

EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS EN CONSTRUCCIONES RESIDENCIALES PRODUCIDOS POR EXPLOSIONES EN UNA PLANTA INDUSTRIAL

Carlos A. Prato ¹, Marcelo A. Cevallos ² y Antonio R. Godoy ³

RESUMEN: En este trabajo se presentan los resultados de la inspección de los daños a las viviendas de una zona urbanizada provocados por ondas de presión generadas en explosiones ocurridas en una planta industrial adyacente. El objeto de la investigación fue aprovechar la ocurrencia de un acontecimiento inesperado y extraordinario para detectar los principales mecanismos de daño/falla estructural de las construcciones típicas frente a acciones no tenidas en cuenta en su diseño, y en la medida de lo posible, llegar a conclusiones generales sobre los principales aspectos del daño observado.

INTRODUCCIÓN

El 3 de Noviembre de 1995, la ciudad de Río Tercero, Provincia de Córdoba, Argentina, fue sacudida por una serie de explosiones originadas en los talleres y depósitos de una planta industrial dedicada a la fabricación de municiones de guerra. Esta planta fue construida hace más de 50 años alejada de la zona urbanizada, pero el crecimiento de la ciudad, condicionada en su extremo norte por el curso de agua del río homónimo, llevó a permitir el uso de predios adyacentes a la planta con fines residenciales.

Tan pronto como las autoridades de seguridad liberaron la zona más afectada por las explosiones, una comisión integrada por docentes de ingeniería civil de la Universidad Nacional de Córdoba realizó una inspección de los principales daños causados por las ondas de presión a las construcciones vecinas, la mayoría de ellas viviendas unifamiliares de una planta separadas por espacios libres. La Comisión no fue autorizada a ingresar al predio de la planta, hecho que significó una notable limitación al alcance de su trabajo. En efecto, la observación directa del cráter de la explosión que produjo la mayor parte de los daños a las construcciones hubiera permitido estimar de una manera independiente la magnitud de la carga explosiva, pero ésta sólo pudo ser estimada a partir de los daños sobre las construcciones.

El objetivo central de la tarea de la Comisión fue observar la naturaleza de los daños que produjo la onda expansiva de las explosiones. El estudio de proyectiles y otros elementos contundentes arrojados por las explosiones que penetraron a través de techos, paredes y aberturas de las viviendas no fue posible ya que la mayor parte de este tipo de daños fue provocada por munición activa que no explotó y que fue recogida antes del arribo de la Comisión al sitio.

Aunque no está relacionado con el alcance ni con las conclusiones del presente estudio, al momento de efectuar la inspección del sitio se dio por descontado que las explosiones ocurrieron por accidente o errores en la operación de la planta. Posteriormente, los autores han tomado conocimiento que las explosiones de Río Tercero pudieron haber sido intencionales. Sobre éste y otros aspectos legales de estos eventos no se hace alude en el presente trabajo.

A manera de síntesis de los acontecimientos relacionados con las explosiones, según surgió de información publicada por la prensa y por testigos, los hechos ocurrieron de acuerdo con la siguiente secuencia:

1. La primera explosión ocurrió en el taller de armado de municiones que se encontraba totalmente rodeado de terraplenes para proteger el resto de la planta de eventuales explosiones. Según testimonios recogidos, esta explosión se originó en barriles de Trotyl, aunque no se consiguieron datos sobre el mecanismo que pudiera provocar la detonación del mismo.
2. La segunda explosión ocurrió en un depósito con techo liviano cuya estructura consistía en cerchas de acero, techo de chapa galvanizada y paredes de mampostería. Este depósito se encontraba fuera de la zona protegida por terraplenes, aproximadamente a 80 m del límite del predio de la Planta que colinda con la zona urbanizada que resultó más afectada. Esta explosión produjo la onda expansiva que causó los daños que se analizan en este trabajo.

¹ Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

² Departamento de Estructuras, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

³ Agencia Internacional de Energía Atómica.

3. Siguieron otras explosiones que causaron daños y víctimas personales a través de proyectiles arrojados por las mismas, pero cuyas ondas expansivas no causaron daños significativos a las construcciones.

OBJETIVO Y ALCANCE

El objetivo de la inspección por parte de la Comisión fue evaluar la distribución espacial de los diferentes niveles de daño en las construcciones, desde el derrumbe de construcciones de mampostería de ladrillos cerámicos y bloques de cemento, la rotura de puertas y portones, y el desprendimiento de los techos de la mampostería hasta la rotura de vidrios y cielorrasos.

La Comisión centró su atención principalmente en el efecto de la onda expansiva en casas unifamiliares aisladas ubicadas en la zona próxima al límite Este de la Planta y al depósito donde se generó la segunda explosión, por ser éste el tipo de construcciones típicas en la zona más afectada. Un conjunto de viviendas de dos plantas de construcción reciente, ubicado en la segunda manzana desde la Planta, también fue motivo de una inspección detallada y brindó datos de interés para interpretar lo ocurrido. En su gran mayoría, las construcciones inspeccionadas en la zona más afectada, ni siquiera las viviendas de dos plantas, contaban con estructura independiente de hormigón armado por lo que el colapso de la mampostería significó en algunos casos el derrumbe total o parcial.

Naturalmente, para interpretar los daños observados, y ante la imposibilidad de acceder al cráter de la principal explosión, fue necesario recurrir a otras evidencias para estimar la intensidad y duración de la onda expansiva.

DESCRIPCIÓN DEL DAÑO OBSERVADO

Después de realizar una primera inspección de las zonas más afectadas se definieron los siguientes indicadores de daño:

- Rotura, deformación y desprendimiento de la carpintería de la mampostería, incluyendo marcos, postigos (metálicos y de madera) y cortinas de enrollar de ventanas, marcos y hojas de puertas y portones.
- Daños a la mampostería resistente y tabiques interiores de partición en viviendas.
- Desprendimiento de techos de hormigón armado de la mampostería de apoyo.
- Daños a cielorrasos suspendidos.

Dada la fragilidad de los vidrios, y la gran sensibilidad de su resistencia a las condiciones de montaje del vidrio y a la rigidez de la carpintería, el criterio de rotura de vidrios no se consideró representativo de la distribución de la intensidad de la onda de presión en la zona afectada.

La severidad del daño fue clasificada en las siguientes categorías en orden creciente, según se verifique al menos uno de los daños descritos en cada grupo:

- 1) Rotura o deformación permanente de cortinas de enrollar de madera, y rotura, desprendimiento y/o deformación permanente de cielorrasos de metal o plástico en locales comerciales abiertos y estaciones de servicio.
- 2) Rotura de puertas exteriores de ingreso a viviendas y cocheras. Fisuras y/o roturas en la mampostería próxima a puertas y ventanas.
- 3) Rotura y fisuras sistemáticas de la mampostería en sectores no debilitados por la presencia de puertas, portones y ventanas.
- 4) Colapso de paredes de mampostería y levantamiento de techos de hormigón armado.

A continuación se describen los principales daños típicos observados:

Categoría de daño nivel 4

La Figura 1 contiene un plano de planta de la ciudad en la zona más afectada, incluyendo las líneas divisorias de las zonas más afectadas según el criterio antes enunciado que fueron trazadas como resultado de la presente inspección.

En la Figura 2 se ilustra el estado de una vivienda construida con paredes de bloques de cemento y losa de techo de hormigón armado convencional. La pérdida del apoyo del techo produjo las deformaciones flexionales tan pronunciadas.

En la Figura 3 se ilustra el desprendimiento de la losa de las paredes a lo largo de todas las líneas de apoyo. Se trata de una losa maciza de hormigón de 0.10 m de espesor sin revestimiento exterior, cuyo peso propio fue superado por la diferencia entre la presión exterior e interior debida a la explosión. Estos daños son característicos

de la situación en la zona 4 que incluye las dos primeras filas de manzanas adyacentes al costado de la planta próximo a la fuente de la explosión.

Las Figuras 4, 5, 6, 7 y 8 ilustran el estado de paredes exteriores de viviendas de la zona más afectada. Estas paredes resultaron desplazadas hacia el exterior, evidenciando una tendencia generalizada por la cual los desplazamientos laterales de las paredes exteriores de las viviendas en la zona próxima a la explosión se produjeron hacia fuera, es decir como consecuencia de un exceso de presión interior respecto a la exterior, independientemente de la posición relativa de la pared respecto del lugar donde se produjo la explosión.

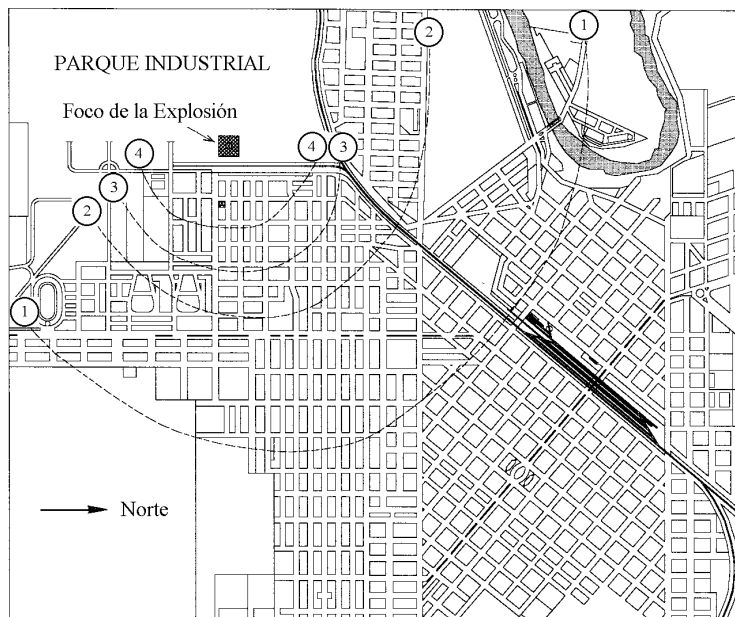


Figura 1.



Figura 2.

Las Figura 9 y 10 ilustran el estado en que quedaron las paredes de una vivienda de dos plantas con una estructura de hormigón armado independiente de la mampostería. El postigo metálico de la Figura 9 fue vencido hacia el interior por la sobrepresión exterior. Se interpreta que el postigo actuó como fusible o punto débil de ese costado de la construcción. Por el contrario, la pared de la planta alta de la Figura 10 evidencia que la falla de la pared fue causada por la sobrepresión del interior respecto al exterior, a pesar que dicha pared estaba orientada enfrentando directamente a la fuente de la explosión. En esta figura también se puede observar que un postigo metálico quedó también deformado hacia fuera como consecuencia del efecto antes señalado.



Figura 3.



Figura 4.



Figura 5.



Figura 6.



Figura 7.



Figura 8.



Figura 9.



Figura 10.

Categoría de daño nivel 3

La Figura 11 muestra la falla de un tabique divisorio de mampostería de bloques de cemento. Las paredes exteriores de mampostería de ladrillos cerámicos macizos de 0.30 m de espesor de esta construcción no presentaron daños apreciables.

En la Figura 12 se ilustra el efecto de las ondas de presión sobre la mampostería que alojan las cortinas de enrollar por encima de las ventanas. En ella se repite la situación observada en paredes de mampostería, en las que el daño sugiere el efecto de una mayor presión en el interior respecto al exterior. Una situación similar se observó en los daños a cielorrasos suspendidos que se deformaron hacia fuera con una configuración similar a la indicada de esta figura.

Categoría de daño nivel 2

La Figura 13 ilustra el daño típico del marco de una ventana arrancado de la mampostería, y la Figura 14 las fisuras en la mampostería próxima a puertas o ventanas de pequeñas dimensiones y suficiente resistencia, tales como puertas exteriores típicamente hechas de madera maciza de 1 a 2 pulgadas de espesor. En algunos casos, las aberturas de dimensiones apreciables como entradas a cocheras, en las que las hojas de la carpintería son muy deformables como se ilustra en la Figura 15, la rotura de la carpintería se produjo hacia el interior de la vivienda como resultado directo de la sobrepresión exterior, mientras que en otros casos como el de la Figura 16 lo hizo hacia el exterior. En todos los casos observados, la mampostería falló hacia el exterior como resultado de la sobrepresión interior, lo que además confirma que la resistencia lateral de la mampostería es mayor hacia el interior que hacia el exterior debido al apoyo que las paredes transversales y losas brindan a las paredes exteriores, situación que con frecuencia no ocurre en el sentido inverso por falta de anclajes o armaduras que impidan desplazamientos hacia el exterior.

Categoría de daño nivel 1

No se cuenta con registros fotográficos de este tipo de daños ya que la mayor atención se concentró en aquellos aspectos relacionados con el mecanismo de falla estructural. Los daños a cielorrasos livianos en todos los casos detectados ocurrieron hacia el exterior como si la explosión hubiera ocurrido en el interior.



Figura 11.



Figura 12.



Figura 13.



Figura 14.

INTENSIDAD DE LA ONDA DE PRESIÓN

La Figura 17 ilustra el estado en que quedó una casilla que alojaba cilindros de gas licuado que estaba ubicada a 250 m de la explosión principal. La Figura 18 presenta un esquema de la casilla con sus dimensiones. La cara exterior de la casilla al momento de la explosión se encontraba cerrada por puertas de chapa muy flexibles que fueron destruidas por la onda de presión sin oponer resistencia. Como consecuencia de la reflexión de la onda en la pared de fondo, el techo de la casilla que estaba simplemente apoyado en los muros laterales fue desplazado en contra del sentido de avance de la onda de presión, quedando desplazado 0.23 m.



Figura 15



Figura 16.



Figura 17.

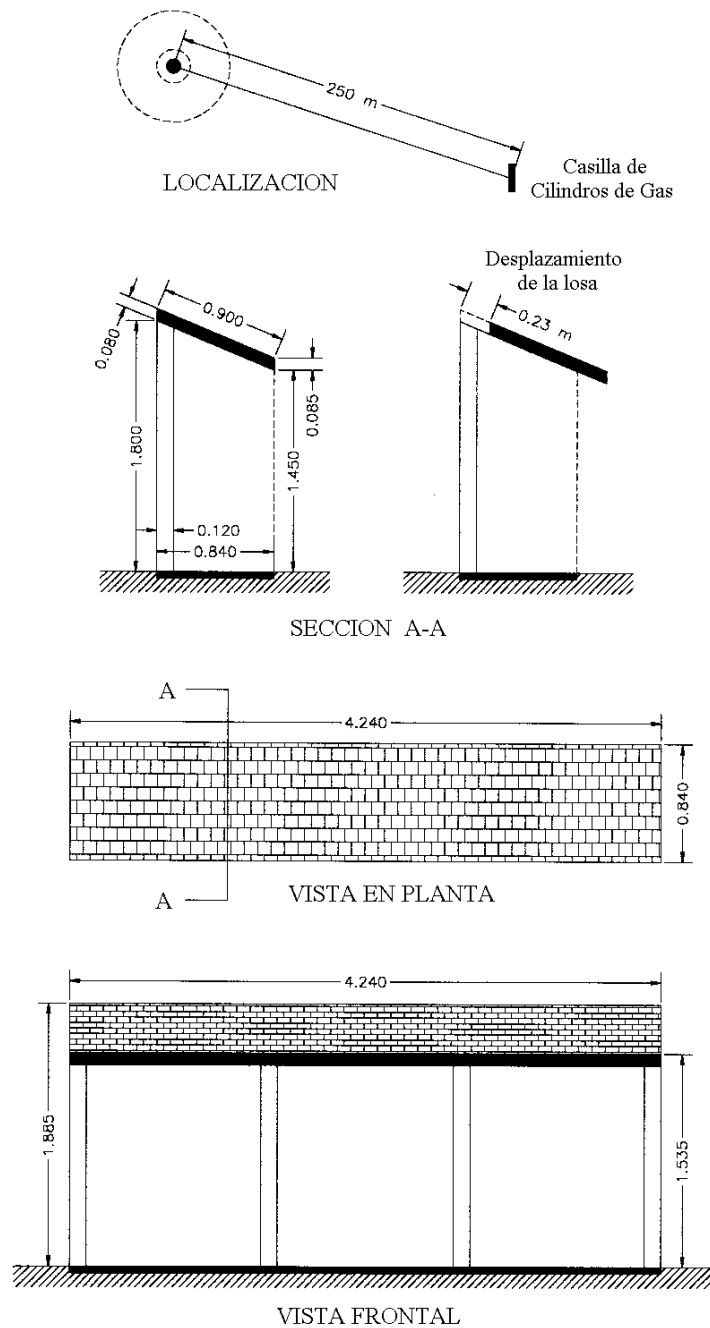


Figura 18.

Para estimar la intensidad de la onda de presión se efectuó un análisis aproximado basado en las siguientes hipótesis:

- La máxima sobrepresión estática inducida por la explosión en la posición considerada es pequeña frente a la magnitud de la presión atmosférica, por lo que es aplicable la teoría lineal de ondas elásticas de un fluido compresible. La geometría del recinto de la casilla y su posición respecto a la dirección de la onda incidente es tal que el problema puede ser analizado con un modelo unidimensional. Como consecuencia de esta hipótesis la reflexión de la onda incidente en la pared del fondo de la casilla produce una sobrepresión total igual al doble de la onda incidente. Además, la duración y forma de la presión total resultante es igual a la de la onda incidente. Consistentemente con esta hipótesis, la sobrepresión dinámica de la onda incidente en campo libre debida a la velocidad de las partículas del aire a esta distancia de la explosión es despreciable a los efectos del presente análisis.

- La sobrepresión estática de la onda incidente tiene variación triangular en el tiempo, con un valor máximo P_{max} a tiempo cero y una duración efectiva T_d . Ambos parámetros son inicialmente desconocidos.
- La sobrepresión dinámica en la cara exterior del techo de la casilla, que tiene una pendiente de 22 grados respecto del frente de onda incidente, es despreciable. En consecuencia, la única sobrepresión en esta cara del techo es la sobrepresión estática de la onda incidente.
- El cálculo de la sobrepresión estática fue realizado utilizando los gráficos adimensionales de Biggs (1964) para una carga explosiva ubicada a una distancia de 250 m del centro de la explosión. La condición de ajuste para estimar la intensidad de la onda reflejada en la pared del fondo de la casilla fue que la trayectoria de la tapa de la casilla coincidiera con el desplazamiento observado. Tanto la onda de presión incidente como la reflejada fueron supuestas con una variación lineal en el tiempo desde su valor máximo hasta cero. Dada la reducida dimensión de la casilla en la dirección de avance de la onda (0.62 m), la reflexión no modificó la forma y duplicó el valor de la máxima sobrepresión de la onda incidente. De los dos parámetros desconocidos, P_{max} y T_d , si se tiene en cuenta que ambos están relacionados entre sí para una distancia dada a la explosión, es posible resolver la máxima presión de la onda reflejada compatible con el desplazamiento permanente observado de 0.23 m. De esta manera se calculó la máxima presión de 8 KPa y la duración de 0.087 segundos. La Figura 19 ilustra la trayectoria del techo de la casilla hasta su posición final.

A los efectos de asistir en la interpretación de los daños observados, se analizó el efecto de la onda de presión externa incidiendo a través de una abertura en un volumen de aire encerrado en paredes rígidas. El volumen fue representado con un modelo de elementos finitos en 2-D para resolver la ecuación de la onda elástica en el aire, considerando las paredes como bordes totalmente reflejantes, excepto la abertura de ingreso de la onda en la que se aplicó la condición de borde absorbente de Lysmer y Kulhemeyer (1969). La Figura 20 muestra la malla del modelo y la abertura de ingreso de la onda. Este modelo utilizó como incógnitas el valor de la presión en cada nudo, con una variación lineal entre nudos. La Figura 21 muestra la ley de variación de la presión calculada en el punto B de la pared opuesta a la abertura de ingreso, normalizada respecto al valor máximo de la presión de la onda incidente. Se puede observar que la máxima sobre presión interior alcanza en este caso al 40 % de la máxima presión incidente pero su duración es varias veces superior, y por lo tanto es capaz de imprimir desplazamientos importantes a las paredes y techos. Naturalmente, la intensidad y duración del pico de sobrepresión interior depende de las dimensiones del recinto analizado, pero el ejemplo numérico demuestra que aún para dimensiones mayores a las típicas en las construcciones de la zona la sobrepresión interior pudo alcanzar un valor significativo.

La sobrepresión máxima reflejada que surge de este análisis es suficiente para levantar los techos de hormigón de 10 cm de espesor de algunas viviendas como la ilustrada en la Figura 3, cuyo techo pesa aproximadamente 2500 N/m^2 . Es interesante que algunas viviendas tradicionales construidas en la década de 1950 con muros externos de mampostería de ladrillos cerámicos macizos de 0.30 m de espesor y techo horizontal de losa de hormigón armado de 0.15 m de espesor con una capa de tierra de espesor medio de 0.20 m y una cubierta superior de tejas cerámicas de 0.05 m de espesor no fallaron, aún las ubicadas a pocos metros de la cerca de la Planta. Estos techos tienen un peso total de aproximadamente 8500 N/m^2 , suficiente para no sufrir levantamiento bajo la sobrepresión interior por la explosión, estimada en 8000 N/m^2 .

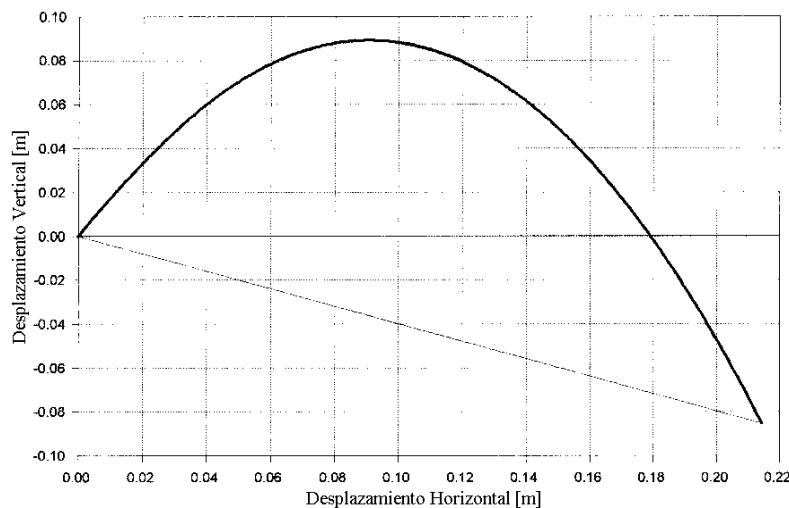


Figura 19: Trayectoria del techo de la casilla debido a la explosión.

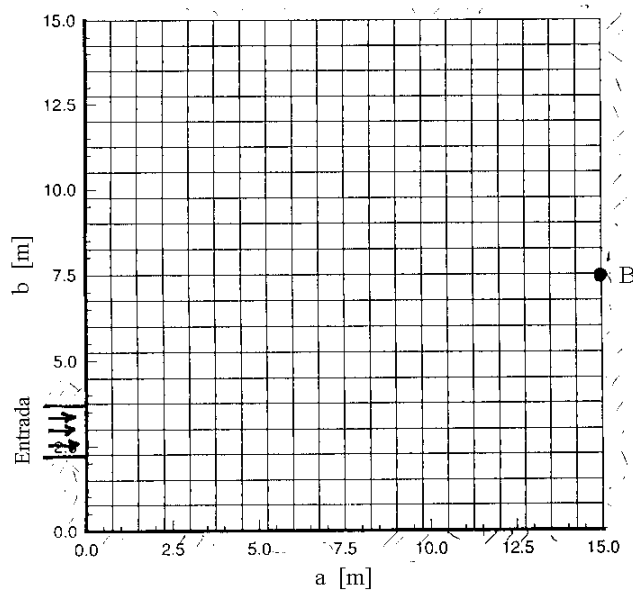


Figura 20: Malla de elementos finitos de un recinto cuadrado de 15m x 15m.

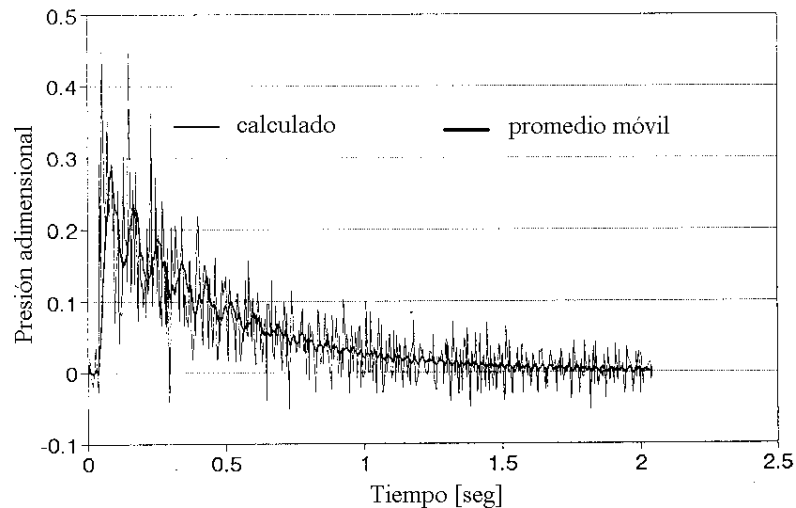


Figura 21: Presión en el punto B.

Como síntesis del análisis y observaciones de campo, surge que la sobrepresión interior respecto a la externa provocó los principales daños a muros y techos, hecho que puede ser atribuido tanto a las reflexiones de ondas en el interior de ambientes cerrados como a la mayor resistencia de mampostería y techos a la sobrepresión exterior respecto a la sobrepresión interior debido a la falta de suficientes elementos de anclaje de techos y paredes en las uniones.

CONCLUSIONES

La mayor parte del daño estructural ocurrió en un radio entre 300 y 400 m del centro de la explosión y consistió en la rotura de paredes de mampostería acompañada del desprendimiento de techos de hormigón armado.

Las viviendas individuales construidas con materiales tradicionales de la región se comportaron satisfactoriamente frente a un estado de carga no previsto en el diseño, y en algunos casos sufrieron daños estructurales sin llegar al colapso. Estas construcciones constan de paredes de mampostería 0.30 m de espesor de ladrillos cerámicos macizos y techos planos de hormigón armado provistas de una carga superior de tierra y cubierta de teja cerámica.

Las viviendas de construcción más reciente hechas con paredes de bloques de cemento y techos de hormigón armado sin carga superior fueron las más afectadas por la explosión y sufrieron colapso total o parcial. Las principales causas de los daños fueron por un lado la insuficiente resistencia de las paredes de bloques a las

presiones laterales como consecuencia de la falta de vigas y columnas de hormigón armado que las confinen, y por otro lado la falta de elementos de anclaje que retengan el techo de hormigón armado a la mampostería. Estos dos efectos actuaron de una manera concurrente, ya que el desprendimiento de los techos disminuyó la resistencia a flexión de las paredes al tiempo que modificó las condiciones de apoyo lateral de los muros en su unión con los techos.

Como apreciación final se destaca que los daños a las paredes de mampostería estuvieron asociados a desplazamientos laterales hacia el exterior, poniendo en evidencia la importancia del efecto de la sobrepresión interior resultante de reflexiones de la onda de presión externa que ingresó sin mayor obstáculo a través de puertas y ventanas.

RECONOCIMIENTOS

Los autores reconocen y agradecen el apoyo brindado por la Agencia Internacional de Energía Atómica para realizar el presente trabajo. También agradecen la colaboración de los Profesores José E. Stuardi, Alfredo Payer y Gabriel Troglia del Departamento de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba, que colaboraron en el análisis y en las tareas de inspección de campo. Esta investigación fue apoyada por subsidios de FONCYT, CONICET y Agencia Córdoba Ciencia, todos organismos oficiales de apoyo a la investigación científica y tecnológica de Argentina.

REFERENCIAS

- Biggs, J. M. (1964). *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill.
- Lysmer, J. y Kuhlemeyer, R.L. (1969). "Finite Dynamic Model For Infinite Media", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 95(4), pp 859-877.