

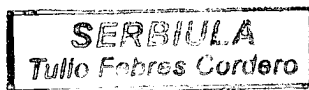
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
POSTGRADO EN INGENIERIA ESTRUCTURAL

**ANALISIS DE ESTRUCTURAS APORTICADAS DE ACERO
SOMETIDAS A CARGAS EXPLOSIVAS**

Tesis presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Magíster
Scientiae en Ingeniería Estructural

Por

Jorge Rafael Kingland Paredes



Mérida, Abril de 2010



Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ÍNDICE GENERAL

Resumen	i
Índice de tablas	iii
Índice de figuras	v
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Cargas explosivas, la respuesta estructural y el diseño resistente a explosiones	
2.1. Introducción	11
2.2 Cargas explosivas	14
2.2.1. Explosivos. Definición y tipos	14
2.2.2. Explosiones. Definición y clasificación	16
2.2.3. Descomposición de los explosivos	17
2.2.4. Características de la onda explosiva en el aire	20
2.2.4.1. Desarrollo de la onda explosiva	20
2.2.4.2. Variación de la sobrepresión con el tiempo	22
2.2.4.3. Tiempo de llegada y duración de la onda explosiva	24
2.2.4.4. Forma del perfil de presiones de una onda explosiva	25
2.2.4.5. La presión dinámica	29
2.2.5. Parámetros de la onda explosiva	31
2.2.6. Ley escalada de ondas explosivas	33
2.2.7. Equivalencia en TNT	35
2.2.8. Comparación de cargas explosivas y cargas sísmicas	37
2.2.9. Categorías de las cargas explosivas	40
2.2.9.1. Explosiones no confinadas o externas	42
2.2.10. Cargas explosivas sobre las estructuras	44
2.2.10.1. Interacción onda explosiva-estructura	47
2.2.10.2. Idealización de las cargas explosivas sobre las estructuras.....	51
2.3. Respuesta estructural ante cargas explosivas	53
2.3.1. Regímenes de respuesta estructural	54
2.3.2. Sistemas de un grado de libertad elásticos y elastoplásticos	57
2.4. Efecto de las explosiones sobre las estructuras	61
2.5. Diseño estructural	64
2.5.1. Filosofía de diseño	66
2.5.2. Modos de falla de estructuras sometidas a cargas explosivas	68
2.5.3. Comportamiento de los materiales a velocidades de deformación altas	68
2.5.4. Manuales técnicos para el diseño resistente a explosiones	69

2.6. Mitigación de explosiones	71
2.7. Diagrama Presión-Impulso (P-I)	72
2.8. Materiales de construcción	73
2.9. Programas computacionales para explosiones y sus efectos	74
Capítulo 3. Simulación numérica de explosiones en el aire	78
3.1. Introducción	78
3.2. Modelado de explosivo-aire	83
3.2.1. Consideraciones generales	83
3.2.2. Geometría	85
3.2.3. Materiales	88
3.2.4. Condiciones de contorno e interacciones	92
3.2.5. Selección del elemento	93
3.2.6. Mallado	94
3.2.7. Técnicas Especiales	97
3.2.8. Descripción del código de análisis	98
3.3. Modelo de verificación	99
3.3.1. Descripción del modelo	99
3.3.2. Resultados del modelo de verificación	104
3.4. Estudio de sensibilidad de mallado	105
3.4.1. Resultados del estudio de sensibilidad de mallado	108
3.5. Resultados de la simulación (modelo explosivo-aire)	113
Capítulo 4. Simulación numérica de estructuras aporticadas de acero sometidas a cargas explosivas	123
4.1. Introducción	123
4.2. Modelos de referencia o de Línea base (“Baseline Analysis”)	130
4.2.1. Descripción del modelo (Modelo Base)	131
4.2.2. Estudio del comportamiento estructural ante cargas explosivas	136
4.2.3. Estudio de la influencia de los modelos constitutivos de plasticidad	142
4.2.4. Estudio de los efectos de la velocidad de deformación	147
4.2.5. Aplicabilidad de cargas uniformemente distribuida para representar explosiones	151
4.3. Modelos de verificación	157
4.3.1. Análisis estático	158
4.3.2. Análisis dinámico	161
4.4. Descripción de la estructura	171
4.5. Análisis modal	174

4.6. Modelado de la estructura	175
4.6.1. Consideraciones generales	175
4.6.2. Geometría	177
4.6.3. Materiales	178
4.6.4. Interacciones y condiciones de contorno	178
4.6.5. Carga	178
4.6.6. Tipo de análisis	179
4.6.7. Selección de elementos y mallado.....	180
4.7. Análisis de la estructura	182
Capítulo 5. Conclusiones y perspectivas	197
Referencias	203
Glosario	216
Anexos	219
Anexos A. Cálculo de las cargas explosivas externas (curvas presión-tiempo) sobre la estructura propuesta de la Fig. 4.22 del Capítulo 4	220
Anexos B. Diseño “preliminar” del pórtico rígido simple de acero de la Fig. 4.15 del Capítulo 4 (pórtico A = B = C de la estructura de la Fig. 4.22)	223
Anexos C. Diseño “preliminar” de la estructura aporticada de acero propuesta de la Fig. 4.22 del Capítulo 4 (compuesta de pórticos rígidos simples A, B y C)	232
Anexos D. Diseño “preliminar” de las vigas secundarias de acero de la estructura aporticada propuesta de la Fig. 4.22 del Capítulo 4 ($V1\ A-B = V1\ B-C = V2\ A-B = V2\ B-C$)	241
Apéndices	245
Apéndice A. Tipos de explosivos y explosiones y el proceso de una detonación	246
Apéndice B. Predicción de carga explosiva	256
Apéndice C. Efecto de la velocidad de deformación	281

RESUMEN

El fenómeno de las explosiones (accidentales o intencionales), la interacción de estas con las estructuras y la respuesta estructural misma, se ha convertido en un tema de interés para investigadores independientes, grupos de investigadores de universidades e institutos y organizaciones gubernamentales y no gubernamentales a raíz de diferentes eventos ocurridos en distintos lugares del mundo. En Venezuela el tema adquiere particular importancia debido a los numerosos procesos que se realizan en la industria petrolera y petroquímica, donde existe un alto riesgo de formarse ambientes explosivos. Esto hace imprescindible garantizar un nivel razonable de protección para el personal y las instalaciones frente a potenciales explosiones que pueden originarse. La ocurrencia de una explosión en una de estas instalaciones causaría pérdidas humanas, ambientales y económicas incalculables.

El tema de las explosiones en general es de por sí muy interesante. Abarca varias disciplinas con muchas posibilidades de líneas de investigación, siendo hasta ahora un campo relativamente poco explorado. Es además un tema tan interesante como complejo. La mayoría de los tópicos involucrados presentan una gran dificultad, en particular para ingenieros estructurales, cuya formación generalmente adolece del conocimiento relacionado con ellos. Asimismo, el hecho de que cada uno de los tópicos involucrados son abordados desde diferentes perspectivas de la ingeniería, potencia la dificultad de su estudio.

El análisis y diseño de estructuras sometidas a cargas explosivas requiere de una gran comprensión del fenómeno de las explosiones y de la respuesta dinámica de los diferentes elementos estructurales. Es por ello que, inicialmente, este trabajo presenta una visión general, intentando explicar de forma sencilla y didáctica, el fenómeno de las explosiones y los efectos de estas sobre las estructuras. Una explicación de la naturaleza de las explosiones y el mecanismo de ondas de choque en el aire es dada, del mismo modo se muestran conceptos básicos de los diferentes métodos para estimar las cargas explosivas y la respuesta estructural. El presente estudio pretende

ser un punto de partida para englobar y explicar de manera sencilla la bibliografía existente al respecto.

Se presenta también la simulación del proceso de detonación y expansión inicial de un explosivo de alta potencia y la propagación de la onda de choque en el aire mediante la utilización del método de los elementos finitos. La formulación Lagrangiana-Euleriana Arbitraria es usada en la simulación. Se analizan y comparan los resultados obtenidos con los que surgen de la aplicación de fórmulas empíricas existentes. Sobre la base de estas comparaciones, se puede concluir que la simulación permite hacer estimaciones aceptables de la sobrepresión máxima para determinadas condiciones, simulando razonablemente el proceso de una explosión.

Por último, un análisis por elementos finitos ha sido efectuado para examinar la respuesta de una estructura aperturada de acero sometidas a cargas explosivas generadas por explosiones externas en el aire. Los resultados obtenidos son comparados con los criterios de deformación (ó valores permisibles) establecidos en el manual TM 5-1300 (1990), referencia obligada en este tema. Este análisis permitirá determinar la influencia de la velocidad de deformación en la respuesta estructural. La comparación de los resultados numéricos muestra que el análisis reproduce en forma ajustada la respuesta esperada. El objetivo de esto es crear las bases para desarrollar un protocolo para evaluar y estudiar la respuesta de estructuras ante cargas de alta magnitud y muy corta duración como las generadas en explosiones.

Las simulaciones numéricas constituyen una herramienta poderosa para predecir el comportamiento de un sistema del mundo real bajo una gran variedad de condiciones. Esta tesis busca introducir a los profesionales de la ingeniería estructural en la solución de este tipo de problemas a través de métodos numéricos, ahondando tópicos de manera específica. En particular, son abordados temas fundamentales en explosiones y sus efectos sobre las estructuras como la detonación y expansión inicial de un explosivo, la propagación en el aire de la onda explosiva generada y la respuesta estructural ante tal tipo de carga.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Diferencias entre combustión ordinaria, deflagración y detonación.....	18
Tabla 2-2. Pesos equivalentes en TNT para diferentes explosivos.....	36
Tabla 2-3. Diferencias entre las cargas explosivas y las sísmicas.....	38-39
Tabla 2-4. Efectos de varias sobrepresiones pico y la velocidad del viento máxima asociada sobre varias estructuras.....	63
Tabla 2-5. Límites típicos de deformación de diseño.....	68
Tabla 2-6. Ejemplos de programas computacionales usados para simular los efectos explosivos y las respuestas estructurales.....	76
Tabla 3-1. Dimensiones de las cargas cilíndricas.....	86
Tabla 3-2. Parámetros JWL para el TNT.....	90
Tabla 3-3. Propiedades del aire.....	91
Tabla 3-4. Relaciones de aspecto en cada parte del modelo para las diferentes relaciones L/D	96
Tabla 3-5. Relación de aspecto en cada parte del modelo de verificación.....	103
Tabla 3-6. Número de elementos y relaciones de aspecto en cada parte del modelo para las diferentes discretizaciones utilizadas.....	107
Tabla 4-1. Características de las discretizaciones planteadas para el análisis de eigenvalores de la placa.....	134
Tabla 4-2. Frecuencias (en ciclos/seg ó Hz) obtenidas del análisis de eigenvalores para las discretizaciones planteadas y de la solución analítica.....	134
Tabla 4-3. Formas modales de la placa.....	135-136
Tabla 4-4. Rango de presiones de diseño según el manual TM 5-1300 (1990).....	137
Tabla 4-5. Casos de cargas considerados. Características de la onda explosiva con diferentes combinaciones $W-R$	137
Tabla 4-6. Clasificación de la respuesta estructural.....	140
Tabla 4-7. Propiedades elásticas e inelásticas consideradas para el acero A36.....	144
Tabla 4-8. Parámetros y datos utilizados en los modelos Cowper-Symond, Yield Ratio y Johnson-Cook para un acero A36 (de bajo contenido de Carbono).....	150
Tabla 4-9. Pendiente, ordenada de la elástica y deflexión máxima para una viga en voladizo bajo una carga uniformemente distribuida.....	159

Tabla 4-10. Deflexión máxima y pendiente en el extremo libre de la columna en voladizo sometida a una presión distribuida. Comparación de resultados.....	160
Tabla 4-11. Dimensiones y propiedades de los perfiles utilizados.....	164
Tabla 4-12. Frecuencias (en ciclos/seg ó Hz) obtenidas del análisis de eigenvalores para la discretización planteada y de la solución en SAP2000.....	167
Tabla 4-13. Dimensiones y propiedades del perfil para las vigas secundarias.....	174
Tabla 4-14. Frecuencias y periodos obtenidos del análisis de eigenvalores (con ABAQUS/Standard y SAP2000) de la estructura aporticada en estudio.....	175
Tabla 4-15. Número de elementos y relaciones de aspecto en cada parte del modelo.....	182

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. Frente de choque de una onda explosiva generada por una explosión en contacto con la superficie.....	20
Fig. 2.2. Variación de la sobrepresión máxima con la distancia en tiempos sucesivos.....	21
Fig. 2.3. Variación de presión con el tiempo en una posición determinada y el efecto de la onda explosiva pasando sobre una estructura.....	23
Fig. 2.4. Curva idealizada de la historia presión-tiempo de una onda explosiva en el aire.....	25
Fig. 2.5. Historia presión-tiempo real para una carga de ANFO detonada cerca a la superficie a una distancia de 7 ft del punto de detonación.....	26
Fig. 2.6. Variación de la sobrepresión y la presión dinámica con el tiempo en una posición dada.....	30
Fig. 2.7. Variación de la sobrepresión de una explosión en el aire y la presión dinámica asociada en una posición determinada.....	31
Fig. 2.8. Idealización típica de la onda de choque.....	32
Fig. 2.9. Ley de escalamiento de Hopkinson-Cranz.....	34
Fig. 2.10. Comparación entre carga explosiva y sísmica.....	40
Fig. 2.11. Categorías de las cargas explosivas. Explosiones no confinadas: No.1 en el aire "libre", No.2 en el aire y No.3 superficial. Explosiones confinadas: No.4 completamente ventilada, No.5 parcialmente confinada y No.6 completamente confinada.....	42
Fig. 2.12. Categorías de explosiones externas: (a) explosión en el aire "libre", (b) en el aire y (c) superficiales.....	43-44
Fig. 2.13. Cargas explosivas sobre las superficies de un edificio.....	45
Fig. 2.14. Vista de planta mostrando el ángulo de incidencia del frente de la onda de choque con respecto a la superficie de reflexión.....	46
Fig. 2.15. Esquema de la interacción de la onda explosiva con una estructura rectangular.....	48
Fig. 2.16. Disposición general de las cargas explosivas idealizadas sobre una estructura rectangular.....	51

Fig. 2.17. Forma de las cargas idealizadas sobre una estructura rectangular.....	52
Fig. 2.18. Tipos de cargas explosivas y respuestas estructurales.....	55
Fig. 2.19. Rangos de presión de diseño.....	56
Fig. 2.20. (a) Sistema de un grado de libertad (b) carga explosiva triangular equivalente.....	58
Fig. 2.21. Función de resistencia simplificado de un sistema de un grado de libertad elastoplástico.....	59
Fig. 2.22. Respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad elastoplástico para una carga triangular.....	60
Fig. 2.23. Secuencia de los efectos de la onda explosiva sobre una estructura.....	61
Fig. 2.24. Límites de deformación comúnmente considerados.....	67
Fig. 2.25. Velocidades de deformación asociada a diferentes tipos de carga.....	69
Fig. 2.26. Diagrama presión-tiempo (P-I) típico.....	73
Fig. 3.1. Geometría espacial, simetría y modelado del problema.....	85
Fig. 3.2. Partes y dimensiones del sistema explosivo-aire para L/D de $1/4$, $1/2$, 1 y 6	88
Fig. 3.3. Condiciones de contorno del sistema.....	92
Fig. 3.4. Multi-point constraint en el modelo explosivo-aire.....	93
Fig. 3.5. Discretización de las partes del sistema.....	95
Fig. 3.6. Elemento CPE4R.....	97
Fig. 3.7. Geometría del modelo de verificación.....	101
Fig. 3.8. Condiciones de contorno del modelo de verificación.....	102
Fig. 3.9. Vínculo cinemático del tipo TIE en el modelo de verificación.....	102
Fig. 3.10. Discretización de las partes del modelo de verificación.....	103
Fig. 3.11. Gráficas de presión-tiempo en la interfaz explosivo-aire.....	105
Fig. 3.12. Gráficas de velocidad-tiempo en la interfaz explosivo-aire.....	105
Fig. 3.13. Discretizaciones propuestas para el estudio. (a) Malla Gruesa, (b) Malla Intermedia (Referencia) y (c) Malla Fina.....	107
Fig. 3.14. Comparación de la sobrepresión máxima en función de la distancia del explosivo para las distintas mallas estudiadas con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada (Para $L/D = 1$ y el azimut de 90°)..	110

Fig. 3.15. Costo computacional (tiempo) para diferentes tamaños de malla.....	111
Fig. 3.16a. Curvas presión-tiempo en 6,21 m (20,4 ft) para las diferentes mallas estudiadas.....	111
Fig. 3.16b. Curvas presión-tiempo en 3,81 m (12,5 ft) para las diferentes mallas estudiadas.....	112
Fig. 3.16c. Curvas presión-tiempo en 2,01 m (6,6 ft) para las diferentes mallas estudiadas.....	112
Fig. 3.17a. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la simulación numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 0,25$	114
Fig. 3.17b. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 0,50$	114
Fig. 3.17c. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la simulación numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 1$	115
Fig. 3.17d. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la simulación numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 6$	115
Fig. 3.18a. Historias de presión conseguidas con ABAQUS y valores de sobrepresión máxima obtenidas con las ecuaciones de Plooster modificadas, a 2 m del centro de la carga explosiva para las relaciones L/D de 0,25, 0,50, 1 y 6.....	118
Fig. 3.18b. Historias de presión conseguidas con ABAQUS y valores de sobrepresión máxima obtenidas con las ecuaciones de Plooster modificadas, a 4 m del centro de la carga explosiva para las relaciones L/D de 0,25, 0,50, 1 y 6.....	119
Fig. 3.18c. Historias de presión conseguidas con ABAQUS y valores de sobrepresión máxima obtenidas con las ecuaciones de Plooster modificadas, a 7 m del centro de la carga explosiva para las relaciones L/D de 0,25, 0,50 y 1.....	119

Fig. 3.19a. Distribución de presiones en el aire a 0,001 seg de la detonación.....	120
Fig. 3.19b. Distribución de presiones en el aire a 0,007 seg de la detonación.....	121
Fig. 3.19c. Distribución de presiones en el aire a 0,014 seg de la detonación.....	121
Fig. 4.1. Geometría y dimensiones de la placa.....	131
Fig. 4.2. Discretizaciones planteadas para el análisis de eigenvalores de la placa....	133
Fig. 4.3. Historia presión-tiempo de forma triangular.....	139
Fig. 4.4. Historia deflexión-tiempo en el centro de la placa, para los diferentes rangos de presiones incidentes de diseño señalados en la Tabla 4-4.....	140
Fig. 4.5. Modelos constitutivos del material evaluados.....	145
Fig. 4.6. Historia deflexión-tiempo en el centro de la placa para los diferentes modelos constitutivos del material considerados.....	146
Fig. 4.7. Historia de esfuerzo (Von Mises)-tiempo en el centro de la placa para los diferentes modelos constitutivos del material considerados.....	147
Fig. 4.8. Historia deflexión-tiempo en el centro de la placa para los diferentes modelos de sensibilidad del material a la velocidad de deformación considerados y cuando no se presenta dicha velocidad.....	150
Fig. 4.9. Identificación de los nodos donde se evalúa la respuesta para la carga uniformemente y como onda incidente.....	152
Fig. 4.10. Historias deflexión-tiempo en diferentes nodos: Nodo ID 2 (Centro de la placa), Nodo ID 943 y Nodo ID 2009, para una explosivo detonado a 6 m.....	154
Fig. 4.11. Historias deflexión-tiempo en diferentes nodos: Nodo ID 2 (Centro de la placa), Nodo ID 943 y Nodo ID 2009, para una explosivo detonado a 20 m.....	155
Fig. 4.12. Historias deflexión-tiempo en diferentes nodos: Nodo ID 2 (Centro de la placa), Nodo ID 943 y Nodo ID 2009, para una explosivo detonado a 100 m.....	156
Fig. 4.13. Modelo numérico del perfil W12x96. Elementos C3D8R.....	159
Fig. 4.14. Curva elástica de la columna W12x96 en voladizo sometida a una presión distribuida. Comparación de resultados.....	160
Fig. 4.15. Modelo del pórtico rígido simple.....	163
Fig. 4.16. Función de excitación representadas por segmentos lineales.....	165
Fig. 4.17. Tipo de conexión considerada.....	166

Fig. 4.18. Discretización del modelo. Elementos C3D8R.....	167
Fig. 4.19. Detalle de la discretización en las alas y el alma de los perfiles.....	168
Fig. 4.20. Respuesta dinámica del pórtico rígido simple excitado por una fuerza del tipo general. Comparación de resultados.....	170
Fig. 4.21. Edificio modular aporticado de acero estructural (de un nivel) resistente a explosiones típico de instalaciones petroquímicas.....	171
Fig. 4.22. Planta acotada del sistema estructural y detalles de las conexiones en las columnas 2A y 2C.....	173
Fig. 4.23. Vista general del modelo. Isométrica.....	177
Fig. 4.24. Mallado del modelo. Vista en la dirección “y”.....	181
Fig. 4.25. Mallado del modelo. Vista en la dirección “x”.....	181
Fig. 4.26a. Aplicación de la carga explosiva sobre el pórtico.....	183
Fig. 4.26b. Aplicación de la carga explosiva sobre el edificio aporticado.....	183
Fig. 4.27. Estructuración de la fachada exterior de un edificio aporticado de acero tipo. Vista de perfil.....	184
Fig. 4.28. Historia deflexión-tiempo en el tope del pórtico rígido.....	185
Fig. 4.29. Contorno de desplazamiento lateral (U3) en el pórtico rígido para $t = 0,03208$ seg.....	186
Fig. 4.30. Historias deflexión-tiempo en el tope del pórtico rígido considerando el efecto de la velocidad de deformación y sin considerarlo.....	187
Fig. 4.31. Contorno de esfuerzos de Von Mises del pórtico rígido para el instante de tiempo ($t = 0,01203$ seg) donde el material alcanza la fluencia y la ubicación donde esta ocurre.....	188
Fig. 4.32. Contornos de esfuerzos de Von Mises del pórtico rígido para los instantes de tiempo y las distintas posiciones donde se presenta la fluencia del material luego de $t = 0,01203$ seg.....	189-190
Fig. 4.33. Historias deflexión-tiempo en el tope de los pórticos en la dirección “x”.....	192
Fig. 4.34. Distribución de esfuerzos de Von Mises del edificio propuesto en el instante de tiempo donde aparece la fluencia en el acero ($t = 0,024$ seg). La zona señalada corresponde a lugar donde ella ocurre.....	194

Fig. 4.35. Campo de esfuerzos de Von Mises del edificio propuesto en el instante de tiempo donde aparece la fluencia en la base ($t = 0,044\text{seg}$).....	195
Fig. 4.36. Contorno de esfuerzos de Von Mises del edificio propuesto cuando se obtienen la máxima deflexión.....	196

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

x

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El tema de la explosiones ha recibido gran atención en los últimos años por parte de muchos investigadores independientes, universidades y organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, impulsado principalmente por la ocurrencia de eventos asociados con actos terroristas en distintos lugares del mundo. El número de publicaciones sobre el tema, si bien aun bajo, se ha incrementado considerablemente. Aspectos tan variados como la fenomenología de las explosiones, su interacción con las estructuras y la respuesta estructural ante eventos explosivos acaparan la atención a partir de resonados sucesos como los acontecidos contra las embajadas de EE.UU. en Nairobi, Kenya y Dar es Salaam, Tanzania en 1998, las Torres Khobar en Dhahran, Arabia Saudita en 1996, el Edificio Federal Murrah en Oklahoma City en 1995, en la sede de la Asociación Mutual Israelita Argentina AMIA, Buenos Aires en 1994 y el World Trade Center en Nueva York en 1993. Estos sucesos han demostrado la necesidad proteger determinadas estructuras civiles “sensibles” a este tipo de eventos. El término sensible posee aquí la acepción de “potencialmente susceptible” a ataques terroristas; como por ejemplo, embajadas, oficinas gubernamentales, etc. Las perspectivas de los actuales y futuros conflictos y coyunturas políticas ó geopolíticas a escala mundial, regional y local, potencian aun más el interés en el tema.

Aunque tales eventos intencionales han impulsado en grado superlativo el estudio en esta área, es tras el colapso del edificio de apartamentos Ronan Point, en Inglaterra en 1968, cuando la prevención del colapso ante eventos explosivos accidentales, como por ejemplo explosiones de cocinas de gas en edificios residenciales, comenzó a convertirse en un imperativo indiscutible en la ingeniería estructural, generando la necesidad de normas y criterios de diseño que permitan reducir la vulnerabilidad de edificios a este tipo de fallas (Nair, 2003).

En Venezuela el tema adquiere particular importancia por la susceptibilidad de importantes estructuras de la industria petrolera que sirven de resguardo costosos e indispensables equipos y sistemas de control, a sufrir cargas de gran impacto provenientes de explosiones de gases y productos petroquímicos en general.

Recientemente se ha llevado a cabo un análisis histórico de accidentes ocurridos en la industria química y en el transporte de mercancías peligrosas desde principios de siglo hasta julio de 1992 –Vílchez, Sevilla, Montiel & Casal (1995)–. El estudio menciona un incremento progresivo (cada vez más importante) en el tiempo: aproximadamente el 95% de los casos corresponden a los últimos 30 años. La rápida evolución tecnológica que ha experimentado la industria en general y la industria química en particular, su gran crecimiento y, consecuentemente, el incremento de inventarios de productos químicos en las instalaciones y en diversos medios de transporte, han provocado un aumento de la probabilidad de que ocurran grandes accidentes con un notable impacto sobre personas, medio ambiente y equipo.

El tema de las explosiones en general es de gran complejidad por dos razones fundamentales: la dificultad del tema y la carencia de información en el área, que involucran diversos aspectos como la detonación, propagación de ondas de presión, interacción fluido-estructura y más aún, comportamiento altamente no lineal de los materiales de las estructuras impactadas, por citar algunos. Cada uno de los tópicos involucrados es de por sí de gran dificultad, en particular para ingenieros estructurales, cuya formación es por lo general ajena a los tópicos relacionados con la mecánica de fluidos y la química, por ejemplo. Pero incluso temas más afines como el diseño de estructuras sometidas a cargas extremas, no son de fácil entendimiento. La exagerada simplificación de los procedimientos de diseño y de análisis denota la complejidad de los tópicos involucrados. Respecto a la falta de información, existen muchas publicaciones, principalmente del sector militar, pero la gran mayoría de estas están restringidas por razones de seguridad y otras no son de fácil acceso. La dificultad proviene, en resumen, de que el problema involucra muchas variables y

existe poca información disponible presentada de manera dispersa y poco didáctica, haciendo el tema de las explosiones difícil de abordar y entender.

Una explosión es un fenómeno físico muy complejo, que genera una onda de presión en el aire como consecuencia de la liberación de energía extremadamente rápida. El efecto más característico de una explosión es el brusco aumento de la presión (también llamado sobrepresión) que se produce en el aire circundante y que se propaga en forma de onda en todas las direcciones libres del espacio. La forma, características y magnitud de la onda dependen del tipo de explosión, del entorno y de la distancia de la fuente explosiva.

Los efectos de la sobrepresión sobre los seres humanos y las estructuras son diversos y dependen de sus niveles de incidencia. Estos pueden ser grandes, y causar daños severos a equipos y estructuras, además de muertes y lesiones humanas. Es por ello, que para garantizar la seguridad estructural y la protección frente a las explosiones exige el determinar, lo más preciso y confiable posible, la carga que se pueda generar.

La mayoría del material o documentos que existen a disposición, para el caso de la predicción de cargas explosivas, son de carácter empírico (o analítico) que esta esencialmente correlacionado con datos experimentales o semiempíricos, y que se basan en modelos simplificados del fenómeno físico. Dado que para obtener información a través de ensayos experimentales se requiere de una coordinación y planificación exhaustiva y significativos costos de inversión y seguridad, hoy día la simulación numérica constituye una alternativa viable para caracterizar explosiones y obtener los campos de presiones que ellas generan.

Por otro lado, aunque una estructura sea capaz de soportar de manera segura todas las sollicitaciones de diseño convencionales, es posible que sufra daños provocados por cargas localizadas y excepcionalmente elevadas como las generadas por las explosiones.

Recientemente muchas estructuras han sido víctimas de explosiones debidos a actos intencionales (terroristas) y las estructuras aporticadas de acero forman una parte importante de este grupo (Sabuwala, 2001). De ahí que el comportamiento de las estructuras aporticadas de acero estructural sometidas a cargas explosivas es de gran interés.

Tradicionalmente, el enfoque del análisis y diseño de componentes individuales o de sistemas estructurales simples sujetos a cargas accidentales como las explosiones ha consistido en representar tales estructuras como sistemas con una sola coordenada de desplazamiento, es decir, como sistemas con un grado de libertad UGDL (SDOF en ingles, Single-degree-of-freedom). Se tratan de sistemas simples que de por si son limitados, y aunado a que las cargas actuantes sobre el sistema son idealizadas, la solución que se obtiene con un modelo de UGDL será solamente una aproximación al verdadero comportamiento dinámico.

Debido a lo anteriormente expuesto, los procedimientos existentes tanto para evaluar el comportamiento estructural como para el diseño resistente a explosiones son simplificados y aproximados. La simplicidad de estos procedimientos podría pasar por alto varios aspectos importantes como la no linealidad geométrica, el efecto de la velocidad de deformación, los esfuerzos residuales, otros modos de falla como el corte directo ó corte por punzonamiento, fragmentación, etc.

Los ingenieros estructurales de hoy necesitan orientación sobre cómo analizar y diseñar las estructuras ante eventos explosivos (explosiones industriales, actos terroristas, etc.). A pesar de la cantidad limitada de documentos existentes en la literatura, las mismas proporcionan a los ingenieros datos técnicos necesarios para el análisis y diseño de estructuras. Existen varios documentos de referencia sobre el tema como por ejemplo, Army Technical Manual 5-1300 (TM 5-1300, 1990), Army Technical Manual 5-855-1 (TM 5-855-1, 1986), ASCE Manual 42 (ASCE, 1985), ASCE Guidelines for Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities (ASCE, 1997), ASCE Structural Design for Physical Security (ASCE, 1999), United Facilities

Criteria (4-010-01 y 4-023-03, 2003 y 2005, respectivamente) y GSA criteria (GSA, 2003) –En el Capítulo 2 se hace una breve descripción de cada uno de ellos–.

Dentro de los manuales técnicos existentes, el TM 5-1300 (1990) es uno de los más utilizados y contiene una extensa sección sobre el diseño resistente a explosiones. En lo que respecta específicamente a las estructuras aporticadas, el mismo proporciona un procedimiento racional para realizar eficazmente un diseño “preliminar” de pórticos resistentes a explosiones. No obstante, a fin de confirmar que el proceso de diseño satisface los criterios de deformación recomendados por el TM 5-1300 (1990) y verificar la capacidad de los miembros establecidos sobre la base de fuerzas y momentos dinámicos estimados, el manual también recomienda la realización de un riguroso análisis posterior al diseño.

En los últimos años, sofisticadas herramientas de análisis han sido desarrolladas y se han vuelto más accesibles. Programas computacionales como ANSYS, ADINA, ABAQUS y LS-DYNA, por nombrar solo algunos, permiten una completa formulación en elementos finitos de componentes o sistemas estructurales para ser desarrollados y evaluados. Si bien una simulación numérica requiere de importante recurso computacional y humano, también puede ser muy útil para la evaluación de comportamientos estructurales bajo condiciones de cargas esperados para propósitos de diseño o para investigaciones forenses después de eventos con cargas explosivas (Krauthammer, 2008). La simulación numérica es también una necesidad en las actuales tendencias de diseño orientadas al desempeño y a la protección ante amenazas múltiples.

Todo esto ha hecho que los profesionales encargados de la predicción de las cargas explosivas y de la respuesta estructural, requieran de una continua investigación, así como de una sistemática revisión de las normativas y prácticas de análisis y diseño para acciones extraordinarias como las explosiones. Estas áreas de investigación están recibiendo gran atención de la comunidad de ingeniería.

Se ha destacado que la complejidad de las cargas explosivas, de la respuesta de los componentes individuales y del conjunto de esos componentes ha requerido que el desarrollo de la práctica del análisis y diseño en este campo involucre sofisticados métodos numéricos.

El gran avance computacional de los métodos informáticos tanto en su aspecto de hardware como software, ha permitido afrontar la resolución de problemas complejos cuya resolución analítica resultaría prácticamente imposible. Así pues la simulación intenta reproducir la realidad a partir de resolución numérica computacional, de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno.

El método de los elementos finitos es una de las más importantes técnicas de simulación y seguramente la más utilizada en las aplicaciones ingenieriles. Constituye un método numérico destinado a resolver mediante ecuaciones matriciales las ecuaciones diferenciales que se plantean en sistemas continuos (campos) o discretos (estructuras). La modelización mediante este método permite reproducir el comportamiento estructural de problemas complejos con ecuaciones constitutivas no lineales, considerando también la no linealidad geométrica y cambios en las condiciones de borde.

Las aplicaciones actuales del método son muy extensas e incluyen sistemas lineales y no lineales, estáticos, dinámicos tales como Mecánica de Sólidos, Mecánica de Fluidos, Transmisión de Calor y Electromagnetismo.

Las herramientas computacionales que permiten realizar este proceso de forma eficiente y cómoda se denominan herramientas de análisis por elementos finitos, o simplemente herramientas de elementos finitos (HEF) –Escribano (2006)–. Existe gran variedad de softwares comerciales para cálculo por elementos finitos. ABAQUS (ABAQUS, 2004) es un programa comercial de análisis de múltiples aplicaciones que se basa en el método de los elementos finitos para resolver diversas aplicaciones en el campo de la ingeniería, incluidos los problemas que necesitan métodos no lineales de resolución. La no linealidad geométrica, del material y la posible no linealidad de las

condiciones de contorno de los problemas, así como los fenómenos de inestabilidad, pueden ser analizados también con este código.

El uso y aplicación del método de los elementos finitos es complejo y difícil. Muchas de las compañías desarrolladoras de software están haciendo un gran esfuerzo en facilitar el acceso a esta metodología a todos los usuarios e ingenieros, mediante la creación de automatismos de mallado, importación de geometría, creación de interfaces gráficas de selección, valores por defecto, etc. Sin embargo, incluso en el caso de los modelos más simples, se requiere de personal experimentado, lo que hace algo complicada su utilización.

Dentro de esta perspectiva, el estudio propuesto tiene por objeto:

- Impulsar el conocimiento y comprensión para estudiantes y profesionales de la ingeniería estructural, de los tópicos básicos concernientes al tema de las cargas extremas o extraordinarias, concretamente las explosiones, tanto en la parte de su fenomenología como de los efectos que tienen sobre las estructuras, incluyendo el análisis y diseño de estructuras resistente a estos eventos.
- Estudiar la física de una detonación y la propagación en el aire de una onda explosiva originada por explosivos de gran potencia como el TNT, a través de la simulación numérica (dinámica de continuos) usando un programa computacional basado en el método de los elementos finitos.
- Desarrollar un protocolo para evaluar y estudiar la respuesta de estructuras aporticadas de acero sometidas a cargas explosivas esperadas para propósitos de diseño a través de software comerciales de elementos finitos.

El cumplimiento de todos los objetivos enunciados anteriormente, dejará el establecimiento de las bases para crear líneas y grupos de trabajo que vayan cubriendo todas las áreas de este campo de investigación.

Entre las potenciales líneas de investigación que se tocan en la presente investigación se encuentran: creación de reportes y libros que abordan tópicos generales, efectos y estimación de cargas explosivas (detonación y propagación de ondas), evaluación de respuesta estructural, diseño de estructuras (específicamente, en acero) y simulaciones numéricas con software basado en el método de elementos finitos, y velocidad de deformación en respuesta de material frente a acciones extremas (explosiones).

Cabe indicar que esta tesis busca ser un primer aporte para el desarrollo del tema de las explosiones y sus efectos sobre las estructuras, promoviendo la investigación en un campo de estudio tan amplio y que despierta mucho interés; pero que hasta ahora ha sido poco investigado y desarrollado.

Esta tesis está estructurada en 5 capítulos. En el primer capítulo se expone de una forma muy general el contexto y la problemática actual de las explosiones y el estado de las investigaciones y estudios relativos al tema, específicamente, en los aspectos a abordar en la tesis como lo son el promover en la comunidad ingenieril el conocimiento y comprensión a través de escritos que expliquen didácticamente este tema, la predicción de cargas explosivas y análisis y diseño de edificios y otras estructuras para proteger vidas y contenido ante cargas de alta magnitud y muy corta duración como las producidas por explosiones. A continuación se realiza referencia sencilla del método de los elementos finitos como técnica avanzada de simulación numérica para dar respuesta a problemas como la generación y propagación de ondas de presión, estimación de las cargas explosivas cuando la explosión ya se ha producido y la respuesta estructural a este tipo de acciones. Posteriormente, se exponen los objetivos y la estructura de la tesis, y se hace una sinopsis descriptiva de cada uno de los capítulos desarrollados a lo largo de este trabajo.

Más detalladamente, el contenido de cada uno de los capítulos se describe a continuación:

En el primer capítulo se expone de una forma muy general el contexto y la problemática actual de las explosiones y el estado de las investigaciones y estudios relativos al tema, específicamente, en los aspectos a abordar en la tesis como lo son el promover en la comunidad ingenieril el conocimiento y comprensión a través de escritos que expliquen didácticamente este tema, la predicción de cargas explosivas y análisis y diseño de edificios y otras estructuras para proteger vidas y contenido ante cargas de alta magnitud y muy corta duración como las producidas por explosiones. A continuación se realiza referencia sencilla del método de los elementos finitos como técnica avanzada de simulación numérica para dar respuesta a problemas como la generación y propagación de ondas de presión, estimación de las cargas explosivas cuando la explosión ya se ha producido y la respuesta estructural a este tipo de acciones. Posteriormente, se exponen los objetivos y la estructura de la tesis, y se hace una sinopsis descriptiva de cada uno de los capítulos desarrollados a lo largo de este trabajo.

En el Capítulo 2 se lleva a cabo una explicación de aspectos básicos del fenómeno de las explosiones y los efectos en las estructuras, de la respuesta estructural y del diseño resistente a explosiones. Se introducen los tópicos básicos concernientes al tema de las cargas explosivas, tanto en la parte de su fenomenología como de los efectos que tienen sobre las estructuras como estudio preliminar para la creación de un material bibliográfico, tipo monografía, que englobe y explique de forma sencilla y didáctica la temática. La información de este capítulo es el resultado de una revisión bibliográfica en varios aspectos básicos del tema de las explosiones, como lo son, específicamente, fenomenología de las explosiones, las cargas explosivas sobre las estructuras, la respuesta estructural y el diseño resistente a explosiones.

En los siguientes dos capítulos (Capítulos 3 y 4) se llevan a cabo simulaciones numéricas, usando un programa computacional de elementos finitos comercialmente disponible como ABAQUS, de la propagación de la onda explosiva en el aire originada por la detonación de un explosivo de alta potencia y de estructuras aperturadas de acero sometidas a cargas explosivas, respectivamente.

Específicamente, en el tercer capítulo se estudia la propagación en el aire de ondas de presión originada por la detonación de un explosivo de gran potencia como el TNT, examinando los efectos de la interacción explosivo-aire y tomando en cuenta la formulación Arbitraria Lagrangiana-Euleriana (ALE Arbitrary Lagrangian-Eulerian) con la utilización del software comercial de elementos finitos ABAQUS, para la predicción de perfiles de presión de ondas explosivas. Específicamente, se trata de simulaciones en 2D de la propagación de la onda explosiva en el aire originada por la detonación de cargas cilíndricas de TNT de masa 1 kg para diferentes relaciones L/D (longitud/diámetro).

En el cuarto capítulo, se evalúa la respuesta de una estructura aporticada tipo, de acero sometida a explosiones en ABAQUS, revisando los criterios de diseño recomendados en el actual Manual técnico del ejército de los EEUU, U.S. Army Technical Manual, TM 5-1300 -1990- (NAVFAC P-397, AFR 88-22), "Estructuras resistentes a los efectos de explosiones accidentales". Con ello, además se desarrolla un protocolo para evaluar y estudiar sistemas aporticados de acero bajo este tipo de cargas, a través de simulaciones numéricas con el uso de un programa de análisis por el método de los elementos finitos. La evaluación de la respuesta dinámica consiste en chequear solo la estabilidad global de la estructura a través del valor permisible de desplazamiento o deflexión lateral establecida en el manual TM 5-1300 (1990). Esta revisión además permitirá determinar la influencia de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico del acero estructural ASTM A36 como material empleado en el diseño de un sistema estructural aporticado de acero bajo cargas dinámicas de corta duración y alta intensidad tales como aquellas asociadas con explosiones.

En el último capítulo de la tesis (Capítulo 5) se resumen las conclusiones más relevantes de este estudio y las recomendaciones sobre posibles líneas de investigación que permitan aportar o contribuir al desarrollo de un tema aun poco investigado y estudiado.

CAPÍTULO 2

CARGAS EXPLOSIVAS, LA RESPUESTA ESTRUCTURAL Y EL DISEÑO RESISTENTE A EXPLOSIONES

2.1. Introducción.-

La naturaleza de las explosiones y los mecanismos de respuestas que pueden llegar a desarrollarse en las estructuras sometidas a cargas explosivas, resultan bastante complejos y difíciles. Generar un documento que aborde didácticamente este fenómeno, para obtener al menos una idea global del mismo, requiere de explicaciones que no son tan básicas y claras; aunado a esto, la carencia de información en el área, hacen de este tema un verdadero reto para aquellos estudiantes y profesionales de la ingeniería civil y estructural que deseen involucrarse en este campo de estudio.

Diversos aspectos como la detonación, la propagación de ondas de presión, la interacción fluido-estructura y el comportamiento altamente no lineal de los materiales de las estructuras impactadas, son de por sí de gran complejidad, además no son conocimientos comunes en el ámbito de la ingeniería estructural; lo que hace de gran complicación este tema de las explosiones. Pero incluso, aspectos más afines como el diseño de estructuras sometidas a cargas explosivas, no son de fácil entendimiento. La exagerada simplificación de los procedimientos de análisis y diseño denota lo complejo de los tópicos involucrados.

Existen muchas publicaciones y artículos técnicos que se caracterizan por no ser muy didácticos y completos. La mayoría de los documentos han sido desarrollados por los servicios militares, pero estos son restringidos solamente al uso oficial o en todo caso no son de fácil acceso. A raíz de los cambios geopolíticos de los últimos años, la finalización de la guerra fría y en especial a causa de la proliferación del terrorismo a nivel mundial, alguna de esta información se ha hecho pública a efecto de que instituciones de investigación y universidades contribuyan en el estudio de este tema

(Suárez, 1997). Sin embargo, aun no se cuenta con documentos que engloben en uno solo, diversos aspectos del fenómeno de las explosiones y de la evaluación y diseño de estructuras que deben resistir cargas explosivas causadas intencional o accidentalmente.

Los documentos existentes varían en el nivel de instrucción que ellos proporcionan y todos tienen su espacio para la interpretación. Un ingeniero con el conocimiento en dinámica estructural y dominio de este tipo de documentos puede ser un recurso valioso para cualquier equipo que trabaje con el análisis y diseño de estructuras resistentes a explosiones. Lamentablemente, la mayoría de los ingenieros no posee este perfil que les permita abordar y participar de manera efectiva este tipo de estudios. Esto hace más imperiosa la necesidad de crear documentos que permitan dar a entender de forma didáctica lo relacionado a las explosiones y sus efectos, y el análisis y diseño de estructuras bajo este tipo de cargas.

De esta forma, este capítulo tiene como objetivo, impulsar el conocimiento y comprensión, independiente de la formación técnica, a estudiantes y profesionales de la ingeniería civil y estructural, de los tópicos básicos concernientes al tema de las cargas explosivas, tanto en la parte de su fenomenología como de los efectos que tienen sobre las estructuras; tratando de explicar de una forma sencilla y didáctica tal temática. Con ello se busca generar un conocimiento general, no específico, del tema.

La información de este capítulo es el resultado de una revisión bibliográfica en varios aspectos básicos del tema de las explosiones, como lo son, específicamente, fenomenología de las explosiones, las cargas explosivas sobre las estructuras, la respuesta estructural y el diseño resistente a explosiones.

Básicamente, este capítulo se puede dividir en tres partes. La primera que engloba todo lo referido a las cargas explosivas. Esta se inicia con la definición y los tipos de explosivos y explosiones. A continuación se explica lo que es el proceso de descomposición de los explosivos y las características de la onda explosiva generada por la detonación de un explosivo de alta potencia. Para tener una referencia o idea

general de lo que son las cargas explosivas y de sus efectos sobre las estructuras (sin entrar en explicar las cargas en detalle) se presenta una comparación con las cargas inducidas por movimientos sísmicos que son comúnmente consideradas en el campo de la ingeniería civil. Posteriormente, se explica los diversos tipos de cargas explosivas por explosiones no confinadas y cómo estas actúan sobre las estructuras, específicamente lo concerniente a la interacción onda explosiva-estructura y la idealización de estas cargas. En la segunda parte, se trata lo relacionado a la respuesta estructural, los efectos de las cargas explosivas sobre las estructuras y el diseño resistente a explosiones. En lo que respecta a la respuesta se expone lo relacionado a los regímenes y los fundamentos del análisis dinámico (conceptos básicos de la dinámica de sistemas de un grado de libertad elásticos y elastoplásticos), y en cuanto al diseño, una breve descripción de lo que es la filosofía de diseño, los modos de falla, la influencia de la alta velocidad de deformación en el comportamiento de los materiales y los manuales técnicos existentes para el diseño resistente a explosiones es presentada. Por último, como tercera parte varios tópicos inherentes como la mitigación, el diagrama presión-impulso, los materiales de construcción y los programas computacionales son presentados.

El alcance de este capítulo está limitado a efectos de explosiones accidentales, no deseadas, que se derivan de explosivos de alta potencia, no nucleares, las cuales pueden generar grandes pérdidas económicas y también en vidas humanas, principalmente en el ámbito de las industrias de proceso.

Con el desarrollo de este capítulo, además de buscar proporcionar una visión general de los principales tópicos relacionados al tema de las explosiones, éste dirigido a ser un punto de partida para crear a partir de él un instrumento o herramienta bibliográfica, tipo monografía, que englobe y explique de manera clara y sencilla todo lo que gira alrededor de esos aspectos básicos.

Muchas de las explosiones accidentales, aunque no todas, suelen originarse por una reacción de combustión o por reacciones exotérmicas fuera de control. Por esta razón

en este capítulo se considerará, en términos generales, que la explosión va unida a uno de estos dos tipos de reacciones: detonación y deflagración. Específicamente, todo el desarrollo que se expondrá a continuación se encuentra en el marco de las explosiones producto del proceso de la detonación, porque la detonación es un fenómeno usual en explosivos de alta potencia. Caso contrario, en ciertos materiales explosivos como el gas natural, la detonación es un fenómeno inusual, o incluso inexistente.

Las explosiones consideradas en este capítulo son las explosiones no confinadas o externas, particularmente, aquellas que ocurren al aire libre. Aunque las explosiones internas o confinadas, son igualmente peligrosas y por consiguiente de consecuencias graves en el ámbito industrial (Sierra, 2006), no son abordados en este estudio. La razón es que este tipo de explosiones, generalmente se originan a través de un proceso de deflagración por el que no se caracteriza los explosivos de alta potencia (como p. ej. el TNT). Más aún, las explosiones confinadas vienen acompañadas de una serie de fenómenos que hacen más complejo el problema. Si bien los conceptos básicos tratados en este capítulo permiten una comprensión del fenómeno, se requiere de nociones un poco más avanzadas, no tan básicas, para un tratamiento más completo.

Otros temas que tienen importancia en este campo, como el fenómeno de colapso progresivo, el comportamiento de las conexiones estructurales, los componentes no estructurales y dispositivos que se usan en estructuras resistentes a explosiones, no son tocados por ser más específicos e igualmente se requiere de conceptos más avanzados en el tema.

2.2. Cargas explosivas.-

2.2.1 Explosivos. Definición y tipos.-

El entendimiento del proceso físico de una explosión requiere una breve mirada a la física asociada con la descomposición de los materiales enérgicos como los explosivos.

Un explosivo es un material, simple o compuesto, capaz de producir una explosión con su propia energía. Este material al activarse sufre una reacción química rápida que lo transforma en un gas, liberando una gran cantidad de energía en forma de calor y expansión de volumen.

Un concepto más formal, encontrado en Mora (2008), habla de un explosivo como una sustancia o mezcla de sustancias de naturaleza química, cuya reacción de descomposición genera una detonación; se efectúa en un tiempo muy breve con gran producción de calor, siendo sus productos finales en su mayor parte gaseoso; el calor generado en su reacción se acumula en el gas producido, en forma de energía cinético-molecular, capaz de transformarse en trabajo mecánico.

Existen diversas tipificaciones de los explosivos según diferentes criterios, no obstante, hay tres formas ampliamente aceptadas: por su tipo de acción, por la sensibilidad a la ignición y por su estado físico.

- Atendiendo a su tipo de acción, se clasifican en: deflagrantes (propelantes) o explosivos de bajo poder o baja potencia (pólvora negra, nitrocelulosa, entre otros) y detonantes o explosivos de alto poder o alta potencia (Trinitrotolueno o TNT, RDX o Ciclonita, PENT ó Tetranitrato de pentaeritrita, ANFO –sigla en inglés para Nitrato de Amonio y Fuel Oil–, C-4, HMX, entre otros). Los deflagrantes son aquellos en los que la reacción se inicia por mecanismos químicos tradicionales: activación termocinética y la velocidad de estos no supera la velocidad del sonido. En los explosivos detonantes la reacción se autoabastece por una onda de choque, supersónica (en el medio que recorre), que inicia al explosivo a medida que esta transcurre. Dada la alta velocidad de la reacción (superando la velocidad del sonido) son explosivos muy potentes.
- Basado en la sensibilidad frente a la ignición, los explosivos se categorizan en primarios o secundarios. Los explosivos primarios (triyoduro amónico, fulminato de mercurio, fulminato de plata, azida de plomo, etc.) requieren cantidades ínfimas de energía para activarse. Son de gran peligrosidad y

generalmente se utilizan flegmatizados (insensibilizados). Su potencia es modesta en comparación con los secundarios. Los explosivos secundarios (Nitroglicerina, TNT, RDX, PENT, etc.) responden al grupo más numeroso, con energías de activación intermedias aunque no estrictamente homogéneas. Su potencia es muy alta.

- Según su estado físico, los explosivos pueden ser agrupados en sólidos (TNT, exógeno, pentrita, etc.), líquidos (nitroglicerina, nitroglicol, etc.), o gases (acetileno, grisú, butano, etc.). Los sólidos son esencialmente explosivos de alta potencia, para los cuales sus efectos son bien conocidos. Los explosivos sólidos y líquidos son a menudo llamados explosivos “condensados” (Bailey & Murray, 1989).

Los explosivos vienen en varias formas, comúnmente llamados por sus nombres tales como TNT, PENT, RDX y otros nombres comerciales.

2.2.2. Explosiones. Definición y clasificación.-

En la literatura no hay una definición establecida en cuanto a lo que es una explosión. Aunque varios autores y grupos de investigación han propuesto algunos conceptos al respecto, como por ejemplo Berthelot (el químico francés que promovió el estudio científico de explosiones), que en 1883, según Bailey & Murray (1989), definió una explosión como “una expansión súbita de gases en un volumen mucho más grande que su inicial, acompañado por ruido y efectos mecánicos violentos”, o el Instituto Americano de Ingenieros Químicos (cuyas siglas en inglés son AIChE, American Institute of Chemical Engineers) que sugiere que una explosión es una liberación de energía que causa una onda explosiva (Explosion Dynamics Laboratory, 2008), la vaguedad que aun existe en el término provoca considerable inquietud que no ha permitido que haya un consenso hacia una definición única. No obstante, la descripción generalizada de una explosión es que se trata, básicamente, de un fenómeno resultante de una súbita y rápida liberación de una gran cantidad de energía.

Si bien existen varias descripciones o concepciones acerca del término “explosión”, se puede identificar muchas características comunes en todas ellas. En este sentido, se puede dar una definición básica estableciendo que una explosión es un fenómeno en el cual hay una liberación rápida y violenta de energía, que puede tener su origen en distintas formas de transformación, y que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía. Esta onda consiste en compresiones y expansiones alternativas del aire atmosférico.

A la vista de lo antes mencionado, las explosiones pueden ser clasificadas, en base a su naturaleza, en tres grandes grupos: físicas o mecánicas, químicas y nucleares.

- Por explosión física o mecánica se entiende como aquella que se produce como consecuencia de la liberación de presión a que se ve sometida la sustancia que reacciona. Es, sencillamente, una brusca expansión.
- Las explosiones químicas se producen al reaccionar químicamente una sustancia o mezcla explosiva por cualquier causa (interna o externa a la propia sustancia o mezcla explosiva), convirtiéndose totalmente o en su mayor parte en gases, con desprendimiento de gran cantidad de calor, por lo que se desarrolla una gran potencia mecánica. El volumen y temperatura que alcanzan los gases depende de la composición química de la especie química o mezcla de especies químicas; y la potencia mecánica depende de la velocidad con la que se produce la reacción.
- Las explosiones nucleares están basadas en la enorme energía liberada en las reacciones al nivel del núcleo atómico de determinados elementos. En este tipo de reacciones se produce una pérdida de masa que se transforma en energía.

2.2.3. Descomposición de los explosivos.-

Partiendo de la idea de lo que es una explosión, se puede deducir que las características de una explosión son: gran velocidad de reacción, transformación total, o en su mayor parte, en gases y gran desprendimiento de calor.

No existen reacciones que, cumpliendo las dos primeras características, no cumplan la tercera, porque el hecho de la instantaneidad supone siempre que la reacción es exotérmica (con desprendimiento de calor).

La descomposición de los explosivos puede efectuarse fundamentalmente a través de mecanismos distintos, dependiendo, en principio, de la naturaleza propia del explosivo y de la forma de iniciación de dicha descomposición. En una explosión química la descomposición puede efectuarse de las siguientes formas: por combustión, por deflagración ó por detonación.

Las características de estos fenómenos, se presenta en la siguiente tabla resumen:

Tabla 2-1. Diferencias entre combustión ordinaria, deflagración y detonación (tomado de Mora, 2008).

COMBUSTIÓN ORDINARIA	DEFLAGRACIÓN	DETONACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> • Toma oxígeno del aire. • Se inicia por calor. • La reacción avanza por conductividad térmica principalmente. • La velocidad depende de las condiciones y naturaleza del explosivo, viniendo determinada por la cantidad de calor actualizado. • La velocidad es del orden de cm/seg. 	<ul style="list-style-type: none"> • El oxígeno o el combustible lo aporta el propio explosivo • Se inicia por calor • La reacción se acelera por el aumento desordenado de choques de moléculas y conductividad térmica • La velocidad aumenta linealmente con la presión. Hasta 100 atmósferas, la velocidad está determinada por la cantidad de calor; a partir de esa presión, viene dada por la energía mecánica de los choques de las moléculas. 	<ul style="list-style-type: none"> • El oxígeno o el combustible lo aporta el propio explosivo • Se inicia por el aporte energético transmitido por una onda de presión o choque, fricción, llama, etc. • La reacción avanza gracias a la energía que liberan los choques de las moléculas, que forman un frente de onda uniforme.

Centrándose más concretamente en los procesos de deflagración y detonación, se puede destacar los siguientes puntos:

- En el caso de la deflagración, la velocidad de reacción es del orden de algunos metros o decenas de metros por segundo, mientras que en el caso de la detonación, las velocidades alcanzan valores de miles de metros por segundo.
- En la deflagración, la transmisión de la reacción de descomposición se basa en la conductividad térmica, mientras que la onda de detonación es una onda

física de choque, que al recorrer un explosivo lo descompone provocando una reacción química de detonación.

- La deflagración es un fenómeno de superficie, mientras que la detonación es un fenómeno de masa.
- En la deflagración la densidad, presión y temperatura varían de una forma continua, mientras que en el caso de la detonación, esas variables sufren una brusca discontinuidad en el instante que se produce dicha detonación.

La mayoría de los materiales explosivos se descomponen en el régimen de detonación y deflagración. Los explosivos detonantes o de alta potencia liberan su energía solo por el proceso de detonación, y los explosivos deflagrantes o de baja potencia por un proceso de incineración rápida denominado deflagración.

Las detonaciones son siempre (para una determinada cantidad de energía) mucho más destructivas que las deflagraciones, ya que pueden llegar a tener presiones máximas cercanas a los 290 psi (20 bar), mientras que en las deflagraciones los valores máximos son de unos 116 psi (8 bar) –Casal, Montiel, Planas & Vílchez (1999)–. De todas formas, también hay que tener en cuenta que es muy difícil iniciar una detonación, caso contrario, las deflagraciones requieren de muy poca energía para iniciarse. En determinadas situaciones, no obstante, una deflagración puede llegar a convertirse en detonación (por ejemplo, en el caso de un frente de llama que se propaga dentro de una tubería).

Una excelente información sobre los procesos químicos de detonaciones y deflagraciones es encontrada en varios libros citados por Krauthammer (2008): Johansson & Persson (1970); Dobratz (1974 y 1981); Baker, Cox, Westine, Kulesz & Strehlow (1983); Smith & Hetherington (1994); Persson, Holmberg & Lee (1994); Cooper & Kurowski (1996) y Walters & Zukas (1998).

En el Apéndice A se explica con mayor profundidad el proceso de una explosión, particularmente en lo que respecta a la detonación.

2.2.4. Características de la onda explosiva en el aire.-

2.2.4.1. Desarrollo de la onda explosiva.-

La detonación de un explosivo de alta potencia genera una masa de gas caliente que puede estar a una presión de 100 hasta 300 kbar y una temperatura que ronda entre 3000-4000 °C (Mays & Smith, 1995). Esta masa de gas se expande rápidamente, desplazando el volumen que ocupa. Como consecuencia de ello, una onda de compresión (una capa de aire comprimido) se forma en el frente de este volumen de gas (llamado frente de la explosión) conteniendo mucha de la energía liberada por la explosión. Esta onda de compresión se le denomina onda explosiva u onda de choque. El termino frente de la explosión (también llamado frente de choque) es comúnmente usado para describir la superficie frontal de la onda explosiva, formada por todas las partículas que están en la misma fase del movimiento, y que se mueve en un ambiente no perturbado. Para ilustrar este término, en la Fig. 2.1 se observa el frente de choque en una explosión superficial. En este caso, el frente de la onda explosiva en el aire es de forma hemisférica como se muestra en la figura y las ondas incidentes y reflejadas coinciden (Glasstone, 1957).

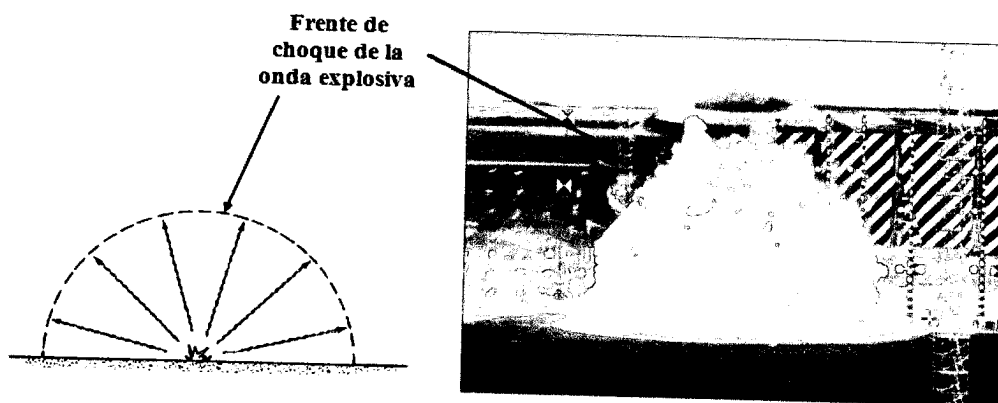


Fig. 2.1. Frente de choque de una onda explosiva generada por una explosión en contacto con la superficie.

Como la onda explosiva viaja en el aire alejándose de su fuente, la sobrepresión en el frente disminuye constantemente, y la presión detrás del frente decrece en una manera regular. Después de un corto tiempo, cuando el frente de onda ha viajado cierta distancia de su fuente, la presión detrás del frente de la onda de choque cae a un valor por debajo de la presión atmosférica. Este desarrollo es observado en la Fig. 2.2, la cual muestra las sobrepresiones en seis tiempos sucesivos (indicadas con los números 1, 2, 3, 4, 5 y 6). En las primeras cinco curvas (t_1 a t_5) la presión en la onda explosiva no han caído por debajo de la atmosférica, pero en la sexta se observa que a cierta distancia detrás del frente de choque aparece una sobrepresión que tiene un valor negativo.

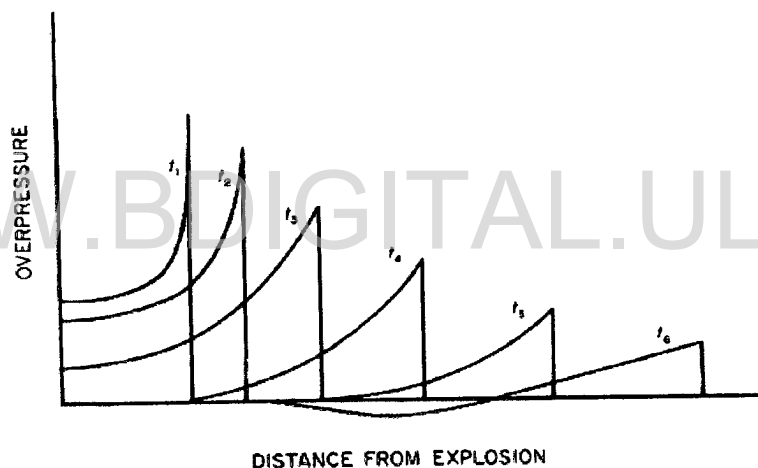


Fig. 2.2. Variación de la sobrepresión máxima con la distancia en tiempos sucesivos (tomado de Glastonne, 1957).

La parte de la onda de choque en la cual la presión es más grande que la atmosférica es llamada fase positiva (o compresión), e inmediatamente seguida de ella, la parte en la cual la presión es menor que la atmosférica es llamada fase negativa (rarefacción o succión); es decir, en la fase positiva el aire es comprimido casi instantáneamente a un valor máximo que decae exponencialmente y luego por debajo de la presión atmosférica en la fase negativa.

Durante la fase positiva, el flujo de gas (o viento de la explosión), asociado con la onda explosiva, salen del lugar donde se inicia la explosión expandiéndose continuamente a través del aire. La dirección del flujo es inversa en la fase negativa, con un movimiento neto del gas regresando hacia el vacío relativo en el punto de detonación. En otras palabras, la onda de presión positiva se propaga alejándose su fuente hasta que la presión de los gases producidos se equilibran con la presión atmosférica, entonces pierde fuerza rápidamente quedando un vacío parcial como una burbuja alrededor del punto de detonación, en este momento el equilibrio se pierde rápidamente, originando que las masas de aire se desplacen en sentido inverso, empujando con violencia hacia dentro (el aire es succionado) para ocupar el vacío existente. Esto también es acompañado por unos fuertes vientos de succión que arrastran los escombros a distancias lejanas del punto donde se genera la explosión.

2.2.4.2. Variación de la sobrepresión con el tiempo.-

La variación de la sobrepresión con el tiempo que sería observada en una posición fijada poco después de la detonación es mostrada en la Fig. 2.3. Los efectos generales correspondientes a ser esperados en una estructura ligera, un árbol, y pequeño animal son indicados a la izquierda de la figura.

Para un intervalo corto de tiempo después de la detonación no hay un incremento en la presión, ya que la onda explosiva toma algún tiempo en viajar la distancia del punto de inicio de la explosión a una posición dada. Cuando el frente de choque llega, un instantáneo incremento de la presión a un valor de presión por encima de la presión atmosférica. Este incremento de la presión es generalmente referido la sobrepresión frontal máxima, sobrepresión máxima incidente o simplemente sobrepresión máxima (TM 5-1300, 1990). El frente de la explosión, que empuja de forma rápida y circunferencialmente (si la fuente explosiva es esférica) dentro de aire no perturbado, incrementa la densidad del aire a través del cual pasa, aumentando su temperatura y acelerando las moléculas de aire. En la Fig. 2.3 el numeral 1 representa el instante de la detonación del explosivo, y el numeral 2 indica el tiempo de llegada

del frente de choque. Tras ese frente, al final del paso de la onda explosiva, un fuerte viento comienza a actuar desde la fuente de la explosión. La velocidad de este viento disminuye rápidamente con el tiempo.

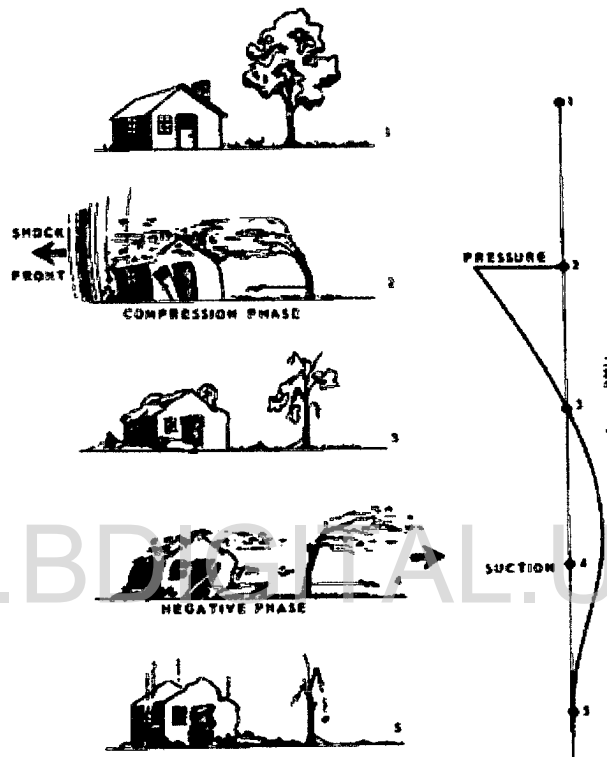


Fig. 2.3. Variación de presión con el tiempo en una posición determinada y el efecto de la onda explosiva pasando sobre una estructura (tomado de Glastonne, 1957).

A medida que la onda explosiva se propaga, la energía por unidad de área decrece. Como resultado de esto, después de la llegada del frente de choque, la presión decrece rápidamente y en el tiempo correspondiente al punto 3 en la Fig. 2.3 es la misma que la presión atmosférica. Aunque la sobrepresión es ahora cero, el viento continuará en la misma dirección por un corto tiempo. El intervalo de tiempo entre los puntos 2 y 3 representa la duración de la fase positiva (o compresión) de la onda

explosiva. Es durante este intervalo que se experimenta la mayor parte de la acción destructiva de la explosión (en el aire).

Como la presión en la onda explosiva continua decreciendo, ella pasa por debajo de la presión atmosférica. En el intervalo de tiempo entre los puntos 3 y 5 en la Fig. 2.3, la fase negativa de la onda pasa por la posición fijada. Durante el paso de la fase negativa, la presión al principio disminuye y luego aumenta hacia a la presión atmosférica la cual es alcanzada en el tiempo representado por el numeral 5. De esta forma, el viento de la explosión ha entonces cesado efectivamente y la directa acción destructiva de la explosión en el aire ha terminado.

2.2.4.3. Tiempo de llegada y duración de la onda explosiva.-

Como se menciona anteriormente, hay un intervalo de tiempo finito requerido para que la onda explosiva se desplace del centro de la explosión a cualquier posición particular. Este intervalo de tiempo (o tiempo de llegada) es dependiente del campo de energía de la explosión y la distancia involucrada. Inicialmente, la velocidad del frente de choque es bastante alta, varias veces la velocidad del sonido, pero como la onda explosiva se propaga, esta velocidad disminuye a medida que el frente de onda se va debilitando. Finalmente, a distancia largas, la onda explosiva se hace esencialmente una onda de sonido y su velocidad se aproxima a la velocidad del sonido en el ambiente.

En cuanto a la duración de la onda explosiva en un punto cualquiera también depende de la energía de la explosión y la distancia desde el punto de detonación. La duración de la fase positiva es más corta para rangos de distancias cercanas y se incrementa a medida que la onda se desplaza de su fuente. Hay una corta duración positiva asociada con el desarrollo de la onda explosiva la cual ocurre antes de la formación de la fase negativa.

La velocidad del viento de la explosión detrás del frente de choque disminuye a cero, y luego se invierte, en un tiempo algo posterior al final de la sobrepresión de la fase

positiva. Por tanto, las duraciones de la presión dinámica pueden exceder las duraciones de la sobrepresión variando cantidades según el nivel de presión implicado. Sin embargo, las presiones dinámicas que existen después de la sobrepresión de la fase positiva son tan bajas que no son significativas (Glasstone, 1957). De esta manera, según Glasstone (1957), el período de tiempo durante el cual la presión dinámica es efectiva puede ser tomado como la duración de la fase positiva.

2.2.4.4. Forma del perfil de presiones de una onda explosiva.-

La característica distintiva de una onda explosiva en cualquier punto en el espacio es la variación de la presión como función del tiempo.

La forma general de una historia presión-tiempo de una onda explosiva en el aire en algún punto en el espacio es mostrada en la Fig. 2.4.

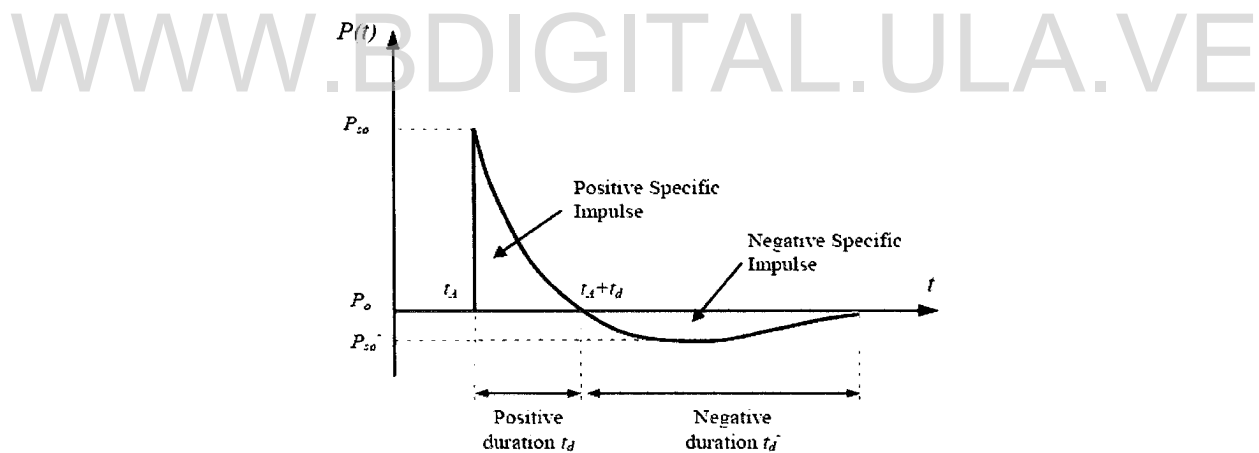


Fig. 2.4. Curva idealizada de la historia presión-tiempo de una onda explosiva en el aire (tomado de Ngo, Mendis, Gupta & Ramsay, 2007).

Se trata de una idealización para una explosión en el aire “libre” (este tipo de explosión explicará más adelante), y en ella puede observarse que cuando la onda explosiva alcanza una posición particular en el espacio en algún instante de tiempo dado, esta se produce un incremento súbito (casi instantáneo) de la presión por

encima de la atmosférica a un valor de sobrepresión máxima, seguido de un descenso de la misma hasta un valor ligeramente por debajo de la atmosférica antes de retornar a la presión ambiente.

La detonación de explosivos de alta potencia o condesados, tales como el TNT, usualmente produce una forma característica conocida como una onda explosiva ideal, cuyo comportamiento es representado a través distribución de presiones como la de la Fig. 2.4. Una onda explosiva ideal, que puede ser usada como una aproximación suficiente, es generada bajo los supuestos que el medio en que se propaga (aire) es inmóvil y homogéneo, y que la fuente es esféricamente simétrica (Mazarak, Martins & Amanatides, 1999).

Un ejemplo de una historia presión-tiempo real se muestra en la Fig. 2.5. Este perfil de presiones es el correspondiente a una carga de ANFO detonada cerca a la superficie a una distancia de 7 ft de la fuente.

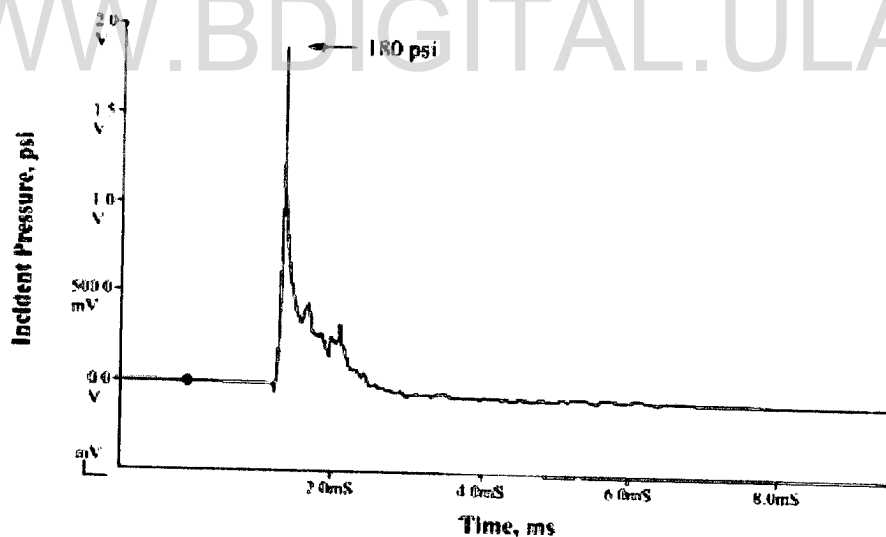


Fig. 2.5. Historia presión-tiempo real para una carga de ANFO detonada cerca a la superficie a una distancia de 7 ft del punto de detonación (tomado de Beveridge, 1998).

Particularmente, las siguientes observaciones pueden ser hechas con relación a la historia presión-tiempo de la Fig. 2.4:

- Antes de llegar la onda de choque a un punto en el espacio, la presión que se observa es la atmosférica (P_o).
- La presión aumenta casi instantáneamente a la sobrepresión máxima (P_{so}) cuando llega el frente de la onda a un punto de observación en dicho espacio. Esto se ocurre para un instante de tiempo t_A llamado tiempo de llegada del frente de choque. En realidad se alcanza P_{so} en un tiempo t_r (tiempo de subida), después de t_A . No obstante, t_r es muy corto, y una subida o aumento instantáneo a la sobrepresión máxima puede suponerse (Krauthammer, 2008).
- La sobrepresión máxima decrece con el tiempo hasta llegar de nuevo a la presión atmosférica en el tiempo t_d , que define la fase positiva de la onda explosiva; es decir, la presión permanece por encima de la atmosférica mientras la fase positiva de la onda pasa por el punto de observación. La duración de la fase positiva t_d es el intervalo entre la llegada del frente de onda y el primer paso por la presión atmosférica (t_A+t_d).
- Una presión más baja a la atmosférica que levemente retorna a la atmosférica marca el paso de la fase negativa. Esta fase es seguida de la positiva con una duración t_d^- que es usualmente más grande que t_d y es caracterizada por una presión máxima negativa P_{so}^- .
- El impulso específico positivo (I) generado por la onda explosiva es definido como el cambio de momentum –Frederick (1986) citado por Neff & Fiume (1999)– y puede ser calculado integrando la presión de la fase positiva de la onda con respecto al tiempo, de t_A a t_A+t_d ; lo cual es simplemente, el área bajo la curva presión-tiempo de la fase positiva,

$$I = \int_{t_A}^{t_A+t_d} P(t) dt \quad \text{Ec. 2.1}$$

Este perfil de presiones es en general definido, principalmente, por los siguientes parámetros: la sobrepresión máxima (P_{so}), el tiempo de duración de la fase positiva (t_d) y el tiempo de llegada del frente de onda (t_A), como se muestra en la Fig. 2.4.

Estos parámetros son obtenidos experimentalmente o analíticamente y son funciones de la magnitud de la carga explosiva, la distancia del origen de la detonación a un punto de medición y del ángulo de incidencia (del cual se detallará más tarde), definido como el ángulo entre la dirección del movimiento de la onda explosiva y la superficie sobre la cual la presión es medida en un punto.

La onda explosiva se propaga en la manera antes descrita mientras ningún obstáculo sea encontrado por la onda. Sin embargo, si la onda alcanza una superficie que no es paralela a la dirección de la propagación (tales como un muro o una estructura), una presión reflejada es generada. Más adelante se explicará lo relativo a esta reflexión.

Muchas formas matemáticas han sido sugeridas para capturar la variación de tiempo de estas ondas explosivas ideales. Una de las ecuaciones más comunes es la de Friedlander, que describe la variación teórica de la presión positiva detrás del frente de choque –Baker (1973) citado por Stuhmiller, Phillips & Richmond (1991)–,

$$P(t) = P_o \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) e^{-\frac{b t}{t_d}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

donde $P(t)$ es la presión en cualquier instante de tiempo (t), P_o es la sobrepresión máxima, t_d es la duración de la fase positiva y b es un constante de decrecimiento, un parámetro que describe la velocidad a la cual la sobrepresión disminuye después del máximo.

La historia presión-tiempo de la onda explosiva ideal es característica de muchas ondas explosivas, especialmente de aquellas lejos de la explosión. Sin embargo, si las reacciones químicas son lentas, o si el punto de observación es cercano a la explosión, los efectos no ideales son observados. De la misma forma, esta historia presión-tiempo es diferente en un espacio abierto y en un espacio cerrado en el que la presión máxima o sobrepresión va seguido de una curva compleja que dibuja las numerosas reflexiones de la onda explosiva contra los obstáculos.

2.2.4.5. La presión dinámica.-

Aunque los efectos destructivos de la onda explosiva han estado comúnmente relacionados a valores de sobrepresión máxima, hay otra variable de igual importancia llamada "presión dinámica". Para una gran variedad de edificios, el grado del daño depende en gran parte de la fuerza de arrastre asociada con los fuertes vientos que acompañan el paso de la onda explosiva. La fuerza de arrastre está influenciada por ciertas características (principalmente, la forma y el tamaño) de la estructura, pero es generalmente dependiente del valor máximo de la presión dinámica y su duración en un punto dado.

La presión dinámica es una función de la velocidad del viento y la densidad del aire detrás del frente de choque. Ambos parámetros pueden estar relacionados a la sobrepresión máxima (positiva) en condiciones ideales en el frente de choque por ciertas ecuaciones, que luego de algunas manipulaciones, la presión dinámica puede definirse según la Ec. B.1 (ver Apéndice B). Igual a la sobrepresión máxima, la presión dinámica máxima disminuye con el incremento de la distancia desde la fuente de la explosión, aunque a una velocidad diferente. La presión dinámica decrece más rápidamente con la distancia que la sobrepresión.

En una posición dada, la presión dinámica varía con el tiempo en una manera similar a como varía la sobrepresión, pero la velocidad con que decrece la presión detrás del frente de choque es diferente. Esto puede observarse en la Fig. 2.6 que indica cualitativamente como las dos presiones varían en el tiempo.

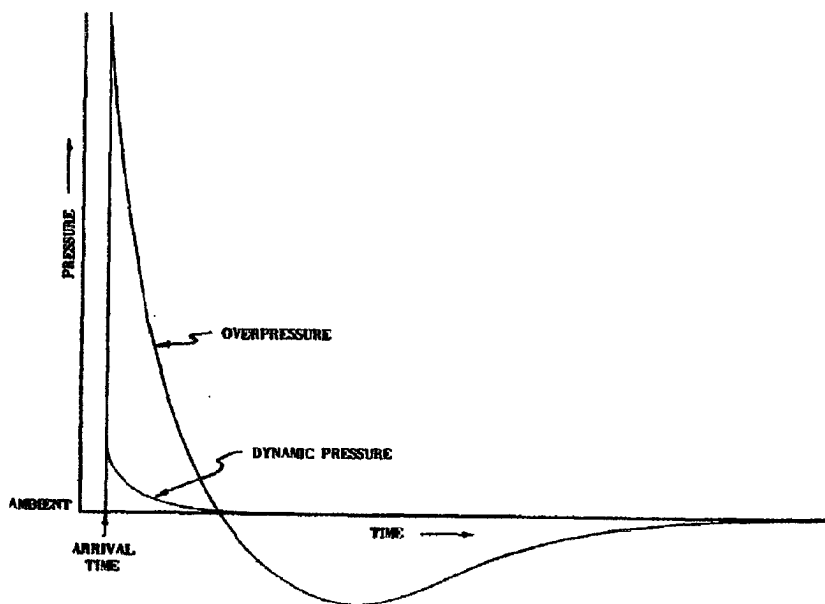


Fig. 2.6. Variación de la sobrepresión y la presión dinámica con el tiempo en una posición dada (tomado de Glasstone, 1957).

Ambas presiones aumentan súbitamente cuando el frente de choque alcanza una posición dada y posteriormente estas disminuyen. La Fig. 2.6 muestra que tanto la sobrepresión como la presión dinámica llegan a cero al mismo tiempo. Realmente, la velocidad de viento (y la presión dinámica) llegan a cero en un tiempo algo posterior, debido en gran parte a la inercia del aire en movimiento, pero para propósitos de estimar daños la diferencia es insignificante (Glasstone, 1957).

De acuerdo con Glasstone (1957), durante la sobrepresión negativa la presión dinámica es muy pequeña y actúa en dirección opuesta. Por tanto, los daños que puedan acaecer por la presión dinámica (o fuerza de arrastre) durante la fase negativa son también pequeños.

La relación entre la sobrepresión y la presión dinámica es ilustrada gráficamente en la Fig. 2.7 presentada en,

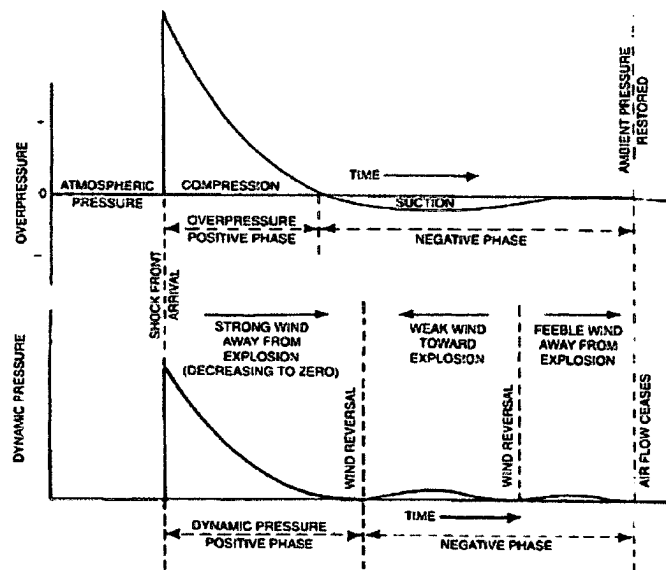


Fig. 2.7. Variación de la sobrepresión de una explosión en el aire y la presión dinámica asociada en una posición determinada (Glasstone & Dolan, 1977) – citados por y tomada de Mohanty, 1998–.

2.2.5. Parámetros de la onda explosiva.-

Los principales parámetros de una onda de choque de una explosión de TNT, requerido para definir la carga explosiva son los siguientes: sobrepresión máxima (positiva) P_o , la duración de la fase positiva t_d , el impulso de la fase positiva i y el tiempo de llegada de la onda t_a .

Además a estos parámetros, hay otros que pueden vincularse en la determinación de la carga explosiva como lo son: presión reflejada máxima P_r , la presión dinámica máxima q_o , la velocidad del frente de choque U y la longitud de la onda explosiva L_w . Usualmente estos parámetros secundarios, definidos de esta forma por ASCE (1997), pueden ser determinados de los principales.

Algunas de las fórmulas y gráficas encontradas en la literatura que permiten determinar estos parámetros, para explosivos convencionales esféricos y no esféricos que detonan en el aire libre, se presentan en el Apéndice B.

De igual forma, se pueden determinar los parámetros de la onda explosiva para la fase negativa de explosiones en el aire libre, y para la fase positiva y negativa de explosiones superficiales.

Los manuales TM 5-1300 (1990) y DOE/TIC-11268 (1980) además de los libros de Baker (1973), Kinney & Graham (1985) y Biggs (1964) –todos citados por Shope (2006)– presentan tablas y gráficas de los parámetros de ondas explosivas para explosiones de TNT.

Para facilitar el uso de algunos procedimientos de diseño y técnicas de análisis, la onda explosiva puede ser idealizada como se muestra en la Fig. 2.8.

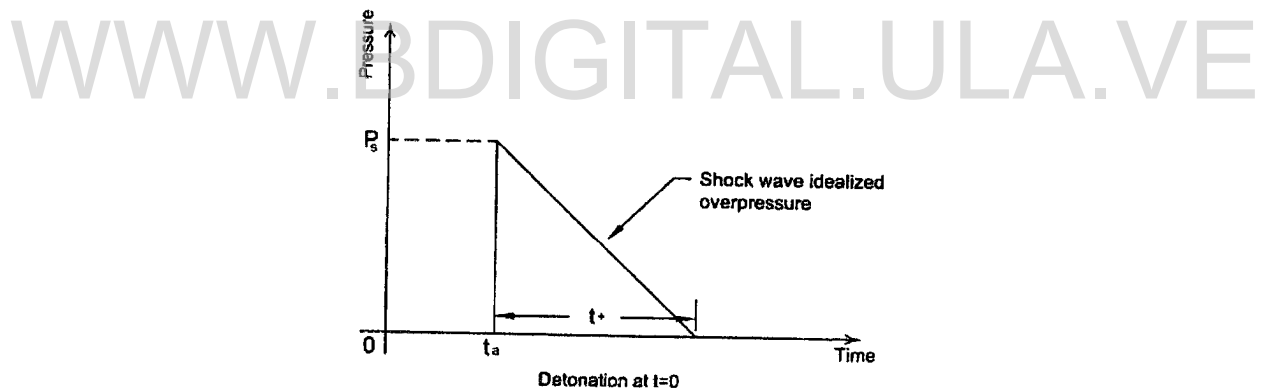


Fig. 2.8. Idealización típica de la onda de choque (tomado de Teicholz, 2001).

La forma simplificada comúnmente adoptada es la de una distribución triangular de presiones con respecto al tiempo, que tiene una presión inicial P_s , que es la sobrepresión máxima alcanzada en el tiempo t_a de llegada del frente de onda a un punto en cuestión, y decrece linealmente con el tiempo a cero en un periodo de tiempo t^+ ($t^+ = t_d$) que es la duración de la fase positiva de la onda explosiva.

De igual manera, la onda reflejada puede ser idealizada por un pulso triangular equivalente de presión máxima P_r y duración t_d , la cual da el impulso reflejado i_r ,

$$i_r = \frac{1}{2} P_r t_d \quad \text{Ec. 2.3}$$

2.2.6. Ley escalada de ondas explosivas.-

Todos los parámetros son principalmente dependientes de la cantidad de energía liberada por una detonación en la forma de una onda explosiva y la distancia de la explosión. Una descripción normalizada universal de los efectos de una onda explosiva pueden ser dados la distancia escalada relativa a $(E/P_a)^{1/3}$ y presión escalada relativa a P_a , donde E es la energía liberada (kJ) y P_a la presión atmosférica (típicamente 100 kN/m^2) –Ngo et al., 2007–.

El escalamiento de las propiedades de las ondas explosivas es una práctica común usada para predecir los parámetros de las ondas explosivas de explosiones de gran escala basada en ensayos a una escala mucho más pequeña.

La forma más común de escalamiento de ondas explosivas es la ley de Hopkinson-Cranz o “ley de la raíz cubica”. Esta ley, primero formulada por B. Hopkinson (1915) e independientemente por C. Cranz (1926), establece que ondas explosivas similares son producidas a distancias escaladas idénticas cuando dos cargas explosivas de similar geometría y la misma composición explosiva, pero de diferente tamaño, son detonados en las mismas condiciones atmosféricas. Es habitual usar como una distancia escalada un parámetro adimensional,

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

donde R es la distancia medida desde el centro de la fuente explosiva y W es el masa total del explosivo. La práctica general para expresar la masa de explosivo W es con una masa equivalente de TNT.

La Fig. 2.9 muestra esquemáticamente las implicaciones de la ley de escalamiento de ondas explosivas de Hopkinson-Cranz. Un observador ubicado a una distancia R del centro de una fuente explosiva de dimensiones características d estará sujeto a una onda explosiva de amplitud P_o , duración t_d y una historia de presión-tiempo característica. La integral de la historia presión-tiempo es el impulso i . La ley de escalamiento de Hopkinson-Cranz entonces establece que un observador a una distancia λR del centro de una fuente explosiva similar de dimensión característica λd detonada en la misma condición atmosférica sentirá una onda explosiva de forma "similar" con amplitud P_o , duración λt_d e impulso λi . Todos los tiempos característicos son escalados por el mismo factor que el factor de escala de longitud. En el escalamiento de Hopkinson-Cranz, las presiones, las temperaturas, las densidades y las velocidades no cambian en tiempos iguales. La ley de Hopkinson-Cranz ha sido minuciosamente verificada a través de varios ensayos realizados sobre un gran rango de cargas explosivas. Sin embargo, la escasa data experimental a distancias escaladas muy pequeñas hace la verificación de la ley de escalamiento de ondas explosivas difícil (ASCE, 1999). Una discusión mucho más completa de esta ley y una demostración de su aplicabilidad es dada el Capítulo 3 de Baker (1973).

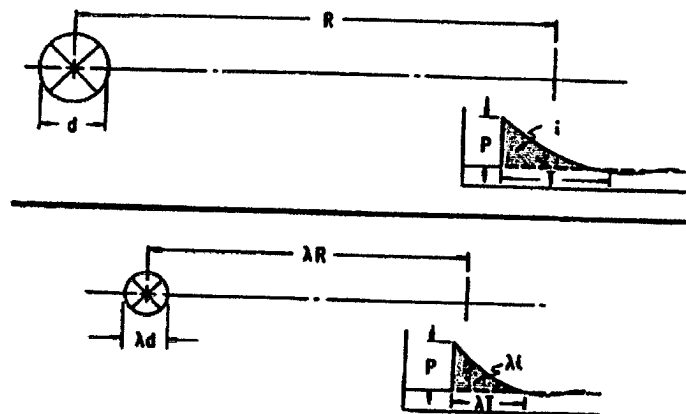


Fig. 2.9. Ley de escalamiento de Hopkinson-Cranz (tomado de ASCE, 1999).

Como se ha dicho, la ley de escalamiento es la más simple y común forma de escalamiento, pero es solamente aplicable a un tipo de explosivo idéntico y forma de la carga. Para explosiones en altitudes elevadas, el escalamiento de Sachs es usado para tomar en cuenta las variaciones en las condiciones ambientales. Kinney & Graham (1985) han refinado las leyes de escalamiento de Hopkinson y Sachs en un simple conjunto de leyes de escalamiento para aplicación general (Wilkinson & Anderson, 2003).

Publicaciones tales como el manual TM 5-1300 (1990) y el DOE/TIC-11268 (1980) usan esta relación presentando curvas que dan las sobrepresiones máximas, su duración y el impulso como una función de la distancia escalada Z .

2.2.7. Equivalencia en TNT

El TNT (Trinitrotolueno) es un explosivo convencional. Ha sido uno de los explosivos más utilizados y esto ha permitido que sus efectos hayan sido ampliamente estudiados y tabulados. La mayoría de los datos sobre efectos explosivos en la práctica se relaciona con presiones de carga explosivas esféricas de TNT. Estos datos pueden ser ampliados para incluir otros materiales explosivos, relacionando la energía de la carga explosiva de esos materiales a un peso equivalente en TNT. La equivalencia de material comparado con el TNT puede ser afectada por otros factores tales como la forma del explosivo, el confinamiento del explosivo, el número de ítems explosivos, la naturaleza de la fuente explosiva y el rango de presión a ser considerado –Baker et al. (1983), HNDM-1110-1-2 (1977) citados por Beshara (1994)–. Los efectos de la energía liberada de un material explosivo, relativa a aquella de TNT, puede ser expresada como una función del calor de detonación de la siguiente manera –HNDM-1110-1-2 (1977) citado por Beshara (1994)–,

$$W_{TNT} = \frac{H_{exp}}{H_{TNT}} W_{exp} \quad \text{Ec. 2.5}$$

donde W_{TNT} es el peso de la carga equivalente en TNT, W_{exp} es el peso del explosivo en cuestión, H_{TNT} es el calor de detonación del TNT, y H_{exp} es el calor de detonación del explosivo en cuestión. El calor de detonación de los explosivos y químicos comúnmente usados son dados en Baker et al. (1983), HNDM-1110-1-2 (1977) y Kinney & Graham (1985) –citados por Beshara (1994)–. La relación de calor es descrita en algunas referencias como el factor equivalente de TNT. Las equivalencias en TNT para diferentes explosivos son presentadas en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Pesos equivalentes en TNT para diferentes explosivos (tomado de NAVFAC DM 2.08, 1986).

Explosive Material	TNT Equivalent Weight
Baratol	0.525
Boracicol	0.283
BIF	1.198
Composition B	1.092
Composition C-4	1.129
Cyclotol 75/25	1.115
DATB/DAINB	0.893
DIPAX	0.959
DNPA	0.752
EMKP	0.874
FEFO	1.149
HMK	1.042
HNAB	1.044
HNS	1.009
LX-01	1.222
LX-02-1	1.009
LX-04	1.007
LX-07	1.058
LX-08	1.406
LX-09-1	1.136
LX-10-0	1.101
LX-11-0	0.874
LX-14	1.119
NG	1.136
NQ	0.75
OCTOL 70/30	1.113
PBK-9007	1.108
PBK-9010	1.044
PBK-9011	1.087
PBK-9205	1.037
PBK-9404	1.108
PBK-9407	1.136
PBK-9501	1.129
Pentolite 60/50	1.085
PETN	1.169
RDX	1.149
TETRYL	1.071
TNT	1.0

Nota: Los valores de los pesos equivalente en TNT son basados en los calores de detonación calculados.

2.2.8. Comparación de cargas explosivas y cargas sísmicas.-

Es importante entender que la naturaleza de las cargas explosivas y las respuestas estructurales a ellas es muy diferente a la de cualquier tipo de carga estructural tradicional (sismo, viento, etc.). Además, el conocer las solicitaciones es esencial, ya que tal información es el primer paso para desarrollar definiciones de cargas racionales que deben ser utilizables para asegurar la selección de aproximaciones de mitigación aceptables.

Dentro de los tipos de solicitaciones dinámicas que pueden afectar una estructura, o un elemento estructural, una de las habitualmente consideradas es la causada por sismos. El grado de conocimiento dentro del campo de la ingeniería estructural de este tipo de cargas con relación a las explosivas es en todos los aspectos muchísimo más desarrollado.

Es por ello, que a través de la comparación entre las cargas sísmicas (habitualmente consideradas en el diseño de una estructura) y las explosivas se busca dar una idea general, sin entrar en explicar las cargas en detalle, de lo que son las solicitaciones originadas por explosiones y de sus efectos sobre las estructuras.

En principio puede señalarse que existen algunas similitudes entre las cargas explosivas y sísmicas. Ambas cargas son dinámicas y producen una respuesta estructural dinámica que involucra el comportamiento inelástico. El enfoque de estas cargas en la respuesta estructural está dado hacia la seguridad de vidas más que prevenir el daño estructural. Por tanto, mientras se traten con estas cargas, los diseños están mucho más basados en el desempeño los cuales incluyan temas de seguridad de vidas, mecanismos de colapso progresivo, ductilidad de ciertos componentes críticos y redundancia de toda la estructura.

En cuanto a las diferencias entre estos dos tipos de cargas, estas son presentadas en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Diferencias entre las cargas explosivas y las sísmicas.	
Cargas sísmicas	Cargas explosivas
Son cargas dinámicas de naturaleza cíclica, de acción estocástica, no periódicas y sin forma; que se caracterizan por un número moderado de ciclos, por ejemplo 10 a 10000 (Hilti Corp., 2008).	Es un tipo de carga dinámica impulsiva que se caracteriza por un número de ciclos bajos (de 1 a 10) con cargas puntuales muy altas (Hilti Corp., 2008).
Son producidos a través de la sacudida lateral del suelo cuyo epicentro sísmico se desarrolla a pocos kilómetros de la superficie del suelo (Suthar, 2007).	Son cargas externas producidas a través de la propagación de ondas de presión y aplicadas súbitamente y directamente a un objeto u estructura.
Son de larga duración (en términos de segundos) en comparación con las explosiones.	Son aplicadas en un periodo de tiempo significativamente muy corto (en términos de milisegundos).
Las cargas sísmicas son cargas puramente inerciales. Menor masa provoca un comportamiento estructural más favorable.	En este caso, la masa de la estructura contribuye a su resistencia inercial, mayor masa proporciona más resistencia.
Las cargas sísmicas son cargas cuya acción es global.	Las cargas explosivas están relacionadas a eventos locales cuyos efectos se dan sobre una zona particular.
Está asociada a eventos regionales, por lo que pueden ser categorizadas basadas en localizaciones geográficas.	Pueden ser categorizadas por la distancia del explosivo y la cantidad de explosivo (masa).
Altamente impredecible, pero la magnitud puede ser bien definida en las consecuencias del sismo.	Altamente impredecible, donde la magnitud no puede ser pronosticada.
La energía sísmica liberada en forma de ondas sísmicas está relacionada a una magnitud.	La energía transportada está asociada a un pulso de alta presión.
Este tipo de cargas generan daños que están limitados a muy pocos mecanismos de respuesta estructural.	Estas cargas activan muchos mecanismos de respuesta estructural debido a sus extremas variaciones de tiempo y espacio.
Los métodos de diseño y el avance en el conocimiento del comportamiento dinámico de las estructuras frente a la acción sísmica están ampliamente desarrollados.	Actualmente el diseño resistente a explosiones es comúnmente llevado a cabo con modelos simplificados.
La filosofía del diseño sismorresistente consiste en diseñar teniendo en cuenta los estados límite que se especificarán, para cumplir con los objetivos de constructibilidad, seguridad y serviciabilidad.	El diseño resistente a explosiones debe ser asumido en el contexto de la seguridad de vidas, y no en términos de serviciabilidad.

(...continuación)

(...continuación)

Tabla 2-3. Diferencias entre las cargas explosivas y las sísmicas.	
Cargas sísmicas	Cargas explosivas
La mayoría de los códigos de diseño sísmico establecen como objetivos, por una parte, evitar el colapso, pero aceptar daño, ante un sismo excepcional severo que pueda presentarse en la vida de la estructura. Y, por otra, evitar daños de cualquier tipo ante sismos moderados que tengan una probabilidad significativa de presentarse en ese lapso.	El propósito de un diseño resistente a explosiones es primeramente prevenir el colapso del sistema estructural y mantener la integridad estructural a través del comportamiento dúctil y redundante. Un secundario pero crítico propósito es reducir o eliminar los fragmentos (los cuales, con excepción del colapso, son la principal causa de lesiones y muertes en explosiones).
Bajo este tipo de cargas, el efecto del amortiguamiento estructural es importante, pues limita la respuesta estructural a la inversa del amortiguamiento.	A diferencia de las cargas sísmicas, el amortiguamiento estructural tiene mucho menos importancia en controlar la máxima respuesta, ya que esta máxima repuesta puede ser alcanzada antes que las fuerzas de amortiguamiento puedan absorber una cantidad importante energía (Clough & Penzien, 1993 citados por Tavarez, s.f.).
Varios modos contribuyen a la respuesta total de la estructura.	De acuerdo con el patrón de desplazamiento, el primer modo (traslación) domina la respuesta estructural.
Cuando un edificio está sometido a una carga sísmica, la capacidad inelástica de los componentes y conexiones permite mitigar la falla global del edificio; la formación de un mecanismo de colapso requiere que el daño (rotulas) ocurra en muchas conexiones viga-columna.	Contrario a las cargas sísmicas, para estructuras sometidas a daños localizados producto de una explosión, la falla de solamente un número limitado de componentes y conexiones puede ser el mecanismo para provocar el colapso desproporcionado o progresivo.
El banco de datos propiamente dicho, que consta de colecciones de acelerogramas y espectros, sistemas de catalogación y una serie de programas y utilidades informáticas destinadas a la explotación y tratamiento de los datos, es en general muy extensa, amplia y de gran facilidad de acceso.	La base de datos de ensayos para diferentes tipos y cantidades de explosivos, y sobre los efectos en las estructuras es pequeña, limitada cuantitativa y cualitativamente, y restringida o normalmente no encontrada en fuentes o colecciones de amplia difusión.

Finalmente, cabe indicar que a veces hay un malentendido acerca de la resistencia a la explosión que es proporcionada por un edificio diseñado para resistir sismos. Aunque existe una cierta coincidencia entre las disciplinas (véase la Fig. 2.10a), principalmente en materia de la prevención del colapso progresivo, en los edificios

resistentes a sismos es poco probable resista los efectos directos de una carga explosiva que actúan sobre superficie exterior de un edificio.

Como resumen, en la Fig. 2.10 se presenta una sencilla comparación gráfica entre ambos tipos de carga.

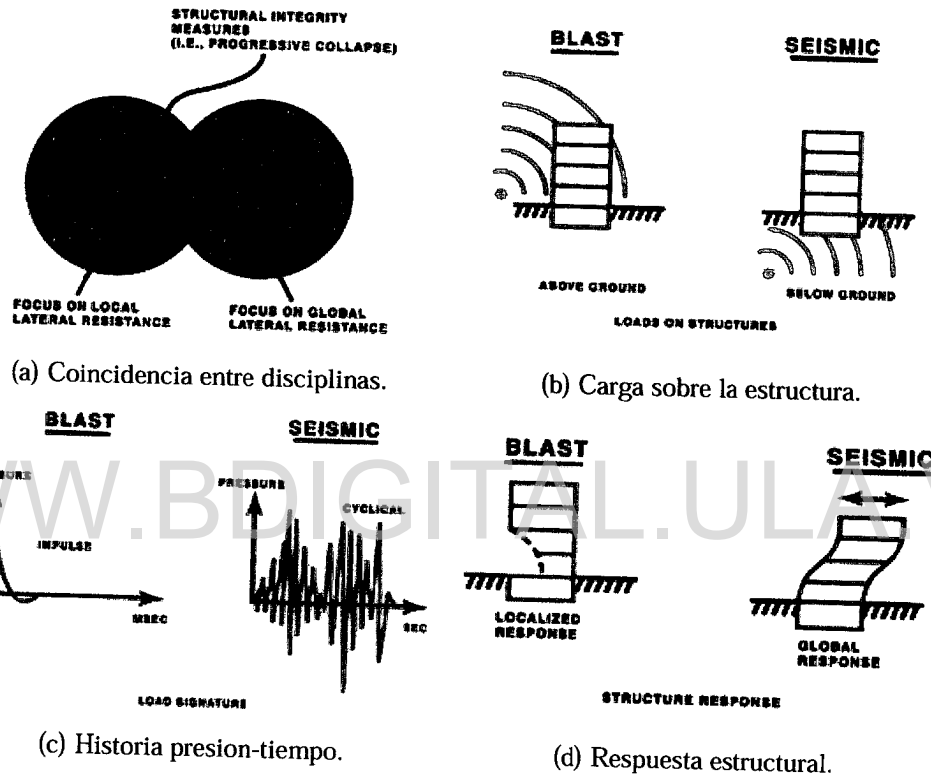


Fig. 2.10. Comparación entre carga explosiva y sísmica –tomado de Hinman (2008)–.

2.2.9. Categorías de las cargas explosivas.-

Las cargas explosivas sobre las estructuras pueden ser divididas en dos grupos principales basados en el confinamiento de la carga explosiva, como lo son: explosiones no confinadas y confinadas (TM 5-1300, 1990).

Las explosiones no confinadas o externas básicamente ocurren al aire libre. El término “no confinadas” es usado para describir explosiones en áreas abiertas. Ya que

este tipo de explosiones son de interés de esta tesis, estas se explicarán con detalle más adelante. Por ahora solo cabe indicar que las explosiones no confinadas se dividen en explosión en el aire “libre”, en el aire y superficiales.

Por su parte, las explosiones confinadas (también llamadas explosiones internas) son las que ocurren dentro de un espacio confinado parcial o totalmente. Ellas se pueden dividir en: completamente ventilada, parcialmente confinada y completamente confinada (TM 5-1300, 1990). En explosiones de este tipo, en general se pueden presentar patrones muy complejos de reflexiones que hacen complicado el tema, y dado el contexto de este capítulo, estas no son explicadas con más profundidad.

En una breve descripción de cada tipo de explosión confinada se tiene que una explosión completamente ventilada es caracterizada por varias superficies de reflexión cercana al punto de detonación, pero también con varias superficies abiertas a la atmosfera. Cuando una explosión se produce dentro de una estructura la cual está parcialmente abierta, con aberturas de tamaños limitados y/o superficies frágiles, se dice que es parcialmente confinada. Finalmente, una explosión completamente confinada es aquella que se ocurre en espacios cerrados. Más pormenores con relación a este tipo de explosiones se pueden encontrar en el manual TM 5-1300 (1990) y el DOE/TIC-11268 (1980).

Ejemplos de las explosiones confinadas son las que suceden en recipientes o tuberías. También se incluyen las explosiones dentro de edificios. Las explosiones al aire libre que encuentran diversos obstáculos como pueden ser equipos de proceso, paredes de edificios, etc., pueden alcanzar cierto grado de confinamiento y turbulencia originando sobrepresiones superiores a las de explosiones no confinadas (Sierra, 2006).

Estas categorías de las cargas explosivas se ilustran en la Fig. 2.11. La figura muestra las seis categorías de posibles cargas, la ubicación en la cual se producirá la explosión y la estructura de protección sujeta a estas cargas.

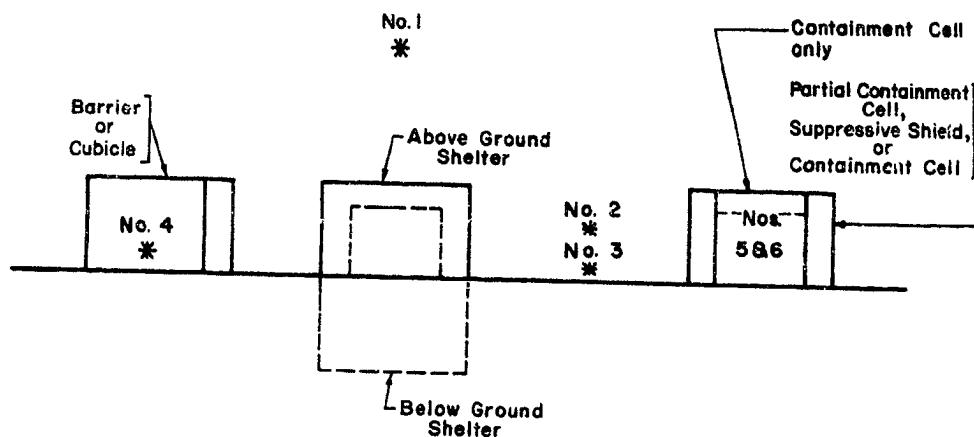


Fig. 2.11. Categorías de las cargas explosivas. Explosiones no confinadas: No.1 en el aire "libre", No.2 en el aire y No.3 superficial. Explosiones confinadas: No.4 completamente ventilada, No.5 parcialmente confinada y No.6 completamente confinada (tomado del TM 5-1300, 1990).

2.2.9.1. Explosiones no confinadas o externas.-

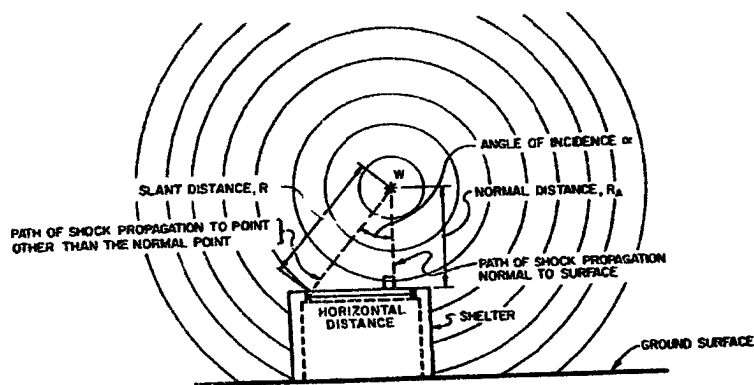
El manual TM 5-1300 (1990) divide las explosiones no confinadas o externas en tres categorías: explosión en el aire "libre", en el aire y superficiales. Estas explosiones son ilustradas en la Fig. 2.12.

- Explosión en el aire "libre" (Fig. 2.12a): Una explosión, que ocurre en el aire libre, produce una onda de choque se propaga alejándose del centro de la detonación, impactando la estructura sin amplificación intermedia de su onda. Como la onda incidente se mueve radialmente alejándose del punto de detonación, explosión, esta hará impacto con la estructura, y, sobre el impacto, la onda inicial (presión o impulso) es reforzada y reflejada.
- Explosión en el aire (Fig. 2.12b): Una explosión que está localizada a una distancia de la estructura de modo que las reflexiones por la superficie del terreno de la onda incidente ocurren antes de arribar la onda explosiva a la estructura. Este tipo de explosión está limitado a aquellas que ocurren a dos o tres veces la altura de un edificio de uno o dos pisos (TM 5-1300, 1990).

Como la onda de choque continúa propagándose a lo largo de la superficie del terreno, un frente conocido como frente “Mach” es formado por la interacción de la onda inicial (onda incidente) y la onda reflejada. Esta onda reflejada es el resultado del reforzamiento de la onda incidente por la superficie del terreno. La variación presión-tiempo del frente Mach es similar al de las ondas incidentes con la excepción que las magnitudes de los parámetros de la explosión son algo más grandes.

La altura del frente Mach se incrementa como la onda se propaga alejándose del punto de detonación. Este incremento en la altura es referido como la trayectoria del triple punto y es formado por la intersección de las ondas inicial, reflejada y Mach.

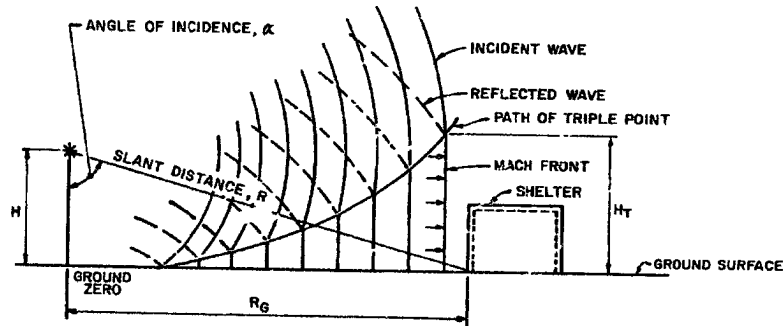
- Explosión superficial (Fig. 2.12c): Una explosión superficial ocurrirá cuando la detonación está localizada cercana a o sobre la superficie del terreno de modo que el choque inicial es amplificado en el punto de detonación debido a las reflexiones del terreno. A diferencia de lo que sucede en una explosión en el aire, la onda incidente y reflejada son fusionadas cerca del punto de detonación en la forma de una onda simple reforzada, similar en naturaleza a la onda Mach pero es esencialmente de forma hemisférica.



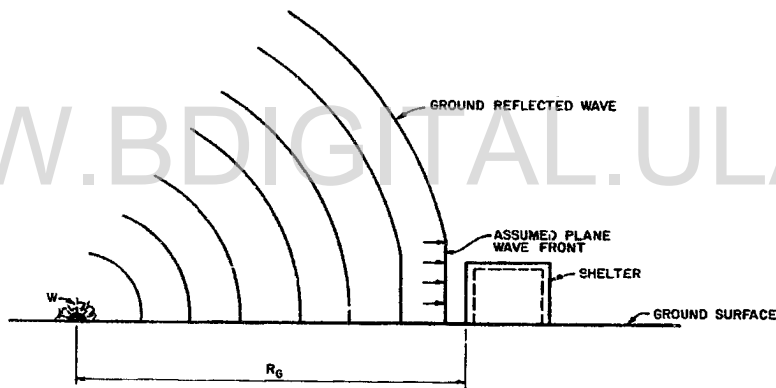
(a) Configuración de una explosión en el aire “libre”.

(...continuación)

(...continuación)



(b) Configuración de una explosión en el aire.



(c) Configuración de una explosión superficial.

Fig. 2.12. Categorías de explosiones externas: (a) explosión en el aire "libre", (b) en el aire y (c) superficiales (tomadas del TM 5-1300, 1990).

2.2.10. Cargas explosivas sobre las estructuras.-

Cuando una onda explosiva que se propaga, impacta la superficie de un objeto o estructura, esta es reflejada y la presión, la densidad, y la temperatura cerca de la superficie aumentan a valores mayores a los de la onda incidente.

La Fig. 2.13 ilustra las cargas explosivas aplicadas a diferentes superficies de un edificio rectangular. Cada superficie puede experimentar una presión diferente basada en su orientación relativa a la dirección de la propagación de la onda de choque.

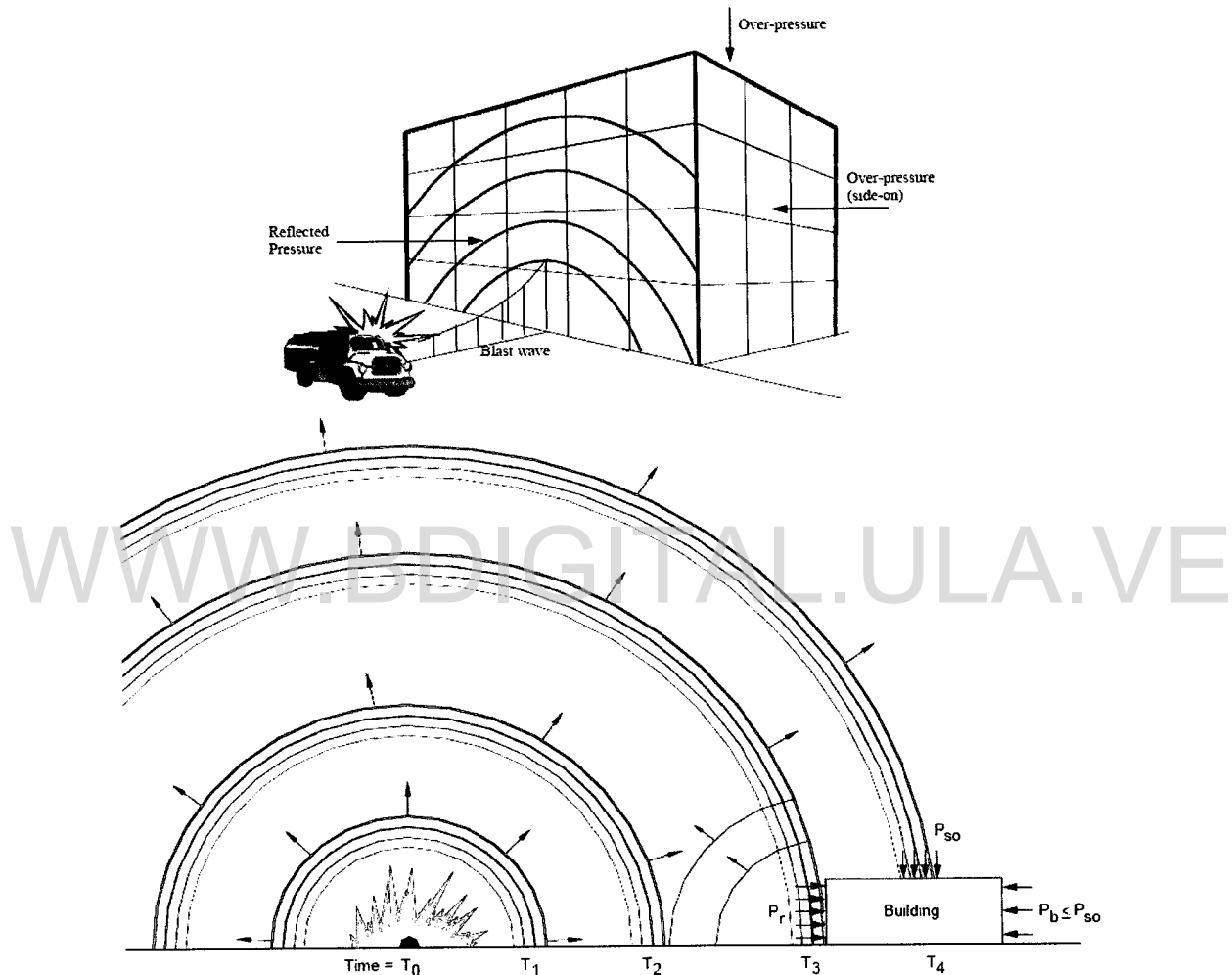


Fig. 2.13. Cargas explosivas sobre las superficies de un edificio (tomados de Ngo et al., 2007 y U.S. Army Corps of Engineers Protective Design Center (PDC), 2006).

Una presión reflejada se presenta en el lado del edificio que hace frente a la onda explosiva. La sobrepresión máxima es amplificada por un factor de reflexión cuando la onda de choque encuentra el edificio en su trayectoria. Para grandes explosiones en

incidencia normal estos factores pueden aumentar la sobrepresión máxima hasta en un orden de magnitud (es decir, un factor de 10). Baker (1973) reporta que la presión reflejada es al menos el doble de la sobrepresión máxima incidente, y puede llegar a ser hasta 8 veces mayor. La presión reflejada es de principal interés ya que para propósitos de diseño, ella produce la carga frontal a aplicar sobre el edificio.

La magnitud de la presión reflejada en una superficie depende del ángulo entre la superficie y la dirección de la propagación de la onda de choque, y el cual es referido como el ángulo de incidencia – U.S. Army Corps of Engineers Protective Design Center (PDC), 2006– (Fig. 2.14). Cuando la onda explosiva encuentra un obstáculo sobre el cual impacta a un ángulo de incidencia de 0° , ella es reflejada normalmente. El caso más usual de carga sobre superficies planas extensas está representado por ondas que golpean con incidencia oblicua. Para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , la reflexión Mach o la reflexión regular ocurre dependiendo del ángulo de incidencia y la fuerza de la onda explosiva (Baker et al, 1983, Smith y Hetherington, 1994 citados por Aráoz & Luccioni, 2007).

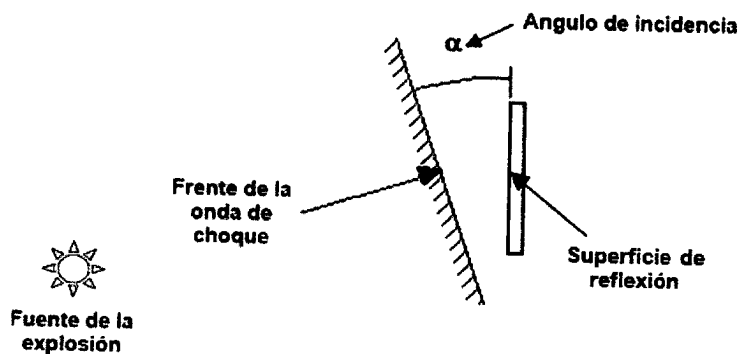


Fig. 2.14. Vista de planta mostrando el ángulo de incidencia del frente de la onda de choque con respecto a la superficie de reflexión.

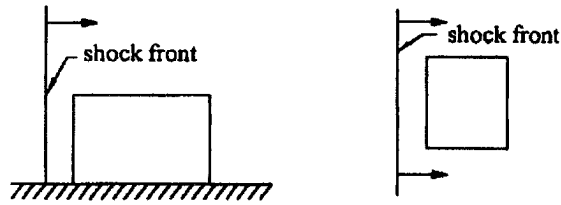
La onda explosiva es reflejada (por la cara de edificio impactada) de vuelta hacia la fuente de la explosión. La onda de choque también envuelve todo el edificio, con efectos de difracción y desplazamiento (Casal et al., 1999), creando patrones de

presión complejos alrededor de la estructura. Respecto al efecto de desplazamiento, es debido a la denominada presión dinámica, ejercida por el viento que sigue siempre a la sobrepresión máxima (Casal et al., 1999). Más adelante, en la interacción onda explosiva-estructura, se explican con más detalle estos efectos. La carga explosiva en todos los lados del edificio paralelos a la dirección de la propagación de onda, como el superior (techo) y los laterales del edificio, es igual a la sobrepresión máxima. La carga en la superficie posterior (trasera o de sotavento) del edificio puede suponerse de forma conservadora igual a la sobrepresión máxima. Sin embargo, ella puede ser afectada considerablemente por vórtices en las esquinas de los lados en la sección de interacción onda explosiva-estructura se da más detalles al respecto).

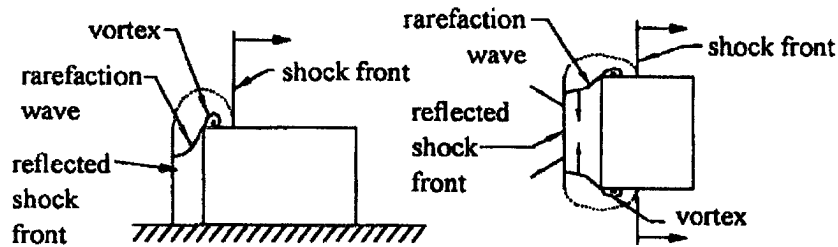
Cuando un explosivo está ubicado muy cerca del edificio impone una carga de presión altamente impulsiva y de elevada intensidad, sobre una zona localizada del edificio; y para un explosivo situado a una distancia lejana producen una distribución de presión uniforme de intensidad baja y duración más larga.

2.2.10.1. Interacción onda explosiva-estructura.-

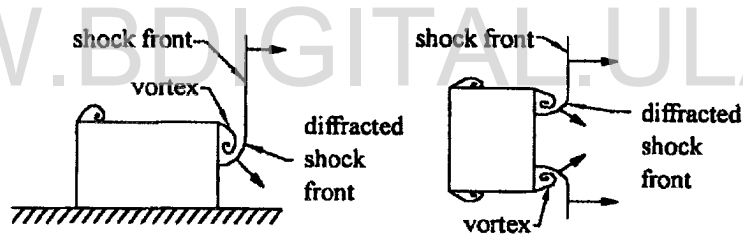
La interacción entre la onda explosiva y una estructura es de por si un proceso bastante complejo dado los distintos y complicados fenómenos que en ella intervienen. Esta interacción entre el frente de choque y tal obstáculo es llamada difracción (Baker, 1973). Este proceso puede ser ilustrado describiendo la secuencia idealizada de eventos que ocurren durante el encuentro de una onda explosiva y una estructura rectangular rígida, como se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.15. El frente de choque de la onda explosiva en la Fig. 2.15 es mostrada viajando horizontalmente de izquierda a derecha y se asume una incidencia normal sobre la superficie frontal sólida (es decir, sin aberturas o ventanas frágiles y que la explosión está lejana de la estructura de modo que el frente de la onda de choque es efectivamente plana. Sin embargo, dependiendo de la ubicación de la potencial amenaza explosiva relativa a la posición de la estructura, la onda puede impactar la estructura en cualquier dirección.



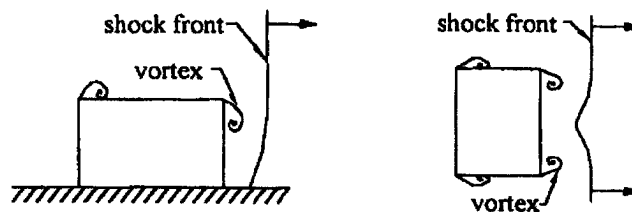
(a) El frente de la onda de choque (onda plana) se aproxima a la estructura.



(b) El frente de la onda de choque es reflejado de la superficie frontal y difractado sobre la estructura.



(c) La difracción continúa a través de la superficie posterior.



(d) La difracción es completada. El frente de la onda de choque pasa más allá de la estructura.

Fig. 2.15. Esquema de la interacción de la onda explosiva con una estructura rectangular (TNO Green Book, 1992 tomado del ASCE, 1997).

La geometría tanto de la onda como de la estructura es mostrada en la Fig. 2.15a, con el frente de la onda de choque (u onda incidente) que se propaga normalmente (es decir, actúa con ángulo de incidencia de 0°) hacia la cara frontal de la estructura. En ese instante, cuando el frente de choque se aproxima, la presión sobre todos los lados de la estructura es la presión atmosférica o ambiental.

Cuando la onda incidente encuentra la estructura (Fig. 2.15b), la porción que impacta sobre la cara frontal es reflejada, desplazándose hacia la izquierda y la presión sobre esa cara se incrementa a un valor P_r , como se ha explicado anteriormente. Por encima de la estructura, en la cara o superficie superior, el frente de onda incidente continúa propagándose relativamente sin distorsión. Como la onda es reflejada hacia atrás, es decir, hacia la izquierda, un frente de onda de rarefacción se desplaza hacia abajo en la cara frontal, como se muestra en la Fig. 2.15b. Un vórtice, el cual es flujo turbulento en rotación espiral a una alta velocidad con sobrepresiones bajas en su centro debido al efecto Venturi –Efecto que consiste en la disminución de la presión de un fluido y el aumento de la velocidad del mismo al hacerlo pasar por el estrechamiento de un conducto (Sánchez, 2006)–, es generado sobre el vértice superior izquierdo de la estructura. En ese mismo instante, la parte inferior de la cara frontal aun siente la presión reflejada P_r , mientras en la parte superior de dicha cara registra una presión más baja bastante cercana a la de la onda incidente, P_o . En la superficie o cara superior, detrás del frente de la onda de choque es sometida a la misma una presión P_o , con la presión quizás reducida un tanto por debajo de ese valor en las cercanías del vórtice. Adelante del frente de la onda de choque, la presión en la cara superior y sobre la superficie posterior es aún la presión atmosférica.

Como el frente de la onda de choque pasa más allá de la cara posterior (trasera) de la estructura, es difractada sobre esta cara, como se muestra en la Fig. 2.15c. Un segundo vórtice es formado en el vértice superior derecho de la estructura. En ese instante, la onda reflejada de la cara frontal ha sido completamente atenuada por la onda de rarefacción, y la presión sobre la cara frontal es la presión dinámica q . Sobre la cara superior, la presión es aún casi igual a la presión del frente de la onda de

choque P_o . Detrás de la onda incidente difractada sobre la cara posterior, la presión es un tanto menor que P_o . Delante de este frente, la presión es P_o . La máxima presión sobre la superficie posterior se desarrolla lentamente como resultados del fenómeno del vórtice y el tiempo requerido para que esa superficie sea envuelta por la onda explosiva.

En la etapa final (Fig. 2.15d), la onda incidente ha pasado más allá de la estructura, el proceso de difracción termina, y la estructura está inmersa en un campo de flujo detrás del frente de la onda.

El proceso descrito anteriormente también ocurre a lo largo de las caras laterales de la estructura, de modo que la explicación precedente también se aplica a la difracción en tales caras de la estructura. Este proceso es ilustrado en la Fig. 2.15.

Como puede observarse, en la interacción de una onda explosiva con un obstáculo, destacan dos efectos:

1. La difracción, que es un efecto resultante de la diferencia de presión generada en el obstáculo cuando la onda explosiva pasa sobre él. Cuando el frente de onda impacta la cara frontal de un obstáculo, ésta experimenta una reflexión (explicada antes). Sin embargo, como el obstáculo tiene dimensiones finitas, la onda incidente sigue en la dirección original de la propagación y finalmente envuelve el obstáculo por completo. Esto es conocido como difracción. Este efecto es dado por las fuerzas producidas de la presión incidente (sobrepresión) y la reflejada, y el flujo alrededor del obstáculo determina el desarrollo de la presión adicional en las caras frontal y posterior.
2. El desplazamiento, descrita anteriormente, es debido a la denominada presión dinámica, ejercida por fuertes vientos que sigue siempre al frente de la onda de choque. Después de que la difracción es completada, fuertes vientos (vientos de la explosión) con velocidades de flujo de varios 100 m/seg son efectivos. Cuando se da este efecto, también se dice que el obstáculo es sometido a una presión de estancamiento (en inglés, "stagnation pressure") –

HySafe, 2006-. Este desplazamiento depende de los parámetros de la onda de choque (amplitud y duración), además de la forma del obstáculo (Beveridge, 1998).

Para configuraciones geométricas más complejas es necesario recurrir a técnicas de análisis numérico comúnmente referidas como dinámica de fluidos computacional (o en breve CFD por sus siglas en inglés).

2.2.10.2. Idealización de las cargas explosivas sobre las estructuras.-

Lo antes explicado ha mostrado la complejidad del proceso de interacción entre la onda explosiva y cualquier obstáculo o estructura. Sin embargo, para propósitos de diseño y análisis estructural, las cargas explosivas resultantes pueden ser simplificadas, como se ilustra en la Fig. 2.16, basado en la onda idealizada discutida en la sección 2.2.5.

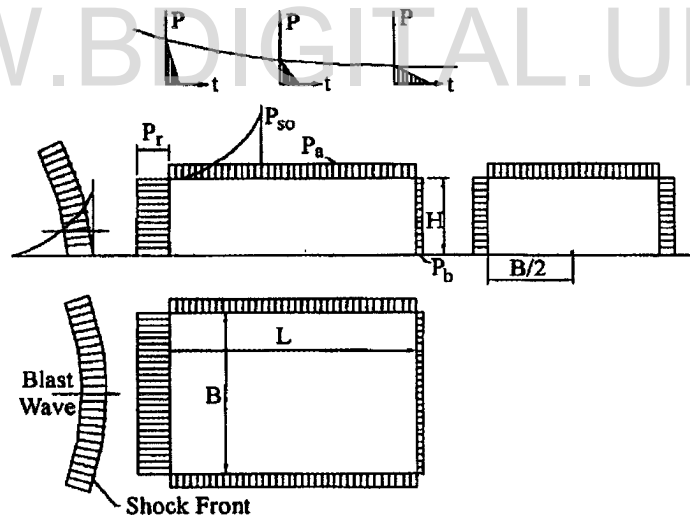
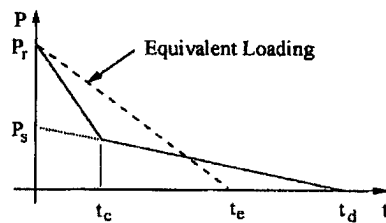


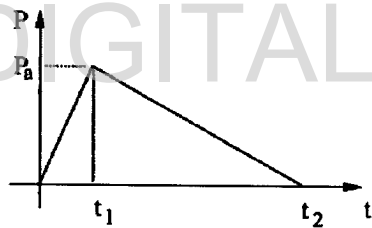
Fig. 2.16. Disposición general de las cargas explosivas idealizadas sobre una estructura rectangular (tomado del ASCE, 1997).

Básicamente, cualquier superficie frontal a una explosión experimentará una presión reflejada P_r (amplificada). Para un obstáculo o estructura con una cara superior plana (como la de la Fig. 2.16) generalmente se asume que la reflexión no ocurre cuando la

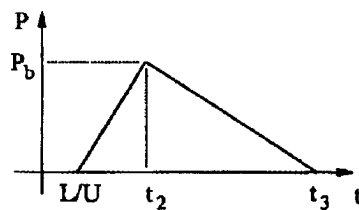
onda explosiva viaja horizontalmente, aunado a la atenuación de la onda con la distancia, dicha cara soportará una presión P_a formada por la sobrepresión máxima (incidente) combinada con la presión dinámica (ASCE, 1997). La misma presión actuará sobre los lados laterales. La presión en la cara posterior, similar a las de las caras laterales y superior, es la sobrepresión atenuada promedio con un valor máximo P_b . En la Fig. 2.17 se observa la forma de estas cargas idealizadas sobre las distintas superficies de un obstáculo o estructura rectangular como la mostrada en la figura anterior.



(a) En la cara frontal.



(b) En las caras laterales y superior.



(c) En la cara posterior.

Fig. 2.17. Forma de las cargas idealizadas sobre una estructura rectangular (tomado del ASCE, 1997).

Más detalles acerca de estas idealizaciones se pueden conseguir en los manuales TM 5-1300 (1990) y ASCE (1997).

2.3. Respuesta estructural ante cargas explosivas.-

Una estructura sujeta a una carga dinámica puede exhibir un comportamiento diferente comparado a una estructura cargada estáticamente, sobre todo si la carga aplicada es gran magnitud y corta duración. Tal carga podría ser aquella producto de la detonación de un explosivo de alta potencia. La fuerte variación de la presión generada por la explosión produce aceleraciones en los elementos estructurales que impacta y, por consiguiente, los efectos inerciales y de la energía cinética deben ser considerados en el análisis dinámico. No es relevante diseñar una estructura para la carga dinámica severa como las explosivas sólo considerando su comportamiento elástico. Tal estructura sería demasiado robusta y poco económica. En cambio, los elementos estructurales deberían ser diseñados para permitir la deformación plástica, y así mejorar la utilización de las capacidades absorción de energía de la estructura. De este modo, esto es de suma importancia para diseñar elementos dúctiles que pueden sufrir grandes deformaciones plásticas y los modos de falla frágiles tienen que ser prevenidos cuando cargas dinámicas severas sean consideradas.

La complejidad en el análisis de la respuesta dinámica de estructuras sometidas a cargas explosivas implica el efecto de altas velocidades de deformación, el comportamiento inelástico no lineal del material, las incertidumbres del cálculo de la carga explosiva y las deformaciones dependientes de tiempo. Por lo tanto, para simplificar el análisis, varias supuestos relacionados con la respuesta de las estructuras y las cargas han sido propuestas y extensamente aceptadas. Para establecer los principios de este análisis, la estructura es idealizada como un sistema de un grado de libertad (UGDL, SDOF en inglés) y la relación entre la duración positiva de la carga explosiva y el período natural de vibración de la estructura es establecida. Esto conlleva a la idealización de carga explosiva y simplifica la clasificación de los regímenes de la carga explosiva.

La respuesta estructural dependerá del tamaño, forma y peso del objeto o estructura, de la condición de apoyo, y también de la existencia de aperturas en cada cara de la estructura.

2.3.1. Regímenes de respuesta estructural.-

La respuesta estructural a carga explosiva es significativamente influenciada por la relación t_d/T ó ωt_d . Tres (3) regímenes de carga son categorizados de la siguiente manera (Ngo et al., 2007):

- $\omega t_d < 0,4$: régimen de carga impulsiva
- $0,40 < \omega t_d < 40$: régimen de carga dinámica
- $\omega t_d > 40$: régimen de carga cuasi-estática

En Smith & Hetherington (1994) –citado por Showichen, 2008– describen estos tres (3) regímenes los cuales relacionan la carga explosiva y la respuesta estructural. La Fig. 2.18 muestra estos tres regímenes gráficamente, donde $R(t)$ es la resistencia de estructura con el tiempo y $F(t)$ es la carga variando en el tiempo. El primer régimen es el del llamado régimen de carga cuasi-estática, donde la duración de la carga es mucho más grande que el periodo natural de vibración de la estructura, por ejemplo, una onda explosiva de un dispositivo nuclear en un rango de medio a largo se propaga a la estructura. El máximo desplazamiento en este caso es solamente una función de la sobrepresión máxima y la rigidez, y no involucra ni la duración de la fase positiva ni la masa de la estructura. El segundo régimen es referido como de carga impulsiva donde la duración de la fase positiva de la explosión es mucho más corta que el periodo natural de vibración de la estructura. En este caso, la onda explosiva alcanza a su máximo y disminuye a su mínimo antes que la estructura haya tenido tiempo de responder significativamente. El tercer caso es el correspondiente al régimen de carga dinámica, donde la duración de la onda explosiva y el tiempo de respuesta de la estructura son similares.

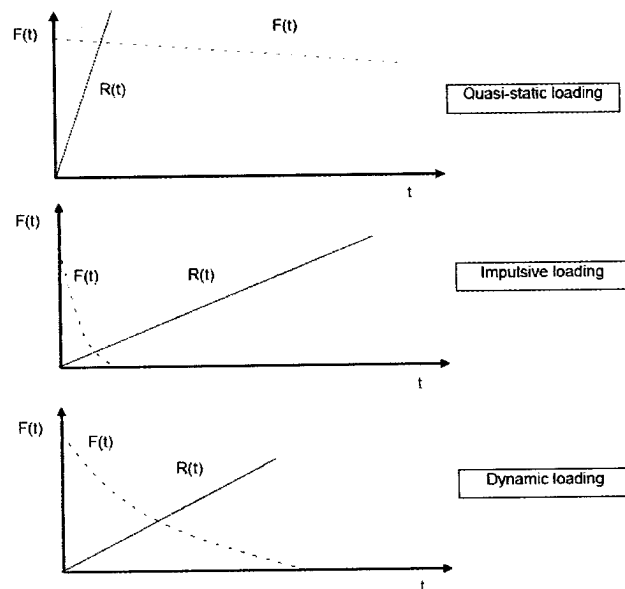


Fig. 2.18. Tipos de cargas explosivas y respuestas estructurales (tomado de Showichen, 2008).

Un análisis ingenieril de presiones de explosiones asociadas con detonaciones de explosivos de alta potencia actuando sobre una estructura debe ser realizado para describir la respuesta de esa estructura. Según el TM 5-1300 (1990), la respuesta a cargas explosivas puede ser expresada en términos de rangos de diseño de acuerdo a la intensidad de la presión, a saber, (a) presión alta, y (b) presión baja. Estos rangos de diseño están relacionados a la posición relativa de la estructura a la explosión.

En un rango de diseño de presión alta, la presión inicial que actúa sobre una estructura es extremadamente alta y amplificada por sus reflexiones en la estructura. Además las duraciones de las cargas aplicadas son cortas. Estas duraciones son también cortas en comparación al tiempo de la respuesta (tiempo en alcanzar la máxima deflexión). Por tanto, las estructuras sometidas a efectos de explosiones en el rango de presión alta pueden, en ciertos casos, ser diseñadas para el impulso (área bajo la curva presión-tiempo) más que la presión máxima asociada con la más larga duración de la presiones de la explosión.

Estructuras sujetas a presiones de explosiones asociadas con el rango de presión baja mantiene presiones máximas de intensidades más pequeñas que aquellas asociadas con el rango de presión alta. Sin embargo, la duración de la carga puede aún exceder el tiempo de respuesta de la estructura. Los elementos estructurales diseñados para el rango de presión baja dependen tanto de la presión como del impulso. En casos donde la presión máxima es relativamente baja y la carga explosiva es muy grande (varios cientos de miles de libras de explosivo) la duración de las presiones de explosiones será extremadamente larga en comparación a aquellas de pesos de explosivo más pequeños. Aquí la estructura responde principalmente a la presión máxima de una manera similar a aquellas estructuras diseñadas para resistir el efecto de detonaciones nucleares. Este último caso, aunque pocas veces se encuentra, es a veces referido como el rango de presión muy baja.

En la Fig. 2.19 se indican semicuantitativamente los parámetros para los cuales definen los rangos de diseño (incluyendo el rango de presión muy baja) de un elemento, junto con la relación aproximada entre el tiempo en alcanzar la máxima deflexión y la duración de la carga.

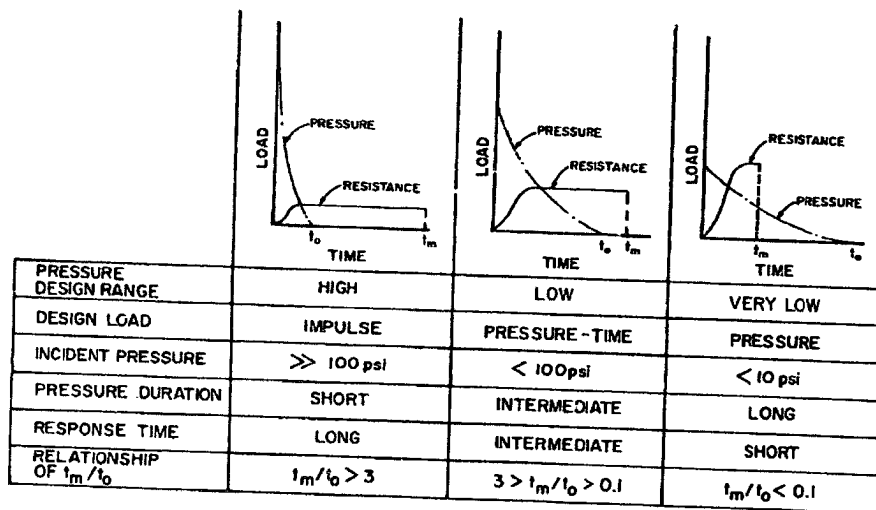


Fig. 2.19. Rangos de presión de diseño (tomado de TM 5-1300, 1990).

2.3.2. Sistemas de un grado de libertad elásticos y elastoplásticos.-

Sistemas de un grado de libertad elásticos.- La discretización más simple de problemas dinámicos o transitorios es por medio de una aproximación de un sistema de un grado de libertad. La estructura real puede ser sustituida por un sistema equivalente de una masa concentrada y un resorte (de masa despreciable) representando la resistencia de la estructura a la deformación. Este sistema idealizado es ilustrado en la Fig. 2.20. La masa estructural, M , está bajo el efecto de una fuerza externa, $F(t)$, y la resistencia estructural, R , es expresada en términos del desplazamiento vertical, y , y la constante de resorte, K .

La carga explosiva también puede ser idealizada como un pulso triangular, teniendo una fuerza máxima F_m y una duración de la fase positiva t_d (Ver Fig. 2.20). La función de excitación es dada como

$$F(t) = F_m \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad \text{Ec. 2.6}$$

El impulso es aproximado como el área bajo la curva fuerza-tiempo, y es dado por

$$I = \frac{1}{2} F_m t_d \quad \text{Ec. 2.7}$$

La ecuación de movimiento de un sistema de un grado de libertad elástico no amortiguado para un tiempo entre "0" y duración de la fase positiva t_d , es dado por Biggs (1964) como

$$M \ddot{y} + Ky = F_m \left(1 - \frac{t}{t_d}\right) \quad \text{Ec. 2.8}$$

Las soluciones generales para desplazamiento y la velocidad pueden ser expresada como,

$$y(t) = \frac{F_m}{K} (1 - \cos \omega t) + \frac{F_m}{K t_d} \left(\frac{\sin \omega t}{\omega} - t \right) \quad \text{Ec. 2.9a}$$

$$\dot{y}(t) = \frac{dy}{dt} = \frac{F_m}{K} \left[\omega \operatorname{sen} \omega t + \frac{1}{t_d} (\cos \omega t - 1) \right] \quad \text{Ec. 2.9b}$$

en el cual ω es la frecuencia circular natural de vibración de la estructura y T es el periodo natural de vibración de la estructura la cual está dada por la Ec. 2.10.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad \text{Ec. 2.10}$$

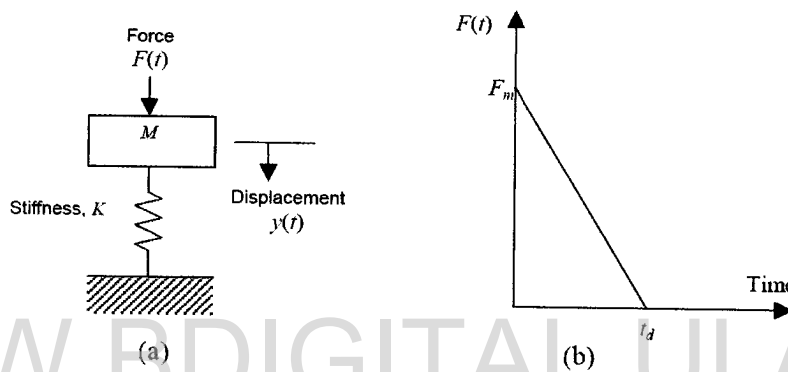


Fig. 2.20. (a) Sistema de un grado de libertad (b) carga explosiva triangular equivalente (tomado de Ngo et al., 2007).

La respuesta máxima es definida por la deflexión máxima dinámica y_m que ocurre en el tiempo t_m . La deflexión máxima dinámica y_m puede ser evaluada poniendo dy/dt igual a cero en la Ec. 2.9b, es decir cuando la velocidad estructural es cero. El factor de carga dinámica, *DLF* (Dynamic Load Factor, en inglés), es definido como la relación de la deflexión dinámica máxima y_m y la deflexión estática y_{st} –que es resultado de la aplicación estática de la carga máxima F_m – (Ec. 2.11):

$$DLF = \frac{y_m}{y_{st}} = \frac{y_m}{F_m/K} \quad \text{Ec. 2.11}$$

La respuesta de todos los sistemas dinámicos estructurales implica un cierto grado de amortiguamiento y si un estado de vibración forzada es estudiado entonces el amortiguamiento es muy importante tenerlo en cuenta. Sin embargo, los efectos del

amortiguamiento son raramente considerados en el análisis de estructuras sujetadas a cargas explosivas porque el amortiguamiento tiene muy pequeño efecto en la deflexión máxima, que por lo general es la única respuesta del interés (Baker et al., 1983 citados por Magnusson, 2007). La razón de esto es que el amortiguamiento estructural es mucho menor que para otros sistemas donde el amortiguamiento crítico tiene que ser considerado. Además, la energía absorbida debido a las deformaciones plásticas del elemento es mucho mayor que aquella absorbida por el amortiguamiento estructural.

Sistemas de un grado de libertad elastoplásticos.- Se espera que elementos estructurales sufran grandes deformación plástica o inelástica bajo cargas explosivas. El análisis exacto de la respuesta dinámica es entonces posible solamente con la solución numérica paso a paso requiriendo un software de análisis dinámico no lineal por elemento finito. Sin embargo, el grado de incertidumbre tanto en la determinación de la carga como en la interpretación de admisibilidad de la deformación resultante es tal que la solución de un sistema de un grado de libertad elastoplástico ideal equivalente (Biggs, 1964) es comúnmente usado. La interpretación está basada en el factor de ductilidad requerido $\mu = y_m/y_e$, usando una función de resistencia elastoplástica perfecta con una resistencia máxima de R_u (Fig. 2.21).

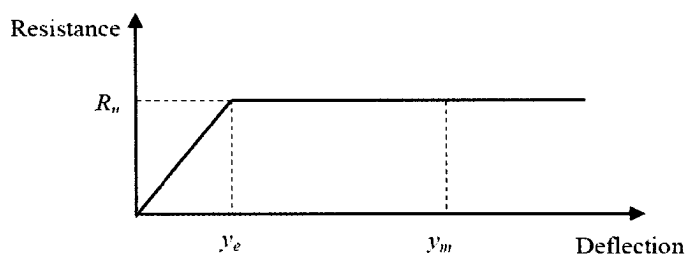


Fig. 2.21. Función de resistencia simplificado de un sistema de un grado de libertad elastoplástico (tomado de Ngo et al., 2007).

Diversos gráficos han sido desarrollados para la respuesta máxima de sistemas de un grado de libertad sometidos a diferentes tipos de funciones de cargas simples y con una función de resistencia bilineal. Tal tipo de gráfico es presentado en la Fig. 2.22.

La relación t_d/T y la relación entre la resistencia interna a la carga aplicada R_u/F_m es suficiente para una solución de la máxima respuesta, la cual es presentada como la relación de la respuesta máxima y la elástica y_m/y_e , es decir, la ductilidad requerida μ .

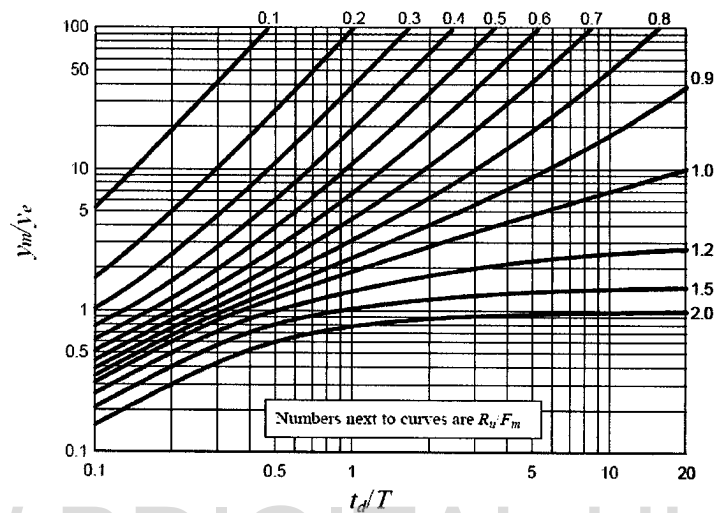


Fig. 2.22. Respuesta máxima de un sistema de un grado de libertad elastoplástico para una carga triangular (tomado de Ngo et al., 2007).

No siempre es posible obtener soluciones a través de la forma antes descrita, por lo que soluciones numéricas pueden ser usadas. Básicamente, estos consisten en modelar la estructura como un sistema de un grado de libertad y se resuelve la ecuación de movimiento usando técnicas de integración numérica. Hay varios métodos simples UGDL en libros clásicos de dinámica estructural como el Biggs (1964) y Clough & Penzien (1993) y también en el manual TM 5-1300 (1990) y TM 5-856-3 (1957).

2.4. Efecto de las explosiones sobre las estructuras.-

Los efectos de la expansión de la onda de choque sobre un edificio se muestran en la Fig. 2.23.

La onda expansiva de ráfaga de aire es el mecanismo de daño primario en una explosión. Las presiones que esto ejerce en el edificio de superficies pueden ser varias órdenes de la magnitud mayor que las cargas para las cuales el edificio es diseñado.

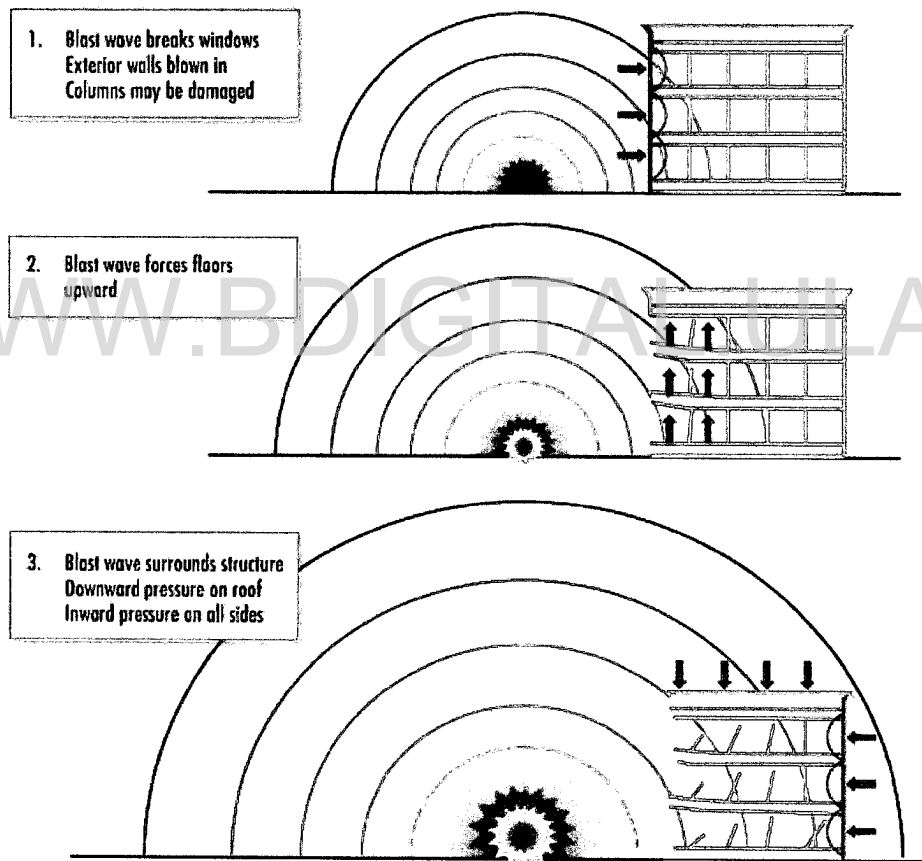


Fig. 2.23. Secuencia de los efectos de la onda explosiva sobre una estructura (tomado de FEMA 426).

Si la fachada exterior del edificio es capaz de resistir las cargas explosivas, el frente de choque penetra a través de aberturas de puertas y ventanas, sometiendo los pisos, techos, paredes, personas, etc., a presiones súbitas y a fragmentos de ventanas, puertas, etc. destruidos. Los componentes del edificio que no son capaces de resistir la onda explosiva se fracturarán y adicionalmente se fragmentarán y moverán por la presión dinámica que inmediatamente sigue al frente de choque de la onda. El mobiliario y las personas del edificio se desplazarán y caerán en dirección de propagación de onda explosiva. De esta forma la explosión se propagará por el edificio

Algunos otros efectos son descritos por Hinman (2008):

- La presión que actúa sobre la cara frontal del edificio es amplificada por factores que pueden ser hasta diez veces la presión incidente. Esta presión es conocida como presión reflejada. Ya que no se sabe sobre cual(es) lado(s) del edificio actuará la onda explosiva, todos los lados deben ser diseñados para el peor de los casos.
- La onda explosiva en el aire trae consigo una fase negativa o de succión después de la fase positiva. Las presiones de la fase negativa pueden gobernar la respuesta en regiones de baja presión, causando el rompimiento en las ventanas exteriores o el desprendimiento de la estructura de techo inclinado.
- Elementos esbeltos, como por ejemplo algunas columnas exteriores las cuales tienen menos área de superficie para que la explosión (en el aire) actúe, tienden a ser más sensibles a los efectos de arrastre que a la presión directa, ya que la explosión tiende a rodear estos elementos disminuyendo el tiempo en que la presión reflejada actúa
- El rebote de los componentes (elementos) de la fachada exterior después de la explosión puede empujar los elementos fuera de la fachada exterior del edificio. Este efecto es diferente al de la presión negativa discutido anteriormente. El rebote se refiere a la reversión del movimiento estructural debido a las vibraciones más que a la reversión de la dirección de la carga. En

vista de que el objetivo del diseño es proteger al personal, la falla de la fachada en la dirección hacia afuera puede ser aceptable siempre que las amenazas de caídas de escombros después del evento y los puntos de salidas bloqueados se eviten.

- Inmediatamente debajo de la explosión, un cráter se formará y el cual puede causar daño a la base del edificio.
- Además de la propagación de una onda de presión en el aire, una parte de la energía es transmitida a través del suelo. Este efecto es análogo a un sismo de alta intensidad y corta duración, que pueden alterar la funcionalidad de los equipos mecánicos y eléctricos. Para explosiones por encima del suelo, este efecto es insignificante y que generalmente no se toma en cuenta en el diseño.

La siguiente tabla, basada en los datos del departamento de defensa de Glasstone & Dolan (1977) y Sartori (1983) –citados por Zipf & Cashdollar (s.f.), resumen los efectos del aumento de la presión en varias estructuras. Esta data producto de ensayos de armas y estudios de explosiones evalúa los efectos de la sobrepresión sobre estructuras y personas. Estos datos proporcionan alguna guía sobre los posibles efectos de las explosiones sobre las estructuras.

Tabla 2-4. Efectos de varias sobrepresiones pico y la velocidad del viento máxima asociada sobre varias estructuras (Zipf & Cashdollar, s.f.).

Peak overpressure	Maximum wind speed	Effect on structures	Effect on the human body
1 psi	38 mph	Window glass shatters	Light injuries from fragments occur
2 psi	70 mph	Moderate damage to houses (windows and doors blown out and severe damage to roofs)	People injured by flying glass and debris
3 psi	102 mph	Residential structures collapse	Serious injuries are common. fatalities may occur
5 psi	163 mph	Most buildings collapse	Injuries are universal. fatalities are widespread
10 psi	294 mph	Reinforced concrete buildings are severely damaged or demolished	Most people are killed
20 psi	502 mph	Heavily built concrete buildings are severely damaged or demolished	Fatalities approach 100%

2.5. Diseño estructural.-

El diseño de instalaciones militares para resistir explosiones es con frecuencia sencillo, porque una geometría relativamente simple puede ser impuesta por los diseñadores, ahí limitada provisión de aberturas para ventanas y puertas, junto con el potencial para uso extenso del concreto armado. Con tales características una estructura relativamente robusta puede ser fácilmente diseñada para resistir una variedad de eventos explosivos.

Para estructuras civiles, el tema es más complejo. Típicamente tales estructuras son geométricamente complejas. Además las fachadas son extensivamente vidriadas, las cuales bajo una explosión generará una gran cantidad de fragmentos extremadamente peligrosos.

De acuerdo con Horoschun (2005), una variedad de temas se deben tratar en el diseño estructural de edificios para resistir explosiones. El diseño debe reconocer,

- La incertidumbre en la carga de diseño.
- La influencia de fragmentación, tanto las generadas por las mismas cargas como por las fallas de los elementos estructurales y no estructurales.
- Mientras el diseño de elementos estructurales es comúnmente dirigido a la respuesta a flexión de tales elementos ante explosiones, se debe reconocer también que otros modos de falla pueden ocurrir.
- El efecto potencial de una explosión sobre personas.

En el diseño de un edificio civil es necesario considerar,

- La falla de la fachada (vitrales, mampostería sin confinar, etc.).
- El impacto sobre las columnas del edificio localizadas en la fachada.
- Elevación en losas. Las losas no son normalmente reforzadas para sostener cargas de elevación significativas, tales miembros se agrietarán fácilmente y se levantarán.
- La acción de fragmentos (escombros) de pared perimetrales destruidas.

Un objetivo de diseño crítico es prevenir la explosión de todo el edificio, no sólo para proteger al personal en el edificio de los efectos directos de la explosión sino minimizar la oportunidad de que la explosión colapse la estructura.

Dos aproximaciones son comúnmente usadas en el análisis de estructuras ante cargas explosivas,

- Métodos simplificados.
 - Con estas técnicas el elemento estructural es modelado como un sistema de un grado elástico-plástico equivalente. El análisis dinámico es efectuado para una carga idealizada (comúnmente asumida de forma triangular).
 - Las transformaciones a un sistema equivalente es factible sólo para geometrías planas relativamente simples.
 - Tal técnica permite una solución razonable, no obstante aunque los resultados son considerados conservadores, su grado es difícil de establecer.
 - Algunos tópicos tales como la falla por corte no son considerados.
- Análisis dinámico no lineal usando elementos finitos.
 - Aunque tales análisis proporcionan un sentido de precisión se debe apreciar también sus limitaciones.
 - Debe saberse bien que incluso la naturaleza del modelo adoptado puede impedir la manifestación de varios mecanismos de falla.
 - Los efectos de la velocidad de deformación necesitan ser incluidos.

La selección del método adoptado depende en parte de la complejidad de la estructura a ser diseñada.

2.5.1. Filosofía de diseño.-

Para llevar a cabo el diseño de elementos sometidos a explosiones es esencial tener presente los siguientes datos (Horoschun, 2005),

- Una carga explosiva común normalmente exhibe presiones en el orden de las decenas a miles de kPa, y
- La duración típica de una carga explosiva es muy corta –típicamente entre 1-10 mseg y como consecuencia de ello sobre muchos elementos estructurales sólo actúa una fracción de la carga aplicada–.

A pesar del hecho de que toda la magnitud no sea sentida por un elemento debido a su duración corta, la carga efectiva soportada por el elemento probablemente aun esté en órdenes de magnitud por encima de su capacidad estática. Las opciones disponibles para ello son,

- Aumentar la resistencia del elemento (su tamaño), o
- Aceptar algún daño en el elemento –previendo que la estructura no colapse o se deforme–.

La base del diseño para estas estructuras por lo tanto debe ser modificada. Para estructuras convencionales (bajo cargas estáticas) el requisito básico de diseño por resistencia es que la capacidad de carga sea siempre mayor que las demandas de diseño que se le aplica. Dicha requisito no garantiza la respuesta inelástica (o daños) en condiciones normales. Para cargas explosivas tal criterio es inadecuado y en su lugar se recurre a un requisito basado en la comparación de la máxima deformación estimada de una estructura y algunos límites de deflexión y rotación establecidos.

Para los diseños basados en cálculos manuales, los criterios de deformación comunes son una relación de ductilidad (deflexión máxima) o una rotación máxima como es representado en la Fig. 2.24.

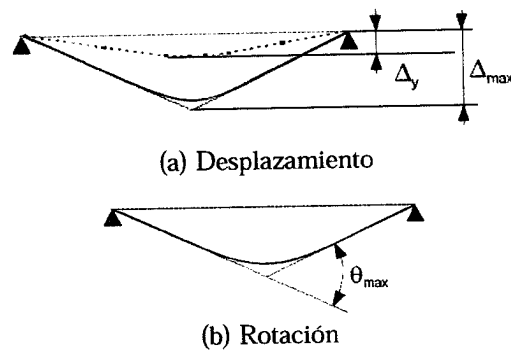


Fig. 2.24. Límites de deformación comúnmente considerados.

El criterio de deformación que se adopte depende del nivel de desempeño requerido por los elementos estructuras o por la estructura en conjunto. Con un elevado límite de deformación (con ello el riesgo al colapso o la rotura se hace mayor), y aun con la ausencia de tales modos de falla, hay un riesgo importante de efectos secundarios que ponen en peligro al personal y a la instalación. De este modo, las instalaciones desocupadas o aisladas del personal pueden ser diseñadas para que acepten un límite de deformación más alto que aquellas instalaciones ubicadas en las proximidades a un área ocupada.

Al mismo tiempo, donde la probabilidad de una explosión es importante (como por ejemplo en un laboratorio de ensayos) se establece niveles de deformación menores a aquellos cuando la probabilidad es más baja. Baker et al. (1983) –citado por Horoschun (2005)– establece unos límites de deformación típicos para diversas instalaciones, y los cuales se presentan en la Tabla 2-5.

Se debe estar consciente de que las herramientas convencionales de análisis no necesariamente identifican todos los posibles modos de falla que puedan producirse por una explosión. Esto es especialmente cierto en los cálculos manuales convencionales, pero también puede ser cierto en análisis no lineales mediante el método de los elementos finitos. En un análisis convencional (que implícitamente se orienta a la acción de la flexión) no dice nada en cuanto a la fragmentación de la estructura o sobre la repentina falla por corte, por citar dos casos.

Tabla 2-5. Límites típicos de deformación de diseño (Horoschun, 2005).

Facility Type	Performance Requirement	Deflection Criteria
Test Facility	Repeated blasts to be sustained without damage	$\Delta_{max}/\Delta_y < 1.0$
Explosives Processing – Personnel in close proximity to structure	Personnel protection required from fragment impact, blast	$\theta_{max} \leq 2^\circ$
Explosives Processing – Personnel remote from structure	Severe damage permitted providing catastrophic damage does not occur	$\theta_{max} \leq 12^\circ$

2.5.2. Modos de falla de estructuras sometidas a cargas explosivas.-

Los efectos de las cargas explosivas en miembros estructurales pueden producir tanto respuestas locales como globales asociadas con diferentes modos de falla. El tipo de respuesta estructural depende principalmente de la velocidad de la carga, la orientación de la estructura con respecto a la dirección de la propagación de onda explosiva y las condiciones de contorno o borde presente (Ngo et al., 2007). Entre los modos de falla generales relacionados con cargas explosivas se encuentran: por flexión, por corte directo ó corte por punzonamiento. Las respuestas locales son caracterizadas por un localizado desmoronamiento ó desprendimiento del material, y generalmente se presentan en explosiones cercanas a la estructura, mientras las respuestas globales son manifestadas comúnmente con fallas por flexión.

2.5.3 Comportamiento de los materiales a velocidades de deformación altas.-

Las cargas explosivas generalmente producen velocidades de deformación muy altas en el rango de 10^2 - 10^4 s⁻¹ (Ngo et al., 2007). Esta alta velocidad modificaría las propiedades mecánicas-dinámicas de las estructuras “objetivos” y, en consecuencia, los mecanismos de daño esperados de varios elementos estructurales. Para estructuras de concreto armado ó acero estructural sometidas a efectos de una onda explosiva, la resistencia tanto del concreto y acero de refuerzo como del acero estructural puede incrementarse considerablemente debido a los efectos de la velocidad de deformación. La Fig. 2.25 muestra los rangos aproximados de velocidades de

deformación esperadas para diferentes condiciones de carga. Se puede ver que velocidades de deformación para cargas estáticas normales están ubicadas en un rango de: 10^{-6} - 10^{-5} s^{-1} , mientras las explosiones normalmente producen cargas asociadas con velocidades de deformación en el rango: 10^2 - 10^4 s^{-1} (Ngo et al., 2007).

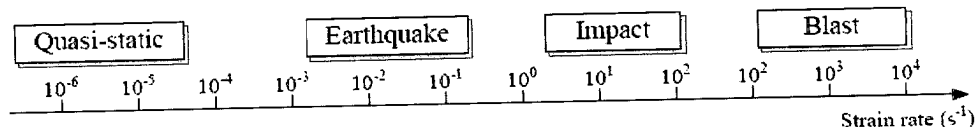


Fig. 2.25. Velocidades de deformación asociada a diferentes tipos de carga (tomado de Ngo et al., 2007).

2.5.4. Manuales técnicos y guías para el diseño resistente a explosiones.-

A través de los años, como resultado de datos y observaciones de ensayos experimentales y procedimientos analíticos, una serie de guías y manuales técnicos de diseño han sido desarrollados. Aunque la mayoría de ellos están dirigidos hacia aplicaciones militares, estos conocimientos son relevantes para la práctica del diseño civil. En Krauthammer (2006) se muestra un breve resumen de los principales manuales técnicos y guías de diseño existentes en la literatura, y que a continuación se presenta:

- Manual TM 5-1300 (1990): Este manual es destinado principalmente para aplicaciones de seguridad a los explosivos. Esta publicación es la más utilizadas por organizaciones militares y civiles; principalmente, para el diseño estructural resistente a los efectos de una explosión. Una de las razones de su amplio es que es de libre accesibilidad. El manual está siendo actualmente revisado.
- Manual TM 5-855-1 (1986 y 1998): Este manual va destinado a ingenieros involucrados en el diseño de instalaciones reforzados para resistir los efectos de armas convencionales. El manual incluye los criterios de diseño para la

- protección contra los efectos de las armas de penetración, detonaciones cercanas, o la explosión y la fragmentación producto de detonaciones lejanas.
- ASCE Manual 42 (ASCE, 1985): El manual viene preparado para proporcionar una guía en el diseño de instalaciones destinadas a resistir los efectos de armas nucleares. Aunque el manual es una excelente fuente de conceptos generales referentes al diseño resistente a explosiones, carece de una orientación específica sobre diversos tópicos, como por ejemplo, los detalles estructurales.
 - ASCE Guidelines for Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities (ASCE, 1997): Esta referencia contiene información detallada y directrices sobre el diseño de las instalaciones industriales resistentes a explosiones, con énfasis en las instalaciones petroquímicas. Incluye las consideraciones de seguridad, ubicación, tipos de construcción, propiedades de los materiales, tópicos de análisis y diseño, y varios ejemplos detallados. La información no está limitada a instalaciones resistentes a explosiones; es muy útil para todos los aspectos del diseño resistente a explosión, incluida la seguridad física.
 - ASCE Structural Design for Physical Security (ASCE, 1999): Este es un reporte del estado de la práctica dirigido a un rango amplio de tópicos en este campo. Inicia con un procedimiento detallado para la evaluación de la amenaza, seguido por una visión general de cómo definir las cargas asociadas con un ataque típico. El comportamiento de sistemas estructurales bajo cargas previstas, y el correspondiente diseño de los elementos estructurales se tratan seguidamente. En diferentes secciones se aborda el comportamiento y diseño de ventanas y puertas para los mismos entornos de carga. Además, una sección es dedicada al reforzamiento de estructuras existentes. Este reporte está a punto de ser revisado y publicado como una guía, en coordinación con la revisión del TM 5-1300 (1990).
 - Criterios DoD and GSA –UFC 4-010-01 (2003), UFC 4-023-03. (2005) & GSA (2003)–: Estas referencias están destinadas a conocer las normas

mínimas antiterrorismo para edificios, y la prevención del colapso progresivo. Ambas publicaciones reconocen que el colapso progresivo podría ser la principal causa de daños en instalaciones atacadas con dispositivos explosivos, e incluye directrices para su mitigación.

- Guía FEMA (FEMA 426, 2003): Esta guía no es una manual técnico o de diseño, pero contiene orientaciones generales claras y comprensivas sobre los tópicos básicos relacionadas con las explosiones. Esta referencia representa una de las herramientas obligatoria consulta para aquellas personas que deseen involucrarse en ese campo.
- Manual DOE (DOE/TIC-11268, 1992): Este manual es similar a TM 5-1300 (1990), como se describe arriba, pero tiene algunas actualizada, basadas en datos más recientes.

2.6. Mitigación de explosiones.-

Como ya es observado anteriormente la magnitud de la presión máxima y el impulso disminuye rápidamente con la distancia. Por esta razón una medida significativa para reducir los riesgos de explosiones sobre una instalación es aumentar lo máximo posible la distancia que existe entre la fuente de la explosión y el obstáculo o estructura a impactar. Típicamente muros perimetrales son construidos sobre los límites de las propiedades para restringir el acceso a las mismas y los edificios son erigidos de manera que ninguna de las fachadas esté a una distancia menor de 30 m de esos límites –Smith & Hetherington (1994) citados por Horoschun (2005)–.

Los muros perimetrales resistentes a explosiones son a menudo sugeridos como una medida de mitigación de los efectos de una explosión sobre la fachada de un edificio, sin embargo, debe tenerse en cuenta que los detalles de los muros y su relación con edificio afectan su grado eficacia. La carga explosiva actuante en la fachada de un edificio es compleja debido a la difracción que ocurre. Mientras en la zona inferior e inmediatamente detrás del muro habrá una reducción significativa de los efectos, en

los puntos más altos en la fachada de edificio se experimenta sólo una reducción modesta –Dove et al. (1989) citados por Horoschun (2005)–.

La provisión de muros resistentes a explosiones como tal no está exenta de preocupación. Como un dispositivo explosivo importante puede en principio actuar con fuerza contra tal muro, hay un riesgo sustancial que la explosión desintegre el mismo y así generar un gran cantidad de fragmentos a alta velocidad que pueden afectar el edificio.

Lamentablemente la opción de incrementar las distancias en entornos poblados es con frecuencia poco viable. Esto, junto con los deseos arquitectónicos para espacios y accesos restringe severamente la posibilidad de proporcionar un edificio con alguna modesta resistencia a las explosiones. En tales casos, es inevitable que se requiera un objetivo de diseño más modesto. No obstante, incluso aquí, asegurando que las distancias de seguridad se mantengan, que la estructura sea redundante, que elementos fuertes y dúctil sean empleados y que la estructura esté diseñada para resistir el colapso progresivo la severidad que pueda generar una explosión puede ser limitada.

2.7. Diagrama Presión-Impulso (P-I).-

El diagrama presión-impulso (P-I) es un forma fácil de relacionar matemáticamente un nivel de daño específico para una combinación de presiones e impulsos impuestos sobre un elemento estructural particular. Un ejemplo de un diagrama P-I es mostrado en la Fig. 2.26 y muestra los niveles del daño de un miembro estructural. La región (I) corresponde al daño estructural severo y la región (II) se refiere a ningún o menor daño. Hay otros diagramas P-I que conciernen a la respuesta humana ante explosiones, en cuyo caso hay tres categorías de lesiones inducidas por explosiones, a saber: primarias, secundarias y lesiones terciarias (Baker et al., 1983 citado por Ngo et al., 2007).

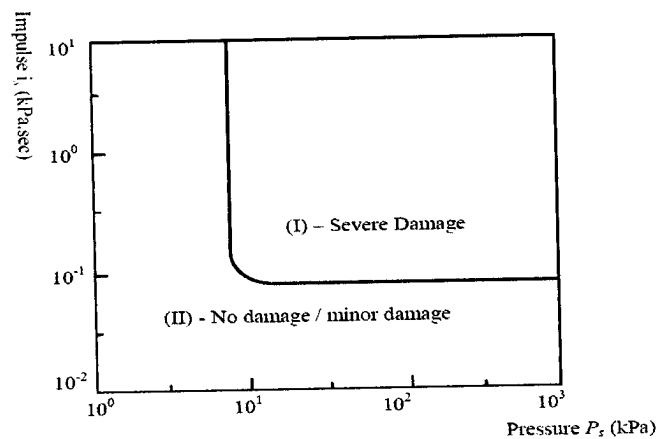


Fig. 2.26. Diagrama presión-impulso (P-I) típico (tomado de Ngo et al., 2007).

2.8. Materiales de construcción.-

Las principales propiedades de los materiales utilizados para soportar explosiones son: la resistencia, la ductilidad y la masa –esta última, particularmente cuando la carga es impulsiva– (Horoschun, 2005).

Para una carga impulsiva la respuesta de deflexión máxima de un elemento rígido-plástico está relacionada con el impulso aplicado de la siguiente manera:

$$\Delta_m \propto \frac{I^2}{2 m_u r_u} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde: Δ_m es el desplazamiento máximo, I el impulso aplicado, m_u la masa efectiva del elemento y r_u la capacidad de carga última del elemento.

De ahí que para una carga impulsiva la masa efectiva del elemento es igualmente tan importante como su resistencia (capacidad de carga). Es por esta razón que el concreto armado es un material ideal para resistir explosiones –un muro estándar de este material puede ser detallado económicamente y conseguir una alta resistencia y

masa efectiva-. Tales elementos de concreto armado proporcionan una excelente protección contra fragmentos.

Mientras una placa de acero, como es más resistente y tiene una densidad más alta, es potencialmente mejor que el concreto armado (la parte económica dicta el uso de secciones relativamente delgadas). Por tanto, la masa efectiva de una placa de acero es considerablemente menor que la del muro de concreto y así la capacidad de carga requiere que sea proporcionalmente mayor, simplemente para compensar la pérdida de masa.

Considerando que las realidades económicas militan en contra del uso de acero en espesores importantes –tanto en los gastos del mismo material, como la fabricación y dificultades de conexión– el principal uso de este material es donde la masa es una preocupación (es decir, en el diseño de puertas resistentes a explosiones, estructuras e instalaciones costa fuera, etc.). Las estructuras de acero son más apropiadas en situaciones donde la presión máxima que define el impulso es más importante que el impulso.

Otros materiales como la madera y la mampostería no reforzada son generalmente inapropiados, pudiendo resistir niveles de explosión muy bajos, y por tanto tiene muy limitado campo de aplicación.

2.9. Programas computacionales para explosiones y sus efectos.-

Los métodos computacionales en el área de la mitigación de los efectos explosivos son generalmente divididos en aquellos usados para la predicción las cargas explosivas sobre las estructuras y aquellos para el cálculo de la respuesta estructural a esas cargas. Los programas computacionales para predicción de la carga explosiva y la respuesta estructural usan tanto métodos de “primeros principios” (en ingles, “first principle”) como métodos semiempíricos (NRC, 1995). En los programas de primer principio, las ecuaciones matemáticas que se resuelven describen las leyes básicas de la física que rigen un problema particular. Estos principios son la conservación de la

materia, momentum y energía. Además, las relaciones matemáticas llamadas ecuaciones constitutivas, que describen el comportamiento físico de los materiales, son necesarios. Si estas ecuaciones se resuelven con precisión y con los modelos matemáticos adecuados, deben predecir las cargas explosivas y la respuesta estructural.

Los métodos computacionales semiempíricos se basan en modelos simplificados de los fenómenos físicos, que son desarrollados a través del análisis de los resultados de ensayos o pruebas y la aplicación de criterios ingenieriles. Implican menos ecuaciones y requieren mucho menos tiempo computacional, lo que les hace más práctico que el de primeros principios para fines de diseño (NRC, 1995).

Los programas que usan el método de primeros principios pueden ser clasificados en análisis acoplados y no acoplados. El análisis no acoplado determina las cargas explosivas como si la estructura (y sus componentes) fuese rígida y entonces se aplican estas cargas a un modelo de la estructura que responde. El defecto de este procedimiento es que cuando el campo de ondas explosivas es obtenido con un modelo rígido de la estructura, las cargas sobre la estructura a menudo son sobreestimadas, particularmente si el movimiento es significativo o la falla de la estructura ocurre durante el período de la carga.

Para un análisis acoplado, el módulo de simulación de la explosión es vinculado con el módulo de la respuesta estructural. En este tipo de análisis el modelo de mecánica de fluidos computacional –Computational Fluid Dynamics (CFD), en ingles– para la predicción de carga explosiva es resuelto simultáneamente con el modelo de mecánica de sólidos computacional –Computational Solid Mechanics (CSM), en ingles– para la respuesta estructural. Tomando en consideración el movimiento de la estructura mientras computa la carga explosiva, las presiones que surgen debido al movimiento y a las fallas de la estructura pueden ser pronosticadas con más precisión. Ejemplos de este tipo de códigos computacionales son AUTODYN, DYNA3D, LS-DYNA y ABAQUS. La Tabla 2-6 resume un listado de los programas

computacionales que están siendo usados actualmente para modelar los efectos de la onda explosiva en estructuras.

Tabla 2-6. Ejemplos de programas computacionales usados para simular los efectos explosivos y las respuestas estructurales (tomado de Ngo et al., 2007).

Name	Purpose and type of analysis	Author/Vendor
BLASTX	Blast prediction. CFD code	SAIC
CTH	Blast prediction. CFD code	Sandia National Laboratories
FEFLO	Blast prediction. CFD code	SAIC
FOIL	Blast prediction. CFD code	Applied Research Associates, Waterways Experiment Station
SHARC	Blast prediction. CFD code	Applied Research Associates, Inc.
DYNA3D	Structural response + CFD (Couple analysis)	Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)
ALE3D	Coupled analysis	Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)
LS-DYNA	Structural response + CFD (Couple analysis)	Livermore Software Technology Corporation (LSTC)
Air3D	Blast prediction. CFD code	Royal Military of Science College, Cranfield University
CONWEP	Blast prediction (empirical)	US Army Waterways Experiment Station
AUTO-DYN	Structural response + CFD (Couple analysis)	Century Dynamics
ABAQUS	Structural response + CFD (Couple analysis)	ABAQUS Inc.

La predicción del campo de presiones (inducido por una explosión) sobre una estructura involucra un comportamiento altamente no lineal. Los métodos computacionales para determinar la respuesta estructural a tal campo, deben por tanto ser validados comparándose con datos experimentales. Se requiere una considerable capacidad y habilidad para evaluar los resultados de una simulación numérica, sin

tales cualidades, es posible que a través de una combinación de errores de modelado y de interpretación, se obtengan resultados incorrectos. Por lo tanto, el éxito de la simulación numérica de cualquier escenario explosivo en estudio por parte de ingenieros que no están familiarizados con estos programas es difícil, más no imposible.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

CAPÍTULO 3

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE EXPLOSIONES EN EL AIRE

3.1. Introducción.-

En los últimos años, las cargas generadas por una explosión han sido y siguen siendo de un gran interés a raíz de los eventos de carácter fortuitos o provocados que han ocurrido en el mundo. A diferencia de otros tipos de cargas, las ondas explosivas que generan este tipo de cargas son realmente complejas ya que involucran algunos efectos importantes tales como las reflexiones múltiples, el efecto Mach, rarefacciones y la fase negativa de la onda.

La rápida expansión del gas caliente que se forma después de la detonación de un explosivo de alta potencia (como por ejemplo el Trinitrotolueno ó TNT), casi instantáneamente comprime el aire circundante produciendo un impulso u onda de choque o de presión que se propaga supersónicamente en todas las direcciones. Cuando este impulso u onda impactan una superficie estructural, estas pueden causar daños a equipos y estructuras, además de lesiones humanas. Es por ello, que para garantizar la seguridad estructural y la protección frente a las explosiones exige el determinar, lo más preciso y confiable posible, la carga que se pueda generar. En el diseño de estructuras para resistir cargas explosivas, los dos principales efectos a considerar, producido por un explosivo, son la sobrepresión máxima o pico (positiva) y su duración, siendo la primera usualmente el factor gobernante en la determinación de la respuesta estructural (TM 5-1300, 1990).

Ahondando un poco más en el proceso de la explosión de un explosivo de alta potencia, éste implica una violenta reacción química la cual convierte la alta energía natural de la carga explosiva en un gas de muy alta presión y temperatura. Este proceso es dividido en dos procesos, el proceso de detonación y expansión inicial (éste se refiere a la interacción entre el gas producido y el material o fluido circundante) y el proceso de propagación de las ondas explosivas. El proceso de

detonación se explica con detalle en el Apéndice A, en resumidas cuentas se puede decir que es la propagación del fenómeno de onda reactiva que actúa a través del explosivo con una velocidad constante relacionada a las propiedades del explosivo involucrado. En el proceso de propagación, la expansión violenta del gas genera una onda de choque fuerte que se propaga en el medio ambiente. Las ondas de choque son creadas porque la velocidad del sonido se incrementa con el aumento de la temperatura en un flujo comprensible. En realidad, la onda viaja a una velocidad más grande que la velocidad del sonido en el medio donde se propaga. Varias propiedades del fluido (densidad, presión velocidad y número Mach) fluctúan discontinuamente. En condiciones atmosféricas, con una relación de calor específico ideal (1,4), la densidad y la presión a través del choque se incrementan mientras la velocidad disminuye y el choque se debilita como su número Mach decrece. Cuando el flujo del número Mach se hace sónico (igual a 1), el salto en la presión densidad y velocidad desaparecen y el choque se desvanece.

Quando se trata de cargas esféricas en el aire, la relación entre la sobrepresión máxima, la distancia desde el punto de medición al centro de la explosión y la energía liberada instantáneamente son bien conocidos. A partir de ellas, se han desarrollado gráficas y ecuaciones analíticas –Brode (1955), Henrych (1979), Kinney & Graham (1985), Kingery & Bulmash (1984), etc.– que han sido ampliamente utilizadas y han contribuido significativamente en el desarrollo de este campo de investigación. Sin embargo, en muchas circunstancias prácticas la forma de la carga no es esférica sino cilíndrica, cordones, bloques rectangulares, etc. En estos casos, las características presión/distancia difieren de las esféricas, y por tanto, las relaciones conocidas para cargas esféricas no tienen validez a otras forma de explosivo.

De acuerdo a lo señalado por Adamík, Vágenknecht, Vávra & Trzcinski (2004), el modelo de la onda explosiva de una carga cilíndrica es muy complejo, de modo que la evaluación precisa de los parámetros de esta onda, tales como la sobrepresión máxima positiva y su duración, no es tarea fácil. Esta complejidad es característica en cualquier carga cuya geométrica no es esférica. En estos casos, la onda explosiva no

entra en contacto con el aire circundante como una onda esférica, ni en el mismo instante sobre la superficie entera de la carga; de modo que, la forma y la energía con que actúa una onda explosiva en el aire dependerá básicamente tanto de la geometría de la carga, como de la ubicación relativa donde ocurre la iniciación de la explosión (DOE/TIC-11268, 1980), es decir de los puntos de detonación. No obstante, el manual DOE/TIC-11268 (1980) señala que se ha encontrado que para una carga particular de geometría no esférica, al incrementar la distancia del explosivo, la onda de presión se hace más esférica y solo pequeños errores son provocados que pueden llevar a despreciar la forma de la carga. Sin embargo, aun se tiene incertidumbre con relación a la distancia para lo cual se de este hecho.

Investigadores como Witsotki & Snyder (1965), Makino & Goodman (1956), Reisler (1972), Adams, Sarmausakis & Sperrazza (1949), Trancreto (1974) y Zaker (1969) citados en el Apéndice B, han conducidos programas experimentales para el estudio del comportamiento de las ondas generadas por explosivos no esféricos, a través de la determinación del campo de explosiones; es decir, el campo de sobrepresiones que se generan. Particularmente para el caso de las cargas cilíndricas, se ha establecido que las sobrepresiones máximas incidentes son función no solo de la distancia radial, sino también del azimut y la altitud (DOE/TIC-11268, 1980).

La mayoría del material o documentos que existen a disposición, para el caso de la predicción de cargas por explosivos, son de carácter empírico (o analítico) que esta esencialmente correlacionado con datos experimentales o semiempíricos que se basan en modelos simplificados del fenómeno físico. Tradicionalmente, éste ha sido la herramienta con que ha proporcionado el estudio de la mitigación de los efectos de las explosiones. Sin embargo, desafortunadamente, para el caso de los datos experimentales se requieren ensayos que necesitan una coordinación y planificación exhaustiva, aunado a los significativos costos de inversión que tienen estos ensayos.

Por estas y otras razones, la simulación numérica por medio de programas ha crecido en popularidad y aplicabilidad, no en el sentido de reemplazar por completo el

análisis experimental (probablemente nunca lo hará), sino más bien se perfila como una herramienta que complementa el proceso experimental, ayudando sobre todo a dar un rango de resultados probables de encontrar en un ensayo, analizar la incidencia directa del proceso de medir en los resultados, probar infinidad de situaciones incluso algunas difíciles de ensayar en la realidad y, lo más importante, ayudar a realizar los ensayos en el menor tiempo y al menor costo posible. El avance tecnológico que ha y sigue existiendo a nivel computacional y la creciente investigación en simulación numérica de ecuaciones diferenciales parciales, hacen el modelado y simulaciones por elementos finitos una alternativa viable con resultados aceptables.

Aunque es de reconocer que se han efectuado trabajos de simulación numérica para representar explosiones –Jankowiak, Lodygowski & Sielicki (2007), Trevino (2000), Adamik et. al (2004) y Jiménez & Rueda (2003), entre muchos otros– esto no es aún del todo desarrollado, en parte a lo complicado del fenómeno de las explosiones.

Como se menciona antes, una explosión es un fenómeno complejo, el cual requiere de buenas técnicas para modelarse en elementos finitos. De la violenta expansión del gas creado por el explosivo resulta en una onda explosiva que lleva un estado de esfuerzos muy alto. Por tanto, una significativa deformación del medio continuo (y de la malla) es inevitable y los análisis no pueden ser conseguidos usando solo una formulación Lagrangiana o Euleriana. Una alternativa a las formulaciones clásicas es una combinación tanto del método Lagrangiano como Euleriano. Este método es llamado formulación Lagrangiana-Euleriana Arbitraria (Arbitraria Lagrangian-Eulerian, ALE). Esta formulación combina las ventajas de ambas formulaciones, a saber la precisión del desplazamiento y el manejo de las distorsiones, respectivamente. En Donea, Huerta, Ponthot & Rodriguez-Ferran (2004) se proporciona una investigación a profundidad de tal formulación, que incluye tanto los aspectos conceptuales como detalles de la implementación numérica.

Dentro de este marco, en este capítulo se estudia la física de una detonación y la propagación en el aire de una onda explosiva originada por explosivos de gran

potencia como el TNT, a través de la simulación numérica (dinámica de continuos) usando un programa computacional basado en el método de los elementos finitos como ABAQUS. Específicamente, se trata de simulaciones en 2D de la propagación de la onda explosiva en el aire originada por la detonación de cargas cilíndricas de TNT de masa 1 kg para relaciones L/D (longitud/diámetro) de 1/4, 1/2, 1 y 6, respectivamente. Para ello, se hace uso del módulo de ABAQUS, ABAQUS/Explicit de dinámica explícita y de la aproximación Lagrangiana-Euleriana Arbitraria disponible también en ABAQUS.

Para caracterizar el material explosivo se emplea la ecuación de estado de Jones-Wilkens-Lee (JWL). El aire también es modelado con una ecuación de estado, y se trata de la ecuación del gas ideal. Ambos modelos constitutivos están incluidos en la Librería de ABAQUS.

El primer paso para estas simulaciones ha sido la verificación de las ecuaciones de estado para el explosivo y el aire, y de la interface explosivo-aire. Para ello se usa el modelo de Fyzika vzryva (2002) –citado por Adamik et. al (2004)–. El efecto de la discretización en la precisión de la simulación numérica también es investigado. Otros aspectos de la simulación (citados más adelante) que pudieran tener influencia en la precisión de los resultados no son llevados a cabo, dado lo preliminar de este estudio.

Las simulaciones numéricas finales efectuadas son comparadas con los valores de las ecuaciones modificadas de Plooster (DOE/TIC-11268, 1980) que permiten calcular sobrepresiones para diferentes distancias en condiciones estándar a nivel del mar con TNT como explosivo para cargas cilíndricas. Las gráficas presión-tiempo en distintas posiciones y la distribución de las presiones a ciertos intervalos de tiempo obtenidas son mostradas, a fin de determinar si ABAQUS puede ser simular adecuadamente la onda explosiva formada de una detonación de un explosivo y su propagación en el aire.

Asociado a la explosión se presentan algunos efectos importantes tales como reflexión, efecto Mach, rarefacción y la fase negativa de la onda explosiva que no son tocados en este estudio. Esto porque las ecuaciones analíticas existentes usualmente ignoran estos fenómenos, y a efectos de comparar resultados, es lo conveniente. Además, este estudio es un primer esfuerzo orientado a ir introduciéndose no solo a la investigación de todo lo relativo al fenómeno de las detonaciones y propagaciones de ondas generadas por una carga explosiva sino crear un protocolo para la simulación numérica de explosiones en el aire.

Los explosivos se presentan en varias formas, llamados comúnmente por sus nombres tales como TNT, PENT RDX, y otros nombres comerciales. El uso del Trinitrotolueno ó TNT como explosivo de "referencia" es universal. Por tanto, es usual que los resultados estén referidos a este tipo de explosivo. A fin de cuantificar los efectos de las explosiones para otros explosivos de gran potencia distintos al TNT, la masa de la carga es convertida en una masa equivalente de TNT multiplicando la masa del explosivo por un factor de conversión.

3.2. Modelado de explosivo-aire.-

3.2.1. Consideraciones generales.-

El problema de las explosiones en el aire puede separarse en dos fases: 1) Detonación y expansión inicial y 2) Propagación de la onda de choque. En esta simulación, un modelo bidimensional (2D) es desarrollado con ABAQUS versión 6.6-1 para representar la expansión inicial y la propagación de ondas de choque en el aire, producidas por la detonación de una carga explosiva de TNT de geometría cilíndrica. Todos los cálculos se efectúan en un servidor Sun Microsystems de 8 procesadores Intel Xeon CPU E5400 con sistema operativo Linux versión 2.6.18-6 (Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de Los Andes, CeCalULA).

Al plantearse el problema desde el punto de vista de los elementos finitos, se considera un modelo en el que el explosivo y el aire se modelan como partes (PARTS

en lenguaje de ABAQUS) separadas y se unen entre sí mediante algún tipo de vínculo cinemático.

A pesar de que se han desarrollado modelos tridimensionales (3D) para caracterizar explosivos y explosiones, como los de Wang (2001), Jankowiak et al. (2007), Jiménez & Rueda (2003), Kloster (2001), Wei (2006), Randers-Pehrson & Bannister (1997), Adamik et. al (2004) y Trevino (2000) por citar algunos, con resultados aceptables; estos modelos 3D son mucho más complejos y costosos en términos de computación, por lo que el usar modelos bidimensionales en algunos casos pueden emplearse sin pérdida de precisión de cálculo.

Ya que este fenómeno de las explosiones es muy complicado, es difícil describirlo. A fin de tratar este problema, algunas suposiciones –unas de ellas expuestas en Wei (2006)– son hechas:

1. Las características físicas y químicas del explosivo y del aire son idénticas en cada dirección.
2. La explosión se asume continua, cuyo movimiento es continuo también.
3. Solo un punto de detonación o iniciación es considerado. El tiempo de retardo de detonación que pueda quedar determinado en el detonador, es ignorado.
4. La onda explosiva se propaga de manera radialmente uniforme (el ángulo de azimut de medición a considerar es de 90° relativo al eje longitudinal de la carga cilíndrica).
5. La reacción e iniciación del explosivo es implementada usando un modelo de “quema” (burn) programada –es decir, el modelo de “quema” programada determina el tiempo de iniciación por una construcción geométrica usando la velocidad de la onda de detonación y la distancia de los puntos del material desde el punto de detonación (Martineau, 1998)–.
6. El material explosivo no tiene rigidez volumétrica previa a la detonación.

Para esta simulación, el sistema de unidades utilizado es Sistema Internacional de Unidades, abreviado “SI”.

3.2.2. Geometría.-

Debido a su simetría radial, un cuarto de la carga explosiva cilíndrica y del aire circundante cilíndrico es modelado a fin de minimizar tiempo y costo computacional. Esta unidad representativa (es decir, el cuarto de cilindro) es matemáticamente suficiente para modelar una estructura bidimensional plana con simetría axial. Específicamente, en términos de geometría planar, se trataría de un cuarto de círculo para el explosivo y un cuarto de corona circular para el aire (ver Fig. 3.1).

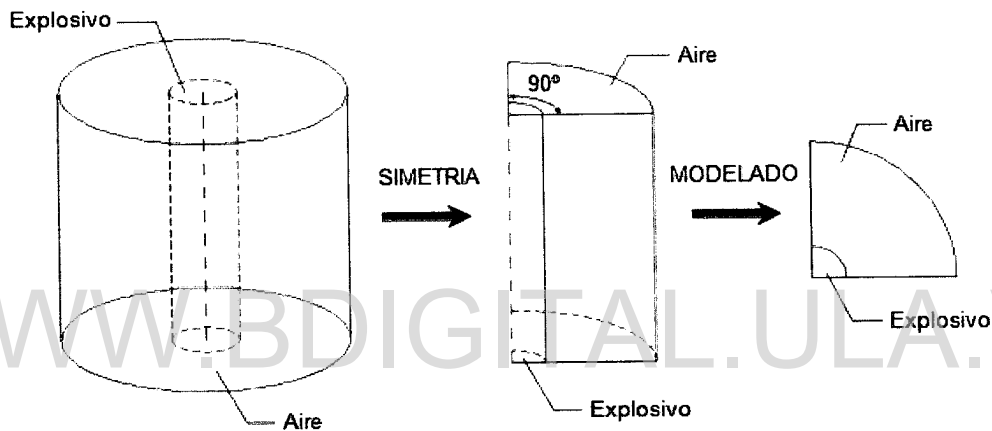


Fig. 3.1. Geometría espacial, simetría y modelado del problema.

Se trata de simular la explosión en el aire de una carga cilíndrica de 1 kg (2,2046 lb) de TNT, a condiciones atmosféricas estándar, para relaciones L/D (es decir, longitud/diámetro, donde longitud = altura) de 1/4, 1/2, 1 y 6. Se ha escogido esta cantidad de masa para trabajar con una explosión de referencia de un kilogramo de explosivo. El explosivo usado es TNT (Trinitrotolueno), ya que como se mencionó anteriormente, es generalmente considerado como una referencia.

La elección de L/D de 1/4, 1/2, 1 y 6, simplemente, obedece a que en el estudio comparativo para algunas relaciones L/D que se hace en el manual DOE/TIC-11268 (1980) en su Capítulo 4, de las sobrepresiones experimentales de Witsotki & Snyer (1965) con los valores calculados de las ecuaciones de Plooster modificadas, es decir

las Ec. B.10, B.11, B.12a, B.12b y B.12c presentadas en el Apéndice B, estas relaciones son las utilizadas.

Las dimensiones de los diámetros de las cargas cilíndricas se determinan a partir de la masa de referencia de 1 kg de TNT y cada una de las relaciones L/D establecidas. Con la densidad absoluta del explosivo ($\rho = 1630 \text{ kg/m}^3$ para TNT –Lee, Finger & Collins, 1973 citado por Jiménez & Rueda, 2003–) se obtiene el volumen (V) que contendría esa masa de 1 kg, y con ese volumen se consiguen los diámetros (D) de las cargas cilíndricas correspondientes a cada L/D señalado anteriormente. En este caso, V es de $0,0006135 \text{ m}^3$. La ecuación que permite determinar tales diámetros es la siguiente,

$$D = \sqrt[3]{\left(\frac{4V}{\pi}\right) (k)^{-1}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde k es el valor de la relación L/D . Esta expresión surge de la fórmula para calcular el volumen de un cilindro recto de base circular.

De esta manera, los diámetros y las longitudes para las cargas planteadas son obtenidas y se resumen en la siguiente tabla,

L/D	D (m)	L (m)
1/4	0,1462	0,0365
1/2	0,1160	0,0580
1	0,0921	0,0921
6	0,0507	0,3041

En cuanto al contorno de aire, circundante al explosivo, su superficie estará definida por las dimensiones radiales a los bordes interior y exterior del sector circular que representa. La dimensión radial interior vendrá dada por el radio de la carga explosiva. Partiendo del hecho que en una explosión la propagación de las ondas de presión se disipa con la distancia, se establecerá un modo de determinar la dimensión radial exterior en función del límite inferior del rango de sobrepresiones o presiones

máximas (P_0) y del límite superior del rango de las distancias escaladas (Z), para los cuales tiene validez la ecuación B.12c.

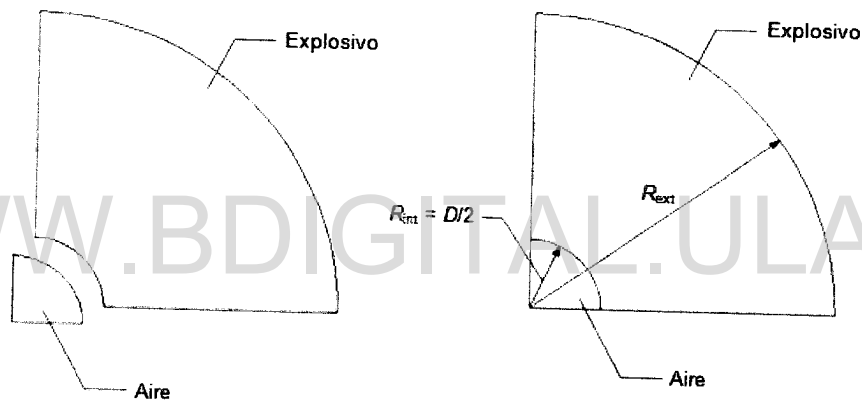
La dimensión radial que delimitará el contorno exterior de aire, para cada relación L/D considerada, se determina haciendo uso de la ley de Hopkinson-Cranz y de la Ec. B.12c. La Ec. B.12c tiene entre sus límites de aplicabilidad, los valores aproximados de 2 psi (1,38E+04 Pa) como límite inferior para sobrepresiones máximas y 20 ft/lb^{1/3} (7,9339 m/kg^{1/3}) como el límite superior para la distancia escalada (ver Apéndice B). Al tratarse de límites de distintos rangos, se procede a trabajar en primera instancia con el límite de la distancia escalada y luego con él de las sobrepresiones máximas.

Empleando la ley de Hopkinson-Cranz, para 1 kg de TNT y el límite superior del rango de distancia escalada correspondiente a 7,9339 m/kg^{1/3} (20 ft/lb^{1/3}), se tiene la distancia de 7,9339 m (26,03 ft). Este valor representará la dimensión radial exterior máxima que tendrá el modelo. Ahora, como también se tiene un límite para las sobrepresiones máximas, se busca establecer la distancia tal que las sobrepresiones se den por encima del límite inferior de 2 psi (1,38E+04 Pa) y a su vez por debajo de la distancia de 7,9339 m determinada anteriormente. Pero antes de ello, se requiere definir la posición azimutal de la distancia escalada, es decir, el ángulo del azimut para el cual se determinará las sobrepresiones máximas en la carga cilíndrica.

Al tratarse el problema como un modelo bidimensional bajo condición de esfuerzos planos o deformaciones planas, en ambos problemas las variables cinemáticas (es decir, los desplazamientos y las deformaciones) se pueden considerar independientes de la coordenada "z" y por tanto analizarse como planos. En esas superficies planas existiría un estado de esfuerzos en cualquier sección transversal normal a "z". De esta manera, considerando que la geometría del modelo consiste de una sección obtenida de la intersección del cilindro con el plano perpendicular al eje y la definición del ángulo del azimut hecha en el Apéndice B (Fig. B.3), este ángulo corresponderá a 90°.

Entonces, con el azimut definido, se procede a determinar la longitud radial que define la frontera exterior del aire para cada relación L/D establecida. Empleando la ecuación B.12c, para $L/D = 1/4, 1/2, 1$ y 6 y la distancia máxima de $7,9339$ m, se verifica que las sobrepresiones máximas estén por encima y lo más cercano de 2 psi ($1,38E+04$ Pa). La mayor distancia que cumpla con esta condición será la dimensión radial exterior que define el sector de aire a modelar. En este caso, se corrobora que la mayor distancia es de $7,9339$ m.

En la figura que a continuación se presenta, se sintetiza las dimensiones de la geometría del modelo para cada L/D establecido.



L/D	D (m)	R_{int} (m)	R_{ext} (m)
$1/4$	0,1462	0,07310	7,9339
$1/2$	0,1160	0,05802	7,9339
1	0,0921	0,04605	7,9339
6	0,0507	0,02534	7,9339

Fig. 3.2. Partes y dimensiones del sistema explosivo-aire para L/D de $1/4, 1/2, 1$ y 6 .

3.2.3. Materiales.-

Para caracterizar la detonación y expansión inicial (los primeros instantes de la propagación de la onda explosiva) del material explosivo se usa la ecuación de estado de Jones-Wilkens-Lee (o JWL) de la librería de materiales de ABAQUS/Explicit. A

pesar de que en algún momento, ha habido objeciones respecto a esta ecuación de estado, véase por ejemplo en Fišerová, Hamed & Hetherington (2003) –citado por Adamik et. al. (2004)–, la ecuación JWL es ampliamente utilizada, y es usada también en este estudio.

Este modelo constitutivo se utiliza para modelar la presión generada por la liberación de energía química de un explosivo (ABAQUS, 2004). Para activar este modelo, simplemente se proporciona el punto o los puntos de detonación (en caso de que haya más de uno) y los parámetros del explosivo para que definan la ecuación de estado JWL.

Esta ecuación viene escrita en términos de la energía interna por unidad de masa, E_{m0} , de la siguiente forma (ABAQUS, 2004),

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_o} \right) e^{\left(-R_1 \frac{\rho_o}{\rho} \right)} + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_o} \right) e^{\left(-R_2 \frac{\rho_o}{\rho} \right)} + \frac{\omega \rho^2}{\rho_o} E_{m0} \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde A , B , R_1 , R_2 y ω son constantes empíricas basadas en datos experimentales (Dobratz, 1981 citado por Krauthammer, 2008), ρ_o es la densidad inicial del explosivo y ρ es la densidad del producto de la detonación.

Según ABAQUS (2004), Este modelo es implementado en una forma referida a una “quema” programada, lo cual significa que la reacción e inicial del explosivo no es determinada por el choque en el material. En cambio, como se mencionó en las condiciones generales, el tiempo de iniciación es determinado por una construcción geométrica usando la velocidad de la onda de detonación y la distancia de los puntos del material desde el punto de detonación.

El explosivo usado para esta simulación es el TNT (Trinitrotolueno). Este explosivo es seleccionado ya que además de ser tomado como referencia, como se dijo antes, su documentación de la ecuación JWL bien conocida y fácilmente obtenible.

Los parámetros JWL para el TNT (Lee et al., 1973 citado por Jiménez & Rueda, 2003) son dados en la Tabla 3-2.

A (Pa)	3,738E+11
B (Pa)	3,747E+09
R_1	4,15
R_2	0,90
ω	0,35

Para el TNT, los valores de E_{m0} y ρ_o son 3,68E+6 J/kg y 1630 kg/m³, respectivamente (Lee et al., 1973 citado por Jiménez & Rueda, 2003); y la velocidad de detonación, C_d , es 6930 m/seg (Lodygowski & Sielicki, 2008).

Un punto de detonación para el material explosivo es definido, y se sitúa aproximadamente en el centro de la carga explosiva cilíndrica, de esta forma se proporciona una expansión radial uniforme. Aunque un explosivo generalmente tiene alguna rigidez volumétrica antes de la iniciación de la detonación (ABAQUS, 2004), para esta simulación no es tomada en cuenta. También se considera que el explosivo detona instantáneamente, es decir, el tiempo de retardo de la detonación es nulo. Este modelo constitutivo para representar el material explosivo es verificado más adelante con un modelo de validación basado en el aplicado por Adamik et al. (2004) para evaluar, en esa investigación, las ecuaciones de estado usadas.

El aire es igualmente modelado con una ecuación de estado. ABAQUS dispone en su librería de una ecuación de estado para caracterizar el aire en la forma de un gas ideal. Se supondrá que el aire, incluso en condiciones extremas como las que se presentan en el entorno de las explosiones, se comporta como un gas ideal (ABAQUS, 2004).

Esta suposición se fundamenta en lo expuesto por Adamik et al. (2004), donde señala que para un valor de presión inicial de 28,5 MPa en el aire, de la interfaz explosivo-aire, -Fyzika vzryva (2002) citado Adamik et al. (2004)- es evidente que para la dinámica del aire, la ecuación de estado para el gas ideal es apropiado. Esta

afirmación corroborada por el mismo Adamík et al. (2004) es revisada, al igual que la ecuación JWL, con un modelo de verificación que se detalla más adelante.

La ecuación para caracterizar el aire a través del modelo de gas ideal o perfecto, disponible en la librería de materiales de ABAQUS/Explicit, viene escrita en la forma de,

$$p + p_A = \rho R(T - T^z) \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde p_A es la presión atmosférica, ρ es la densidad inicial del aire, R es la constante del gas, T^z es el cero absoluto para la escala de temperatura usada y T es la temperatura de referencia o actual. La Tabla 3-3 presenta las propiedades del aire que permiten la aplicación de la ecuación de estado de gas ideal antes descrita.

p_A (Pa)	101325
ρ (kg/m ³)	1,293
R (J/kg°K)	287
T^z (°K)	0
T_0 (°K)	288,4

Los valores de las constantes del material mostrados en la Tabla 3-3, son tomados de Łódygowski & Sielicki (2008) y Jankowiak et al. (2007).

Una de las características importantes de un gas ideal es que su energía específica depende solamente de su temperatura (ABAQUS, 2004); por tanto la energía específica puede ser integrada numéricamente como,

$$E_m = E_{m0} + \int_{T_0}^{T-T^z} c_v(T) dT \quad \text{Ec. 3.4}$$

donde E_{m0} es la energía específica inicial en la temperatura inicial T_0 y c_v es el calor específico a volumen constante, la cual depende solamente de la temperatura (T) para un gas ideal. En este sentido, ABAQUS requiere, para completar de caracterizar el

aire, definir E_{m0} para T_0 y c_v . Para el aire sus valores son $E_{m0} = 0,193E+06$ J/kg y $c_v = 1003,5$ J/kg $^{\circ}$ K (Łódygowski & Sielicki, 2008 y Jankowiak et al., 2007).

Al utilizar esta ecuación de gas ideal una condición adiabática es asumida. El estado inicial del gas estará determinado por la densidad inicial (ρ) y la temperatura inicial (T_0).

3.2.4. Condiciones de contorno e interacciones.-

En el modelo se aplican las condiciones de contorno o restricciones que se muestran en la Fig. 3.3: las condiciones de simetría en los bordes rectos (el desplazamiento U_x en el borde paralelo al eje "y" y el desplazamiento U_y en el borde paralelo al eje "x"), a fin de mantener la física del problema. El borde exterior del aire se considera libre, ya que alguna restricción en este borde puede afectar la simulación con resultados erróneos.

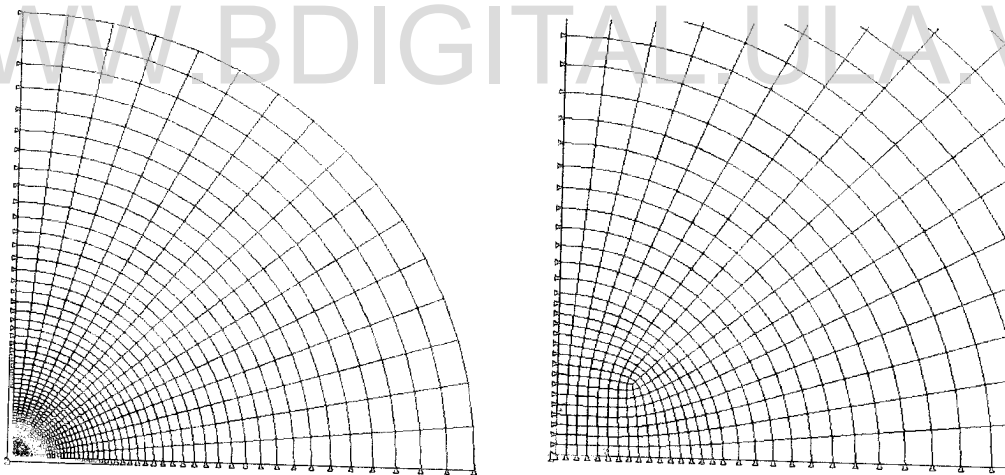


Fig. 3.3. Condiciones de contorno del sistema.

Las partes que componen el sistema explosivo-aire están unidas entre sí conectando los nodos linderos con vínculos cinemáticos que ABAQUS tiene en su librería (ver Fig. 3.4). Estos vínculos pertenecen al grupo de los MPC (multi-point constraints) del

tipo TIE (según lenguaje de ABAQUS) que igualan todos los desplazamientos de los nodos que están conectados. La aplicabilidad de estos vínculos en el análisis, es demostrada implícitamente con el mismo modelo de verificación donde se validan las ecuaciones de estado JWL y del gas ideal.

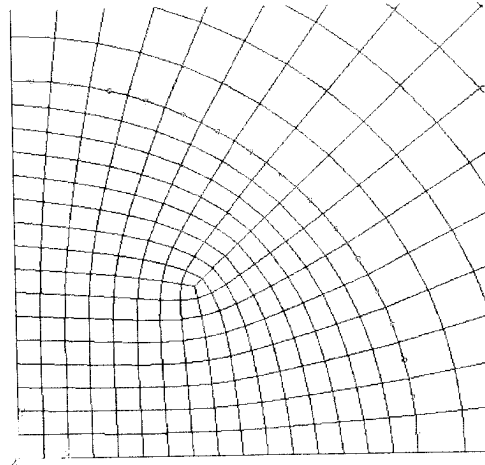


Fig. 3.4. Multi-point constraint en el modelo explosivo-aire.

3.2.5. Selección del elemento.-

La selección de elementos de deformaciones planas para el modelado, intuitivamente, debería ser lo más adecuado, dado el fenómeno físico que se quiere estudiar y de cálculo que se quiere realizar. Los modelos bidimensionales en la hipótesis de deformación plana se puede considerar en estructuras prismáticas de gran longitud, con generatrices paralelas a un eje, sometido a acciones normales a las generatrices y constantes a lo largo de ellas. En estas condiciones (y en zonas alejadas de los extremos) las secciones normales al eje (para las que se suponen las mismas propiedades de los materiales) se deforman por igual y se mantienen durante las deformaciones planas y perpendiculares al eje. Esto reafirmaría el uso de elementos de deformaciones planas para analizar el problema.

Sin embargo, dependiendo de los esfuerzos a los que estarán sometidos los elementos, se determinará si es correcta la elección del elemento. Se tiene esta reserva en cuanto a esta elección ya que no se tiene idea para cual rango de relación L/D son aceptables los resultados con deformaciones planas. Una de las condiciones para estos elementos es que se traten de cuerpos cuya dimensión en la dirección longitudinal sea mucho más grande que las dimensiones transversales, por lo que es de esperar que para relaciones L/D más grandes se ajusten mejor los resultados. Esta es una de las inquietudes a dilucidar con esta simulación y que definirá su ámbito de aplicabilidad.

En todo caso, ya que en este modelo se emplean elementos de deformación plana, el problema equivale a la explosión de un explosivo cilíndrico en faja indefinida (Jiménez & Rueda, 2003), que se enmarca dentro del contexto de las explosiones generadas por una carga de geometría no esférica, como la cilíndrica, objeto de esta investigación.

3.2.6. Mallado.-

El concepto manejado para mallar este modelo se basa en el aplicado por Wang (2001) y Yin, Gu, Lin & Kuang (2009). Este consiste en crear una malla fina para el explosivo y para una parte del aire que está cercana al explosivo, y una malla gruesa en la zona más lejana del explosivo.

Para la discretización de la parte del explosivo, se han empleado 16 divisiones en los segmentos radiales, siguiendo la sugerencia de Jankowiak et al. (2007), y 16 divisiones al arco de circunferencia, para simplemente buscar uniformidad del mallado, es decir, mantener igual separación entre nodos. La malla de la parte del explosivo está en contacto con la del aire tal que hay un vínculo nodo a nodo entre ellas.

Para la parte del aire, se ha discretizado de la siguiente forma: 16 divisiones se han colocado a los arcos de circunferencia (interno y externo), para ser coincidentes con

la discretización de la parte del explosivo y 70 divisiones a los segmentos radiales empleando una distribución no uniforme a lo largo de los segmentos, proporcionando un espaciado más cerrado hacia los extremos del segmento colindante a la parte del explosivo. Al presentarse en la zona de interfaz explosivo-aire grandes gradientes de presiones, el mallar de esta forma, tal que en la zona más cercana a esa interfaz la densificación de elementos sea mayor, es lo más recomendado; ya que el objetivo es capturar de forma precisa esas variaciones de presión en esa región.

Con la elección de este número de divisiones y esta forma de discretización, se trata de establecer una malla uniforme con la menor relación de aspecto posible. Estas discretizaciones se presentan en la Fig. 3.5.

La Tabla 3-4 muestra las relaciones de aspecto en las partes discretizadas para cada uno de los valores L/D consideradas. Cabe indicar, que una relación de aspecto tan próxima a la unidad, es demostración de una adecuada regularidad de la malla. Según Yin et al. (2009), la malla debe ser lo más uniforme posible ya que en la integración explícita la longitud del tiempo del paso es determinado por el tamaño del elemento más pequeño en el modelo. Lo importante es evitar los elementos pequeños ya que por los procedimientos condicionalmente estables estos llevan a muy pequeños incrementos de tiempo en método explícito de integración de las ecuaciones de movimiento, y los elementos grandes también para mejorar la precisión de los resultados (Jankowiak et al., 2007).



Fig. 3.5. Discretización de las partes del sistema.

Tabla 3-4. Relaciones de aspecto en cada parte del modelo para las diferentes relaciones *L/D*.

<i>L/D</i>	Relación de aspecto			
	Parte explosivo		Parte aire	
	Promedio	Peor	Promedio	Peor
1/4	1,29	1,70	1,53	1,64
1/2	1,29	1,70	1,48	1,63
1	1,28	1,68	1,47	1,63
6	1,29	1,70	1,50	2,75

Elementos CPE4R (según la denominación de ABAQUS), que son elementos continuos cuadriláteros de 4 nodos de deformación plana con interpolación bilineal e integración reducida y control de “hourglass” (ABAQUS, 2004), son empleados para las dos partes del sistema. Los grados de libertad activos en este elemento son los desplazamientos U_x y U_y . La topología de los elementos se muestra en la Fig. 3.6. La malla del modelo completo consta de 1312 elementos (192 elementos en la malla del explosivo y 1120 elementos en la malla del aire). El uso de elementos de integración reducida obedecen a que son muy tolerantes de distorsión (ABAQUS, 2004). ABAQUS/Explicit dispone de estos elementos de integración reducida que tienen modos de “hourglass”. Este efecto de “hourglass” puede, por tanto, propagarse a través de la malla; sin embargo, el mismo programa incluye sofisticados controles para impedir que el fenómeno del “hourglassing” sea un problema en los análisis.

Para describir brevemente lo que es el “hourglass”, en cálculos con elementos de integración reducida pueden aparecer modos de deformación de mariposa, o de reloj de arena, conocidos como “hourglass” (es una inestabilidad numérica de la malla. También reciben el nombre de modos de energía nula). Puesto que la integración reducida se realiza en el punto central del elemento que por simetría no sufre deformaciones, el elemento puede adquirir la deformación sin que se oponga ninguna rigidez. Los modos de “hourglass”, consecuencia de una integración reducida, se plantea como un serio problema, pues al ser su contribución en las fuerzas resistentes

nula, es decir, tiende a ser los elementos ser demasiado flexibles, están controlados por el algoritmo, por lo que bajo ciertas condiciones de contorno y de carga, pueden crecer desorbitadamente y desvirtuar totalmente la solución.

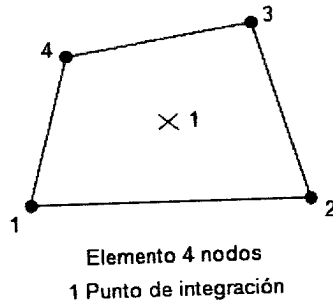


Fig. 3.6. Elemento CPE4R (Tomado de ABAQUS, 2004).

Para este análisis se seleccionan los elementos cuadriláteros a los triangulares por razones de isotropía geométrica (Cubillos, s.f.). Además, el modelo no presenta irregularidades en la geometría que sugieran el uso de elementos triangulares.

3.2.7. Técnicas Especiales.-

De la rápida expansión del volumen de gas producto de la detonación de un explosivo resulta una onda de choque que se propaga a muy alta presión. Por lo tanto, la significativa deformación del medio continuo (y de la malla) es inevitable y el análisis numérico de una explosión no puede ser conseguido usando formulaciones Lagrangiana o Euleriana (Bouamoul & Nguyen, 2008). Una alternativa a estas formulaciones clásicas es una combinación tanto del método Lagrangiano como del Euleriano. Este método es llamado formulación Lagrangiana-Euleriana Arbitraria (Arbitrary Lagrangian Eulerian, ALE), y es desarrollado en el programa ABAQUS.

La técnica usada para resolver este problema en esta simulación es la del mallado adaptativo ALE con un dominio, que es un método disponible en ABAQUS. El análisis es efectuado usando una aproximación Euleriana tradicional. Un único dominio de mallado adaptativo es definido de manera que incluya ambas regiones

(explosivo y aire). Esto permite que ambos gases, tanto el generado por el explosivo como el aire, fluyan libremente. Como la onda de choque se mueve radialmente, la malla puede ser tomada como “estacionaria” aplicando una de las técnicas de mallado adaptativo que posee ABAQUS, como lo es el PREVIOUS PREDICTOR (según lenguaje de ABAQUS). Con esta técnica, la definición de la malla basada en la posición de los nodos al final del incremento de la malla adaptativa previa tiene el efecto de mantener la malla estacionaria para una malla uniforme sin deformación de la interfaz explosivo-aire. La frecuencia del mallado adaptativo se cambia a “1” debido al flujo de material que ocurre a través de la malla cuando la onda de choque se propaga (ABAQUS, 2004).

3.2.8. Descripción del código de análisis.-

En ABAQUS, la capacidad de simulación de explosiones es proporcionada por la funcionalidad propia de ABAQUS/Explicit. Éste es un programa que usa una formulación de elementos finitos en forma dinámica explícita y se utiliza principalmente para simulaciones de eventos dinámicos de corta duración, tales como impactos, explosiones, etc. (Ver Ref. Principia S.A., s.f.).

Las simulaciones se corren para 0,016 seg. Este tiempo es escogido iterativamente para permitir evaluar la historia de presiones a lo largo de la trayectoria que sigue la onda de choque en el aire, la cual es de interés en este estudio. El hecho de escoger de esta forma el tiempo se debe a que no hay una expresión generalizada que describa la evolución de la onda a lo largo del tiempo y permita estimar el tiempo que tarda la onda en recorrer el medio a través por el cual se propaga. Existen datos experimentales y ecuaciones de la duración de la fase positiva y negativa de la onda de choque, sin embargo son particularizadas a ciertas condiciones, por ejemplo al tipo de explosivo, geometría de la carga, medio donde se detona el explosivo, etc.

Para reducir la posibilidad de una solución inestable, se ajusta el incremento de tiempo estable calculado por ABAQUS/Explicit por un factor de escala constante. En este análisis se usa un factor de escala de 0,67 ya que un material explosivo es

caracterizado (Livermore Software Technology Corporation, 1999 citado por Trevino, 2000). El incremento de tiempo estable es ajustado basado en una estimación elemento por elemento, y es determinada usando la velocidad de la onda dilatacional en cada elemento (ABAQUS, 2004). Esta estimación según ABAQUS (2004) es conservadora, dando un incremento de tiempo estable más pequeño que el límite de estabilidad que está basado en la frecuencia máxima del modelo.

Uno de los parámetros requeridos para la configuración del análisis es la viscosidad global o de compresión. Esta viscosidad introduce un amortiguamiento asociado con la deformación volumétrica y su objetivo es mejorar el modelado de eventos dinámicos de alta velocidad, controlando las oscilaciones de alta frecuencia que puedan presentarse (ABAQUS, 2004). Para este estudio, se utilizaron los valores por defecto que tiene el programa.

Finalmente, el análisis toma en cuenta los efectos no lineales de grandes desplazamientos y deformaciones, es decir, no linealidad geométrica; y es efectuado en doble precisión para prevenir la acumulación de errores por redondeo.

3.3. Modelo de verificación.-

3.3.1. Descripción del modelo.-

Cuando se desarrolla un modelo computacional tal como el descrito previamente, es importante verificar el desempeño de cada uno de sus componentes y evaluar su precisión. En este caso, esta verificación es hecha para validar la aplicación de los modelos constitutivos utilizados para representar el material explosivo y el aire, y del vínculo cinemático considerado para la interfaz explosivo-aire –en este contexto, se refiere a interfaz como espacio: desde esta perspectiva la interfaz es el lugar de interacción, el espacio donde se desarrolla los intercambios (Álvarez, s.f.)–.

Este modelo de verificación se basa en el que ha sido utilizado en Adamik et al. (2004) en ese estudio para validar las ecuaciones de estado JWL y de gas ideal aplicadas, de acuerdo a indicado por Fyzika vzryva (2002) –citado Adamik et al.

(2004)–. Según lo señalado por Fyzika vzryva (2002), para la onda explosiva en el aire, la velocidad inicial en la interfaz explosivo-aire y la presión inicial (para una carga esférica de TNT y detonación inmediata) son, respectivamente: 4400 m/seg y 28,5 MPa (Adamik et al., 2004).

La validación de Adamik et al. (2004) que es reproducida, consiste de una simulación numérica en 3D de una explosión en el aire producida por una carga esférica de 50 g de TNT, donde se investiga la presión y velocidad que ocurren en la zona de interfaz explosivo-aire. Para ello se utiliza el programa computacional ABAQUS/Explicit.

El modelo geométrico consiste de dos esferas concéntricas, la interior que es el explosivo y la externa representa el aire.

La dimensión que define la carga, es decir su radio, es obtenido a partir de fórmula del volumen de una esfera. En primera instancia se determina el volumen a través de la ecuación de densidad absoluta (ρ), que expresa la masa por unidad de volumen.

Con la masa considerada de 0,05 kg (50 g) y la densidad del material explosivo de 1630 kg/m³ correspondiente al Trinitrotolueno (TNT), se tiene el volumen (V) que ocupa esa masa y el cual tiene un valor de 0,000030675 m³. La ecuación (Ec. 3.5) permite calcular el radio (r) de la carga esférica, conocido su volumen.

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad \text{Ec. 3.5}$$

Por tanto, en este caso el radio es de 0,01942 m.

La parte del aire circundante al explosivo consiste de una esfera hueca de espesor 0,01942 m, es decir, de radio externo $r_{\text{ext}} = 0,03884$ m y radio interno $r_{\text{int}} = 0,01942$ m. Estas dimensiones son seleccionadas puesto que es de interés solamente la zona de interfaz explosivo-aire y por tanto no se requiere tanto dominio esférico de aire. Este espesor es suficiente para determinar la presión y la velocidad que se generan en la zona de interfaz explosivo-aire.

Haciendo uso de la simetría del problema, solo un octavo de las esferas concéntricas es modelado. La Fig. 3.7 muestra la geometría del modelo.

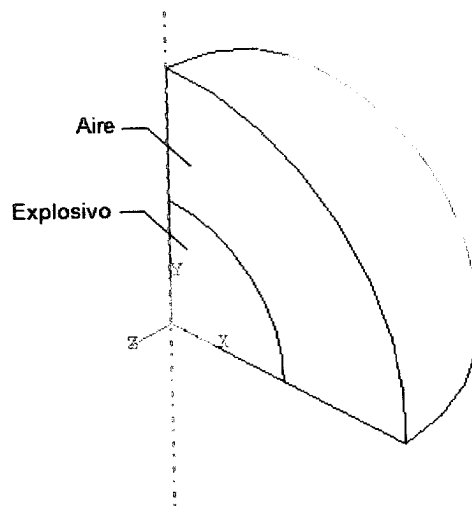


Fig. 3.7. Geometría del modelo de verificación.

Como en el modelo bidimensional descrito previamente, el explosivo utilizado es TNT y es representado con la ecuación de estado de Jones-Wilkins-Lee (JWL). De la misma manera, el aire es caracterizado con una ecuación de estado, en este caso la de un gas ideal. Los valores de los parámetros que definen estas ecuaciones ya se especificaron anteriormente. La detonación es iniciada instantáneamente aproximadamente en el centro del explosivo.

Como consecuencia de las condiciones de simetría, a los nodos de las superficies resultantes del corte de las esferas concéntricas por la acción conjunta de los tres planos diametrales paralelos a los planos XY, XZ e YZ, se les es permitido solo el desplazamiento radial, es decir, movimiento en la sección de corte. De igual forma al modelo en 2D, la superficie esférica del modelo se considera libre, es decir, sin ninguna restricción. Estas condiciones de contorno están indicadas en la Fig. 3.8.

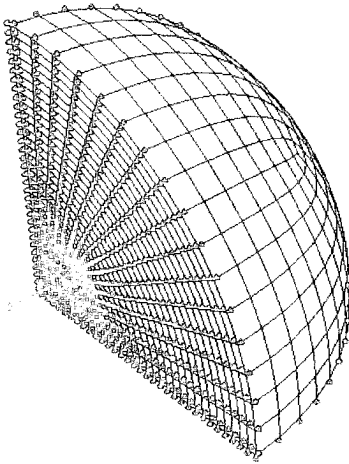


Fig. 3.8. Condiciones de contorno del modelo de verificación.

Al igual que en el modelo bidimensional, las partes correspondientes al explosivo y al aire están unidas entre sí con vínculos cinemáticos del tipo TIE (Ver Fig. 3.9).

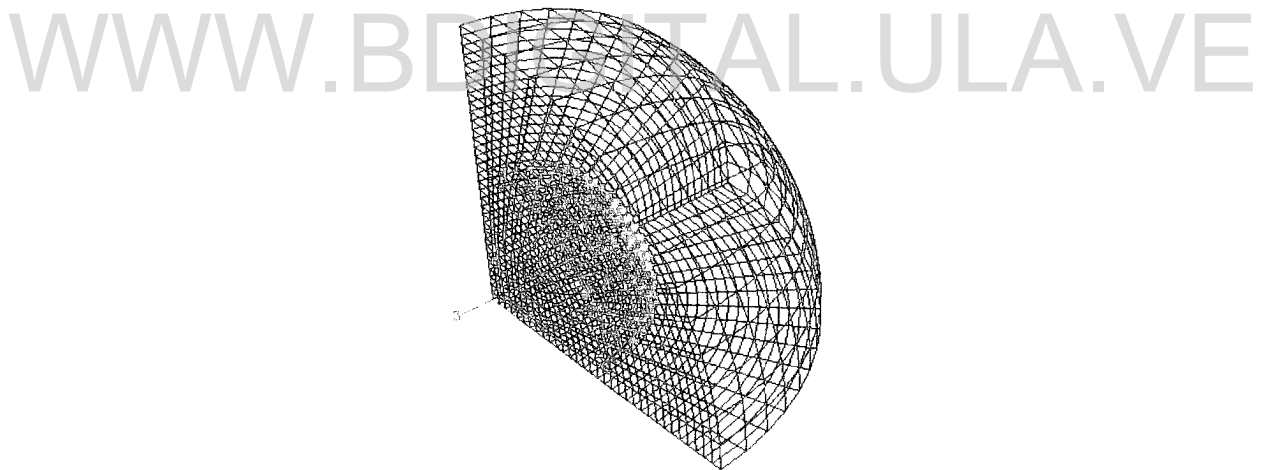


Fig. 3.9. Vínculo cinemático del tipo TIE en el modelo de verificación.

La discretización del modelo consta de 16 divisiones en todos los segmentos rectos y curvos que lo conforman. De este modo, el sistema explosivo-aire totaliza 5120 elementos, 2048 para el explosivo y 3072 para el aire. Los detalles acerca de esta malla son observados en la Fig. 3.10.

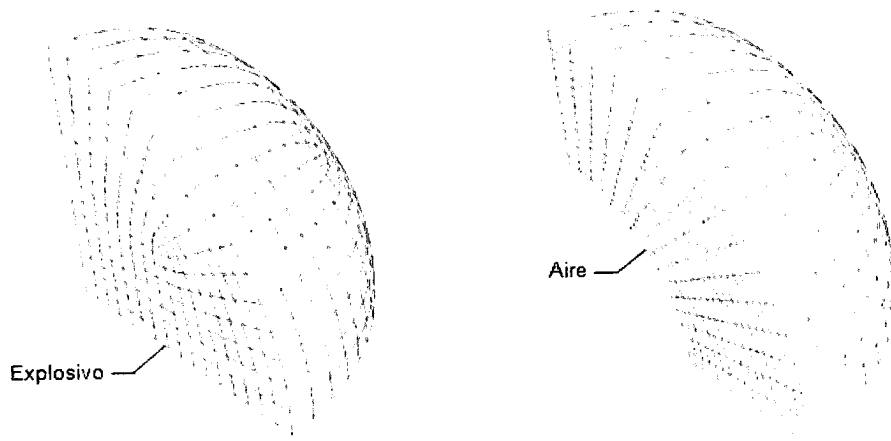


Fig. 3.10. Discretización de las partes del modelo de verificación.

Previsiones han sido tomadas para mantener longitudes de elementos dentro de un rango razonable con el objetivo de maximizar la precisión computacional sin degradar el tiempo de cálculo. Por ejemplo, la relación de aspecto promedio conviene que esté por debajo de 3 para establecer un análisis tridimensional (Bouamoul & Nguyen, 2008). En este sentido, el tamaño de malla propuesta presenta las relaciones de aspecto que se muestran en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Relación de aspecto en cada parte del modelo de verificación.			
Relación de aspecto			
Parte explosivo		Parte aire	
Promedio	Peor	Promedio	Peor
1,36	2,20	2,31	4,08

Se han empleado elementos tridimensionales tipo C3D8R (según la denominación de ABAQUS) para representar tanto el aire como el explosivo. Se trata de un elemento sólido hexaedro lineal de 8 nodos con integración reducida y control de "hourglass" (ABAQUS, 2004).

El análisis se realiza con el programa ABAQUS/Explicit, y las consideraciones relacionadas con el control del análisis dinámico explícito del modelo bidimensional anterior son aplicadas en éste. Este análisis tiene una duración de $7,50E-06$ seg. Este tiempo seleccionado iterativamente es suficiente para evaluar la historia de presiones y velocidades en la interfaz explosivo-aire. Al igual que en el modelo 2D, se emplea el mismo mallado adaptativo tipo ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian). De la misma forma, se usa doble precisión para minimizar los errores debidos al redondeo.

3.3.2. Resultados del modelo de verificación.-

Las gráficas que se presentan en la Fig. 3.11 y 3.12 corresponden a la evolución de las presiones y velocidades de la onda explosiva en las capas de aire circundantes al explosivo, considerado como la zona de interfaz explosivo-aire. En este análisis, esta zona es definida como una banda que está aproximadamente entre 0,020 m y 0,027 m medida a partir del centro del explosivo. Específicamente, en tres puntos dentro de esta franja se evaluará la historia de presión y de velocidad.

Como se observa en estas gráficas, los valores máximos obtenidos correspondiente a la presión y la velocidad en dicha zona son, respectivamente, $2,93E+07$ Pa (29,3 MPa) y 4556 m/seg. De estos valores, es evidente que las ecuaciones de estado usadas describen apropiadamente la dinámica de la interfaz inicial (Adamik et al., 2004).

Al validarse la utilización de las ecuaciones de estado, implícitamente se está validando la aplicación del vínculo cinemático considerado en la simulación. De esta forma, se puede concluir que el vínculo tipo TIE, para unir las partes que componen el sistema explosivo-aire, transmite adecuadamente las ondas que genera el explosivo al aire.

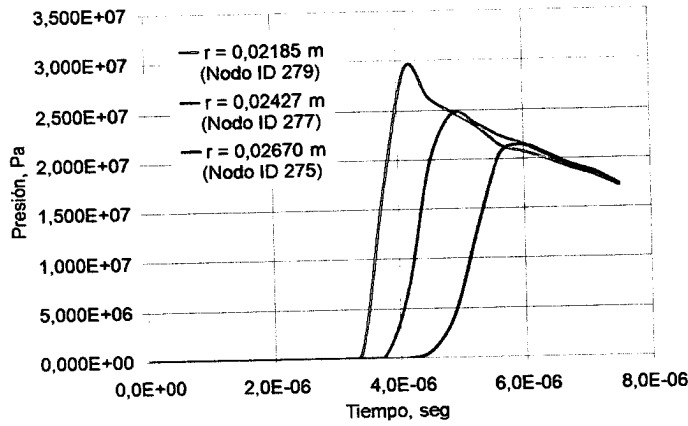


Fig. 3.11. Gráficas de presión-tiempo en la interfaz explosivo-aire.

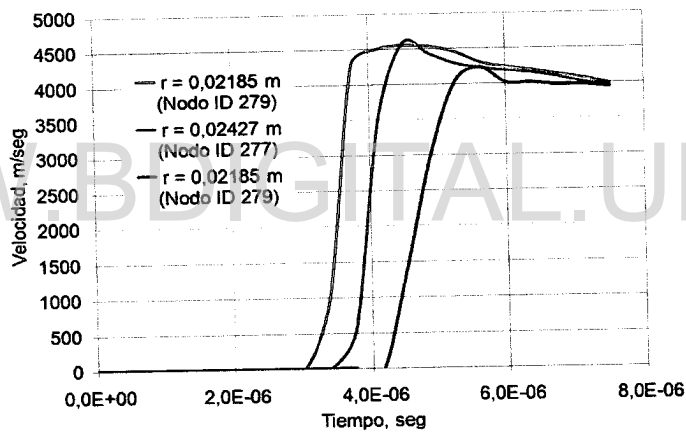


Fig. 3.12. Gráficas de velocidad-tiempo en la interfaz explosivo-aire.

3.4. Estudio de sensibilidad de mallado.-

La densidad de elementos o densidad de malla es un aspecto importante en un modelo en elementos finitos, ya que la exactitud de un análisis por el método de los elementos finitos es muy dependiente del tipo de elemento y del grado de la densidad de la malla seleccionada para efectuar dicho análisis. Así, un modelo que tiene una malla demasiado gruesa no produce resultados adecuados, y una malla demasiado fina requiere de mucho tiempo y costo computacional y puede ser más que necesaria

para las variaciones en esfuerzos y deformaciones. Donde se espera que los gradientes en esfuerzos y deformaciones sean bajos, la densidad es baja, y donde los gradientes son altos, como por ejemplo en las zonas de concentración de esfuerzos, la densidad de la malla debe ser alta.

En este sentido, un análisis de sensibilidad de mallado es llevado a cabo. Para ello, una serie de discretizaciones de varios tamaños, específicamente tres (3), son evaluadas.

Una de las discretizaciones es la planteada anteriormente en 3.2.6, la cual está basada en las sugerencias realizadas por Jankowiak et al. (2007) para discretizar la parte del explosivo y por Wang (2001) para mallar este tipo de modelos explosivo-aire. Esta malla se identificará como la malla intermedia. Las otras dos (2) mallas, que tienen como referencia la malla intermedia, se caracterizan por ser una más densa (malla fina) y la otra menos densa (malla gruesa).

Las divisiones para la discretización de la malla fina y gruesa se seleccionan de manera que en el caso de la malla fina esta tenga una densidad de elementos de aproximadamente el doble de la malla intermedia, mientras la gruesa tenga una densidad de más o menos la mitad de la intermedia. Específicamente, la malla fina tendrá un total de 2840 elementos y la gruesa 770 elementos (correspondiente a un factor ~ 2 y $\sim 0,6$ respecto a la malla intermedia, respectivamente).

Detalles relacionado con estas mallas son resumidos en la Fig. 3.13 y la Tabla 3-6.

Con esto se busca no solo determinar cual mallado es el más adecuado sino verificar las sugerencias dadas por Jankowiak et al. (2007) y Wang (2001).

Cabe indicar que las tres discretizaciones corresponden al modelo cuya relación $L/D = 1$. Esto porque se espera que a partir de relaciones mayores a 1, los resultados de la simulación tiendan a ajustarse de mejor manera al fenómeno físico. A mayor relación L/D el problema en deformación plana es más evidente y se pueden obtener

resultados que son válidos para una sección del cilindro que está lejos de sus extremos (Esto se comprobará más adelante en el punto 3.5).

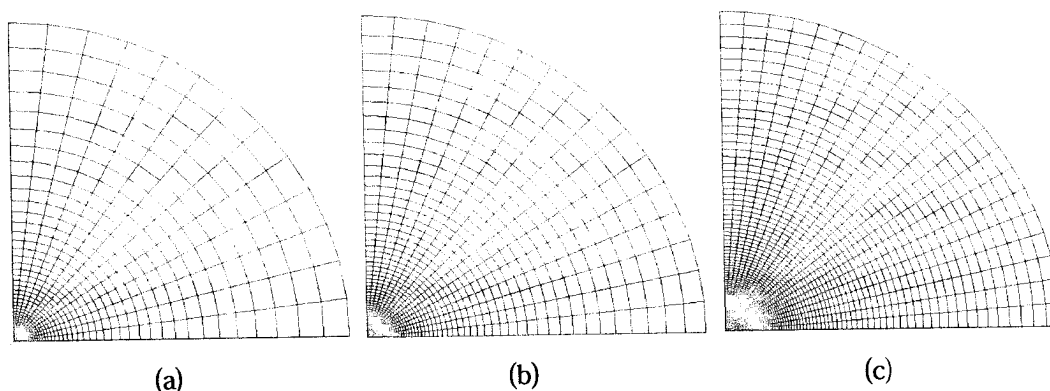


Fig. 3.13. Discretizaciones propuestas para el estudio
(a) Malla Gruesa, (b) Malla Intermedia (Referencia) y (c) Malla Fina.

Tabla 3-6. Número de elementos y relaciones de aspecto en cada parte del modelo para las diferentes discretizaciones utilizadas.

Malla	Nº Total de Elementos	Parte Explosivo			Parte Aire		
		Nº de Elementos	Relación de Aspecto		Nº de Elementos	Relación de Aspecto	
			Prom.	Peor		Prom.	Peor
Gruesa	770	120	1,27	1,60	650	1,44	2,22
Intermedia	1312	192	1,28	1,68	1120	1,47	1,63
Fina	2840	320	1,27	1,75	2520	1,79	1,89

Los resultados numéricos de sobrepresión máxima para distintas distancias de la carga explosiva se comparan con aquellos obtenidos de una de las ecuaciones encontrada de la literatura para determinar la sobrepresión máxima en cargas explosivas cilíndricas. Se trata de la ecuación de Plooster modificada, descrita en el DOE/TIC-11268 (1980) y presentadas en el Apéndice B (Ecs. B.10, B.11, B.12a, B.12b y B.12c). Las historias presión-tiempo, a distintas distancias del explosivo, son

presentadas para cada discretización a fin de evaluar la influencia de la densidad de malla en la distribución de presiones en el tiempo.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo con el programa ABAQUS/Explicit (versión 6.6) en modo de doble precisión.

3.4.1. Resultados del estudio de sensibilidad de mallado.-

Los resultados indican que la densidad de la malla influye significativamente la precisión de la predicción.

Como puede observarse en la Fig. 3.14, la precisión de la predicción en zona cercana al explosivo (en este caso, aproximadamente en los primeros 3 m) es bastante pobre (es decir, una gran dispersión de los datos alrededor de los valores de la ecuación de Plooster modificada) en comparación a las zonas más alejadas, probablemente debido a la complejidad del fenómeno explosivo en esa región (Yin et al., 2009). A partir de los 4 m se puede apreciar claramente, que aunque los puntos presentan cierta dispersión estos parecen “seguir” la tendencia de los valores de la ecuación de Plooster modificada. Esto es importante ya que indica coincidencia en el comportamiento de la sobrepresión máxima con la distancia.

Para las tres (3) mallas, respecto a los resultados de la ecuación para distancias mayores a 4 m (desde donde se aprecia un comportamiento racional en la predicción de sobrepresión máxima), cuando el número de elementos se incrementa de 1312 a 2840, la diferencia porcentual en la predicción de la sobrepresión máxima se incrementa en un promedio de 187%; mientras que al disminuir de 1312 a 770 elementos, la estimación de la sobrepresión máxima disminuye a un promedio de 87%. Para la malla de 1312 elementos (malla intermedia) la diferencia se encuentra en un 145% en promedio. Sin embargo, cuando se evalúa la variación entre los resultados numéricos de la simulación, la diferencia de la predicción disminuye notablemente. Teniendo como referencia los valores de la malla intermedia, los resultados para la malla gruesa divergen en un promedio porcentual de 20% (por

debajo) y para la malla fina un 12% (por arriba). Estos resultados, por lo menos para este estudio, llevan a generar ciertas dudas con relación a la aplicabilidad de la ecuación de Plooster modificada como parámetro para comparar con los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas, sin obviar que la naturaleza de una simulación puede tener efectos en los resultados que se alcancen.

En este caso, y al igual como se presenta en Yin et al. (2009), el hecho de aumentar la densidad de la malla no necesariamente implica que los resultados sean más precisos. No obstante, existen trabajos como los de Wang (2001) y Bouamoul & Nguyen (2008) donde muestran que la precisión en la predicción de la sobrepresión máxima se incrementa al aumentar el número de elementos en los modelos. He aquí una de las tantas incertidumbre que existen es este campo de investigación de la simulación numérica de explosiones en el aire. Es por ello, los requerimientos de más estudios en este aspecto, y en específico, este trabajo busca sembrar las bases para ello.

El promedio de diferencia porcentual de sobrepresión máxima entre cada una de las discretizaciones estudiadas se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Promedio Diferencia \%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{Diferencia \%}) , \quad \text{Ec. 3.6}$$

La diferencia porcentual de sobrepresión máxima, para una distancia del explosivo considerada, entre cada una de las discretizaciones estudiadas se determinan con la siguiente expresión (Aráoz & Luccioni, 2007):

$$\text{Diferencia \%} = \frac{|p_2 - p_1|}{p_1} * 100 \quad \text{Ec. 3.7}$$

donde p_2 es la sobrepresión obtenida con malla gruesa o fina (dependiendo de la malla evaluada) y p_1 la obtenida con malla intermedia (o de referencia).

Para mejorar la precisión se debe revisar cuidadosamente otros aspectos del modelo en ABAQUS, e inclusive el ajuste de la ecuación de Plooster, para establecer las

causas de esta inexactitud. Entre los aspectos a revisar en el modelo cabe destacar: los modelos constitutivos y los parámetros que definen los materiales (aire y explosivo), tipo de elemento, incremento de integración o intervalo de tiempo y condiciones de contorno. Según Bouamoul & Nguyen (2008), la viscosidad global artificial junto con el factor de masa escalada y la geometría son tópicos influyentes en la precisión de los resultados, por tanto, también deben ser revisados en el modelo. Evaluar la influencia de cada uno de estos aspectos en los valores de sobrepresión obtenidos no forma parte de este estudio.

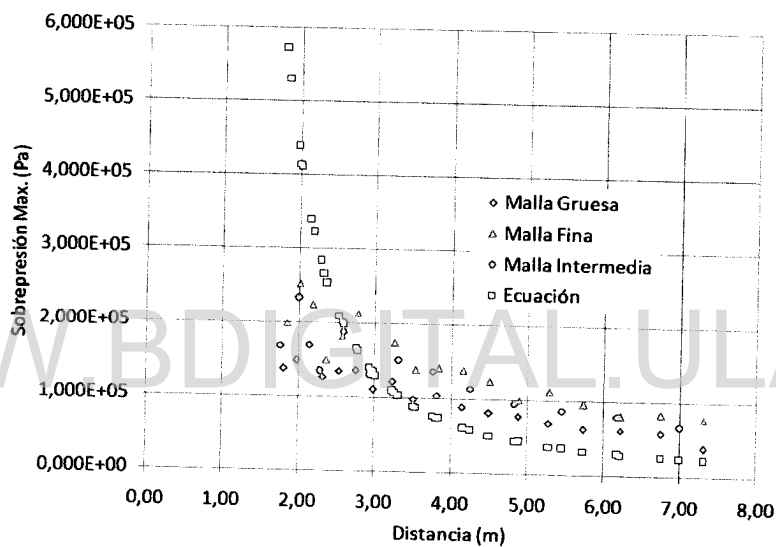


Fig. 3.14. Comparación de la sobrepresión máxima en función de la distancia del explosivo para las distintas mallas estudiadas con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada (Para $L/D = 1$ y el azimut de 90°).

Al igual como lo demostraron Yin et al. (2009) y Wang (2001), el tiempo computacional se incrementa significativamente con la disminución del tamaño de la malla como se muestra en la Fig. 3.15. Para la discretización de 1312 elementos (malla intermedia) la simulación completa toma 10 min 27 seg. Considerando ambos factores, tiempo computacional y precisión, la malla con 1312 resulta adecuada y por tanto es usada para los modelos definitivos.

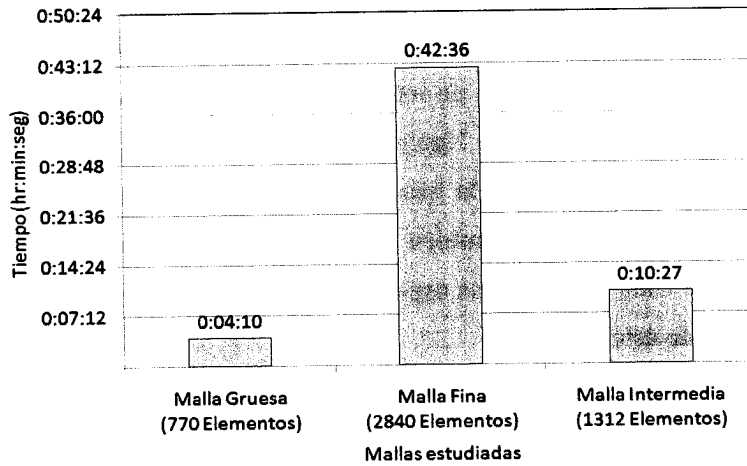


Fig. 3.15. Costo computacional (tiempo) para diferentes tamaños de malla.

Las Fig. 3.16a, 3.16b y 3.16c muestran las variaciones de la presión en el tiempo para cada una de las discretizaciones estudiadas a diferentes distancias del explosivo.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

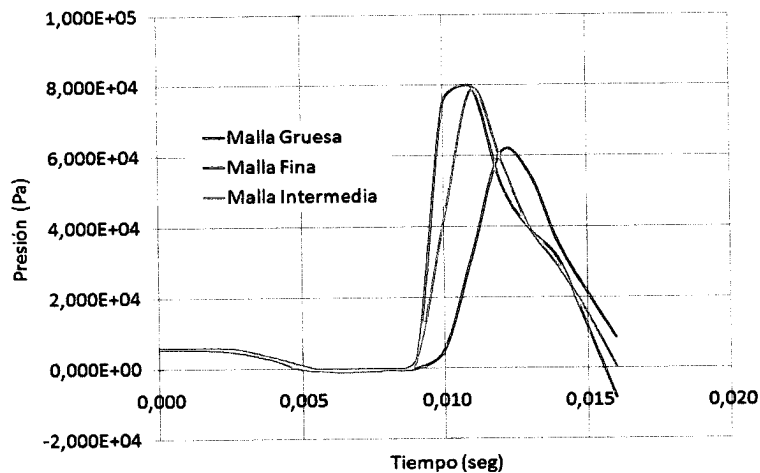


Fig. 3.16a. Curvas presión-tiempo en 6,21 m (20,4 ft) para las diferentes mallas estudiadas.

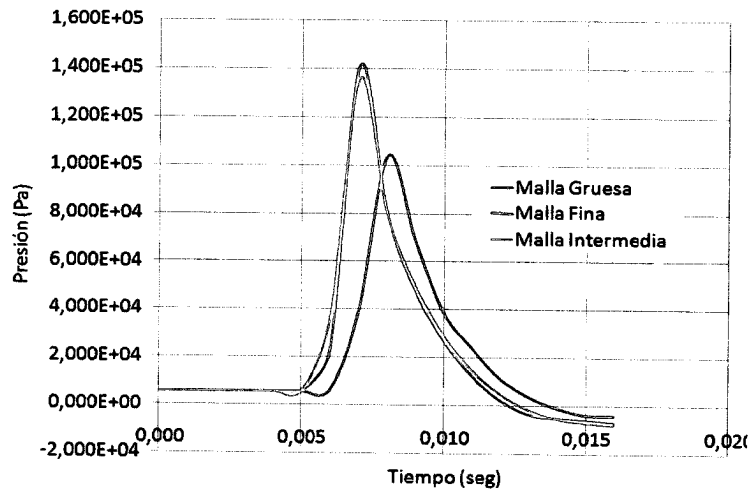


Fig. 3.16b. Curvas presión-tiempo en 3,81 m (12,5 ft) para las diferentes mallas estudiadas.

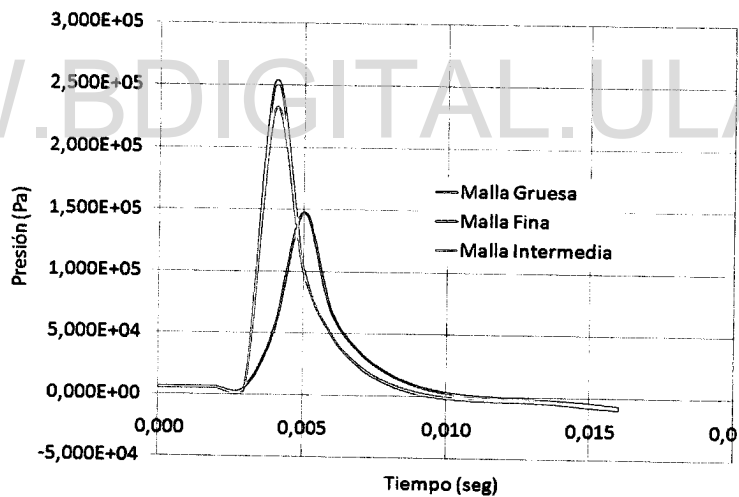


Fig. 3.16c. Curvas presión-tiempo en 2,01 m (6,6 ft) para las diferentes mallas estudiadas.

En ellas se observa que para las mallas intermedia y fina dicha variación es bastante coincidente en su forma, difiriendo en los valores máximos. Para la malla gruesa el comportamiento presenta un desfase respecto a las otras dos mallas y por supuesto diverge en la sobrepresión máxima. Esto muestra la influencia que tiene la densidad

del mallado en la predicción no solo de los valores de sobrepresión máxima sino del desarrollo de la presión de la onda explosiva en tiempo.

3.5. Resultados de la simulación (modelo explosivo-aire).-

La estimación de la sobrepresión máxima y la relación presión-tiempo a una distancia arbitraria del punto de detonación, además de la distribución de la presión en el aire son focos de interés en este estudio.

Los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas son comparados con los valores de las ecuaciones de Plooster modificada ya utilizadas anteriormente. Las Fig. 3.17a, 3.17b, 3.17c y 3.17d muestran estas comparaciones para cada relación L/D estudiada (0,25, 0,50, 1 y 6, respectivamente). En ellas se puede observar que a medida que aumenta la relación L/D de la carga explosiva, las sobrepresiones máximas con la distancia se van ajustando de mejor manera, teniendo éstas un comportamiento lógico a partir de ciertas distancias. Particularmente, esto se hace visible desde, aproximadamente, los 3 m para las relaciones $L/D = 1$, y los 2 m para $L/D = 6$. Esto corrobora el hecho de poder modelar apropiadamente un problema de cargas cilíndricas detonadas en el aire como un problema de deformaciones planas, en particular para relaciones L/D altas. Todos las sobrepresiones son evaluadas para un azimut de 90° relativo al eje longitudinal de la carga cilíndrica (el punto de detonación es el centro de la carga).

En la zona próxima al explosivo, dígame, hasta los 3 m para la relación $L/D = 0,50$ y 1, y los 2 m para $L/D = 6$, la correlación entre los valores de la simulación numérica y de la ecuación es bastante pobre. Por tanto, estos resultados son más estables para distancias grandes debido a la complejidad del fenómeno de la explosión en la zona cercana al explosivo, como se cita antes. El hecho de que la Fig. 3.17d esté dada hasta los 4 m, sencillamente obedece a que más o menos hasta esa distancia, para $L/D = 6$, la ecuación de Plooster modificada tiene validez.

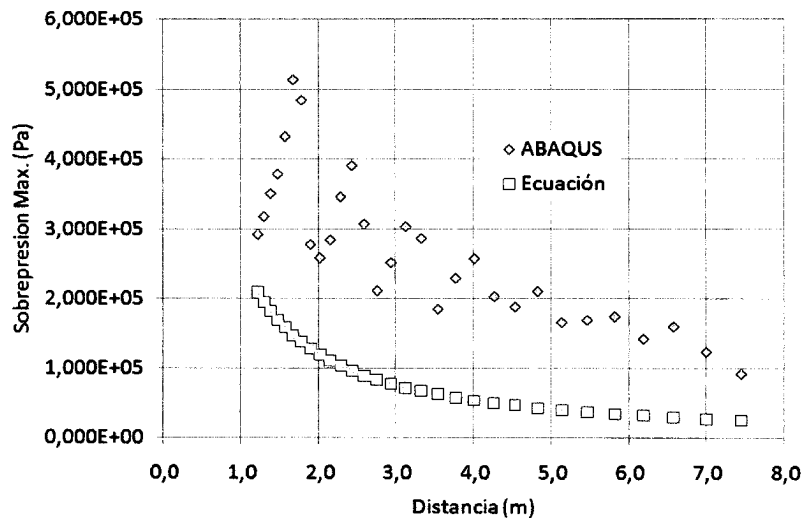


Fig. 3.17a. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la simulación numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 0,25$.

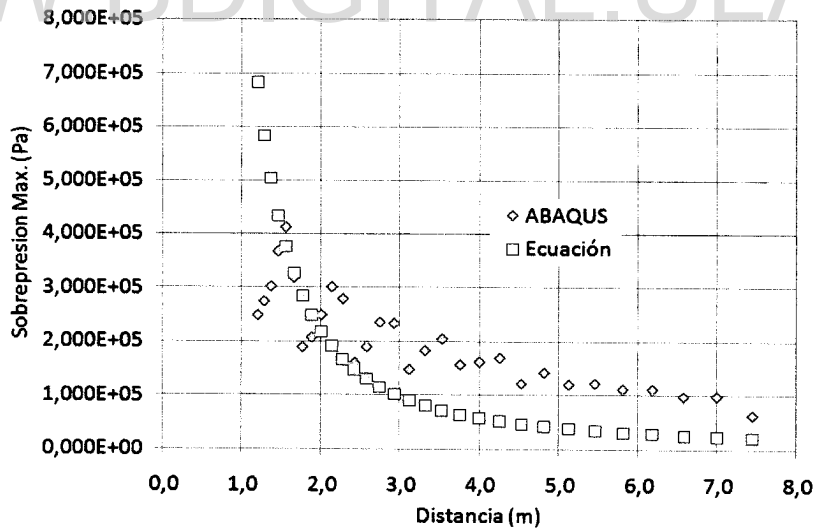


Fig. 3.17b. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la simulación numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 0,50$.

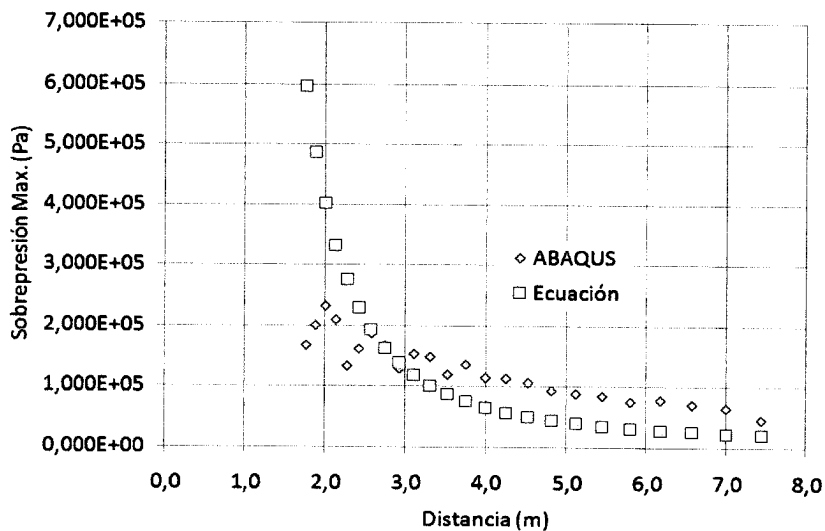


Fig. 3.17c. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la simulación numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 1$.

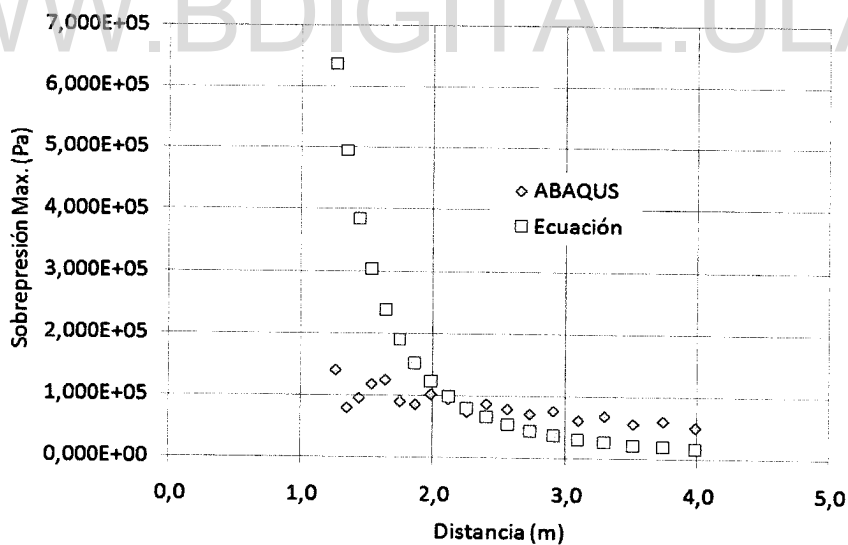


Fig. 3.17d. Comparación de la sobrepresión máxima obtenida de la simulación numérica con ABAQUS con los valores calculados de la ecuación de Plooster modificada como una función de la distancia del explosivo, para una carga cilíndrica de 1 kg con una relación $L/D = 6$.

Para las relaciones $L/D = 0,25$ y $0,50$ (Fig. 3.17a y 3.17b), se aprecia que la dispersión de las sobrepresiones máximas obtenidas con ABAQUS, alrededor de aproximadamente los primeros 4 m del explosivo, es significativa. A partir de esos 4 m se puede decir que los datos siguen más o menos la tendencia de los valores de la ecuación. Esto resultados no permite definir con claridad un patrón de comportamiento de la sobrepresión máxima con la distancia para $L/D = 0,25$ y $0,50$. La marcada diferencia de resultados con relación a $L/D = 1$ y 6 , demuestra que para este estudio en específico de simulaciones de cargas explosivas cilíndricas de 1 kg para diferentes relaciones L/D detonadas en el aire es válida para relaciones mayores a $0,25$.

Las diferencias porcentuales promedio de la sobrepresión máxima entre la simulación numérica y la ecuación de Plooster modificada (con referencia a esta última) se encuentran en un promedio de 355, 156, 113 y 98%, para las relaciones $L/D = 0,25$, $0,50$, 1 y 6 , respectivamente. Debe señalarse que los datos tomados para calcular estos porcentajes son aquellos para los cuales se estima siguen un comportamiento lógico ya explicado anteriormente. Los porcentajes obtenidos son ciertamente elevados. No obstante, es de esperarse que existan importantes niveles de error en la predicción dado el alto nivel de incertidumbre que hay en el problema. Como se menciona en el estudio de sensibilidad de mallado son varios los factores que influyen en la precisión de la predicción. Es por ello, que antes de dar un juicio definitivo respecto a la aplicabilidad de ABAQUS para realizar simulaciones numéricas de explosiones en el aire, se requieren de estudios más detallados a fin de establecer el grado de influencia que podría tener cada uno de ellos.

Porcentajes como los obtenidos para $L/D = 0,50$ y en especial para $0,25$ es posible que, aún cuando se optimice la precisión en la determinación de la sobrepresión máxima, no se llegue a porcentajes razonables que permitan validar las simulaciones. Para $L/D = 1$ y 6 , como ya se ha dicho, se requerirá de una investigación más detalladas. Hasta ahora no existe mucha claridad en este tipo de estimaciones a través de simulaciones numéricas. De por si el fenómeno de las explosiones en el aire es

complejo, y si se le anexa el tratar de simularlo con todas las implicaciones que esto lleva, es entendible esta discrepancias en este campo de investigación. Para tener una idea del nivel de error que se puede conseguir en este tipo de trabajos, cabe indicar el de Bouamoul & Nguyen (2008) donde se puede observar errores relativos de la sobrepresión máxima entre 27% a 36% comparando con resultados experimentales y el de Jiménez & Rueda (2003) en el cual muestran una sobrepresión máxima que está en el orden de 45% de la real, entre otros.

La fórmula aplicada para conseguir estos porcentajes es semejante a la Ec. 3.7 con la diferencia de que p_2 es el resultado numérico de la simulación y p_1 es el resultado obtenido de la ecuación de Plooster modificada (Yin et al., 2009).

En definitiva, estos resultados muestran que la tendencia de las sobrepresiones máximas conseguida con ABAQUS se ajusta a las sobrepresiones de las ecuaciones de Plooster modificada para relaciones L/D mayores a 1 y zona distante del explosivo. La predicción de la sobrepresión máxima a través de la simulación numérica es sobreestimada en un significativo porcentaje respecto a de Plooster modificada. Sin embargo, ello es sensible a varios factores que ya han sido indicados.

Las curvas de historia de presión de ABAQUS a diferentes distancias del explosivo (Fig. 3.18a, 3.18b y 3.18c) también son mostradas en este estudio. Los resultados muestran que, comparando con la característica curva presión-tiempo de una onda explosiva en un punto arbitrario (Fig. 2.4, Capítulo 2), ABAQUS simula razonablemente el proceso de una explosión. La propagación de la onda de choque en el aire es capturada en estas curvas. Se observa que en el momento inicial la presión es constante igual a un valor de referencia que puede ser la presión atmosférica o cero (dependiendo con cual se trabaje), en este caso a presión cero. En un instante de tiempo, señalado como "tiempo de llegada", la presión aumenta (súbita o gradualmente dependiendo del caso) a un valor pico o máximo (sobrepresión máxima), para luego presentarse una disminución gradual en la presión máxima con

el incremento de la distancia, junto con el aumento gradual en el tiempo de duración. A medida que se incrementa la distancia, para cualquiera de las relaciones L/D consideradas, se tiene un aumento más gradual (no repentino) de la presión al valor máximo. Para cortas distancias (para este estudio señálese hasta los 2 m), contrariamente, se puede considerar que hay un súbito, casi instantáneo, aumento de presión hasta la presión máxima.

Las figuras presentan la comparación entre las variaciones de la presión en el tiempo obtenida con ABAQUS en un posición arbitraria (2, 4 y 7 m del centro del explosivo) para las relaciones L/D consideradas (0,25, 0,50, 1 y 6).

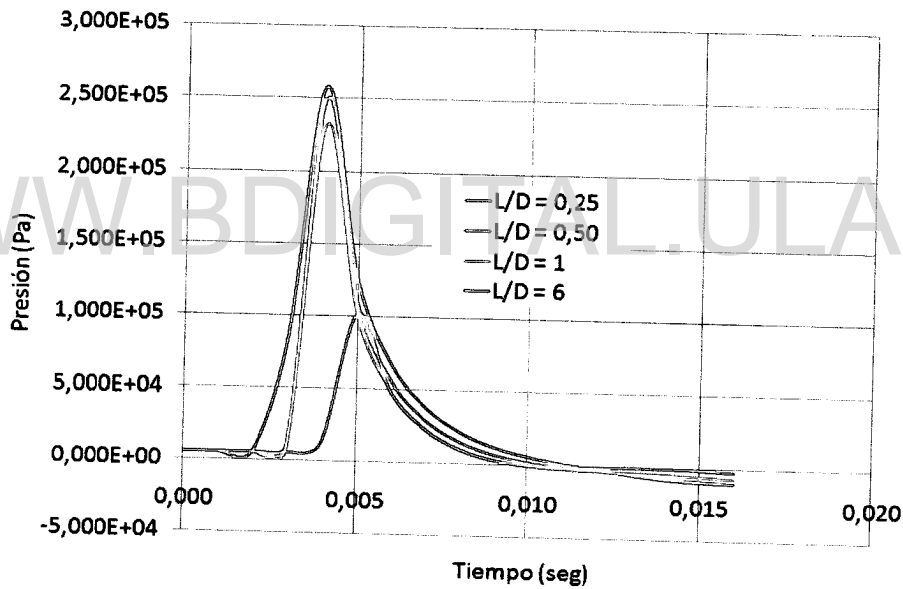


Fig. 3.18a. Historias de presión conseguidas con ABAQUS y valores de sobrepresión máxima obtenidas con las ecuaciones de Plooster modificadas, a 2 m del centro de la carga explosiva para las relaciones L/D de 0,25, 0,50, 1 y 6.

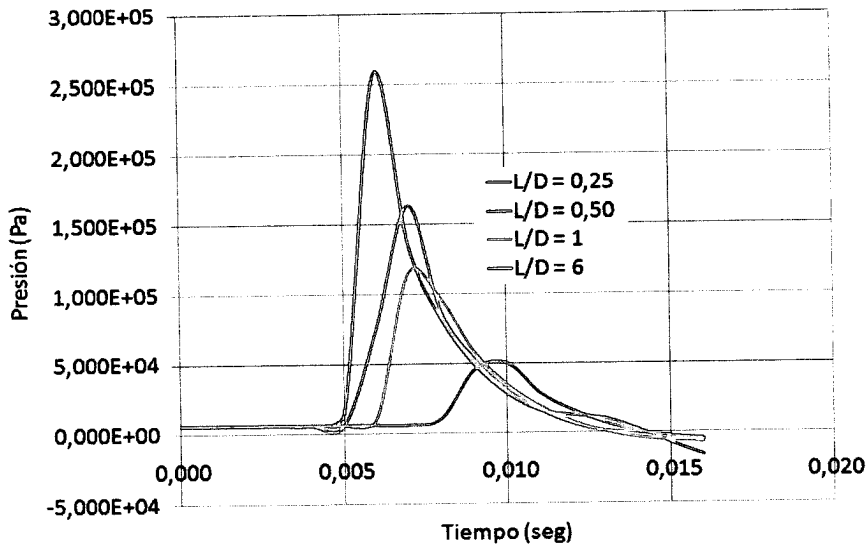


Fig. 3.18b. Historias de presión conseguidas con ABAQUS y valores de sobrepresión máxima obtenidas con las ecuaciones de Plooster modificadas, a 4 m del centro de la carga explosiva para las relaciones L/D de 0,25, 0,50, 1 y 6.

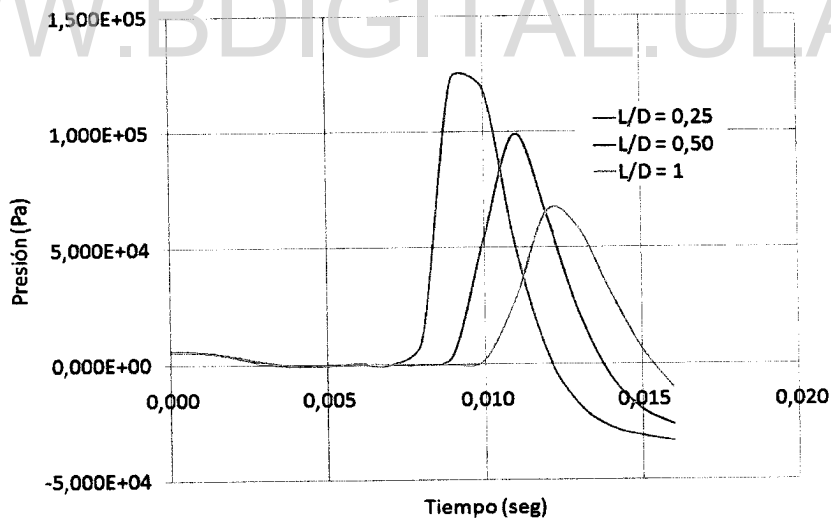


Fig. 3.18c. Historias de presión conseguidas con ABAQUS y valores de sobrepresión máxima obtenidas con las ecuaciones de Plooster modificadas, a 7 m del centro de la carga explosiva para las relaciones L/D de 0,25, 0,50 y 1.

No es posible construir una curva presión-tiempo basada en ecuaciones analíticas para comparar con la de la simulación, debido a que en la literatura no se encuentra expresiones analíticas generalizadas que permitan estimar la duración de la fase positiva, el tiempo de llegada de la onda y coeficiente de decrecimiento de la presión con el tiempo –llamado también parámetro de frente de onda (Łódygowski & Sielicki, 2008)–, y así lograr definir la curva –por ejemplo en la forma sugerida por Friedlander (Ec. 2.2, Capítulo 2)–. La comparación de la sobrepresión máxima en diferentes posiciones ya se discutió anteriormente. En la Fig. 3.18c no se coloca la curva presión-tiempo para la relación $L/D = 6$, ya que para el tiempo manejado en la simulación (0,016 seg) no se captura completamente.

En las Fig. 3.19a, 3.19b y 3.19c se puede apreciar la distribución de presiones en el aire a 0,001, 0,007 y 0,014 seg de la detonación del explosivo para una carga cilíndrica de 1 kg de TNT y relación $L/D = 1$. Ellas describen la expansión producto de la detonación y su propagación en el aire. Para las otras relaciones L/D consideradas el patrón de distribución es semejante.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

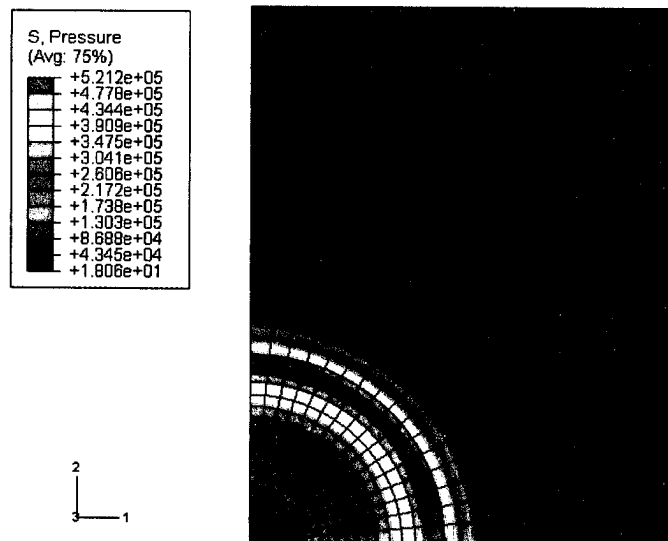


Fig. 3.19a. Distribución de presiones en el aire a 0,001 seg de la detonación.

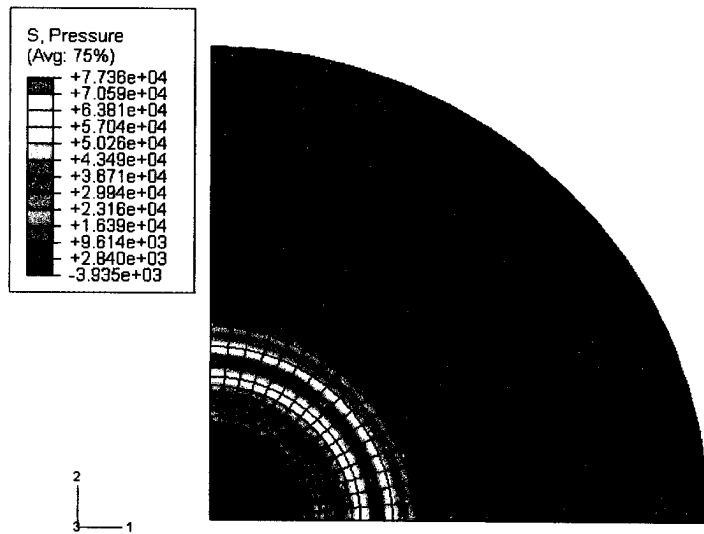


Fig. 3.19b. Distribución de presiones en el aire a 0,007 seg de la detonación.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

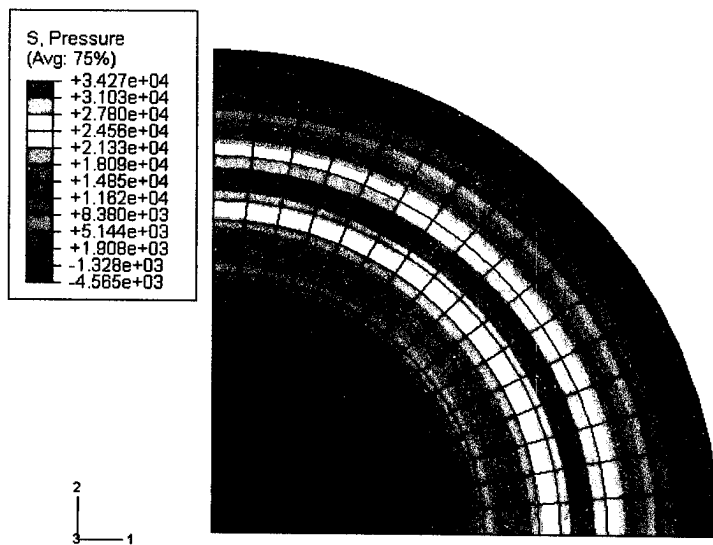


Fig. 3.19c. Distribución de presiones en el aire a 0,014 seg de la detonación.

Debe señalarse que por ahora la duración y el impulso de la fase positiva de la onda explosiva no son estimados en este estudio.

Como en Jiménez & Rueda (2003), el empleo del mallado adaptativo no mejora los resultados, pero es importante considerarlo ya que la explosión es un fenómeno complejo, el cual requiere buenas técnicas de modelado de los elementos finitos. Las ondas de choque explosivas y el aire son fluidos los cuales son especialmente difíciles modelar porque ellos se someten a grandes deformaciones, y las formas de los elementos y tamaños pueden cambiar considerablemente (Yin et al., 2009). Una formulación como la ALE (Arbitraria Lagrangiana-Euleriana) logra minimizar las dificultades debido a las grandes deformaciones. Como se menciona anteriormente, la formulación ALE es un método que permite a la malla finita moverse independientemente del flujo del material y donde cada elemento en la malla puede contener una mezcla de dos o más materiales diferentes. Recuérdese que para tener una mayor idea de esta formulación, particularmente en cuanto a los aspectos conceptuales e implementación numérica, en el artículo de Donea et al. (2004) se proporciona una investigación relativa a este tipo de método.

En conclusión, los resultados muestran que es posible estimar la presión en función del tiempo y la sobrepresión máxima de la onda explosiva a través de modelos numéricos.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ESTRUCTURAS APORTICADAS DE ACERO SOMETIDAS A CARGAS EXPLOSIVAS

4.1. Introducción.-

El análisis y diseño de estructuras sometidas a cargas explosivas ha sido tradicionalmente objeto de interés, principalmente, en el sector militar. Sin embargo, aunque desde sucesos como los ocurridos en el edificio Ronan Point de Londres en 1968 (donde un escape de gas produjo una explosión que ocasionó un desproporcionado colapso de la estructura) y en la plataforma petrolífera Piper Alpha en 1988 (donde una serie de explosiones seguida de incendios, producto de un fallo técnico, causó no solo la destrucción total de la plataforma sino 167 muertos y US\$3400 millones en daños –Kepa, 2008–) ya se había generado un significativo interés en la integridad estructural de edificaciones ante explosiones en el campo no militar, es a partir de los diferentes eventos intencionales acaecidos en los últimos años –como el de la sede de la Asociación Mutual Israelita Argentina –AMIA– (Buenos Aires-Argentina, 1994), el del Edificio Federal Alfred Murrah (Oklahoma-E.E.U.U., 1995) y el de las torres del World Trade Center (Nueva York-E.E.U.U, 2001) por citar algunos– donde se ha intensificado la atención en lo que respecta a la respuesta estructural ante explosiones e impactos. La respuesta estructural a este tipo de cargas es un campo importante de la ingeniería ya que hay ciertas estructuras catalogadas como “sensibles” (como por ejemplo, instalaciones petroleras, edificios públicas o gubernamentales, etc.) que necesitan de protección tal que una explosión inicial no lleve a daños catastróficos (Caretta, Cant, Palmer, 2002).

A pesar de que existen publicaciones –por ejemplo, Army Technical Manual 5-1300 (TM 5-1300, 1990), Army Technical Manual 5-855-1 (TM 5-855-1, 1986), ASCE Manual 42 (ASCE, 1985), ASCE Guidelines for Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities (ASCE, 1997), ASCE Structural Design for Physical

Security (ASCE, 1999), United Facilities Criteria (4-010-01 y 4-023-03, 2003 y 2005, respectivamente) y GSA criteria (GSA, 2003), entre otros– que establecen las pautas para el análisis y diseño tanto de elementos estructurales (vigas, columnas, muros, etc.) como de sistemas estructurales básicos (pórticos rígidos simples) sujetos a cargas accidentales como las explosiones, se basan en métodos simplificados y aproximados que están limitados fundamentalmente a un solo modo de respuesta, y además requieren que tanto la estructura como las cargas sean idealizadas. Aunque ciertamente, para algunos casos, estos métodos resultan una herramienta comúnmente usada para un análisis y/o diseño rápido de estructuras sometidas a cargas explosivas con razonable precisión (Longinow & Alfawakhiri, 2003), para otros estos no son suficientes, y por tanto requieren de métodos más avanzados que vayan más allá de proporcionar información para un solo modo de respuesta y de las simplificación e idealizaciones que se suponen, por ejemplo, soluciones para sistemas de múltiples grados de libertad (MGDL), determinación de varios modos de respuesta dinámica, análisis donde se tomen en cuenta las no linealidades asociadas a la plasticidad (material) y a la posibilidad de grandes deformaciones (geométrica), el efecto de la velocidad de deformación, aplicación de diferentes tipos de cargas simultáneamente, esfuerzos residuales, etc.

Uno de estos métodos avanzados es de los elementos finitos. Hoy día existen muchos programas computacionales de elementos finitos comercialmente disponibles (por ejemplo, ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, etc.) que poseen la capacidad de efectuar análisis dinámicos no lineales considerando variedad de fenómenos del comportamiento y atributos físicos del problema. Si bien una simulación por este método requiere de importante recurso computacional y humano, también puede ser muy útil para la evaluación de comportamientos estructurales bajo condiciones de cargas esperados para propósitos de diseño o para investigaciones forenses después de eventos con cargas explosivas (Krauthammer, 2008). En este sentido, las simulaciones numéricas pueden ser usadas para la evaluación pormenorizada de

respuestas estructurales y en etapas finales de diseño donde se requiere de revisiones detalladas (diseño por desempeño).

Por otro lado, las actuales prácticas de análisis y diseño proponen llevar a cabo tanto ensayos experimentales como simulaciones numéricas. El costo asociado con ensayos experimentales es alto, y en algunos casos los ingenieros están obligados a confiar en predicciones numéricas. En la práctica, el análisis numérico presenta un desafío significativo en términos de representar exactamente la física del problema, modelando la estructura con suficiente detalle, y completar el análisis en una cantidad razonable de tiempo.

Actualmente el método de los elementos finitos es una herramienta utilizada por numerosos investigadores con objeto de conocer mejor el comportamiento mecánico de estructuras y/o elementos estructurales ante cargas explosivas –por ejemplo, Krauthammer (1999), Summers (2008), Motley (2004), Shope (2006), Lee, Kim & Kim (2009), Crawford & Magallanes (2005), Zhang, Zhongdong & Zhang (2008), Edel, Sari & Montoya (2005), Luccioni, Ambrosini & Danesi (2004), Krauthammer & Cipolla (2008), entre muchos otros–. Sin embargo, en la literatura no se ha encontrado un procedimiento o protocolo general para el análisis de estructuras aporticadas sometidas a explosiones por el método de los elementos finitos; existen algunos estudios dirigidos a problemas puntuales, como por ejemplo, resistencia a explosiones de vigas “sandwich” empotradas (Deshpande & Fleck, 2004), respuesta de columnas de acero de ala ancha sujetas a carga axial constante y cargas explosivas laterales (Shope, 2006) y análisis de elementos finitos de conexiones columna-viga de acero sometidas a cargas explosivas (Sabuwala, Linzell & Krauthammer, 2005), por nombrar algunos.

En el caso particular de las estructuras aporticadas de acero, el TM 5-1300 (1990) – manual técnico que representa uno de los estándares existente más usados en la regulación de estructuras sometidas a explosiones– proporciona un procedimiento racional para realizar eficazmente un diseño “preliminar” de pórticos resistentes a

explosiones. No obstante, a fin de confirmar que el proceso de diseño satisface los criterios de deformación recomendados por el TM 5-1300 (1990) y verificar la capacidad de los miembros establecidos sobre la base de fuerzas y momentos dinámicos estimados, el mismo manual recomienda realizar un análisis más riguroso. En estos análisis se puede considerar algunos de los ítems compilados por White, Liew & Chen (1991) –citado por ASCE (1997)– que pueden afectar la resistencia y estabilidad de pórticos de acero. Cabe indicar que este procedimiento del TM 5-1300 (1990) está dirigido a edificaciones caracterizadas por ser de múltiples luces (o vanos) y de alturas relativamente bajas.

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo, planteado como un estudio preliminar, es dar un primer paso hacia el desarrollo de un protocolo para estudiar la respuesta de estructuras aperticadas de acero sometidas a cargas explosivas esperadas para propósitos de diseño a través de software comerciales de elementos finitos. La evaluación de la respuesta dinámica consiste en chequear solo la estabilidad global de la estructura a través del valor permisible de desplazamiento o deflexión lateral establecida en el manual TM 5-1300 (1990). Ello servirá para iniciar la revisión de criterios de diseño propuestos en dicho manual, como sugieren Krauthammer & Cipolla (2008). Existe también un valor permisible para chequear la estabilidad local por medio de la deformación por rotación, sin embargo por el momento no se evalúa. Esta revisión además permitirá determinar la influencia de la velocidad de deformación en ese valor de deflexión lateral máxima obtenido. Por último, la estructura es evaluada localmente obteniendo la distribución de los esfuerzos (Von Mises) y determinando la localización y el valor del máximo esfuerzo presentado.

El presente estudio se realiza con el programa ABAQUS versión 6.6-1. La simulación se basa en consideraciones de modelado en elementos finitos encontradas en la literatura. La configuración de la estructura a evaluar corresponde a un edificio típico de una instalación petroquímica (ver Fig. 4.21), diseñada según los pautas del manual TM 5-1300 (1990). La utilización de este tipo de estructura para este trabajo obedece a que estas son relativamente simples (en términos de su análisis y diseño), y siendo

este, como se menciona anteriormente, un primer paso hacia el desarrollo de un protocolo para estudiar la respuesta de estructuras aperticadas de acero sometidas a cargas explosivas, resulta lo más conveniente.

Uno de los objetivos de este estudio es determinar la capacidad del programa de elementos finitos ABAQUS para efectuar análisis de estructuras sometida a cargas explosivas.

Algunos modelos de referencia y de verificación (o calibración) son efectuados con el fin de poder explorar y evaluar algunos tópicos específicos relacionados con el problema en estudio, y calibrar y validar la fiabilidad del modelo de elementos finitos resultante, respectivamente. Un modelo de referencia o de línea base ("baseline analysis") permite, básicamente, describir y evaluar diferentes aspectos ó variables puntuales que influyen en el comportamiento y desempeño de un problema, con anterioridad al desarrollo de modelos complejos. Éste se fundamenta en un modelo computacional de elementos finitos sencillo en geometría y discretización. Por otro lado, el objetivo de la verificación o calibración, en este caso, es optimizar la eficiencia, del modelo de elementos finitos en cuanto a la predicción de deflexiones, e indirectamente, obtener resultados lo más cercanamente posibles a la realidad, aunque intrínsecamente todo modelo posee hipótesis y aproximaciones que son ineludibles y que marcan una restricción entre la coincidencia de lo real y lo modelado. Usados correctamente, estos modelos son instrumentos de valoración de alta calidad.

Es importante la identificación de las formas modales y los periodos de vibración en la predicción de la respuesta dinámica de las estructuras. De este modo, un análisis modal es realizado con el mismo ABAQUS y verificado con el programa SAP2000 de análisis y diseño estructural.

Las historias presión-tiempo que son aplicadas en la simulación numérica corresponden a las cargas de diseño de la estructura. El evento explosivo propuesto es el creado por la detonación en el aire de una carga esférica de TNT (Trinitrotolueno) de 1814 kg (4000 lb) aproximadamente a unos 87 m (285 ft) de la estructura. Es de

mencionar, que este escenario puede ubicarse en uno de los criterios de diseño antiterrorista recomendados en ASCE (1999) –citado por Schmidt (2003), Tabla 1–, específicamente, el de baja probabilidad de un ataque con un vehículo bomba. El atentado al Edificio Federal Alfred Murrah en Oklahoma es un ejemplo de este tipo de ataque, donde precisamente, la cantidad de explosivo utilizada fue de 1814 kg – Longinow & Mniszewski (1996) citado por Ngo et al. (2007)–. A fin de buscar no escoger una carga de diseño arbitrariamente como sugiere Schmidt (2003), es que se usan esos criterios de diseño recomendados. La justificación de esta cantidad de explosivo, descansa en que junto con la distancia optada, se desea conseguir las duraciones y las sobrepresiones –relativamente bajas de acuerdo al TM 5-1300– para las cuales está orientado el procedimiento de diseño de pórticos de este manual.

Las cargas presión-tiempo son estimadas de acuerdo al manual TM 5-1300 (1990), TM 5-855-1 (1986) y al ASCE Guidelines for Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities (ASCE, 1997). El TM 5-885-1 (1986), al igual que el TM 5-1300 (1990), proporciona un procedimiento basado en abacos empíricos que permiten obtener los parámetros principales (sobrepresión máxima incidente, impulso y la duración) de la onda explosiva requeridos para definir las cargas sobre una estructura, y la guía del ASCE (1997) permite obtener los otros parámetros (presión reflejada máxima, velocidad del frente de choque, presión dinámica máxima, entre otros) que deben ser considerados para determinar dichas cargas. Esta es la manera comúnmente empleada para definir las cargas explosivas (ASCE, 1997). Solo la fase positiva de la onda explosiva es tomada en cuenta.

Una de las limitaciones de este tipo de procedimiento para estimar la carga (según Remennikov, 2007), radica en que se desestima la verdadera física del fenómeno de la interacción onda explosiva-estructura, suponiendo que la historia presión-tiempo es aplicada en distintas partes en el mismo instante de tiempo. Y aunque el autor destaca que esta suposición proporciona una aproximación pobre de los efectos de explosiones sobre objetos cercanos, no ocurre lo mismo para objetos a larga distancia como la manejada para esta simulación. Siendo este trabajo un primer paso para

estudiar lo relativo al comportamiento estructural de edificaciones ante explosiones, el fenómeno de interacción onda explosiva-estructura no es considerado por ahora. Este fenómeno es de tal complejidad que requiere de mayor investigación, no solo en su parte teórica sino para su simulación numérica.

Durante el análisis, es comúnmente se supone que no hay acoplamiento entre el fluido (aire) y la estructura (problema no acoplado); la respuesta de la estructura puede ser obtenida independientemente del fluido estableciendo directamente una presión actuante conocida (Subramaniam, Nian & Andreopoulos, 2009). Un enfoque habitualmente empleado para evaluar respuestas estructurales consiste en un análisis dinámico para una historia presión-tiempo preestablecida usando un esquema numérico tal como el de los elementos finitos. Precisamente, este es el enfoque en que se basa la propuesta del protocolo de análisis de estructuras de acero sometidas a cargas explosivas.

Finalmente, la consideración de que se tratan de explosiones en el aire, es motivado a que son las más estudiadas, y por consiguiente existe mayor información relacionada con ellas. Además, este tipo de explosiones ocurren de tal manera que la onda explosiva impacta a la estructura sin amplificaciones producto de la presencia de una superficie densa, como por ejemplo la del terreno. Una explosión cercana al terreno trae consigo una serie de fenómenos como la incidencia de la onda, su reflexión y la interacción de esas ondas conocida como efecto "Mach" o reflexión irregular, que por el momento no son abordados. Tampoco se consideran para estudio otros efectos sobre estructura como la influencia de la onda de rarefacción, vórtices y difracción. Al igual que el fenómeno interacción onda explosiva-estructura, estos efectos requieren mucha más investigaciones y estudios. Solo se considera la presión asociada con la onda explosiva llamada sobrepresión incidente y la presión producida por su reflexión cuando impacta la estructura denominada presión reflejada. Esta última genera la carga de diseño a actuar sobre la estructura.

4.2. Modelos de referencia o de Línea base (“Baseline Analysis”).-

Se ha mencionado anteriormente que los modelos de referencia o de línea base (“baseline models”) permiten investigar y evaluar los efectos o la sensibilidad de varios aspectos o parámetros asociados a un problema a través simulaciones numéricas simples. Estos modelos, son usados para optimizar y facilitar el desarrollo de modelos en elementos finitos más complejos y también permiten identificar rápidamente el foco de posibles irregularidades presentadas y, dar una solución rápida y adecuada. La idea de estos modelos de línea base es tener justamente una línea base de la cual partir como punto de referencia para poder evaluar fenómenos ó problemas.

Para el presente trabajo, varios modelos fueron creados con el propósito de estudiar los siguientes aspectos:

1. El comportamiento estructural dinámico ante cargas explosivas, a partir de los rangos de presiones de diseño del manual TM 5-1300 (1990).
2. La influencia de los modelos constitutivos de plasticidad en la respuesta estructural.
3. El efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades mecánicas del acero estructural.
4. La aplicabilidad de la carga uniformemente distribuida para representar explosiones en el aire distantes.

Los modelos de referencia son analizados con el programa ABAQUS versión 6.6-1 usando un análisis explícito, que se utiliza principalmente para simulaciones de dinámica rápida (impactos, explosiones, etc.) –Ver Ref. Principia, s.f.–. Este tipo de análisis usa integración explícita en el dominio del tiempo (emplea la técnica de la diferencia central).

Para los periodos de tiempo de los análisis es tomado el tiempo de la duración de la fase positiva de la sobrepresión. Esto permite a la estructura, en este caso una placa rectangular (la descripción de la misma se hará en la siguiente sección), experimentar

los primeros ciclos del movimiento que son los de interés (DOE/TIC-11268, 1980). Las unidades usadas son las del sistema inglés.

4.2.1. Descripción del modelo (Modelo Base).-

El modelo base consiste de una placa rectangular de acero estructural. La Fig. 4.1 muestra la geometría y dimensiones de la placa cuyo espesor es de 0,3937 in (0,01 m). La placa está simplemente apoyada en sus cuatro lados y está modelada en 3D. El modelo de Elementos Finitos es desarrollado en ABAQUS/CAE (ABAQUS, 2004). ABAQUS/CAE es el ambiente completo de ABAQUS (CAE, por sus siglas en inglés) que proporciona una interfase simple y consistente para crear, correr, monitorear, y evaluar resultados de simulaciones de ABAQUS/Standard y ABAQUS/Explicit.

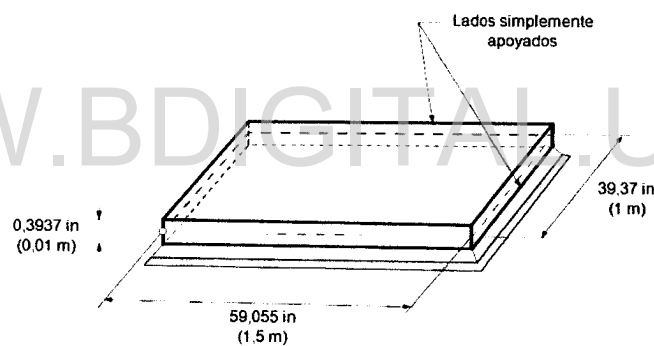


Fig. 4.1. Geometría y dimensiones de la placa.

Se supone un comportamiento elástico lineal para el material. Las propiedades elásticas del material adoptadas son: Módulo de elasticidad, $E = 3,0458E+7$ psi ($2,1E+11$ Pa) y Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,30$. La densidad, $\rho = 7,296E-4$ lb-seg²/in⁴ (7800 kg/m³).

Este modelo es tomado del problema "Eigen-11" de análisis de valores propios (de una placa rectangular delgada simplemente apoyada) de los ejemplos de verificación del programa computacional MIDAS/Gen de elementos finitos 2D y 3D (Gen Verification Examples MIDAS, 2006).

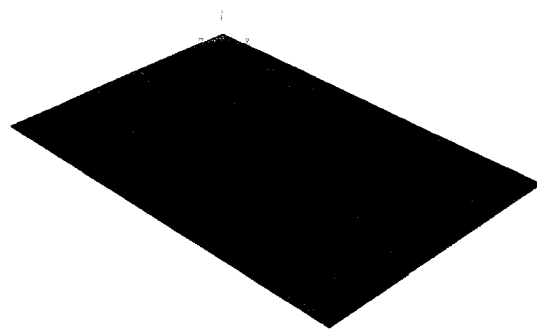
Dado que el espesor de la placa es significativamente más pequeño que cualquiera de las otras dimensiones, se utilizan elementos de placa (shell) en el modelo. En este estudio, elementos S4R (según la denominación de ABAQUS) con integración reducida y control de “hourglass” son considerados para modelar la geometría de la placa.

En análisis dinámico una de las mayores dificultades que se presenta a la hora de elegir la densidad de malla y tipos de elementos más adecuados para el análisis. Un análisis dinámico es mucho más costoso que el correspondiente análisis estático, y una malla inapropiada incrementará de forma notable el coste del análisis, o conducirá a resultados incorrectos.

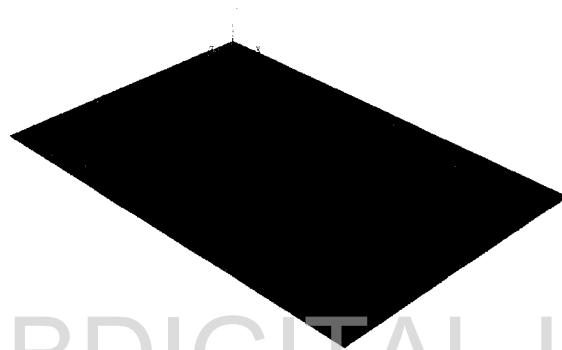
Un análisis de valores propios es efectuado para establecer la discretización del modelo y el tipo de elemento. Según *Getting Started ABAQUS/Standard* (Hibbitt Karlsson & Sorensen Inc., 2002), cuando se diseñan mallas para simulaciones dinámicas, se necesita considerar las formas modales que influirán en la respuesta y usar una malla que sea capaz de representar estas formas modales adecuadamente. Esto significa que una malla que es apropiada para una simulación estática puede no ser apropiada para calcular la respuesta dinámica a cargas que excitan modos de frecuencia altos. El número de frecuencias naturales calculadas son de seis (6), como se determinan en el problema “Eigen-11” de análisis de valores propios antes citado.

El análisis de valores propios, disponible en ABAQUS, es efectuado por medio del método de iteración del subespacio y los valores propios son normalizado con respecto a la matriz de masa de la estructura (es decir, los valores propios son escalados de tal modo que la masa generalizada para cada vector es unitario).

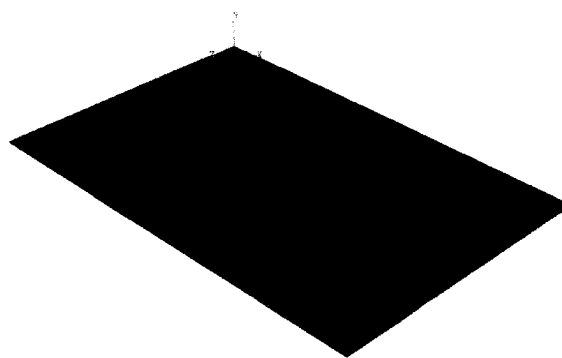
Específicamente, tres (3) mallas definidas, son evaluadas (Fig. 4.2). En la Tabla 4-1 se presentan las características de dichas mallas.



(a) Malla N°1 (100 elementos).



(b) Malla N°2 (1200 elementos).



(c) Malla N°3 (3800 elementos).

Fig. 4.2. Discretizaciones planteadas para el análisis de valores propios de la placa.

Tabla 4-1. Características de las discretizaciones planteadas para el análisis de valores propios de la placa.						
Mallas	Nº de divisiones		Nº		Relaciones de aspecto	
	Lado largo	Lado corto	Elementos	Nodos	Promedio	Peor
Nº1	10	10	100	121	1,50	1,50
Nº2	40	30	1200	1271	1,13	1,13
Nº3	76	50	3800	3927	1,01	1,01

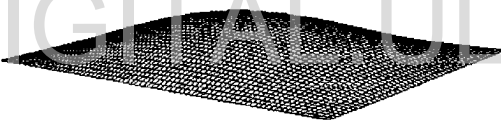
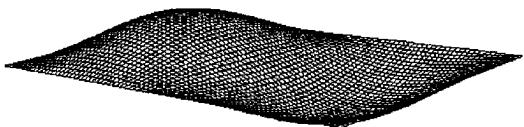
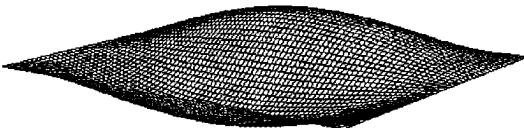
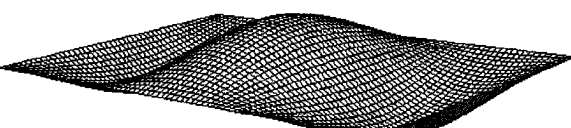
Las frecuencias naturales obtenidas se muestran en la Tabla 4-2. Los valores teóricos mostrados en dicha tabla, y adoptados para este estudio, corresponden la solución analítica al problema “Eigen-11” de análisis de valores propios señalado anteriormente. Estos mismos valores son corroborados a través la solución particular para frecuencias naturales de una placa rectangular delgada y uniforme de tamaño $a \times b$ y un espesor h , con los lados simplemente apoyados encontrada en Leissa (1973).

Tabla 4-2. Frecuencias (en ciclos/seg ó Hz) obtenidas del análisis de valores propios para las discretizaciones planteadas y de la solución analítica.				
Modo	Malla Nº1	Malla Nº2	Malla Nº3	Teórico
1 ^{er}	35,91	35,60	35,55	35,63
2 ^{do}	70,42	68,50	68,36	68,52
3 ^{ro}	114,13	109,98	109,63	109,64
4 ^{to}	134,06	123,70	123,19	123,34
5 ^{to}	147,16	142,65	142,23	142,53
6 ^{to}	208,14	197,52	196,79	197,35

Una comparación entre las frecuencias proporcionada por la simulación numérica, a través del análisis de valores propios para las tres mallas propuestas, y la solución analítica refleja una buena correlación entre los resultados de las mallas Nº2 y Nº3 y los analíticos. Aunque la malla Nº2 presenta no solo buenos resultados sino menor número de elementos, la malla seleccionada en definitiva es la Nº3. Esto debido a que para ambas mallas el costo computación no es tan significativo como para poner el número de elementos como factor influyente en la elección. En definitiva, cualquiera de las dos se puede utilizar.


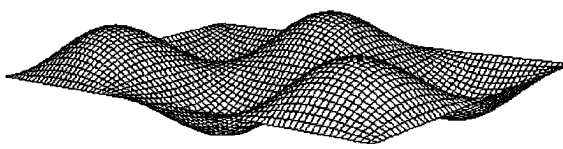
Por otro lado, es necesaria la aplicación del análisis de valores propios para predecir la respuesta estructural dinámica de la placa a partir de las frecuencias naturales (o los períodos de vibración) y las formas modales, que es fundamental en el análisis y diseño de estructuras sometidas a cargas explosivas. Como más adelante se hace un estudio del comportamiento estructural ante cargas explosivas, esta información es requerida.

En la Tabla 4-2 se muestran las frecuencias naturales obtenidas. Los resultados del análisis de valores propios confirman que la placa tiene como modo fundamental (primer modo) de vibración en flexión. La placa puede ser excitada para vibrar en modo de flexión cuando la onda explosiva la impacta. Las formas modales obtenidas se presentan en la Tabla 4-3.

Modo	Forma modal
1 ^{er}	
2 ^{do}	
3 ^{ro}	
4 ^{to}	

(...continuación)

(...continuación)

Modo	Forma modal
5 ^{to}	
6 ^{to}	

Esto ha permitido además verificar el desempeño de ABAQUS en análisis de este tipo.

La amortiguación del material no es considerada en este análisis. Solo una cantidad (los valores por defecto de ABAQUS) del amortiguamiento asociado con deformación volumétrica es tomado en cuenta.

A partir del modelo antes descrito (modelo base) se crean los modelos de referencia que permitirán evaluar los tópicos antes mencionados.

4.2.2. Estudio del comportamiento estructural ante cargas explosivas.-

El propósito de este punto es estudiar las respuestas dinámicas que pueden presentarse ante cargas explosivas.

Dependiendo de la magnitud de la carga y su duración, las estructuras tendrán distintos comportamientos. En este sentido, los distintos rangos de presiones de diseño establecido por el manual TM 5-1300 (1990) son empleados (Ver Fig. 2.19 del Capítulo 2).

La simulación numérica de la placa sometida a la acción de cargas explosivas de distinta magnitud y ubicadas a distintas distancias es llevada a cabo. Se utilizan cargas explosivas esféricas de TNT. Específicamente, se trata de cargas cuyas sobrepresiones (incidentes) se enmarquen dentro los valores que se establece para cada rango de presiones de diseño (Ver Tabla 4-4).

Rango de presión de diseño	Alto	Bajo	Muy Bajo
Presión incidente	>> 100 psi	< 100 psi	< 10 psi

Como se expone en el Apéndice B, existen varias soluciones para los parámetros de las ondas explosivas, los cuales son presentados usualmente en gráficos, tablas o ecuaciones basadas en resultados experimentales o numéricos. En este estudio, se emplean las expresiones presentadas Kinney y Graham (1985) para la sobrepresión máxima y la duración de la fase positiva (Ec. B.18 y B.23 del Apéndice B). Estos parámetros son expresados en función de la distancia escalada Z y la masa de la carga explosiva W . Las expresiones de Kinney & Graham (1985) están circunscritas a onda de explosiones (fase positiva) en el aire de un carga esférica. En la Tabla 4-5 se presentan los distintos casos de carga considerados.

Masa de la carga equivalente de TNT, W	1814 kg (4000 lb)	1814 kg (4000 lb)	1814 kg (4000 lb)
Distancia de la detonación al objeto, R	6 m (236,22 in)	20 m (787,40 in)	100 m (3937,01 in)
Sobrepresión máxima incidente, P_o	589,47 psi (4,06E+6 Pa)	47,24 psi (3,26E+5 Pa)	1,88 psi (1,30E+4 Pa)
Duración de la fase positiva, t_d	0,001028 seg	0,011782 seg	0,039317 seg

Recuérdese que el parámetro de la distancia escalada (Ver sección 2.2.6, Capítulo 2) es una medida para comparar los efectos explosivos producto de diferentes explosiones, la cual es atribuida a Hopkinson (1915) –citado por Hsieh, Hung & Chen (2008)– y es dado por la forma $Z = R/W^{1/3}$ (donde R y W son, respectivamente, la distancia de la detonación al objeto, en metros y la masa de la carga equivalente de TNT, en kg).

El procedimiento seguido para definir los casos de carga anteriores consiste en fijar una masa de explosivo como referencia –en esta oportunidad se selecciona 1814 kg (4000 lb) que corresponden a la cantidad usada en el atentado al Edificio Federal Alfred Murrah en Oklahoma de 1995 (Longinow, 1996 citado por Ngo et al., 2007)– y variar las distancias del explosivo al objeto de forma que, utilizando la ecuación de Kinney & Graham (1985), las sobrepresiones máximas estén dentro de los rangos de presiones incidentes mostrados en la Tabla 4-4.

Además, una definición que describa la variación de la presión de la explosión como una función del tiempo es requerida para el análisis dinámico. La compleja historia presión-tiempo es comúnmente simplificada por una historia presión-tiempo triangular –Fig. 4.3, Bulson (1997)–, esto es,

$$P(t) = P_o \left(1 - \frac{t}{t_d} \right) \quad \text{Ec. 4.1}$$

en el cual t_d es la duración de la onda explosiva para la representación de la carga triangular, P_o representa la sobrepresión máxima de la onda de choque en su fase positiva.

Precisamente, esta carga triangular es la aplicada sobre la placa para los diferentes valores establecidos de P_o y t_d . El ángulo de incidencia de las cargas se considera de 0° (perpendicular a la superficie).

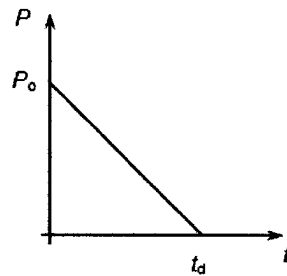


Fig. 4.3. Historia presión-tiempo de forma triangular.

Se supone la presión de la carga explosiva como uniformemente distribuida sobre la superficie de placa. El análisis es llevado a cabo bajo el modo elástico lineal ya que el comportamiento post-fluencia no es tomado en cuenta en el análisis. Se incluye los efectos de la no linealidad del material a través del modelo elastoplástico perfecto.

Luego de aplicada las distintas cargas para las diferentes combinaciones antes citadas de sobrepresiones máximas y su duración sobre el modelo se obtienen las respuestas estructurales de la placa. Estas respuestas, representadas a través de historias deflexión-tiempo en el centro de dicha placa se presentan en la Fig. 4.4.

Ya se ha destacado que uno de los parámetros importantes relacionados con las ondas explosivas es la duración de la fase positiva, t_d . Este valor es importante porque en el proceso de diseño es comparado con el periodo o frecuencia natural de la estructura o del elemento estructural para determinar la respuesta estructural a explosiones explosivas. En este sentido, la respuesta de una estructura ó elemento estructural sometido a cargas explosivas es bastante sensible a la relación de su período natural y la duración de fase positiva de la carga.

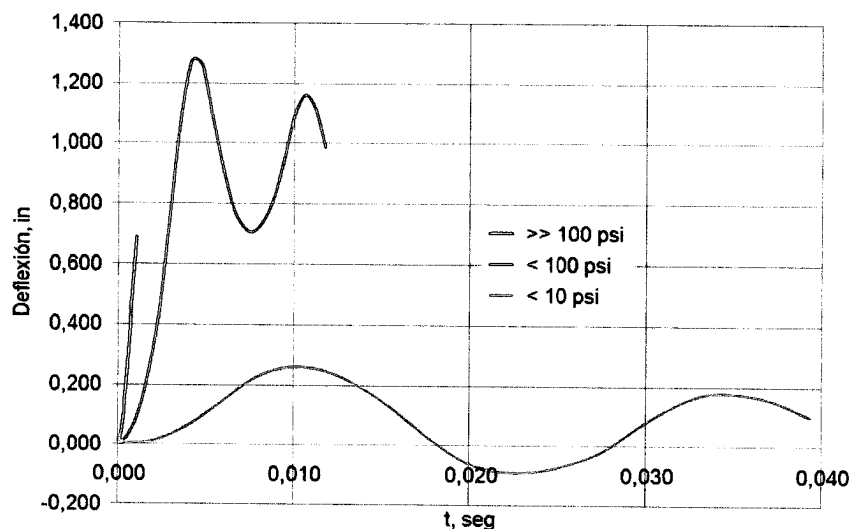


Fig. 4.4. Historia deflexión-tiempo en el centro de la placa, para los diferentes rangos de presiones incidentes de diseño señalados en la Tabla 4-4.

Basado en lo antes mencionado, en Mays & Smith (1995) se encuentra una categorización de la respuesta estructural en términos del producto de la frecuencia natural de la estructura y la duración de la fase positiva de una explosión. En ella se establecen tres regímenes de respuesta estructural (Tabla 4-6):

Tabla 4-6. Clasificación de la respuesta estructural (Mays & Smith, 1995).		
Impulsiva	Dinámica	Cuasi-estática
$\omega_n t_d < 0,40$	$0,40 < \omega_n t_d < 40$	$\omega_n t_d > 40$

Para la placa, la frecuencia natural (f) es de 35,55 Hz según el análisis de valores propios, es decir, tiene un periodo fundamental (T) de 0,02813 seg y una frecuencia circular o angular (ω_n) de 223,37 rad/seg.

Se puede observar en la Fig. 4.4 que la respuesta para una sobrepresión incidente P_o $>> 100$ psi, es efectivamente impulsiva. En este caso, donde $\omega_n t_d < 0,40$ ($0,23 < 0,40$) y caracterizado por ser t_d (0,001028 seg) mucho más pequeño que T , la carga ha terminado de actuar antes que la estructura haya tenido el tiempo para responder

considerablemente (la mayor parte de la deformación ocurre para tiempos más grandes que t_d). De esta forma, se puede decir que el desplazamiento es una función del impulso, la rigidez y la masa (Mays & Smith, 1995). Lo observado en la Fig. 4.4 para $P_o \gg 100$ psi, indica que el pulso de la carga explosiva cae a cero antes de que cualquier desplazamiento significativo ocurra. De acuerdo a Mays & Smith (1995), este caso es descrito como una carga impulsiva. En este régimen la variación de la magnitud y el tiempo de la presión no son importantes (TM 5-1300, 1990). Cuando un elemento o una estructura responden a un impulso, la máxima respuesta depende del área bajo la curva presión-tiempo (el impulso de la carga explosiva).

Para estructuras sometidas a excitaciones impulsivas, el efecto de la propagación de la onda de esfuerzo dentro del material es de gran importancia en el análisis (Hsieh et al., 2008). La onda de esfuerzo hará que la distribución de esfuerzo varíe con el tiempo y alcance esfuerzos a niveles más altos que producidos por una carga estática.

Para $10 \text{ psi} < P_o < 100 \text{ psi}$, se observa que el desplazamiento máximo ocurre durante la fase del pulso, hecho común de la respuesta dinámica. Aunque también puede presentarse que el desplazamiento máximo se dé en la fase de la vibración libre. En ambos casos, $\omega_n t_d$ se encuentra entre 0,40 y 40 ($\omega_n t_d = 2,62$ y $8,78$, respectivamente) por lo que era de esperarse este tipo de respuesta. Es de indicar que para t_d y T aproximadamente iguales, el desarrollo de la respuesta es más complejo y posiblemente requiere la solución completa de la ecuación de movimiento de la estructura (Mays & Smith, 1995).

Finalmente, un caso que aunque no se observa en la Fig. 4.4 puede presentarse y es el régimen cuasi-estático. En este régimen se presenta que t_d es mucho mayor que T . En el límite la carga puede considerarse que permanece constante mientras la estructura alcanza su deflexión máxima. En este caso, según Mays & Smith (1995), el máximo desplazamiento es solamente función de la presión máxima y la rigidez.

4.2.3. Estudio de la influencia de los modelos constitutivos de plasticidad.-

Para estudiar la influencia de los modelos constitutivos de material en la respuesta estructural ante cargas explosivas, cuatro (4) modelos son seleccionados. Se tratan de los modelos (Ver Fig. 4.5): 1) Elastoplástico perfecto, 2) Bilineal, 3) Trilineal y 4) Johnson-Cook (JC), comúnmente usados para describir el comportamiento inelástico del acero y que están disponibles en la librería de ABAQUS.

Estos modelos constitutivos adoptados para el acero son basados en la superficie de fluencia de Von Mises, asociada a una ley de flujo plástico. El criterio de Von Mises (o criterio de la máxima energía de distorsión) supone que el material se comporta de forma isotrópica, es decir, tiene las mismas propiedades en todas las direcciones. Este criterio es empleado habitualmente para metales dúctiles.

El material usado para la placa es un acero A36 (ASTM A36/A36M-04, 2004). Para esta parte no se consideran la evolución temporal de la deformación (en el marco de la viscoplasticidad), ni se toma en cuenta un tipo de modelo de daño. En cambio, la influencia de los efectos de no linealidad geométrica si son incluidos.

En cuanto a los modelos se puede decir:

- El modelo elastoplástico perfectamente (Fig. 4.5a) no considera el efecto de endurecimiento por deformación. Este modelo, por su sencillez, es el más implementado. Tiene limitaciones como el no poder representar el endurecimiento del material, la pérdida de rigidez del elemento y la máxima deformación límite que puede sufrir el material.
- El modelo bilineal es un modelo similar al elastoplástico perfecto, excepto por el factor que toma en cuenta el efecto de endurecimiento por deformación (Fig. 4.5b). Este efecto es considerado al asignar un valor mayor que cero a la rigidez post-cedencia. Generalmente se supone un valor entre 0.5% y 5% de la rigidez inicial para la rigidez post-cedencia. Esto hace que el modelo bilineal

se acerca más a la realidad que el modelo elastoplástico perfecto. Uno de sus limitantes es que no incluye la degradación de rigidez.

- En el trilineal se contempla el incremento de la resistencia en la zona de endurecimiento. Se caracteriza por tres rectas (Fig. 4.5c), la primera corresponde al rango elástico, la segunda es la plataforma de fluencia y la última es la zona de endurecimiento; las ecuaciones que definen cada una de estas rectas son mostradas más adelante. Las ecuaciones conocidas para el modelo trilineal del acero, son:

$$\sigma = E\varepsilon_s \quad \text{si } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad \text{Ec 4.2a}$$

$$\sigma = \sigma_y \quad \text{si } \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \quad \text{Ec 4.2b}$$

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_u - \sigma_y)(2\eta - \eta^2) \quad \text{si } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{sh} \quad \text{Ec 4.2c}$$

donde, $\eta = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}}$ y $E_{sh} = \frac{2(\sigma_u - \sigma_y)}{\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}}$. E es el módulo de elasticidad del acero, E_{sh} es la pendiente de la zona de endurecimiento, σ_y es el límite de fluencia del acero, σ_u es el esfuerzo de rotura del acero, ε_y es la deformación de fluencia del acero, ε_{sh} es la deformación al inicio de la zona de endurecimiento y ε_{su} es la deformación de rotura del acero.

- La relación JC ha sido ampliamente utilizada para modelizar el comportamiento de metales y su formulación explícita se expresa en la Ec. C.6 del Apéndice C. La ley de comportamiento de Johnson-Cook es puramente fenomenológico y contempla el efecto del endurecimiento por deformación, el ablandamiento térmico y el efecto de la velocidad de deformación. En la Fig. 4.5d se representa el efecto del endurecimiento por deformación que en este análisis es el de interés.

A continuación, se muestra en la Tabla 4.7 los datos utilizados para definir cada uno de los modelos constitutivos antes mencionados para el acero A36. Estos datos son obtenidos de varias fuentes en la literatura consultada: Leigh & Earls (2008), ASTM A36/A36M-04. (2004), Prinz (2007) y Schwer (2007).

Tabla 4-7. Propiedades elásticas e inelásticas consideradas para el acero A36.			
<i>Propiedades elásticas</i>			
Módulo de elasticidad, E		2,9E+7 psi	
Coeficiente de Poisson, ν		0,30	
Densidad, ρ		0,000735 lb-seg ² /in ⁴ (0,284 lb/in ³)	
<i>Propiedades inelásticas</i>			
Modelo	Elastoplástico perfecto ^I	Esfuerzo de fluencia, σ_y	36000 psi
		Deformación de fluencia, ϵ_y ^{II}	0,00124 in/in
		Deformación ultima, ϵ_u	0,02 in/in
	Bilineal ^I	Pendiente del endurecimiento por deformación, E_T	4 % ^{IV}
		Esfuerzo ultimo, σ_u	58000 psi
	Trilineal ^I	Pendiente de la zona de endurecimiento, E_{sh}	2,9E+6 psi ^{IV}
		Deformación al inicio de la zona de endurecimiento, ϵ_{sh}	0,005
		Esfuerzo ultimo, σ_u	58000 psi
	Johnson- Cook ^{III}	A	41500 psi
		B	72540 psi
N		0,228	
^I Datos de esfuerzo de fluencia (σ_y), deformación de fluencia (ϵ_y), deformación ultima (ϵ_u) y deformación de rotura ó ultima (ϵ_{su} ó ϵ_u) son comunes en los modelo elastoplástico perfecto, bilineal y trilineal. ^{II} Obtenido utilizando la Ley de Hooke: $E = \sigma_y / \epsilon_y$. ^{III} Valores para $\dot{\epsilon}_O = 1,0 \text{ seg}^{-1}$. ^{IV} Parámetros conseguidos para $\sigma_u = 58000 \text{ psi}$.			

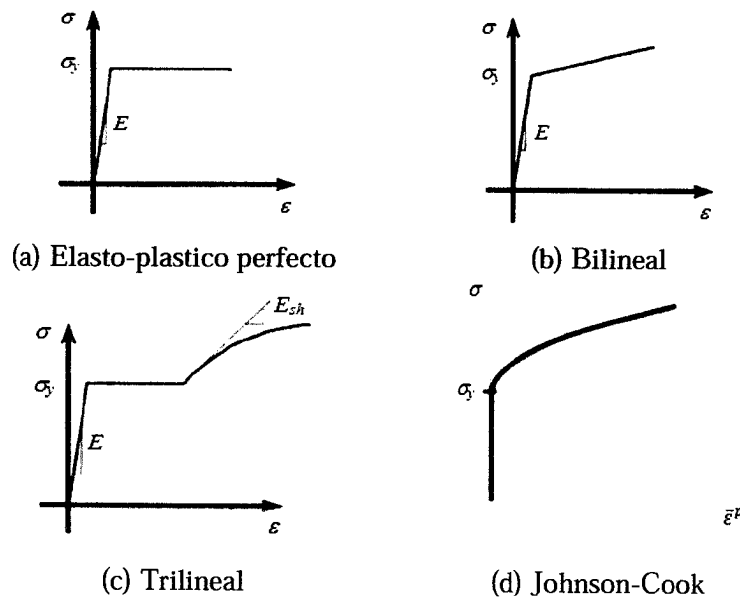


Fig. 4.5. Modelos constitutivos del material evaluados.

Las curvas esfuerzo-deformación son convertidas en esfuerzo real (“true stress”) y deformación plástica logarítmica de acuerdo al manual de código ABAQUS/Explicit. Esta conversión obedece a que la curva usual de esfuerzo-deformación (llamada también de ingeniería o nominal), que expresa tanto el esfuerzo como la deformación en términos de las dimensiones originales de un espécimen de prueba (probeta), no muestra realmente lo que sucede en el material. Cuando una probeta se deforma plásticamente bajo una carga axial, ésta sufre una disminución gradual del área de la sección transversal respecto del área nominal (mientras se produce el alargamiento), específicamente se trata de un estrangulamiento o estricción, produciendo un área real menor que la inicial, y por tanto el esfuerzo real que se genera es siempre mayor que el nominal.

La carga aplicada corresponde a una explosión de 1814 kg (4000 lb) de TNT detonada a una distancia de 20 m (787,40 in). En la Tabla 4-5 se presenta la sobrepresión máxima (y su duración) generada por dicha explosión. Con la utilización de esta carga se busca que la placa responda en el régimen dinámico. La

variación de la presión con el tiempo se supone aproximadamente como triangular, como muestra la Fig. 4.3. En este caso se considera que la carga de presión es distribuida uniformemente sobre toda la superficie de la placa.

Los resultados obtenidos del análisis numérico, variando el modelo constitutivo, pueden observarse en las Fig. 4.6 y 4.7, donde se muestran las historias deflexión-tiempo y esfuerzo-tiempo en el centro de la placa estudiada. El esfuerzo a evaluar es el de Von Mises, que es un criterio de falla para materiales dúctiles como el acero, y dice que el principio de fluencia se produce cuando la energía de distorsión alcanza un valor crítico.

De las Fig. 4.6 y 4.7 se puede concluir que el comportamiento mecánico del acero estructural A36 bajo cargas explosivas, no se ve influenciado por el tipo de modelo constitutivo que se emplee para representar el material cuando estos no dependen de la velocidad de deformación. Esto coincide con lo expuesto en Oñate & Owen (2007), referente a que el comportamiento mecánico de los metales ante cargas de corta duración y alta intensidad como las explosivas es afectado principalmente por la velocidad de deformación y la temperatura. Más adelante se estudia la influencia de la velocidad de deformación.

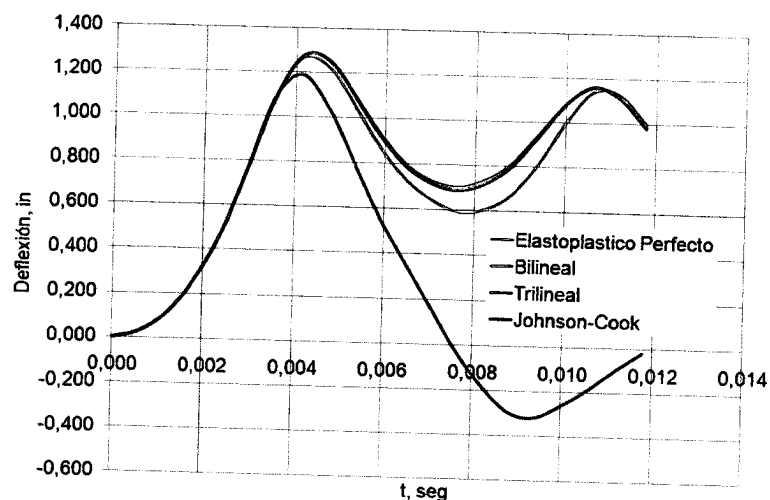


Fig. 4.6. Historia deflexión-tiempo en el centro de la placa para los diferentes modelos constitutivos del material considerados.

La diferencia que se aprecia entre el modelo de Johnson-Cook y el resto obedece a que el modelo JC es muy sensible a los parámetros que definen la ecuación que caracteriza el comportamiento del material. Como se menciona anteriormente este modelo es de tipo fenomenológico, y por tanto requiere de ensayos para calibrar los parámetros del modelo. Este modelo presenta el inconveniente de proponer una sensibilidad lineal del material a la velocidad de deformación que no corresponde con el comportamiento de la mayor parte de los metales.

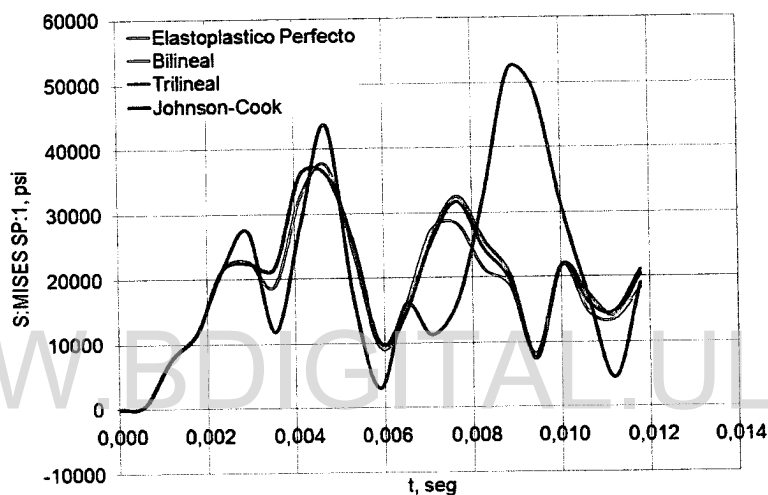


Fig. 4.7. Historia de esfuerzo (Von Mises)-tiempo en el centro de la placa para los diferentes modelos constitutivos del material considerados.

4.2.4. Estudio de los efectos de la velocidad de deformación.-

Varios modelos dependientes de la velocidad de deformación son aplicados a la placa de acero, a fin de investigar su efecto en el comportamiento mecánico del acero. Específicamente, se trata de tres modelos: Cowper-Symond, Yield Ratio y Johnson-Cook, los cuales están incorporados en las librerías del programa ABAQUS. Este efecto de la velocidad de deformación se explica con más detalle en el Apéndice C.

Los modelos constitutivos utilizados en un análisis de estructuras sometidas a acciones dinámicas de tipo impulsivo, como impacto o explosión, deben tener en cuenta la velocidad de deformación en su formulación.

Una estructura o elemento estructural sujeta a este tipo de cargas puede experimentar grandes deformaciones inelásticas en un tiempo muy corto de tiempo. Esta alta velocidad de deformación durante la respuesta puede tener un efecto significativo en las propiedades del material, y por tanto debe ser tomado en cuenta.

Una de las prácticas comúnmente aplicadas para considerar este efecto en el diseño y análisis de estructuras sometidas a cargas explosivas es incrementar el esfuerzo de fluencia del material a través de un factor denominado “factor de incremento dinámico” (en inglés, Dynamic Increase Factors, DIF). Para tener una idea de la magnitud del DIF, un factor de incremento de la resistencia estática de 1,2 es aplicado sobre el esfuerzo de fluencia es sugerido en el TM 5-1300 (1990) –citado por Lan & Crawford, 2003– para análisis dinámicos.

El acero considerado es un A36 y un modelo constitutivo elastoplástico perfecto y de Johnson-Cook son usados en el análisis. La sensibilidad a la velocidad de deformación es incorporada usando el modelo de Cowper-Symond y Yield Ratio en combinación con el modelo elastoplástico perfecto, mientras con el Johnson-Cook se considera el efecto de la velocidad de deformación con el efecto de la deformación por endurecimiento.

Las propiedades elásticas e inelásticas (sin considerar la dependencia de la velocidad de deformación) se muestran en la Tabla 4.7, mientras los parámetros y datos de los diferentes modelos empleados para considerar la influencia de la velocidad de deformación en el material son dados en la Tabla 4-8.

Estos valores son obtenidos de Mohamed (2007), Motley (2004) y Schwer (2007), respectivamente. Para este estudio se tiene en cuenta la no linealidad geométrica.

La presión impuesta a la placa es idealizada uniformemente distribuida sobre toda su superficie con la misma amplitud y duración del caso anterior donde se evalúan los modelos constitutivos de plasticidad. Se supone la misma relación presión-tiempo de forma triangular.

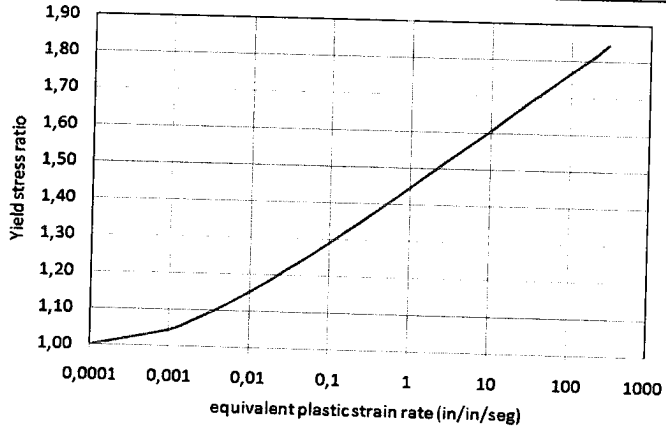
Los resultados observados en la Fig. 4.8 muestran claramente el efecto de la velocidad de deformación. En esta figura, se presenta la historia de deflexión en el centro de la placa para los diferentes modelos que consideran el comportamiento de dependencia de la velocidad, y su comparación con cuando no se considera este efecto.

Cuando el efecto de la velocidad de deformación es tomado en cuenta, el esfuerzo de fluencia se incrementa con la velocidad. De este modo, ya que el módulo de elasticidad es mucho más grande que el módulo plástico, se espera que el análisis con velocidad de deformación sea más rígido, resultando en una disminución en la deflexión o desplazamiento en el centro de la placa, como se observa en la Fig. 4.8.

Esto corrobora la necesidad de tomar en cuenta este fenómeno en el diseño de estructuras sujetas a cargas explosivas.

Cabe indicar que los resultados son sensibles a los parámetros ó los datos del material. Boh, Louca & Choo (2004) –citados por Kadid (2008)– indican que hay una gran incertidumbre relacionada con los efectos de la velocidad de deformación sobre la respuesta del acero estructural. En este sentido, hay que tener cuidado con los datos que se usan y los resultados que se manejan.

Es de destacar que al igual como se observa en la evaluación de los modelos de plasticidad, la relación de JC es sensible a los datos del material por las razones ya antes expuestas.

Tabla 4-8. Parámetros y datos utilizados en los modelos Cowper-Symond, Yield Ratio y Johnson-Cook para un acero A36 (de bajo contenido de Carbono).	
Cooper-Symond	$D = 40,4 \text{ seg}^{-1}$
	$q = 5$
Yield Ratio	
Johnson-Cook	$\dot{\epsilon}_0 = 1,0 \text{ seg}^{-1}$
	$C = 0,017$

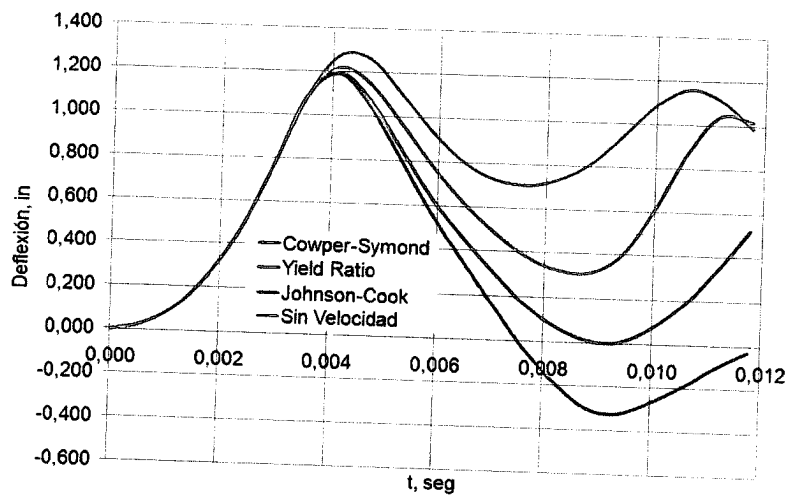


Fig. 4.8. Historia deflexión-tiempo en el centro de la placa para los diferentes modelos de sensibilidad del material a la velocidad de deformación considerados y cuando no se presenta dicha velocidad.

4.2.5. Aplicabilidad de cargas uniformemente distribuida para representar explosiones.-

Uno de los supuestos que generalmente se aplican para simular cargas explosivas es considerar la presión uniformemente distribuida sobre la superficie de impacto, particularmente para explosiones en el aire a larga distancia del objeto.

Las cargas originadas por una explosión están caracterizadas por una distribución de presión espacial y temporal. Cuando ocurre una explosión en el aire, a medida que la onda explosiva se aleja del punto de detonación la expansión del frente de choque de la onda se va haciendo más grande, a tal punto que a cierta distancia esta puede considerarse plana por lo que es posible hacer la suposición de considerar la misma como una carga distribuida uniformemente. Sin embargo, el inconveniente de esta suposición radica en determinar para qué combinación de distancia y cantidad de explosivo esta suposición es válida, ya que ambas están interrelacionadas.

Las cargas explosivas de forma esféricas al detonarse crean ondas esféricas que se disipan con la distancia. Incluso, cargas de geometría no esférica pueden suponerse esféricas a partir de ciertas distancias (DOE/TIC-11268, 1980).

ABAQUS tiene la capacidad de simular ondas esféricas y planas a través de la opción INCIDENT WAVE (según el lenguaje de ABAQUS). No obstante, se debe conocer bien la naturaleza de problema a modelar con la aplicabilidad de esta opción, principalmente en lo que respecta a establecer el o los puntos de aplicación de la historia presión-tiempo de la onda (lo que ABAQUS define como "Standoff Point") y las superficies incidentes y de reflexión (en caso de que se presenten).

Este hecho genera cierta complejidad en el modelado, que aunque se ajusta más a la realidad de los que es una explosión en el aire, hay casos en que se puede simplificar el problema a una carga uniforme distribuida, como es para explosiones distantes.

El diseño de estructuras aporricadas de acero está orientado a sobrepresiones relativamente bajas (TM 5-1300, 1990), que actúen por un tiempo "prolongado" (en

el orden de las decenas de milisegundos) sobre la estructura. Para generar estas sobrepresiones y su duración, a través de la detonación de explosivos de alta potencia como el TNT, se requiere de gran cantidad de explosivo detonado a largas distancias. En esta situación y dado lo explicado anteriormente, es posible que se pueda suponer una carga uniforme.

La razón de este análisis es porque más adelante se efectúa un análisis de una estructura aporricada de acero sometida a cargas explosivas, y por tanto se considera el imponer la presión como una carga uniformemente distribuida.

Para evaluar esta aplicabilidad se obtienen las historias de deflexión en tres puntos sobre la placa (en el centro, cercano a un borde y uno intermedio entre estos dos puntos) –Ver Fig. 4.9– y se examina si hay variación en la respuesta de la placa al aplicar sobre su superficie una onda incidente esférica y una carga uniformemente distribuida.

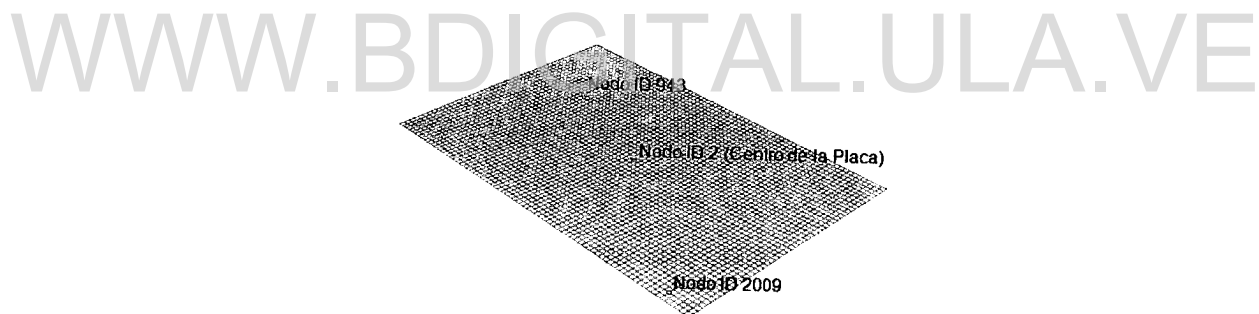


Fig. 4.9. Identificación de los nodos donde se evalúa la respuesta para la carga uniformemente y como onda incidente.

Para este modelo, de la misma manera que en los casos antes evaluados, la relación esfuerzo-deformación elastoplástico perfecta es usada. Las propiedades del material son las presentadas en la Tabla 4-7. Igualmente, la no linealidad geométrica es considerada especificando la opción NLGEOM (según el lenguaje de ABAQUS).

Los casos de carga aplicados se basan en una carga explosiva detonada a distintas distancias. Concretamente, son los utilizados en la evaluación del comportamiento

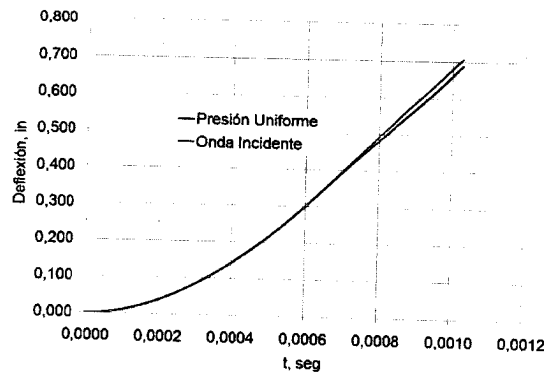
estructural dinámico realizada anteriormente, y que se detallan en la Tabla 4-5. Para esta investigación, las distancias para las cuales están definidos los parámetros de sobrepresión (positiva) y su duración son 6, 20 y 100 m. La evolución en el tiempo de la carga que actúa sobre la placa es de forma triangular como se ha tomado a lo largo de estos análisis.

En las Fig. 4.10, 4.11 y 4.12 se observan distintas historias deflexión-tiempo obtenidas en los tres nodos propuestos para cada distancia según el correspondiente caso de carga.

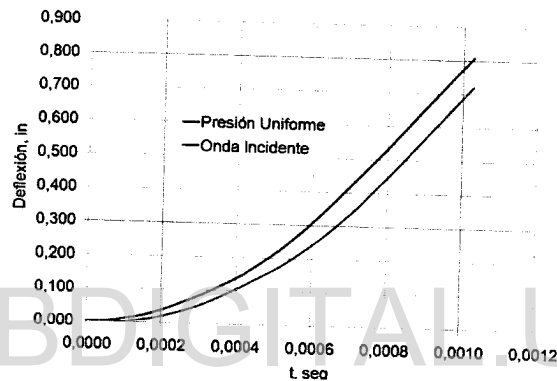
Como se muestra en las figuras, efectivamente, a medida que aumenta la distancia la respuesta de la placa se hace más independiente de la forma de aplicar la carga. En este análisis ya a partir de los 20 m las historias son idénticas.

En vista de que el tamaño de la superficie a impactar también tiene influencia al considerar aplicar la carga explosiva como uniformemente distribuida, es lógico que esto debe evaluarse a través de modelos simples, como por ejemplo este que se presenta, ya no se trataría de un problema estándar sino variable. Lo que sí es un hecho es que dependiendo de la distancia es posible suponer la carga uniformemente distribuida.

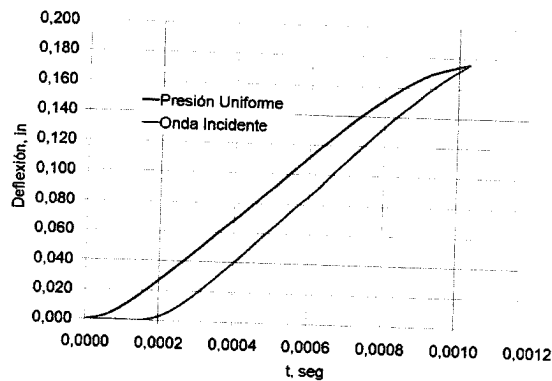
Lo antes mencionado es válido para explosiones externas (en el aire) distantes con incidencia normal a la superficie. Fuera de este caso esta inferencia respecto a la carga debe ser evaluada.



(a) Nodo ID 2 (Centro de la placa).

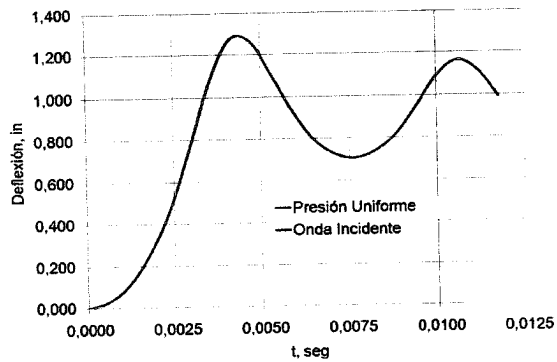


(b) Nodo ID 943.

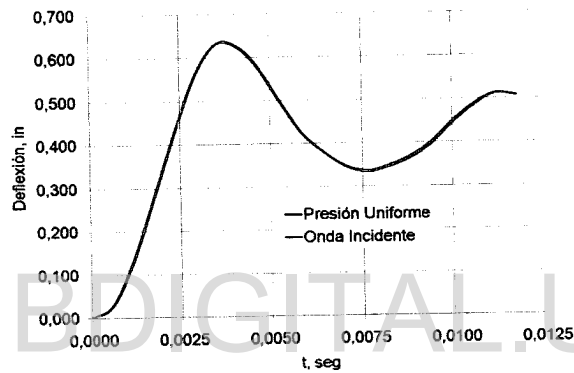


(c) Nodo ID 2009.

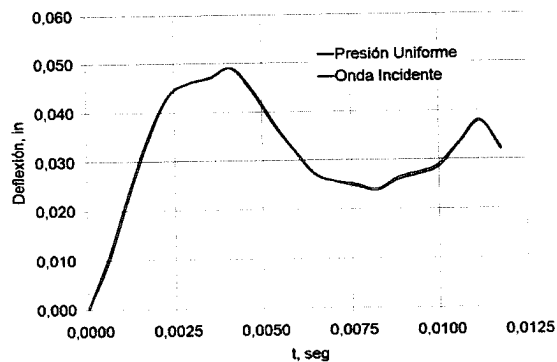
Fig. 4.10. Historias deflexión-tiempo en diferentes nodos: Nodo ID 2 (Centro de la placa), Nodo ID 943 y Nodo ID 2009, para una explosivo detonado a 6 m.



(a) Nodo ID 2 (Centro de la placa).

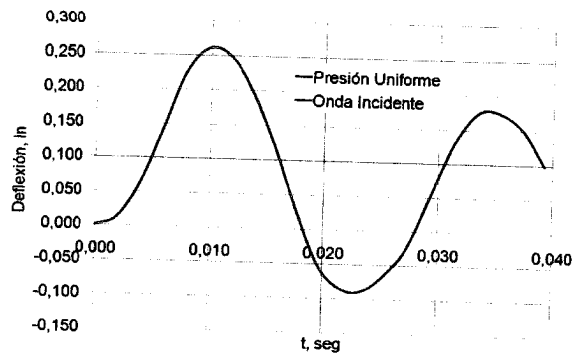


(b) Nodo ID 943.

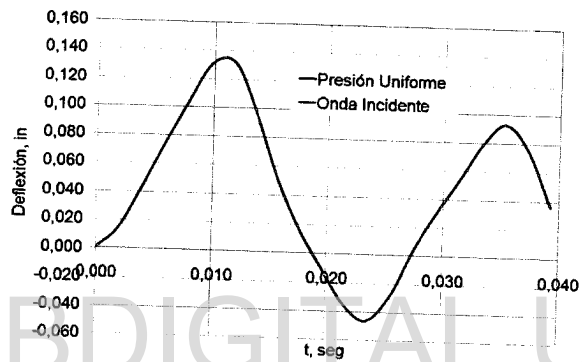


(c) Nodo ID 2009.

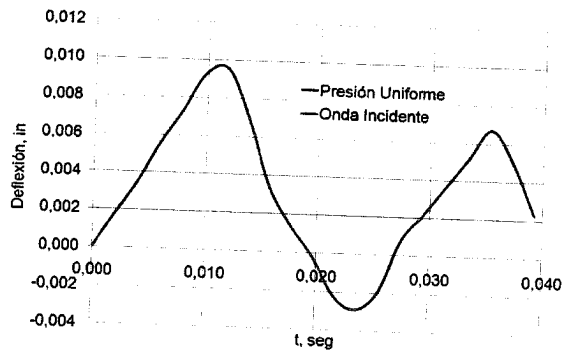
Fig. 4.11. Historias deflexión-tiempo en diferentes nodos: Nodo ID 2 (Centro de la placa), Nodo ID 943 y Nodo ID 2009, para una explosivo detonado a 20 m.



(a) Nodo ID 2 (Centro de la placa).



(b) Nodo ID 943.



(c) Nodo ID 2009.

Fig. 4.12. Historias deflexión-tiempo en diferentes nodos: Nodo ID 2 (Centro de la placa), Nodo ID 943 y Nodo ID 2009, para una explosivo detonado a 100 m.

4.3. Modelos de verificación.-

La verificación o calibración de modelos numéricos de estructuras es muy importante, si se quiere obtener un orden aceptable de confiabilidad en los resultados arrojados por un modelo computacional. De esta manera, todo el proceso que involucra la verificación está justificado en el hecho de que las estructuras están sometidas a múltiples tipos y escenarios de carga, sobre los que se debe tener seguridad en el grado de correspondencia, entre el comportamiento real de la estructura y el simulado. Para alcanzar este grado de correspondencia, se hacen pruebas de carga sobre las estructuras donde se monitorean, como mínimo, las variables fundamentales del problema como la magnitud y posición de las cargas, deflexiones y las características mecánicas de los materiales de la estructura.

Para validar la utilización del programa comercial ABAQUS para el análisis por el método de los elementos finitos de estructuras sometidas a cargas explosivas, se verificará que el programa realice adecuadamente tanto análisis estático como dinámico. Para esta demostración se seguirá el procedimiento empleado en Motley (2004), con las diferencias de que para el análisis de la deflexión estática de un perfil estructural en voladizo sujeta a flexión se hará con una presión distribuida, tratando con ello se representar la carga generada por las explosiones; mientras que para el análisis dinámico, se evaluará la respuesta dinámica de un pórtico rígido pero sometido a una fuerza excitadora impulsiva dinámica de tipo general, característica de las producidas por las explosiones. En el primer análisis se busca además asegurar que los elementos continuos y las condiciones de apoyo trabajen apropiadamente. También se determinará la pendiente estática en un punto de la columna. Asimismo, en el segundo análisis se comprobará la correcta aplicación de una carga variando en el tiempo y de la interacción empleada en la conexión viga-columna se comporte de forma rígida. Los resultados obtenidos con ABAQUS se compararan a los de su solución analítica y los resultados que se obtuvieron con un programa de análisis estructural como SAP2000. Este un software de análisis y diseño estructural de

edificaciones y elementos por el método de los elementos finitos, que ofrece análisis estáticos y dinámicos, lineales y no lineales.

4.3.1. Análisis estático.-

Un perfil W12x96 de acero estructural A36 es modelado con el objetivo de verificar su deflexión estática. Este perfil es el mismo de las columnas del pórtico a utilizar para la verificación del análisis dinámico (que se presenta seguidamente), en términos de dimensiones, propiedades del material y elementos.

El perfil está empotrado en uno de sus extremos y soportará una presión uniforme de $5,7 \text{ lb/in}^2$ sobre una ala del perfil y todo su longitud. A efectos de este análisis, el material del perfil se considera como elástico, teniendo un módulo de elasticidad de $2,9\text{E}+7 \text{ lb/in}^2$ y un coeficiente de Poisson de 0,30.

El modelo es construido a través del módulo ABAQUS/CAE y el análisis se efectúa con ABAQUS/Standard.

Se utilizan elementos sólidos tridimensionales del tipo hexaedro lineal de ocho nodos con integración reducida y control de hourglass, específicamente los elementos C3D8R de la librería de ABAQUS. La malla del modelo planteado es tomada del trabajo de Motley (2004). Todo ello se presenta en la Fig. 4.13. Los resultados que se obtengan además corroborarán la fiabilidad de la malla propuesta.

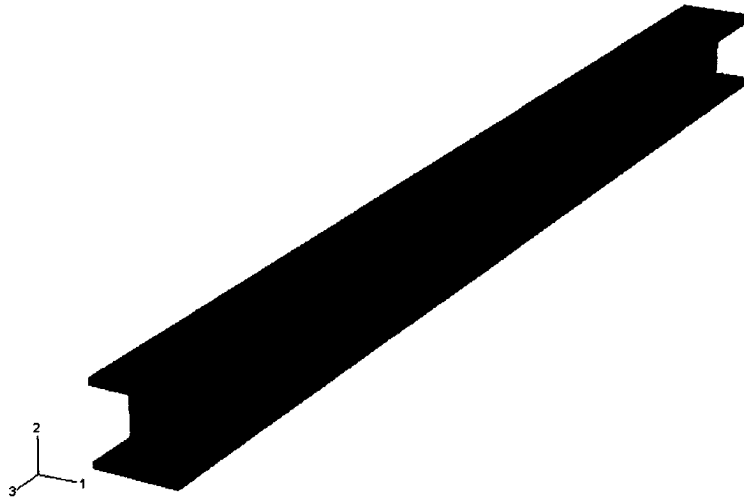


Fig. 4.13. Modelo numérico del perfil W12x96. Elementos C3D8R.

Las ecuaciones analíticas de deflexión máxima, pendiente en el extremo y la elástica son basadas en el método de superposición (Pytel & Singer, 1994).

Tabla 4-9. Pendiente, ordenada de la elástica y deflexión máxima para una viga en voladizo bajo una carga uniformemente distribuida (Pytel & Singer, 1994. Tabla 6-2, pág. 218).			
Tipo de carga	Pendiente en el extremo	Ecuación de la elástica (y es positiva hacia abajo)	Deflexión máxima
	$\theta = \frac{wL^3}{6EI}$	$EIy = \frac{wx^2}{24} (6L^2 - 4Lx + x^2)$	$\delta = \frac{wL^4}{8EI}$

En la Tabla 4-10 y la Fig. 4.14 se presentan la comparación de resultados de la deflexión máxima y la pendiente en el extremo libre y la curva elástica de la columna, respectivamente.

Tabla 4-10. Deflexión máxima y pendiente en el extremo libre de la columna en voladizo sometida a una presión distribuida. Comparación de resultados.					
	ABAQUS	Ec. Analítica	Error (%)	SAP2000	Error (%)
Deflexión máxima (in)	0,337737	0,320409	5,13	0,333647	1,21
Pendiente ^I	0,00249685	0,00247108	1,03	0,00247100	1,04

^I en el extremo libre

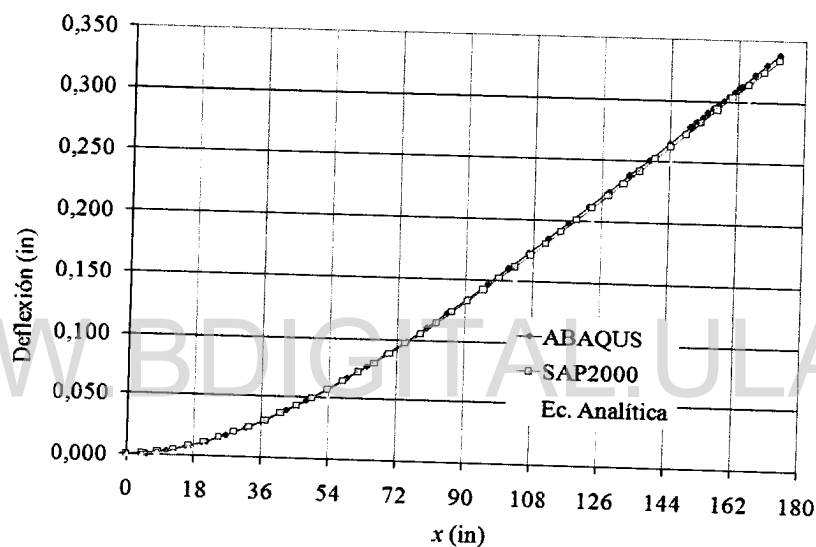


Fig. 4.14. Curva elástica de la columna W12x96 en voladizo sometida a una presión distribuida. Comparación de resultados.

Los resultados obtenidos muestran una aceptable aproximación entre ABAQUS, la solución analítica y SAP2000. Esto valida tanto la utilización de los elementos sólidos continuos y de las condiciones de apoyo en los modelos definitivos.

Cabe indicar que, dado que los elementos sólidos no tienen grados de libertad de rotación, la pendiente obtenida con ABAQUS es aproximada, estimada manualmente.

La divergencia en la amplitud de la curva elástica, puede venir dada al hecho de que el número de puntos de integración que contiene el modelo en ABAQUS es mucho más grande relativo al modelo UGL (Motley, 2004).

4.3.2. Análisis dinámico.-

Esta verificación busca asegurar que la respuesta dinámica (comportamiento) de un pórtico rígido simple sea consistente con una solución analítica. El modelo a analizar en ABAQUS queda definido por un gran número de elementos y grados de libertad asociados, que hace incapaz de efectuar un análisis teórico paralelo. Sin embargo, la respuesta dinámica de muchas estructuras prácticas puede ser expresada en términos de una sola Coordenada Dinámica (un Grado de Libertad, UGL). Si las propiedades físicas del sistema son tales que hacen posible más de un modo de desplazamiento y es reducido matemáticamente a una aproximación de un sistema de un Grado de Libertad donde se supone su forma deformada, la solución de la ecuación de movimiento es solo una aproximación al verdadero comportamiento dinámico. Partiendo de este hecho, un análisis de un sistema con un grado de libertad (UGL) bajo solamente desplazamiento lateral se efectuará para comparar con el análisis de ABAQUS. Como respuesta se evaluará la historia-tiempo del desplazamiento lateral del sistema. La relación entre la fuerza externa a aplicar lateralmente y la deformación resultante será lineal, asimismo, las curvas de carga y descarga se consideran idénticas, por lo que el sistema se considera de comportamiento elástico lineal.

Como se trata de un sistema de un grado de libertad a ser excitado por una fuerza del tipo general, el desplazamiento total como respuesta a esa fuerza puede obtenerse mediante una integral que puede ser calculada analíticamente. Esta integral se conoce como Integral de Duhamel, y proporciona la solución, precisamente, para la vibración forzada no amortiguada de un sistema de un grado de libertad lineal excitada por una fuerza arbitraria con condiciones iniciales nulas. Esta integral puede expresarse como:

$$y(t) = \{ A(t) \text{sen } \omega t - B(t) \text{cos } \omega t \} / m\omega \quad \text{Ec. 4.3}$$

en donde,

$$A(t) = \int_0^t F(\tau) \cos \omega \tau \, d\tau \quad \text{Ec. 4.4a}$$

$$B(t) = \int_0^t F(\tau) \sen \omega \tau \, d\tau \quad \text{Ec. 4.4b}$$

El cálculo de la integral de Duhamel, por tanto, requiere el cálculo numérico de las integrales $A(t)$ y $B(t)$.

Un método alternativo para el cálculo de la integral de Duhamel se basa en obtener la solución analítica exacta de esta integral para la función de la excitación suponiendo que está representada por segmentos lineales consecutivos (Paz, 1992). Suponiendo que la función excitadora puede reemplazarse por segmentos rectos y usando métodos de integración numérica, como la regla trapezoidal y la regla de Simpson, se obtienen las fórmulas de recurrencia para el cálculo de las integrales $A(t)$ y $B(t)$ en el instante $t = t_i$.

$$A(t_i) = A(t_{i-1}) + \left(F(t_{i-1}) - t_{i-1} \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \right) (\sen \omega t_i - \sen \omega t_{i-1}) + \frac{\Delta F_i}{\omega^2 \Delta t_i} \left\{ \cos \omega t_i - \cos \omega t_{i-1} + \omega (t_i \sen \omega t_i - t_{i-1} \sen \omega t_{i-1}) \right\} \quad \text{Ec. 4.5a}$$

$$B(t_i) = B(t_{i-1}) + \left(F(t_{i-1}) - t_{i-1} \frac{\Delta F_i}{\Delta t_i} \right) (\cos \omega t_{i-1} - \cos \omega t_i) / \omega + \frac{\Delta F_i}{\omega^2 \Delta t_i} \left\{ \sen \omega t_i - \sen \omega t_{i-1} - \omega (t_i \cos \omega t_i - t_{i-1} \cos \omega t_{i-1}) \right\} \quad \text{Ec. 4.5b}$$

en donde ω es la frecuencia natural del sistema y $F(t)$ es la fuerza excitadora aproximada por una función de segmentos lineales.

Cabe señalar que esta solución es dada para un sistema no amortiguado, y aunque la hipótesis de amortiguamiento nulo no es realista (se observa que la respuesta no se atenúa nunca, cosa no aplicable en la realidad), esto responde exclusivamente a modelos teóricos.

Un pórtico rígido simple (es decir, estructura resistente a cargas, formada por dos columnas y una viga, vinculadas por la parte superior sin posibilidad de movimiento de un miembro con respecto al otro) es modelado en elementos finitos para asegurar principalmente que solución dinámica es consistente con los resultados analíticos.

El modelo del pórtico con las dimensiones y propiedades de las secciones y la historia-tiempo de la excitación se presentan a continuación.

En la Fig. 4.15 se presenta la geometría del pórtico rígido a analizar. La estructura tiene una luz de 252 in (21 ft ó 6,40 m) y una altura de columnas de 172,885 in (14,41 ft ó 4,39 m). La viga está conectada a las columnas a 156 in (13 ft ó 3,96 m) de altura. La condición de apoyo en la base de las columnas se considera empotrada (es decir, vínculo o condición idealizado que impide la rotación y el desplazamiento en cualquier dirección).

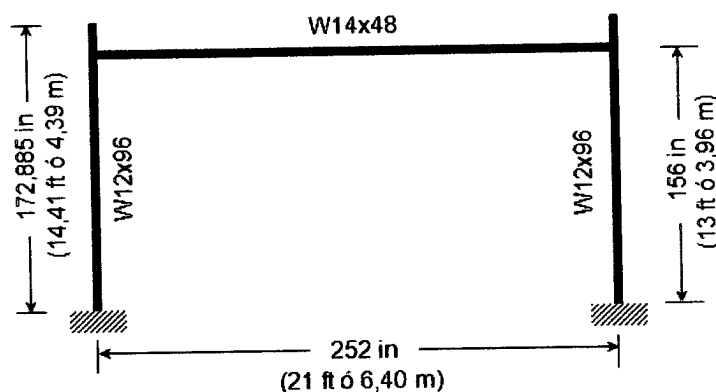


Fig. 4.15. Modelo del pórtico rígido simple.

Las columnas y la viga del pórtico son perfiles estructurales de secciones I de Ala Ancha (es decir, Wide Flange Type I-Beam). Las columnas son W12x96 y la viga W14x48 (Tabla 4-11). Cabe indicar, que estas secciones son resultado de un diseño resistente a explosiones efectuado a la estructura según el Manual técnico del ejército de los EEUU, U.S. Army Technical Manual, TM 5-1300 (1990) -Ver Anexo B-.

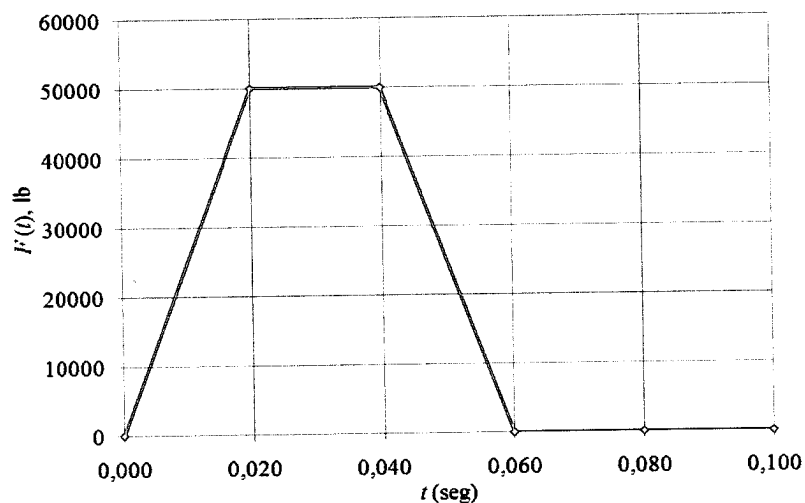
Columnas: W12x96									
d (in)	b _f (in)	t _w (in)	t _f (in)	A (in ²)	W (lb/ft)	I _x (in ⁴)	I _y (in ⁴)	S _x (in ³)	S _y (in ³)
12,71	12,160	0,550	0,900	28,2	96	833	270	131	44,4
Viga: W14x48									
d (in)	b _f (in)	t _w (in)	t _f (in)	A (in ²)	W (lb/ft)	I _x (in ⁴)	I _y (in ⁴)	S _x (in ³)	S _y (in ³)
13,79	8,030	0,340	0,595	14,1	48	485	51,4	70,3	12,8

Tabla 4-11. Dimensiones y propiedades de los perfiles utilizados.

El material de estos perfiles corresponde a un acero A36. Este acero tiene un módulo de elasticidad de $2,9E+7 \text{ lb/in}^2$ y un coeficiente de Poisson de 0,30. De esta forma, para este análisis se supone un modelo de comportamiento elástico lineal.

La gráfica de la función de excitación es tomada de Paz (1992) -de uno de los ejemplos ilustrativos (4.1) de respuesta a excitaciones dinámicas generales, pág. 78-,

donde el valor de la fuerza en el intervalo de 0,020 y 0,040 seg será de 50000 lb (Fig. 4.16).



t (seg)	0,000	0,020	0,040	0,060	0,080	0,100
$F(t)$, lb	0	50000	50000	0	0	0

Fig. 4.16. Función de excitación representadas por segmentos lineales.

Además, se supone que hay una conexión rígida entre la viga y las columnas, es decir, la unión de la viga con las columnas tiene suficiente rigidez para mantener virtualmente inalterado el ángulo original de los miembros que se interceptan. El tipo de conexión considerado es el que se muestra en la Fig. 4.17. Se trata de una conexión rígida soldada con rigidizadores en pares, en los dos lados del alma (la unión los rigidizadores con el alma de las columnas también se considera soldada). Estos rigidizadores se suponen que ocuparán el peralte completo del alma y tendrán el ancho y espesor del ala de la viga. Cabe indicar que estas dimensiones de los rigidizadores no obedecen a un diseño.

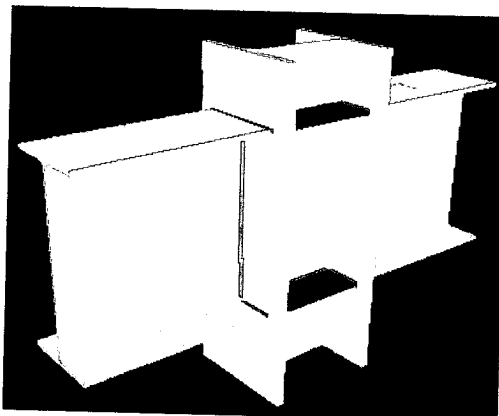


Fig. 4.17. Tipo de conexión considerada (Conexión rígida. Tomado de www.steel-connections.com/lmc_types.htm. Limcon V3, 2009).

Debido a la naturaleza de la carga, el análisis se efectúa usando el módulo ABAQUS/Explicit. Este módulo ejecuta un análisis dinámico explícito y es recomendado para problemas dinámicos cuyas cargas son de alta intensidad y corta duración. La no linealidad geométrica es tomada en cuenta.

Para este análisis, elementos continuos C3D8R (de acuerdo al lenguaje de ABAQUS) son utilizados. Este es un elemento sólido lineal de 8 nodos con integración reducida. ABAQUS recomienda usar este tipo de elementos para análisis no lineales complejos que involucren plasticidad y grandes deformaciones, características cruciales para análisis de estructuras sujetas a cargas explosivas.

Al igual que en el análisis estático, la malla creada se basa en la empleada en Motley (2004). A pesar de que en su trabajo Motley determina que ese es un mallado adecuado, se realiza un análisis de valores propios a fin de verificarlo. La explicación respecto a la utilización de este tipo de análisis para definir discretizaciones y seleccionar tipos de elementos ya es presentada previamente en los modelos de referencia.

Para este análisis son de interés solo los primeros cuatro (4) modos de vibración. Al comparar los resultados obtenidos con los que genera el programa estructural

SAP2000 (Tabla 4-12), se demuestran que la malla se puede considerar adecuada. El periodo de vibración del pórtico para desplazamientos laterales se ubica en 0,0549 seg. En la Fig. 4.18 se presenta la discretización definida para el modelo.

Tabla 4-12. Frecuencias (en ciclos/seg ó Hz) obtenidas del análisis de valores propios para la discretización planteada y de la solución en SAP2000.		
Modo	ABAQUS	SAP2000
1 ^{er}	6,77	6,67
2 ^{do}	9,81	9,79
3 ^{ro}	15,00	14,85
4 ^{to}	18,21	18,57

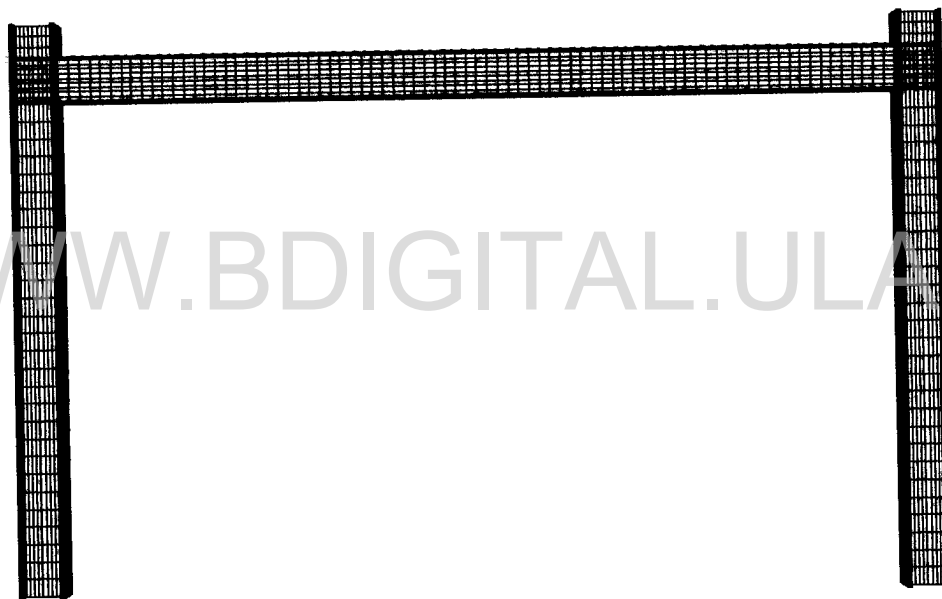


Fig. 4.18. Discretización del modelo. Elementos C3D8R.

La malla obtenida consta de 8136 elementos distribuidos de la siguiente forma: 1980 elementos en cada columna, 3600 en la viga y 72 en cada rigidizador. En la sección de los perfiles (tanto en la viga como en las columnas), las alas son discretizadas con nueve (9) divisiones a lo ancho y dos (2) a lo alto; mientras que el alma consta de una (1) división a lo ancho y nueve (9) en la altura (Fig. 4.19). En la dirección

longitudinal de los miembros, la viga presenta uniformemente 80 divisiones y las columnas 28 particiones uniformes hasta la cara inferior de la viga. A partir de esta cara la discretización se ajusta a la partición de la sección de la viga y concluye con tres divisiones.

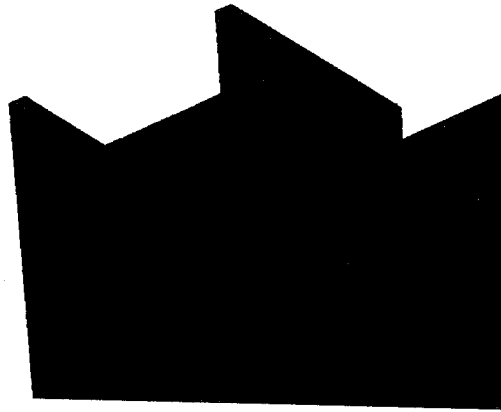


Fig. 4.19. Detalle de la discretización en las alas y el alma de los perfiles.

El pórtico pesa 3504 lb, por lo que tiene una masa, m , de 9,07 lb-seg²/in. Este peso se determinó en base a las propiedades del material de la estructura.

La rigidez lateral del pórtico puede fácilmente ser determinada usando una ecuación dada por Chopra (2001) que está basada una relación de rigidez entre vigas y columnas. Si las deformaciones por corte son despreciables, esta ecuación vendrá escrita de la siguiente forma:

$$k = \frac{12EI_c}{h_c^3} \frac{12\rho + 1}{12\rho + 4} \quad \text{Ec. 4.6}$$

donde

$$\rho = \frac{\sum_{\text{vigas}} EI_v / L}{\sum_{\text{columnas}} EI_c / h}$$

I_v = momento de inercia de la columna (in^4)

I_c = momento de inercia de la viga (in^4)

h = altura de la columna (in)

L = longitud de la viga (in)

De esta forma, la rigidez del pórtico, k , es de 97683,33 lb/in.

Para este sistema la frecuencia se obtiene de:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Resultando esta con un valor de 103,79 rad/seg.

El cálculo numérico de la integral de Duhamel se hace considerando el sistema no amortiguado. Con respecto al amortiguamiento cabe indicar, que el mismo tiene mucha menos importancia en la respuesta máxima de una estructura a cargas impulsivas que para otras cargas (p. ej. Periódicas o armónicas) ya que la máxima respuesta a una sollicitación impulsiva particular será alcanzado en un muy corto tiempo, antes que las fuerzas de amortiguamiento puedan absorber suficiente energía de la estructura (Clough & Penzien, 1993). Por esta razón, en problemas donde intervienen este tipo de cargas se ignora el amortiguamiento.

Los resultados obtenidos por medio del programa ABAQUS y los resultados obtenidos analíticamente y con SAP2000 se muestran en la Fig. 4.20.

Estos resultados muestran un aceptable ajuste, con leves divergencias, a los resultados de la ecuación analítica y de SAP2000. Sin embargo, ya que hay una importante diferencia en el número de grados de libertad, algunas variaciones son esperadas entre los resultados (Motley, 2004).

De acuerdo a Motley (2004), la determinación de la masa y la rigidez varían entre un modelo con un grado de libertad (UGL) y un modelo con muchos grados de libertad,

cambiando con ello la frecuencia natural del sistema. Modificaciones en la masa y la rigidez tienen un notable efecto en el comportamiento teórico del sistema y es evidente que un ligero cambio en estos valores puede compensar la variación en el comportamiento calculado para el sistema UGL. Al igual que en el caso del análisis estático, la diferencia en la amplitud, puede ser atribuida al mayor número de puntos de integración presentes en el modelo en ABAQUS.

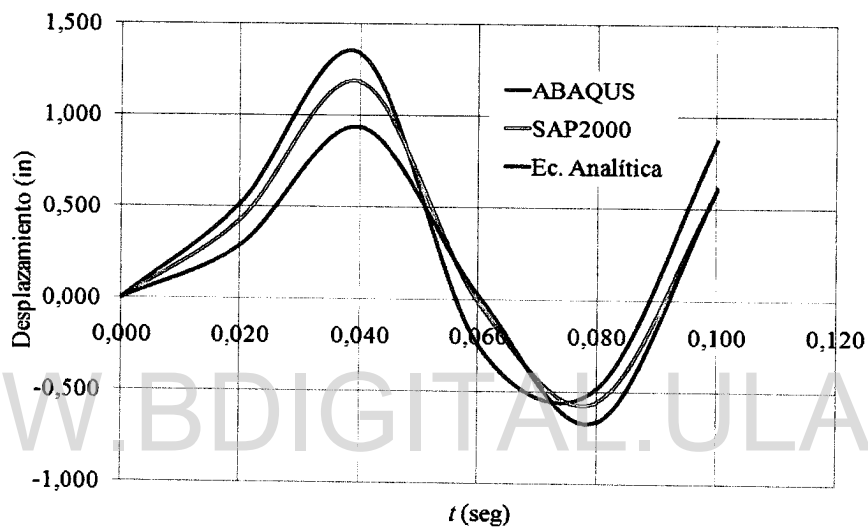


Fig. 4.20. Respuesta dinámica del pórtico rígido simple excitado por una fuerza del tipo general. Comparación de resultados.

Estos resultados indican igualmente que hay una buena caracterización de la variación de la carga con el tiempo y del MPC (Multi Point Constraint) tipo TIE (es decir, hace los desplazamientos y rotaciones globales y así como el resto de los grados de libertad activos iguales en dos nodos; siendo utilizados generalmente para unir dos partes cuando los nodos correspondientes deban ser conectados completamente) para juntar la viga y las columnas, destacando el adecuado comportamiento de este tipo de interacción para modelar la conexión viga-columna.

4.4. Descripción de la estructura.-

Se trata de un sistema estructural de pórticos rígidos, típico de un edificio (en términos de dimensiones, masa y rigidez) de una instalación petroquímica (ASCE, 1997). Estos edificios utilizan, principalmente, miembros (vigas y columnas) de acero estructural con láminas corrugadas del mismo material como muros (Summers, 2008).

Como es sabido, en la industria de la petroquímica se manejan ciertos materiales ó productos que pueden y han producido explosiones accidentales. Aunque tales eventos pueden ser relativamente ocasionales, cuando ellos ocurren las consecuencias pueden ser extremadamente graves involucrando lesiones personales, pérdidas financieras y potencialmente impactando en la seguridad pública. Uno de los edificios que requieren la necesidad de considerar la resistencia a explosiones, según la agencia federal OSHA (Occupational Safety and Health Administration) – citada por ASCE (1997)–, son las salas de control de procesos. En la Fig. 4.21 se aprecia un edificio común para sala de control de una planta petroquímica.

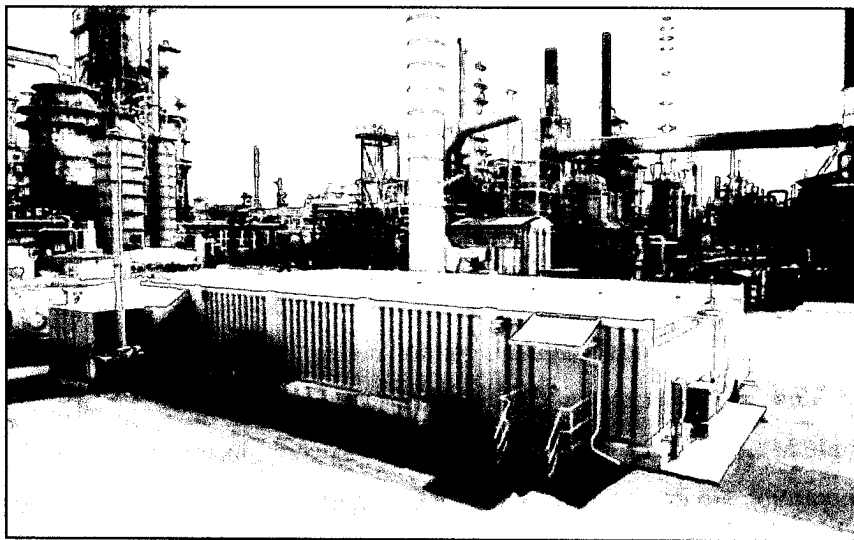


Fig. 4.21. Edificio modular aporticado de acero estructural (de un nivel) resistente a explosiones típico de instalaciones petroquímicas (tomado de Summers, 2008).

La escogencia de este tipo de edificio para este estudio obedece a que presenta un sistema de pórticos rígidos sencillo, formado en ambas direcciones (ortogonales), de múltiples luces o vanos, relativamente bajos (de uno a dos niveles máximo) y regular, ajustándose a las características que plantea el TM 5-1300 (1990) para pórticos de acero resistente a explosiones.

La estructura a analizar consiste de una serie de pórticos rígidos de un (1) vano y un nivel. Específicamente, tres (3) pórticos en la dirección “x” separados cada 252 in (21 ft ó 6,40 m) y conectados por vigas según se indica en la Fig. 4.22. Los pórticos tienen la geometría del utilizado en el modelo de verificación del análisis dinámico (Fig. 4.15). Estas dimensiones son características de este tipo de estructuras (Summers, 2008; TM 5-1300, 1990). Las columnas del pórtico han sido orientadas de manera de disponer una mayor rigidez en la dirección “x” ya que se ha tomado la expansión de la explosión en esa dirección. La condición de apoyo en la base de las columnas se considera empotrada de acuerdo a lo especificado en el ASCE (1997) para edificios aporticados de acero.

Como se menciona anteriormente, el dimensionamiento de este pórtico obedece a un diseño “preliminar” según las pautas del Manual TM 5-1300 (1990) para estructuras aporticadas de acero. Igualmente, las vigas secundarias que conectan transversalmente con los pórticos son el resultado de un diseño de acuerdo al mismo manual. Los perfiles resultantes de estos diseños son los que se muestran en las Fig. 4.15 y 4.22. Las dimensiones y propiedades de los perfiles del pórtico y de las vigas secundarias se detallan en la Tabla 4-11 y 4-13. En el Anexo C se presenta el cálculo del diseño de dichos perfiles. En Schmidt (2003) y Longinow & Alfawakhiri (2003) se presentan dos artículos referentes al diseño estructural para ataque terroristas con bombas y al diseño resistente a explosiones con acero estructural. Específicamente, el primero se da una explicación general de los principales aspectos relacionados a la determinación de la respuesta de elementos estructurales y el segundo, a través de preguntas y respuestas fundamentales, se presenta una idea global acerca del diseño resistente a explosiones para elementos de acero estructural.

Al considerarse un sistema de pórticos rígidos, las conexiones entre vigas y columnas se suponen son suficientemente rígidas para mantener sin cambios los ángulos entre elementos que se interceptan. En la verificación del análisis dinámico anteriormente descrito se observa que, en base a los resultados, la conexión rígida utilizada trabaja adecuadamente. De igual forma, los rigidizadores se suponen que ocuparán el peralte completo del alma (Fig. 4.22b) y tendrán el ancho y espesor del ala de la viga, sin esto obedecer a un diseño. Por ahora lo que se busca es que la conexión cuente con una resistencia completa a momento, es decir, la rotación se encuentra totalmente restringida.

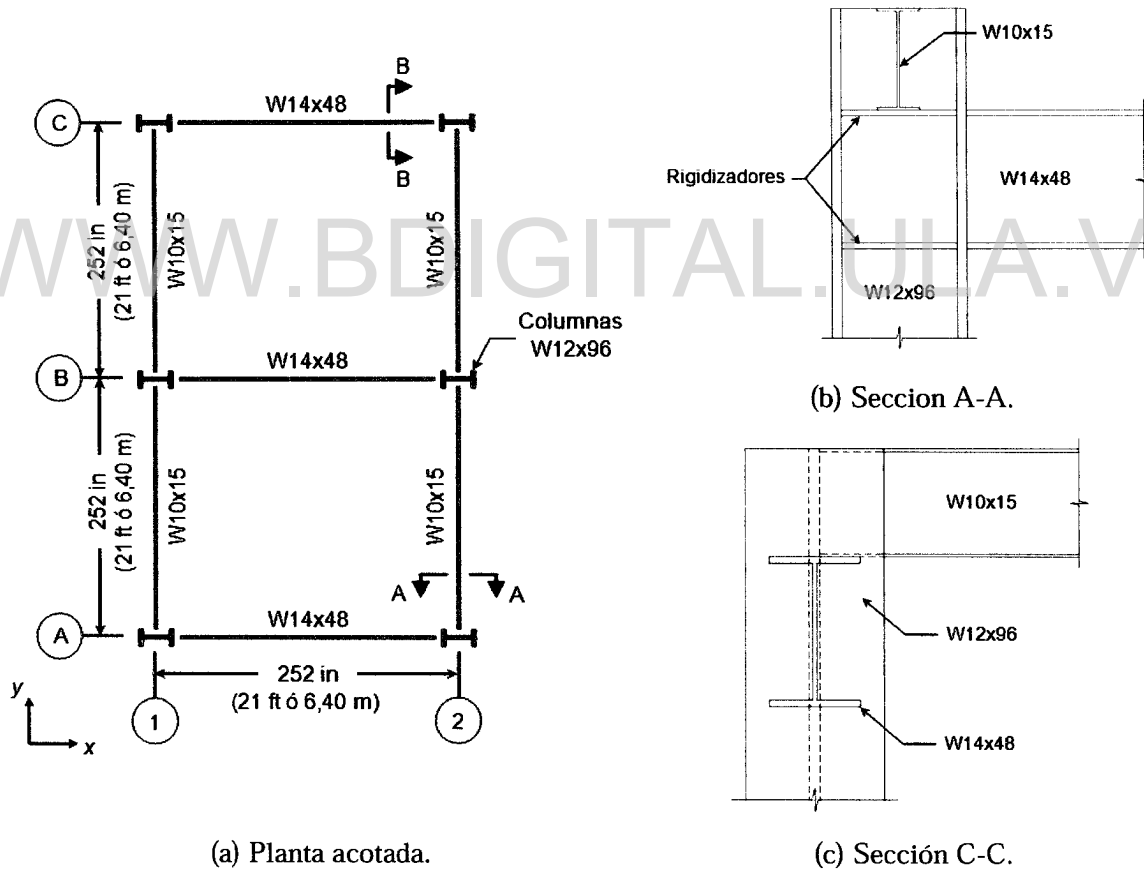


Fig. 4.22. Planta acotada del sistema estructural y detalles de las conexiones en las columnas 2A y 2C.

Vigas secundarias: W10x15									
d (in)	b _f (in)	t _w (in)	t _f (in)	A (in ²)	W (lb/ft)	I _x (in ⁴)	I _y (in ⁴)	S _x (in ³)	S _y (in ³)
9,99	4,000	0,230	0,270	4,41	15	68,9	2,89	13,8	1,45

Tabla 4-13. Dimensiones y propiedades del perfil para las vigas secundarias.

4.5. Análisis modal.-

Para este modelo de elementos finitos se obtuvieron las frecuencias naturales calculadas directamente por el software. Este análisis busca determinar los periodos de vibración de la estructura, necesarios para definir el régimen en que trabaja ante una carga explosiva.

En la Tabla 4-14 se presentan las frecuencias naturales (Hz) y los periodos correspondientes a los doce (12) primeros modos de vibración del sistema aporticado planteado.

Las formas modales y las frecuencias de los doce (12) primeros modos de vibración son encontradas (con ABAQUS/Standard) dentro de un intervalo de frecuencia de 6 Hz a 18 Hz. La primera frecuencia relacionada al movimiento de flexión en la dirección “x” del pórtico rígido simple tiene valor de 17,982 Hz, que corresponde a un periodo de vibración de 0,0556 seg. En la dirección “y”, la primera frecuencia asociada al movimiento de flexión es de 6,6420 Hz (es decir, un periodo de 0,1506 seg). Las otras frecuencias pertenecen movimientos torsionales y de flexión locales. Estos resultados son verificados con el programa de análisis estructural SAP2000 (Ver Tabla 4-14).

Tabla 4-14. Frecuencias y periodos obtenidos del análisis de valores propios (con ABAQUS/Standard y SAP2000) de la estructura aporticada en estudio.

Modo	Frecuencia (ciclos/seg ó Hz)		Período (seg)	
	ABAQUS	SAP2000	ABAQUS	SAP2000
1 ^{er}	6,6420	6,5481	0,1506	0,1527
2 ^{do}	6,8006	6,9969	0,1470	0,1429
3 ^{ro}	7,4348	7,7440	0,1345	0,1291
4 ^{to}	7,8525	7,7622	0,1273	0,1288
5 ^{to}	8,1051	8,9208	0,1234	0,1121
6 ^{to}	8,7633	10,378	0,1141	0,0964
7 ^{mo}	10,738	10,715	0,0931	0,0933
8 ^{vo}	11,324	11,994	0,0883	0,0833
9 ^{no}	13,785	12,472	0,0725	0,0801
10 ^{mo}	16,618	12,975	0,0602	0,0771
11 ^{ro}	17,381	15,675	0,0575	0,0638
12 ^{do}	17,982	18,003	0,0556	0,0555

4.6. Modelado de la estructura.-

4.6.1. Consideraciones generales.-

La carga por el peso propio y otras cargas muertas o permanentes no son consideradas durante este análisis. Este tipo de cargas son a menudo ignoradas en el diseño resistente a explosiones (DOE/TIC-11268, 1980), y por consiguiente en el análisis. De acuerdo al manual DOE/TIC-11268 (1980), hay tres razones para despreciar este efecto:

1. Las cargas muertas son normalmente pequeñas con comparación con las cargas producidas por una explosión.
2. Estas cargas están casi siempre asociadas con la masa que está ubicada en o sobre la estructura. Esta masa adicional puede beneficiar a la estructura para cargas dinámicas si es bien sujetadas a ella.
3. Si la masa no está bien sujetada, pero es libre moverse, su verdadero efecto es muy difícil de evaluar.

Cabe indicar que hay circunstancias específicas expuestas en el manual DOE/TIC-11268 (1980) donde se considera que el efecto de estas cargas debe ser incluido. No obstante, ninguna de ellas se presenta en este estudio.

La estructura es modelada considerando los efectos dinámicos provenientes de la velocidad de deformación que es producida por la onda explosiva. Estos efectos de la velocidad de deformación en el material deben ser incluidos en métodos y análisis numéricos si puede ser hacerse adecuadamente (DOE/TIC-11268, 1980), lo cual es posible con el programa ABAQUS.

Según el DOE/TIC-11268 (1980), el amortiguamiento del material es pequeño y puede ser descartado en problemas de respuesta relacionado con explosiones. Solo los pocos primeros ciclos de la respuesta son de interés y el efecto del amortiguamiento del material será insignificante. En este sentido, este amortiguamiento no es considerado. Solo el amortiguamiento numérico (por defecto) que maneja el programa es tomado en cuenta. En ABAQUS/Explicit éste viene dado en la forma de viscosidad global lineal y cuadrática. Estos parámetros introducen una amortiguación asociada con la deformación volumétrica, que buscan mejorar el modelado de eventos dinámicos de alta velocidad como impactos o explosiones, amortiguando la frecuencia más alta de los elementos y previniendo el colapso de un elemento bajo cambios abruptos en la velocidad.

El efecto de aberturas, puertas o ventanas no son tomadas en cuenta. Por el momento es de interés solo el comportamiento global de sistema estructural ante cargas explosivas. Efectos de arrastre y del tiempo de llegada de la onda explosiva de no son considerados en este estudio.

Aunque el manual TM 5-1300 (1990) sugiere que para este tipo de análisis los efectos de segundo orden (P-Delta) sean considerados, dado el carácter preliminar de este estudio, éstos no son tomados en cuenta.

El ángulo de incidencia de la onda explosiva se supone de 0° . Cuando las ondas explosivas encuentran una superficie de longitud infinita sobre la cual chocan con ángulo de incidencia nulo, éstas son normalmente reflejadas. Todo el flujo detrás de la onda se detiene y las presiones son considerablemente mayores que las incidentes. Para ángulos de incidencia entre 0° y 90° , aparece tanto reflexión regular como reflexión Mach según del ángulo de incidencia y la fuerza de choque –Baker et al. (1983), Smith & Hetherington (1994), citados por Aráoz & Luccioni (2007)–.

La fase negativa es no es tomada en cuenta debido a que las presiones máximas en la fase negativa son mucho más pequeñas (Horoschun, 2005) en comparación con las presiones máximas de la fase positiva.

Para facilitar el manejo de las guías y manuales de diseño y de tablas de perfiles se opta trabajar con el sistema de unidades inglesa.

4.6.2. Geometría.-

La geometría del modelo planteado para el análisis se muestra en la Fig. 4.23.

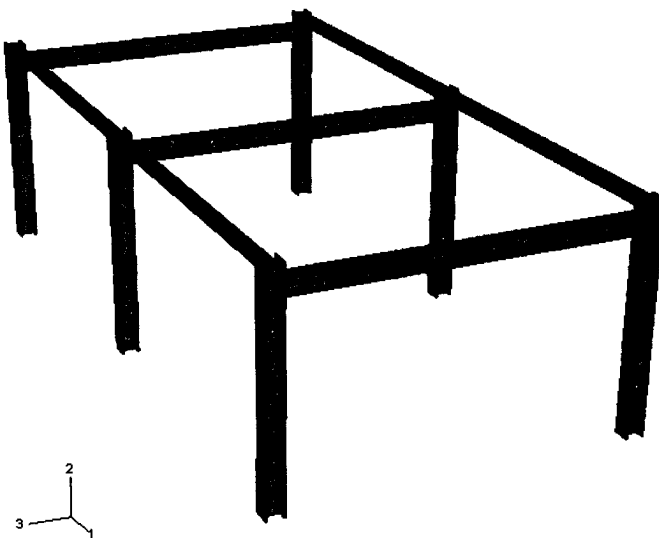


Fig. 4.23. Vista general del modelo. Isométrica.

4.6.3. Materiales.-

El material utilizado para la estructura es el acero A36. Para la modelación de este acero en el rango no lineal se adopta un modelo elastoplástico perfecto y criterio de fluencia de Von Mises. Las propiedades elásticas e inelásticas para este material se pueden observar en las Tablas 4-7 y 4-8. La sensibilidad a la velocidad de deformación del esfuerzo de fluencia es incluida en el modelo del material. Para ésto, el modelo de Cowper-Symond (1957) –Ver Ec. C.4. Apéndice C– es usado. A continuación, se resumen los parámetros usados para modelar este material.

Densidad, $\rho = 0,000734 \text{ lb-seg}^2/\text{in/in}^3$

Módulo de elasticidad, $E = 2,90\text{E}+7 \text{ psi}$

Coefficiente de Poisson, $\nu = 0,30$

Esfuerzo de fluencia, $f_y = 36000 \text{ psi}$.

Cowper-Symond: $D = 40,4 \text{ 1/s}$ y $p = 5$.

Ya que los datos de plasticidad en ABAQUS, se definen en esfuerzos reales (“true stress”) y deformaciones reales (“true strain”), la curva elastoplástica perfecta es transformada a esos valores.

4.6.4. Interacciones y condiciones de contorno.-

De la misma manera que en el modelo de verificación del análisis dinámico, para las interacciones entre los diversos miembros de la estructura y los rigidizadores, se usa la opción “TIE” del programa. Igualmente, se considera que la estructura esta empotrada en la base.

4.6.5. Carga.-

La carga aplicada para el análisis es la carga de diseño frontal. Esto porque se busca realizar una revisión del diseño verificando los valores permisibles de deflexión lateral establecidos en el manual TM 5-1300 (1990).

Esta carga es determinada acuerdo a las pautas de los manuales TM 5-1300 (1990) y TM 5-855-1 (1986), y la guía de ASCE (1997) –Ver Anexo A–. El evento planteado para generar esta carga se define siguiendo el procedimiento aplicado para el modelo de referencia utilizado previamente para evaluar el comportamiento estructural dinámico. Básicamente, se propone una cantidad de explosivo y se varía la distancia a la cual se detona, de manera que los valores de estos parámetros se ajusten al tipo de sollicitación que según el TM 5-1300 (1990) es aplicable a este tipo de estructuras. En este sentido, el escenario es el de una carga esférica de TNT de 1814 kg –como se ha indicado previamente corresponde a la cantidad usada en el atentado del Alfred Murrah en Oklahoma, según Longinow & Mniszewski (1996) citado por Ngo et al. (2007) –, detonada a una distancia aproximada de 87 m de la estructura.

La curva de variación de la presión en el tiempo es definida usando una forma de onda triangular (Fig. 4.3) con una presión reflejada máxima de 5,7 psi y una duración de la fase positiva de 0,0401 seg. A partir de lo demostrado arriba en el estudio de aplicabilidad de cargas uniformemente distribuida, se supone que la presión actúa de esta forma. La aplicación de la presión reflejada obedece a que para propósitos de diseño es la utilizada (Ngo et al. 2007).

4.6.6. Tipo de análisis.-

Se realiza un análisis dinámico de desplazamiento/esfuerzo con no linealidad del material y geométrica. Este análisis se efectúa en dos pasos. En el primero se aplican las condiciones de contorno, como se recomienda en el manual del programa. En el segundo se aplica la carga de diseño, tomando como algoritmo de convergencia el método de integración directa explícito (basado en una regla de integración de diferencias finitas centrales) en el tiempo de las ecuaciones del movimiento, el cual es especialmente apropiado para acciones impulsivas y respuestas fuertemente discontinuas. El incremento de la carga se produce de forma automática y se va ajustando a lo largo del análisis. Para este análisis, la duración de la fase positiva es tomada como el periodo de tiempo (“time period” según la nomenclatura de

ABAQUS) del análisis, es decir, el periodo corresponde con a la duración real del evento.

El método de diferencias centrales es condicionalmente estable; el límite de estabilidad del operador de diferencias centrales depende de la frecuencia más alta del sistema. El programa hace una estimación elemento por elemento del incremento de tiempo para el cual la solución resulta estable.

En un análisis dinámico explícito como el que se indica, los valores de desplazamiento y velocidad son calculados en términos de cantidades que son conocidas al comienzo de cada incremento, además la matriz de masa y de rigidez no son invertidas, lo que trae como consecuencia que cada incremento es relativamente más barato que los incrementos de un análisis implícito.

4.6.7. Selección de elementos y mallado.-

El mallado de la estructura se basa en los modelos de verificación del análisis estático y dinámico. La discretización de los pórticos en "x" es la misma de ese modelo, ya que se trata de los mismos pórticos. Los perfiles en la dirección "y" que conectan a los pórticos presentan el mismo tipo de malla del análisis estático, en cuanto a las particiones. A través del análisis modal antes presentado se logra verificar este mallado.

La estructura se ha modelado con elementos sólidos de 8 nodos (C3D8R, de acuerdo al nomenclatura de ABAQUS) dado la recomendación citada antes en cuanto a la conveniencia de usar este tipo de elementos para análisis no lineales complejos que involucren plasticidad y grandes deformaciones. Las Fig. 4.24 y 4.25 muestran el mallado del modelo.

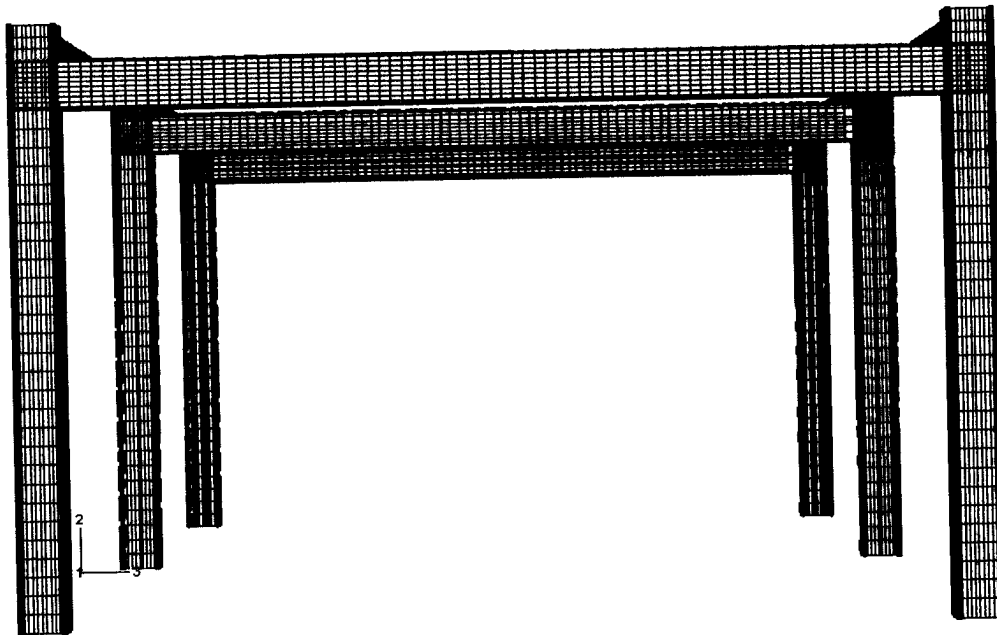


Fig. 4.24. Mallado del modelo. Vista en la dirección "y".

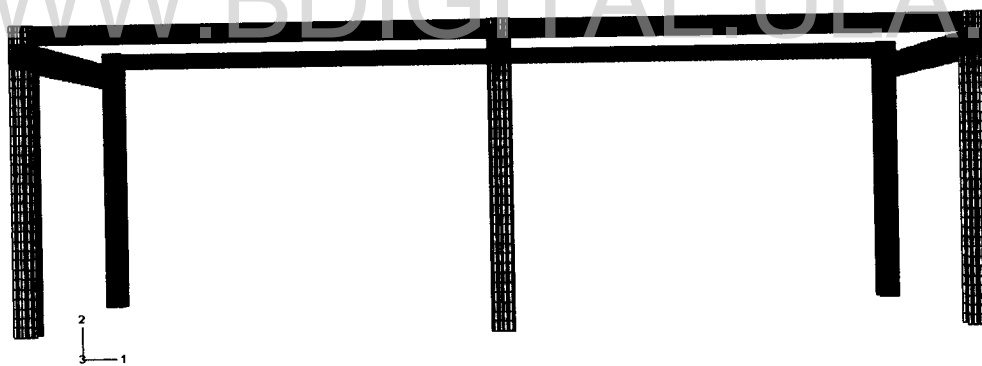


Fig. 4.25. Mallado del modelo. Vista en la dirección "x".

Cabe indicar que el modelo cuenta con un total de 46008 elementos. El número de elementos por cada parte del modelo y sus relaciones de aspecto (promedio y la peor) se muestran en la Tabla 4-15.

Tabla 4-15. Número de elementos y relaciones de aspecto en cada parte del modelo.					
Parte	Nº de Partes	Nº de Elementos	Nº total de Elementos	Relación de Aspecto	
				Prom.	Peor
Columna	6	1980	11880	8,78	11,83
Viga	3	3600	10800	9,80	10,05
Viga (amarre)	6	3600	21600	21,36	23,28
Rigidizador	24	72	1728	4,07	4,07

4.7. Análisis de la estructura.-

Antes de evaluar la respuesta del edificio aporticado propuesto, a través de la simulación numérica, se hace la revisión del diseño “preliminar” del pórtico rígido sugerida en manual TM 5-1300 (1990). En ambos casos, se chequea la estabilidad global de la estructura a través del valor admisible de deflexión o desplazamiento lateral establecido en dicho manual.

Dentro de esa revisión, además se determina la influencia del efecto de la velocidad de deformación en el desplazamiento lateral máximo del pórtico. Para ello, se analiza el pórtico con y sin el efecto de la velocidad de deformación (utilizando el modelo de Cowper-Symond).

Finalmente, se obtienen los patrones de esfuerzos de Von Mises generados en el modelo, así como el valor del máximo esfuerzo presentado y su ubicación. Esto permite evaluar localmente la estructura, determinando potenciales zonas de falla, y en caso de presentarse, establecer posibles propuestas de rediseño.

Para el pórtico rígido y del edificio aporticado, se aplica solo la carga de diseño estática equivalente horizontal, es decir la frontal, ya que por ahora interesa solo el movimiento lateral. Las superficies a impactar en los dos casos se muestran en las Fig. 4.26a y 4.26b. Como puede observarse en la Fig. 4.26b, en el caso del edificio

aporticado, se utiliza una placa sobre acero de gran espesor sobre el lado de la estructura que se plantea, de acuerdo al diseño, actué la carga explosiva.

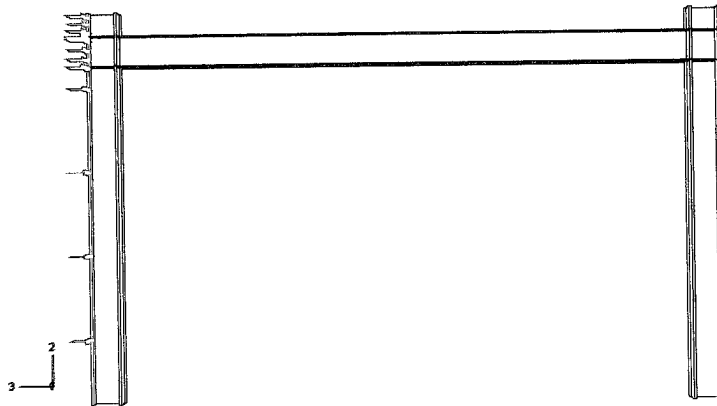


Fig. 4.26a. Aplicación de la carga explosiva sobre el pórtico.

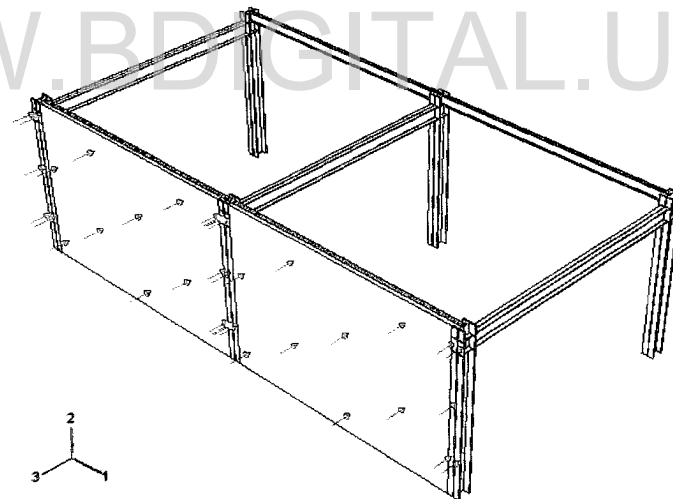


Fig. 4.26b. Aplicación de la carga explosiva sobre el edificio aporticado.

Se puede decir que esa placa representa el muro de protección de ese lado del edificio. Aunque este tipo de muro, en un diseño integral del edificio se debe diseñar, en esta oportunidad lo que busca es que se transfiera la carga de diseño a toda la estructura. La utilización de un espesor grande para la simulación de la placa le da

una rigidez que representa el muro de protección de ese lado del edificio. Esta estructura lateral, para este tipo de edificios la componen de unos perfiles transversales (wall girt) y de unos paneles de acero (wall panel) –típicamente corrugados. (Ver Fig.4.21 y 4.27).

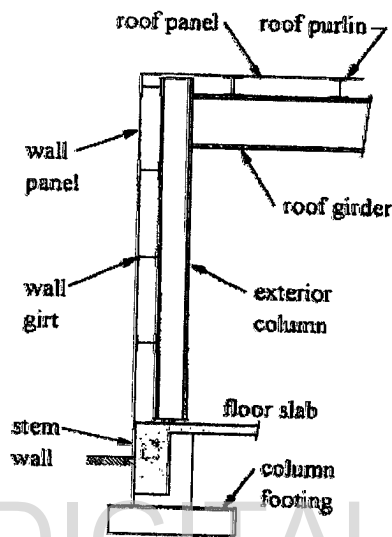


Fig. 4.27. Estructuración de la fachada exterior de un edificio aporticado de acero tipo. Vista de perfil (Tomado del ASCE, 1997).

El pórtico rígido simple y el edificio aporticado tienen un periodo de vibración para el movimiento en la dirección “x” de 0,1477 seg y 0,0556 seg, respectivamente (ambas corresponden a una frecuencia natural de 6,77 Hz y 17,982 Hz, obtenidas con ABAQUS/Standard según Tablas 4-12 y 4-14). De acuerdo con estos periodos y la duración (de la fase positiva) de la carga explosiva considerada, según la clasificación de la Tabla 4-6, se espera que ambas tengan un comportamiento estructural en el régimen dinámico, lo cual es característico en este tipo de estructuras.

Revisando los resultados obtenidos para el pórtico rígido, se encuentra una deflexión lateral máxima de 3,67 in (9,32 cm) en el tope del pórtico. Esto se aproxima al valor de la deflexión lateral máxima estimada según los cálculos del diseño que es de 3,48 in (8,84 cm) –Ver Anexo B–. La diferencia entre ambos resultados es del 5,15%, el

cual es aceptable. Esto indica que la simulación numérica efectuada representa muy bien al diseño en cuanto a la predicción de los valores esperados de deflexión lateral. Este desplazamiento máximo se da aproximadamente a los 0,03208 seg. como se presenta en la Fig. 4.28. Al hablarse de “tope del pórtico” se refiere a nivel de la junta viga-columna. El resultado de la deflexión antes citado se mide precisamente en el centro de la junta viga columna, en concordancia con la suposición del procedimiento de diseño.

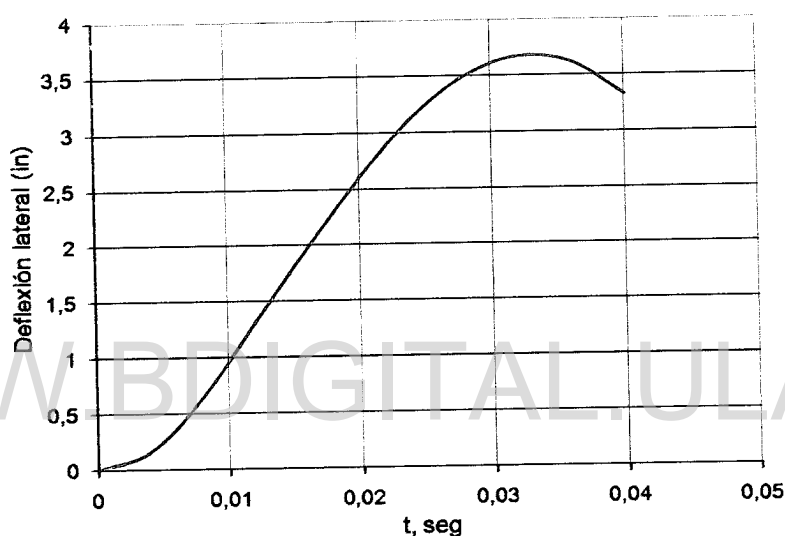


Fig. 4.28. Historia deflexión-tiempo en el tope del pórtico rígido.

Si se compara en términos del valor normativo, la deflexión conseguida a través de la simulación tiene un valor de $H/42,5$. Como se detalla en el Anexo B, el diseño está calculado para que el pórtico tenga una deflexión máxima de $H/45$ y el valor permisible tratado en el TM 5-1300 (1990) es $H/25$, donde H es la altura del pórtico. Es decir, para la altura del pórtico de 156 in (13 ft), el valor máximo admisible de la deflexión lateral es de 6,24 in (15,85 cm), el valor del diseño es de 3,48 in (8,84 cm) y el obtenido de la simulación de 3,67 in (9,32 cm). Por supuesto, ambos valores están por debajo del admisible en aproximadamente un 70% y 80%, respectivamente.

En este caso, esta diferencia entre el valor normativo y el obtenido en el cálculo se debe a que el criterio de diseño de las columnas y elementos viga-columnas, propuesto en el TM 5-1300 (1990), es muy conservador hacia la selección de secciones. El condicionante de las fórmulas de interacción para la flexión biaxial y carga axial combinada no permite optimizar el diseño y por tanto se presentan los elementos sobrediseñados. Es de indicar que para el diseño de los elementos de los pórticos, el manual TM 5-1300 (1990) sugiere que estos se diseñen bajo los criterios de que actúan como elementos viga-columnas.

En la Fig. 4.29 se muestra el contorno del desplazamiento lateral del pórtico para el instante que se consigue el valor máximo en el tope (para $t = 0,03208$ seg).



Fig. 4.29. Contorno de desplazamiento lateral (U3) en el pórtico rígido para $t = 0,03208$ seg.

Es de recordar que los resultados anteriores están afectados por el efecto de la velocidad de deformación. A fin de determinar el nivel de influencia del efecto de la velocidad de deformación en la respuesta, se analiza el pórtico sin considerar la velocidad de deformación y se comparan ambas soluciones.

Los resultados observados en la Fig. 4.30 revelan que existe un efecto de la velocidad de deformación en la respuesta del pórtico.

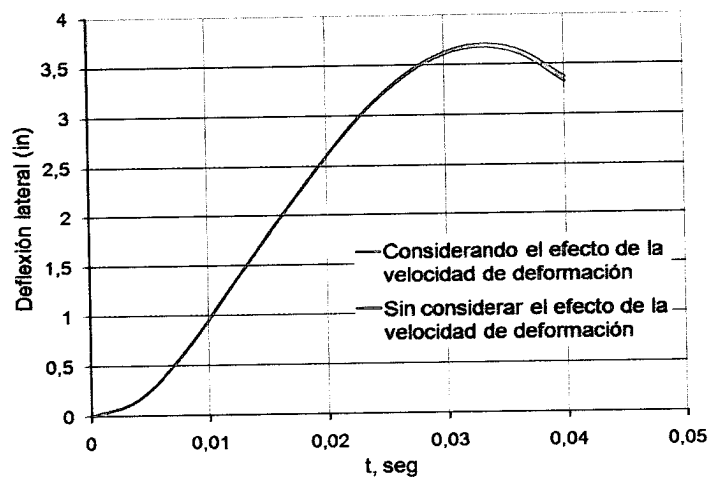


Fig. 4.30. Historias deflexión-tiempo en el tope del pórtico rígido considerando el efecto de la velocidad de deformación y sin considerarlo.

Como se indica en el estudio de influencia de la velocidad de deformación a través de los modelos de referencia, cuando el efecto de la velocidad de deformación es considerado el esfuerzo de fluencia se incrementa con la velocidad, lo que trae como consecuencia que el módulo de elasticidad sea mucho más grande que el módulo plástico y la estructura se haga más rígida, resultando en una disminución en la deflexión máxima, como se ilustra en la Fig. 4.30.

La deflexión lateral máxima conseguida tomando en cuenta la velocidad de deformación es la antes citada de 3,67 in (9,32 cm) mientras que no considerando este efecto la deflexión tiene un valor de 3,69 in (9,37 cm), en otras palabras, el modelo utilizado en el análisis numérico permite disminuir la deflexión en un 0,54%. Esto indica que para este caso estudiado, este efecto no influye significativamente en el desplazamiento máximo resultante. No obstante, como se ha dicho, los resultados son sensibles a los parámetros ó los datos del material, y por tanto es porcentaje es sensible a variaciones.

Otro aspecto considerado es evaluar potenciales zonas de falla que puede presentar el pórtico. Esto forma parte del protocolo que se propone para el análisis de estructuras aporricadas sometidas a explosiones, ya que además de revisar lo concerniente a estabilidad global y local de la estructura, en cuanto a deflexiones y deformaciones (rotaciones), también se debe chequear posibles fallas de los materiales. Von Mises es un criterio de falla de los materiales uniformes y dúctiles (por ejemplo, el acero).

En este sentido, la Fig. 4.31 muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises en el pórtico rígido simple para el instante de tiempo (0,01203 seg) en el que comienza a fluir el material, es decir, alcanza el límite de fluencia. En dicha figura se aprecia que la primera zona crítica se da en base de la columna.

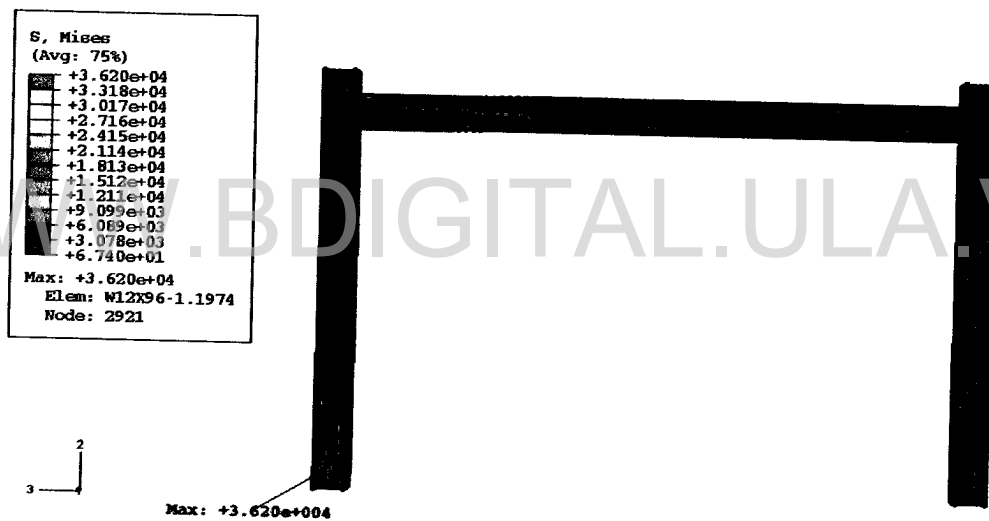
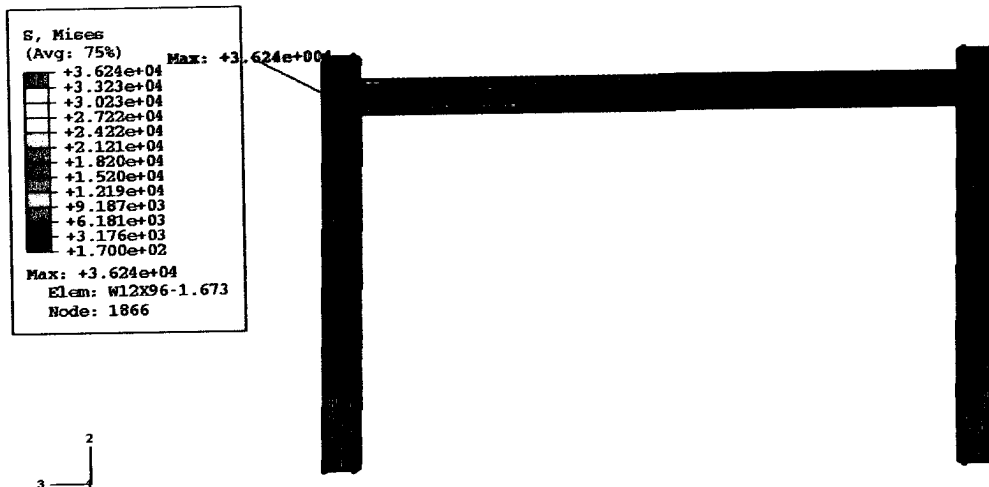


Fig. 4.31. Contorno de esfuerzos de Von Mises del pórtico rígido para el instante de tiempo ($t = 0,01203$ seg) donde el material alcanza la fluencia y la ubicación donde esta ocurre.

En las Fig. 4.32a, 4.32b y 4.32c se muestra los diferentes puntos del pórtico donde ocurre fluencia del material después de $t = 0,01203$ seg.



(a) para $t = 0,02005$ seg

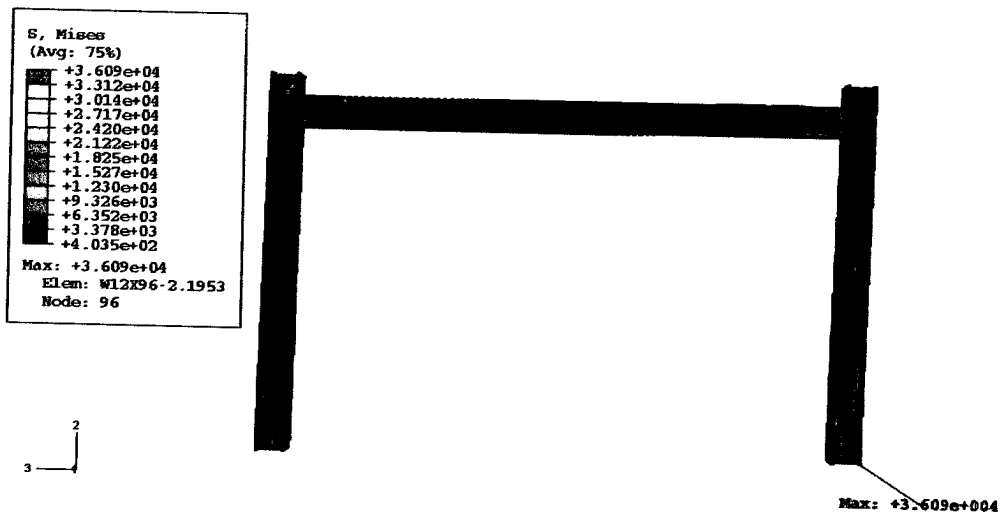


(b) para $t = 0,024061$ seg

Fig. 4.32. Contornos de esfuerzos de Von Mises del pórtico rígido para los instantes de tiempo y las distintas posiciones donde se presenta la fluencia del material luego de $t = 0,01203$ seg.

(...continuación)

(...continuación)



(c) para $t = 0,02005$ seg

Fig. 4.32. Contornos de esfuerzos de Von Mises del pórtico rígido para los instantes de tiempo y las distintas posiciones donde se presenta la fluencia del material luego de $t = 0,01203$ seg.

La evidencia experimental muestra que cuando una estructura está sometida a fuerzas externas que sobrepasan cierto límite, aparecen deformaciones permanentes en el material aun cuando dichas fuerzas dejen de actuar sobre la estructura (Florez, 1999). La secuencia de la Fig. 4.32 de cómo va fluyendo el material en el pórtico durante el evento es coherente con el comportamiento en que se espera vaya plastificando el pórtico. En primera instancia la columna más solicitada es por supuesto la que soporta el impacto, siendo su base la primera zona que cede plásticamente. Al seguir la carga sobre el pórtico se produce una redistribución de los esfuerzos en el proceso de fluencia del material y comienza a darse en algunos puntos que van experimentando deformaciones elastoplásticas. Al seguir la carga sobre el pórtico este alcanza un estado totalmente plástico en el que se forma un número de secciones plenamente plásticas suficiente para transformar el pórtico en un mecanismo plástico.

Por el momento el efectuar un análisis cuantitativo de la zona plastificada no es abordado en este trabajo.

El suponer una plasticidad perfecta después de llegar al esfuerzo de fluencia, equivale a despreciar los efectos del endurecimiento por deformación y por tanto se está del lado de la seguridad.

Un detalle a aclarar es que en las leyendas de las figuras de los contornos de los esfuerzos de Von Mises se observan que los valores máximos resultantes son más grandes que $3,6045E+4$ psi, lo cual no debe ser posible ya que el material se supone elastoplástico perfecto a esta magnitud de esfuerzo. Este resultado engañoso es debido al algoritmo que ABAQUS/CAE usa para crear contornos para variables de elementos, tales como los esfuerzos. El algoritmo requiere los datos en los nodos, sin embargo, ABAQUS calcula las variables de elementos en los puntos de integración. ABAQUS/CAE calcula valores nodales de las variables de elementos extrapolando los datos desde los puntos de integración a los nodos.

La extrapolación depende del tipo de elemento. ABAQUS/CAE usa extrapolación lineal para calcular los valores nodales de las variables de elementos. Para desplegar un contorno de esfuerzos de Von Mises, ABAQUS/CAE extrapola los componentes de esfuerzos de los puntos de integración a las localizaciones nodales dentro de cada elemento y calcula el esfuerzo de Von Mises. Esto causa que los esfuerzos nodales extrapolados sean más grandes que los valores en los puntos de integración. Los esfuerzos de Von Mises calculados para estos valores serán, por tanto, también más grandes. En resumen, los esfuerzos de Von Mises en un punto de integración no pueden nunca exceder el actual esfuerzo de fluencia del material del elemento, sin embargo, los valores nodales extrapolados en una gráfica de contorno puede serlo.

A partir de este instante, los mismos resultados que son obtenidos para el pórtico rígido, son ahora conseguidos para el edificio aporticado propuesto. En esta oportunidad no se examina es la influencia de la velocidad de deformación que ya ha sido ampliamente estudiado, además que es más complejo para este caso. La

simulación se hace para un periodo de tiempo igual a 0,08 seg para lograr capturar de una mejor manera la respuesta del edificio. A partir del tiempo en que finaliza la duración de la fase positiva se considera permanece constante a cero el resto del análisis.

En la Fig. 4.33 muestra las historias de deflexión en el tope de los pórticos, específicamente en el centro de las juntas viga-columna de los pórticos en la dirección "x" que es la dirección donde se supone se propaga la explosión. En el modelo sería en los nodos ID 2440, ID 2440 e ID 1850, respectivamente. La identificación de los pórticos como A, B y C es de acuerdo con la estructuración en planta mostrada en la Fig. 4.22a.

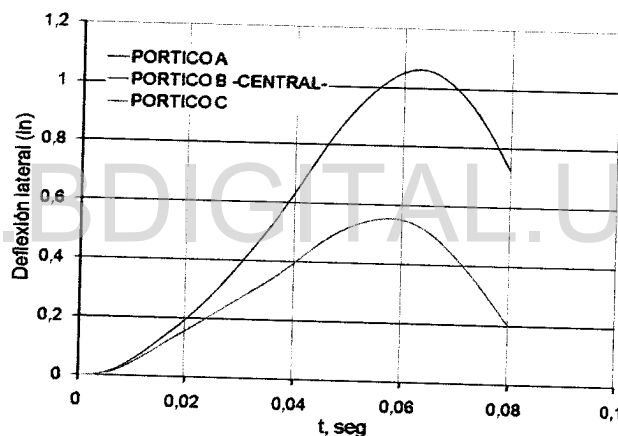


Fig. 4.33. Historias deflexión-tiempo en el tope de los pórticos en la dirección "x".

Al igual que en el caso del pórtico rígido simple, el valor de la deflexión lateral conseguida para el pórtico B (central) a través de la simulación numérica se ajusta aceptablemente al valor de diseño. Específicamente, el valor obtenido es de 1,06 in (2,70 cm) y el de diseño 1,16 in (2,95 cm). Esta diferencia 9,4% entre ambos resultados corrobora lo dicho en el caso del pórtico rígido respecto a que la simulación realizada representa adecuadamente al diseño en cuanto a la predicción de

los valores esperados de deflexión lateral. Este desplazamiento máximo ocurre a los 0,064 seg.

Según la estructuración de este edificio, el valor permisible de la deflexión lateral es de 6,24 in (15,85 cm). En esta oportunidad, la deflexión esperada de acuerdo al cálculo de diseño es de $H/134$, es decir 1,16 in (2,94 cm), que es mucho más baja a la obtenida para el pórtico rígido, y por supuesto mucho más por debajo que la deflexión normativa. La diferencia entre el valor permisible y el de diseño se ubica en un factor de 5,4. El incremento de esta diferencia se debe a la hiperestaticidad que tiene la estructura.

La naturaleza del sistema estructural aporticado le da mayor estabilidad (es la capacidad de la estructura de mantener el equilibrio como un conjunto, para cualquiera de los estados de cargas que pueden actuar sobre la misma) y rigidez (es la capacidad de la estructura de oponerse a ser deformada) a la estructura esto gracias al alto grado de hiperestaticidad propia del sistema.

Cuando se diseñan estructuras aporticadas de acero según el manual TM 5-1300 (1990), básicamente, se especifica el pórtico más desfavorable, de acuerdo al evento que se defina, y se trabaja con los valores tributarios. El diseño del edificio propuesto se basa, precisamente en el pórtico B, y por eso los valores de éste son los que se utilizan para comparar con los del diseño. Para simplificar el diseño efectuado se supone que el resto de los pórticos son iguales al calculado, es decir todos los pórticos tendrán la misma rigidez y resistencia. Es por ello que los pórticos externos (pórticos A y C) al no estar tan solicitados, como era de esperarse, la deflexión lateral es menor. La deflexión lateral en estos pórticos se sitúa en 0,55 in (1,40 cm), un 48,1% inferior al del pórtico B (Fig. 4.33).

Por último se presenta el estado de esfuerzo del modelo cuando alcanza la fluencia en el material y en el instante en que se alcanza la deflexión máxima.

La distribución de los esfuerzos de Von Mises para cuando aparece la fluencia en el modelo se muestra en la Fig. 4.34. En dicha figura se detalla el punto donde empieza la cedencia del material. Esto es en la columna 1B del pórtico B (según Fig. 4.22) que es directamente impactada por la carga explosiva y la de más demanda. La fluencia del acero en ese punto ocurre a los 0,024 seg, por lo que aún hay carga actuando sobre la columna. Luego de alcanzado el esfuerzo límite en ese punto, este se extienden a los rigidizadores de esa junta, lo cual es un indicativo de la expansión de la plastificación de esa junta.

En una primera instancia, el cómo va fluyendo el material en la estructura tiende a seguir la secuencia antes señalada del pórtico rígido, concretamente en el pórtico B. Es solo a partir de $t = 0,076$ seg cuando la cedencia pasa al pórtico A en la columna 1A.

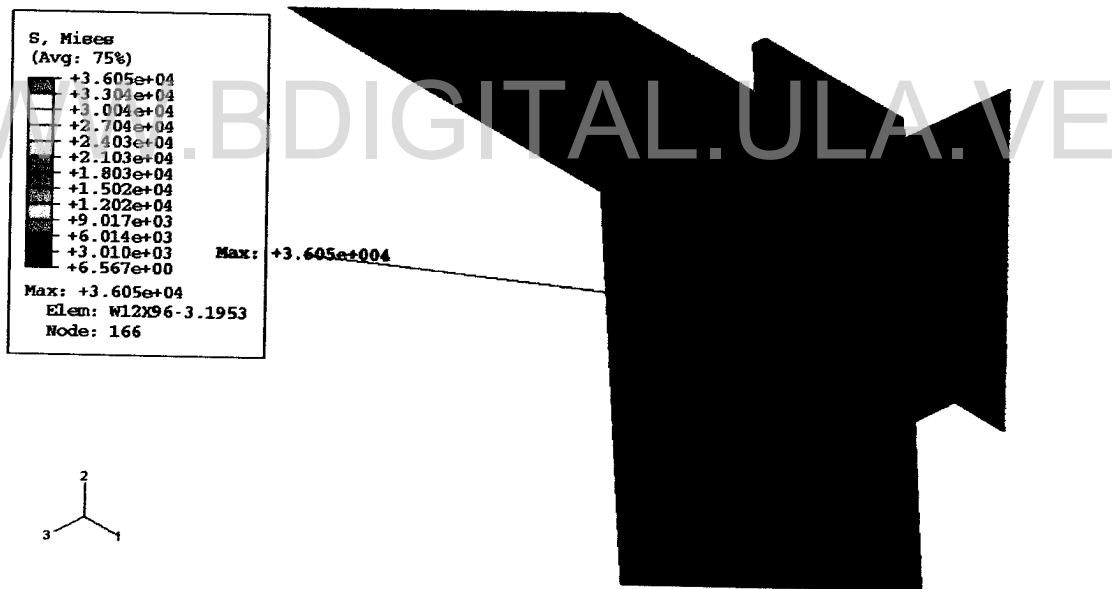


Fig. 4.34. Distribución de esfuerzos de Von Mises del edificio propuesto en el instante de tiempo donde aparece la fluencia en el acero ($t = 0,024$ seg). La zona señalada corresponde a la zona de fluencia.

Una de las zonas sensible a la plastificación es la base de la columna 1B (según Fig. 4.22). El campo de esfuerzos cuando se alcanza la resistencia máxima del material en la base de esa columna se observa en la Fig. 4.35. El análisis de elementos finitos indica que la cedencia del material acontece a los 0,044 seg, apenas finalizada la aplicación de la carga.



Fig. 4.35. Campo de esfuerzos de Von Mises del edificio propuesto en el instante de tiempo donde aparece la fluencia en la base ($t = 0,044\text{seg}$).

La Fig. 4.36 muestra los esfuerzos de Von Mises obtenidos a los 0,064 seg, tiempo en el cual se da la máxima deflexión en el pórtico B. En ese instante la columna ya ha experimentado un importante nivel de cedencia, particularmente a nivel de su base.

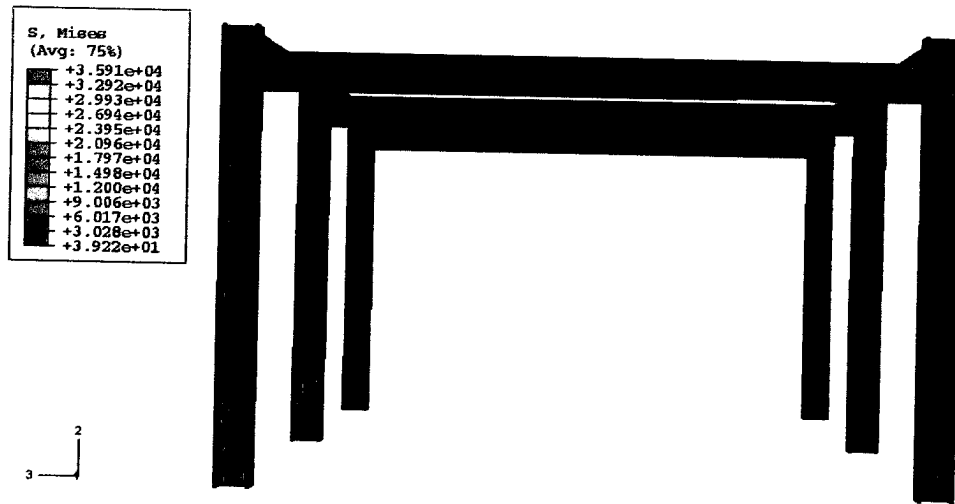


Fig. 4.36. Contorno de esfuerzos de Von Mises del edificio propuesto cuando se obtienen la máxima deflexión.

Todos los análisis de este capítulo se efectuaron a través del mismo servidor (disponible en CeCALCULA) con que se realizaron las simulación del capítulo 3.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El presente estudio muestra una evaluación exhaustiva de las consecuencias de una explosión sobre una estructura. El tema muestra una cierta complejidad dado a que mayoría de los tópicos relacionados son ajenos a la formación y experiencia básica de un ingeniero civil. Aunado a esto, las referencias son de difícil acceso, además de poco didácticas e incompletas. El tema es de importancia en nuestro país dada el alto riesgo de las estructuras petroleras y petroquímicas a este tipo de eventos. A nivel mundial, el tema adquiere importancia debido a los atentados terroristas de los últimos años.

Un estudio de lo que es una explosión, así como sus efectos sobre la estructura y sus componentes fue presentada mediante una exhaustiva revisión bibliográfica y simulaciones numéricas utilizando el método de los elementos finitos. Se presenta también la detonación de un explosivo de alta potencia en el aire, recogiendo conceptos fundamentales de análisis y diseño de estructuras resistentes a explosiones.

Se presenta desde la definición y tipos de explosivos y explosiones, pasando por el proceso de descomposición de los explosivos y las características de la onda expansiva generada por la detonación de un explosivo de alta potencia, así como los diversos tipos de cargas explosivas y su acción sobre las estructuras, particularmente lo concerniente a la interacción onda explosiva-estructura y su idealización.

Igualmente se muestra una breve descripción de la filosofía de diseño, así como los modos de falla, la influencia de la alta velocidad de deformación en el comportamiento de los materiales y los manuales técnicos existentes para el diseño resistente a explosiones. Por último, se describen varios tópicos inherentes como la mitigación, el diagrama presión-impulso, los materiales de construcción y los programas computacionales.

De los ejemplos mostrados, una primera simulación en 2D consistió en la detonación en el aire de una carga cilíndrica de 1 kg de TNT para diferentes relaciones L/D , utilizando un software comercial no lineal de elementos finitos (ABAQUS) para estudiar la formación, el desarrollo y la propagación de la onda explosiva. Para ello, se usó un enfoque híbrido de estructuras y fluidos llamado formulación arbitraria Lagrangiana-Euleriana.

Los modelos propuestos han sido calibrados usando un modelo de Fyzika Vzryva, validando la utilización de las ecuaciones de estado y la dinámica de la interfaz inicial. Asimismo, un análisis de sensibilidad de mallado fue llevado a cabo. Los resultados indican que la densidad de la malla influye significativamente la precisión de la predicción. Las simulaciones se han comparado con los valores de las ecuaciones modificadas de Plooster. Sobre la base de esta comparación, se ha concluido que a medida que aumenta la relación L/D de la carga explosiva, las sobrepresiones máximas se ajustan de mejor manera con la distancia se ajustan. En la zona próxima al explosivo, la correlación entre los valores de la simulación numérica y de la ecuación es bastante pobre debido a la complejidad del fenómeno de la explosión en la zona cercana al explosivo. Se recomienda un mayor estudio en este aspecto. Antes de dar un juicio definitivo respecto a la aplicabilidad del programa ABAQUS para realizar simulaciones numéricas de explosiones en el aire, se requieren de estudios más detallados para establecer la influencia de los diferentes factores que intervienen en el problema. Las curvas de historia de presión obtenidas con ABAQUS a diferentes distancias del explosivo muestran que, comparando con la curva presión-tiempo característica de una onda explosiva en un punto arbitrario, el programa simula razonablemente el proceso de una explosión, particularmente la propagación de la onda de choque en el aire. No es posible construir una curva presión-tiempo basada en ecuaciones analíticas para comparar con la de la simulación, debido a la falta de información en la literatura para definir la curva en cargas cilíndricas.

De acuerdo a los resultados presentados, es claro que el uso de ecuaciones analíticas o empíricas está limitado a las condiciones y suposiciones con las cuales fueron creadas, por lo que no son suficientes para la evaluación precisa de las presiones.

Una segunda simulación muestra un análisis dinámico explícito a través del método de los elementos finitos para obtener la respuesta de una estructura aporticada de acero, diseñado de acuerdo al procedimiento de manual TM 5-1300, sometida a cargas explosivas externas en el aire. La estructura está constituida por un sistema estructural de pórticos rígidos, típico de un edificio (en términos de dimensiones, masa y rigidez) de una instalación petroquímica. Los resultados obtenidos son comparados con los criterios de deformación (ó valores permisibles) establecidos en el mencionado manual. Esto permitió mostrar el procedimiento a seguir para el diseño y la evaluación de edificios basado en desempeño.

Modelos de referencia se usaron para calibrar, optimizar y facilitar el desarrollo de modelos en elementos finitos más complejos y también identificar el foco de posibles irregularidades, dado una solución rápida y más efectiva. Concretamente, varios modelos se crearon con el propósito estudiar de los siguientes aspectos:

1. El comportamiento estructural dinámico ante cargas explosivas, a partir de los rangos de presiones de diseño del manual TM 5-1300.
2. La influencia de los modelos constitutivos de plasticidad en la respuesta estructural.
3. El efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades mecánicas del acero estructural, y
4. La aplicabilidad de la carga uniformemente distribuida para representar explosiones en el aire distantes.

De los cuales se obtuvieron las siguientes conclusiones: 1) Tres regímenes (impulsivo, dinámico y cuasi-estático) de respuesta estructural se pueden presentar. La respuesta de una estructura ó elemento estructural sometido a cargas explosivas es

bastante sensible a la relación de su período natural y la duración de fase positiva de la carga. 2) El comportamiento mecánico del acero estructural A36 bajo cargas explosivas, no se ve influenciado por el tipo de modelo constitutivo que se emplee para representar el material. 3) Se muestran claramente el efecto de la velocidad de deformación. Cuando el efecto de la velocidad de deformación es tomado en cuenta, el esfuerzo de fluencia se incrementa con la velocidad. 4) A medida que aumenta la distancia la respuesta se hace más independiente de la forma de aplicar la carga, por lo que dependiendo de la distancia es posible suponer la carga uniformemente distribuida.

Para estos modelos, un análisis de valores propios también fue efectuado previamente para establecer la discretización del modelo y el tipo de elemento.

La verificación o calibración de modelos numéricos de estructuras es efectuado a fin de obtener un orden aceptable de confiabilidad en los resultados arrojados por un modelo computacional. En el primer modelo, a través de un análisis estático, se comprobó que los elementos continuos y las condiciones de apoyo trabajan apropiadamente. Asimismo, en el segundo modelo se hace análisis dinámico que ha demostrado la correcta aplicación de una carga variando en el tiempo y de la interacción empleada en la conexión viga-columna se comporte de forma rígida.

Un análisis modal permitió determinar los periodos de vibración de la estructura, necesarios para definir el régimen en que trabaja ante una carga explosiva. Además de corroborar la malla utilizada para el modelo.

Antes de evaluar la respuesta del edificio aporticado propuesto, a través de la simulación numérica, se hizo la revisión del diseño “preliminar” del pórtico rígido sugerida en manual TM 5-1300. En ambos casos, se chequearon la estabilidad global de la estructura a través del valor admisible de desplazamiento lateral establecido en dicho manual.

Revisando los resultados obtenidos para el pórtico rígido, estos indicaron que la simulación numérica efectuada representa muy bien al diseño en cuanto a la predicción de los valores esperados de deflexión lateral. Pero si se compara en términos del valor normativo, criterio de diseño propuesto en el TM 5-1300, es muy conservador. Para el edificio apórticado propuesto, al igual que en el caso del pórtico rígido simple, el valor de la deflexión lateral para el pórtico de diseño a través de la simulación numérica se ajusta muy bien al valor de diseño.

Otro aspecto considerado es evaluar potenciales zonas de falla que puede presentar el pórtico. Se presenta el estado de esfuerzo del modelo cuando alcanza la fluencia en el material y en el instante en que se alcanza la deflexión máxima. Cabe recordar que este análisis se llevó a cabo en el contexto un evento con explosivos de alta potencia y el efecto de la interacción fluido-estructura no es considerado.

Aunque se ha demostrado que las procedimientos de análisis y diseño actualmente disponibles en los manuales técnicos pueden ser utilizadas como una herramienta para obtener estimaciones aceptables de los efectos de la explosión en las estructuras, las técnicas numéricas como el modelado en elementos finitos deben ser usadas para evaluaciones más precisas, mas pormenorizada de respuestas estructurales y en etapas finales de diseño donde se requiere de revisiones detalladas. Las últimas tendencias apuntan al diseño por desempeño.

Dentro del contexto del tema de las explosiones y sus efectos sobre las estructuras es evidente que el desarrollo de muchos aspectos relacionados con el estudio e investigación en estos ámbitos no ha tenido adecuada difusión en la comunidad científica, siendo muy escasos los grupos de investigación y fuentes relacionadas con estas materias. Una de las razones principales que explican esta situación es la dificultad técnica y económica que conlleva estos temas. Sin embargo, la intención es continuar la investigación en este campo dado que aún quedan numerosos aspectos que interesaría abordar, entre ellos:

- Análisis cuantitativo del fenómeno de la interacción de las ondas explosivas con las estructuras. Esto dará lugar a tener modelos más ajustados para la predicción de efectos de una explosión, así como la respuesta directa cuando una estructura es sometida a una explosión.
- Métodos para el análisis y evaluación de estructuras nuevas y existentes, respectivamente: análisis de Pushover (chequeo de ductilidades), espectros de explosiones y curvas de fragilidad en función de la distancia escalada “Z”.
- Evaluación de colapso progresivo.
- Uso de técnicas inteligentes, como redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos como procedimientos de predicción y optimización de la ubicación de cargas críticas y simulación de todos los escenarios posibles de distancia y carga.
- Desarrollo (fragmentación) e impacto de fragmentos como mecanismo de daño y destrucción significativa generado por explosiones.
- Técnicas y métodos de reforzamiento: estrategias de mitigaciones eficientes y económicas que incluyan el uso de materiales y tecnologías innovadoras.
- Revisión de códigos de diseño y actuales normas.
- Utilización de un enfoque basado en dinámica computacional de fluidos – Computational Fluid Dynamics (CFD), en inglés–, para la predicción de la explosión en el aire causado por la explosión y las presiones aplicadas en superficies expuestas a la propagación de ondas de choque como opción a la mecánica computacional de sólidos –Computational Solid Mechanics (CSM), en inglés–.
- Ensayos de laboratorio a escala real o reducida para desarrollar aproximaciones computacionales y validar modelos, utilizando por ejemplo el método de nube de puntos (instrumentación y cámaras fotográficas).

REFERENCIAS

- Kadid, A. (2008). Stiffened Plates subjected to Uniform Blast Loading. *Journal of Civil Engineering and Management. International Research and Achievements*. Vilnius: Technika, Vol. 14, No. 3, p. 155-161.
- ABAQUS®. (2004). *Manuals, Version 6.4*. Abaqus Inc, USA.
- Adamík V., Vágenknecht J., Vávra P. & Trczinski W. A. (2004). Effect of TNT Charges Orientation on Generated Air Blast Waves – Numerical Simulation Using LS-DYNA. *Proc. 12. ANSYS User's Meeting 2004*.
- Adams, Ch. L., Sarmousakis, J. N. & Sperrazza, J. (1949). Comparison of the Blast from Explosive Charges of Different Shapes. *Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, Report N° 681, January*.
- Álvarez, X. (s.f.). Definiciones de interfaz [Documento en línea]. Disponible: <http://www.arteuna.com/talleres/FUC/Alvarez-%20Interfaces.htm>. [Consulta: 2009, Mayo 12].
- Aráoz, G. F. & Luccioni, B. M. (2007). Behaviour of Masonry Walls under Blast Loads. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Mecánica Computacional Vol. XXVI, octubre pp. 2267-2282. Córdoba, Argentina*.
- ASCE (1997). *Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities*. Task Committee on Blast Resistant Design, Petrochemical Energy Committee, ASCE (American Society of Civil Engineers). Reston, VA.
- ASCE. (1985). *Design of Structures to Resist Nuclear Weapons. Manual 42*, American Society of Civil Engineers. Reston, VA.
- ASCE. (1999). *Structural Design for Physical Security: State of the Practice*, American Society of Civil Engineers. Reston, VA.
- ASTM A36/A36M-04. (2004). *Standard Specification for Carbon Structural Steel*. West Conshohocken, PA.: American Society of Testing and Materials.
- Bailey, A. & Murray, S. G. (1989). *Explosives, Propellants and Pyrotechnics*. Brassey, London.
- Baker, W. E. (1973). *Explosions in Air*. University of Texas Press. Austin, TX.

- Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J. & Strehlow, R. A. (1983). *Explosion Hazards and Evaluation*. Elsevier. Amsterdam.
- Beshara, F. B. A., 1994. Modelling of Blast Loading on Above Ground Structures- I. General phenomenology and External Blast. *Computers and Structures*, 51(5), p. 585-596.
- Beveridge, A. (1998). *Forensic Investigation of Explosions*. Taylor & Francis Ltd. London.
- Biggs, J. M. (1964). *Introduction to Structural Dynamics*. McGraw-Hill. New York.
- Boh, J. W., Louca, L. A. & Choo, Y. S. (2004). Strain Rate Effects on the Response of Stainless Steel Corrugated Firewalls subjected to Hydrocarbon Explosions, *Journal of Constructional Steel Research* 60(1): 1-29.
- Bouamoul, A. & Nguyen-Dang, T. V. (2008). High Explosive Simulation using Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation. DRDC Valcartier TM 2008-254.
- Brode, H.L. (1955). Numerical Solution of Spherical Blast Waves. *Journal of Applied Physics*, No. 6, June.
- Bulson, P. S. (1997). *Explosive Loading of Engineering Structures*. E&FN Spon, London.
- Caretta, G., Cant, R. S. & Palmer, A. C. (2002). Response of Offshore Structures to Explosion Loading. 9th International Conference on Numerical Combustion. 7-10 April, Sorrento, Italy.
- Casal, J., Montiel, E., Planas, E. & Vílchez, J. A. (1999). *Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales*. Edicions UPC.
- Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of Structures – Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, Inc. Second Edition. USA.
- Clough, R. W. & Penzien, J. (1993). *Dynamics of Structures*. McGraw-Hill, Inc. Second Edition. USA.
- Cooper, P. W. & Kurowski, S. P. (1996). *Introduction to the Technology of Explosives*. Wiley-VCH. New York.

- Cowper, G. R. & Symonds, P. S. (1957). Strain Hardening and Strain Rate effect in the Impact Loading of Cantilever Beams. Brown University, Division of Applied Mathematics Report No. 28.
- Crawford, J. E. & Magallanes, J. M. (2005). Analysis of a Steel Frame Subjected to Blast Effects and Subsequent Progressive Collapse Demands. Karagozian & Case Paper.
- Cubillos, A. (s.f.). Introducción al Método de los Elementos Finitos [Documento en línea]. Disponible: <http://almec.files.wordpress.com/2007/10/resumen.pdf>. [Consulta: 2009, Abril 25].
- Deshpande V. S. & Fleck N. A. (2004). The Resistance of Clamped Sandwich Beams to Shock Loading. Journal of Applied Mechanics, ASME, 71, 386-401.
- Dobratz, B. M. (1974). Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. Technical Report UCRL-51319, Rev. 1. Lawrence Livermore Laboratory. Berkeley. July.
- Dobratz, B. M. (1981). LLNL Explosive Handbook, Properties of Chemical Explosives and Explosive Stimulants. Lawrence Livermore National Laboratory report UCRL-52997, March.
- DOE/TIC-11268. (1980). A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings on Structures. Department of Energy. Amarillo, Texas. November.
- DOE/TIC-11268. (1992). A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings on Structures. Department of Energy. July.
- Donea, J., Huerta, A., Ponthot, J.-Ph. & Rodriguez-Ferran, A. (2004). Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods. Encyclopedia of Computational Mechanics, Vol.1, Chapter 14, p. 1-25. John Wiley & Sons New York, NY.
- Dove R., Hamilton J. and Coltharp D. (1989). Perimeter Walls for Blast Reduction. Proc. ASCE Specialty Conf. Structures for Enhanced Safety and Physical Security, E. Krauthammer (Ed.), Arlington Virginia, pp 142-153.
- Edel, M. T., Sari, A. & Montoya, J. (2005). Assessment of Modular Metal Building for Blast Loads. Draft Report. Baker Engineering and Risk Consultants, Inc. BakerRisk Project N° 01-01272-001-05. November.

- Escribano R., M. (2006). El Análisis por Elementos Finitos: Una Metodología muy Reciente en Economía. ASEPUMA. Volume: Actas 14, Issue: 1.
- Explosion Dynamics Laboratory –EDL– (2008). Glossary on Explosion Dynamics. California Institute of Technology. Disponible en: <http://www.galcit.caltech.edu/EDL/projects/JetA/Glossary.html>. [Consulta: 2009, Diciembre 12].
- FEMA 426. (2003). Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings, Federal Emergency Management Agency, Report No. 426, Washington D.C.
- Fišerová, D., Hamed, A. & Hetherington J. G. (2003). Systematic Study of Simulated Mine Explosions using AUTODYN. Proceeding of the VI Seminar on New trend in research of energetic materials, University of Pardubice, Faculty of Chemical Technology, April 22-24.
- Florez L., Julio. (1999). Monografía de Ingeniería Sísmica. CIMNE IS.
- Frederick, F. J. (1986). Introduction to Physics for Scientists and Engineers. McGraw-Hill Book Company, Fourth Edition. New York.
- Fyzika vzryva (2002). TOM 1. Moskva, Fizmatlit.
- Gen Verification Examples MIDAS (2006). Eigenvalue Analysis of a Thin Simply Supported Rectangular Plate. Eigen-11. Disponible en: <http://www.midas-diana.com/support/examples.asp>. [Consulta: 2009, Noviembre 25].
- Glasstone, S. (1957). The Effects of Nuclear Weapons. U.S. Atomic Energy Comm. Washington, D.C.
- Glasstone, S. & Dolan, P. J. (1977). The Effects of Nuclear Weapons. 3rd ed. U.S. Department of Defense and the Energy Research and Development Administration.
- GSA. (2003). Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. General Services Administration. June.
- Henrych, J. (1979). The Dynamics of Explosion and Its Use. Elsevier.

- Hibbitt Karlsson & Sorensen Inc. (2002). Getting started with ABAQUS/Standard. Version 6.3. USA.
- Hilti Corp. (2008). Cargas Dinámicas. Disponible en: http://www.hilti.es/holes/modules/editorial/edit_singlepage.jsp?contentOID=12029. [Consulta: 2009, Diciembre 2].
- Hinman, E. (2008). Blast Safety of the Building Envelope. Whole Building Design Guide. National Institute of Building Sciences. Disponible en: http://www.wbdg.org/resources/env_blast.php. [Consulta: 2009, Junio 22].
- HNMD-1110-1-2. (1977). Suppressive Shield – Structural Design and Analysis Handbook. U.S. Army Corps of Engineers. Huntsville, AL.
- Hopkinson, B. (1915). British Ordnance Board Minutes. 13565.
- Horoschun, G. (2005). Blast and Terrorist Attack: The application of Engineering Principles to its Mitigation. Australian Earthquake Engineering Society. Conference 2005. Albury, New South Wales.
- Hsieh, M. W., Hung, J. P. & Chen, D. J. (2008). Investigation on the Blast Resistance of a Stiffened Door Structure. Journal of Marine Science and Technology. Vol. 16, N°2, pp. 149-157.
- HySafe. (2006). Chapter 3: Accidental Phenomena and Consequences. Biennial Report on Hydrogen Safety (BRHS), Version 1.0. Octubre.
- Jankowiak, T., Łodygowski, T. & Sielicki, P.W. (2007). Modelling of Pressure Distribution after Explosion. 17th Int. Conference on Computer Methods in Mechanics. Łódz-Spała.
- Jiménez, F. & Rueda, F. (2003). Simulando Explosiones con ABAQUS/Explicit®. Ingeniería IDOM Internacional S.A de CV. Madrid, España.
- Johansson, C. H. & Persson, P. A. (1970). Detonic of High Explosives. Academic Press. New York.
- Kepa, J. (2008). Los diez accidentes más caros de la historia. 20 minutos. Noviembre. Disponible en: <http://jonkepa.wordpress.com/2008/11/04/los-diez-accidentes-mas-caros-de-la-historia/>. [Consulta: 2010, Enero 15].

- Kingery C. N. & Bulmash, G. (1984). Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. ARBRL-TR-02555, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
- Kinney, G. F. & Graham, K. J. (1985). Explosive Shocks in Air. 2nd Edition, Springer Verlag.
- Kloster, M. S. (2001). Coupled Lagrangian and Eulerian Approach to Detonation and Fragmentation Problems. Master's Thesis. Naval Postgraduate School Monterey CA. September.
- Krauthammer, T (1999). Blast-resistant Structural Concrete and Steel Connections. International Journal of Impact Engineering, Volume 22, Number 9, October, pp. 887-910 (24).
- Krauthammer, T. & Cipolla, J. (2008). Building Blast Simulation and Progressive Collapse Analysis. Simulia Insights, January/February 2008, pp. 14–15.
- Krauthammer, T. (2006). Required R&D for the Protection of Critical Infrastructure. Proc. Fraunhofer Symposium on Future Security. Karlsruhe, Germany. 4-5 July.
- Krauthammer, T. (2008). Modern Protective Structures. CRC Press, USA.
- Lan, S. & Crawford, J. E. (2003). Evaluation of the Blast Resistance of Metal Deck Roofs. 5th Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 12-14 November. Changsha, Hunan, China.
- Lee, E., Finger, M. & Collins, W. (1973). JWL Equation of State Coefficients for High Explosives. Technical Report UCID-16189, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA.
- Lee, K., Kim, T. & Kim, J. (2009). Local Response of W-shaped Steel Columns under Blast Loading. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 31, No. 1, pp. 25-38.
- Leigh, E. & Earls, Ch. (2008). Simulating Blast Effects in Steel Lattice Structures. Proceedings of the 6th International Conference on Computation of Shell and Spatial Structures IASS-IACM 2008: "Spanning Nano to Mega", 28-31 May. Cornell University, Ithaca, NY, USA.

- Leissa, A. W. (1973). *Vibrations of Shells*. NSA SP-288.
- Limcon V3. (2009). *Connection Types*. Disponible en: http://www.steel-connections.com/lmc_types.htm. [Consulta: 2009, Mayo 6].
- Livermore Software Technology Corporation. (1999). *LS-DYNA Keyword User's Manual, Version 950*. Livermore, CA, May.
- Łódygowski, T. & Sielicki P., W. (2008). *Failure of the Masonry Structure under Blast Loading*. Workshop 2008 Poznan. *Dynamic Fracture and Damage of Brittle and Ductile Materials and its Industrial Applications*. Poznan University of Technology. Poznań, 3-5 September.
- Longinow, A. & Mniszewski, K. R. (1996). *Protecting Buildings against Vehicle Bomb Attacks*. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, ASCE. New York, pp. 51-54.
- Longinow, A. & Alfawakhiri, F. (2003). *Blast Resistant Design with Structural Steel. Common Questions Answered*. *Modern Steel Construction*. October, pp. 61-65.
- Longinow, A. (2004). *Blast Basics*. North American Steel Construction Conference, Long Beach, CA. March 24-27.
- Luccioni, B. M., Ambrosini, R. D. & Danesi, R. F. (2004). *Analysis of Building Collapse under Blast Loads*. *Engineering Structures*, Vol. 26 Issue 1 pp. 63-71, January.
- Magnusson, J. (2007). *Structural Concrete Elements Subjected to Air Blast Loading*. Licentiate Thesis. Stockholm, May.
- Makino, R. C. & Goodman, H. J. (1956). *Air Blast Data on Bare Explosive of Different Shape and Compositions*. BRL Report N° 1015.
- Martineau, R. L. (1998). *A Viscoplastic Model of Expanding Cylindrical Shells Subjected to Internal Explosive Detonations*, LA-13424-T, April.
- Mays, G. C. & Smith, P. D. (1995). *Blast Effects on Buildings*, Thomas Telford Publications, London, UK.

- Mazarak, O., Martins, Cl. & Amanatides, J. (1999). Animating Exploding Objects. Proceedings of the 1999 Conference on Graphics Interface '99. p. 211-218, September. Kingston, Ontario.
- Mohamed A., R. M. (2007). Performance Based Design of Offshore Structures subjected to Blast Loading. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy. Imperial College London. Civil and Environmental Engineering. London, United Kingdom. October.
- Mohanty, B. (1998). Physics of Explosion Hazards. Chapter 2 in Forensic Investigation of Explosions. Alexander Beveridge, Ed. London. Taylor & Francis.
- Mora Ch., H. (2008). Manual del Vigilante de Explosivos. 1^{era} Edición. Editorial Club Universitario (ECU). España.
- Motley, M. R. (2004). Finite Element Analysis of the Application of Synthetic Fiber Ropes to Reduce Blast Response of Frames. Thesis Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Civil Engineering. Blacksburg, Virginia. December.
- Nair, S. R. (2003). Progressive Collapse Basics. Proceedings Steel Building Symposium: Blast and Progressive Collapse Resistance. December 4-5, New York, NY, 1-11.
- NAVFAC DM 2.08. (1986). Blast Resistant Structures. Naval Facilities Command (NAVFAC) Design Manual (DM) 2.08. December.
- Neff, M. & Fiume, E. (1999). A Visual Model for Blast Waves and Fracture. Proceedings of the 1999 Conference on Graphics Interface '99. p. 193-202, September. Kingston, Ontario.
- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. & Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview. Electronic Journal of Structural Engineering, Special Issue: Loading on Structures, p.76-91.
- NRC. (1995). Protecting Buildings from Bomb Damage. National Research Council. National Academy Press.

- Oñate, E. & Owen, R. (2007). Computational Plasticity. Computational Methods in Applied Sciences , Vol. 7 Serie. Springer.
- Paz, M. (1992). Dinámica Estructural – Teoría y Cálculo. Editorial Reverté, S.A. Tercera Edición. Barcelona, España.
- Persson, P. A., Holmberg, R. & Lee, J. (1994). Rock Blasting and Explosive Engineering. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Principia S.A. (s.f.). FAQs y trucos en Abaqus. [Documento en línea]. Disponible: http://www.principia.es/abaqus/asistencia_faqs.htm. [Consulta: 2009, Abril 20].
- Prinz, G. S. (2007). Effect of Beam Splicing on Seismic Response of Buckling-Restrained Braced Frames. M.S. Thesis. Provo (Utah). Brigham Young University.
- Pytel, A. & Singer, F. L. (1994). Resistencia de Materiales – Introducción a la Mecánica de Sólidos. Harla, S.A. Cuarta Edición. México, D.F. 1994.
- Randers-Pehrson, G. & Bannister, K. A. (1997). Airblast loading mode for DYNA2D and DYNA3D. Report ARL-TR-1310.
- Reisler, R. C. (1972). Explosive Yield Criteria. Minute of 14th Explosives Safety Seminar, New Orleans, 8-10 November, Department of Defense Explosives Safety Board. Pp. 271-288.
- Remennikov, A. M. (2007). The State of the Art of Explosive Loads Characterisation. AEES Conference. November 23-25, Wollongong, NSW.
- Sabuwala, T. (2001). Finite Element Analysis of Steel Beam to Column Connections Subjected to Blast Loads. A Thesis Proposal in Civil Engineering. Pennsylvania State University. August.
- Sabuwala, T., Linzell, D. & Krauthammer, T. (2005). Finite Element Analysis of Steel Beam to Column Connections Subjected to Blast Loads. International Journal of Impact Engineering, 31, pp. 861-876.
- Sánchez F., E. (2006). Elementos Metálicos y Sintéticos. 1era Edición. Editorial EDITEX, S.A. Madrid.
- Sartori, L. (1983). The Effects of Nuclear Weapons, Physics Today, March, pp. 32-41.

- Schmidt, J. A. (2003). Structural Design for External Terrorist Bomb Attacks. *Structure*, March Issue, p.14-15.
- Schwer, L. (2007). Optional Strain-Rate Forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon_0. 6th German LS-DYNA Forum. October 11-12. Frankenthal, Germany.
- Shope, R. L. (2006). Response of Wide Flange Steel Columns Subjected to Constant Axial Load and Lateral Blast Load. Tesis Doctoral. Civil Engineering Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Showichen, A. (2008). Numerical analysis of vehicle bottom structures subjected to anti-tank mine explosions. Thesis or dissertation, Doctoral, PhD. Engineering Systems Department. Cranfield University.
- Sierra, E. (2006). NTP 321: Explosiones de Nubes de Vapor No Confinadas: Evaluación de la Sobrepresión (1993). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Colecciones de tipo NTP (Nota Técnica de Prevención). Madrid, España.
- Schmidt, J. A. (2003). Structural Design for External Terrorist Bomb Attacks. *STRUCTURE®magazine*. March issue.
- Smith, P. D. & Hetherington, J. G. (1994). Blast and Ballistic Loading of Structures. Butterworth-Heinemann. London.
- Stuhmiller, J. H., Phillips, Y. Y. & Richmond, D. R. (1991). The Physics and Mechanisms of Primary Blast Injury. In Bellamy R and Zajtchuk R (Eds.). Textbook of Military Medicine. Conventional Warfare, Ballistic, Blast, and Burn Injuries (Office of the Surgeon General, Department of the Army, Washington, DC) Vol. 5: pp. 241-270.
- Suarez, L. E. (1997). Revision de Libros: Modern Protective Structures, por Theodor Krauthammer, CRC Press. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 8(1) 97.
- Subramaniam, K. V., Nian, W. & Andreopoulos, Y. (2009). Blast response simulation of an elastic structure: Evaluation of the fluid-structure interaction effect. *International Journal of Impact Engineering*, 36(7): 965-974.

- Summers, P. B. (2008). Design of Modular Blast-Resistant Steel-Framed Buildings in Petrochemical Facilities. ASCE Structures Congress, Vancouver, Canada, April 23-26.
- Suthar, K. (2007). The Effect of Dead, Live and Blast Loads a Suspension Bridge. Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park.
- Tavarez, F. A. (s.f.). Simulation of FRP Composite Repaired Concrete Structures subjected to Impact and Blas Loads: Literature Review.
- Teicholz, E. (2001). Facility Design and Management Handbook. McGraw-Hill.
- TM 5-1300. (1990). The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual, US Department of the Army, Navy, and Air Force. Washington DC.
- TM 5-855-1. (1986). Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons. Technical Manual. Department of the Army. November.
- TM 5-855-1. (1998). Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons. Technical Manual. Department of the Army. August.
- TM 5-856-3. (1957). Design of Structures to Resist the Effects of Atomic Weapons, Principles of Dynamic Analysis and Design. Department of the Army. U.S. Army Corps of Engineers. Washington, March.
- TNO Green Book. (1992). Methods for the Determination of Possible Damage and Objects. CPR16E.
- Trancroto, J. E. (1974). Effects of Charge Composition and Surface Conditions on Blast Enviroment. Minute of 16th Explosives Safety Seminar, Vol. I, Hollywood, FL, pp. 301-334, Sepetember.
- Trevino, T. (2000). Applications of Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) Analysis Approach to Underwater and Air Explosion Problems. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA.
- U.S. Army Corps of Engineers Protective Design Center –PDC–. (2006). User's Guide for the Single Degree of Freedom Blast Effects Design Spreadsheets (SBEDS). Protective Design Center Technical Report, PDC-TR 06-02.

- UFC 4-010-01. (2003). DoD Minimum Antiterrorism Standards for Building. Department of Defense, Unified Facilities Criteria (UFC). October.
- UFC 4-023-03. (2005). Design of Building to Resist Progressive Collapse. Department of Defense, Unified Facilities Criteria (UFC). January.
- Vilchez, J. A., Sevilla, S., Montiel, H. & Casal, J. (1995). Historical Analysis of Accidents in Chemical Plants and in the Transportation of Hazardous Materials. *J. Loss Prev. Process Ind.* Vol. 8, núm. 2, pp. 87-96. 1995.
- Walters, W. P. & Zukas, J. A. (1998). *Fundamental of Shaped Charges*. CMC Press.
- Wang, J. (2001). Simulation of Landmine Explosion Using LS-DYNA3D Software: Benchmark Work of Simulation of Explosion in Soil and Air. Report DSTO-TR-1168.
- Wei, J. (2006). Numerical Study on Propagation Mechanism of Spherical Detonation Waves. Proceedings of the 2006 International Symposium on Safety Science and Technology, #1097. Changsha, China, Oct. 24-27.
- White, D. W., Liew, J. Y. R. & Chen, W. F. (1991). Second-Order Inelastic Analysis for Frame Design: A Report to SSRC Task Group 29 on Recent Research and the Perceived State-of-the-Art, Structural Engineering Report, CE-STR-91-12, Purdue University, West Lafayette, 116 pp.
- Wilkinson, C. R. & Anderson, J. G. (2003). *An Introduction to Detonation and Blast for the Non-Specialist*. Edinburgh, Australia: Australian Government Defence Science and Technology Organization.
- Wisotki, J. & Snyder, H. W. (1965). *Characteristic of Blast Waves Obtained from Cylindrical High Explosive Charges*. University of Denver, Denver Research Institute, November.
- Yin, X., Gu, X., Lin, F. & Kuang, X. (2009). Numerical Analysis of Blast Loads inside Buildings. Computational Structural Engineering Proceedings of the International Symposium on Computational Structural Engineering, held in Shanghai, China, June 22–24. 681-690.

- Zaker, T. A. (1969). Blast Pressures From Sequential Explosions. IIT Research Institute, Chicago Illinois, Phase Report II, Project J6166, March 25.
- Zhang, X., Zhongdong, D. & Zhang, Ch. (2008). Numerical Simulation of Dynamic Response and Collapse for Steel Frame Structures subjected to Blast Load. Transactions of Tianjin University, Vol. 14, No. 0. October, pp. 523-529.
- Zipf, K. R. & Cashdollar, K. L. (s.f). Explosions and Refuge Chambers. Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/docket/pdfs/NIOSH-125/125-explosions%20and%20Refuge%20Chambers.pdf>. [Consulta: 2009, Octubre 2].

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

GLOSARIO

- **Explosión**: Una explosión es un fenómeno en el cual hay una liberación rápida y violenta de energía, que puede tener su origen en distintas formas de transformación, y que genera una onda de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras va disipando energía.
- **Explosivo**: Un explosivo es un material, simple o compuesto, capaz de producir una explosión con su propia energía. Este material al activarse sufre una reacción química rápida que lo transforma en un gas, liberando una gran cantidad de energía en forma de calor y expansión de volumen.
- **Detonación**: Es un proceso físico-químico caracterizado por su alta velocidad de reacción y la formación de grandes cantidades de productos gaseosos a una elevada temperatura, la cual una gran fuerza expansiva. En una detonación, la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es supersónica.
- **Deflagración**: Es un proceso exotérmico en el cual la transmisión de la reacción de descomposición está basada principalmente en la conductividad térmica. En una deflagración, la velocidad de la onda de sobrepresión en el medio sin reaccionar es subsónica.
- **Onda explosiva o de choque**: Como consecuencia de la detonación de un explosivo de alta potencia, una onda de compresión (una capa de aire comprimido) se forma en el frente de este volumen de gas (llamado frente de la explosión) conteniendo mucha de la energía liberada por la explosión. Esta onda de compresión se le denomina onda explosiva u onda de choque.
- **Frente de la explosión o de choque**: El termino frente de la explosión (también llamado frente de choque) es comúnmente usado para describir la superficie frontal de la onda explosiva, formada por todas las partículas que están en la misma fase del movimiento, y que se mueve en un ambiente no perturbado.

- **Explosiones no confinadas o externas:** Son que básicamente ocurren al aire libre. El término “no confinadas” es usado para describir explosiones en áreas abiertas. Cabe indicar que las explosiones confinadas (también llamadas explosiones internas) son las que ocurren dentro de un espacio confinado parcial o totalmente.
- **Sobrepresión:** Se define como el exceso de presión, sobre la atmosférica, que se alcanza en un frente de onda. La máxima presión alcanzada por la onda en un punto dado se conoce como “sobrepresión máxima”, “pico de presión estática” o “sobrepresión estática”.
- **Duración de la fase positiva:** El periodo de tiempo en el que la presión es superior a la presión atmosférica, se conoce como “duración de la fase positiva”.
- **Impulso:** El impulso específico es la integral de la sobrepresión variable en función del tiempo multiplicada por cada uno de los diferenciales de tiempo en que se divide el tiempo que actúa.
- **Presión reflejada:** Es la presión estática que se alcanza en el momento inmediatamente posterior al choque de la onda de presión contra una superficie rígida y viaja en la misma dirección y sentido opuesto a la onda incidente.
- **Ley escalada:** La aproximación más utilizada para el escalamiento de la onda explosiva es la ley de Hopkinson, la cual establece que ondas explosivas similares son producidas por distancias escaladas idénticas cuando dos cargas diferentes del mismo explosivo y con la misma geometría son detonadas en la misma atmósfera.
- **Ángulo de incidencia:** El ángulo entre la superficie a impactar la onda de choque y la dirección de la propagación de la dicha onda, es referido como el ángulo de incidencia.
- **Difracción:** La difracción es un efecto resultante de la diferencia de presión generada en el obstáculo cuando la onda explosiva pasa sobre él.

- Presión dinámica: Es consecuencia del “viento de la explosión” arrastrado por el avance de la onda, pudiendo provocar el derribo de obstáculos desplazables.
- Velocidad de deformación: La velocidad de deformación no es más que el cambio de la deformación en el tiempo.
- Formulación Lagrangiana-Euleriana: El enfoque Lagrangiano-Euleriano Arbitrario (ALE en inglés) es una variante del Lagrangiano en el que la malla se deforma en función de una velocidad “arbitraria”, independiente de la velocidad del fluido. La velocidad de la malla aparece incorporada en el término convectivo, lo que proporciona mayor estabilidad numérica.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ANEXOS

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANEXO A

Cálculo de las cargas explosivas externas (curvas presión-tiempo) sobre la estructura propuesta de la Fig. 4.22 (ver Capítulo 4) para una explosión en el aire de una explosivo esférico de TNT de 1814 kg (4000 lb) a una distancia de 86,7 m (285 ft). La superficie de la estructura sobre la cual actúa el frente de choque tiene un ancho de 12,8 m (42 ft) y se asume que es plana, se propaga horizontalmente e impacta frontalmente. Los parámetros de la onda explosiva se obtienen de las graficas del TM 5-855-1 (1986)^I –tomadas del material del curso de Kiger & Woodson (2005)^{II}– y las curvas presión-tiempo se construyen de acuerdo al manual TM 5-1300 (1990)^{III} y el ASCE (1997)^{IV}.

^ITM 5-855-1. (1986). *Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons*. Technical Manual. Department of the Army. November.

^{II}Kiger, S. A & Woodson, S. C. (2005). *Explosion Effects and Structural Design for Blast*. Course Outline. September 27 and 28.

^{III}TM 5-1300. (1990). *The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. Technical Manual, US Department of the Army, Navy, and Air Force. Washington DC.

^{IV}ASCE (1997). *Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities*. Task Committee on Blast Resistant Design, Petrochemical Energy Committee, ASCE (American Society of Civil Engineers). Reston, VA.

EFECTO DE LAS CARGAS EXPLOSIVAS EXTERNAS (CURVAS PRESION-TIEMPO) SOBRE LA ESTRUCTURA PROPUESTA DE LA FIG. 4.22 (CAPÍTULO 4).

DATOS

CANTIDAD DE EXPLOSIVO Y DISTANCIA A LA ESTRUCTURA

W =	4000 lb =	1814,4 kg
R =	285 ft =	86,9 m

DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA

B =	42 ft =	12,80 m
H =	13 ft =	3,96 m

DISTANCIA ESCALADA

Z =	17,95 ft/lb ^{1/3} =	7,12 m/kg ^{1/3}
-----	------------------------------	--------------------------

PARÁMETROS DE LA ONDA EXPLOSIVA

VALORES ESCALADOS (Fig. 3.4. TM 5-855-1, 1986)

P _{so} =	2,7 psi
P _r =	5,7 psi
i _r /W ^{1/3} =	7,2 psi-msec/lb ^{1/3}
i _s /W ^{1/3} =	3,2 psi-msec/lb ^{1/3}
t _o /W ^{1/3} =	3 msec/lb ^{1/3}
U =	1,2 ft/msec
L _w /W ^{1/3} =	3,3 ft/lb ^{1/3}

PARÁMETROS DE LA ONDA EXPLOSIVA

VALORES ABSOLUTOS

P _{so} =	2,7 psi =	18615,8 Pa
P _r =	5,7 psi =	39300,1 Pa
i _r =	114,29 psi-msec =	788,0 Pa-seg
i _s =	50,80 psi-msec =	350,2 Pa-seg
t _o =	47,6 msec =	0,0476 seg
U =	1,2 ft/msec =	365,8 m/seg
L _w =	52,38 ft =	15,97 m

CARGA FRONTAL (TM 5-1300, 1990)

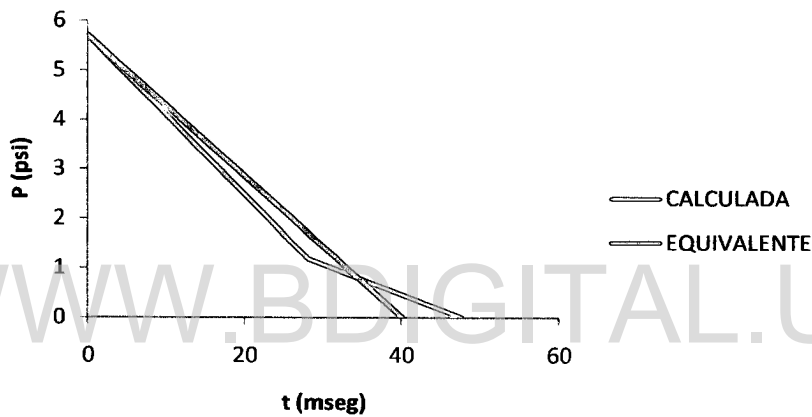
S =	13 ft
G =	21 ft
R =	0,619
Cr =	1,14 (Fig. 2-192)
t _c =	28,2 msec
t _{of} =	37,6 msec
q _o =	0,18 (Fig. 2-3)
CD =	1
P _{so} + CD·q _o =	2,88 psi
tr _f =	40,1 msec

CARGA SOBRE TECHO (ASCE, 1997)

Lw =	52,38 ft
L1 =	21 ft
Lw/L1 =	2,494
CE =	0,75 (Fig. 3.9)
CD =	-0,4 (Secc. 3.3.3)
qo =	0,1 (Fig. 2-3. TM 5-1300, 1990)
Pa =	2,0 psi
tr = t1 =	17,5 msec
td =	47,6 msec
t2 =	65,1 msec

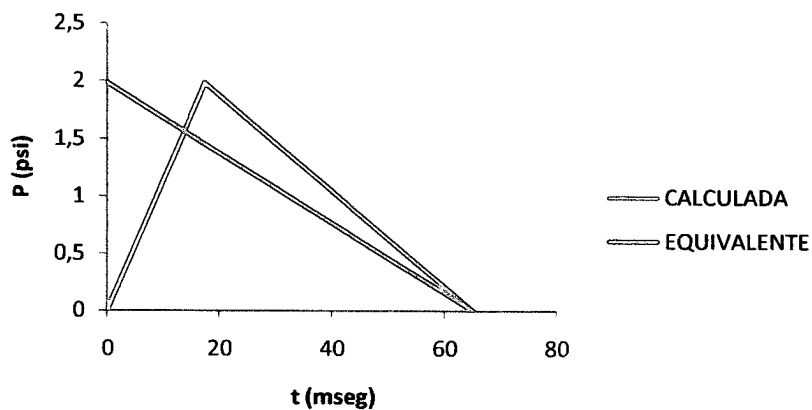
CURVA PRESIÓN-TIEMPO

CARGA FRONTAL



CURVA PRESIÓN-TIEMPO

CARGA SOBRE TECHO



ANEXO B

Diseño “preliminar” del pórtico rígido simple de acero de la Fig. 4.15 del Capítulo 4 (pórtico $A = B = C$ de la estructura de la Fig. 4.22) sometido a las cargas explosivas determinadas en el Anexo A. La dirección de la explosión de diseño es paralela al pórtico. El diseño es realizado siguiendo los criterios y pautas establecidos en el manual técnico TM 5-1300 (1990)¹.

¹TM 5-1300. (1990). The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual, US Department of the Army, Navy, and Air Force. Washington DC.

DISEÑO "PRELIMINAR" DE PÓRTICO RÍGIDO SIMPLE DE ACERO (TM 5-1300, 1990)

DESCRIPCIÓN: DISEÑO "PRELIMINAR" DEL PÓRTICO RÍGIDO SIMPLE DE ACERO DE LA FIG. 4.15 DEL CAPÍTULO 4 (PÓRTICO A = B = C DE LA ESTRUCTURA DE LA FIG. 4.22) SOMETIDO A LAS CARGAS EXPLOSIVAS DETERMINADAS EN EL ANEXO A.

DATOS

1) CARGAS PRESIÓN-TIEMPO SE MUESTRAN EN EL ANEXO A.

De las cargas presión-tiempo:

Lateral = 5,7 psi (Max.)

Vertical = 2,0 psi (Max.)

2) CRITERIOS DE DISEÑO:

$\delta = H/$ 25

$\theta_{max} =$ 2 grados (para miembros individuales)

3) CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL SE MUESTRA EN LA FIG. 4.15 (CAPÍTULO 4).

4) ACERO ASTM A36.

PROCEDIMIENTO

PASO 1. CÁLCULO DE α

Separación entre pórticos, bh = 21 ft

Separación de viguetas, bv = 21 ft

qh = 1436 lb/in

qv = 504 lb/in

$\alpha =$ 2,85

PASO 2. ESTABLECIMIENTO DE LAS CARGAS ESTÁTICAS EQUIVALENTES

a. Mecanismo de viga local

DLF = 1,25 (Sección 5-41.3)

w = 7,56 k/ft = 630 lb/in

b. Mecanismo combinado o panel

DLF = 0,625 (Sección 5-41.3)

w = 3,78 k/ft = 315 lb/in

PASO 3. CAPACIDADES DE MOMENTO PLÁSTICO REQUERIDAS

C = 2 "Valores recomendados"
 C1 = 2 "Valores recomendados"
 n = 1
 $\alpha = 2,85$
 H = 13 ft = 156 in
 L = 21 ft = 252 in

Mecanismo de colapso	w (k/ft)	w (lb/in)	"Base empotrada"		"Base articulada"	
			Mp (k-ft)	Mp (lb-in)	Mp (k-ft)	Mp (lb-in)
1	7,56	630	208,373	2,50E+06	208,37	2,50E+06
2	7,56	630	130,046	1,56E+06	182,06	2,18E+06
3a	3,78	315	151,72 (C1≤2)	1,82E+06	455,16 (C1≤2)	5,46E+06
3b	3,78	315	151,72 (C1≥2)	1,82E+06	455,16 (C1≥2)	5,46E+06
4	3,78	315	165,883	1,99E+06	331,77	3,98E+06
5a	3,78	315	124,134 (C1≤2)	1,49E+06	273,1 (C1≤2)	3,28E+06
5b	3,78	315	124,134 (C1≥2)	1,49E+06	273,1 (C1≥2)	3,28E+06
6	3,78	315	124,134	1,49E+06	273,1	3,28E+06
			"Base empotrada"		"Base articulada"	
			Mp (k-ft) =	208,4	Mp (k-ft) =	455,16
			Mp (lb-in) =	2,50E+06	Mp (lb-in) =	5,46E+06

"Base empotrada"

Vigas, Mp = 208,37 k-ft = 2,50E+06 lb-in
 Columna interior, C*Mp = 416,745 k-ft = 5,00E+06 lb-in
 Columna exterior, C*Mp = 416,745 k-ft = 5,00E+06 lb-in

PASO 4. CARGAS EXIALES Y CORTE

Debido a la presión horizontal:

w = 3,78 k/ft = 315 lb/in

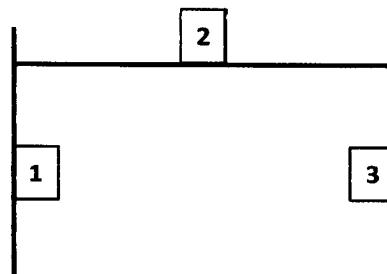
De la figura 5-24,

R = 140 kips = 140049 lb

Miembro [1] Carga axial

Factor = 1/5

P = 28,01 kips = 28009,8 lb



Miembro [2] Fuerza de corte
 Factor = $\frac{1}{5}$
 $V = 28,01 \text{ kips} = 28009,8 \text{ lb}$

Miembro [3] Fuerza de corte
 Factor = $\frac{4}{5}$
 $V = 112 \text{ kips} = 112039,2 \text{ lb}$

Debido a la presión vertical:

$w = 7,56 \text{ k/ft} = 630 \text{ lb/in}$
 Longitud, $L = 21 \text{ ft} = 252 \text{ in}$

Miembro [1] Fuerza de corte
 % de area tributaria = $\frac{1}{2}$
 $V = 79,38 \text{ kips} = 79380 \text{ lb}$

Miembro [2] Carga axial
 % de area tributaria = $\frac{1}{2}$
 $P = 79,38 \text{ kips} = 79380 \text{ lb}$

Miembro [3] Carga axial
 % de area tributaria = $\frac{1}{2}$
 $P = 79,38 \text{ kips} = 79380 \text{ lb}$

Nota: Las cargas permanentes o muertas son pequeñas en comparación con las cargas explosivas y por tanto no son tomadas en cuenta en este paso.

PASO 5. DISEÑO (SEGÚN SECCIONES 5-37.3, 5-38 y 5-39)

a.

Miembro	Mp (k-ft)	P (k)	V (k)
[1]	208,4	28,0	79,4
[2]	416,7	79,4	28,0
[3]	416,7	79,4	112,0

Miembro	Mp (lb-in)	P (lb)	V (lb)
[1]	2,50E+06	28009,8	79380
[2]	5,00E+06	79380	28009,8
[3]	5,00E+06	79380	112039,2

b.

"Acero estructural A-36"

				Miembro	"Sx"
$f_y =$	36 ksi =	36000	lb/in ²		S (in ³)
$c =$	1,29	(Tabla 5-2 "A36, presión baja, flexión)		[1]	48,95
$a =$	1,1	10% (Comentario Sección 5-12.1)		[2]	97,90
$f_{ds} =$	51,084 ksi =	51084	lb/in ² (Ec 5-2)	[3]	97,90

Miembro	Sección	A (in ²)	d (in)	tw (in)	bf (in)	tf (in)	d/tw	S (in ³)
[1]	W14x48	14,1	13,79	0,340	8,030	0,595	40,559	70,3
[2]	W12x96	28,2	12,71	0,550	12,160	0,900	23,109	131
[3]	W12x96	28,2	12,71	0,550	12,160	0,900	23,109	131

c.

Miembro	Sección	bf/2tf	bf/2tf < bf/2tf (5-24) ?	Sección 5-24: bf/2tf = f(fy)
[1]	W14x48	6,7479	OK	bf/2tf = 8,5
[2]	W12x96	6,7556	OK	
[3]	W12x96	6,7556	OK	

d.

Miembro	Sección	P _y (kips)	P _y (lb)	P/P _y	d/tw (5-24. Ec. 5-17 y 5-18)
[1]	W14x48	507,6	5,08E+05	0,0552	63,362
[2]	W12x96	1015,2	1,02E+06	0,0782	61,15
[3]	W12x96	1015,2	1,02E+06	0,0782	61,15

Miembro	Sección	d/tw (5-24) > d/tw ?
[1]	W14x48	OK
[2]	W12x96	OK
[3]	W12x96	OK

e.

fdv =	28,096 ksi =	28096,2	lb/in ²	(Ec. 5-4)	
		Aw (in ²)			
Miembro	Sección	"Sección 5-23"	V _p (ksi)	V _p (lb/in ²)	V _p > fdv ?
[1]	W14x48	4,284	120,36	120364,1	OK
[2]	W12x96	6,0005	168,59	168591,2	OK
[3]	W12x96	6,0005	168,59	168591,2	OK

f.

Miembro	Sección	I _x (in ⁴)	I _y (in ⁴)	Z _x (in ³)	r _x (in)	r _y (in)
[1]	W14x48	485	51,4	78,4	5,85	1,91
[2]	W12x96	833	270	147	5,44	3,09
[3]	W12x96	833	270	147	5,44	3,09

Miembro	Sección	"Mpx" (ft-kips)	"Mpx" (in-lb)	K
[1]	W14x48	333,75	4,00E+06	0,75
[2]	W12x96	625,78	7,51E+06	1,52
[3]	W12x96	625,78	7,51E+06	1,52

Miembro	Sección	KL/rx	KL/ry	KL/r "max"
[1]	W14x48	32,308	98,9529	98,953
[2]	W12x96	43,588	76,7379	76,738
[3]	W12x96	43,588	76,7379	76,738

E = 29000 ksi = 2,90E+07 lb/in²
Cc = 126,1

Miembro	Sección	"Fa" (ksi)	"Fa" (lb/in ²)	"Mmx" (ft-kips)	"Mmx" (in-lb)	"Mmx ≤ Mpx?" Mm ≤ Mp?	Mpx/Mmx
[1]	W14x48	18,603	18602,94	257,52	3,090E+06	OK	1,30
[2]	W12x96	22,299	22298,64	598,13	7,178E+06	OK	1,05
[3]	W12x96	22,299	22298,64	598,13	7,178E+06	OK	1,05

Miembro	Sección	"F'ex" (ksi)	"F'ex" (lb/in ²)	"Pex" (kips)	"Pex" (lb)	"Pp" (kips)	"Pp" (lb)
[1]	W14x48	143,07	1,43E+05	3866,4	3,866E+06	720,284	7,203E+05
[2]	W12x96	78,60	7,86E+04	4248,2	4,248E+06	1440,57	1,441E+06
[3]	W12x96	78,60	7,86E+04	4248,2	4,248E+06	1440,57	1,441E+06

Miembro	Sección	Pu (kips)	Pu (lb)	P/Pu+...	P/Pu+... ≤ 1?	P/Pp	M/Mp+...	M/Mp+... ≤ 1?
[1]	W14x48	445,91	4,46E+05	0,756	OK	0,0389	0,624	OK
[2]	W12x96	1069	1,07E+06	0,678	OK	0,0551	0,666	OK
[3]	W12x96	1069	1,07E+06	0,678	OK	0,0551	0,666	OK

C = 0,85

PASO 6. CÁLCULO DE RIGIDEZ DEL PÓRTICO Y DEFLEXIÓN

Miembro	Sección	"Ix" I (in ⁴)	Peso (lb/ft)	Peso (lb/in)
[1]	W14x48	485	48	4
[2]	W12x96	833	96	8
[3]	W12x96	833	96	8

Ica = 833 in⁴ (Tabla5-14)

Ig = 485 in⁴ (Tabla5-14)

β = 1 (Tabla5-14) Fixed Base

D = 0,36043 (Tabla5-14)

C2 = 29,3 (Tabla5-14)

E = 2,90E+04 ksi = 2,90E+07 lb/in²

K = 186,44 k/in = 1,86E+05 lb/in

KL = 0,4125 (Ec. 5-51)

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Peso muerto, $W = 1940 \text{ lb}$ (Sección 5-41.6)
 $g = 32,2 \text{ ft/seg}^2 = 386,4 \text{ in/seg}^2$

$me = 60,248 \text{ lb-seg}^2/\text{ft} = 5,0207 \text{ lb-seg}^2/\text{in}$
 $TN = 0,0508 \text{ seg} = 50,767 \text{ seg}$ (Ec. 5-50)
 $T = 0,0401 \text{ seg} = 40,1 \text{ seg}$ "De la presión-tiempo FRONTAL"

$T/TN = 0,790$
 $P/Ru = 1,6$ (Nota Paso 6. Ejemplo 5A-6)
 $\mu = X_m/XE = 4,6$ (Figura 3-64a) "C1=1.000 y C2 = 1.000"

$Ru = 140,05 \text{ k} = 140049 \text{ lb}$ (Ec. 5-52)
 $XE = Ru/K = 0,751 \text{ in}$ (Ec. 5-53)
 $X_m = \delta = 3,48 \text{ in}$
 $\delta = 0,0223 * H = H/45$ Cumple $\delta ? = \text{OK}$

PASO 7. DEFLEXIÓN DE MECANISMOS LOCAL POSIBLE

a. Mecanismo de viga

Miembro Sección
 [1] W14x48

Para una respuesta elasto-plástica, tomar el factor de carga-masa promedio para una respuesta elástica y plástica.

$KLM = 0,77$ (Elástico) (Tabla 3-12)
 $0,66$ (Plástico) (Tabla 3-12)
 $0,715$ "Promedio"

$W = 4 \text{ lb/in}$
 $g = 386,4 \text{ in/seg}^2$ $m = 0,01035 \text{ in/seg}^2$
 $me = 0,0074 \text{ lb-seg}^2/\text{in}^2$
 $KE = 1071 \text{ lb/in}^2$ (Tabla 3-8)

$TN = 0,017 \text{ seg}$ (Ec. 5-15)
 $T = 0,0651 \text{ seg}$ "De la presión-tiempo sobre TECHO"

$T/TN = 3,9412$
 $Ru = 630 \text{ lb/in}$ (Tabla 5-13)
 $P = 504 \text{ lb/in}$
 $P/Ru = 0,8$
 $\mu = X_m/XE = 1,85$ (Figura 3-64a) "C1=1.000 y C2 = 1.000"

Chequeo de la rotación en los extremos de la viga,

$$\begin{aligned} XE &= Ru/KE = 0,588 \text{ in} \\ X_m &= 1,0882 \text{ in} \\ X_m/(L/2) &= 0,00864 (= \tan \theta) \\ \theta &= 0,4948 \text{ grados} \end{aligned}$$

$$\theta < \theta_{\max} ? = \text{OK}$$

b. Mecanismo de columna exterior

Miembro Sección
[3] W12x96

Para una respuesta elasto-plástica, tomar el factor de carga-masa promedio para una respuesta elástica y plástica:

$$\begin{aligned} KLM &= 0,77 \text{ (Elástico)} && \text{(Tabla 3-12)} \\ &0,66 \text{ (Plástico)} && \text{(Tabla 3-12)} \\ &0,715 \text{ "Promedio"} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= 8 \text{ lb/in} \\ g &= 386,4 \text{ in/seg}^2 && m = 0,0207 \text{ in/seg}^2 \\ m_e &= 0,0148 \text{ lb-sec}^2/\text{in}^2 \\ KE &= 12522 \text{ lb/in}^2 && \text{(Tabla 3-8)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_N &= 0,0068 \text{ seg} && \text{(Ec 5-15)} \\ T &= 0,0401 \text{ seg} && \text{"De la presión-tiempo FRONTAL"} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T/T_N &= 5,8698 \\ R_u &= 448718 \text{ lb} && R_u = 2876,4 \text{ lb/in} && \text{(Tabla 5-13)} \\ P &= 224078,4 \text{ lb} \\ P/R_u &= 0,4994 \\ \mu = X_m/XE &= 1 \text{ (Figura 3-64a)} && \text{"C1=1.000 y C2 = 1.000"} \end{aligned}$$

Chequeo de la rotación en los extremos de columnas,

$$\begin{aligned} XE &= Ru/KE = 0,230 \text{ in} \\ X_m &= 0,2297 \text{ in} \\ X_m/(L/2) &= 0,00294 (= \tan \theta) \\ \theta &= 0,1687 \text{ grados} \end{aligned}$$

$$\theta < \theta_{\max} ? = \text{OK}$$

Conclusion: Las deflexiones de los mecanismos local están dentro del criterio. La deflexión lateral es aceptable.

RESUMEN

Los miembros a ser usados en un análisis computacional son los siguientes:

Miembro	Sección
[1]	W14x48
[2]	W12x96
[3]	W12x96

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANEXO C

Diseño “preliminar” de la estructura aporticada de acero propuesta de la Fig. 4.22 del Capítulo 4 –compuesta de pórticos rígidos simples (A, B y C)– sometida a las cargas explosivas determinadas en el Anexo A. El diseño de los muros perimetrales no es incluido en este diseño. La dirección de la explosión de diseño es paralela a los pórticos. El diseño es realizado siguiendo los criterios y pautas establecidos en el manual técnico TM 5-1300 (1990)¹.

¹TM 5-1300. (1990). The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual, US Department of the Army, Navy, and Air Force. Washington DC.

DISEÑO "PRELIMINAR" DE ESTRUCTURA APORTICADA DE ACERO (TM 5-1300, 1990)

DESCRIPCIÓN: DISEÑO "PRELIMINAR" DE LA ESTRUCTURA APORTICADA DE ACERO PROPUESTA DE LA FIG. 4.22 DEL CAPÍTULO 4 -COMPUESTA DE PÓRTICOS RÍGIDOS SIMPLES (A, B Y C)- SOMETIDA A LAS CARGAS EXPLOSIVAS DETERMINADAS EN EL ANEXO A.

DATOS

1) CARGAS PRESIÓN-TIEMPO SE MUESTRAN EN EL ANEXO A.

De las cargas presión-tiempo:

Lateral = 5,7 psi (Max.)
Vertical = 2,0 psi (Max.)

2) CRITERIOS DE DISEÑO:

$\delta = H/ 25$
 $\theta_{max} = 2$ grados (para miembros individuales)

3) CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL SE MUESTRA EN LA FIG. 4.22 (CAPÍTULO 4).

4) ACERO ASTM A36.

PROCEDIMIENTO

PASO 1. CÁLCULO DE α

Separación entre pórticos, bh = 21 ft
Separación de viguetas, bv = 21 ft
qh = 1436,4 lb/in
qv = 504 lb/in
 $\alpha = 2,85$

PASO 2. ESTABLECIMIENTO DE LAS CARGAS ESTÁTICAS EQUIVALENTES

a. Mecanismo de viga local

DLF = 1,25 (Sección 5-41.3)
w = 7,56 k/ft = 630 lb/in

b. Mecanismo combinado o panel

DLF = 0,625 (Sección 5-41.3)
w = 3,78 k/ft = 315 lb/in

PASO 3. CAPACIDADES DE MOMENTO PLÁSTICO REQUERIDAS

C = 2 "Valores recomendados"
 C1 = 2 "Valores recomendados"
 n = 1
 α = 2,85
 H = 13 ft = 156 in
 L = 21 ft 252 in

Mecanismo de colapso	w (k/ft)	w (lb/in)	"Base empotrada"		"Base articulada"	
			Mp (k-ft)	Mp (lb-in)	Mp (k-ft)	Mp (lb-in)
1	7,56	630	208,373	2,50E+06	208,37	2,50E+06
2	7,56	630	130,046	1,56E+06	182,06	2,18E+06
3a	3,78	315	151,72 (C1≤2)	1,82E+06	455,16 (C1≤2)	5,46E+06
3b	3,78	315	151,72 (C1≥2)	1,82E+06	455,16 (C1≥2)	5,46E+06
4	3,78	315	165,883	1,99E+06	331,77	3,98E+06
5a	3,78	315	124,134 (C1≤2)	1,49E+06	273,1 (C1≤2)	3,28E+06
5b	3,78	315	124,134 (C1≥2)	1,49E+06	273,1 (C1≥2)	3,28E+06
6	3,78	315	124,134	1,49E+06	273,1	3,28E+06
			"Base empotrada"		"Base articulada"	
			Mp (k-ft) =	208,4	Mp (k-ft) =	455,16
			Mp (lb-in) =	2,50E+06	Mp (lb-in) =	5,46E+06

"Base empotrada"
 Vigas, Mp = 208,37 k-ft = 2,50E+06 lb-in
 Columna interior, C1*Mp = 416,745 k-ft = 5,00E+06 lb-in
 Columna exterior, C*Mp = 416,745 k-ft = 5,00E+06 lb-in

PASO 4. CARGAS EXIALES Y CORTE

Debido a la presión horizontal:

w = 3,78 k/ft = 315 lb/in

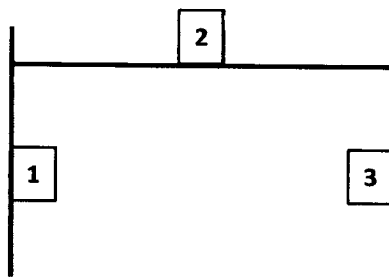
De la figura 5-24,

R = 140,05 kips = 140049 lb

Miembro [1] Carga axial

Factor = 1/5

P = 28,01 kips = 28009,8 lb



Miembro [2] Fuerza de corte
 Factor = $\frac{1}{5}$
 $V = 28,01 \text{ kips} = 28009,8 \text{ lb}$

Miembro [3] Fuerza de corte
 Factor = $\frac{4}{5}$
 $V = 112,04 \text{ kips} = 112039,2 \text{ lb}$

Debido a la presión vertical:

$w = 7,56 \text{ k/ft} = 630 \text{ lb/in}$
 Longitud, $L = 21 \text{ ft} = 252 \text{ in}$

Miembro [1] Fuerza de corte
 % de área tributaria = $\frac{1}{2}$
 $V = 79,38 \text{ kips} = 79380 \text{ lb}$

Miembro [2] Carga axial
 % de área tributaria = $\frac{1}{2}$
 $P = 79,38 \text{ kips} = 79380 \text{ lb}$

Miembro [3] Carga axial
 % de área tributaria = $\frac{1}{2}$
 $P = 79,38 \text{ kips} = 79380 \text{ lb}$

Nota: Las cargas permanentes o muertas son pequeñas en comparación con las cargas explosivas y por tanto no son tomadas en cuenta en este paso.

PASO 5. DISEÑO (SEGÚN SECCIONES 5-37.3, 5-38 y 5-39)

a.

Miembro	Mp (k-ft)	P (k)	V (k)
[1]	208,4	28,0	79,4
[2]	416,7	79,4	28,0
[3]	416,7	79,4	112,0

Miembro	Mp (lb-in)	P (lb)	V (lb)
[1]	2,50E+06	28009,8	79380
[2]	5,00E+06	79380	28009,8
[3]	5,00E+06	79380	112039,2

b.

"Acero estructural A-36"				"Sx"
fy =	36 ksi =	36000	lb/in ²	Miembro S (in ³)
c =	1,29 (Tabla 5-2 "A36, presión baja, flexión)			[1] 48,95
a =	1,1 10% (Comentario Sección 5-12.1)			[2] 97,90
fds =	51,084 ksi =	51084	lb/in ² (Ec 5-2)	[3] 97,90

Miembro	Sección	A (in ²)	d (in)	tw (in)	bf (in)	tf (in)	d/tw	"Sx" S (in ³)
[1]	W14x48	14,1	13,79	0,340	8,030	0,595	40,559	70,3
[2]	W12x96	28,2	12,71	0,550	12,160	0,900	23,109	131
[3]	W12x96	28,2	12,71	0,550	12,160	0,900	23,109	131

c.

Miembro	Sección	bf/2tf	bf/2tf < bf/2tf (5-24) ?	Sección 5-24: bf/2tf = f(fy)
[1]	W14x48	6,7479	OK	bf/2tf = 8,5
[2]	W12x96	6,7556	OK	
[3]	W12x96	6,7556	OK	

d.

Miembro	Sección	Py (kips)	Py (lb)	P/Py	d/tw (5-24. Ec. 5-17 y 5-18)
[1]	W14x48	507,6	5,08E+05	0,0552	63,362
[2]	W12x96	1015,2	1,02E+06	0,0782	61,15
[3]	W12x96	1015,2	1,02E+06	0,0782	61,15

Miembro	Sección	d/tw (5-24) > d/tw ?
[1]	W14x48	OK
[2]	W12x96	OK
[3]	W12x96	OK

e.

fdv =	28,096 ksi =	28096,2	lb/in ²	(Ec. 5-4)	
		Aw (in ²)			
Miembro	Sección	"Sección 5-23"	Vp (ksi)	Vp (lb/in ²)	Vp > fdv ?
[1]	W14x48	4,284	120,36	120364,1	OK
[2]	W12x96	6,0005	168,59	168591,2	OK
[3]	W12x96	6,0005	168,59	168591,2	OK

f.

Miembro	Sección	Ix (in ⁴)	Iy (in ⁴)	Zx (in ³)	rx (in)	ry (in)
[1]	W14x48	485	51,4	78,4	5,85	1,91
[2]	W12x96	833	270	147	5,44	3,09
[3]	W12x96	833	270	147	5,44	3,09

Miembro	Sección	"Mpx" (ft-kips)	"Mpx" (in-lb)	K
[1]	W14x48	333,75	4,00E+06	0,75
[2]	W12x96	625,78	7,51E+06	1,52
[3]	W12x96	625,78	7,51E+06	1,52

Miembro	Sección	KL/rx	KL/ry	KL/r "max"
[1]	W14x48	32,308	98,9529	98,953
[2]	W12x96	43,588	76,7379	76,738
[3]	W12x96	43,588	76,7379	76,738

E = 29000 ksi = 2,90E+07 lb/in²
Cc = 126,1

Miembro	Sección	"Fa" (ksi)	"Fa" (lb/in ²)	"Mmx" (ft-kips)	"Mmx" (in-lb)	"Mmx ≤ Mpx?"	Mm ≤ Mp?	Mpx/Mmx
[1]	W14x48	18,603	18602,94	257,52	3,090E+06	OK		1,30
[2]	W12x96	22,299	22298,64	598,13	7,178E+06	OK		1,05
[3]	W12x96	22,299	22298,64	598,13	7,178E+06	OK		1,05

Miembro	Sección	"F'ex" (ksi)	"F'ex" (lb/in ²)	"Pex" (kips)	"Pex" (lb)	"Pp" (kips)	"Pp" (lb)
[1]	W14x48	143,07	1,43E+05	3866,4	3,866E+06	720,284	7,203E+05
[2]	W12x96	78,60	7,86E+04	4248,2	4,248E+06	1440,57	1,441E+06
[3]	W12x96	78,60	7,86E+04	4248,2	4,248E+06	1440,57	1,441E+06

Miembro	Sección	Pu (kips)	Pu (lb)	P/Pu... ≤ 1?	P/Pu... ≤ 1?	P/Pp	M/Mp... ≤ 1?	M/Mp... ≤ 1?
[1]	W14x48	445,91	4,46E+05	0,756	OK	0,0389	0,624	OK
[2]	W12x96	1069	1,07E+06	0,678	OK	0,0551	0,666	OK
[3]	W12x96	1069	1,07E+06	0,678	OK	0,0551	0,666	OK

C = 0,85

PASO 6. CÁLCULO DE RIGIDEZ DEL PÓRTICO Y DEFLEXIÓN

Miembro	Sección	"Ix" (in ⁴)	Peso (lb/ft)	Peso (lb/in)
[1]	W14x48	485	48	4
[2]	W12x96	833	96	8
[3]	W12x96	833	96	8

Ica = 833 in⁴ (Tabla5-14)

Ig = 485 in⁴ (Tabla5-14)

β = 1 (Tabla5-14) Fixed Base

D = 0,36043 (Tabla5-14)

C2 = 29,3 (Tabla5-14)

E = 2,90E+04 ksi = 2,90E+07 lb/in²

K = 186,44 k/in = 1,86E+05 lb/in

KL = 0,4125 (Ec. 5-51)

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Peso muerto, $W = 10797 \text{ lb}$ (Sección 5-41.6)
 $g = 32,2 \text{ ft/seg}^2 = 386,4 \text{ in/seg}^2$

$m_e = 335,31 \text{ lb-seg}^2/\text{ft} = 27,943 \text{ lb-seg}^2/\text{in}$
 $TN = 0,1198 \text{ seg} = 119,77 \text{ seg}$ (Ec. 5-50)
 $T = 0,0401 \text{ seg} = 40,1 \text{ seg}$ "De la presión-tiempo FRONTAL"

$T/TN = 0,335$
 $P/Ru = 1,6$ (Nota Paso 6. Ejemplo 5A-6)
 $\mu = X_m/XE = 1,55$ (Figura 3-64a) "C1=1.000 y C2 = 1.000"

$Ru = 140,05 \text{ k} = 140049 \text{ lb}$ (Ec. 5-52)
 $XE = Ru/K = 0,7512 \text{ in}$ (Ec. 5-53)
 $X_m = \delta = 1,16 \text{ in}$
 $\delta = 0,0075 * H = H/134$ Cumple $\delta ? = \text{OK}$

PASO 7. DEFLEXIÓN DE MECANISMOS LOCAL POSIBLE

a. Mecanismo de viga

Miembro Sección
 [1] W14x48

Para una respuesta elasto-plástica, tomar el factor de carga-masa promedio para una respuesta elástica y plástica:

$KLM = 0,77$ (Elástico) (Tabla 3-12)
 $0,66$ (Plástico) (Tabla 3-12)
 $0,715$ "Promedio"

$W = 27,63 \text{ lb/in}$
 $g = 386,4 \text{ in/seg}^2$ $m = 0,07151 \text{ in/seg}^2$
 $m_e = 0,0511 \text{ lb-seg}^2/\text{in}^2$
 $KE = 1071 \text{ lb/in}^2$ (Tabla 3-8)

$TN = 0,043 \text{ seg}$ (Ec. 5-15)
 $T = 0,0651 \text{ seg}$ "De la presión-tiempo sobre TECHO"

$T/TN = 1,4996$
 $Ru = 630 \text{ lb/in}$ (Tabla 5-13)
 $P = 504 \text{ lb/in}$
 $P/Ru = 0,8$
 $\mu = X_m/XE = 1,5$ (Figura 3-64a) "C1=1.000 y C2 = 1.000"

Chequeo de la rotación en los extremos de la viga,

$$XE = Ru/KE = 0,588 \text{ in}$$

$$Xm = 0,8824 \text{ in}$$

$$Xm/(L/2) = 0,00700 (= \tan \theta)$$

$$\theta = 0,4012 \text{ grados}$$

$$\theta < \theta_{\max} ? = \text{OK}$$

b. Mecanismo de columna exterior

Miembro Sección
[3] W12x96

Para una respuesta elasto-plástica, tomar el factor de carga-masa promedio para una respuesta elástica y plástica:

$$\begin{aligned} KLM &= 0,77 \text{ (Elástico)} && \text{(Tabla 3-12)} \\ &0,66 \text{ (Plástico)} && \text{(Tabla 3-12)} \\ &0,715 \text{ "Promedio"} \end{aligned}$$

$$W = 25,88 \text{ lb/in}$$

$$g = 386,4 \text{ in/seg}^2 \quad m = 0,06698 \text{ in/seg}^2$$

$$m_e = 0,0479 \text{ lb-seg}^2/\text{in}^2$$

$$KE = 12522 \text{ lb/in}^2 \quad \text{(Tabla 3-8)}$$

$$TN = 0,0123 \text{ seg} \quad \text{(Ec 5-15)}$$

$$T = 0,0401 \text{ seg} \quad \text{"De la presión-tiempo FRONTAL"}$$

$$T/TN = 3,2635$$

$$Ru = 448718 \text{ lb} \quad Ru = 2876,4 \text{ lb/in} \quad \text{(Tabla 5-13)}$$

$$P = 224078,4 \text{ lb}$$

$$P/Ru = 0,4994$$

$$\mu = Xm/XE = 1 \text{ (Figura 3-64a)} \quad \text{"C1=1.000 y C2 = 1.000"}$$

Chequeo de la rotación en los extremos de columnas,

$$XE = Ru/KE = 0,230 \text{ in}$$

$$Xm = 0,2297 \text{ in}$$

$$Xm/(L/2) = 0,00294 (= \tan \theta)$$

$$\theta = 0,1687 \text{ grados}$$

$$\theta < \theta_{\max} ? = \text{OK}$$

Conclusion: Las deflexiones de los mecanismos local están dentro del criterio. La deflexión lateral es aceptable.

RESUMEN

Los miembros a ser usados en un análisis computacional son los siguientes:

Miembro	Sección
[1]	W14x48
[2]	W12x96
[3]	W12x96

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ANEXO D

Diseño “preliminar” de las vigas secundarias de acero de la estructura aportificada propuesta de la Fig. 4.22 del Capítulo 4 (V1 A-B = V1 B-C = V2 A-B = V2 B-C) sometidas a la carga explosiva sobre el techo determinada en el Anexo A. El diseño es realizado siguiendo los criterios y pautas establecidos en el manual técnico TM 5-1300 (1990)ⁱ.

ⁱTM 5-1300. (1990). The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual, US Department of the Army, Navy, and Air Force. Washington DC.

DISEÑO "PRELIMINAR" DE VIGA DE ACERO (TM 5-1300, 1990)

DESCRIPCIÓN DISEÑO "PRELIMINAR" DE LAS VIGAS SECUNDARIAS DE ACERO DE LA ESTRUCTURA APORTICADA PROPUESTA DE LA FIG. 4.22 DEL CAPÍTULO 4 (V1 A-B = V1 B-C = V2 A-B = V2 B-C) SOMETIDAS A LA CARGA EXPLOSIVA SOBRE EL TECHO DETERMINADA EN EL ANEXO A.

DATOS

1) CARGA PRESIÓN-TIEMPO SE MUESTRA EN EL ANEXO A.

De las cargas presión-tiempo:

Vertical = 2 psi

2) CRITERIO DE DISEÑO:

$\theta_{max} = 2$ grados

3) CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL SE MUESTRA EN LA FIG. 4.22 (CAPÍTULO 4).

Longitud, L = 21 ft

Separación entre vigas, b = 3 ft C/3ft (21ft/7) (Supuesto)

4) ACERO ASTM A36.

$f_y = 36$ ksi

$E = 29000$ ksi

PASO 2. CARGA ESTÁTICA EQUIVALENTE (Sección 5-22.3)

DLF = 1

w = 0,864 k/ft

PASO 3. "Mp" REQUERIDO

$M_p = 47,628$ k-ft (Tabla 3-1) "Simplemente apoyada"

PASO 4. SELECCIÓN DEL MIEMBRO

a = 1,1 (Sección 5-13.2)

c = 1,29 (Tabla 5-2)

$f_{ds} = 51,084$ ksi (Ec. 5-2)

S + Z = 22,376 in³ (Ec. 5-7) "Requerido"

Sección: W10x15

d = 9,99 in weight, w = 15 lb/ft

tw = 0,23 in I = 68,9 in⁴ "Ix"

bf = 4 in

tf = 0,27 in

S = 13,8 in³

Z = 15,632 in³

S + Z = 29,432 in³ S + Z ≥ S + Z (req.) ? = OK

Mp = 62,647 k-ft

Chequeo de pandeo local

d/tw = 43,435

bf/2tf = 7,4074

bf/2tf = 8,5 (Sección 5-24)

d/tw < 412/(fy)^{1/2} ? = OK (Ec. 5-17)

bf/2tf (Sección 5-24) ≥ bf/2tf ? = OK (Sección 5-24)

PASO 5. CÁLCULO DE LA MASA, m

Peso de la losa, w_l = 6 lb/ft² "Estimado"

g = 32,2 ft/seg²

m = 21521,74 k·ms²/ft

PASO 6. CÁLCULO DE LA MASA EFECTIVA, me

KLM (elástico) = 0,78

KLM (plástico) = 0,66

KLM (promedio) = 0,72 (Tabla 3-12)

me = 15495,65 k·ms²/ft

PASO 7. CÁLCULO DE Ke

Ke = 115,07 k/ft (Tabla 3-8) "f(condición de apoyo)"

"Simplemente apoyada"

PASO 8. CÁLCULO de TN

TN = 72,913 ms (Ec. 5-15)

T = 47,6 ms

PASO 9. RELACIÓN DE DUCTILIDAD

$$\begin{aligned}T/TN &= 0,6528 \\P &= 18,144 \text{ kips} \\Ru &= 23,866 \text{ kips} \quad \text{"Simplemente apoyada"} \\P/Ru &= 0,7603\end{aligned}$$

$$\mu = X_m/X_E = 1,5 \quad (\text{De la fig. 3-64a, } C_1=1.000 \text{ y } C_2=1.000)$$

PASO 10. CHEQUEO DEL DIF

$$\begin{aligned}te/T &= 0,41 \quad (\text{De la fig. 3-64a, } C_1=1.000 \text{ y } C_2=1.000, \text{ para } P/Ru \text{ y } T/TN) \\te &= 19,516 \text{ ms} \\d\varepsilon/dt &= 9,03E-02 \quad \text{in/in/s} \quad (\text{Ec. 5-1})\end{aligned}$$

$$DIF = 1,28 \quad (\text{De la fig. 5-2})$$

PASO 11. CÁLCULO DE X_e

$$\begin{aligned}X_e &= 2,4888 \text{ in} \\X_m = \mu X_e &= 3,7332 \text{ in} \\tg\theta &= 0,0296 \quad (\text{Tabla 3-5}) \quad \text{"Simplemente apoyada"} \\ \theta &= 1,6971 \text{ grados}\end{aligned}$$

PASO 12. CHEQUEO DEL CORTE

Esfuerzo de fluencia dinámico en corte

$$fdv = 28,096 \text{ ksi} \quad (\text{Ec. 5-4})$$

Capacidad última de corte

$$\begin{aligned}Aw &= 2,1735 \text{ in}^2 \\Vp &= 61,067 \text{ kips} \quad (\text{Ec. 5-16})\end{aligned}$$

Corte max.

$$\begin{aligned}Vs &= 11,933 \text{ kips} \quad (\text{Tabla 3-9}) \quad \text{"Simplemente apoyada"} \\Vp > Vs ? &= \text{OK}\end{aligned}$$

APENDICES

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

APÉNDICE A

TIPOS DE EXPLOSIVOS Y EXPLOSIONES Y EL PROCESO DE UNA DETONACIÓN

A.1. Introducción.-

El entendimiento del proceso físico de una explosión requiere de una breve mirada a la física asociada con la descomposición de los materiales explosivos. Los parámetros físicos claves asociadas con esta descomposición son el calor, la presión y el choque. En este apéndice, la interacción e interdependencia de estos parámetros es discutida.

El propósito de este apéndice es dar a conocer lo referente a los tipos de explosivos y explosiones y el mecanismo de detonación de un explosivo.

De las distintas maneras en que puede presentarse una explosión, se considera solo la explosión química producida por una reacción química de descomposición ordinariamente rápida.

A.2. Tipos de explosivos.-

Los materiales explosivos pueden ser clasificados según su estado físico como sólidos, líquidos, o gases. Los explosivos sólidos son principalmente explosivos altos o de alta potencia, para los cuales los efectos de la explosión son mejor conocidos. Ellos también pueden ser clasificados en base a su sensibilidad frente a la ignición como explosivos primarios o secundarios. Los explosivos primarios pueden ser fácilmente detonados con la ignición simple de una chispa, llama o impacto. Los explosivos secundarios detonan creando ondas de choque explosivas, que causan un daño a los alrededores.

La Fig. A.1 muestra un desglose de materiales energéticos en familias diseñado para propósitos específicos asociados con diferentes tipos de aplicaciones de armas y usos civiles de explosivos.

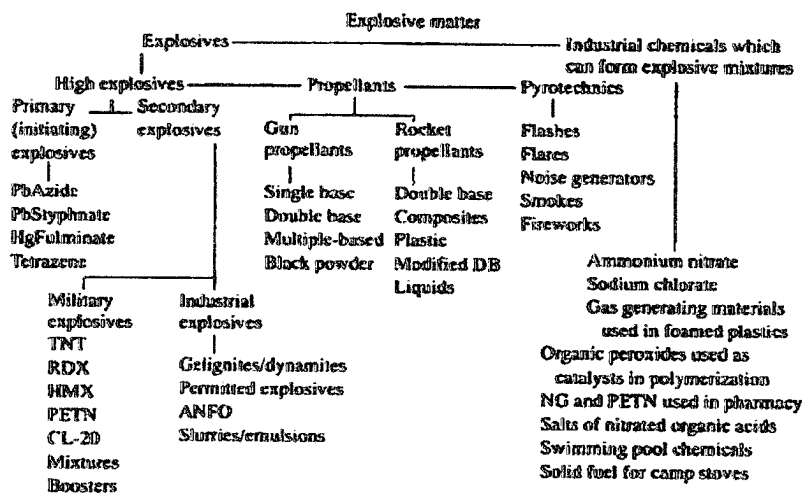


Fig. A.1. Clasificación de materiales explosivos (tomada de Zukas & Walters, 1998).

Las propiedades para varios explosivos son proporcionadas en la Tabla A-1.

La siguiente bibliografía (según Zukas & Walters, 2002) no es exhaustiva, pero es un punto de partida para estudiar con mayor detalle la naturaleza y fundamentos de los explosivos.

- Urbanski, T.: Chemistry and Tecnology of Explosives, Pergamon Press, Oxford (1964).
- Cook, M. A.: Science of High Explosives, Reinhold, New York (1959).
- Bowden, F. P. & Yoffe, A. D.: Fast Reactions in Solids, Butterworth Scientific, London (1958).
- AMC Pamphlet AMCP 706-180: Engineering Design Handbook; Principles of Explosive Behavior, US Army Materiel Command (1972).
- AMC Pamphlet AMCP 706-177: Engineering Design Handbook; Properties of Explosive of Military Interest, US Army Materiel Command (1971).
- Marinkas, P.L.: Organic Energetic Compounds, Nova Science, Commack, NY (1996).

Tabla A-1. Propiedades de algunos de explosivos más comunes (tomada de Zukas & Walters, 2002).

Explosive	Charge density (ρ) g/cm ³	Velocity of detonation (D) m/s	Detonation pressure, GPa	Molecular weight	Activation energy (E) kcal/mole	Heat of decomposition ^a (Q) cal/g	Pre-explosion freq. fact. (A) s ⁻¹	Thermal conductivity (k) cal/cm ² °C ² s	Heat capacity ^b (C _p) cal/g °C	(Source(s) of data); Notes, appearance, etc.
NC	1.58	7300	21.0 (calc)	(262.6) ₀						(b): 13.35% N
NG	1.59	7650	25.2	227.1						(b): liquid
NQ	1.78	7147	28.2	104.1	57.1	500	8.73×10^{22}	0.00098 (25-50°C)	0.269 + 0.00077	(a): 37 < T °C < 167; High-boil density, recrystallized from water
Picric acid	1.60	7260	26.5 (calc)	229.1				2.4×10^{-4}	0.234 at 0°C	(b): yellow; obsolete
TNT	1.62	7045	18.9	227.13	34.0	300	2.51×10^{21}	6.22×10^{-4} < 45 °C 5.89×10^{-4} < 75 °C	0.254 + 0.000757 0.309 + 0.000557	(a): 17 < T °C < 67 97 < T °C < 150 (b): WWII material still in service
Ammonium picrate	1.63	6850		246						(b): WWII material still in service
Tetryl	1.614	7479	22.64	287.15	38.4	500	2.51×10^{23}	7×10^{-6}	0.211 + 0.000267	(a): -100 < T °C < 300; yellow
PETN	1.67	7075	31.0	316.35	47.0	300	6.3×10^{20}		0.239 + 0.0037	(a): 32 < T °C < 127
RDX	1.787	8639	33.79	222.13	47.1	500	2.02×10^{22}	2.53×10^{-6}	$0.232 + 7.5 \times 10^{-7} T$	(b): 32 < T °C < 167
HMX	1.89	9410	39.5	296.37	52.7	500	5×10^{20}	0.0012 (25°C)	0.231 + 0.000557	(a): 37 < T °C < 167 (b): Types II and IV also
HINS I	1.60	6800	20.0 (calc)							(b): Types II and IV also
TATB	1.847	7660	25.9	238.18	59.9	600	3.18×10^{22}	1.3×10^{-3}	0.215 + 0.013247	(a): yellow
PbAzide	4.38	5500		291				4.2×10^{-4}	0.09	(b):
PbStyphnate	3.02	5200		468						(b):
AN	1.72	1500 at 0.7 density		80.05				$2.9-3.9 \times 10^{-6}$	0.4 at 0°C	(b): hygroscopic
Black powder	1.92	1350 (decomposition)								(b): black-grey
Oxalimidocubane	2.1 (calc)	6893 (calc)	48.9 (calc)	464						(c): Not yet made

(a) *LASL Explosive Property Data*; Gibbs, T.R. and Peppinoto, A., University of California Press (1980).
 (b) *LLNL Explosives Handbook*; Dobratz, B.M., UCRL-52997, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA (1981).
 (c) Minder, C.L.: Private communication.
 N.B.: Units are as quoted in the sourcebooks.
^aAt constant pressure.

A.3. Tipos de explosiones.-

Las explosiones pueden ser clasificadas en base a su naturaleza como físicas o mecánicas, químicas o nucleares.

- Por explosión física o mecánica entendemos aquella que se produce como consecuencia de la liberación de presión a que se ve sometida la sustancia que reacciona. Es, sencillamente, una brusca expansión.
- Las explosiones químicas se producen al reaccionar químicamente una sustancia o mezcla explosiva por cualquier causa (interna o externa a la propia sustancia o mezcla explosiva), convirtiéndose totalmente o en su mayor parte

en gases, con desprendimiento de gran cantidad de calor, por lo que se desarrolla una gran potencia mecánica. El volumen y temperatura que alcanzan los gases depende de la composición química de la especie química o mezcla de especies químicas; y la potencia mecánica depende de la velocidad con la que se produce la reacción.

- Las explosiones nucleares están basadas en la enorme energía liberada en las reacciones al nivel del núcleo atómico de determinados elementos. En este tipo de reacciones se produce una pérdida de masa que se transforma en energía.

La Fig. A.2 muestra una clasificación de explosiones. Es posible para más de un tipo de clasificación ocurra en cualquier incidente particular.

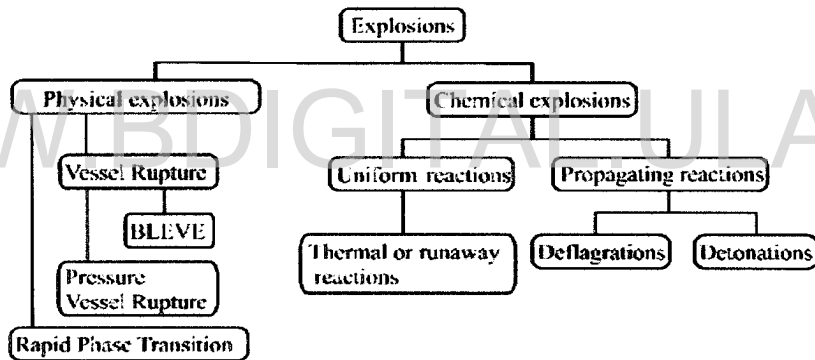


Fig. A.2. Relación entre los diferentes tipos de explosiones (tomada de Crowl, 2003)

A.3 Proceso de una explosión.-

Las explosiones químicas, dependiendo de las condiciones a las cuales ellos están expuestos, pueden ofrecer diferentes comportamientos que serian esperados de su naturaleza explosiva. Los procesos de descomposición de un compuesto explosivo de alta potencia son:

- Combustión ordinaria (en espacios abiertos a presión normal): Es el fenómeno mediante el cual las sustancias son capaces de combinarse con el oxígeno atmosférico con desprendimiento de gases y producción de llamas.

La combustión se inicia con una aportación externa de calor y, una vez iniciada, avanza en el volumen del explosivo por capas paralelas a la superficie que se quema, las cuales sucesivamente van entrando en combustión por el calor transmitido y por el choque de partículas producidas en la combustión.

La velocidad de este proceso, llamada velocidad de combustión, depende de las condiciones en las que se encuentre el explosivo y de la propia naturaleza del mismo, siendo del orden de entre algunos centímetros a algunos metros por segundo.

- Deflagración (combustión a presión en espacios cerrados): Es un fenómeno químico de carácter explosivo, consistente en un proceso de combustión acelerada de carácter intra o intermolecular. En la deflagración, la velocidad de reacción permite comunicar el calor por conductividad térmica, por lo que su avance se produce en capas paralelas a su superficie.

La velocidad de este fenómeno es función de la temperatura, presión y de su confinamiento, y puede alcanzar órdenes de algunos metros o decenas de metros por segundo, –puede alcanzar una velocidad de 2000 m/seg (Mora, 2008)–.

- Detonación: La detonación es, al igual que la deflagración, un fenómeno de carácter explosivo (se produce una reacción explosiva), que se propaga en el medio inicial por dos fenómenos autoentretenidos mutuamente, uno físico (onda de choque) y otro químico (reacción química de oxidación). La onda de choque, al actuar sobre una partícula, provoca su compresión dinámica local, que calienta bruscamente la materia y produce su autoinflamación, la cual suministra la energía necesaria para mantener la onda de choque.

Para una descomposición química definida, la velocidad de detonación, en función de la densidad, es de un orden de magnitud de miles de metros por segundo –típicamente entre 5000 y 8000 m/seg (NRC, 1995)–.

Tanto la naturaleza del mismo compuesto explosivo como el sistema de iniciación y las condiciones externas gobiernan el proceso de descomposición.

A.4. Proceso de detonación.-

El proceso de detonación se puede originar en un compuesto explosivo de alta potencia mediante una onda de choque capaz de provocar la reacción química de descomposición, de una forma tal que la energía liberada en la reacción sea capaz de mantener de una forma continua la onda de choque.

En una reacción de detonación son precisas tres condiciones relacionadas entre sí:

- Estímulo que provoque la reacción inicial.
- Energía positiva de la reacción capaz de alimentar la onda de choque que se ha iniciado.
- Celeridad suficiente en la transmisión de la energía, desprendida en la reacción, a la onda de choque para que ésta se mantenga.

De lo expuesto hasta el momento, se deduce que para que se produzca una detonación, es necesario que en la descomposición de las moléculas se desprenda una cantidad de energía suficiente para llegar a su energía de iniciación o activación, y además, que esta energía sea transferida a las moléculas circundantes en cantidad igual o superior a su energía de activación.

La energía de iniciación puede ser suministrada de varios modos, dependiendo del explosivo en cuestión. En los explosivos bajos (deflagrantes), la energía de una llama es suficiente; mientras que en explosivos altos o detonados un tipo de onda de choque de energía es necesaria.

Una vez que el explosivo ha sido iniciado, el primer efecto producido es la generación de una onda de presión o de choque que se propaga a través de su propia masa. Esta onda es el portador de la energía necesaria para activar las moléculas de la masa del explosivo que están alrededor del foco energizado inicial en la cual entonces se inicia una reacción en cadena.

Al mismo tiempo en que esta onda es producida, la masa del explosivo que reacciona libera una gran cantidad de gases de temperatura alta. Si esta presión secundaria actúa sobre el resto de la masa que no es detonada, su efecto es sumado a aquella de la onda de presión primaria, pasando del proceso de deflagración a detonación (Fig. A.3).

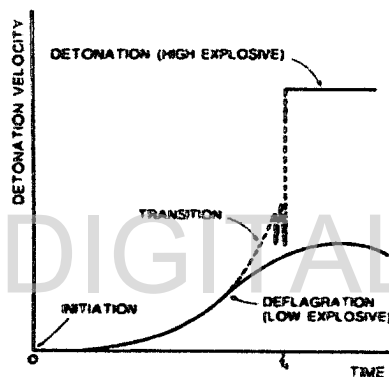


Fig. A.3. Proceso de detonación (tomado de López, López & Ayala (1995)).

Si la onda de presión del gas actúa al contrario en la masa del explosivo que no es reaccionada, un sistema de deflagración lenta ocurre, haciendo más lenta la reacción del explosivo y causando una pérdida de energía en la onda de detonación primaria que puede hacer incapaz de activar el resto de la masa del explosivo, así deteniendo la detonación.

Como ha descrito anteriormente, la detonación consiste en la propagación de una reacción química que se mueve a través del explosivo a velocidad supersónica, transformándolo en nuevos compuestos químicos. La característica básica de estas reacciones es que es iniciada y sostenida por una onda de choque supersónica.

Como se indica en la Fig. A.4, un choque inicial comienza la transformación química que ocurre a través de la zona de reacción para finalizar en el llamado plano Chapman-Jouguet (C-J) donde el balance químico es producido, al menos en detonaciones ideales.

En explosivos comerciales, importantes reacciones químicas son desarrolladas detrás del plano C-J, sobre todo las reacciones de los ingredientes en la forma de partícula grande y los metales combustibles. Estas reacciones secundarias pueden afectar el desempeño del explosivo, pero no tener la influencia sobre la estabilidad o la velocidad de detonación.

En un explosivo de alta potencia la zona de reacción primaria es por lo general completamente estrecha, sólo milímetros, mientras en explosivos de baja potencia esta zona es mucho más amplia y, en caso de ANFO, pueden ser de varios centímetros.

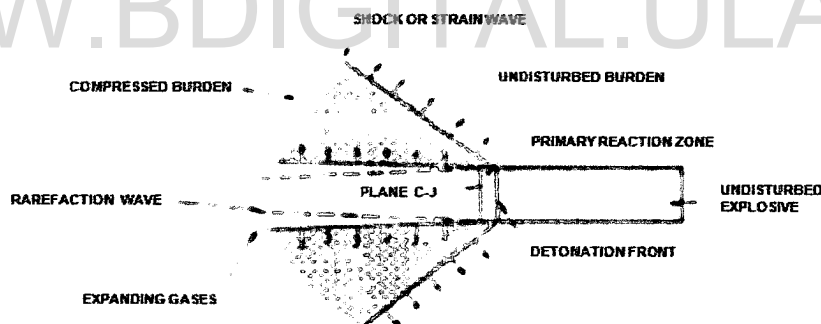


Fig. A.4. Proceso de detonación de una carga explosiva (tomado de López et al. (1995).

Los productos de la reacción están detrás del plano C-J, y en algunos casos son las partículas inertes. La mayoría de los productos son gases que alcanzan una temperatura de 1500 a 4000 °C y presiones que van de 2 a 100 GPa. Los gases bajo estas condiciones se expanden rápidamente y producen una onda de choque o de deformación en el medio circundante.

En el Fig. A.5 un perfil simplificado de una columna explosiva es mostrado. La onda de detonación, que es caracterizada por un aumento repentino de la presión, se desplaza hacia el derecho a velocidad supersónica. Detrás del nivel de presión máxima una contracción es producida como consecuencia de la conservación momentánea que compensa el avanzado impulso generando una onda de rarefacción que es transmitida en dirección contraria.

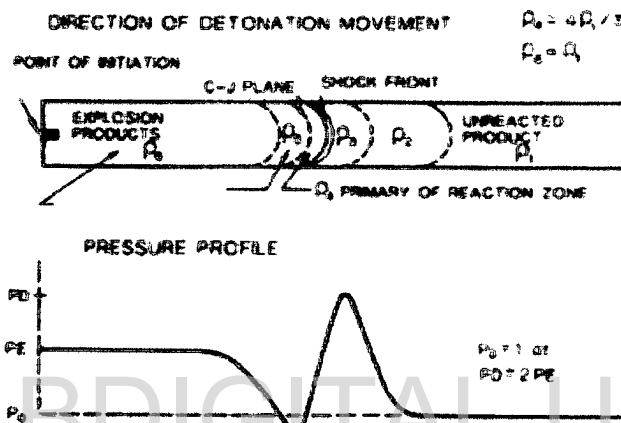


Fig. A.5. Perfil de presión en la detonación de una columna explosiva (tomado López et al. (1995)..

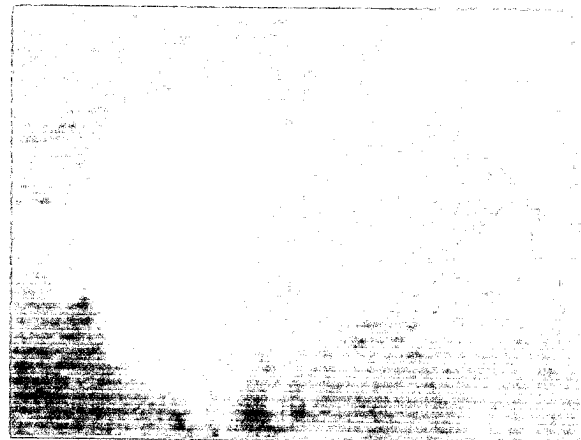


Foto A.1. Detonación de una carga no confinada (Nitro Nobel, tomado de López et al. (1995).

A.5. Referencias.-

- Crowl, D. (2003). Understanding Explosions. Center for Chemical Process Safety/AIChE.
- López J., C., López J., E. & Ayala C., F. J. (1995). Drilling and Blasting of Rocks. 1ª Edition. Taylor & Francis.
- Mora Ch., H. (2008). Manual del Vigilante de Explosivos. 1ª Edición. Editorial Club Universitario (ECU). España.
- NRC -National Research Council-. (1995). Protecting Buildings from Bomb Damage. National Academy Press. Washington D. C.
- Walters, W. P. & Zukas, J. A. (1998). Fundamental of Shaped Charges. CMC Press.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

APÉNDICE B

PREDICCIÓN DE CARGA EXPLOSIVA

B.1. Introducción.-

Es sabido que la rápida expansión de la masa del gas caliente resultante de la detonación de una carga explosiva ocasiona una onda de compresión denominada onda de choque, la cual es propagada a través del aire (Stuhmiller, Phillips & Richmond, 1991), y que estas ondas, como expresa Beshara (1994), pueden provenir de la detonación de explosivos de alta potencia, incluyendo dispositivos nucleares, o de explosivos de baja potencia tales como gases inflamables y vapores. Cuando la onda de choque de una explosión en el aire sale del centro de la detonación, viaja como una onda incidente hasta que choca con un objeto. Esta onda que se propaga en el aire tiene una serie de parámetros o características que la definen. Cabe indicar que en este capítulo al referirse a detonaciones, explosiones o propagación en el aire se está señalando que ninguna amplificación de la onda ocurre entre la carga explosiva y algún objeto al que pueda impactar.

Se conoce que la función o historia presión-tiempo de una típica onda de choque se caracteriza por dos regiones, una positiva y otra negativa. Cuando es positiva constituye la fase positiva y cuando es negativa, la fase negativa. Típicamente, los parámetros más importantes de la onda de choque usados para calcular la respuesta de estructuras a cargas explosivas son los correspondientes a la fase positiva (USACE PDC, 2006). En algunas situaciones, de acuerdo al TM 5-1300 (1990), los parámetros de la fase negativa son requeridos para predecir la función presión-tiempo de la onda actuante sobre una estructura; sin embargo, la fase negativa no es importante para el diseño y es usualmente ignorada (Krauthammer, 2008).

Según el ASCE (1997), para el diseño de estructuras resistente a explosiones, los principales parámetros de la onda de choque requeridos para definir la carga explosiva sobre estas estructuras son: la sobrepresión máxima (positiva), P_o , su

duración (fase positiva), t_d , y el correspondiente impulso (positivo), I_o . De esta forma, como señala Luccioni & Ambrosini (2005) el primer paso para el análisis y diseño es la estimación fidedigna y precisa de las presiones e impulso actuantes sobre la estructura. Estas características de la onda de choque generadas por una explosión depende tanto de la energía liberada del explosivo y la naturaleza del medio a través del cual se propaga esta onda (Beshara, 1994).

La sobrepresión máxima es el parámetro generalmente más definido y medido (Sierra, 2006). La sobrepresión máxima que existe en una onda de choque antes de que sea afectada por alguna estructura u obstáculo, es frecuentemente referenciada como la sobrepresión lateral máxima, la sobrepresión incidente máxima o meramente sobrepresión máxima –TM 5-1300 (1990) citado Ngo, Mendis, Gupta & Ramsay (2007)–. Tanto esta sobrepresión como su duración (fase positiva) en cualquier punto localizado en el espacio más allá del centro de la explosión son funciones del tipo y la masa del material explosivo y de la distancia de la explosión (Shope, 2006). El impulso específico, según Sierra (2006), es la integral de la fuerza variable en función del tiempo multiplicada por cada uno de los diferenciales de tiempo en que se divide el tiempo que actúa.

Estos parámetros que definen la onda de choque para materiales explosivos convencionales de alta o gran potencia, como por ejemplo TNT, PETN ó RDX, han sido el foco de un número de estudios. Existen muchas soluciones para estos parámetros tanto desde el punto de vista numérico como de mediciones experimentales, como por ejemplo las presentadas por Kinney & Graham (1985), Smith & Hetherington (1994), Baker, Cox, Westine, Kulesz & Strehlow (1983) – citados por Luccioni & Ambrosini (2005)– y Kingery & Bulmash (1984). Los resultados son usualmente presentados en gráficos, tablas o ecuaciones basadas en resultados experimentales o numéricos como las tablas dadas por Kinney & Graham (1985) o ecuaciones como las presentadas por Smith & Hetherington (1994), por citar algunos –Luccioni & Ambrosini, 2005–. Por lo general, estos resultados usan la distancia escalada característica Z .

Los valores de los parámetros de las ondas de choque de explosiones en el aire difieren, por supuesto, de un conjunto de resultados experimentales y numéricos a otro (ASCE, 1999); por consiguiente, uno puede obtener predicciones bastantes diferentes de sobrepresión máxima, impulso y duración. La exactitud de las predicciones y mediciones en la cercanía de la superficie del terreno es menor que en la lejanía de dicha superficie, probablemente debido a la complejidad del fenómeno de las explosiones –Smith & Hetherington (1994) citado por Luccioni & Ambrosini (2005)–.

Beshara (1994) expresa que estos parámetros son medidos para explosiones controladas en ensayos experimentales y que tales ensayos son referidos como explosiones de referencia (en inglés, reference explosions). Para otras cargas explosivas y diferentes distancia medida del centro del explosivo, leyes de escalamiento son empleadas.

La mayor cantidad de datos recopilados de explosiones en el aire para materiales explosivos de gran potencia están basados en explosivos esféricos. Sin embargo, existe gran cantidad de dispositivos explosivos que no son de forma esférica (cilíndrico, cordón detonante, cubos, etc.) –DOE/TIC-11268, 1980–.

Estos datos pueden ser ampliados para incluir otros materiales explosivos, incluso armas nucleares, relacionando la energía explosiva de la masa de estos materiales con la masa equivalente de TNT. La equivalencia de los materiales explosivos relativo al TNT puede ser afectado por otros factores tales como la forma del material, la naturaleza de la fuente explosiva, el rango de presiones considerado, entre otros (Beshara, 1994).

Además de la sobrepresión máxima, la duración y el impulso específico, otros parámetros de las ondas de choque son de particular interés. Estos parámetros secundarios, definidos de esta forma por ASCE (1997), son: la presión dinámica máxima (q_o), la velocidad del frente de choque (U), la presión reflejada máxima (P_r)

y la longitud de la onda explosiva (L_w). Cada uno de estos parámetros están dados por las siguientes relaciones (ASCE, 1997):

$$q_o = \frac{2,5P_o^4}{(7P_a + P_o)} \quad (\text{psi}) \quad \text{Ec. B.1}$$

$$U \approx 1130 (1 + 0,058 P_o)^{0,5} \quad (\text{ft/seg}) \quad \text{Ec. B.2}$$

$$P_r = (2 + 0,05 P_o) P_o \quad (P_o \text{ en psi}) \quad \text{Ec. B.3}$$

$$L_w \approx U t_d \quad \text{Ec. B.4}$$

donde P_a es la presión atmosférica estándar. Usualmente estos parámetros secundarios pueden ser requeridos para obtener los parámetros principales de la onda de choque señalados anteriormente.

En esta perspectiva, este capítulo presenta algunos de los modelos propuestos para el cálculo de los parámetros de las ondas de choque, principalmente para la sobrepresión máxima. Particularmente, se tratan de ecuaciones, desarrolladas por varios autores usando técnicas experimentales y numéricas, para determinar la sobrepresión incidente máxima de explosiones en el aire de cargas esféricas y no esféricas. Además, algunas expresiones para determinar la duración de la sobrepresión en cargas esféricas son mostradas. Cabe destacar, que hasta ahora no se tiene información de ecuaciones formuladas para la duración en el caso de cargas no esféricas, y por tanto, lamentablemente, no se muestra nada referido a ellas. Finalmente, se muestran algunas gráficas creadas para predecir los parámetros de la onda de choque como una función de la distancia escalada, y se indican varias referencias de fuentes de datos de estos parámetros. Todas estas ecuaciones y gráficas están dadas solo para explosivos convencionales que detonan en el aire.

El capítulo se divide, en función a la geometría del explosivo, en dos partes: cargas no esféricas y cargas esféricas. En cada uno de ellos se expone lo concerniente a

diversas ecuaciones y gráficas desarrolladas para determinar los parámetros principales de las ondas de choque.

B.2. Cargas no esféricas.-

Antes de abordar lo concerniente a los modelos disponibles para estimar la sobrepresión máxima, se harán algunas consideraciones respecto a este tipo de cargas.

La detonación se propaga como una onda a través de un gas de una forma muy similar a la propagación de una onda de choque a través del aire (Bulson, 1997). Si el explosivo es esférico, la onda de choque que se produce será esférica, y ya que la superficie de la onda se incrementa continuamente, la energía por unidad de área decrece continuamente. Por consiguiente, como la onda de choque sale desde la carga, la presión en el frente de la onda, llamada sobrepresión máxima, decrece constantemente (Longinow, 2003). Este concepto ya descrito ha hecho que el conocimiento de la propagación en el aire de la onda de choque originada por la detonación de cargas esféricas, sea bastante extenso tanto en el campo experimental como analítico, que ha permitido crear un sinfín de datos, modelos matemáticos, ábacos, etc., para determinar los parámetros de esta onda, primordialmente la sobrepresión máxima. Sin embargo, en el caso de un carga explosiva de geometría no esférica, como por ejemplo cilíndrica, cordón detonante, etc., el modelo de la onda de choque es muy complejo, por lo que la estimación de parámetros de la onda explosiva como la sobrepresión máxima y su duración, tiene su grado de complicación – Adamík, Vágenknecht, Vávra & Trczinski (2004)–. Aunado a esto, es bastante limitada la cantidad y el acceso a este tipo de información relacionada con las cargas de geometría no esféricas lo que agrega más dificultad a la estudio investigación de este tipo de cargas.

En la poca literatura disponible y consultada, referida a las cargas de geometría no esférica, hay algunos autores que han propuesto modelos matemáticos para el cálculo de los parámetros de la onda explosiva, principalmente para la sobrepresión máxima.

Estos modelos están basados en análisis teóricos, cálculos numéricos o una gran cantidad de resultados experimentales.

Algunos de los modelos son presentados en Bulson (1997) para distintas formas de cargas.

Para cargas de línea es conocido que el frente de choque de la onda explosiva se expande cilíndricamente, de modo que la sobrepresión máxima P_o es una función de un parámetro $r(L/W)^{1/2}$, donde L y r son la longitud y el radio, respectivamente, W es la masa del explosivo y $L \gg r$ (Bulson, 1997).

Lindberg & Firth (1967) –citado por Bulson (1997)– predijeron teóricamente valores de sobrepresión P_o a partir de una relación entre la sobrepresión máxima, la distancia del punto de medición desde el centro del explosivo (R) y la energía liberada instantánea (E) para una carga en el aire perfectamente esférica. Estas sobrepresiones estimadas por los autores son mostradas a través de la gráfica de la Fig. B.1.

Generalmente, las ondas explosivas de cargas no esféricas exhiben una caída de presión menos rápida con la distancia (Bulson, 1997), lo cual se puede observar en la Fig. B.1.

En esta gráfica, el eje vertical es P_o/P_a , donde P_a es la presión atmosférica y R_o es una dimensión característica definida como,

$$R_o = \left[E / (P_a L^{(3-\nu)}) \right]^{1/\nu} \quad \text{Ec. B.5}$$

Los valores de $\nu = 1, 2$ y 3 son para cargas plana, cilíndrica y esférica, respectivamente, de modo que $R_o = [E/(P_a)]^{1/3}$ para cargas esféricas, $R_o = [E/(P_a L)]^{1/2}$ para cargas cilíndricas y $R_o = [E/(P_a L^2)]$ para cargas de línea. La relación de sobrepresión P_o/P_a es comparada con R/R_o en la Fig. B.1.

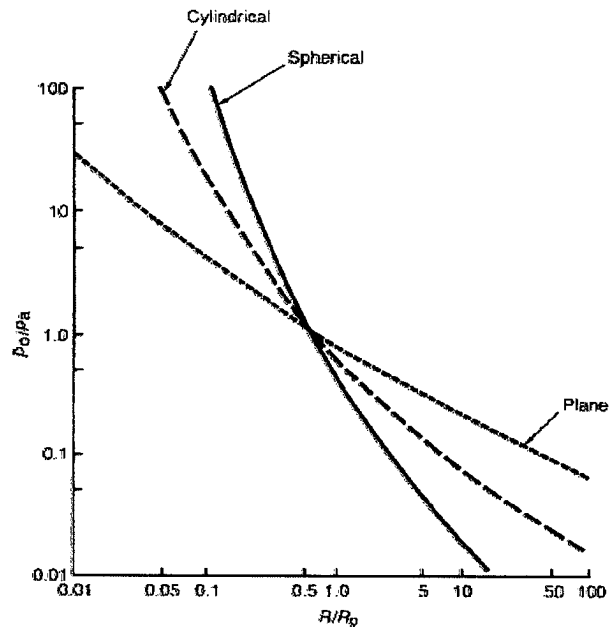


Fig. B.1. Sobrepresión máxima vs distancia para varias formas de carga (Lindberg & Firth, 1967) –tomada de Bulson, 1997–.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Otro de los modelos mostrados por Bulson (1997) son los propuestos por Stoner & Bleakney (1948). Ellos plantean ecuaciones que relacionan la sobrepresión máxima (P_o) y la distancia escalada (Z), en unidades inglesas, para diferentes formas de cargas. Cuatro ecuaciones resultan de este trabajo:

Para bloques rectangulares de 1 lb de TNT,

$$P_o = \frac{36280}{Z^3} - \frac{770}{Z^2} + \frac{13,5}{Z} \quad \text{Ec. B.6}$$

Para cilindros de 8 lb de Pentolita,

$$P_o = \frac{21070}{Z^3} - \frac{135}{Z^2} + \frac{10,5}{Z} \quad \text{Ec. B.7}$$

Para cilindros de 4 lb de TNT,

$$P_o = \frac{19210}{Z^3} - \frac{186}{Z^2} + \frac{11,34}{Z} \quad \text{Ec. B.8}$$

Para esferas de 3,75 lb de Pentolita,

$$P_o = \frac{7823}{Z^3} - \frac{295}{Z^2} + \frac{8,63}{Z} \quad \text{Ec. B.9}$$

Todas estas ecuaciones están basadas en ensayos efectuados en 1948, reportados por los autores, para investigar el comportamiento de cargas de bloques rectangulares de TNT, cargas esféricas de TNT y Pentolita y cilindros de Pentolita. Para la mayoría de estas relaciones $P_o < 2$ psi y $Z > 20$ ft/lb^{1/3}. Estas diferentes expresiones son empíricas y tienden a sugerir una exactitud de la medida que no existía para ese momento. De hecho, cuando los resultados son trazados en ejes de escala común, todos ellos se encuentran dentro de una banda de dispersión estrecha, como se muestra en la Fig.

B.2.

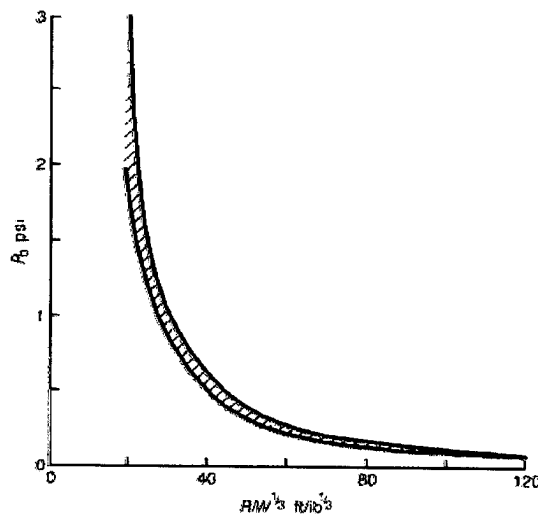


Fig. B.2. Sobrepresión máxima vs distancia escalada para cargas esféricas, cilíndricas y rectangulares (Stoner & Bleakney, 1948) –tomada de Bulson, 1997–.

Información adicional en el comportamiento de cargas esféricas de Pentolita es registrada en los trabajos de Goodman (1960) quien reúne una compilación de mediciones tomadas de ensayos realizados durante 15 años de 1945 a 1960.

En el DOE/TIC-11268 (1980) destaca el hecho de que varios investigadores han conducido programas para el estudio de explosivos no esféricos. Varias observaciones son coincidentes ó comunes en estas investigaciones. Una es que las sobrepresiones más grandes siempre ocurren en la dirección de la cara de la carga con la mayor área de superficie presentada, y otra, que múltiples picos de presiones ocurren en la fase de sobrepresión positiva inicial. Además, para una carga de una geometría no esférica particular, con el aumento en la distancia respecto a la carga, la onda explosiva tiende a hacerse más esférica que a la final pueden llevar a despreciar la forma de dicha carga.

Uno de los modelos que se describe en el DOE/TIC-11268 (1980), para la predicción de la sobrepresión en cargas de geometría cilíndricas, es de Plooster (1978) modificado. Este investigador hizo un ajuste de curva de datos obtenidos de un programa de ensayo dirigido por Wisotski & Snyer (1965) en el Instituto de Investigación de Denver (Denver Research Institute). Este ajuste es de la forma funcional $P_o = f(Z, L/D, \theta)$ donde P_o es la sobrepresión incidente máxima o pico, Z es la distancia radial escalada medida desde el centro de la carga cilíndrica, L/D es la relación longitud-diámetro de la carga y θ es el ángulo de azimut (ver Fig. B.3 para su definición) La base de datos para este ajuste es de ensayos de cilindros de explosivo Composición "B" (Comp B) con relaciones longitud-diámetro que varían de 1/4 a 10. La presión atmosférica promedio asumida fue de 12,03 psi. Dos ecuaciones resultaron de este ajuste:

Para cargas con $L/D \geq 1$,

$$y = [2,0467 - 0,1146X + (0,1285 - 0,0342X)\cos\theta + (0,0621 - 0,3280X)\cos 2\theta \\ + (-0,0029 + 0,0304X)\cos 3\theta + (-0,1532 - 0,998X)\cos 4\theta]$$

$$\begin{aligned}
& + [-2,1617 + 0,1422X + (-0,2079 + 0,1161X)\cos\theta + (-0,4178 + 0,3686X)\cos 2\theta \\
& + (-0,1372 + 0,0648X)\cos 3\theta + (-0,3484 + 0,1191X)\cos 4\theta] \lambda \\
& + [0,4366 + 0,0418X + (0,0138 + 0,0983X)\cos\theta + (0,1178 + 0,1451X)\cos 2\theta \\
& + (0,2556 + 0,043X)\cos 3\theta + (0,3123 - 0,1616X)\cos 4\theta] \lambda^2 \quad \text{Ec. B.10}
\end{aligned}$$

Para cargas con $L/D < 1$,

$$\begin{aligned}
y = & [2,0467 - 0,1753X + (0,1285 + 0,0728X)\cos\theta + (0,0621 - 0,2503X)\cos 2\theta \\
& + (-0,0029 + 0,0079X)\cos 3\theta - 0,1534\cos 4\theta] \\
& + [-2,1616 + 0,0464X + (-0,2079 - 0,2174X)\cos\theta + (-0,4178 + 0,3426X)\cos 2\theta \\
& + (-0,1372 + 0,1171X)\cos 3\theta + (-0,3484 - 0,3449X)\cos 4\theta] \lambda \\
& + [0,4366 + 0,0053X + (0,0138 + 0,0006X)\cos\theta + (0,1178 + 0,2656X)\cos 2\theta \\
& + (0,2556 + 0,2072X)\cos 3\theta + (0,3123 - 0,2410X)\cos 4\theta] \lambda^2 \quad \text{Ec. B.11}
\end{aligned}$$

donde,

$$X = \ln\left(\frac{L}{D}\right) \quad (a)$$

$$\lambda = \ln(0,0893Z) \quad (b)$$

$$P_o = 1,22 e^y \quad \text{Ec. B.12} \quad (c)$$

El ajuste original presentado por Plooster (1978) han sido modificados para permitir el cálculo de la sobrepresión máxima a condiciones standard a nivel del mar con TNT como explosivo (DOE/TIC-11268, 1980).

Las ecuaciones B.10 y B.11 deben ser utilizadas con las limitaciones de la base de datos con que éstas se crearon. De acuerdo con las curvas 4.19, 4.20 y 4.21

presentadas en DOE/TIC-11268 (1980) en su Capítulo 4, y que muestran la comparación entre datos experimentales –obtenidos por Wisotski & Snyder (1965)– y los valores calculados con estas ecuaciones para las relaciones L/D de 1/4, 1 y 6, respectivamente, puede establecerse que estas expresiones están limitadas a valores de sobrepresiones máximas de alrededor de 2 a 100 psi (1,38E+04 y 6,89E+05 Pa) y de distancias escaladas de aproximadamente 3 a 20 ft/lb^{1/3} (1,19 y 7,93 m/kg^{1/3}).

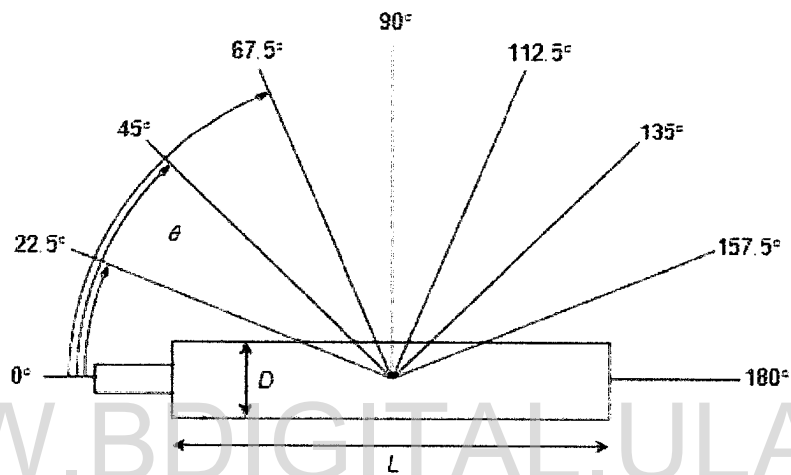


Fig. B.3. Ángulos de azimut (θ) con relación al eje longitudinal de cargas de geometría cilíndrica. (L = Longitud de la carga a lo largo del eje longitudinal y D = diámetro de la carga) –tomado de DOE/TIC-11268, 1980–.

Una de las prácticas comúnmente realizadas es relacionar parámetros de cargas no esféricas y esféricas. JMEM (1989) –citado por Victor (1996)– proporciona métodos analíticos para relacionar cargas esféricas y cilíndricas. La ecuación de sobrepresión máxima recomendada por JMEM (1989), para cargas cilíndricas cuya sobrepresión es medida normal al eje de la carga, es la siguiente

$$\frac{P_{cilindrica}}{P_{esferica}} = \frac{5,53 \left(\frac{L}{D}\right)^{0,308}}{Z^{0,998}} + \frac{\left(Z - \frac{L}{D}\right)}{24,99} \quad \text{Ec. B.13}$$

donde Z es la distancia escalada en ft/lb^{1/3} y L/D es relación longitud-diámetro.

Swisdak (1975) presenta unas curvas que dan la relación de la sobrepresión máxima obtenida de cargas cilíndricas (para varias relaciones longitud-diámetro) y la obtenida de cargas esféricas como una función de la distancia escalada. En la Fig. B.4 se muestran estas curvas. Todas las mediciones realizadas para la construcción estas curvas se tomaron a 90° respecto al eje longitudinal de la carga cilíndrica.



Fig. B.4. Relación de la sobrepresión máxima en el aire ($P_{cilíndrica}/P_{esférica}$) vs distancia escalada para cargas cilíndricas con diferentes relaciones L/D (tomado de Swisdak, 1975).

Otras curvas que relacionan la carga esférica con las cilíndricas son exhibidas por DOE/TIC-11268 (1980). En las Fig. B.5, B.6 y B.7 se grafican la relación, masa de la carga esférica equivalente a masa de la carga cilíndrica, basada en sobrepresiones máximas incidente experimentales a condiciones atmosféricas estándar, como función de la posición acimutal de la distancia escalada y el valor de L/D .

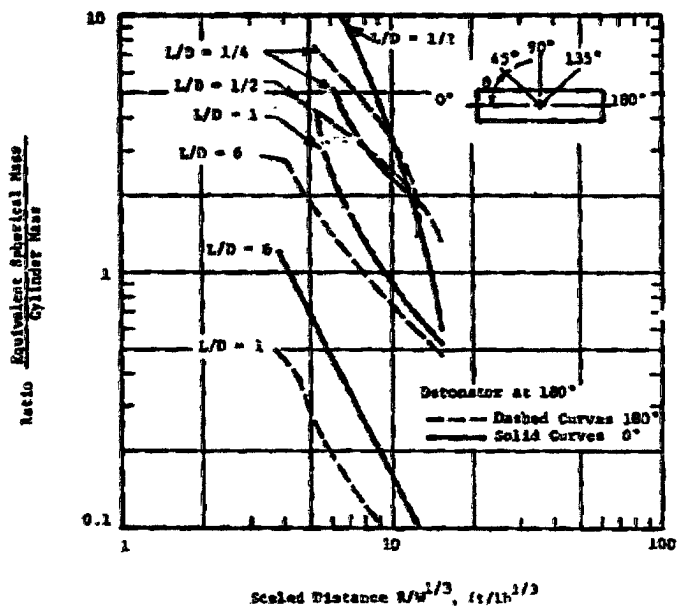


Fig. B.5. Relación masa esférica equivalente a masa del cilindro ($\theta = 0^\circ$ y 180°)
 -tomado de DOE/TIC-11268, 1980-.

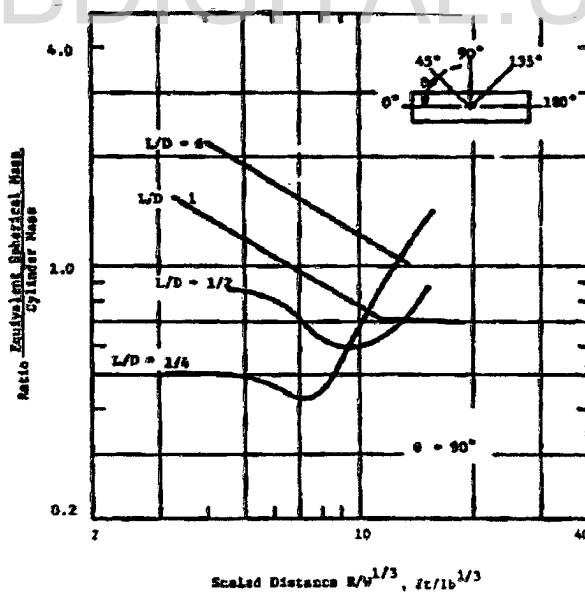


Fig. B.6. Relación masa esférica equivalente a masa del cilindro ($\theta = 90^\circ$)
 -tomado de DOE/TIC-11268, 1980-.

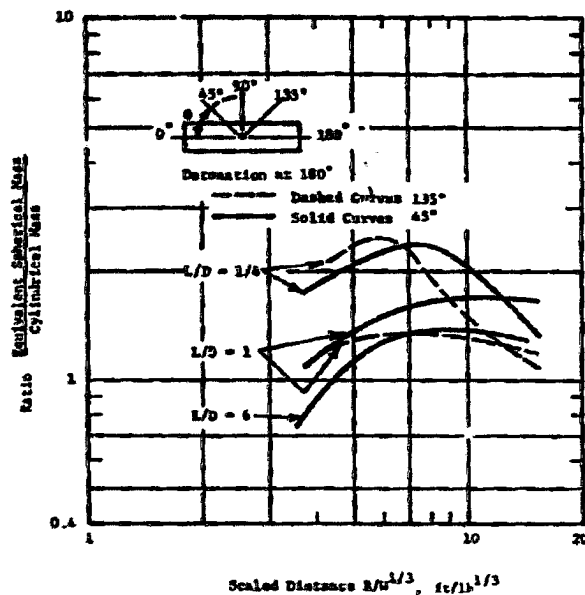


Fig. B.7. Relación masa esférica equivalente a masa del cilindro ($\theta = 45^\circ$ y 135°)
 –tomado de DOE/TIC-11268, 1980–.

Las principales contribuciones a la base de datos de explosiones de cargas cilíndricas han sido dadas por Swisdak (1983), Plooster (1978) y DOE/TIC-11268 (1980) – citados por Victor (1996)–, tanto para cargas cuya orientación del eje es vertical como horizontal.

DOE/TIC-11268 (1980) presenta a varios autores y organizaciones que han conducido investigaciones en este tema. Wisotski & Snyder (1965) condujeron un programa de ensayos en el Instituto de Investigación de Denver (Denver Research Institute), del cual obtuvo una gran cantidad de datos para cargas cilíndricas. Otros programas experimentales han sido llevados a cabo por Makino & Goodman (1956), Reisler (1972), Adams, Sarmousakis & Sperrazza (1949), Trancreto (1974) y Zaker (1969) para la determinación del campo de explosiones (es decir, campo de presiones creado como consecuencia de la detonación de una carga explosiva) alrededor de explosivos no esféricos de geometría simple regular (cilindros, cubos, conos, etc.).

Curvas ajustadas son mostradas en el capítulo 5 del UFC 3-340-01 (2002) –citado por USACE PDC, 2007– para varias relaciones de L/D para detonaciones en el aire. El programa BLASTX –Britt, Ranta & Joachim (2001), citados por USACE PDC, (2007)– puede también ser usado para calcular cargas explosivas generadas por explosivos cilíndricos de gran potencia (Este programa es restringido a contratistas gubernamentales de los E.E.U.U.).

B.3. Cargas esféricas.-

Hay varios conjuntos de ecuaciones de sobrepresión máxima debido a cargas esféricas basadas en la distancia escalada, Z , desarrolladas usando tanto técnicas numéricas como experimentales. Los modelos que a continuación se muestran son presentados por Borgers & Vantomme (2006), quienes hacen un estudio comparativo de los mismos para un rango completo de distancia escalada, Z . Estos modelos están dados para las siguientes unidades: P_o en bar y Z en $m/kg^{1/3}$ (W es la masa de equivalente de TNT).

- Brode (1955):

$$P_o = \frac{6,7}{Z^3} + 1 \quad (1 < P_o) \quad (a)$$

$$P_o = \frac{0,975}{Z} + \frac{1,455}{Z^2} + \frac{5,85}{Z^3} - 0,019 \quad (0,1 \leq P_o \leq 10) \quad (b) \quad \text{Ec. B.14}$$

- Henrych (1979):

$$P_o = \frac{14,072}{Z} + \frac{5,540}{Z^2} - \frac{0,357}{Z^3} + \frac{0,00625}{Z^4} \quad (0,05 \leq Z \leq 0,3) \quad (a)$$

$$P_o = \frac{6,1938}{Z} - \frac{0,3262}{Z^2} + \frac{2,1324}{Z^3} \quad (0,3 \leq Z \leq 1) \quad (b)$$

$$P_o = \frac{0,662}{Z} + \frac{4,05}{Z^2} + \frac{3,288}{Z^3} \quad (1 \leq Z \leq 10) \quad (c) \quad \text{Ec. B.15}$$

- Naumenko & Petrovskiy (1956):

$$P_o = \frac{10,7}{Z^3} - 1 \quad (Z \leq 1) \quad \text{Ec. B.16}$$

- Sadovskiy (1952):

$$P_o = \frac{0,76}{Z} + \frac{2,55}{Z^2} + \frac{6,5}{Z^3} \quad (1 \leq Z \leq 15) \quad \text{Ec. B.17}$$

- Kinney & Graham (1985):

$$\frac{P_o}{P_a} = \frac{808 \left(1 + \left(\frac{Z}{4,5} \right)^2 \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,048} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{0,32} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{1,35} \right)^2}} \quad \text{Ec. B.18}$$

- KB/DoD Modificado (1998):

$$P_o = \exp \left(A + B \ln(Z) + C \ln(Z)^2 + D \ln(Z)^3 + E \ln(Z)^4 \right) \quad (P_o \text{ en kPa}) \quad \text{Ec. B.19}$$

donde,

A	B	C	D	E	
7,2106	-2,1069	-0,3229	0,1117	0,0685	0,2 < Z < 2,9
7,5938	-3,0523	0,40977	0,0261	-0,01267	2,9 < Z < 23,8
6,0636	-1,4066	0	0	0	23,8 < Z < 198,5

Con respecto a estas ecuaciones, Borgers & Vantomme (2006) tiene algunas conclusiones, las cuales se presentan a continuación:

- En el rango de $1 < Z < 10$ todos los modelos tienen similar resultado, excepto para el KB/DoD Modificado (1998).

- Para $Z < 1$, todos los modelos divergen fuertemente. Significa que varios modelos han sido ampliados a $Z = 0,1$, que está cercano del radio externo del explosivo.
- Henrych (1979) propone tres (3) ecuaciones, fundamentadas en datos experimentales. La desviación, para la ecuación B.15b –también discutido por Smith & Hetherington (1994)– no es la más adecuada, ajustando simplemente el rango de las ecuaciones B.15a y B.15c para completar esa diferencia conduciría a una solución más exacta.
- La solución de Brode (1955), al inicio en $P_o < 10$ kPa se desvía rápidamente debido al limitado rango de la ecuación ($10 \text{ kPa} = 0,1 \text{ bar} \leq P_o$).

Otra ecuación de la sobrepresión máxima en kPa es introducida por Mills (1987) –citada por Ngo et al. (2007)–, en la cual W es la masa equivalente de TNT en kg, y Z ($\text{m/kg}^{1/3}$) es la distancia escalada:

$$P_o = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{100}{Z} \quad \text{Ec. B.20}$$

Las siguientes ecuaciones son presentadas por Smith & Hetherington (1994) –citado por Luccioni & Ambrosini (2005)–, con $Z = \text{m/kg}^{1/3}$:

$$P_o = \frac{1407,2}{Z} + \frac{554,0}{Z^2} - \frac{35,7}{Z^3} + \frac{0,625}{Z^4} \quad [\text{kPa}] \quad (0,05 \leq Z \leq 0,3)$$

$$P_o = \frac{619,4}{Z} - \frac{32,6}{Z^2} + \frac{213,2}{Z^3} \quad [\text{kPa}] \quad (0,3 \leq Z \leq 1,0)$$

$$P_o = \frac{66,2}{Z} + \frac{405,0}{Z^2} - \frac{328,8}{Z^3} \quad [\text{kPa}] \quad (1,0 \leq Z \leq 10) \quad \text{Ec. B.21}$$

Por último, se muestra una relación propuesta en el U.S. Army Technical Manual Fundamentals of Protective (Non-nuclear), N° TM 5-855-1, publicada originalmente en 1965 –TM 5-855-1 (1965), citado por Bulson (1997)–. En unidades inglesas la ecuación viene dada de la siguiente manera,

$$P_o = \frac{4120}{Z^3} - \frac{105}{Z^2} + \frac{39,5}{Z} \quad \text{Ec. B.22}$$

donde, P_o en psi y $Z = \text{ft}/\text{lb}^{1/3}$. Esta ecuación es válida solamente cuando $160 > P_o > 2$ psi y $20 > Z > 3 \text{ ft}/\text{lb}^{1/3}$.

Como se mencionó anteriormente, uno de los parámetros importantes de la onda de choque es la duración (positiva) de la sobrepresión máxima, ya que es determinante en la respuesta de miembros estructurales. La siguiente ecuación es expuesta por Kinney & Graham (1985) –citada por Geebeken & Doege (2005)–,

$$\frac{t_d}{W^{1/3}} = \frac{980 \left[1 + \left(\frac{Z}{0,54} \right)^{10} \right]}{\left[1 + \left(\frac{Z}{0,02} \right)^3 \right] \left[1 + \left(\frac{Z}{0,74} \right)^6 \right] \sqrt{1 + \left(\frac{Z}{6,9} \right)^2}} \quad \text{Ec. B.23}$$

con $W = \text{masa}_{\text{TNT}}$ (kg).

Otra ecuación para determinar la duración es la de Mays & Smith (1995) y Lam, Mendis & Ngo (2004) –citado por Silva, Lu & Nanni (s.f.)–. Esta ecuación correlaciona conservadoramente (Lam et al, 2004) W y R con t_d , de la siguiente forma (W es la masa equivalente de TNT en kg y R es la distancia medida del centro del explosivo en metros),

$$\log_{10} \left(\frac{t_d}{W^{1/3}} \right) \approx -2,75 + 0,27 \log_{10} \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right) \quad [\text{seg}] \quad (Z \geq 1.0)$$

$$\log_{10} \left(\frac{t_d}{W^{1/3}} \right) \approx -2,75 + 1,95 \log_{10} \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right) \quad [\text{seg}] \quad (Z \leq 1.0) \quad \text{Ec. B.24}$$

El ASCE (1999) presenta un conjunto de curvas escaladas para varios parámetros de la fase positiva de ondas incidentes. Estas curvas, de la Fig. B.8, son de una publicación del TM 5-1300 (1990) y desarrolladas por Kingery & Bulmash (1984) – ASCE, 1999–. Las mismas son escaladas de acuerdo a la ley de Hopkinson-Cranz y

son específicas para cargas esféricas de TNT detonadas bajo condiciones atmosféricas estándar –una presión atmosférica de 14,696 psi [101 kPa] y una velocidad del sonido en el aire de 1116 ft/seg [340 m/seg] (ASCE, 1999)–. La masa de la carga se refiere a la masa equivalente de TNT.

La figura presenta la forma escalada de los siguientes parámetros: sobrepresión máxima incidente (P_s , en psi), el impulso específico incidente (i_s , en psi-ms), tiempo de llegada de la onda de choque (t_a , en ms), duración de la fase positiva (t_d , en ms), sobrepresión máxima normalmente reflejada (P_r , en psi-ms), velocidad del frente de choque (U , en ft/ms), longitud de onda de la fase positiva (L_w , en ft).

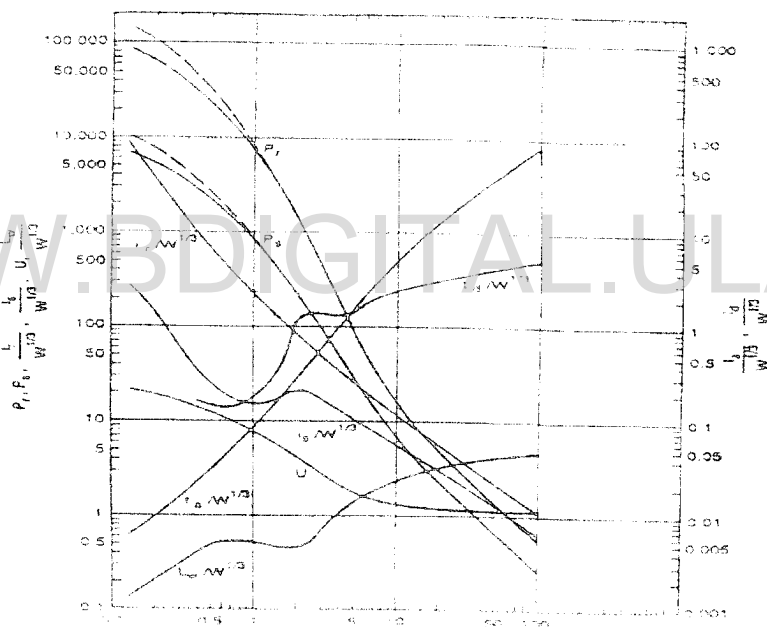


Fig. B.8. Parámetros (fase positiva) de una onda de choque para una carga esférica detonada en el aire (TM 5-1300, 1990) –tomado de ASCE (1999)–.

La distancia escalada más pequeña usada para las curvas es 0,134 ft/lb^{1/3} (0,0532 m/kg^{1/3}) la cual corresponde al radio de una carga de TNT esférica (ASCE, 1999). Sin embargo, los datos compilados utilizados para ajustar las curvas contiene muy pocas, si las hubiera, mediciones directas de parámetros de explosiones en el aire para

distancias escaladas menores de $1 \text{ ft/lb}^{1/3}$ ($0,397 \text{ m/kg}^{1/3}$) –ASCE, 1999–. Todas estas curvas son mostradas hasta un valor de distancia escalada de $100 \text{ ft/lb}^{1/3}$ ($39,7 \text{ m/kg}^{1/3}$).

Hay un número de fuentes de datos para los parámetros de las ondas de choque de explosivos convencionales. Según Beshara (1994), referencias como las de Baker (1973) y Tomlinson & Sheffield (1971) proporcionan las propiedades del frente de choque de ondas incidentes para cargas esféricas de Pentolita detonados en el aire, una compilación detallada para explosiones en el aire está disponible en el TM 5-1300 (1990), y una comparación de predicciones de los parámetros de las ondas de choque puede también ser encontradas en Strehlow & Baker (1976).

El reporte de Kingery & Bulmash (1984), tal como señala Remennikov (2003), contiene una compilación de datos de ensayos explosivos usando masas de cargas de menos de 1 kg a 400000 kg. Estos autores usaron técnicas de ajuste de curvas para representar los datos con ecuaciones de polinomio de orden superior, que son usados por el programa CONWEP (USACE PDC, 2007) –El United States Army Corps of Engineers ha diseñado un programa llamado CONWEP (Conventional Weapons Effects) que permite calcular un rango de efectos de explosiones de diferentes tipos de explosivos de alta potencia y armas; es de uso restringido y sólo se le proporcionan a personal autorizado–. Estas ecuaciones pueden también ser encontradas en el TM 5-855-1 (1998) en forma gráfica solamente.

B.4. Referencias.-

- Adamík V., Vágenknecht J., Vávra P. & Trczinski W. A. (2004). Effect of TNT Charges Orientation on Generated Air Blast Waves – Numerical Simulation Using LS-DYNA. Proc. 12. ANSYS User's Meeting 2004.
- Adams, Channing L., Sarmousakis, James N. & Sperrazza, Joseph. (1949). Comparison of the Blast from Explosive Charges of Different Shapes. Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, Report N° 681, January.

- ASCE (1997). Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. Task Committee on Blast Resistant Design, Petrochemical Energy Committee, ASCE (American Society of Civil Engineers). Reston, VA.
- ASCE. (1999). Design for Physical Security: State of the Practice Report. American Society of Civil Engineers. Reston, VA.
- Baker, W. E. (1973). Explosions in Air. University of Texas Press, Austin, TX.
- Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz J.J. & Strehlow R.A. (1983). Explosion Hazards and Evaluation. Elsevier, Amsterdam.
- Beshara F., B. A. (1994). Modelling of Blast Loading on Aboveground Structures- I. General Phenomenology and External Blast. Technical Paper, Computers & Structures Vol.51, No. 5, 585-596. March.
- Beveridge, A. (1998). Forensic Investigation of Explosions. Taylor & Francis.
- Borgers, W. J. B. & Vantomme, J. (2006). Toward a Parametric Model of A Planar Blast Wave Created with Detonating Cord. Proc. 19th Military Aspects of Blast and Shock (MABS). Calgary, Canada.
- Britt, J. R., Ranta, D. E. & Joachim, C. E. (2001). BLASTX Code. Version 4.2, User's Manual. Report ERDC/GSL TR-01-2, Distributed by U.S Army Engineer Research and Development Center. Vicksburg, MS. March.
- Brode, H.L. (1955). Numerical Solution of Spherical Blast Waves. Journal of Applied Physics, No. 6, June.
- Bulson, P.S. (1997). Explosive Loading of Engineering Structures. A History of Research and a Review of Recent Developments. London: E & FN Spon.
- KB DoD Modificado. (1998). Ammunition and Explosives Hazard Classification Procedures Joint Technical Bulletin TB 700-2/ NAVSEAINST 8020.8B/ TO 11A-1-47/ DLAR 8220.1; 5, January.
- DOE/TIC-11268. (1980). A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings on Structures. U.S. Department of Energy. Pantex Plant, Amarillo, Texas. November.

- Gebbeken, N. & Doege, T. (2005). Residual Load-Carrying Capacity of Masonry Walls Subjected to Blast Loads. JCSS and IABSE Workshop Robustness of Structures. BRE, Garston, Watford, UK. November 28.
- Goodman, H. J. (1960). Compiled Free-air Blast Data on Bare Spherical Pentoline, BRL Report 1092, Aberdeen Proving Ground, Maryland, USA.
- Henrych, J. (1979). The Dynamics of Explosion and Its Use. Elsevier.
- JMEM –Joint Munitions Effectiveness Manual–. (1989). USAF-61A1-3-7, NAVY-NAVAIR 00-130-ASR-2-1, USMC-FMFM 5-21, ARMY-FM 101-51-3. Revision 2, 8 May.
- Kingery C. N. & Bulmash, G. (1984). Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst. ARBRL-TR-02555, Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD.
- Kinney, G. F. & Graham, K. J. (1985). Explosive Shocks in Air. (2nd Edition) Springer-Verlag, New York.
- Krauthammer, T. (2008). Modern Protective Structures. CRC Press.
- Lam, N., Mendis, P. & Ngo, T. (2004). Response Spectrum Solutions for Blast Loading. Electronic Journal of Structural Engineering (EJSE), 4.
- Lindberg, H. E. & Firth, R. O. (1967). Tech. Rep. AFWL-TR-66-163, Vol. 2, Air Force Weapons Lab, Kirtland, USA.
- Longinow, A. (2003). “Blast Basics”, Proceedings: Steel Building Symposium: Blast and Progressive Collapse Resistance, December 4-5, New York, NY, 13-19.
- Luccioni, B. & Ambrosini, D. (2005). Blast Load Assessment using Hydrocodes. Mecánica Computacional Vol. XXIV. Buenos Aires, Argentina, Noviembre.
- Makino, R. C. & Goodman, H. J. (1956). Air Blast Data on Bare Explosive of Different Shape and Compositions. BRL Report N° 1015.
- May, G. C. and Smith, P. D. (1995) Blast Effects on Buildings. Thomas Telford Service Ltd, London, E14 4JD. 121pp.
- Naumenko, I. A. & Petrovski, I. G. (1956). The Shock Wave of a Nuclear Explosion. Moskau.

- Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. & Ramsay, J. (2007). Blast Loading and Blast Effects on Structures - An Overview. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 7, pp.76-91. Special Issue: Loading on Structures.
- Plooster, M. N. (1978). Blast Front Pressure From Cylindrical Charges of High Explosives. Naval Weapons Center Technical Memorandum N° 3631, Navy Contract N° N00123-76-C-0166, Denver Research Institute, September.
- Reisler, R. C. (1972). Explosive Yield Criteria. Minute of 14th Explosives Safety Seminar, New Orleans, 8-10 November, Department of Defense Explosives Safety Board. Pp. 271-288.
- Remennikov, A.M. (2003). A Review of Methods for Predicting Bomb Blast Effects on Buildings. *Journal of Battlefield Technology* 6 (3), pp. 5–10.
- Sadovskyi M. A. (1952). Mechanical Effects of Air Shock Waves from Explosions According to Experiments. Moskau.
- Shope, R. L. (2006). Response of Wide Flange Steel Columns Subjected to Constant Axial Load and Lateral Blast Load. Tesis Doctoral. Civil Engineering Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Sierra, E. (2006). NTP 321: Explosiones de Nubes de Vapor No Confinadas: Evaluación de la Sobrepresión (1993). Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT). Colecciones de tipo NTP (Nota Técnica de Prevención). Madrid, España.
- Silva, P. F., Lu, B. & Nanni, A. (s.f.). Prediction of Blast Loads Based on the Expected Damage Level by using Displacement Based Method. Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, University of Missouri-Rolla, USA.
- Smith P.D. & Hetherington J.G. (1994). Blast and Ballistic Loading of Structures. Butterworth-Heinemann Ltd, Great Britain.
- Stoner, R. G. & Bleakney, W. (1948). The attenuation of Spherical Shock Wave in Air. *Jour. Appl. Phys*, 19(7), 670.

- Strehlow, R. A. & Baker, W. E. (1976). The Characterization and Evaluation of Accidental Explosions. Progress in Energy and Combustion Science 2, 27-60 (1976).
- Stuhmiller, J. H., Phillips Y. Y. & Richmond D. R. (1991). The Physics and Mechanisms of Primary Blast Injury. Conventional Warfare: Ballistic, Blast and Burn Injuries. Washington, D. C.: Office of the Surgeon General of the U.S. Army: 241-270.
- Swisdak, M. M., Jr. (1975). Explosion Effects and Properties, Part 1 - Explosion Effects in Air. Naval Surface Weapons Center, NSWC/WOL/TR 75-116. Silver Spring, Maryland. October.
- Swisdak, M.M., Jr. (1983). Maximum TNT Equivalence of Naval Propellants. Naval Surface Weapons Center, NSWC TR 83-120. Silver Spring, Maryland, February.
- TM 5-1300. (1990). The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual, US Department of the Army, Navy, and Air Force. Washington DC.
- TM 5-855-1. (1965). U.S. Army Fundamentals of Protective Design (Non-nuclear). Department of Army Technical Manual. Washington.
- TM 5-855-1. (1998). Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapon Effects, Department of the Army, Air Force, and Navy and Defense Special Weapons Agency, Technical Manual TM 5-855-1/AFPAM 32-1147(I)/NAVFAC P-1080/DAH-SCWEMAN-97, August..
- Tomlinson, W. R. & Sheffield, O. E. (1971). Engineering Design Handbook- Properties of Explosive of Military Interest. AMC Pamphlet No. 706-177, Headquarters, U.S. Army Material Command.
- Trancreto, J. E. (1974). Effects of Charge Composition and Surface Conditions on Blast Enviroment. Minute of 16th Explosives Safety Seminar, Vol. I, Hollywood, FL, pp. 301-334, Sepetember.

- U.S. Army Corps of Engineers Protective Design Center – USACE PDC –. (2006). Methodology Manual for the Single-Degree of Freedom Blast Effects Design Spreadsheets (SBEDS). Protective Design Center, Technical Report PDC-TR 06-01.
- UFC 3-340-01. (2002). Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. U. S. Department of Defense. Washington, D.C.
- Victor, A. C. (1996). Warhead Performance Calculations for Threat Hazard Assessment. DDESB Explosives Safety Seminar, Las Vegas, Nevada, 20-22 August.
- Wisotki, J. & Snyder, H. W. (1965). Characteristic of Blast Waves Obtained from Cylindrical High Explosive Charges. University of Denver, Denver Research Institute, November.
- Zaker, T. A. (1969). Blast Pressures From Sequential Explosions. IIT Research Institute, Chicago Illinois, Phase Report II, Project J6166, March 25.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

APÉNDICE C

EFFECTO DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

C.1. Introducción.-

Las cargas dinámicas de corta duración, tal como las asociadas con las explosiones, a menudo exhiben una fuerte variación en el tiempo y en el espacio, resultando en un súbito gradiente al impactar en las estructuras. Estas cargas son típicamente aplicadas a las estructuras a velocidades aproximadamente 1000 veces más rápidas que la provocada por un terremoto, y las frecuencias de la respuesta estructural son mucho más grandes que aquellas inducidas por las cargas convencionales.

El análisis y diseño de estructuras sometidas a explosiones requerirá un conocimiento de las propiedades dinámicas de los materiales estructurales, ya que bajo este tipo de carga, los materiales pueden variar sus propiedades mecánicas que a su vez afectarán significativamente en la resistencia estructural. En estas estructuras generalmente es permitido el sufrir deformaciones plásticas para absorber la energía de la explosión (ASCE, 1997).

Al actuar este tipo de cargas dinámicas sobre una estructura, da lugar a un cierto grado de rapidez de deformación en diferentes partes de la estructura cuando estas se deforman, generalmente referido como efecto de la velocidad de deformación.

La alta velocidad de deformación está relacionada con materiales sometidos a explosiones. Para estructuras expuestas a efectos de una explosión, la respuesta a velocidades de deformación en el orden de $10^2 - 10^4 \text{ seg}^{-1}$ (Mendis & Ngo, 2005) es a menudo examinada, debido a que éstas pueden tener un efecto significativo sobre las propiedades del material. Este tipo de cargas causan un incremento en la resistencia y rigidez de algunos materiales estructurales. En el acero es evidente un aumento en el esfuerzo de fluencia con la velocidad de la carga. El efecto de la velocidad de deformación es mucho menor en la respuesta del concreto.

Este efecto del incremento de la resistencia del material es normalmente referido con un factor de incremento dinámico (Dynamic Increase Factor, *DIF*). Este factor, simplemente, es la relación entre el valor dinámico y el estático, y usualmente es reportado como una función de la velocidad de deformación. Este factor es de significativa importancia en el diseño y análisis de estructuras resistentes a explosiones.

El comportamiento de materiales estructurales tales como el acero y el concreto a altas velocidades de deformación es considerablemente diferente al comportamiento bajo cargas estáticas o cuasi-estáticas. Esto es, según Wooddell (2005), porque los procesos de deformación que ocurren durante la carga estática o cuasi-estática varían de los procesos de deformación que ocurren durante la carga dinámica. En cargas estáticas y cuasi-estáticas, la velocidad de cambio de la carga aplicada es pequeña, y entonces la deformación resultante puede ser considerada como una serie de pasos en la cual el material está en equilibrio estático –Meyers (1994) citado por Wooddell (2005)–. Durante las cargas dinámicas, la velocidad de cambio en la carga aplicada es muy grande, teniendo velocidades de deformación en el orden de $10^3 - 10^5 \text{ s}^{-1}$ (Wooddell, 2005).

El estudio de la influencia de la alta velocidad de deformación en las características del acero a través de ensayos, como el de la barra de Hopkinson, el de cilindro de Taylor y el de tracción estándar por citar algunos, son muy difíciles en términos tanto de la instrumentación técnica a emplear como de interpretación de los resultados medidos (Mihalikova & Janek, 2007). Aunado a esto, la sensibilidad del acero a la velocidad de deformación depende de su estructura interna, por lo tanto es necesario evaluar la sensibilidad para cada tipos de acero individualmente (Bursák & Mamuzic, 2006). Esto trae como consecuencia que sea limitada la información a cerca de resultados de la sensibilidad de acero a la velocidad de deformación donde los procedimientos de los ensayos estén completamente documentados. Otros resultados son dados en documentos con escasa información de las condiciones de ensayo y

algunos reportes son restringidos. De esta forma, datos disponibles de las propiedades dinámicas del acero en sus distintos grados son bien limitados.

Debido a los escasos datos experimentales, los mecanismos fundamentales que llevan a la velocidad de deformación en el concreto no son bien conocidos (Krauthammer, Marchand, Stevens, Bounds & Nene, 2004). Esto presume que al igual que en caso del acero, el estudio de la influencia de la alta velocidad de deformación a través de ensayos son muy difíciles.

Esto ha llevado a que exista un particular interés en desarrollar y examinar modelos constitutivos que permiten simular el comportamiento mecánico del material. Modelos constitutivos dependientes de la velocidad de deformación para materiales metálicos, como el de Johnson-Cook y Cowper-Symond, son ampliamente usados e incluidos en códigos computacionales (por ejemplo, en LS-DYNA® y ABAQUS®). En el caso del concreto, según Krauthammer et al. (2004), a raíz de esa falta de conocimientos que aun existe en cuanto a la velocidad de deformación en ese material, modelos que caractericen este fenómeno tienden a ser especulativos; sin embargo, para métodos simplificados, resultados adecuados son a menudo obtenidos usando el factor de incremento dinámico (*DIF*). Desafortunadamente, no es necesariamente favorable ignorar los efectos de la velocidad: mientras las predicciones de la resistencia pueden ser conservadoras, la respuesta de la estructura puede cambiar de dúctil a frágil, debido a la naturaleza de la falla del concreto a muy elevadas velocidades de carga (Krauthammer et al., 2004).

En este contexto, en el presente capítulo se describe el efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de materiales, como el acero estructural y el concreto; haciendo mayor énfasis en el acero estructural no solo por ser el más estudiado y del que se tiene mayor información sino porque se trata del material utilizado en esta tesis.

En una primera parte se explica de una manera general el efecto de la alta velocidad de deformación, originado por cargas dinámicas de muy corta duración y gran

amplitud como las generadas por explosiones, en el comportamiento mecánico de los materiales. Seguidamente, se aborda lo referente a la influencia de la alta velocidad de deformación en materiales estructurales como el acero estructural y el concreto. En ello se expone los principales efectos que se producen en las características mecánicas de estos materiales al incrementar velocidad de deformación y algunos de los modelos constitutivos dependientes de la velocidad de deformación utilizados en el análisis de estructuras sometidas a acciones dinámicas de tipo impulsivo, como impacto o explosión.

C.2. Comportamiento de materiales a altas velocidades de deformación.-

El comportamiento de estructuras que son sometidas a cargas dinámicas de corta duración y gran intensidad, como es el caso de las explosivas, puede variar significativamente respecto al comportamiento en situaciones estáticas o cuasi-estáticas. Común para todos los eventos dinámicos de una estructura es la presencia de los efectos inerciales debido al aceleramiento de las masas. Debido a los efectos inerciales los elementos que componen la estructura tratarán de resistir cualquier cambio en la velocidad y por tanto estos efectos tienen que ser considerados en un análisis dinámico. La carga dinámica dará lugar a un cierto grado de rapidez de deformación en diferentes partes de la estructura cuando estas se deforman, generalmente referido como efecto de la velocidad de deformación.

La velocidad de deformación no es más que es el cambio de la deformación en el tiempo (Ec. C.1). Su unidad es el recíproco de segundos ($1/\text{seg}$ o seg^{-1}).

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \text{Ec. C.1}$$

Las cargas explosivas típicamente producen altas velocidades de deformación en el rango de $10^2 - 10^4 \text{ seg}^{-1}$ (Mendis & Ngo, 2005). Esta alta velocidad de carga cambiaría las propiedades mecánicas de las estructuras que impactaría y, en consecuencia, los mecanismos de daño esperados para varios elementos estructurales. En la Fig. C.1 se muestra los rangos aproximados de velocidades de deformación

esperadas para diferentes condiciones de carga. En ella puede observarse que una velocidad de deformación estática normal está localizada en un rango de $10^{-6} - 10^{-5} \text{ seg}^{-1}$, mientras que para explosiones normalmente están asociadas con velocidades de deformación en el rango de $10^2 - 10^4 \text{ seg}^{-1}$.

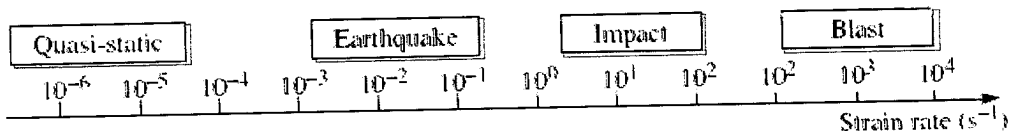


fig. C.1. Velocidades de deformación asociados con diferentes tipos de cargas (tomado de Mendis & Ngo, 2005).

Otra clasificación similar de cargas estáticas y dinámicas típicas aplicadas a estructuras como función de la velocidad de deformación se presenta en Tabla C-1.

Según esta tabla, el rango de velocidades de deformación para explosiones está en el orden de $10^{1.5} - 10^4 \text{ seg}^{-1}$.

Tabla C-1. Tipos de carga vs velocidad de deformación (Paik & Thayambali, 2003) –tomado de Son, Astaneh-Asl & Rutner (2005)–.

Strain rate:	$< 10^{-3}$	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{1.5}$	$10^{1.5} \sim 10^4$	$> 10^4$
Loading:	Creep	Static or Quasi-static	Dynamic	Impact	Hyper velocity impact
Examples:	Constant loading machine	Gravity loads	Impulse pressure effects on high-speed craft, wave breaking loads	Explosion, vehicle collision	Bombing

Lindholm (1971) –citado por Sierakowski (1997)– presenta un interesante esquema (Fig. C.2) que relaciona los aspectos de ensayos dinámicos con tiempos de carga característicos y regiones de velocidad de deformación. En él se muestra el método de carga, el régimen de velocidad de deformación, y los eventos dinámicos importantes necesarios a ser considerados para ensayos en el régimen especificado.

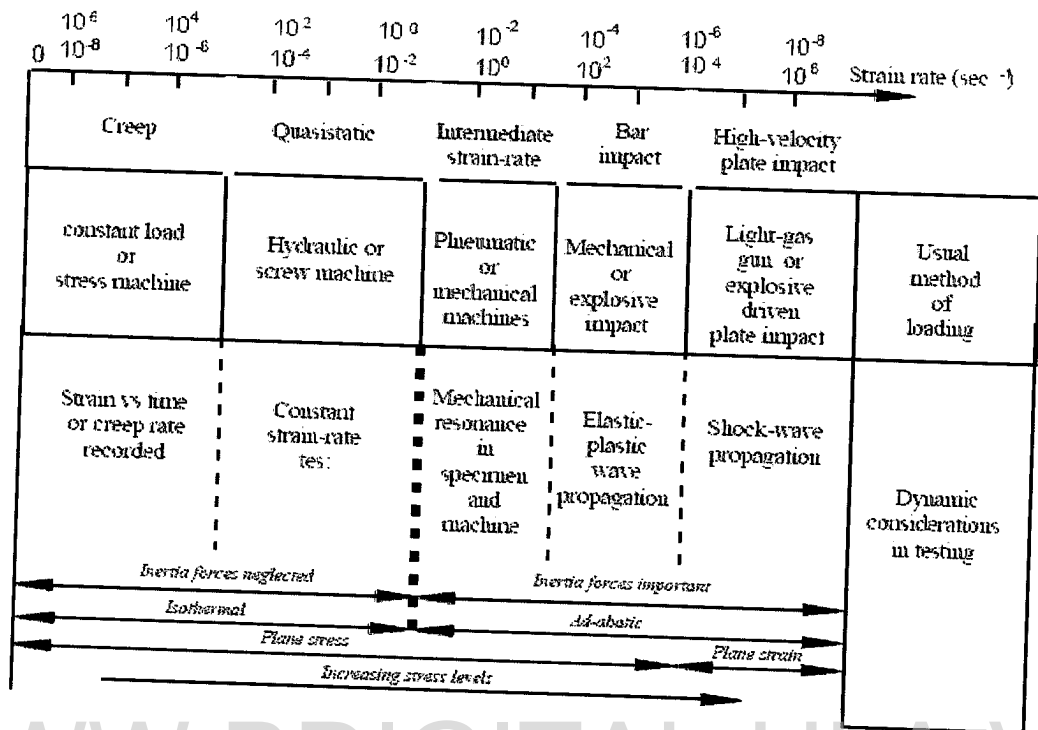


Fig. C.2. Aspectos dinámicos de ensayos dinámicos (Lindholm, 1971) –tomado de Sierakowski (1997)–.

La influencia de la alta velocidad de deformación sobre el comportamiento mecánico de los materiales ha sido estudiada extensamente desde 1872, el año en que J. Hopkinson publica su famoso experimento –Hopkinson (1872) citado por Li-Lih & Dong (2001)–. De allí, un gran número de investigadores, en el área del comportamiento dinámico de materiales, han demostrado que los efectos debido a la alta velocidad de deformación pueden ser bastante significativos, es decir, el flujo de esfuerzos (es un término comúnmente reservado para la aparición de flujo plástico en un material previamente deformado, y que depende de deformación efectiva, la velocidad de deformación y la temperatura) y la ductilidad de los materiales, la deformación y los mecanismos de fractura son a menudo considerablemente diferentes de aquellos expuestos a cargas estáticas o cuasi-estática. A deformaciones y velocidades muy grandes, puede haber cambios abruptos en el modo de

deformación que llevan a microestructuras (es decir, la forma y alineación de los componentes microscópicos de un material) perceptible diferentes (Haddad, 2001).

El efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades de resistencia se conoce como sensibilidad a la velocidad de deformación. Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia en el material (endurecimiento por velocidad de deformación en materiales metálicos). De hecho, el efecto de la velocidad de deformación junto con el efecto inercial han sido considerados los dos efectos dinámicos más importantes que distinguen la dinámica de explosión/impacto de la mecánica estática –Zukas, Nicholas, Swift, Grezczuk & Curran (1982) y Li-Lih (1985) citados por Li-Lih & Dong (2001)–.

La respuesta de un material bajo cargas estáticas o dinámica está gobernada por la relación esfuerzo-deformación. Para muchos materiales, las curvas esfuerzo-deformación son sensibles a la velocidad de deformación. Al aumentar la velocidad de deformación se producirá niveles de esfuerzos más grandes, pero valores inferiores de deformación. La Fig. C.3 muestra esto esquemáticamente.

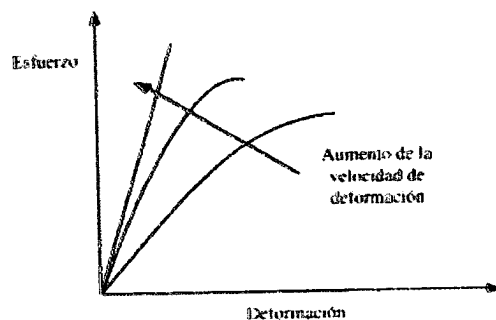


Fig. C.3. Efecto de la velocidad de deformación sobre las curvas esfuerzo-deformación.

A velocidades de deformación en el orden de 10^2 seg^{-1} (Meyers & Chawla, 1999), los efectos inerciales empiezan a hacerse importantes debido al efecto de la propagación de onda (Meyers, 1994).

Como ya se ha mencionado, la mayoría de las veces, el flujo de esfuerzos se incrementa con la velocidad de deformación. Un parámetro definido para describir este efecto, en términos del esfuerzo efectivo ($\bar{\sigma}$) y la velocidad de deformación efectiva ($\dot{\bar{\epsilon}}$),

$$m = \frac{\partial \ln \bar{\sigma}}{\partial \ln \dot{\bar{\epsilon}}} \quad \text{Ec. C.2a}$$

y simplificado para la condición uniaxial como,

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad \text{Ec. C.2b}$$

es conocido como sensibilidad a la velocidad de deformación. Este exponente representa la variación del flujo de esfuerzo con la velocidad de deformación ó la rapidez con que el esfuerzo produce cambios en función de la velocidad de deformación unitaria.

El efecto de la velocidad de deformación se puede ver en la Fig. C.4(a). En ella se presenta una curva de resistencia a la fluencia, que es una representación válida del comportamiento esfuerzo-deformación de un metal durante su deformación plástica.

Se observa que efectivamente al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación. Esto se representa usualmente como una línea aproximadamente recta en una gráfica log-log (siempre y cuando las escalas vertical y horizontal sean las mismas), la cual conduce a la siguiente relación,

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m \quad \text{Ec. C.3}$$

donde C , llamada constante de resistencia, es una constante de proporcionalidad correspondiente al esfuerzo para una velocidad de deformación de 1 seg^{-1} y m es la pendiente de la curva C.4(b), que como ya se indicó es el exponente que describe la relación entre el esfuerzo y la velocidad de deformación durante la deformación. La constante C tiene unidades de esfuerzo y m puede tener valores de 0 y 1. Materiales

con valores de m entre 0 y 0,1 no son sensibles a la velocidad de deformación, mientras materiales con m entre 0,5 y 1 son muy sensibles (Soboyejo, 2003).

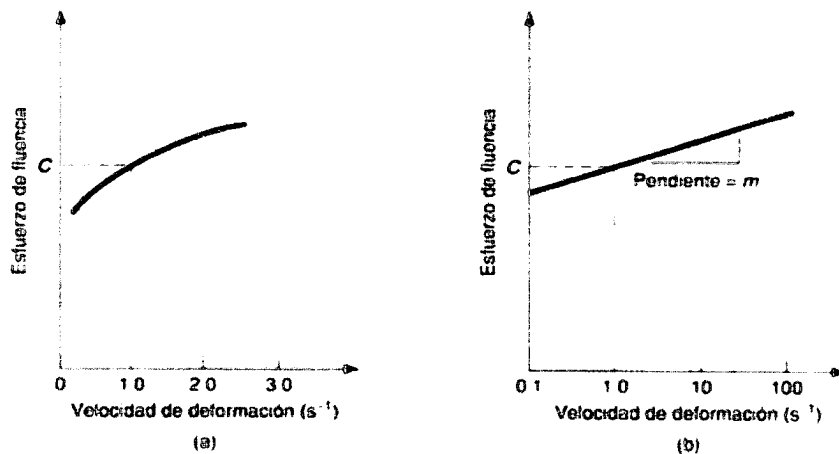


Fig. C.4. (a) Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia a temperatura de trabajo elevada, (b) la misma relación graficada en coordenadas log-log (tomado de Groover, 1997).

Para muchos materiales, el efecto de la velocidad de deformación sobre el flujo de esfuerzo, a una deformación y temperatura fija, puede ser modelado usando una expresión empírica de ley potencial, como la Ec. C.3.

Los efectos típicos que la velocidad de deformación tiene sobre un material se pueden observar en la Fig. C.5 (Meyers & Chawla, 1999), que muestra el efecto de diferentes velocidades de deformación en la respuesta a tracción del acero AISI 1040. El esfuerzo de fluencia a diferentes valores de deformación se incrementa con la velocidad de deformación. De ahí, se tendría, como máximo, un incremento del 15% en el esfuerzo de fluencia duplicando la velocidad de deformación. En general, m varía entre 0,02 y 0,2 para temperaturas homogéneas entre 0 y 0,9 (90% del punto de fusión en $^{\circ}K$) –Meyers & Chawla, 1999–.

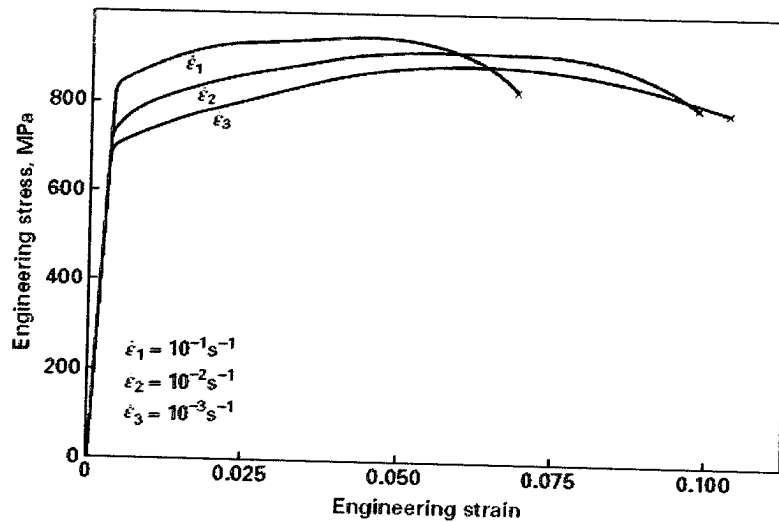


Fig. C.5. Efecto de la velocidad de deformación en las curvas esfuerzo-deformación para el acero m AISI 1040. (tomado de Meyers & Chawla, 1999).

En el particular caso del comportamiento de materiales estructurales como el acero estructural y el concreto a velocidades de deformación altas, de la misma forma, es considerablemente diferente del comportamiento bajo cargas estáticas o cuasi-estáticas. La respuesta dinámica de estos materiales ha sido estudiada extensamente; sin embargo, sus propiedades dinámicas no son ampliamente publicadas. En el acero es evidente un significativo aumento del esfuerzo de fluencia con la velocidad de carga, y en el caso del concreto, el efecto de la velocidad de deformación puede, igualmente, incrementar su resistencia, pero en mucha menor medida que en el acero. Además destaca en el concreto, a diferencia del acero, hay un leve aumento en el módulo de elasticidad.

Estos materiales no pueden responder a la misma velocidad en que es aplicada la carga. De esta manera, el límite elástico se incrementa y menos deformación plástica ocurrirá. A una velocidad de deformación muy rápida, una carga mayor es requerida para producir la misma deformación que a una velocidad mucho más baja. Este incremento en el límite elástico es bastante significativo para materiales de resistencia baja, y disminuye cuando el límite elástico estático aumenta (ASCE, 1997).

Más adelante se detallará el efecto de la velocidad de deformación en el comportamiento mecánico de cada uno de estos materiales.

En el amplio campo de la ingeniería se emplean materiales estructurales que son sometidos a velocidades de deformación altas o muy altas. Es claro que muchos materiales muestran una significativa variación en la respuesta mecánica bajo el incremento de la velocidad de deformación. Por ello, ha habido un interés en el efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia de los materiales. Estas propiedades son casi siempre usadas por ingenieros para analizar estructuras sometidas a entornos dinámicos. Sin embargo, la información de las propiedades dinámicas de un material es quizás el aspecto más débil de diseños estructurales que implican cargas dinámicas que causan deformaciones inelásticas grandes. Como las respuestas varían considerablemente, es necesario ensayar materiales individuales para obtener la información específica. Es por ello, que a menudo son usadas ecuaciones, denominadas constitutivas, para representar la respuesta de materiales.

El desarrollo de ecuaciones constitutivas o ecuaciones de estado que relacionan el esfuerzo y la deformación en función de la velocidad de deformación han permitido que técnicas del análisis numérico sean aplicadas en el modelado de problemas estructurales donde la calidad de los resultados depende fuertemente de una descripción idónea del comportamiento del material.

La implementación de los efectos de la velocidad de deformación en modelos constitutivos puede ser realizada de diferentes maneras. La selección de estas ecuaciones y las constantes aplicadas afectan la capacidad de predecir correctamente el comportamiento de los materiales. Existen muchos trabajos realizados por varios investigadores en este campo de estudio. Modelos como el Johnson-Cook y Cowper-Symond son ampliamente usados para describir un factor de incremento dinámico en las propiedades mecánicas en metales. En el concreto, el efecto de la velocidad de deformación es típicamente reportado como un factor de incremento dinámico (*DIF*). –es decir, la relación de resistencia dinámica a estática–. En particular, modelos como

el CEB-FIP 90 (1993) y Malvar y Crawford (1998) reportan *DIF* para resistencias a la tracción y compresión bajo velocidades de deformación altas. Estos modelos han sido típicamente examinados y calibrados con ensayos experimentales.

De acuerdo al ASCE (1997), la magnitud del incremento dinámico es dependiente de varios aspectos incluyendo la resistencia del material (estática) y la velocidad de deformación. En general, mientras más grande sea la resistencia estática de un material, más bajo es el incremento en la resistencia dinámica. La Fig. C.6 describe la relación entre la velocidad de deformación y la relación de la resistencia dinámica a estática del material para el acero estructural y el concreto.

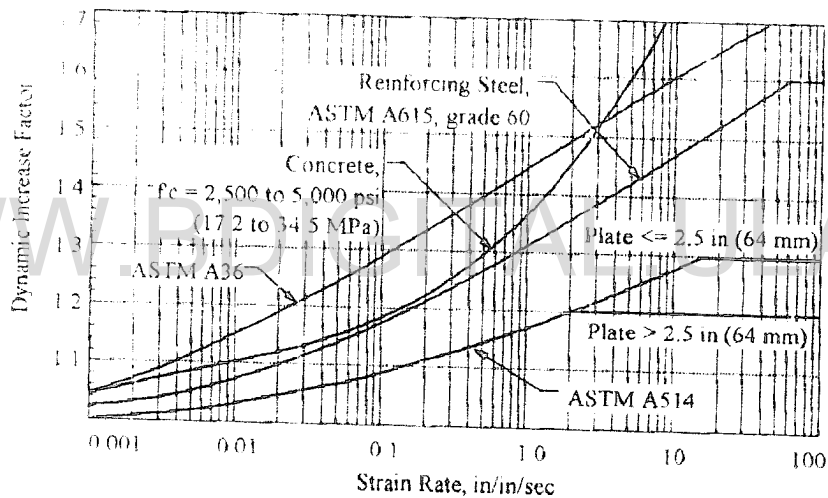


Fig. C.6. Efecto de la velocidad de deformación en la resistencia dinámica del material (TM 5-1300, 1990) –tomado de ASCE, 1997–.

Ya se ha mencionado que para incorporar el efecto del incremento en la resistencia de un material con la velocidad de deformación, un factor de incremento dinámico (*DIF*) es aplicado a la resistencia estática. Ampliando más en este tópico, este factor es también dependiente del tipo de esfuerzo (por ejemplo, flexión, corte) ya que los valores máximos para estos esfuerzos ocurren a diferentes intervalos de tiempo (ASCE, 1997). Los esfuerzos a flexión ocurren muy rápidamente mientras que los

máximos cortes pueden ocurrir relativamente más tarde resultando en una velocidad de deformación más baja para el corte.

Los valores de *DIF* varían para diferentes tipos de esfuerzos tanto en el concreto como en el acero por varias razones. En este sentido, el reporte ASCE (1997) expresa que la respuesta a flexión es dúctil y los valores de *DIF* permitidos son los que reflejan las velocidades de deformación reales. Según este reporte, los esfuerzos cortantes en el concreto producen fallas frágiles y por tanto la selección de un *DIF* requiere ser conservativo; adicionalmente, datos de ensayos para la respuesta a corte dinámico del concreto no están bien establecidos para la resistencia a compresión. Velocidades de deformación para tracción y compresión en miembros de acero y concreto son más bajas que para flexión y por tanto los valores *DIF* son necesariamente más bajos.

Es posible determinar la velocidad de deformación de un material durante la determinación de la respuesta dinámica usando un procedimiento iterativo (ASCE, 1997). El método usualmente aplicado es que la velocidad debe ser asumida y un *DIF* seleccionado. La resistencia dinámica es determinada multiplicando la resistencia estática por el *DIF*. El tiempo requerido para alcanzar la máxima respuesta puede ser usada para determinar una velocidad de deformación y *DIF*, de esta forma corroboran la velocidad asumida y el factor seleccionado. Hay incertidumbre en muchas de las variables usadas para calcular esta respuesta, y por tanto, la determinación de las velocidades de deformación con una importante precisión no es garantizada.

Los valores de los factores de incremento dinámico son presentados en una cantidad de referencias aunque muchos son basados en la misma fuente de datos. Muchos de los datos que han sido publicados están basados en ensayos de velocidades de deformación altas y muchos de los valores recomendados son seleccionados arbitrariamente. Una de las publicaciones más importantes en el campo de las explosiones es el manual TM 5-1300 (1990), el cual sugiere valores de *DIF* basados en el rango de sobrepresiones o de distancias escaladas.

C.3. Efecto de la velocidad de deformación en acero.-

A velocidades de deformación muy altas, el módulo de elasticidad y la deformación última permanece casi igual a como si se estuviesen en un entorno de cargas estáticas, en otras palabras, se mantienen sin alterar a pesar de la velocidad de deformación. Sin embargo, bajo velocidades de deformación muy altas, generalmente, el esfuerzo de fluencia del acero estructural se incrementa significativamente y, en menor grado el esfuerzo último. Estos efectos son ilustrados en la Fig. C.7 que muestra las curvas típicas esfuerzo-deformación para un acero estructural de bajo carbono (tal como A36) sometido a dos diferentes velocidades de deformación. Estos efectos de incremento del esfuerzo de fluencia y del esfuerzo último son llamados factor de incremento dinámico para el esfuerzo de fluencia y factor de incremento dinámico para el esfuerzo último, respectivamente (TM 5-1300, 1990). Otros definen estos valores como esfuerzo de fluencia dinámico y esfuerzo ultimo dinámico (Shope, 2006).

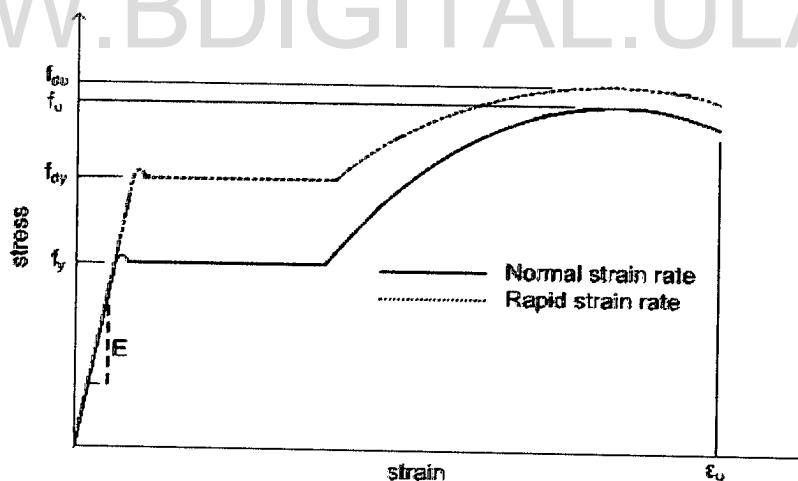


Fig. C.7. Curva esfuerzo-deformación típica para el acero (tomado de Son et al., 2005).

Se debe mencionar que las velocidades de deformación en el material expuesto a cargas explosivas disminuyen a medida la distancia del objeto a impactar aumenta.

Por tanto, el incremento en el esfuerzo de fluencia y el último del acero dependerá de la distancia del punto de detonación al objeto a impactar. Un excelente resumen del comportamiento de dependiente de la velocidad de deformación cuando éste está relacionado con el diseño resistente a explosiones es presentado por Baker (1997) – citado por Shope (2006)–.

En el análisis o diseño de estructuras sometidas a explosiones, el procedimiento habitual es tomar las propiedades estáticas del material y multiplicarlas por un factor de incremento dinámico para tomar en cuenta los efectos de la velocidad de deformación. La ecuación de Cowper-Symond (Ec. C.4), es ampliamente usada para describir un factor de incremento dinámico en las propiedades mecánicas del acero – Cowper & Symonds (1957) citado por Son et al. (2005)–. En la ecuación, f_{dy} es el esfuerzo de fluencia dinámico a velocidad de deformación alta, f_y es el esfuerzo de fluencia estático, $\dot{\epsilon}$ es la velocidad de deformación y C y q son constantes.

$$\frac{f_{dy}}{f_y} = 1,0 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/q} \quad \text{Ec. C.4}$$

Cowper & Symond (1957) –citado por Son et al. (2005)– han sugerido valores de C igual a 40.4 y de q igual a 5 para aceros de baja resistencia (tal como el A36). En 1999, Paik & Chung –citado por Son et al. (2005)– propusieron valores de C y q iguales a 3200 y 5 para aceros de alta resistencia.

Para el diseño en acero estructural, DOE/TIC-11268 (1992) –citado por Shope (2006)– proporciona las siguientes ecuaciones para la relación esfuerzo estático a esfuerzo dinámico tanto para los valores de fluencia como del esfuerzo último:

$$\frac{f_{dy}}{f_y} = 1,3 + 0,25 \log(\dot{\epsilon}) \quad \text{para } 1 < \dot{\epsilon} < 100 \text{ seg}^{-1} \quad \text{(a)}$$

$$\frac{f_{du}}{f_y} = 1,1 + 0,10 \log(\dot{\epsilon}) \quad \text{para } 1 < \dot{\epsilon} < 100 \text{ seg}^{-1} \quad \text{(b)} \quad \text{Ec. C.5}$$

donde,

$$\dot{\epsilon} = \text{Velocidad de deformación promedio} = \frac{f_{dy}}{E \cdot t_E}$$

t_E = Tiempo a la fluencia, seg

E = Módulo de elasticidad

Para propósitos de diseño general usando el acero A36, el manual TM 5-1300 (1990) –citado por Shope (2006)– recomienda los factores de incremento dinámico dados en las Tablas C-2 y C-3 para el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo último, respectivamente. Sin embargo, si se requiere un análisis más cuidadoso, el manual ofrece una gráfica de diseño, mostrada en la Fig. C.8, que plotea el factor de incremento dinámico, f_{dv}/f_y , como una función de la velocidad de deformación promedio. Tanto el manual TM 5-1300 (1990) como el DOE/TIC-11268 (1992) – citados por Shope (2006)– recomiendan un valor de $f_{dv} = 0,55 f_{dy}$ para el esfuerzo cortante dinámico. Los factores de incremento dinámico para otros aceros estructurales, como el A588 y el A514, son mostrados en las Tablas C-2 y C-3. Cabe indicar que el acero A514 no es recomendado para un diseño plástico, los factores para este acero pueden ser usados para un diseño elástico dinámico (TM 5-1300, 1990).

La Tabla C.2 presenta los factores dinámicos para el esfuerzo de fluencia en varios niveles de carga (sobrepresión causadas por explosiones) y condiciones de flexión, tracción y compresión a la que pueda estar sometida el elemento estructural. Para miembros a flexión se asume una velocidad de deformación de $0,10 \text{ seg}^{-1}$ en el rango de sobrepresión de diseño baja y $0,30 \text{ seg}^{-1}$ en el rango de sobrepresión de diseño alta. Para miembros a tracción y compresión, los valores de *DIF* vienen dados para velocidades de deformación de $0,02 \text{ seg}^{-1}$ en el rango de sobrepresión de diseño bajo y $0,05 \text{ seg}^{-1}$ en el rango de sobrepresión de diseño alta. En la Tabla C.3, a diferencia de los factores de incremento dinámico para el esfuerzo de fluencia, los valores *DIF* son independientes de los rangos de sobrepresiones.

Tabla C-2. Factores de incremento dinámico para esfuerzo de fluencia de aceros estructurales –tomado de Shope (2006)–.

Material	Bending		Tension or Compression	
	Low Pressure	High Pressure	Low Pressure	High Pressure
	$\dot{\epsilon} = 0.1 / \text{seconds}$	$\dot{\epsilon} = 0.3 / \text{seconds}$	$\dot{\epsilon} = 0.02 / \text{seconds}$	$\dot{\epsilon} = 0.05 / \text{seconds}$
A36	1.29	1.36	1.19	1.24
A588	1.19*	1.24*	1.12*	1.15*
A514	1.09	1.12	1.05	1.07

* Estimated

Tabla C-3. Factores de incremento dinámico para esfuerzo último de aceros estructurales – tomado de Shope (2006)–.

Table 2-2 Dynamic Increase Factors for Ultimate Stress of Structural Steels

Material	DIF
A36	1.10
A588	1.05*
A514	1.00

* Estimated

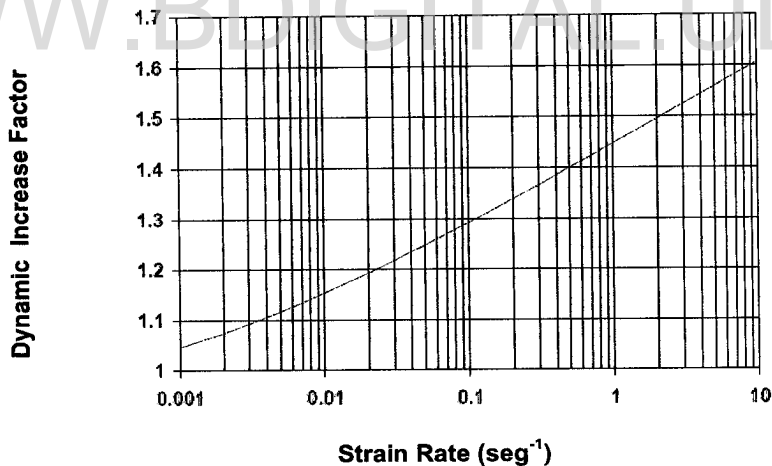


Fig. C.7. Factor de incremento dinámico vs velocidad de deformación para el esfuerzo de fluencia del acero A36 (TM 5-1300, 1990) –tomado de Shope (2006)–.

Uno de los modelos constitutivos más implementados, y que por ello vale la pena describir, es el de Johnson-Cook. Este es un modelo fenomenológico (es decir, no

está basado en teorías de plasticidad tradicionales), que reproduce varias respuestas observadas en impacto y penetración de metales. Este modelo toma en cuenta tres de los efectos claves en la respuesta del material como son endurecimiento por deformación, velocidad de deformación y ablandamiento térmico. Estos tres efectos son combinados, en una manera multiplicativa, en el modelo constitutivo de Johnson-Cook. Su formulación explícita se expresa en la Ec. C.6 (Özel & Karpap, 2007):

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\epsilon})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad \text{Ec. C.6}$$

En la Ec. C.6 el parámetro A es el esfuerzo de fluencia inicial del material a temperatura ambiente. La velocidad de deformación plástica equivalente $\dot{\bar{\epsilon}}$ es normalizada con respecto a una velocidad de deformación de referencia $\dot{\bar{\epsilon}}_0$. T_0 es la temperatura ambiente, y T_m es la temperatura de fusión del material, y ellas son constantes. Mientras el parámetro n toma en cuenta el efecto del endurecimiento por deformación, el parámetro m considera el efecto del ablandamiento térmico y C representa la sensibilidad a la velocidad de deformación.

Schwer (2007) presenta unos parámetros de Johnson-Cook para el acero A36 (Tabla C-4), proporcionados por Seidt (2005), para una velocidad de deformación nominal de $1,0 \text{ seg}^{-1}$, es decir $\dot{\bar{\epsilon}}_0 = 1,0 \text{ seg}^{-1}$. Cabe destacar, que este valor de $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ debe ser consistente con los valores de los parámetros de fluencia y de endurecimiento, es decir A y B (Schwer, 2007).

Tabla C-4. Parámetros del acero A36 para el modelo Johnson-Cook para una velocidad de deformación nominal (Datos tomados de Schwer, 2007).

A (ksi)	B (ksi)	N	C	$\dot{\bar{\epsilon}}_0$ (seg^{-1})	M	T_m (°K)	T_0 (°K)
41,50	72,54	0,228	0,017	1.0	0,917	1773	293

Numerosos modelos constitutivos dependientes de la velocidad de deformación están disponibles en la literatura, estos permiten relacionar el estado de esfuerzos con el estado de deformaciones, la velocidad de deformación y/o la temperatura (Tabla C-5).

Tabla C-5. Modelos constitutivos dependientes de la velocidad de deformación. Revisión (Nota. Datos tomados de Martínez & Cruz, 2007).

Nombre	Modelo ⁱ	Tipo de Modelo	Referencia ⁱⁱ
Ley de Potencia de Norton	$\sigma_o = k \cdot \dot{\epsilon}^m$, $m = \partial \ln \sigma_o / \partial \ln \dot{\epsilon}$, $\epsilon = c u \epsilon$ m : Constante de sensibilidad a la velocidad de deformación ϵ_o : Área transversal de la probeta	Modelos de viscosidad pura $\sigma = \sigma, T, \dot{\epsilon}$	Rappaz, Bellet & Deville (1998)
Zerilli y Armstrong ⁱⁱⁱ	Para el caso de materiales con estructura BCC: $\sigma_o = C_o + C_1 \exp(-C_2 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}^*) + C_3 \dot{\epsilon}^n$ Para el caso de materiales con estructura FCC: $\sigma_o = C_o + C_2 \dot{\epsilon}^{-1/2} \exp(-C_3 T + C_4 T \ln \dot{\epsilon}^*)$	Modelos viscoplásticos $\sigma = \sigma, T, \epsilon, \dot{\epsilon}$	Zerilli & Armstrong (1987)
Norton-Hoff ⁱⁱⁱ	$\sigma_o = k \sqrt{3}^{m+1} k_o \cdot \epsilon + \epsilon_o^n e^{(\beta/T)}, \dot{\epsilon}, m$		Montmitonnet & Chenot (1995)
Hamouda-Hashmi ⁱⁱⁱ	$\sigma_o = K G_1 T \cdot \epsilon^{m\alpha(t,T)} [1 + m \dot{\epsilon}^p]$		Hamouda (2002)
Hansel-Spittel ⁱⁱⁱ	$\sigma_o = A e^{m_1 T} T^{m_2} \cdot \epsilon + \epsilon_o^{m_3} e^{m_4(\epsilon + \epsilon_o)} [1 + \epsilon + \epsilon_o]^{m_5} e^{-m_6(\epsilon + \epsilon_o)}, \dot{\epsilon}, m_3, \dot{\epsilon}, m_3 T$		Duan & Sheppard (2003)

ⁱ En estas ecuaciones σ es el tensor de esfuerzos y $\dot{\epsilon}$ tensor de velocidades de deformación
ⁱⁱ Todas las referencias son citadas por Martínez & Cruz (2007)
ⁱⁱⁱ Dominio de grandes velocidades de deformación: $\dot{\epsilon} > 10^4 \text{ seg}^{-1}$ ó $\dot{\epsilon} > 10^3 \text{ seg}^{-1}$

C.4. Efecto de la velocidad de deformación en concreto.-

Similar al acero, las propiedades mecánicas del concreto bajo condiciones de cargas dinámicas pueden ser completamente diferentes si estas están en situación de cargas estáticas. Los esfuerzos que estará experimentando el concreto durante cierto periodo de tiempo en condiciones dinámicas pueden alcanzar valores que son notablemente más grandes que la resistencia a compresión estática. Los factores de magnificación de la resistencia tan altos como 4 en compresión y hasta 6 en tracción, para velocidades de deformación en el rango de $10^2 - 10^3 \text{ seg}^{-1}$, han sido reportados por Grote, Park & Zhou (2001) –citado por Mendis & Ngo (2005)–. La resistencia última del concreto es más grande bajo condiciones dinámicas. Aunque el módulo de elasticidad también es más grande, esta diferencia es pequeña y es usualmente

ignorada (ASCE, 1997). La Fig. C.8 describe la relación entre la respuesta estática y la dinámica para el concreto. La Fig. C.9 muestra las curvas esfuerzo-deformación para diferentes velocidades de deformación. Obsérvese que a mayor velocidad, aumenta la resistencia.

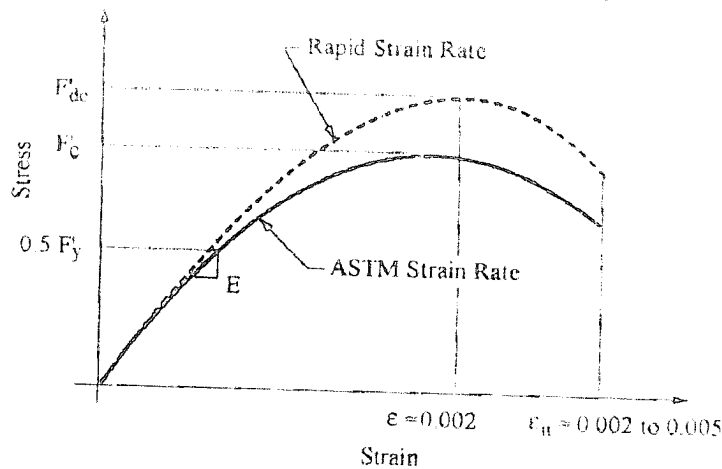


Fig. C.8. Efecto de la velocidad de deformación en la curva esfuerzo-deformación del concreto (TM 5-1300, 1990) –tomado de ASCE, 1997–.

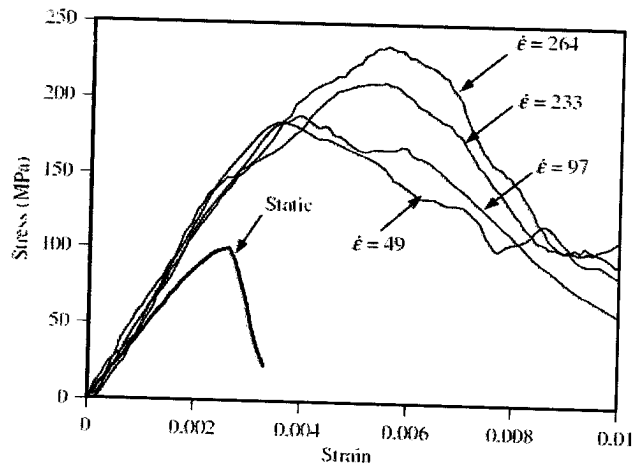


Fig. C.9. Curva esfuerzo-deformación del concreto para diferentes velocidades de deformación (tomado de Mendis & Ngo, 2005).

El concreto tiene el comportamiento significativamente diferente cuando sometido a tracción o compresión. En general, bajo carga estática la resistencia a la tracción del concreto es omitida ya que comparada con la resistencia a compresión es relativamente pequeña. Sin embargo, a velocidades de deformación muy altas, tal como las generadas por cargas explosivas, la resistencia a la tracción del concreto se incrementa significativamente y la omisión de la resistencia a la tracción del concreto no puede ser fácilmente justificada. El Modelo CEB-FIP 90 (1993) (Fig. C.10) – citado por Son et al. (2005)– sugiere las siguientes ecuaciones de factor de incremento dinámico (*DIF*) para la resistencia a compresión del concreto a velocidades de deformación altas.

$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1,026\alpha} \quad \text{para } \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ seg}^{-1} \quad (a)$$

$$DIF = \frac{f_c}{f_{cs}} = \gamma \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1/3} \quad \text{para } \dot{\epsilon} > 30 \text{ seg}^{-1} \quad (b) \quad \text{Ec. C.7}$$

donde,

f_c = Resistencia a compresión dinámica a $\dot{\epsilon}$

f_{cs} = Resistencia a compresión estática a $\dot{\epsilon}_s$

f_c/f_{cs} = Factor de incremento dinámico para la resistencia a compresión (*DIF*)

$\dot{\epsilon}$ = velocidad de deformación en el rango de 30E-06 a 300 seg^{-1}

$\dot{\epsilon}_s = 1\text{E-}06 \text{ seg}^{-1}$ (velocidad de deformación estática)

$\log \gamma = 6,156\alpha - 2$

$\alpha = 1/(5 + 9f_{cs}/f_{co})$

$f_{co} = 10 \text{ MPa} = 1450 \text{ psi}$

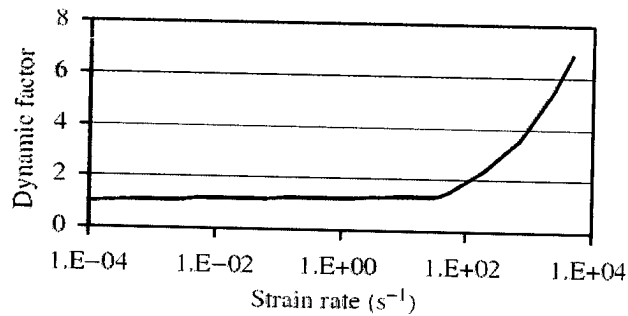


Fig. C.10. Factor de incremento dinámico para resistencia a compresión del concreto (Modelo CEB-FIP, 1990) –tomado de Mendis & Ngo, 2005–.

Aunque el Código Modelo CEB-FIP 1990 (1993) –citado por Son et al. (2005)– sugiere factores de incremento dinámico bajo tracción a velocidades de deformación altas, Malvar y Crawford (1998) proponen ecuaciones modificadas basadas en datos de ensayos experimentales. Éstas son definidas de la siguiente manera,

$$\frac{f_t}{f_{ts}} = \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^\delta \quad \text{para } \dot{\epsilon} \leq 1 \text{ seg}^{-1} \quad (\text{a})$$

$$\frac{f_t}{f_{ts}} = \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right)^{1/3} \quad \text{para } \dot{\epsilon} > 1 \text{ seg}^{-1} \quad (\text{b}) \quad \text{Ec. C.8}$$

donde,

f_t = Resistencia a tracción dinámica a $\dot{\epsilon}$

f_{ts} = Resistencia a tracción estática a $\dot{\epsilon}_s$

f_t/f_{ts} = Factor de incremento dinámico para la resistencia a tracción

$\dot{\epsilon}$ = velocidad de deformación en el rango de 1E-06 a 160 seg^{-1}

$\dot{\epsilon}_s = 1\text{E-}06 \text{ seg}^{-1}$ (velocidad de deformación estática)

$$\log \beta = 6\delta - 2$$

$$\delta = 1/(1 + 8f_{cs}/f_{co})$$

$$f_{co} = 10 \text{ MPa} = 1450 \text{ psi}$$

Después de alcanzar la máxima resistencia a tracción y compresión, el concreto muestra un comportamiento de ablandamiento lo cual significa que la rigidez se hace negativa (Fig. C.11). Varios investigadores han formulado modelos matemáticos para definir la rigidez negativa. Scott, Park & Priestley (1982) y Soroushian, Choi & Alhamad (1987) –ambas citadas por Son et al. (2005)– indican que la rigidez después del punto máximo a velocidad de deformación alta será más o menos igual que velocidades de deformación normales (estática).

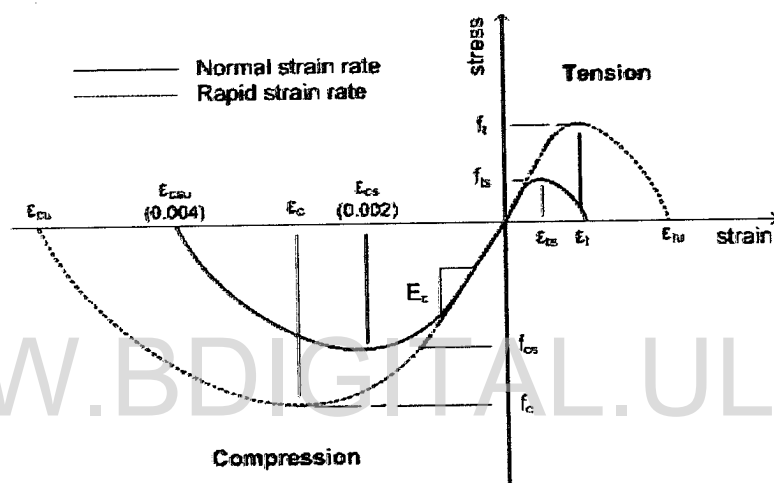


Fig. C.11. Curva esfuerzo-deformación típica del concreto (tomado de Son et al., 2005).

C.5. Referencias.-

- ASCE. (1997). Design of Blast-Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. American Society of Civil Engineering. Reston, VA.
- Baker, D. D. (1997). Dynamic Material Behavior. Building to Last, Proceedings of Structures Congress XV, ASCE, Portland, OR, 614-623.
- Bursák, M. & Mamuzic, I. (2006). The Influence of the Loading Rate on the Mechanical Properties of Drawing Steel Sheet. *Metabk* 45 (1), 57-60
- CEB-FIP Model Code 1990. (1993). Comité Euro-international du Béton. Trowbridge. Redwood Books. Wiltshire, UK.

- Cowper, G. R. & Symonds, P. S. (1957). Strain Hardening and Strain Rate Effect in the Impact Loading of Cantil ver Beams. Brown University, Division of Applied Mathematics Report, 28.
- DOE/TIC-11268 (1992). A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings on Structures. U. S. Department of Energy, Albuquerque Operations Office, Albuquerque, NM.
- Duan, X. & Sheppard, T. (2003). Computation of Substructural Strengthening by the Integration of Metallurgical Models into the Finite Element Code, *Comput. Mat. Sci.* 27, 250-258.
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos De Manufactura Moderna: Materiales Procesos Y Sistemas*. Prentice Hall Hispanoamericana. Mexico.
- Grote, D. L., Park, S. W. & Zhou, M. (2001). Dynamic Behaviour of Concrete at High Strain Rates and Pressures: I. Experimental Characterization. *Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, Pergamon Press, NewYork, pp. 869-886.
- Haddad, Y.M. (2001). *Mechanical Behaviour of Engineering Materials – Volume 2: Dynamic Loading and Intelligent Material Systems*. Kluwer Academic Publishers. Springer, 1ra Ed.
- Hamouda, A. M. S. (2002). Effect of Energy Losses During an Impact Event on the Dynamic Flow Stress, *J. Mater. Process. Technol.* 124, 209-215.
- Hopkinson, J. (1872). *Proc. Man. Lit. Phil. Soc.*, 11-40.
- Krauthammer, T., Marchand, K.A., Stevens, D.J., Bounds, W.L. & Nene, M. (1994) Effects of Short Duration Dynamic Loads on RC Structures. *Concrete International*, 57-63. October.
- Li-Lih, W. & Dong, X. L. (2001). Positive and Negative Strain-Rate Effect for Materials with Damage and/or Phase Transformation at High Strain Rates. *Fundamental Issues and Applications of Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena*. Elsevier Science td., 193-200.
- Li-Lih, W. (1985). *Foundations of Stress Waves*. National Defense Industry Press. Beijing.

- Lindholm, U.S. (1971). *Techniques in Metals Research*. Interscience, Vol. 1.
- Malvar L. J. & Crawford J. E. (1998). *Dynamic Increase Factors for Steel Reinforcing Bars*. 28th DDESB Seminar. Orlando, USA.
- Martínez T., H. V. & Cruz R., L. J. (2007). *Numeric Simulation of Sliding Contact for the System 2117-T4/X19CrNi17.2 in Mechanical Upsetting*. *Dyna Rev.Fac.Nac.Minas*, May/Aug. 2007, Vol.74, N°152, p.167-180.
- Mendis, P. & Ngo, T. (2005). *Vibration and Shock Problems of Civil Engineering Structures*. *Vibration and Shock Handbook: Mechanical Engineering Series*, edited by Clarence W. de Silva. CRC Press.
- Meyers, M. A. & Chawla, K. K. (1999). *Mechanical Behavior of Materials*. 2nd Ed. Prentice-Hall.
- Meyers, M.A. (1994). *Dynamic Behavior of Materials*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Mihalikova, M. & Janek, J. (2007). *Influence of the Loading and Strain Rates on the Strength Properties and Formability of Higher-Strength Sheet*. *Metabk* 46 (2), 107-110.
- Montmitonnet, P. & Chenot, J. L. (1995). *Introduction of Anisotropy in Viscoplastic 2D and 3D Finite-Element Simulations of Hot Forging*, *J. Mater. Process. Technol.* 53, 662-683.
- Özel, T. & Karpat, Y. (2007). *Identification of Constitutive Material Model Parameters for High-Strain Rate Metal Cutting Conditions Using Evolutionary Computational Algorithms*. *Materials and Manufacturing Processes*, Volume 22, Number 5, June 2007, pp. 659-667(9).
- Paik J. K. & Thayamballi, A. K. (2003). *Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures*. John Wiley & Sons. LTD. Hoboken, NJ, USA.
- Rappaz, M., Bellet, M. & Deville, M. (1998). *Traité des Matériaux, Modélisation Numérique en Science et Génie des Matériaux*, Vol 10, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp. 291-301.

- Schwer, L. (2007). Optional Strain-Rate Forms for the Johnson Cook Constitutive Model and the Role of the Parameter Epsilon_0. 6th German LS-DYNA Forum. Frankenthal, Germany. October 11-12.
- Scott, B. D., Park, R., & Priestley, M. J. N. (1982). Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates. ACI J. 79(1), 13-27.
- Seidt, J. D. (2005). EOD Material Characterization, Supplemental Report: Constitutive and Fracture Models for ASTM A36 Hot Rolled Steel. Battelle Technical Report prepared for the Naval Explosive Ordnance Disposal Technology Division. Contract N00174-04-D-0004 (TITAN) Prime. Subcontract: 05-OAT-0003. November.
- Shope, R. L. (2006). Response of Wide Flange Steel Columns Subjected to Constant Axial Load and Lateral Blast Load. Tesis Doctoral. Civil Engineering Virginia Polytechnic Institute & State University.
- Sierakowski, R. L. (1997). Strain Rate Behavior of Metals and Composites. Convegno IGF 13. Cassino 27 e 28 Maggio.
- Soboyejo, W. (2003). Mechanical Properties of Engineered Materials. New York, NY.
- Son, J., Astaneh-Asl, A. & Rutner, M. (2005). Performance of Bridge Decks Subjected to Blast Load. 6th Japanese-German Bridge-Symp., Munich, Germany, 29/08-01/09.
- Soroushian, P., Choi, K. & Alhamad, A. (1987). Dynamic Constitutive Behavior of Concrete. ACI J., 83(2), 251-258.
- TM 5-1300. (1990). The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions. Technical Manual, US Department of the Army, Navy, and Air Force. Washington DC.

- Wooddell, M. (2005). High-Strain Rate Constitutive Model Validation of Stainless Steel 22-6-9. Summer Undergraduate Research Fellowship (SURF) & International Research Experience Program (IREP). Georgia Tech. Atlanta, Georgia U.S.A. June 1 - July 27.
- Zerilli, F. J. & Armstrong, R. W. (1987). Dislocation-Mechanics-Based Constitutive relations for Material Dynamics Calculations, J. Appl. Phys. 61 (5), 1816–1825.
- Zukas, J. Nicholas, T., Swift, H. Grezczuk, L. & Curran, D. (1982). Impact Dynamics. Wiley-Interscience. New York.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE