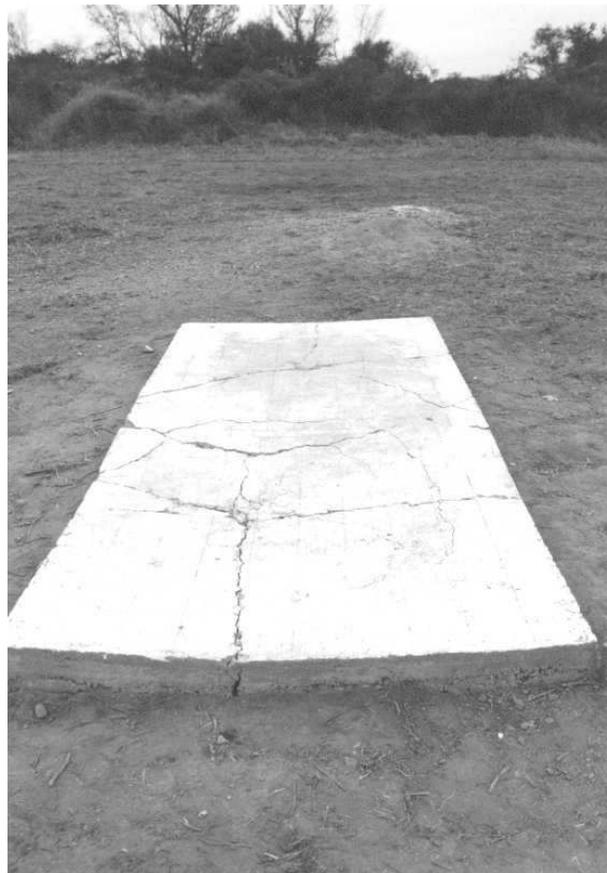


Figura 3.24. Aspecto de la placa de hormigón después de las explosiones.

3.4.3. Suelos

En este caso, el objetivo era determinar experimentalmente las dimensiones del cráter que se producía luego de la detonación de una carga explosiva.

3.4.3.1. Propiedades mecánicas del suelo

Para determinar las propiedades mecánicas del suelo, se extrajeron muestras en el área de ensayo. Por cada pozo se obtuvieron dos muestras, una a 0.30 m. y la otra a 0.60 m. de profundidad. Sobre éstas se realizaron los siguientes ensayos:

- Humedad natural
- Densidad seca
- Clasificación según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

En la Tabla 3.8, se observan los resultados promedio que se obtuvieron para las dos profundidades analizadas.

Profundidad (m)	Humedad natural (%)	Densidad seca (gr/cm ³)	Clasificación SUCS
0.30	20.1	2.45	OL
0.60	19.4	2.47	OL

Tabla 3.8. Propiedades mecánicas del suelo.

OL: Suelo orgánico de partículas finas (más del 50 % pasa el tamiz N° 200), con límite líquido menor que 50 e índice plástico menor a 4.

3.4.3.2. Resultados de los ensayos

Respecto a la medición de los cráteres es importante aclarar que:

- Se realizaron tres mediciones del diámetro aparente y tres del diámetro del cráter, según se indica en el esquema de la Figura 3.25.
- Se midió la profundidad en el centro y en los tercios, según un diámetro del cráter. Además se determinó Δh (Figura 3.25).

c) Para los casos B1y B2 no se produjo cráter. Para los restantes de esta serie (B4, B7, B10) el cráter no presentaba reborde en el perímetro.

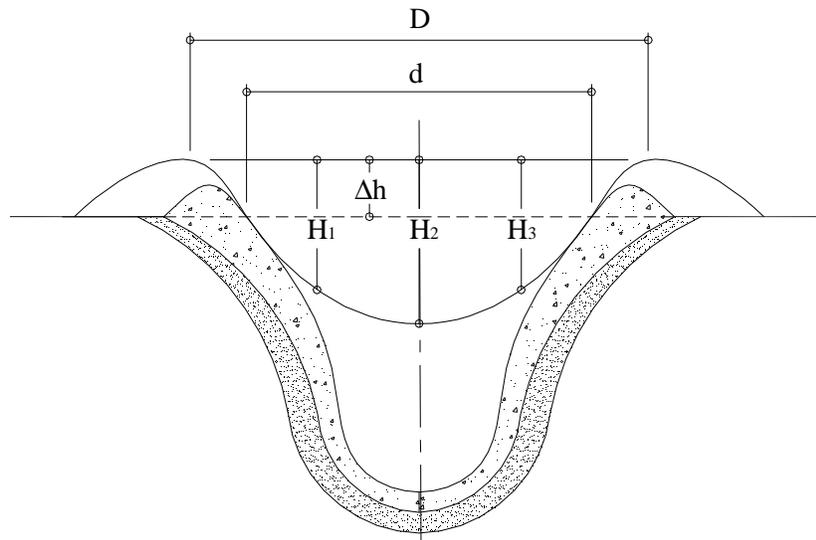


Figura 3.25. Dimensiones determinadas experimentalmente para el cráter.

En la siguiente fotografía se observa el momento en el que se está determinando el diámetro aparente de uno de los cráteres originado por una carga explosiva apoyada en el suelo.



Figura 3.26. Determinación del diámetro aparente del cráter.

En la Tabla 3.9, se muestran los valores medidos para el diámetro aparente (D) y para el diámetro (d) de los cráteres. El símbolo “-” indica que para ese ensayo no se formó cráter.

Ensayo (Código)	Diámetro Explosivo (cm)	Diámetro Aparente			Diámetro		
		D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	d1 (cm)	d2 (cm)	d3 (cm)
A1	10	120	100	100	50	40	50
B1	10	-	-	-	-	-	-
A2	15	130	130	130	65	65	65
B2	15	-	-	-	-	-	-
A4	20	150	150	150	95	87	90
B4	20	-	-	-	-	-	-
A7	25	210	180	170	110	110	105
B7	25	-	-	-	60	60	60
A10	30	190	210	200	130	120	120
B10	30	-	-	-	70	80	80

Tabla 3.9. Diámetros de los cráteres.

En la Tabla 3.10 se presentan los valores de las profundidades (H1, H2, H3) y de Δh (Figura 3.25).

Ensayo (Código)	Diámetro explosivo (cm)	Profundidad del cráter			Δh	
		H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Δh_1 (cm)	Δh_2 (cm)
A1	10	29	32	29	-	-
B1	10	-	-	-	-	-
A2	15	35	43	31	13	13
B2	15	-	-	-	-	-
A4	20	32	44	38	15	11
B4	20	8	13	10	-	-
A7	25	38	50	30	15	15
B7	25	6	8	6	-	-
A10	30	44	55	38	20	20
B10	30	11	17	11	-	-

Tabla 3.10. Profundidades de los cráteres.

3.4.3.3. Procesamiento de los datos

En la Tabla 3.11 se indican los valores promedio para los diámetros (D, d) y el valor de profundidad en el centro del cráter (H2).

Ensayo (código)	D (cm)	d (cm)	H ₂ (cm)
A1	106.7	46.7	32
B1	-	-	-
A2	130.0	65.0	43
B2	-	-	-
A4	150.0	90.7	44
B4	-	58.3	13
A7	186.7	108.3	50
B7	-	60.0	8
A10	200.0	123.3	55
B10	-	76.7	17

Tabla 3.11. Valores promedios de los diámetros y profundidad en el centro del cráter.

En la Figura 3.27, se grafican los valores de los diámetros medidos para las cargas apoyadas respecto al peso del explosivo detonado elevado a la potencia 1/3.

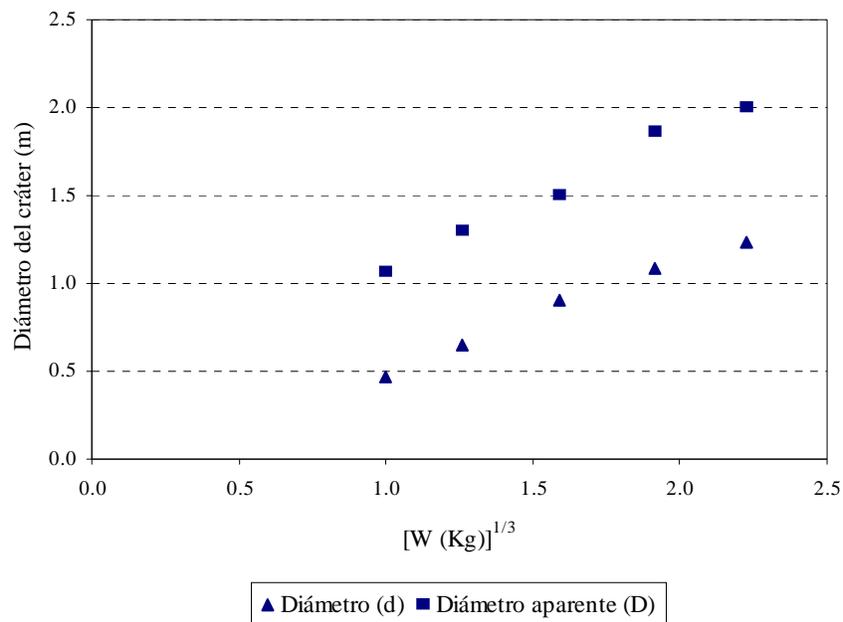


Figura 3.27. Diámetros experimentales vs. $[W \text{ (Kg)}]^{1/3}$

CAPITULO 4

ANALISIS NUMERICO

4.1. INTRODUCCION

Desde un punto de vista estricto, la mayoría de las estructuras deberían tratarse como sistemas estructurales continuos con infinitos grados de libertad y para conocer su comportamiento frente a la acción de cargas exteriores, sería necesario integrar las correspondientes ecuaciones diferenciales de equilibrio. Sin embargo, con frecuencia este tipo de análisis es difícil o imposible, debido a la geometría de la estructura, la naturaleza de las condiciones de contorno, la distribución de las propiedades mecánicas de los materiales, el tipo de cargas, etc., y en la práctica es necesario utilizar métodos más simplificados que permitan analizar la estructura de manera aproximada. El Método de Elementos Finitos es uno de los procedimientos que existen para aproximar el comportamiento de una estructura con infinitos grados de libertad por el de otra, con aproximadamente las mismas propiedades físicas y geométricas, pero con un número finito de grados de libertad, cuyas ecuaciones de equilibrio pueden expresarse por un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un número limitado de incógnitas (*Oñate (1995)*).

En el caso de análisis dinámicos, una técnica de resolución muy utilizada para sistemas lineales es el método de superposición modal, el cual se caracteriza fundamentalmente por su capacidad de representar el comportamiento dinámico de una estructura considerando unas pocas formas modales. Sin embargo, cuando las cargas son de tipo impulsivo excitan muchos modos de vibración y por lo tanto aumenta considerablemente el número de formas modales que se deben considerar en el análisis. En estos casos, por otra

parte, para obtener los esfuerzos máximos en la estructura es suficiente con evaluar un intervalo de tiempo pequeño, por lo que a veces resulta conveniente hacer una integración directa paso a paso en el tiempo, la cual se hace imprescindible cuando el sistema presenta algún tipo de no linealidad.

Uno de los objetivos del análisis numérico, fue realizar una predicción computacional del orden de las magnitudes a medir durante los ensayos, para determinar la ubicación de los sensores de presión y aceleración y las cargas a utilizar. Otro aspecto importante, era determinar cuáles son los parámetros que más influyen en la modelación teórico-numérica de las estructuras sometidas a cargas explosivas. Para ello se realizó un estudio numérico que reprodujera los ensayos experimentales llevados a cabo sobre las placas metálicas de acero descritas en el Capítulo 3. Se utilizó el Método de Elementos Finitos y se determinó la respuesta dinámica utilizando el método de superposición modal y el método de integración directa. Como acciones externas se consideraron, en este último caso, los registros experimentales de presión.

4.2. DESCRIPCION DEL ANALISIS NUMERICO

Para llevar a cabo el análisis numérico se utilizaron los programas de elementos finitos ABAQUS/Standard 5.7-3 (*ABAQUS/Standard, User's Manual (1997)*) y COSMOS/M 1.71 (*COSMOS/M, Command Reference (1994)*). Las placas se modelaron utilizando elementos tipo cáscara (shell), de cuatro nodos. En ambos casos, las condiciones de borde se consideraron como un empotramiento perfecto. Para las propiedades materiales se adoptó un módulo de Elasticidad $E = 180 \text{ GPa}$ (obtenido experimentalmente), un coeficiente de Poisson $\nu = 0.3$, y una densidad $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

El análisis dinámico se llevó a cabo por el método de superposición modal y por el método de integración directa. En ambos casos, para la integración paso a paso en el tiempo, se utilizó el método Newmark- β ($\beta = 1/4$ y $\gamma = 1/2$). Se determinó la aceleración en los nodos que se correspondían con la posición de los acelerómetros en los ensayos.

Para la inclusión de la carga en el análisis numérico, en una primera aproximación, se usaron las presiones teóricas obtenidas con la ley de Hopkinson (*Autoridad Regulatoria Nuclear (1998)*) con el objeto de predecir los valores de aceleración y tensión que podían esperarse en los ensayos. Luego de realizados los mismos, se usaron como carga aplicada, los registros experimentales de presión, cuyos parámetros se aproximaban a los estimados

teóricamente, por lo que puede suponerse que fue la carga efectivamente actuante sobre las mismas.

En este capítulo sólo se presentan los resultados obtenidos con las presiones medidas experimentalmente.

4.2.1. Placa metálica empotrada en la base (Placa A)

La Figura 4.1 muestra el Modelo 1 formado por 150 elementos con el que se discretizó la Placa A.

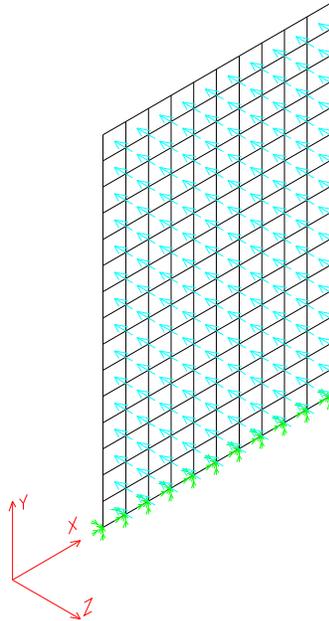


Figura 4.1. Modelo 1 de la Placa A.

Además, con el fin de comparar la influencia del tamaño de los elementos de la malla en los resultados, se utilizó también el Modelo 2, formado por elementos con la dimensión de sus lados igual a la mitad de los utilizados para el primer modelo, lo que condujo a una malla de 600 elementos.

El coeficiente de amortiguamiento que se adoptó fue de 0.2 %. Este valor se obtuvo experimentalmente y coincide con los valores encontrados en la literatura para el acero.

4.2.1.1. Análisis numérico de las frecuencias modales

En la siguiente tabla se indican los valores numéricos de las frecuencias correspondientes a las primeras cinco formas modales que se obtuvieron para los dos modelos analizados. Por otra parte, se indica la diferencia que se produce cuando con un mismo programa se considera uno u otro modelo.

Modo	Frecuencias (Hz)					
	ABAQUS/Standard			COSMOS/M		
	Modelo 1	Modelo 2	Dif. (%)	Modelo 1	Modelo 2	Dif. (%)
1	0.7437	0.7434	0.04	0.7422	0.7431	0.12
2	2.5095	2.5090	0.02	2.4884	2.5039	0.62
3	4.6708	4.6329	0.82	4.5874	4.6123	0.54
4	8.5215	8.4787	0.50	8.3799	8.4440	0.76
5	11.6910	11.5670	1.07	11.1934	11.4399	2.15

Tabla 4.1. Valores numéricos de las frecuencias. Placa A.

Se puede observar que en el caso del programa ABAQUS la máxima diferencia que se obtuvo entre los valores correspondientes a las primeras cinco frecuencias es de alrededor del 1 %, mientras que para el caso del programa COSMOS/M la diferencia máxima es de aproximadamente el 2 %.

Si bien en este punto no se muestran los resultados, es importante destacar que el análisis anterior se ha efectuado para las primeras 60 formas modales. A partir del mismo, se concluyó que en el caso de ABAQUS las diferencias entre los valores de las frecuencias para uno y otro modelo, van aumentando a medida que se consideran modos más altos, lo cual tiene su explicación en el hecho que una malla más enriquecida es capaz de captar mejor los modos superiores. Sin embargo, para los valores obtenidos con COSMOS/M, se ve que las diferencias permanecen prácticamente uniformes en todo el rango de valores de frecuencias analizadas.

4.2.1.2. Análisis numérico del Ensayo 1

De acuerdo a lo indicado en el punto 3.2.1, el Ensayo 1 corresponde a una carga de 0.8 Kg de TNT, ubicada a 46.30 m. de la placa (Figura 3.1).

a) Acción externa

Como acción externa para el análisis numérico de este ensayo, se utilizó la curva de presión que se muestra en la Figura 4.2. Esta se obtuvo de superponer en el tiempo las presiones registradas en el Sensor 1 (frente) y en el Sensor 4 (atrás) de acuerdo a la Figura 3.10.

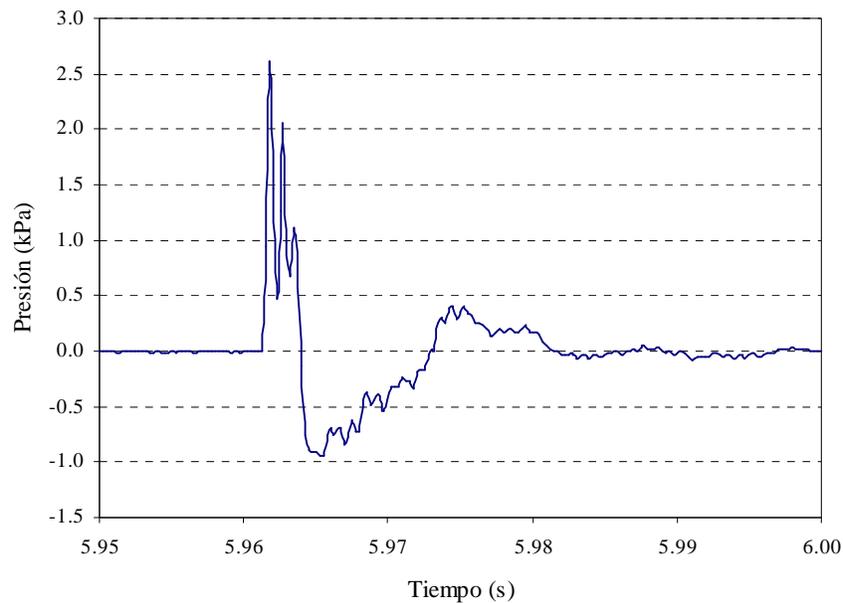


Figura 4.2. Presión resultante para el Ensayo 1.

b) Determinación de las aceleraciones

Como se mencionó anteriormente, se realizó el análisis dinámico computacional por medio de dos métodos de resolución.

Para el cálculo de la respuesta utilizando el método de superposición modal, se consideraron las primeras 30 formas modales. En las Figuras 4.3 y 4.4, se muestran los resultados de aceleración obtenidos con los programas ABAQUS y COSMOS/M para el Modelo 1, en las posiciones 1 y 2 respectivamente (Figura 3.3). En las Figuras 4.5 y 4.6 se muestran los resultados para las mismas posiciones, pero correspondientes al Modelo 2.

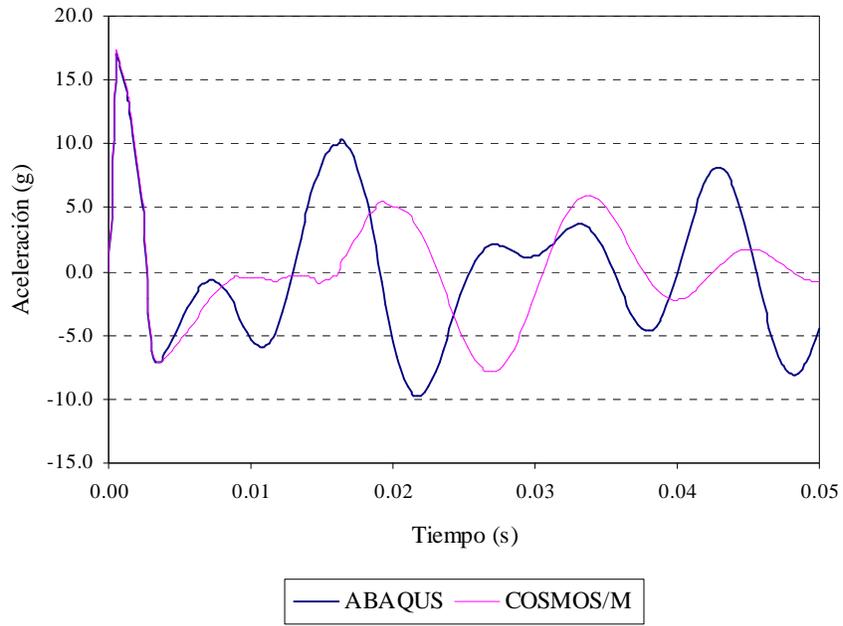


Figura 4.3. Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 1. Placa A. Ensayo 1.

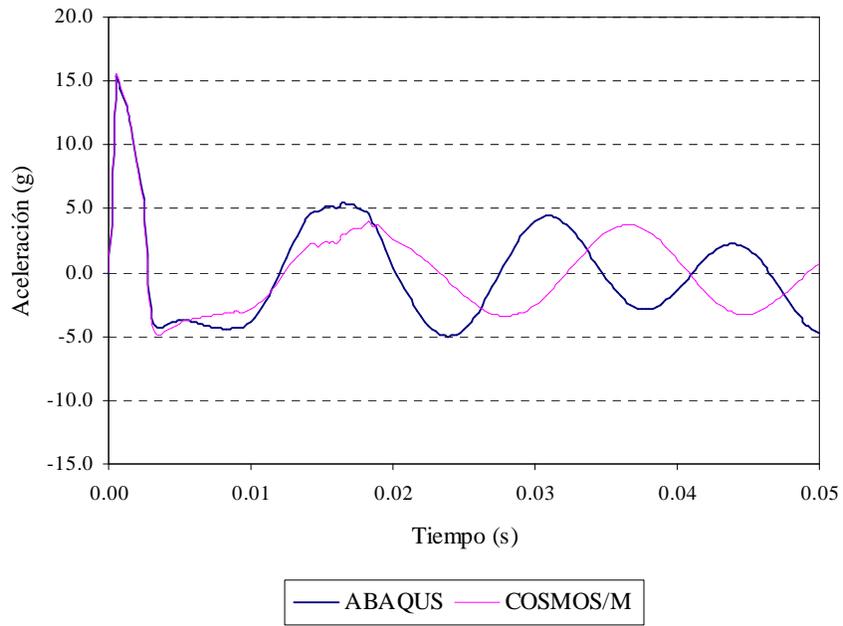


Figura 4.4. Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 1. Placa A. Ensayo 1.

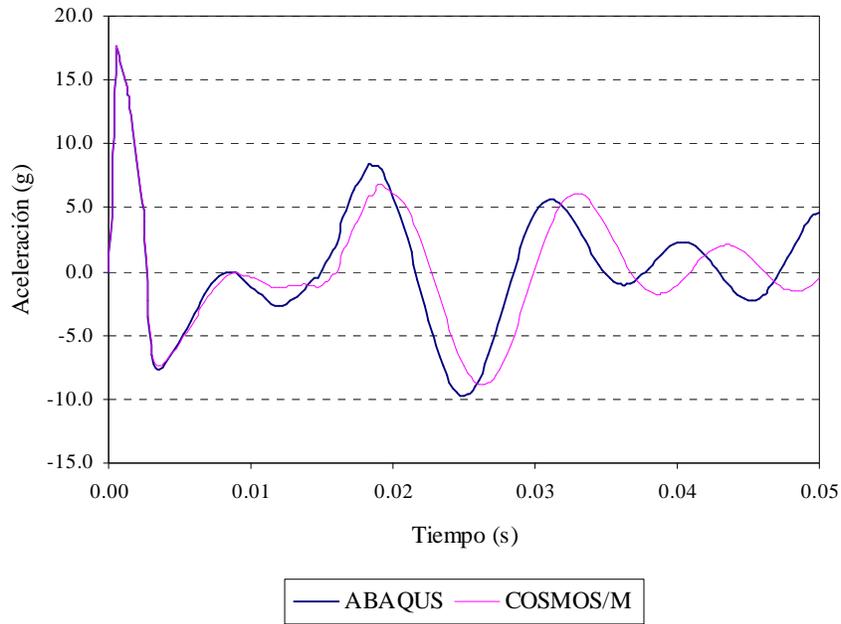


Figura 4.5. Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.

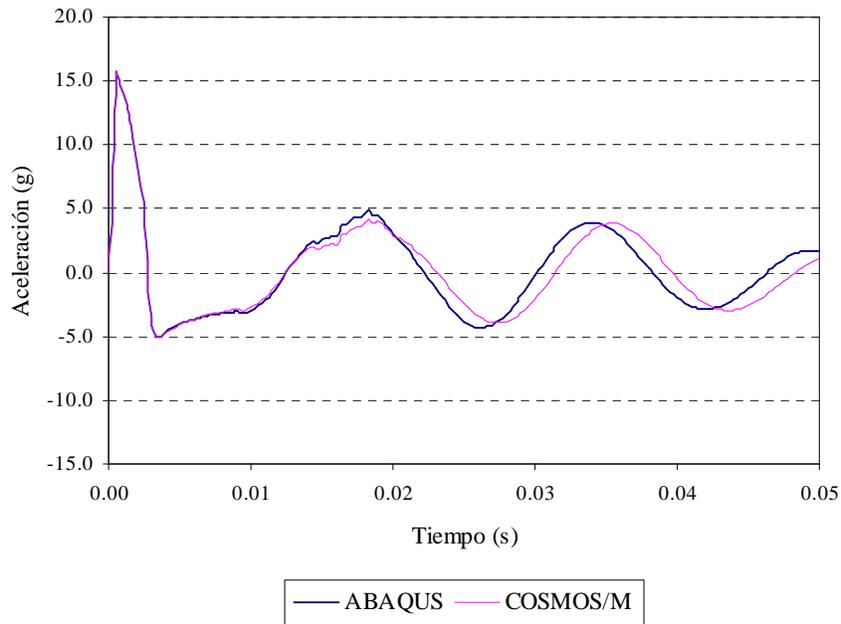


Figura 4.6. Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.

En el caso del Modelo 1, se puede observar que los valores numéricos de aceleración coinciden en la zona de vibración forzada para ambas posiciones. En la zona de vibraciones libres se produce un desajuste entre las curvas, mostrando el modelo de ABAQUS un comportamiento más rígido que el de COSMOS/M, lo cual se explica por la diferencia entre los valores de las frecuencias de los modos superiores que se obtienen con uno y otro programa.

Para el Modelo 2, hay una buena coincidencia entre ambas curvas en las dos posiciones analizadas. Esto se puede explicar porque las cargas impulsivas excitan los modos superiores de vibración y los valores de las frecuencias que se obtienen con ambos programas en este caso, son similares en el rango de interés para el análisis.

En la Tabla 4.2 se indican los valores obtenidos para el pico de aceleración inicial para cada una de las curvas anteriores.

Posición	Aceleración (g)			
	ABAQUS/Standard		COSMOS/M	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
1	16.99	17.53	17.22	17.47
2	15.25	15.62	15.48	15.62

Tabla 4.2. Pico de aceleración inicial. Ensayo 1. Linealidad geométrica.

Se puede observar que las predicciones numéricas del pico de aceleración inicial, para cada posición analizada, tienen un buen ajuste entre sí.

Debido a que las estimaciones numéricas iniciales indicaban la posibilidad de que en el problema analizado existieran efectos de no linealidad geométrica debido a grandes desplazamientos, se decidió realizar un análisis dinámico aplicando el método de integración directa, el cual permite considerar este efecto. Durante el análisis, los elementos se formulan en la configuración actual (formulación Euleriana) y se tiene en cuenta la distorsión que sufren los mismos a partir de su forma original a medida que se desarrolla el cálculo.

Sólo se utilizó el programa ABAQUS y en la Figura 4.7 se indican los resultados obtenidos para el Modelo 1 en las posiciones 1 y 2.

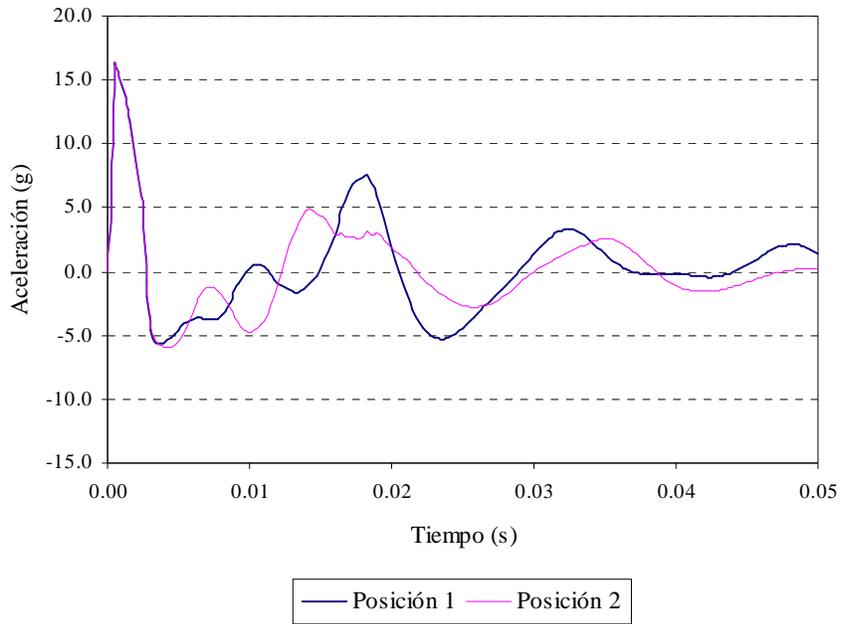


Figura 4.7. Resultados numéricos. Modelo 1. Ensayo 1. No linealidad geométrica.

En la Figura 4.8 se muestra la comparación de resultados para la Posición 2 del Modelo 1, considerando linealidad y no linealidad geométrica. Los resultados corresponden al programa ABAQUS.

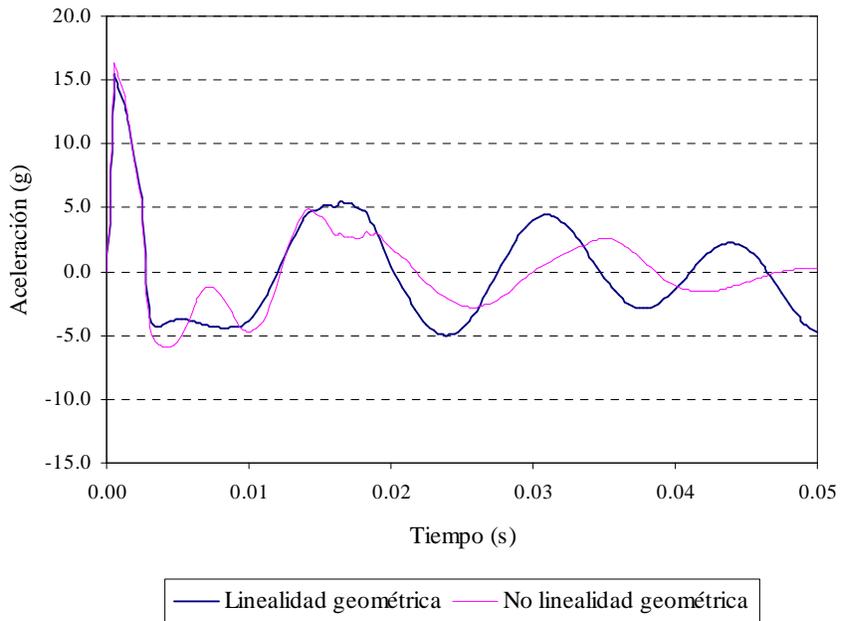


Figura 4.8. Comparación entre linealidad y no linealidad geométrica. Posición 2.

Las curvas resultantes tienen buen ajuste en la zona de vibraciones forzadas, y una coincidencia aceptable en la zona de vibraciones libres, por lo que se concluyó que la placa respondió con linealidad geométrica.

En la siguiente tabla se comparan los valores obtenidos para el pico inicial de aceleración en las posiciones analizadas del Modelo 1, para uno y otro caso.

Posición	Aceleración (g)		Diferencia (%)
	L. Geométrica	N. L. Geométrica	
1	16.99	16.18	-5.01
2	15.25	16.15	5.57

Tabla 4.3. Valores numéricos del pico de aceleración inicial. Ensayo 1.

Los resultados muestran que se logró muy buen ajuste entre ambas predicciones numéricas para el valor inicial de aceleración

c) *Verificación de tensiones*

En la Figura 4.9, se muestran los valores de la tensión de von-Mises para el período de tiempo analizado, en el elemento más solicitado de la zona del empotramiento del Modelo 1.

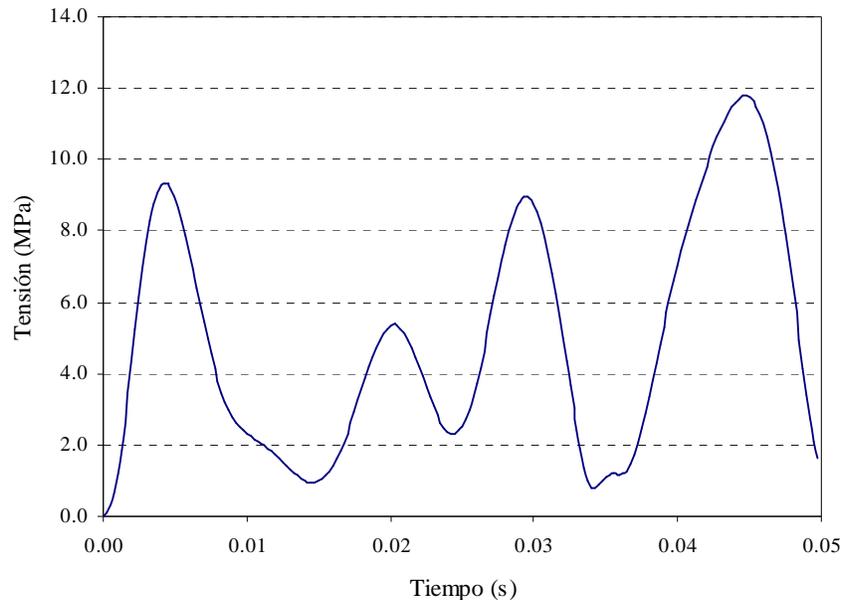


Figura 4.9. Tensiones de von-Mises en la zona de empotramiento. Ensayo 1.

Se puede observar que el valor máximo de la tensión de von-Mises, no superó la tensión de fluencia del material con el que estaba construida la placa y que se determinó experimentalmente ($\sigma_f = 280$ MPa)

4.2.1.3. Análisis numérico del Ensayo 2

Este ensayo, corresponde a una carga de 10 Kg de TNT, ubicada a 60.00 m. de la Placa A (Figura 3.1), como se indica en el punto 3.2.1.

a) Acción externa

La Figura 4.10 indica la variación en el tiempo de la onda de presión que se utilizó para el cálculo computacional de este ensayo. Como en el caso anterior, resultó de superponer en el tiempo las presiones registradas en el Sensor 1 (frente) y en el Sensor 4 (atrás) dispuestos según la Figura 3.10.

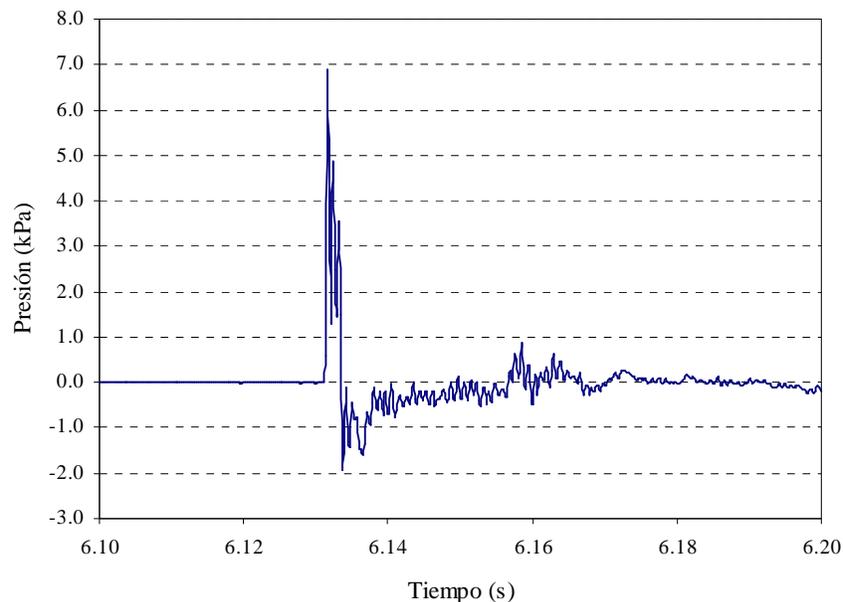


Figura 4.10. Presión resultante en el Ensayo 2.

b) Determinación de las aceleraciones

En este caso el análisis sólo se realizó por el método de superposición modal, considerando 60 formas modales.

En los siguientes gráficos, se observan las curvas de aceleración que se obtuvieron en las posiciones 1, 2 y 3 de la placa (Figura 3.3). En las Figuras 4.11, 4.12 y 4.13 se muestran los resultados que corresponden al Modelo 1, y en las Figuras 4.14, 4.15 y 4.16 los correspondientes al Modelo 2.

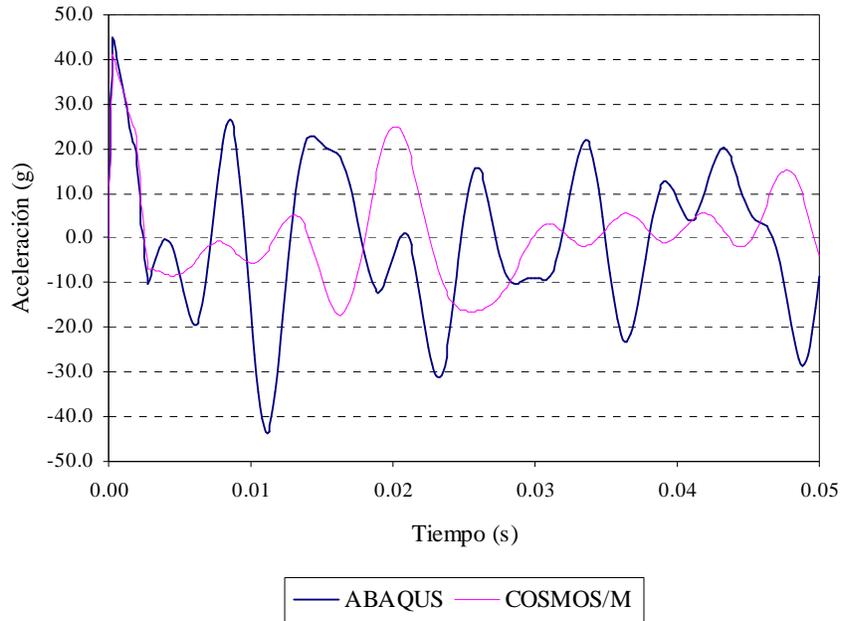


Figura 4.11. Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.

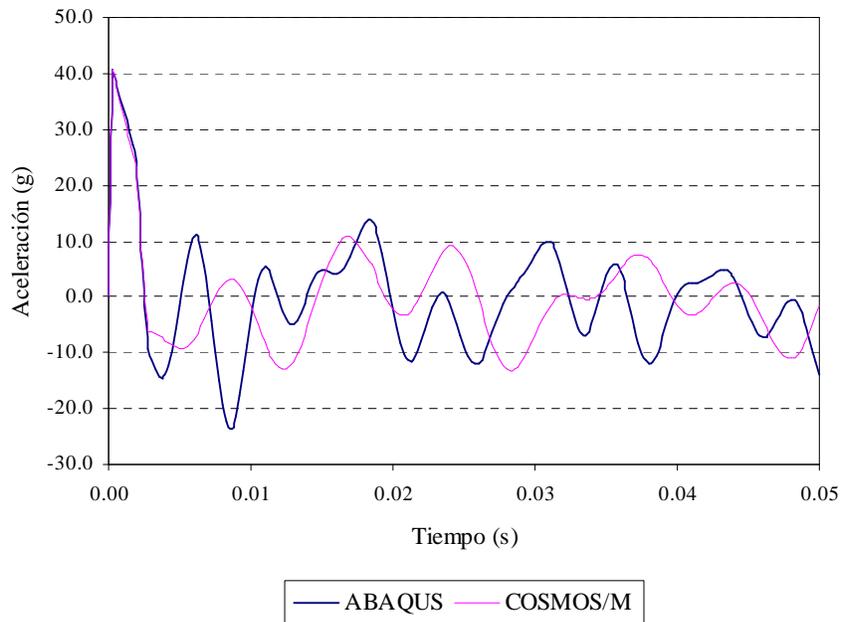


Figura 4.12. Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.

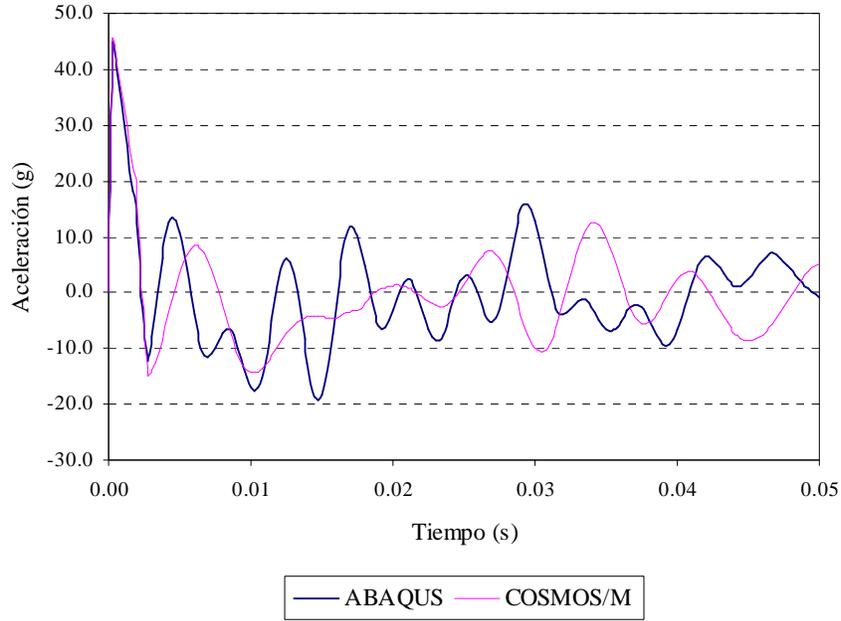


Figura 4.13. Resultados numéricos para la Posición 3. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.

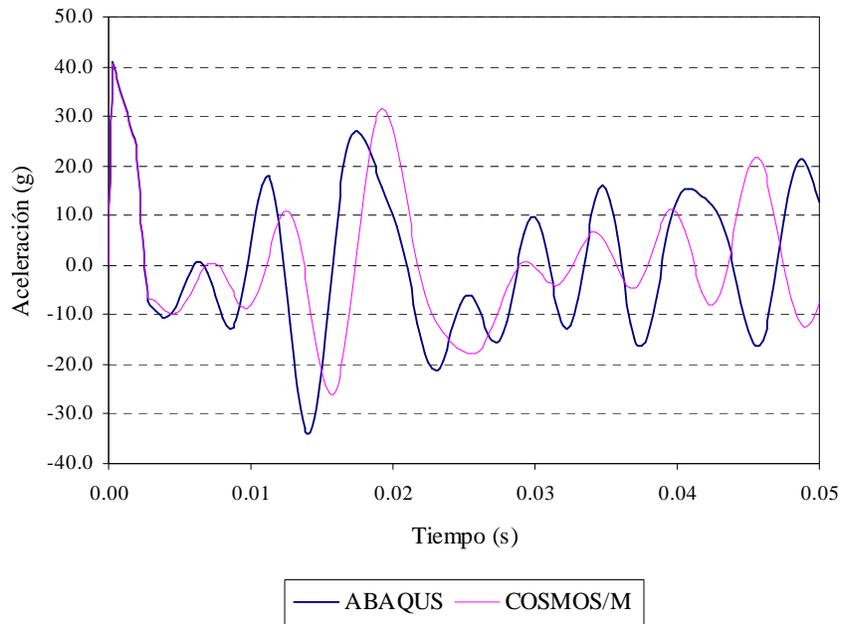


Figura 4.14. Resultados numéricos para la Posición 1. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.

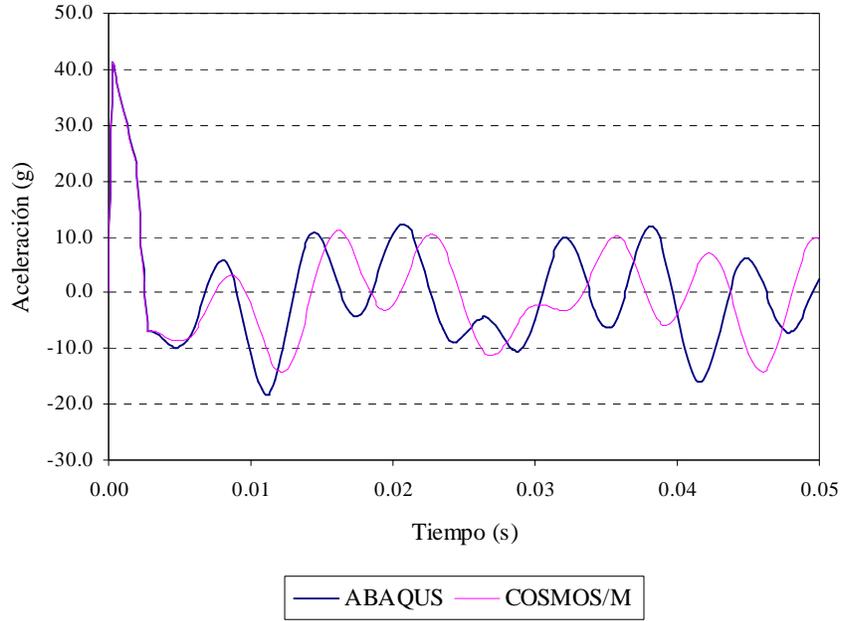


Figura 4.15. Resultados numéricos para la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.

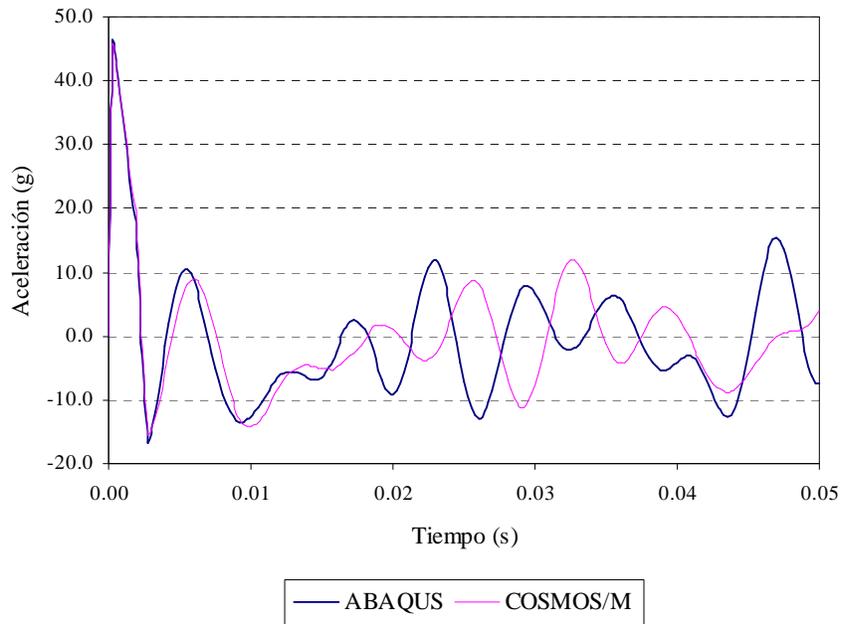


Figura 4.16. Resultados numéricos para la Posición 3. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.

A partir del análisis de las curvas anteriores, se deduce que en el caso del Modelo 1, los valores de aceleración obtenidos computacionalmente coinciden para la zona de vibración forzada en las tres posiciones analizadas. Sin embargo, en la zona de vibraciones libres, se produce un fuerte desajuste entre las curvas, debido a que la estructura modelada con el programa COSMOS/M tiene un comportamiento más flexible que la modelada con ABAQUS.

Para el Modelo 2, hay una buena coincidencia entre las curvas para la zona de vibraciones forzadas. En la zona de vibraciones libres, se logra mejor ajuste que en el caso del Modelo 1, porque las diferencias entre los valores de las frecuencias que se obtienen con ambos programas y que se consideran para el análisis, son menores.

En la Tabla 4.4 se indican los valores numéricos obtenidos para el pico de aceleración inicial.

Posición	Aceleración (g)			
	ABAQUS/Standard		COSMOS/M	
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 1	Modelo 2
1	44.56	40.41	40.87	40.38
2	40.22	40.89	40.40	40.84
3	44.66	46.14	45.24	45.52

Tabla 4.4. Pico de aceleración inicial. Ensayo 2. Linealidad geométrica.

Se puede ver que las predicciones numéricas del pico de aceleración inicial tienen un buen ajuste entre sí para cada posición analizada.

c) Verificación de tensiones

En la Figura 4.17 se muestra el valor de la tensión de von-Mises en el elemento más solicitado de la zona del empotramiento del Modelo 1. Nuevamente se puede observar que el valor máximo no supera la $\sigma_f = 280$ MPa correspondiente al material de la placa.

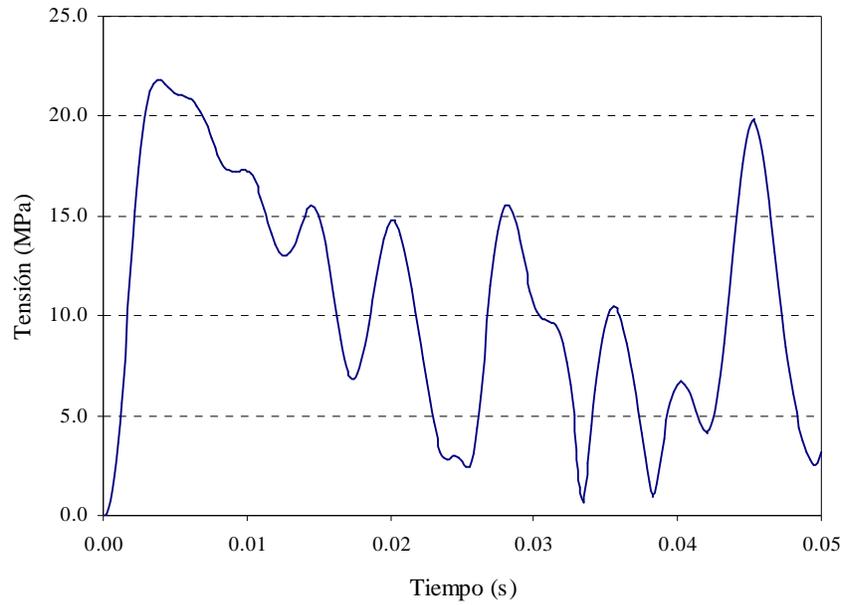


Figura 4.17. Tensión de von-Mises en la zona de empotramiento. Ensayo 2.

4.2.2. Placa metálica empotrada en los cuatro bordes (Placa B)

En la Figura 4.18 se observa el Modelo 1 formado por 100 elementos que se utilizó para discretizar la Placa B.

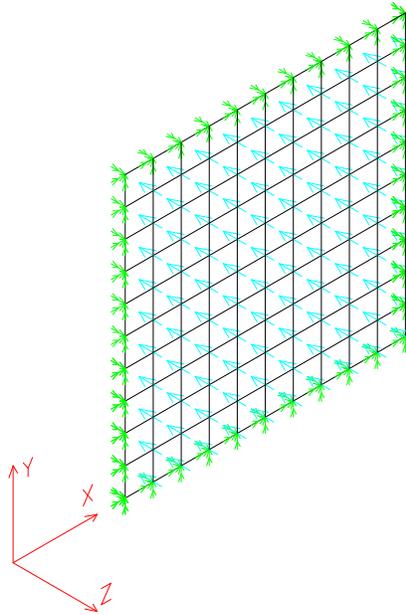


Figura 4.18. Modelo 1 de la Placa B.

Nuevamente, con el fin de estudiar la influencia del tamaño de los elementos de la malla en los resultados, se recurrió al Modelo 2, con las dimensiones de los elementos igual a la mitad que las del Modelo 1, lo que originó una malla de 400 elementos.

El coeficiente de amortiguamiento determinado experimentalmente fue 5 %. La diferencia de un orden de magnitud con el amortiguamiento del material se puede explicar por el efecto del “amortiguamiento de contorno” debido a la disipación de energía en la unión placa-marco. Cuando el amortiguamiento se mide en una zona de la estructura, se encuentra comúnmente que es de un orden de magnitud más alto que el amortiguamiento material intrínseco de las componentes de la estructura. Esta diferencia se atribuye a efectos como deslizamiento micro friccional en las juntas, al roce en juntas remachadas, etc. (Woodhouse (1998)).

4.2.2.1. Análisis numérico de las frecuencias modales

En la Tabla 4.5 se muestran los valores numéricos de las frecuencias correspondientes a las primeras cinco formas modales para los dos modelos analizados. Además, se indica la diferencia que se obtuvo en los valores para cada programa, cuando se consideró uno u otro modelo.

Modo	Frecuencias (Hz)					
	ABAQUS/Standard			COSMOS/M		
	Modelo 1	Modelo 2	Dif. (%)	Modelo 1	Modelo 2	Dif. (%)
1	8.4516	8.3191	1.59	8.2162	8.2614	0.55
2	17.9800	17.1390	4.91	16.6882	16.8342	0.87
3	17.9800	17.1390	4.91	16.6882	16.8342	0.87
4	26.2960	25.2270	4.24	24.3431	24.7600	1.68
5	35.0270	31.3230	11.83	29.7641	30.1541	1.29

Tabla 4.5. Valores numéricos de las frecuencias. Placa B.

Se puede concluir que en el caso del programa ABAQUS la máxima diferencia que se produce entre los valores de las primeras cinco frecuencias es de alrededor del 12 %, mientras que para el caso de COSMOS/M se produce una diferencia máxima muy inferior al caso anterior (1.7 %).

El análisis anterior se ha efectuado para las primeras 20 formas modales. A partir del mismo, se observó que en el caso del programa ABAQUS las diferencias van aumentando a medida que se consideran modos más altos. En el caso del programa COSMOS/M, las

diferencias entre las frecuencias permanecen prácticamente uniformes en el rango de valores analizados y en promedio, son significativamente menores que las observadas para ABAQUS.

4.2.2.2. Análisis numérico del Ensayo 1

a) Acción externa

Se determinó la respuesta de la placa considerando como acción externa la onda de presión mostrada en la Figura 4.2.

b) Determinación de las aceleraciones

Se determinó la aceleración en el centro de la placa utilizando el método de superposición modal. La Figura 4.19 muestra los valores de aceleración para el Modelo 1 cuando se consideraron 16 formas modales.

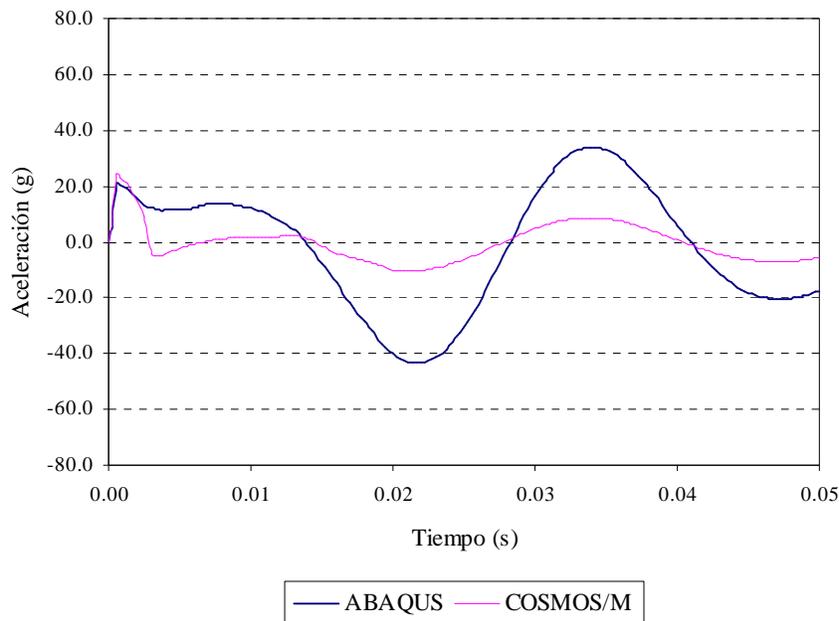


Figura 4.19. Resultados numéricos para 16 formas modales. Modelo 1. Ensayo 1.

La Figura 4.19 corresponde a las curvas de aceleración para el Modelo 1 cuando se utilizaron 20 formas modales.

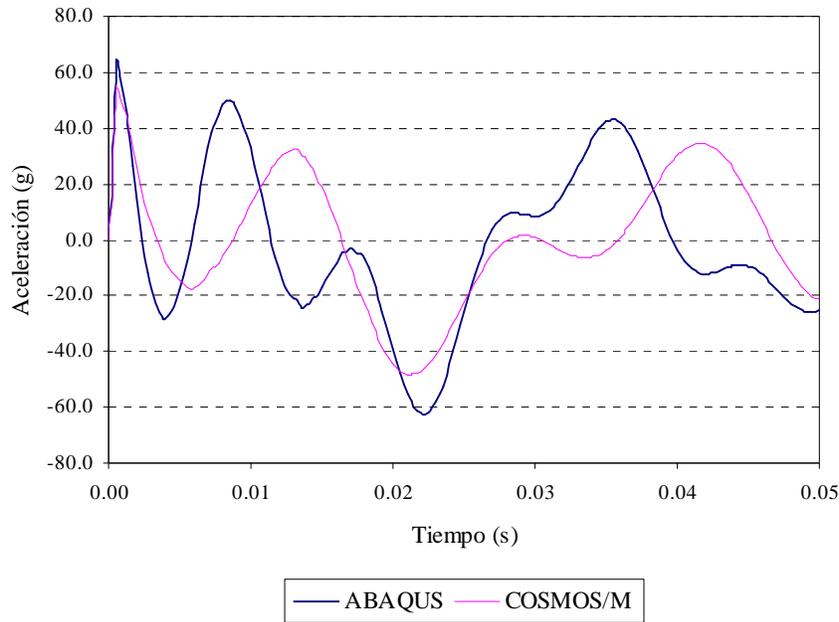


Figura 4.20. Resultados numéricos para 20 formas modales. Modelo 1. Ensayo 1.

En la Tabla 4.6, se muestran los valores del pico inicial de aceleración para el centro de la placa y la diferencia entre ellos. Los resultados corresponden al Modelo 1, cuando se consideran 16 y 20 formas modales.

Modos	Aceleración (g)	
	ABAQUS/Standard	COSMOS/M
16	21.39	24.33
20	63.96	54.53
Diferencia (%)	66.6	55.4

Tabla 4.6. Comparación del pico de aceleración inicial. Placa B. Superposición modal.

Se observó una marcada diferencia en el valor del pico inicial de aceleración en función de la cantidad de formas modales que se consideraron para el cálculo, lo cual puso en evidencia que en el caso de tratar con cargas de tipo impulsivo, un punto importante en la modelación del problema, es la elección de la cantidad de formas modales necesarias para representar adecuadamente el comportamiento dinámico de la estructura analizada.

En la Figura 4.21 se muestran los resultados de aceleración para el Modelo 2, cuando se consideran 20 formas modales.

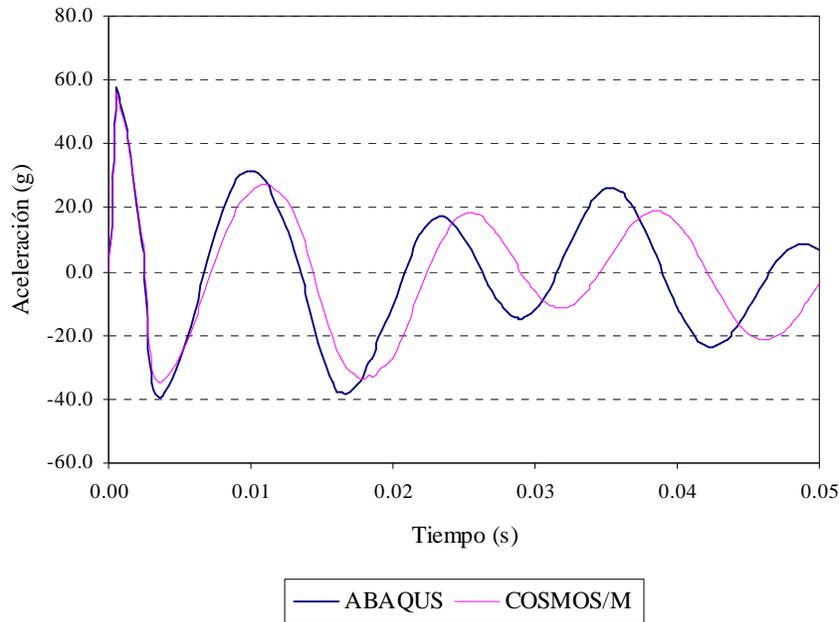


Figura 4.21. Resultados numéricos para 20 formas modales. Modelo 2. Ensayo 1.

A partir del análisis de las curvas de las Figura 4.19, se concluye que en el caso del Modelo 1, los valores numéricos de aceleración coinciden en la zona de vibración forzada para la posición analizada. Sin embargo, en la zona de vibraciones libres, se produce un desajuste entre las curvas, debido a que la estructura modelada con el programa ABAQUS se comporta más rígida que la modelada con COSMOS/M.

Para el Modelo 2 (Figura 4.20), en la zona de vibraciones forzadas hay una buena coincidencia entre las curvas, y para la zona de vibraciones libres, se logra mejor ajuste que en el caso del Modelo 1.

En la siguiente tabla, se muestran los picos de aceleración inicial que se obtienen para cada modelo analizado y con cada programa, cuando se consideran 20 modos de vibración.

	Aceleración (g)		Diferencia (%)
	ABAQUS/Standard	COSMOS/M	
Modelo 1	63.96	54.53	14.74
Modelo 2	57.21	55.25	3.43

Tabla 4.7. Pico de aceleración inicial. Placa B. Modelos 1 y 2.

Los resultados indican que al refinar la malla, se logró disminuir sustancialmente la diferencia entre los valores obtenidos para la aceleración inicial con uno y otro programa.

c) Verificación de tensiones

Se realizó un análisis para determinar los valores de la tensión de von-Mises en el período de tiempo estudiado. En la Figura 4.22 se muestran los valores correspondientes al elemento más solicitado del Modelo 1 y se puede observar que los mismos están muy por debajo del valor de la $\sigma_f = 280$ MPa del material de la placa.

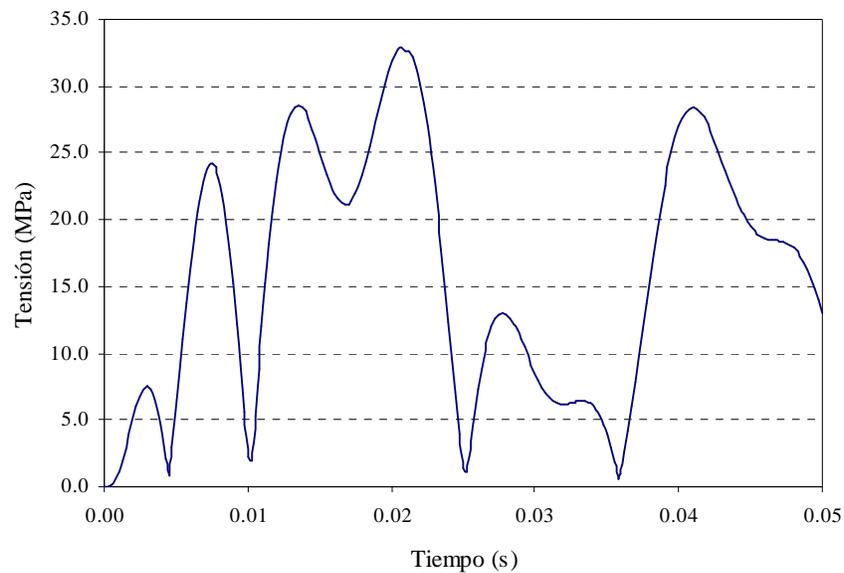


Figura 4.22. Tensiones de von-Mises en la zona central de la Placa B.

CAPITULO 5

COMPARACION DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCION

En el Apéndice A se realizó una descripción de la onda de presión que se produce por la detonación de explosivos y la forma de evaluar sus parámetros. En los primeros capítulos se presentaron los métodos dinámicos que permiten evaluar la respuesta de estructuras sometidas a este tipo de cargas. También se mostraron las fórmulas empíricas disponibles en la literatura, con las cuales se pueden predecir las dimensiones de los cráteres originados por cargas explosivas, teniendo como dato el peso de las mismas.

Uno de los objetivos de este capítulo, es establecer guías para la modelación teórico-numérica de estructuras, a partir de la comparación entre los resultados experimentales y los obtenidos computacionalmente para el caso de las estructuras metálicas. Para el caso de las ondas de presión y de los diámetros de los cráteres, se comparan los resultados experimentales con las fórmulas propuestas en la literatura y con otros resultados experimentales.

En el Capítulo 3, se presentaron las curvas experimentales de presión que se registraron para diferentes posiciones respecto a la ubicación de las cargas explosivas. En el presente capítulo, se comparan los valores pico de presión reflejada experimentales, con los que se obtienen a partir de expresiones que permiten determinar los parámetros de la onda de presión.

También en el tercer capítulo, se presentó el análisis experimental llevado a cabo sobre dos placas metálicas de acero con diferentes condiciones de sustentación. De este estudio se extrajeron los valores de frecuencias naturales y de aceleración para diferentes puntos de las mismas. Por otra parte, en el capítulo anterior, se presentó el análisis numérico llevado a cabo sobre los modelos de las estructuras antes mencionadas. Se evaluaron las aceleraciones en los mismos puntos que en el estudio experimental. A partir de esto, se realizó un análisis comparativo para evaluar el grado de ajuste existente entre los valores experimentales y los resultados computacionales.

Por último, en el Capítulo 3, se presentaron los resultados experimentales correspondientes a los diámetros de los cráteres que se obtuvieron para detonaciones de cargas explosivas apoyadas y elevadas sobre el suelo. Estos resultados experimentales se compararon con curvas propuestas por diferentes autores y con otros resultados experimentales.

5.2. ONDAS DE PRESION

Uno de los parámetros más importantes de las ondas de presión, es el valor de la presión reflejada que actúa sobre una estructura, cuando el frente de onda incide contra ésta. En la siguiente tabla se realizó la comparación entre los valores del pico de presión reflejada registrados en los sensores 1 y 3 (Figura 3.10), con los que se obtienen a partir de la siguiente ecuación (*Smith y Hetherington* (1994)):

$$p_r = 2p_s \frac{7p_a + 4p_s}{7p_a + p_s} \quad (5.1)$$

donde p_r es la presión reflejada, p_s es el pico de presión incidente, que se obtiene de ábacos en función de la distancia escalada $Z=D/W^{1/3}$ (ec. A.4) (*Autoridad Regulatoria Nuclear* (1998)) y p_a es la presión atmosférica. Los ensayos se numeran de acuerdo al punto 3.2.1.

Ensayo	Presión reflejada (KPa)					
	Experimental		Teórica		Diferencia (%)	
	S 1	S 3	S 1	S 3	S 1	S 3
1	2.62	4.60	2.82	4.23	7.63	8.04
2	6.80	10.02	6.08	8.14	10.59	10.76
3	2.20	3.62	2.41	3.42	9.55	5.52
4	14.51	14.53	14.41	14.41	0.69	0.83

Tabla 5.1. Comparación de los picos de presión reflejada.

Los resultados anteriores permiten concluir que, al menos en lo que respecta al valor pico, los registros experimentales de presión reflejada son confiables.

En la Tabla 5.2 se comparan los valores de la velocidad del frente de onda que se determinaron a partir de los registros experimentales con los obtenidos a partir de la siguiente ecuación (*Smith y Hetherington* (1994)):

$$U_s = \sqrt{\frac{6p_s + 7p_a}{7p_a}} a_0 \quad (5.2)$$

siendo U_s la velocidad del frente de onda y a_0 la velocidad del sonido en el aire. La velocidad teórica se calculó como el promedio entre la velocidad que se obtuvo aplicando la ec. (5.2) para los valores del Sensor 1 y del Sensor 3.

La velocidad de la onda experimental se obtuvo como:

$$U_{s\text{exp}} = \frac{L}{\Delta t} \quad (5.3)$$

donde L es la distancia entre el Sensor 1 y el Sensor 3 (Figura 3.10) y Δt se obtiene de restar los tiempos de arribo de la onda de presión a ambos sensores.

Ensayo	Velocidad del frente de onda (Km/h)		Diferencia (%)
	Experimental	Teórica	
1	1249	1233	1.28
2	1241	1242	0.08
3	1227	1231	0.33

Tabla 5.2. Comparación de velocidades del frente de onda.

Se puede concluir que los valores experimentales para las velocidades del frente de las ondas de presión, tienen un ajuste excelente con los calculados utilizando la ec. (5.2).

5.3. ESTRUCTURAS METALICAS

En este punto se presenta la comparación entre los resultados numéricos y experimentales de las aceleraciones en distintos puntos de las dos placas metálicas que se describieron en el Capítulo 3.

5.3.1. Comparación de aceleraciones para el Ensayo 1. Placa A

A partir de la observación de los resultados del análisis numérico presentado en el capítulo anterior, se deduce que el Modelo 2 es el que mejor representa el comportamiento estructural. Por otra parte, para el mismo modelo, los resultados obtenidos con los programas ABAQUS/Standard y COSMOS/M son muy similares. Por lo anteriormente expuesto, se decidió mostrar en este punto, la comparación entre los resultados experimentales y los que se obtuvieron con el programa ABAQUS para el Modelo 2 de 600 elementos.

En la Figura 5.1 se comparan los valores de aceleración experimentales con los obtenidos utilizando el programa ABAQUS para la Posición 2 de la Placa A (Figura 3.3). Estos resultados se obtuvieron empleando el método de superposición modal considerando 30 formas modales.

Es importante destacar que las curvas se extienden por un período de tiempo de 50 ms, que es aproximadamente una vez y media la duración de la carga exterior.

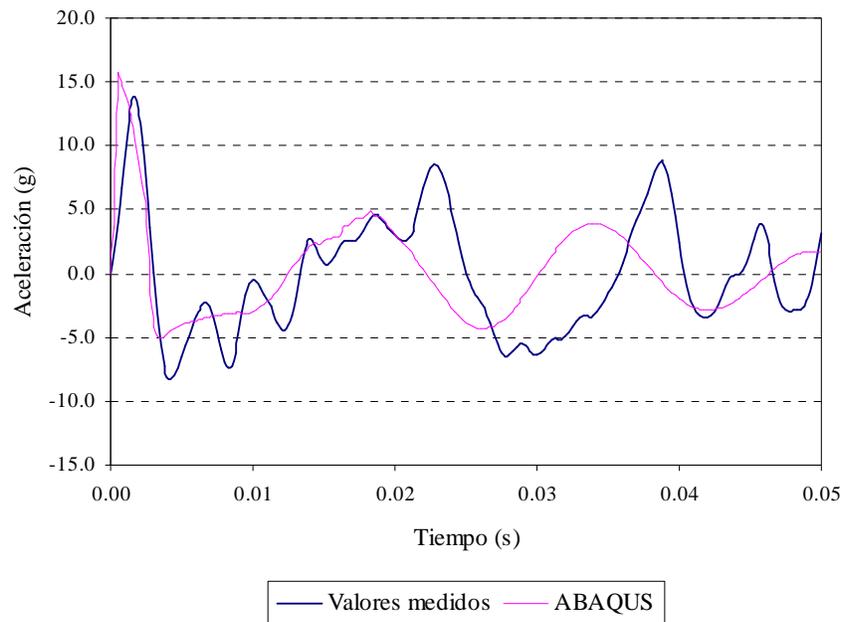


Figura 5.1. Aceleración en la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.

Se logró un ajuste adecuado en la zona de vibraciones forzadas. En la zona de vibraciones libres, se produjo un desajuste en las altas frecuencias.

En la Tabla 5.3 se comparan los valores del pico de aceleración inicial para el modelo de 150 elementos y en la Tabla 5.4 para el modelo de 600 elementos, en las Posiciones 1 y 2 de la Placa A (Figura 3.3).

Posición	Aceleración (g)		Diferencia (%)
	Experimental	ABAQUS	
1	12.28	16.99	38.36
2	13.89	15.25	8.92

Tabla 5.3. Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 1. Placa A. Ensayo 1.

Posición	Aceleración (g)		Diferencia (%)
	Experimental	ABAQUS	
1	12.28	17.53	42.75
2	13.89	15.62	11.08

Tabla 5.4. Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 2. Placa A. Ensayo 1.

Los resultados anteriores mostraron que para ambos modelos, los programas sobrestimaron los valores del pico inicial de aceleración en la Posición 1. Sin embargo, para la Posición 2, los resultados que se obtuvieron con ambos modelos son aceptables.

La Figura 5.2, muestra la comparación entre las curvas experimental y la que tiene en cuenta el efecto de no linealidad geométrica debido a grandes desplazamientos.

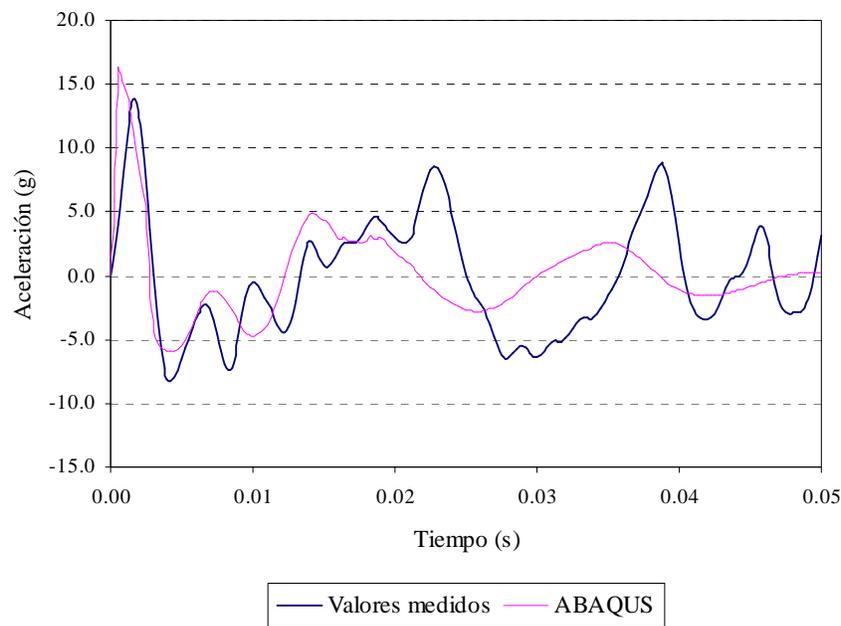


Figura 5.2. Aceleración en la Posición 2. No linealidad geométrica. Placa A. Ensayo 1.

Este análisis sólo se llevó a cabo con el Modelo 1. Se logró un buen ajuste en el pico de aceleración inicial en la zona de vibraciones forzadas, pero se obtuvo un desajuste en las altas frecuencias en la zona de vibraciones libres. Se puede concluir que, en este caso, la modelación de la placa sin tener en cuenta el efecto de no linealidad geométrica es correcto.

En la siguiente tabla, se indican los valores obtenidos con el análisis anterior para el pico inicial de aceleración en las dos posiciones estudiadas.

Posición	Aceleración (g)		Diferencia (%)
	Experimental	ABAQUS	
1	12.28	16.18	31.76
2	13.89	16.15	16.27

Tabla 5.5. Comparación del pico de aceleración. Ensayo 1. No linealidad geométrica.

Se observa que en la Posición 1 el pico inicial de aceleración está sobrestimado. Para la Posición 2, en cambio, la diferencia con el valor experimental es levemente superior a las que se obtuvieron con el método de superposición modal.

5.3.2. Comparación de aceleraciones para el Ensayo 2. Placa A

La Figura 5.3, muestra la comparación entre el registro experimental de aceleración y la curva obtenida para la Posición 2 de la Placa A, con el Modelo 2.

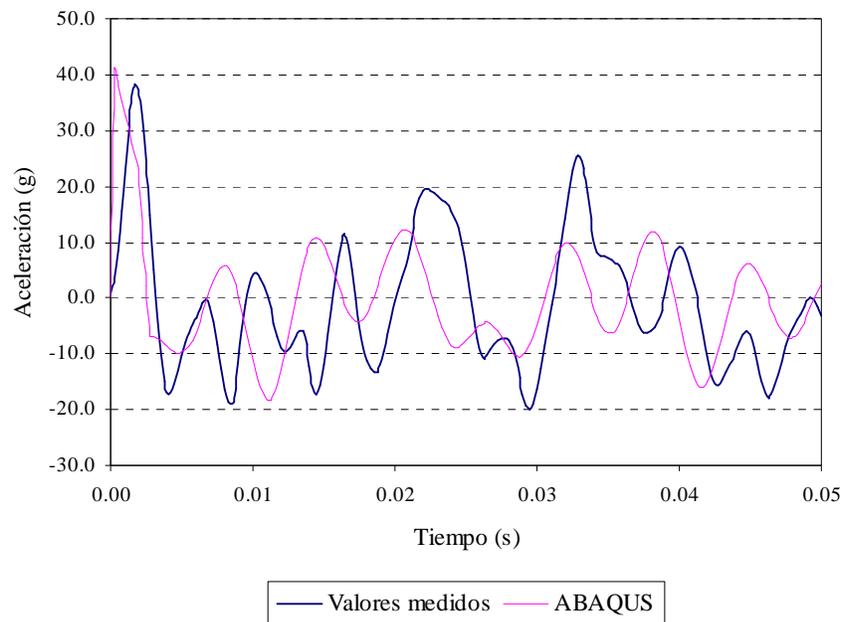


Figura 5.3. Aceleración en la Posición 2. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.

Las curva que se obtuvo con el programa ABAQUS mostró un buen ajuste con la curva experimental en el período de tiempo que corresponde a la aplicación de la carga. En la zona de vibraciones libres, nuevamente se produce un desajuste en lo que respecta a las frecuencias.

En las Tablas 5.6 y 5.7 se comparan los valores numéricos del pico de aceleración inicial obtenidos con el modelo de 100 y 400 elementos respectivamente, con los valores experimentales en las tres posiciones analizadas.

Posición	Aceleración (g)		Diferencia (%)
	Experimental	ABAQUS	
1	48.24	44.56	7.63
2	38.42	40.22	4.69
3	41.88	44.66	6.64

Tabla 5.6. Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 1. Placa A. Ensayo 2.

Posición	Aceleración (g)		Diferencia (%)
	Experimental	ABAQUS	
1	48.24	40.41	16.23
2	38.42	40.89	6.43
3	41.88	46.14	10.17

Tabla 5.7. Comparación del pico de aceleración inicial. Modelo 2. Placa A. Ensayo 2.

Se puede concluir, a partir de las comparaciones que se muestran en las tablas anteriores, que ambos modelos han logrado captar adecuadamente el valor máximo de aceleración inicial para las Posiciones 2 y 3, y muestran una diferencia un poco más marcada en la Posición 1.

5.3.3. Comparación de aceleraciones para el Ensayo 1. Placa B

En la Figura 5.4, se comparan el registro experimental de aceleración para el centro de la Placa B con la curva obtenida mediante el programa de Elementos Finitos ABAQUS para esa posición, cuando se consideraron 16 formas modales. Estos resultados corresponden al Modelo 1, puesto que debido a la gran diferencia entre los resultados, se decidió que no era necesario analizar el Modelo 2 ya que los resultados no mejorarían sustancialmente.

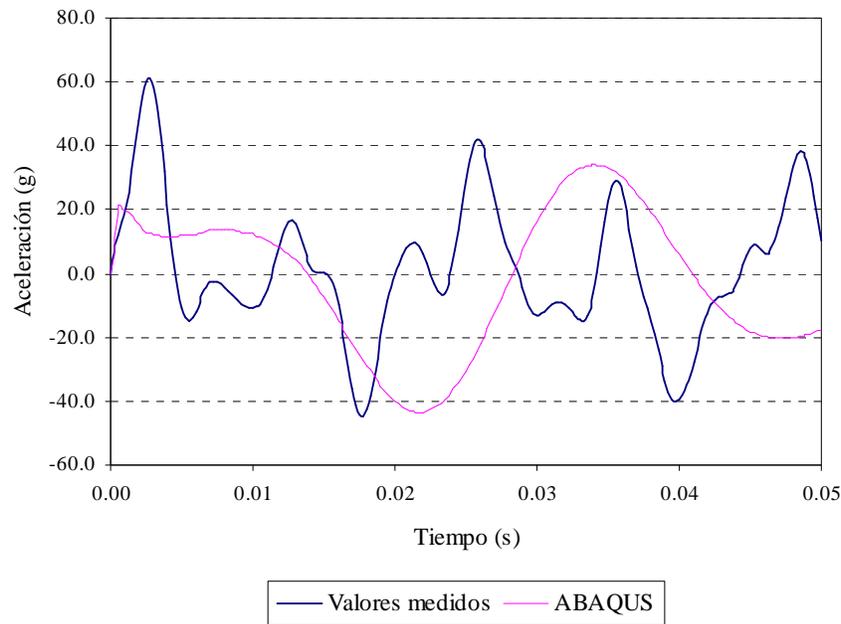


Figura 5.4. Aceleración para 16 formas modales. Modelo 1. Placa B. Ensayo 1.

A partir de los resultados anteriores, se concluyó que para 16 formas modales, el Modelo 1 no fue capaz de representar el comportamiento dinámico estructural.

En la Tabla 5.8, se muestran las diferencias entre los valores máximos de aceleración experimentales y computacionales, cuando se consideraron 16 formas modales.

Aceleración (g)		Diferencia (%)
Experimental	ABAQUS	
61.08	21.39	64.98

Tabla 5.8. Comparación del pico de aceleración inicial. 16 modos. Modelo 1. Placa B.

Es importante destacar la marcada diferencia que se obtuvo para el valor del pico inicial de aceleración cuando se consideraron sólo 16 formas modales. Esto alertó la importancia que tiene incluir en el modelo numérico, la cantidad de formas modales necesarias para representar adecuadamente el comportamiento dinámico de la estructura que se analiza, frente a cargas de tipo impulsivo.

Se muestra en la Figura 5.5, los resultados para el Modelo 1 cuando se utilizaron en el análisis 20 formas modales.

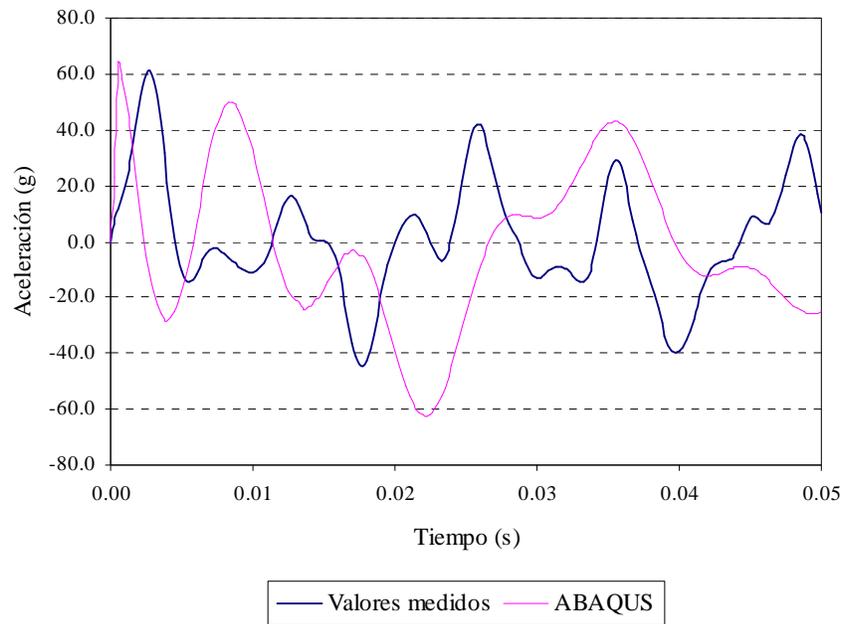


Figura 5.5. Aceleración para 20 formas modales. Modelo 1. Placa B. Ensayo 1.

En este caso, los resultados mostraron un mejor comportamiento del modelo, con una adecuada predicción para el valor de aceleración inicial y un desajuste en frecuencias luego que deja de actuar la onda de presión.

En la siguiente tabla, se muestran las diferencias entre los valores del pico de aceleración inicial experimental y los numéricos para el Modelo 1, cuando se consideraron 20 formas modales.

Aceleración (g)		
Experimental	ABAQUS	Diferencia (%)
61.08	63.96	4.72

Tabla 5.9. Comparación del pico de aceleración inicial. 20 modos. Modelo 1. Placa B.

Una conclusión importante de este análisis es que, cuando se consideraron 20 formas modales, los resultados mejoraron significativamente en lo que respecta a la estimación del valor máximo de aceleración inicial. Este mismo análisis se realizó aumentando el número de modos considerados en el análisis (30, 40) y se encontró que los resultados no variaban sustancialmente.

A partir de lo anterior, se deduce que cuando se trabaja con cargas de tipo impulsivo, resulta importante realizar una serie de pruebas para determinar el número adecuado de frecuencias modales que se utilizarán en el análisis por superposición modal.

En la siguiente figura se comparan la curva experimental con la obtenidas utilizando el programa ABAQUS. Los resultados numéricos corresponden al Modelo 2, formado por 400 elementos.

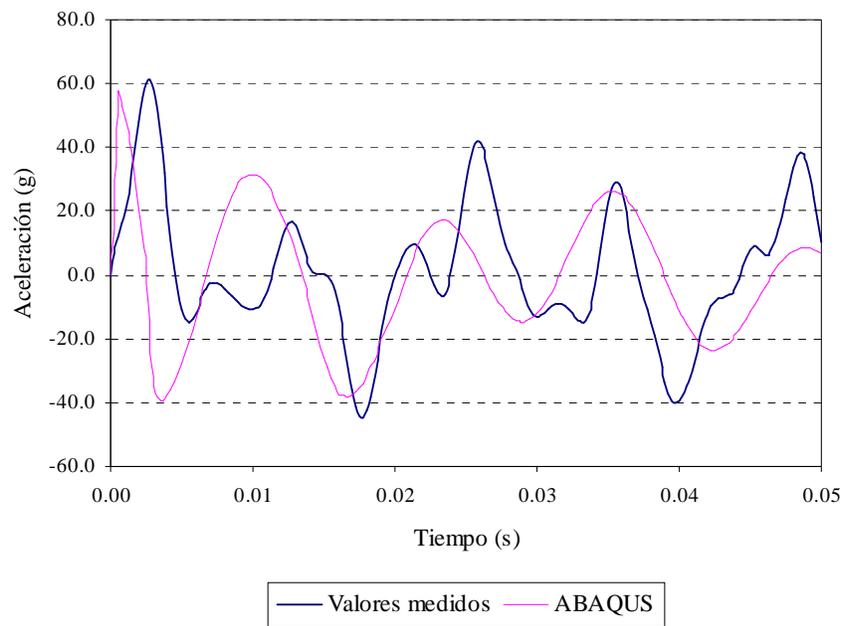


Figura 5.6. Aceleración para 20 formas modales. Modelo 2. Placa B. Ensayo 1.

Nuevamente, los resultados computacionales ajustaron bien con el registro experimental en la zona de vibraciones forzadas, pero luego que cesa de actuar la carga, se observó un desajuste en los valores de las frecuencias.

La Tabla 5.10 muestra las diferencias entre los valores del pico inicial de aceleración para el Modelo 2 con el registro experimental.

Aceleración (g)		Diferencia (%)
Experimental	ABAQUS	
61.08	57.21	6.34

Tabla 5.10. Comparación del pico de aceleración inicial. 20 modos. Modelo 2. Placa B.

Se puede concluir que se obtuvo una muy buena predicción del valor máximo de aceleración inicial.

5.4. SUELOS

En este punto, se presenta la comparación entre los diámetros de los cráteres que se obtuvieron experimentalmente en el marco de esta tesis, con curvas de la literatura y con resultados experimentales previos presentados por *Ambrosini et al* (1998).

En la siguiente tabla se muestran los valores promedio para los diámetros aparentes D y los diámetros reales d de los cráteres (Figura 3.25) que se obtuvieron en los experimentos. Estos valores corresponden a los explosivos apoyados en el suelo.

Ensayo (código)	D (cm)	d (cm)
A1	106.7	46.7
A2	130.0	65.0
A4	150.0	90.7
A7	186.7	108.3
A10	200.0	123.3

Tabla 5.11. Diámetros de los cráteres para cargas apoyadas.

Los resultados experimentales de los diámetros de los cráteres, se compararon con la curva propuesta por *Bull et al* (1998):

$$D(m) = (0.75 \text{ a } 1.07)[W(Kg)]^{1/3} \quad (5.4)$$

y con la ecuación propuesta por *Kinney y Graham* (1985):

$$D(m) = 0.8[W(Kg)]^{1/3} \quad (5.5)$$

la cual tiene una desviación estándar de 30 %. En las ecuaciones anteriores, D es el diámetro del cráter y W es el peso del explosivo detonado equivalente en TNT.

En la Figura 5.7 se comparan los valores experimentales con las curvas que surgen de la ec. (5.4) y en la Figura 5.8 con las que se obtienen de la ec. (5.5).

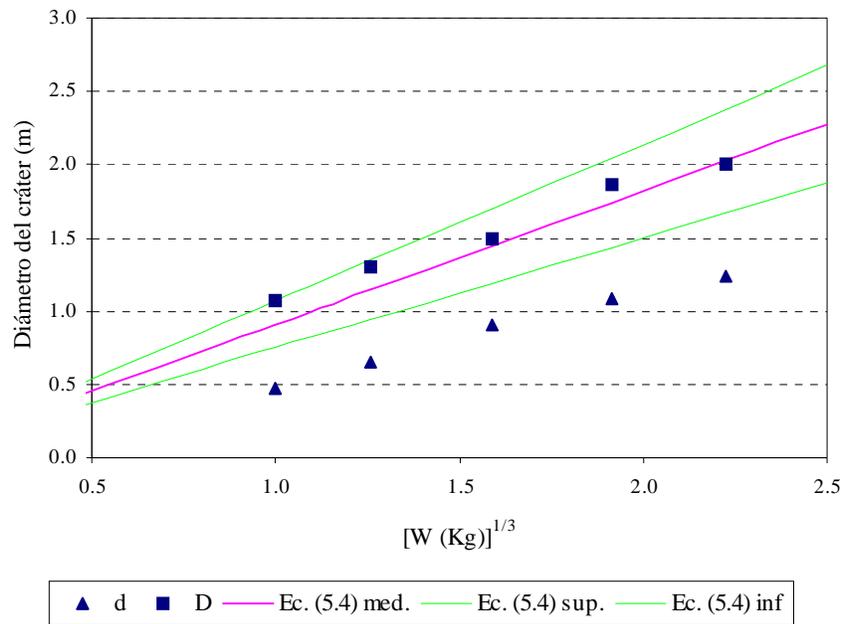


Figura 5.7. Comparación entre los diámetros experimentales y la ecuación de Bull.

A partir de la Figura 5.7, se concluyó que la ec. (5.4) es adecuada para predecir el diámetro aparente de los cráteres originados por la detonación de cargas explosivas apoyadas en el suelo. Sin embargo, los diámetros reales están por debajo de la curva límite inferior.

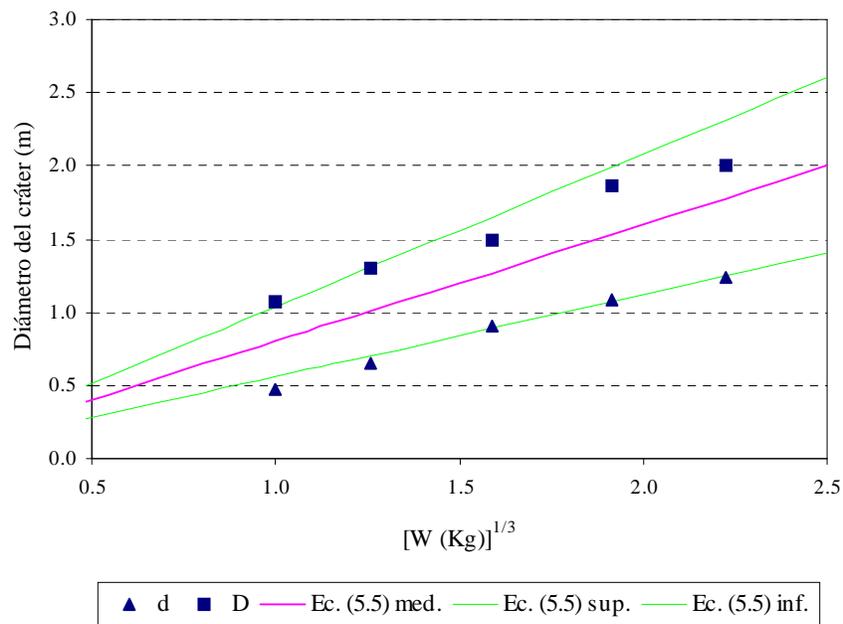


Figura 5.8. Comparación entre los diámetros experimentales y la ecuación de Kinney.

Se observa que los valores de los diámetros aparentes, están comprendidos dentro de las curvas límites. Sin embargo, a diferencia del caso anterior, los valores de los diámetros reales de los cráteres ajustan bien con la curva límite inferior de la ec. (5.5).

En el siguiente gráfico, se muestra la comparación entre los diámetros d de los cráteres obtenidos en los experimentos y los determinados por *Ambrosini et al* (1998).

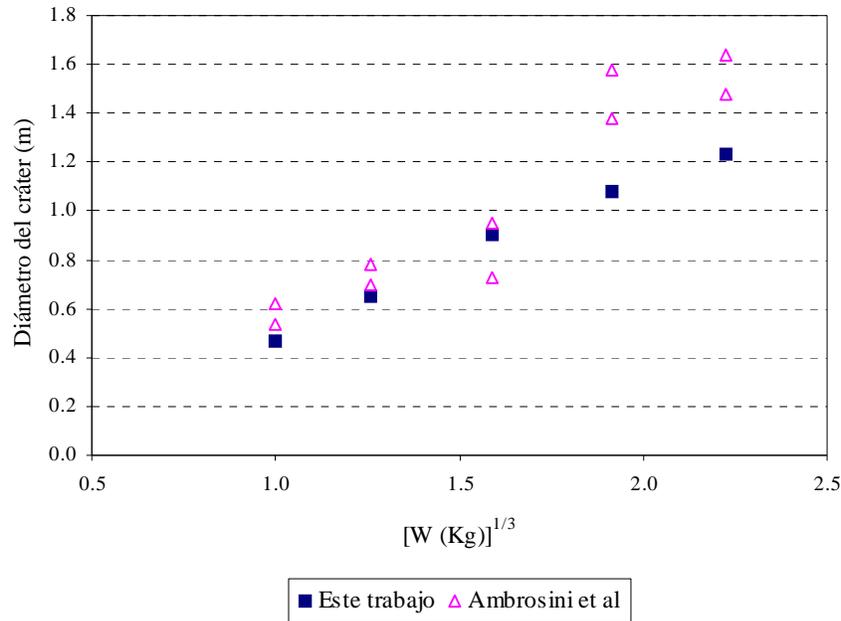


Figura 5.9. Comparación de diámetros experimentales. Explosivos apoyados.

Se observa una muy buena correlación entre los resultados experimentales para las primeras tres cargas explosivas (1, 2 y 4 Kg. de TNT). Sin embargo, para las cargas de 7 y 10 Kg. de TNT, los resultados muestran un leve desajuste.

En la Tabla 5.12 se indican los valores promedio para los diámetros reales d de los cráteres que se obtuvieron para cargas elevadas a 0.50 m sobre el suelo.

Ensayo (código)	d (cm)
B1	-
B2	-
B4	58.3
B7	60.0
B10	76.7

Tabla 5.12. Diámetros de los cráteres para cargas elevadas.

En la Figura 5.10 se comparan los valores mostrados en la tabla anterior con los resultados experimentales presentados por *Ambrosini et al* (1997).

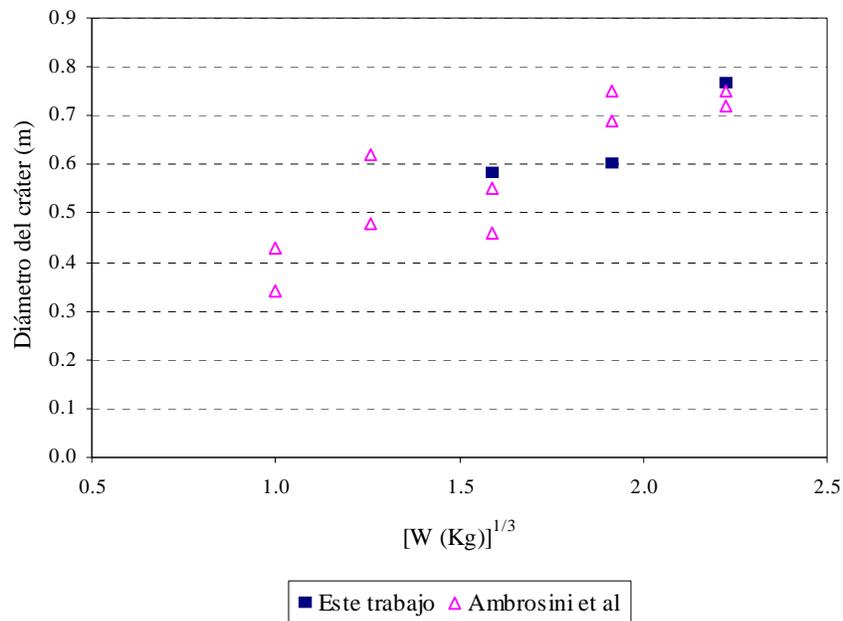


Figura 5.10. Comparación de diámetros experimentales. Explosivos elevados.

En el caso de los experimentos realizados en el marco de este trabajo de tesis, se observó que no hubo formación de cráteres para las cargas explosivas de 1 y 2 Kg. de TNT. Para el caso de las cargas de mayor peso (4, 7 y 10 Kg. de TNT), se puede concluir que los valores experimentales de ambos ensayos, tienen una muy buena correlación entre sí.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES

6.1. INTRODUCCION

En este trabajo, se ha presentado el estudio experimental llevado a cabo sobre estructuras simples y suelos, sometidos a la acción de ondas de presión originadas por la detonación de explosivos.

Por otra parte, se realizó un análisis numérico sobre las estructuras ensayadas y se compararon los resultados obtenidos con los del ensayo. También, para el caso de suelos, se realizó una comparación de los resultados experimentales con curvas propuestas por diversos autores y con otros datos de ensayo.

En este capítulo, se presentan las conclusiones que se obtuvieron a partir del análisis de los resultados y se hace una recomendación de posibles trabajos futuros.

6.2. DISCUSION Y CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados presentados en los Capítulos 3 y 4, y de la comparación realizada en el Capítulo 5, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

6.2.1. Estructuras

- Los registros experimentales de presión, muestran una muy buena correlación con los resultados que se predicen a partir de ábacos y fórmulas.
- Cuando se modela una estructura para determinar su respuesta dinámica bajo la acción de una carga de tipo impulsivo, resulta de fundamental importancia la cantidad de modos de vibración que se consideran. Como este tipo de carga, en general, excita los modos superiores, la respuesta está fuertemente influenciada por aquel valor. Para ilustrar esta afirmación, en la Figura 6.1 se muestran los resultados obtenidos con el programa ABAQUS cuando se consideran en el análisis 16 y 20 modos.

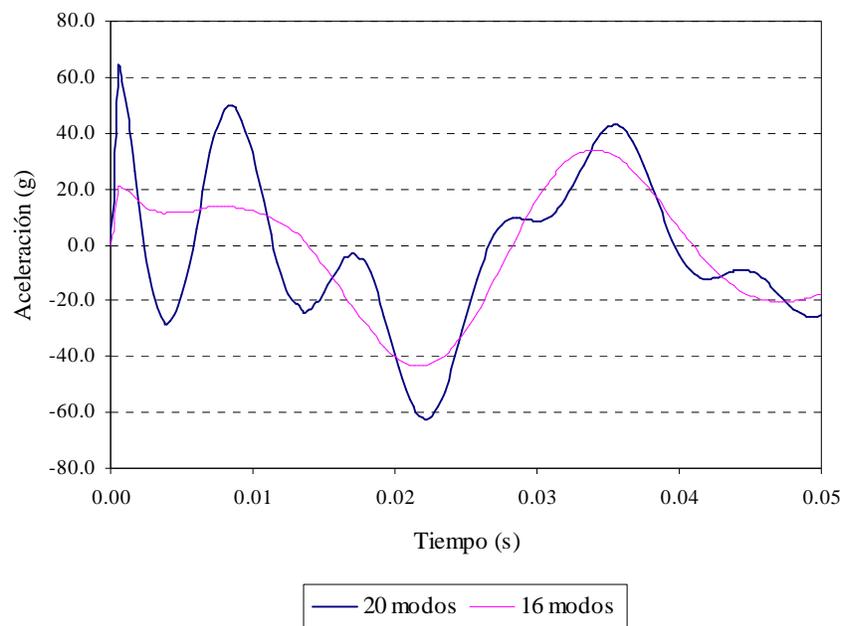


Figura 6.1. Comparación de la respuesta para 16 y 20 modos. Placa B. Ensayo 1.

- Los modelos computacionales deben tener el nivel de discretización acorde con la cantidad de modos que se van a incluir en la respuesta, puesto que mallas más refinadas son capaces de captar las frecuencias más altas con menor error, y como dichas frecuencias intervienen en forma significativa en la respuesta obtenida, resulta de especial importancia su correcta determinación. Para resaltar este hecho, en la Tabla 6.1 se presentan las frecuencias naturales 15 a 20 de las Placas A y B obtenidas con el Modelo 1 (150 y 100 elementos respectivamente) y el Modelo 2 (600 y 400 elementos respectivamente). Los resultados numéricos corresponden a los obtenidos con el programa ABAQUS.

Modo	Placa A			Placa B		
	Modelo 1	Modelo 2	Dif. (%)	Modelo 1	Modelo 2	Dif. (%)
15	47.5110	43.8250	-8.41	80.7910	70.9290	-13.90
16	49.2450	47.4990	-3.68	101.7200	78.0690	-30.29
17	51.7410	48.7200	-6.20	109.2600	78.1350	-39.83
18	63.8080	60.1410	-6.10	109.3600	84.8650	-28.86
19	65.1590	61.4890	-5.97	113.7200	84.8650	-34.00
20	66.6560	63.2350	-5.41	113.7200	89.1340	-27.58

Tabla 6.1. Frecuencias naturales para los Modelos 1 y 2. Placas A y B.

- Resultó en una mejora significativa de los resultados obtenidos la consideración de la carga usada en el análisis como la superposición temporal de las presiones en las caras anterior y posterior de las placas. Sin embargo, le diferencia en el pico de aceleración en la parte superior de la Placa A (libre) indica que se debe mejorar la expresión de la carga aplicada en ese tipo de contornos.

6.2.2. Suelos

- Los resultados para los diámetros de los cráteres que se originan a partir de la detonación de cargas explosivas apoyadas en el suelo, muestran un buen ajuste con las curvas propuestas en la literatura y con otros resultados experimentales. Sin embargo puede sugerirse que, para cargas pequeñas, la expresión a utilizar sea:

$$D(m) = 0.56 [W(Kg)]^{1/3} \quad (6.1)$$

- Los diámetros de los cráteres para cargas elevadas muestran una buena correlación con otros resultados experimentales disponibles. Sin embargo, estos valores son significativamente inferiores a los que se obtienen para cargas apoyadas de igual peso.

6.3. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

A partir de las conclusiones anteriores, se desprenden un conjunto de recomendaciones para trabajos futuros:

- Realizar ensayos sobre estructuras más complejas, con el fin de proponer guías de diseño confiables y determinar los parámetros de importancia para la modelación teórico-computacional de las mismas.

- Realizar ensayos sobre materiales, que provoquen una respuesta no lineal física del mismo, con el objetivo de profundizar en el conocimiento de la dependencia del comportamiento con la velocidad de deformación. Estos datos podrían usarse para poner a punto modelos materiales.

- Como ya se mencionó, un método para estimar la cantidad de explosivo detonado en los ataques deliberados contra construcciones civiles es a partir de la inspección del cráter resultante luego de la explosión. Por lo tanto, resulta importante incrementar el caudal de datos respecto a las dimensiones de los cráteres que se producen a partir de la detonación de explosivos elevados, libres o sobre vehículos.

- Es de creciente importancia la utilización de explosivos para la determinación de frecuencias naturales de estructuras de grandes dimensiones y para la generación de sismos artificiales para ensayo de prototipos. La experiencia ganada en los ensayos realizados permitiría poner a punto técnicas confiables y seguras para este fin.

- Las cargas dinámicas asociadas con explosiones provocan elevadas velocidades de deformación en el material. Este tipo de comportamiento de dependencia de la velocidad de deformación debe ser incluido en los modelos teórico-numéricos. En general, existen muy pocos modelos para materiales friccionales, por lo que resultaría adecuado formular un esquema de análisis de suelos sometidos a cargas dinámicas genéricas e impulsivas, con una modelación más realista de los mismos que la utilizada en la actualidad.

APENDICE A

ONDA DE PRESION ORIGINADA POR EXPLOSIONES EN AIRE

El objetivo de este Apéndice es describir las características y los parámetros más importantes de la onda de presión que se origina a partir de la detonación de una carga explosiva en el aire.

A.1 DESCRIPCION DE LA ONDA DE PRESION

La detonación de un explosivo genera la expansión violenta de gases calientes originando una onda de presión, que se mueve hacia afuera desde el lugar de detonación a alta velocidad. Cuando el frente de presión arriba al punto de observación se produce un brusco aumento de la presión y una posterior succión (Figura A.1). La fase negativa de la onda de presión es usualmente de mayor duración que la fase positiva. El valor máximo de la presión negativa es pequeño comparado con el valor de la sobrepresión positiva pico. A medida que la onda de presión viaja en el aire desde el punto de detonación, el pico de sobrepresión decrece. El pico de presión básicamente depende de la cantidad de explosivo y de la distancia al punto de observación.

Cuando el frente de onda arriba a un punto dado comienza un viento transitorio, que origina una presión dinámica proporcional al cuadrado de la velocidad del viento y a la densidad del aire detrás del frente de presión. La presión dinámica crece rápidamente cuando el frente de onda arriba al punto de observación y comienza a decrecer, pero alcanza el cero

un tiempo después que la sobrepresión (Figura A.1). Cuando el viento deja de actuar desde el lugar de la explosión, la sobrepresión está en la fase negativa. Durante esta fase se produce un vacío parcial, el aire es atraído y el viento comienza a actuar en la dirección opuesta, pero a menor velocidad. Poco tiempo después que la sobrepresión mínima ha pasado, el viento cambia de dirección nuevamente y actúa desde el punto de explosión.

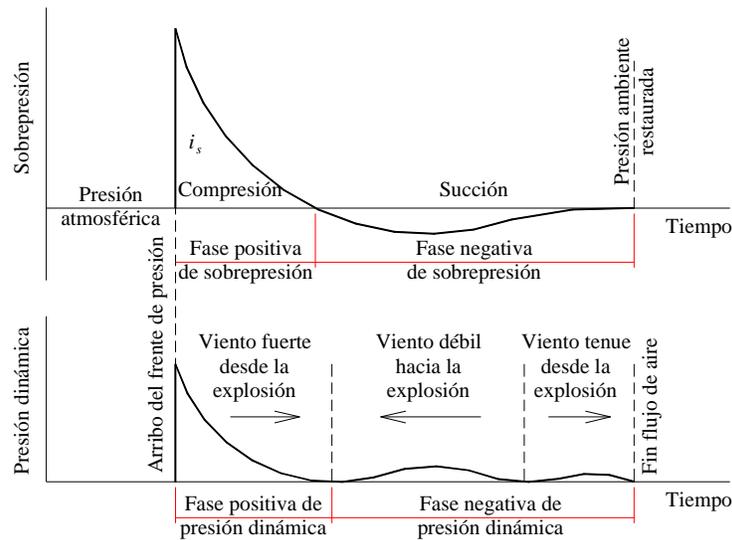


Figura A.1. Sobrepresión y presión dinámica vs. tiempo, para una posición fija.

A.2 REFLEXION DE LA ONDA DE PRESION EN UNA SUPERFICIE

Cuando la onda de presión incidente desde una explosión en el aire alcanza un medio más denso (tierra, agua, muro) parte de la energía se refleja. El valor del pico de presión de la onda reflejada dependerá del valor de la onda incidente y el ángulo al cual ésta alcanza a la superficie. La naturaleza de la superficie también tiene un efecto importante. Una superficie ideal o aproximadamente ideal refleja toda la energía que la alcanza, y las propiedades de la onda de presión están libres de efectos térmicos y mecánicos. Una superficie donde estos efectos son significantes, se dice que es no-ideal.

La variación en la sobrepresión en una posición cercana al *punto de tierra cero* (proyección sobre el terreno de la vertical que pasa por la carga) será como se indica en la Figura A.2. Esta zona es la región de reflexión *regular*, es decir, donde la onda incidente y reflejada no se unen, excepto en la superficie del suelo. Cualquier objeto ubicado en esta

región, estará sometido a dos ondas de presión, la primera debido a la onda incidente y la segunda a la onda reflejada, la cual arriba poco tiempo después que la primera.

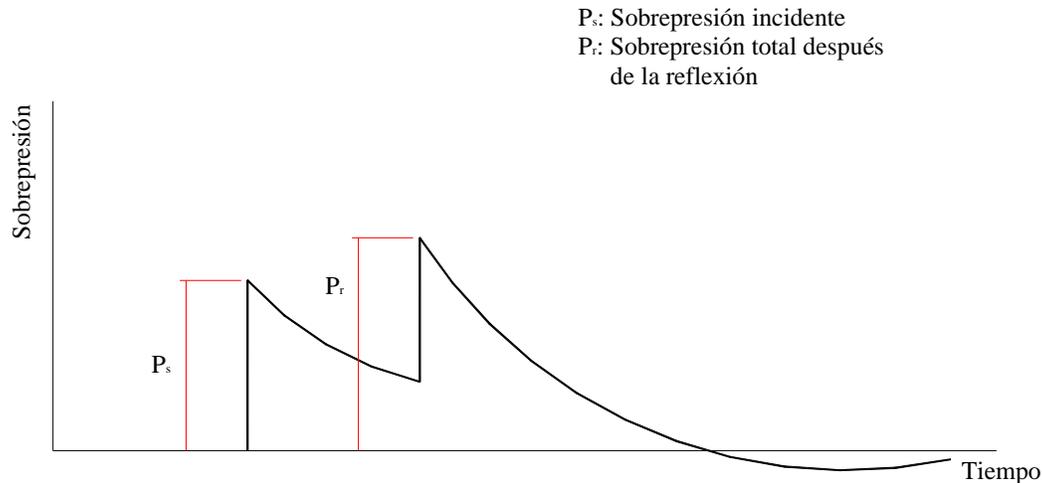


Figura A.2. Onda de presión en la zona de reflexión regular.

En el caso anterior se asume que ambas ondas viajan aproximadamente a la misma velocidad. Sin embargo, la onda reflejada siempre viaja a través del aire que ha sido calentado y comprimido por el pasaje de la onda incidente, lo cual hace que se mueva a mayor velocidad. La situación en una posición próxima al *punto de tierra cero* se ve en la Figura A.3a. En un estado posterior, más lejos desde aquel punto (Figura A.3b) el frente más vertical de la onda reflejada muestra que está viajando más rápido y alcanzando a la onda incidente. En el estado representado por la Figura A.3c, la onda reflejada próxima al suelo alcanzó a la onda incidente y se unieron para formar un solo frente llamado *frente Mach*.

Este proceso se llama reflexión *irregular* o *Mach* y la zona donde las ondas se unen región *Mach*. El punto en el cual se unen los tres frentes se llama punto triple. La configuración de los tres frentes de presión se llama *Mach Y* (Figura A.4). A medida que la onda reflejada continua alcanzando a la incidente, el punto triple sube y la altura del *frente Mach* se incrementa. Al comienzo de la reflexión Mach se produce un aumento en la sobrepresión, y esto origina que un determinado valor de sobrepresión se produzca a un rango mayor que el correspondiente a una reflexión regular.

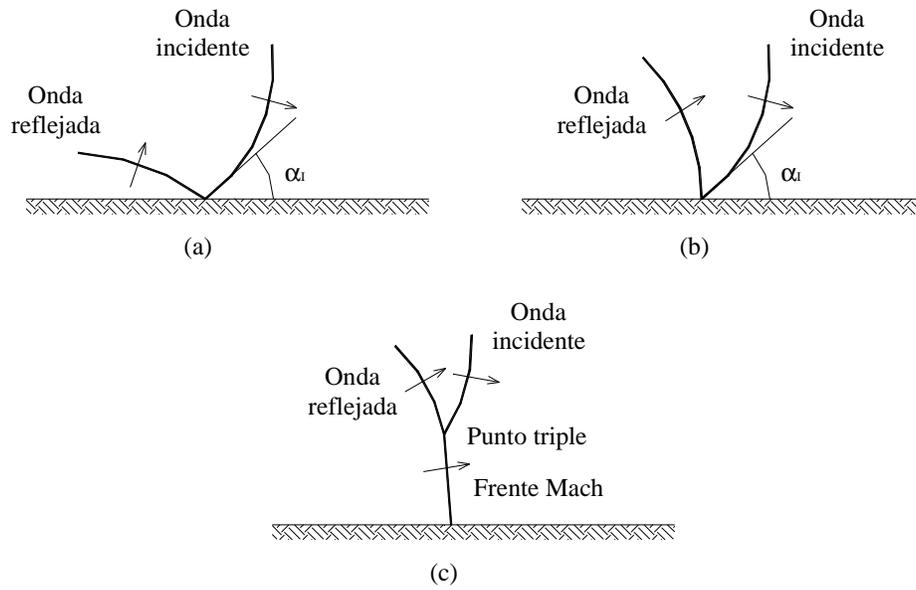


Figura A.3. Proceso de reflexión Mach.

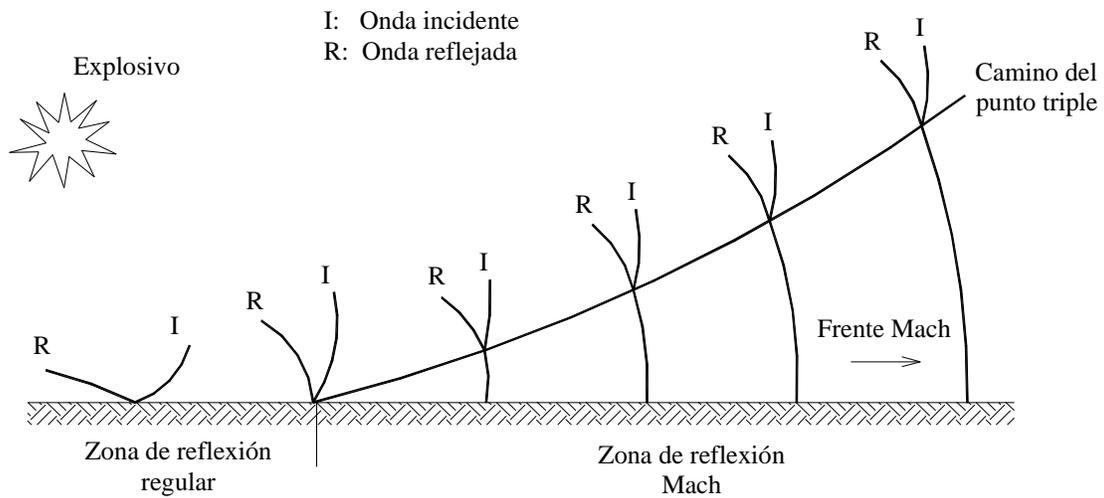


Figura A.4. Progreso de la reflexión Mach.

En el caso de una detonación en contacto con la superficie, la onda incidente y reflejada se unen instantáneamente y hay un solo frente de presión, con forma semiesférica.

A.3 PARAMETROS DEL FRENTE DE ONDA

Las propiedades de la onda de presión en la región de reflexión regular son algo complejas. Dependen del ángulo de incidencia entre la onda y el medio donde se refleja y de la sobrepresión. Para el caso de una detonación en contacto con la superficie y en la región Mach bajo el camino del punto triple, los parámetros en el frente de la onda de presión están relacionados por las ecuaciones de Rankine-Hugoniot (*Smith y Hetherington (1994)*). La ecuación para la velocidad del frente de onda U_s , la velocidad de las partículas detrás del frente de onda u_s , la densidad del aire detrás del frente de onda ρ_s , y la presión dinámica máxima q_s son:

$$\begin{aligned} U_s &= \sqrt{\frac{6p_s + 7p_a}{7p_a}} a_0 & u_s &= \frac{5p_s}{7p_a} \sqrt{\frac{7p_a}{7p_a + 6p_s}} a_0 \\ \rho_s &= \frac{6p_s + 7p_a}{p_s + 7p_a} \rho_0 & q_s &= \frac{5p_s^2}{2(p_s + 7p_a)} \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

donde p_s es el pico de sobrepresión, p_a es la presión del aire ambiente, ρ_0 es la densidad del aire a presión ambiente y a_0 es la velocidad del sonido en el aire a presión ambiente delante de la onda de presión.

Para un ángulo de incidencia α_i de 0° , el pico de presión reflejada está dado por:

$$p_r = 2p_s \left[\frac{7p_a + 4p_s}{7p_a + p_s} \right] \quad (\text{A.2})$$

El incremento en la sobrepresión reflejada sobre el valor de $(2p_s)$ se debe a la presión dinámica del viento. Cuando el ángulo de incidencia α_i de la onda de presión con una superficie es 90° no se produce reflexión. En el caso que esté comprendido entre 0° y 90° se producirá una reflexión regular o una reflexión Mach.

Si se define el coeficiente de reflexión C_r como la relación de p_r a p_s , entonces la relación anterior predice que C_r variará desde 2 hasta 8, dependiendo si p_s es mucho menor o mucho mayor que la presión ambiente respectivamente. Sin embargo se han medido valores de C_r de hasta 20.

Otro parámetro importante es el impulso específico de la onda i_s , que tiene en cuenta la duración de la fase positiva y la variación de la sobrepresión durante este tiempo. Se puede

definir como el área bajo la curva sobrepresión-tiempo desde el tiempo de arribo t_a hasta el final de la fase positiva, dado por:

$$i_s = \int_{t_a}^{t_a+t_s} p_s(t).dt \quad (\text{A.3})$$

El impulso dinámico de la fase positiva se define de manera análoga, reemplazando $p_s(t)$ y t_s por $q_s(t)$ y t_{qs} , respectivamente.

A.4 LEYES DE ESCALA DE LAS ONDAS DE PRESION

El uso de las leyes de escala permite representar, en forma simple, los parámetros correspondientes a ondas de presión para un amplio rango de energías.

La ley de escala más usada para ondas de presión es la formulada por Hopkinson y Cranz, conocida como la ley de escala de la raíz cúbica.

Si se define la distancia escalada Z como:

$$Z = \frac{D}{W^{1/3}} \quad (\text{A.4})$$

entonces la ley anterior establece (*Smith y Hetherington (1994)*):

Similares ondas de presión se producen a iguales distancias escaladas, cuando se detonan en la misma atmósfera, dos cargas explosivas de similar geometría y del mismo explosivo, pero de tamaño diferente.

Teóricamente, una determinada sobrepresión ocurrirá a una distancia desde la explosión que es proporcional a la raíz cúbica del peso del explosivo. De acuerdo a esta ley, si D_1 es la distancia desde el centro de la carga y W_1 el peso del explosivo para el cual se alcanza una cierta sobrepresión o presión dinámica, entonces para una carga de peso W esta misma presión ocurrirá a una distancia D dada por:

$$\frac{D}{D_1} = \left(\frac{W}{W_1} \right)^{1/3} \Rightarrow D = \frac{D_1}{W_1^{1/3}} \cdot W^{1/3} \quad (\text{A.5})$$

Es práctica común usar el TNT como explosivo de referencia. Por lo tanto, para determinar las características de la onda de presión para otro tipo de explosivo se debe convertir el peso del mismo a su equivalente en TNT. Una forma de hacer esto, es multiplicar

el peso del explosivo por un factor de conversión, que se obtiene como la relación entre su energía específica y la correspondiente al TNT.

Cuando se comparan detonaciones en aire de diferentes energías, es conveniente introducir una altura escalada de detonación, definida como:

$$H = \frac{h}{W^{1/3}} \quad (\text{A.6})$$

donde H es la altura escalada de detonación, h la altura real de detonación y W el peso de explosivo detonado.

Para detonaciones de diferentes energías que tienen *la misma altura escalada de detonación*, se puede aplicar la escala de la raíz cúbica desde el punto de tierra cero, de igual forma que para distancias desde la explosión.

La escala de la raíz cúbica también se puede aplicar al tiempo de arribo del frente de presión, la duración de la fase positiva y el impulso de la fase positiva. Las relaciones para detonaciones con igual altura escalada se pueden expresar como:

$$\frac{t}{t_1} = \frac{D}{D_1} = \left(\frac{W}{W_1} \right)^{1/3} \quad \frac{i}{i_1} = \frac{D}{D_1} = \left(\frac{W}{W_1} \right)^{1/3} \quad (\text{A.7})$$

donde t_1 representa el tiempo de arribo o la duración de la fase positiva e i_1 es el impulso de la fase positiva para una explosión de referencia de energía W_1 , y t e i se refieren a una explosión de energía W ; D_1 y D son las distancias desde el punto de tierra cero.

Para el caso de explosiones que se producen en condiciones atmosféricas que difieren de las del nivel del mar, la ley de escala más usada es la de Sachs (*Smith y Hetherington*, (1994)).

APENDICE B

DESARROLLO DE ECUACIONES

El objetivo del presente Apéndice, es presentar las ecuaciones que fundamentan los métodos de resolución estructural presentados en el Capítulo 2.

B.1 METODOS DE UN GRADO DE LIBERTAD

B.1.1 Factores de transformación

Como se explicó en el punto 2.2.4.1, la base de este método de resolución, consiste en reducir el sistema real a uno equivalente de un grado de libertad, por medio de *factores de transformación*.

En este punto se indica la forma de obtener los mismos para el caso de una estructura con respuesta en el rango lineal (*Biggs (1964)*).

a) Masa

La masa equivalente del sistema de un grado de libertad está dada por

$$M_e = \int m \phi_{(x)}^2 dx \quad (\text{B.1})$$

donde m es la masa la estructura y $\phi_{(x)}$ es la función de forma asumida. Se define el *factor de masa* K_m como la relación de la masa equivalente respecto a la masa total de la estructura real:

$$K_m = \frac{M_e}{M_l} \quad (\text{B.2})$$

b) *Distribución de la carga*

La fuerza equivalente está dada por

$$F_e = \int p_{(x)} \phi_{(x)} dx \quad (\text{B.3})$$

siendo $p(x)$ la forma en que varía la carga que actúa sobre la estructura con la posición.

El *factor de carga* K_l se define como la relación de la carga equivalente a la fuerza real total:

$$K_l = \frac{F_e}{F_l} \quad (\text{B.4})$$

Lo anterior se aplica a la magnitud de la fuerza, porque tanto la carga real como la equivalente tienen la misma variación en el tiempo.

c) *Función de resistencia*

La resistencia de un elemento es la fuerza interna que tiende a restablecer al mismo a su posición estática descargada. La resistencia máxima se define como la carga total que el elemento podría soportar estáticamente con la distribución dada. La rigidez es numéricamente igual a la carga total que con esa distribución produciría un desplazamiento unitario en el punto donde el desplazamiento es igual al del sistema equivalente. De lo anterior surge que el *factor de resistencia* K_r debe ser igual al factor de carga K_l . Por lo tanto (*Biggs (1964)*):

$$K_r = K_l = \frac{R_{me}}{R_m} = \frac{k_e}{k} \quad (\text{B.5})$$

B.1.2 Integración directa de la ecuación de movimiento

Se presenta en este punto, la formulación incremental de la ecuación de equilibrio dinámico para sistemas de un grado de libertad.

Consideremos la estructura que se muestra en la Figura B.1, y las fuerzas que actúan sobre la misma. Supongamos que las fuerzas del resorte y amortiguamiento varían en el tiempo, al igual que la carga aplicada (*Clough y Penzien (1975)*).

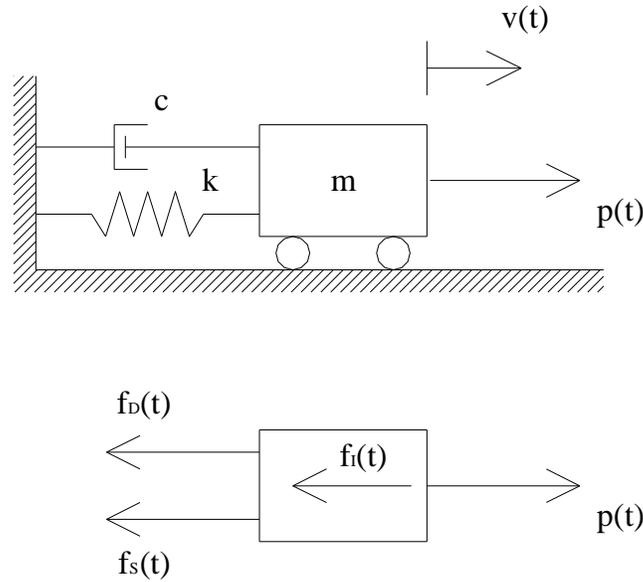


Figura B.1. Sistema dinámico de un grado de libertad.

En cualquier instante de tiempo t el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre la masa m es:

$$f_I(t) + f_D(t) + f_S(t) = p(t) \quad (\text{B.6})$$

mientras un corto tiempo Δt posterior la ecuación será:

$$f_I(t + \Delta t) + f_D(t + \Delta t) + f_S(t + \Delta t) = p(t + \Delta t) \quad (\text{B.7})$$

Restando ambas ecuaciones se obtiene la ecuación incremental de movimiento para el tiempo t :

$$\Delta f_I(t) + \Delta f_D(t) + \Delta f_S(t) = \Delta p(t) \quad (\text{B.8})$$

Las fuerzas en forma incremental se pueden escribir como sigue:

$$\Delta f_I(t) = m\Delta\ddot{v}(t) \quad \Delta f_D(t) = c(t)\Delta\dot{v}(t) \quad \Delta f_S(t) = k(t)\Delta v(t) \quad (\text{B.9})$$

donde $c(t)$ y $k(t)$ son el amortiguamiento y la rigidez correspondientes a la velocidad y desplazamiento durante el intervalo. Reemplazando las expresiones anteriores en la ec. (B.8) se obtiene la forma final para la ecuación incremental de equilibrio en el instante t :

$$m\Delta\ddot{v}(t) + c(t)\Delta\dot{v}(t) + k(t)\Delta v(t) = \Delta p(t) \quad (\text{B.10})$$

a) *Método de la aceleración lineal. Método implícito.*

Este método forma parte del conjunto de los métodos implícitos de integración paso a paso que permiten resolver la ec. (2.11). En el mismo, se asume que la aceleración varía linealmente en el intervalo de tiempo mientras las propiedades del sistema permanecen constantes durante el mismo. Las expresiones para la variación de la aceleración, velocidad y desplazamiento en el intervalo son:

$$\begin{aligned}\ddot{v}(\tau) &= \ddot{v}(t) + \frac{\Delta\ddot{v}}{\Delta t} \tau & \dot{v}(\tau) &= \dot{v}(t) + \ddot{v}(t)\tau + \frac{\Delta\ddot{v}}{\Delta t} \frac{\tau^2}{2} \\ v(\tau) &= v(t) + \dot{v}(t)\tau + \ddot{v}(t) \frac{\tau^2}{2} + \frac{\Delta\ddot{v}}{\Delta t} \frac{\tau^3}{6}\end{aligned}\quad (\text{B.11})$$

Evaluando las ecuaciones anteriores en el extremo del intervalo ($\tau \equiv \Delta t$) y usando el desplazamiento incremental como variable para el análisis, la ec. (B.11) toma la forma:

$$m \left[\frac{6}{\Delta t^2} \Delta v(t) - \frac{6}{\Delta t} \dot{v}(t) - 3\ddot{v}(t) \right] + c(t) \left[\frac{3}{\Delta t} \Delta v(t) - 3\dot{v}(t) - \frac{\Delta t}{2} \ddot{v}(t) \right] + k(t) \Delta v(t) = \Delta p(t) \quad (\text{B.12})$$

La expresión anterior se puede escribir como:

$$\tilde{k}(t) \Delta v(t) = \tilde{\Delta p}(t) \quad (\text{B.13})$$

donde:

$$\tilde{k}(t) = k(t) + \frac{6}{\Delta t^2} m + \frac{3}{\Delta t} c(t) \quad (\text{B.14})$$

$$\tilde{\Delta p}(t) = \Delta p(t) + m \left[\frac{6}{\Delta t} \dot{v}(t) + 3\ddot{v}(t) \right] + c(t) \left[3\dot{v}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{v}(t) \right] \quad (\text{B.15})$$

La ec. (B.13) es equivalente a una relación de equilibrio incremental estático, y se puede resolver dividiendo la carga incremental por la rigidez. El comportamiento dinámico se tiene en cuenta por la inclusión de los efectos de inercia y amortiguamiento en los términos de carga (ec. (B.14)) y rigidez efectiva (ec. (B.15)). Debido a las hipótesis del método, se produce una acumulación de errores de paso a paso, que se puede evitar imponiendo el cumplimiento de la condición de equilibrio en el final de cada paso del análisis:

$$\ddot{v}(t) = \frac{1}{m} [p(t) - f_D(t) - f_S(t)] \quad (\text{B.16})$$

Este método es *condicionalmente estable* y dará una solución convergente si el incremento de tiempo es menor que $1/2$ del período de vibración del sistema.

Newmark propone una modificación para las expresiones del desplazamiento y la velocidad, incorporándoles los parámetros β y γ .

$$v(\tau) = v(t) + \dot{v}(t)\tau + \ddot{v}(t)\frac{\tau^2}{2} + \beta \frac{\Delta\ddot{v}}{\Delta t} \tau^3 \quad (\text{B.17})$$

$$\dot{v}(\tau) = \dot{v}(t) + \ddot{v}(t)\tau + \gamma\Delta\ddot{v}(t)\tau \quad (\text{B.18})$$

El parámetro γ introduce un amortiguamiento artificial, que desaparece para $\gamma = 1/2$. Cuando $\beta = 1/6$ y $\gamma = 1/2$, se obtiene el método de la aceleración lineal.

b) Método explícito

Para formular el procedimiento explícito de resolución de la ec. (B.11), se aproximan la velocidad y la aceleración por el método de la diferencia finita central.

Este método es *condicionalmente estable* y será convergente para valores de incremento de tiempo menores que 0.318 del período del sistema.

B.2 METODOS DE MULTIPLES GRADOS DE LIBERTAD

B.2.1 Integración directa de las ecuaciones de movimiento

A continuación se desarrollan las ecuaciones incrementales de equilibrio dinámico para sistemas de múltiples grados de libertad (*Clough y Penzien (1975)*).

Tomando la diferencia entre las relaciones de equilibrio para los tiempos t y $t + \Delta t$ la ecuación incremental de equilibrio toma la forma:

$$\Delta\mathbf{f}_I(t) + \Delta\mathbf{f}_D(t) + \Delta\mathbf{f}_S(t) = \Delta\mathbf{p}(t) \quad (\text{B.19})$$

Los incrementos de fuerzas en esta ecuación se pueden expresar como:

$$\Delta\mathbf{f}_I(t) = \mathbf{m}\Delta\ddot{\mathbf{v}}(t) \quad \Delta\mathbf{f}_D(t) = \mathbf{c}(t)\Delta\dot{\mathbf{v}}(t) \quad \Delta\mathbf{f}_S(t) = \mathbf{k}(t)\Delta\mathbf{v}(t) \quad (\text{B.20})$$

Los coeficientes de influencia c_{ij} y k_{ij} de las matrices de amortiguamiento y rigidez incremental $\mathbf{c}(t)$ y $\mathbf{k}(t)$, respectivamente, se determinan para cada incremento de tiempo.

Sustituyendo las ecs. (B.20), la ecuación incremental de movimiento (ec. (B.19)) es

$$\mathbf{m}\Delta\ddot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{c}(t)\Delta\dot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{k}(t)\Delta\mathbf{v}(t) = \Delta\mathbf{p}(t) \quad (\text{B.21})$$

La ecuación anterior expresa las N ecuaciones incrementales de equilibrio del sistema analizado.

a) *Método de la aceleración lineal.*

La operación básica en la solución paso a paso es convertir las ecuaciones diferenciales simultáneas de movimiento, a un conjunto de ecuaciones algebraicas simultáneas. Para ello se establece una relación simple entre desplazamiento, velocidad y aceleración que se asume válida para un incremento corto de tiempo.

En este método se considera una variación lineal en el tiempo para el vector aceleración, lo cual conduce a una variación cuadrática para el vector velocidad y cúbica para el vector desplazamiento. De forma análoga que para SDOF, se obtiene:

$$\tilde{\mathbf{k}}(t)\Delta\mathbf{v}(t) = \Delta\tilde{\mathbf{p}}(t) \quad (\text{B.22})$$

donde:

$$\tilde{\mathbf{k}}(t) = \mathbf{k}(t) + \frac{6}{\Delta t^2} \mathbf{m} + \frac{3}{\Delta t} \mathbf{c}(t) \quad (\text{B.23})$$

$$\Delta\tilde{\mathbf{p}}(t) = \Delta\mathbf{p}(t) + \mathbf{m} \left[\frac{6}{\Delta t} \dot{\mathbf{v}}(t) + 3\ddot{\mathbf{v}}(t) \right] + \mathbf{c}(t) \left[3\dot{\mathbf{v}}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{\mathbf{v}}(t) \right] \quad (\text{B.24})$$

En la ec. (B.22), $\tilde{\mathbf{k}}(t)$ y $\Delta\tilde{\mathbf{p}}(t)$ se pueden interpretar como la matriz de rigidez dinámica efectiva y el incremento de carga efectivo, respectivamente. Para llevar a cabo el análisis, se debe evaluar $\tilde{\mathbf{k}}(t)$ a partir de las propiedades de masa, amortiguamiento y rigidez en ese paso y $\Delta\tilde{\mathbf{p}}(t)$ a partir de los vectores de velocidad y aceleración en el comienzo del paso, y del incremento de carga durante ese paso. Luego $\Delta\mathbf{v}(t)$ se evalúa a partir de la ec. (B.22) por algún método de resolución de ecuaciones. El cambio de $\mathbf{c}(t)$ y $\mathbf{k}(t)$ en problemas no lineales requiere una actualización paso a paso, lo cual implica un mayor esfuerzo computacional.

Luego de calculado $\Delta \mathbf{v}(t)$, el incremento del vector velocidad se determina por la expresión:

$$\Delta \dot{\mathbf{v}} = \frac{3}{\Delta t} \Delta \mathbf{v}(t) - 3\dot{\mathbf{v}}(t) - \frac{\Delta t}{2} \ddot{\mathbf{v}}(t) \quad (\text{B.25})$$

Los vectores de desplazamiento y velocidad en el final del incremento de tiempo serán:

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + \Delta \mathbf{v}(t) \quad \dot{\mathbf{v}}(t + \Delta t) = \dot{\mathbf{v}}(t) + \Delta \dot{\mathbf{v}}(t) \quad (\text{B.26})$$

El vector aceleración, se calcula a partir de la condición de equilibrio dinámico en el tiempo $t + \Delta t$:

$$\ddot{\mathbf{v}}(t + \Delta t) = \mathbf{m}^{-1} [\mathbf{p}(t + \Delta t) - \mathbf{f}_D(t + \Delta t) - \mathbf{f}_s(t + \Delta t)] \quad (\text{B.27})$$

donde $\mathbf{f}_D(t + \Delta t)$ y $\mathbf{f}_s(t + \Delta t)$ representan los vectores de fuerzas de amortiguamiento y rigidez, respectivamente, evaluados para la velocidad y desplazamiento en el tiempo $t + \Delta t$ (así como la historia de carga si el material tiene propiedades dependientes de la historia).

APENDICE C

ONDA DE PRESION EN SUELOS ORIGINADA POR EXPLOSIONES

En este Apéndice, se describen los parámetros que caracterizan la onda de presión que se origina en los suelos, a partir de la detonación de una carga explosiva enterrada o próxima a la superficie.

C.1 ACCION DE LAS EXPLOSIONES EN LOS SUELOS

Todos las explosiones cerca o bajo la superficie del suelo causarán ondas de superficie y ondas de cuerpo. La componente isotrópica del pulso de tensión transitorio causa compresión y dilatación del suelo o roca, con movimientos de partículas paralelos a la dirección de propagación de la onda, conocidas como *ondas de compresión o P*. La componente desviadora del pulso de tensión causa distorsión o corte del suelo, con movimiento de las partículas perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Estas se conocen como *ondas de corte o S*. Cerca de la superficie del suelo las partículas adoptan un movimiento circular, debido a las *ondas de Rayleigh o R* (Smith y Hetherington, (1994)).

Como regla general, las ondas *P* y *S* dominan a corta distancia en el caso de explosiones enterradas, mientras las ondas *R* dominan para explosiones superficiales. Para explosiones enterradas a gran distancia dominan las ondas *R*, debido a su menor tasa de disminución con la posición.

La velocidad de propagación de las ondas depende principalmente de la densidad y rigidez del suelo. Las ondas R y S viajan aproximadamente a la misma velocidad dada por (Smith y Hetherington, (1994)):

$$c_R \approx c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (\text{C.1})$$

donde G es el módulo de elasticidad transversal del suelo.

La velocidad de propagación de las ondas P es:

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \quad (\text{C.2})$$

siendo λ la constante de Lamé.

El término general velocidad sísmica se define como:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{C.3})$$

donde E es el módulo obtenido de un ensayo de compresión uniaxial sin confinamiento. Las velocidades sísmicas varían desde valores menores a 200 m/s (arena seca suelta) a valores superiores a 1500 m/s para arcillas saturadas. La amplitud y energía de la onda decrece con la distancia desde la explosión por dos razones. Primero, debido a que la energía se extiende en un área de superficie creciente a medida que la onda viaja desde el lugar de explosión. Segundo, la energía se disipa como trabajo para deformar plásticamente la matriz del suelo. Una velocidad sísmica alta implica normalmente baja histéresis y por lo tanto poca atenuación histerética con el rango, es decir con la distancia desde el lugar de detonación. La amplitud de las ondas de cuerpo es inversamente proporcional al rango. La amplitud de las ondas de superficie es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del rango. Las ondas P y S se atenúan más rápidamente que las ondas R , las cuales tienden a dominar en rangos grandes.

C.2 PARAMETROS DE EXPLOSIONES EN EL SUELO

La magnitud de una explosión se describe por la velocidad pico de la partícula \dot{v} y por el desplazamiento pico de la partícula v . Estos valores se transforman a una carga que el

suelo transmite a una estructura enterrada o elemento estructural. Esto se hace por el pico de sobrepresión p_0 y por el impulso específico i_0 .

La magnitud de la explosión se caracteriza por el rendimiento de la explosión, el cual se ajusta por un factor de acoplamiento para tener en cuenta que energía producida se entrega al suelo como onda de presión. Conociendo las propiedades y atenuación del suelo con el rango, se pueden estimar v y \dot{v} en una determinada posición. Estos se relacionan con los parámetros de carga p_0 e i_0 , los cuales se pueden usar para determinar la respuesta de la estructura.

Las relaciones entre v , \dot{v} , p_s e i_s son (Smith y Hetherington, (1994)):

$$p_0 = \rho c_p \dot{v} \qquad i_0 = \rho c_p v \qquad (C.4)$$

REFERENCIAS

ABAQUS/Standard. Version 5.7-3. User's Manual (1997).

Ambrosini R. D., Luccioni B. M., Segura F. R., Danesi R. F., Riera J. D., Rocha M. M. (1998). "Acción de Cargas Explosivas en Suelos", Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural.

Autoridad Regulatoria Nuclear (1998). "Efectos de Explosiones y Acciones Mitigantes Aplicables a Estructuras, Sistemas y Componentes de Instalaciones Civiles", 10 al 14 de Agosto, Buenos Aires, Argentina.

Baker W. E., Westine P. S., Dodge F. T. (1985). "Similarity Methods in Engineering Dynamics", Elsevier.

Biggs J. M. (1964). "Introduction to Structural Dynamics". Mac Graw Hill Book Company, New York.

Bull J. W., Woodford C. H. (1998). "Camoufllets and their effect on Runway Support", Computers and Structures 69, 695-706.

Bull J. W., Woodford C. H. (1998). "The Prevention of Runway Collapse Following an Underground Explosion", Engineering Failure Analysis, Vol. 5, No. 4, pp. 279-288.

Chabai J. (1965). "On Scaling Dimensions of Craters Produced by Buried Explosives", J. of Geophysical Research, 70, p. 5075.

Chadwick P., Cox A. D., Hopkins H. G. (1964). "Mechanics of Deep Underground Explosions", Phil. Trans. Royal Soc. London, Ser. A Maths. Physics Sci., 256, 235-300.

Referencias

Clough R.W., Penzien J. (1975). "Dynamics of Structures", Mc Graw Hill, Inc, New York.

ComputerBoards, INC. (1995). PCM-DAS16/16™ Manual.

COSMOS/M. Version 1.71. User Guide (1994).

Ellis B. R., Tsui F. (1997). "Testing and Analysis of Reinforced Concrete Panels Subject to Explosive and Static Loading", Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 122, 293-304.

Fábrica Militar de Pólvoras y Explosivos "Villa María".

Formby S. A., Wharton R. K. (1996). "Blast Characteristics and TNT Equivalence Values for Commercial Explosives Detonated at Ground Level", Journal of Hazardous Materials, pp 183-198.

Haskell N. A. (1955). "Some Consideration on the Modeling of Crater Phenomena in Earth", Air Force Surv. Geophys. 67, TN-55-205, Air Force Cambridge Research Center, Bedford, M.A.

Hewlett-Packard (1998). HP VEE Advanced Programming Techniques.

Honeywell (1998). Installation Instructions for 180PC Pressure Sensors.

Katona T., Ratkai S., Halbritter A., Krutzik N. J., Schütz W. (1997). "Verification of Dynamic Characteristics and Response Results of the VVER-440/213 Main Building Complex Paks Based on Latest Blast Experiments", Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14), Lyon, France, pag. 583-590.

Kinney G. F., Graham K. J. (1985). "Explosive Shocks in Air", Springer-Verlag New York Inc.

Konno T., Mizuno J., Kontani O., Mihara Y., Sugawara O., Yoshikawa K., Kobayashi T., Motosaka T. (1997). "Earthquake Simulation by Explosives for Studying the Ultimate Response of Structures", Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14), Lyon, France, pag. 347-354.

KYOWA (1986). Dynamic Strain Amplifier DPM-600 series. Operation Manual.

- KYOWA* (1986). Ultra-Miniature Low-Capacity Acceleration Transducer. Operation Manual.
- Lampson C. W.* (1946). "Explosions in Earth", in Effects of Impact and Explosion: Vol. I, AD 221586, Washington, DC, 1946.
- Louca L. A., Pan Y. G., Harding J. E.* (1998). "Response of Stiffened and Unstiffened Plates Subjected to Blast Loading", Engineering Structures, Vol. 20, No. 12, pp. 1079-1086.
- Morrey C. B.* (1952). "Underground Explosion Theory, Operation Jangle, WT-369", Office of Technical Services, Department of Commerce, Washington, DC.
- Nurick G. N., Gelman M. E., Marshall N. S.* (1996). "Tearing of Blast Loaded Plates with Clamped Boundary Conditions", Int. J. Impact Engng, Vol. 18, Nos. 7-8, pp. 803-827.
- Oñate E.* (1995). "Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. Análisis Estático Lineal", Artes Gráficas Torres, S.A.
- Persson P. A., Holmberg R., Lee J.* (1994). "Rock Blasting and Explosives Engineering", Book CRC Press, Inc. Printed in U.S.A.
- Saxe H. C.* (1963). "Explosion Crater Prediction Utilizing Characteristic Parameters", Proceedins 5th Sym. on Rock Mechanics, University of Minnesota, Fairhust, C. Pergamon Press, 273-306.
- Sedov L. I.* (1959). "Similarity and Dimensional Methods in Mechanics", p. 256 ff, New York, Academic Press.
- Smith P. D., Hetherington J. G.* (1994). "Blast and Ballistic Loading of Structures", Butterworth Heinemann.
- Varpasuo P.* (1997). "Blast Excitation Response of Kozloduy Unit VVER-1000 NPP Reactor Building", Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14), Lyon, France, pag. 599-606.
- Varpasuo P.* (1997). "The SSI-and Structural Response of the Paks NPP for Explosion Excitation", Transactions of the 14th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 14), Lyon, France, pag. 607-614.

Referencias

Woodhouse J. (1998). "Linear Damping Models for Structural Vibration", *Journal of Sound and Vibration*, 215(3), 547-569.