

Causas del accidente y recomendaciones para minimizar sus efectos

# *Análisis de la* **EXPLOSIÓN** *de una* **CISTERNA** *de gas natural licuado*

Por **J.M. BONILLA MARTÍNEZ**, Ingeniero Químico, Ingeniero Técnico Industrial, Oficial de Bomberos. e-mail: wjuanma@yahoo.com. **J. BELMONTE PÉREZ**, Técnico de nivel medio en Prevención de Riesgos Laborales. Sargento de Bomberos. e-mail: jbelmonte094@gmail.com. **J.A. MARÍN AYALA**, Sargento de Bomberos. Experto en Riesgo Químico. e-mail: sierra11ciezal@hotmail.com.

**E**l 20 de octubre de 2011, un vehículo cisterna sufrió un accidente en Zarzalico, término municipal de Lorca (Murcia). A consecuencia del mismo se produjo el incendio inmediato de la cisterna y la posterior explosión de la misma, falleciendo el conductor del camión. La unidad, que transportaba 46.000 litros (21.589 kg.) de gas natural licuado (GNL), se dirigía a Fonelas (Granada) tras cargar en una planta de Cartagena (Murcia). Según la tipología de los accidentes contemplada en la Directriz Básica de Planificación de Protección Civil para accidentes de transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril, se trata de un siniestro de tipo 4 desde sus momentos iniciales, con desenlace en tipo 5.

El 22 de junio de 2002, otro vehículo cisterna de características similares al anterior sufrió un accidente en Tivissa (Tarragona) que también provocó un incendio y acabó en explosión. Se da la



El presente artículo describe el accidente sufrido en la provincia de Murcia (España) en 2011 por una cisterna de gas natural licuado que tuvo como consecuencia el posterior incendio y explosión de la carga. Los efectos fueron notables en términos de radiación térmica, sobrepresión y proyección de fragmentos. Es el segundo siniestro de este tipo en el mundo del que tenemos noticia, tras el ocurrido en Tivissa (Tarragona) en 2002. Se analizan las posibles causas y se formulan conclusiones y recomendaciones para evitar este tipo de accidentes.



circunstancia de que, hasta ese momento, de todos los accidentes registrados en cisternas de GNL, ninguno había sufrido la explosión del depósito. Aunque el de Zarzalico presenta ciertas similitudes con el accidente de Tivissa, se aprecian algunas diferencias notables: carretera de gran tránsito vehicular, una gasolinera próxima, un número importante de personas y, especialmente, el hecho de que los bomberos llegaron al lugar cuando la cisterna estaba incendiada. Cuarenta y siete minutos después de su llegada, la cisterna estalló (el tiempo total hasta la explosión fue de 71 minutos). En el de Tivissa, los bomberos, aunque se dirigían al lugar de los hechos, no estaban presentes cuando la cisterna explotó. Por tanto, en el accidente de Zarzalico se cuenta con los testimonios de primera mano de testigos presenciales y de los propios intervinientes.

## El escenario y el accidente

El accidente se produjo en el punto kilométrico 3,5 de la autovía A-91 que une Puerto Lumbreras con Granada. El lugar está a 856 metros de altitud sobre el nivel del mar. A unos 150 metros del accidente, en el lado opuesto de la calzada (dirección sur), se ubica una gasolinera que cuenta con cafetería-restaurante, tienda y zona de descanso para vehículos pesados. A unos 90 metros, junto a una vía de servicio que discurre paralela al punto del accidente (dirección norte), hay una casa de campo habitada. El punto donde tuvo lugar la explosión presenta, en el arcén de la autovía, un talud de tierra y roca de unos 10 metros de altura de promedio (Figura 1).

Sobre las 8:00 horas, un camión que transportaba dos grandes placas de hormigón prefabricado se detuvo por avería en el arcén de la autovía, invadiendo parcialmente el vial derecho, como puede apreciarse en las figuras 4 y 6. Unos veinte minutos después, el camión cisterna

colisionó con la parte posterior del vehículo estacionado. Como consecuencia del choque se produjo la pérdida de control de la cisterna, que sobrepasó al camión plataforma y, tras romper el guardarraíl del arcén, se empotró finalmente en la cuneta contra el talud. La unidad quedó apoyada sobre sus ruedas, ligeramente inclinada hacia la derecha por el desnivel de la cuneta, y con la cabeza tractora girada hacia el semirremolque (efecto tijera), quedando aprisionada entre éste y el talud (Figura 2).

Tras detenerse, el vehículo cisterna se inflamó de forma súbita. Diversos testigos presenciales que se encontraban en la gasolinera y en la cafetería así lo corroboran. También las declaraciones del conductor del vehículo plataforma encajan con esta circunstancia, ya que in-

tuvo tentó auxiliar al del vehículo cisterna, pero no pudo aproximarse debido a la magnitud de las llamas.

## Respuesta a la emergencia

Un testigo presencial dio aviso al servicio de emergencias 112, activándose los mecanismos de respuesta. A las 8:21 horas se movilizaron las primeras dotaciones de bomberos desde el parque de Lorca, perteneciente al Consorcio de Bomberos de la Región de Murcia, que dista 31 kilómetros del lugar de los hechos. La información que recibieron de salida era la del incendio de un camión con el conductor atrapado. Durante el desplazamiento se les transmitió que podría tratarse de una cisterna de gas natural.

Las primeras actuaciones a su llegada

estuvieron encaminadas a identificar y contrastar la información recibida durante el trayecto. En pocos minutos se confirmó que se trataba de una cisterna con gas natural licuado y que el conductor se encontraba atrapado en el interior de la cabeza tractora, envuelta por las llamas. También pudieron observar la pérdida casi completa de la envoltura de la cisterna y de parte del aislante. La emisión de humos disminuyó de forma considerable, por lo que el fuego parecía estar alimentándose exclusivamente del contenido de la cisterna (Figura 3).

A partir de la información obtenida, y ante el riesgo de una potencial explosión, se decidió acordonar la zona en un perímetro de 600 metros, ordenando a la Guardia Civil el corte del tráfico de la autovía en ambos sentidos a dicha distancia. Los vehículos de bomberos se retiraron a una distancia inicial de unos 150 metros, y se procedió, igualmente, a evacuar a todo el personal de la gasolinera y del restaurante, así como a un nutrido grupo de personas que se encontraban en el puente sobre la autovía presenciando la escena. Esta operación fue realizada por los bomberos hasta en tres ocasiones, ya que la población era muy reacia a alejarse de las inmediaciones de la cisterna siniestrada.

Momentos antes de la explosión se escuchó un silbido penetrante procedente de la cisterna y una intensificación del fuego, por lo que se decidió ampliar la zo-



**Figura 1.** Imagen aérea de la zona del accidente. Fuente: Instituto Geográfico Nacional.



**Figura 2.** Situación de los vehículos tras el accidente. Fuente: Víctor Sanz y Juan Francisco Valera.



**Figura 3.** Vista de la cisterna al llegar las dotaciones de bomberos. Fuente: Testigo presencial.

na de intervención a 200 metros. Cuando los bomberos se estaban retirando al nuevo perímetro se produjo el estallido de la cisterna. Algunos intervinientes relatan que escucharon una detonación a sus espaldas, instintivamente se giraron y pudieron observar una ingente masa ardiendo que se elevaba y avanzaba hacia ellos. Durante un breve espacio de tiempo sintieron un intenso calor mientras corrían para protegerse.

Tras la explosión, la cisterna se rompió en varios pedazos y se produjeron diversos incendios de vegetación en la parte

superior del talud y alrededor de la cisterna. La extinción de esos focos secundarios se completó finalmente sin mayores contratiempos. A las 10:05 horas se consiguió recuperar el cadáver del conductor del vehículo y a las 10:52 se dio por finalizada la emergencia (Figura 4).

### Fuga del contenido. Las causas probables

Desde sus inicios el incendio tuvo una gran virulencia, ya que rápidamente prendieron todos los elementos combustibles

de cabina, ruedas y combustible del vehículo, envolviendo totalmente a la cisterna por su parte central. Tras la combustión de éstos, la densidad del humo descendió notablemente y se pudo apreciar la destrucción total de la envolvente, salvo en el fondo posterior, y que el incendio quedó relegado a dos grandes dardos de fuego: uno en la parte central y otro en la parte trasera derecha de la cisterna, tal como puede apreciarse en las fotografías siguientes. Sin embargo, podría tratarse de un solo foco debido al efecto rebote desde la parte ventral sobre la carretera y el talud (Figura 5).

No parece probable que un incendio de tal magnitud se desencadenara de forma repentina solo por el mero hecho del impacto, ya que ningún elemento del vehículo posee un índice de inflamabilidad para que así suceda. El único componente extremadamente inflamable era la carga, por lo que es más que probable que la colisión provocó una fuga del contenido de la cisterna. Como posibles fuentes de ignición se postulan las fricciones mecánicas, chispas o arcos eléctricos, el nivel térmico del motor, sus elementos y los conductos de escape. Las declaraciones de algunos testigos que creyeron oír «como un fuerte silbido», diversos restos de la cisterna encontrados en las inmediaciones del vehículo plataforma y la existencia de los dardos incendiados, parecen constatar la veracidad de este hecho.

### El siniestro de Zarzalico, según la tipología de accidentes de la Directriz Básica de Protección Civil, tiene inicialmente categoría 4, aunque su desenlace fue de tipo 5



**Figura 4.** Momentos posteriores a la explosión. Focos de incendio. Fuente: Testigo presencial.



**Figura 5.** Incendio en sus momentos iniciales y antes de la explosión. Fuente: Testigo presencial.

Son varias las hipótesis que se barajan como causas posibles que dieron origen a la fuga. Además de la cabina, la parte central de la cisterna, donde están ubicados los elementos de carga, descarga, seguridad y nivel de llenado, también colisionó con la plataforma o con algún otro elemento del camión estacionado. Muy próximo a este se halló una parte considerable del armario de color azul donde se alojan todos los dispositivos mencionados. Esta circunstancia es un indicativo de que la zona de valvulería sufrió un impacto que pudo dañar alguna de las conducciones (Figura 6).

Los restos de la cabeza tractora presentaban unas enormes deformaciones en la parte derecha, indicativas de la magnitud del impacto. La cabina pudo girarse completamente y arrastrarse así a lo largo de toda la plataforma y la cabina del otro vehículo, golpeando el armario de forma directa o indirecta. La rotura de todos los elementos de sujeción de las placas de hormigón, ancladas al lateral de la plataforma, pudo producirse por esta causa. Otra posibilidad es que alguna de las conducciones fuera seccionada por las pilastras del guardarraíl al entrar la cisterna en la cuneta.

Lo que parece estar totalmente descartado es la perforación de la cisterna por impacto contra la esquina trasera de la plataforma, aunque fue una conjetura que también se contempló en primera instancia. De haberse producido, hubieran quedado restos de la envolvente y del



**Figura 6.** Restos del armario ventral de la cisterna (a la izquierda, en azul). Fuente: Testigo presencial.

aislante en la zona trasera del camión averiado como una evidencia clara, y no se halló ninguno. Por otra parte, todas las imágenes estudiadas constatan de manera palpable que la fuga se encontraba en la parte baja central. En cualquier caso, estas hipótesis no son excluyentes; pudieron incluso sucederse varias de ellas que dieron como resultado la rotura de alguna de las conducciones que no cuentan con válvulas hermetizadoras interiores y la consecuente fuga del producto.

## Tipología de la cisterna

Actualmente existen dos tipos de cisternas ADR para el transporte de gas natural licuado: cisternas de doble casco de acero con aislamiento de perlita y vacío, y cisternas monocasco de acero con ais-

lamiento de poliuretano y envolvente de aluminio. La cisterna accidentada era de este último tipo, cuyas características aparecen en la Tabla 1.

Todo el sistema de carga y descarga, así como los elementos de seguridad y nivel se encuentran alojados en la parte central inferior de la cisterna, dentro de un armario protector. Las válvulas y conducciones son las siguientes:

**Bocas de carga y descarga.** Dos de fase líquida y una de fase gaseosa. Cuentan con doble válvula, una manual y otra obturadora, en el interior de la cisterna accionada mediante un dispositivo neumático (Figura 7).

**Válvulas de seguridad.** Dispone de tres válvulas de seguridad, dos taradas a 7 bar y una a 9 bar. Enlazan con la fase gaseosa mediante un tubo buzo que recorre la

**Tabla 1.** Características de la cisterna.

| Magnitud/Elemento             | Valor/ Descripción                        |
|-------------------------------|---|
| Longitud total                | 14 metros                                 |
| Anchura total                 | 2,6 metros                                |
| Diámetro interior             | 2,34 metros                               |
| Altura                        | 3,8 metros                                |
| Volumen nominal               | 56.500 litros                             |
| Presión de prueba             | 9,1 bar                                   |
| Presión de servicio           | 7 bar                                     |
| Temperatura de servicio       | +50 / -196°C                              |
| Material del cuerpo interior  | Acero inoxidable 304LN                    |
| Espesores del cuerpo interior | 4 mm virola / 6 mm fondos                 |
| Rompeolas interiores          | 7 unidades de 3 mm                        |
| Aislamiento                   | 130 mm de poliuretano inyectado           |
| Forro exterior                | Aluminio de 2 mm / fondos de poliéster    |
| Válvulas de seguridad         | 3. 2 taradas a 7 bar y 1 tarada a 9,1 bar |

Fuente: Ros Roca Indox Cryo Energy S.L.

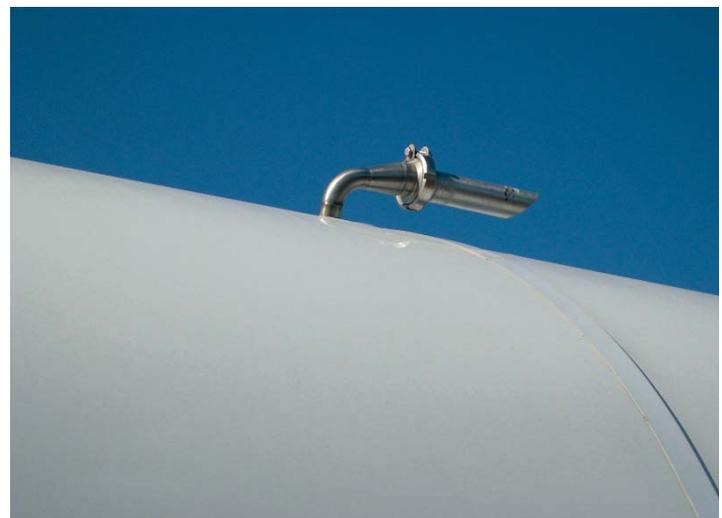
cisterna, bajo el aislante, por su parte inferior y asciende por el fondo delantero hasta la parte superior, donde conecta con el depósito. La salida de las válvulas de seguridad comunica con otro tubo que asciende rodeando la cisterna por la parte central (siempre bajo el aislante) y posteriormente se dirige por la parte superior hacia la trasera, donde comunica al exterior mediante el dispositivo de venteo (Figura 8).

**Válvulas de vaciado en emergencia.**

Dos válvulas manuales conectadas a sendas conducciones que discurren paralelas a la pared de la cisterna por su parte



**Figura 7.** Vista general del conjunto de válvulas y conducciones. En primer término, las bocas de carga y descarga. En la fotografía derecha, detalle de las válvulas obturadoras interiores. Fuente: Autores.



**Figura 8.** Válvulas de seguridad y dispositivo apagallamas de venteo. Fuente: Autores.

interior, y en sentidos opuestos. Ascenden hasta una altura ligeramente superior a la mitad del depósito y se encuentran rematadas por un sifón en cada uno de los extremos. En caso de vuelco a 90° o 270°, siempre quedará un extremo en la fase líquida y otro en la gaseosa, permitiendo el vaciado de emergencia.

**Válvula de máximo llenado.** Tubo sifón que asciende por el interior de la cisterna hasta la máxima altura de llenado (el 85% de la capacidad). Mediante un sistema de purga manual permite saber si el nivel de líquido se encuentra por encima de los límites legales permitidos.

**Control de nivel.** Dispositivo que conecta la fase líquida y la gaseosa a sendos dispositivos de medida de presión. Calcula el nivel de llenado por relación entre la presión hidrostática del líquido y la presión interior de la cisterna.

De todos los dispositivos y conducciones mencionados, solo los de carga y descarga cuentan con válvulas de asiento interiores que garantizan la hermeticidad de la cisterna; en caso de rotura de tuberías conectadas a ellas no existiría fuga al estar obturadas desde el interior. Aunque resulta evidente que la cisterna golpeó en la zona del armario, tal como demues-

tran los restos de este en la calzada, las imágenes disponibles no permiten averiguar el estado de dichas válvulas al no mostrar el interior de la cisterna en esta parte. No obstante, esta suposición parece menos probable que la rotura de alguna otra conducción que no dispone de válvulas obturadoras.

## Antecedentes históricos de accidentes con GNL

En un reciente estudio<sup>(5)</sup> se afirma que de los 89 accidentes con materias peligrosas registrados en el mundo que dieron origen a BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) entre 1926 y 2004, tan solo uno (Tivissa) se originó en una cisterna de GNL que se vio sometida, tras un accidente, a un incendio de la carga. Recientemente se han producido en España varios accidentes con transporte de GNL por carretera (Tabla 2).

Los accidentes tipo 3 al 5 son los más peligrosos y los que ofrecen un mayor riesgo a la población y a los intervinientes. En estos casos la intervención se va a limitar, fundamentalmente, a las acciones de rescate y evacuación. Los siniestros tipos 1 y 2 van a precisar de un con-

trol continuo sobre las variables de presión y temperatura en el interior de la cisterna, debido a su condición de sustancia criogénica.

## Efectos de la explosión

Los efectos de la explosión de Zarzalico se corresponden con las registradas en las explosiones BLEVE documentadas a día de hoy, a tenor de las fuentes bibliográficas consultadas<sup>(6,7,8)</sup>. Según los especialistas, la mayoría de las BLEVE se producen cuando el recipiente contiene entre 1/2 y 3/4 de volumen de líquido total. Al producirse una BLEVE en un recipiente, según el mecanismo expuesto, se originan los efectos siguientes:

A) **Sobrepresión.** Se produce debido a la onda de choque provocada por los vapores resultantes de la ebullición en masa de la sustancia. Esta puede ser muy importante y causar daños a personas y bienes. La magnitud de la onda de presión ocasionó daños materiales importantes a distancias de hasta 160 metros. Esta sobrepresión que se manifestó parece que está también en consonancia con los valores que los especialistas estiman que se puede esperar de una BLEVE.

**Tabla 2.** Accidentes de cisternas de gas natural en España.

| Año          | Lugar                      | Consecuencia                       | Víctimas                       | Tipo accidente * |
|--------------|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------|
| 1999 (27/01) | Sevilla                    | Incendio de neumático cisterna     | –                              | 4                |
| 2000 (10/10) | Jabugo (Huelva)            | Vuelco cisterna                    | –                              | 2                |
| 2002 (12/06) | Beas (Huelva)              | Vuelco cisterna                    | –                              | 2                |
| 2002 (22/06) | Tivissa (Tarragona)        | Explosión BLEVE. Incendio forestal | Fallecimiento conductor        | 5                |
| 2002 (04/12) | Huelva                     | Vuelco cisterna                    | Conductor heridas leves        | 2                |
| 2004 (24/03) | Jabugo (Huelva)            | Incendio cabina cisterna           | –                              | 4                |
| 2007 (11/10) | Algodonales (Cádiz)        | Vuelco con derrame                 | Fallecimiento conductor        | 3                |
| 2008 (19/08) | Reolid (Albacete)          | Vuelco con fuga                    | Fallecimiento conductor        | 3                |
| 2010 (25/10) | Sanlúcar la Mayor (Huelva) | Fuga por valvulería                | –                              | 3                |
| 2011 (20/10) | Zarzalico (Murcia)         | Explosión BLEVE. Incendio matorral | Fallecimiento conductor        | 5                |
| 2011 (27/10) | Ribarroja (Valencia)       | Vuelco sin derrame                 | –                              | 2                |
| 2011 (21/11) | Palos (Huelva)             | Alcance de cisterna GNL vacía      | Conductor lesiones de gravedad | 2                |
| 2012 (14/01) | Puerto Lumbreras (Murcia)  | Vuelco cisterna vacía              | Conductor lesiones de gravedad | 2                |
| 2012 (17/01) | Puerto Lumbreras (Murcia)  | Vuelco cisterna vacía              | –                              | 2                |
| 2012 (24/01) | Huelva                     | Vuelco cisterna                    | –                              | 2                |

\* Real Decreto 387/1996, de 1 de marzo, por el que se aprueba la directriz básica de planificación de protección civil ante el riesgo de accidentes en los transportes de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril. Fuente: Autores.



**Figura 9.** Daños ocasionados por la sobrepresión sobre elementos de la gasolinera. Fuente: Autores.

**Tabla 3.** Magnitud de la explosión de Zarzalico.

| Hipótesis                                    | Diámetro bola de fuego (m) | Irradiación térmica (kW/m <sup>2</sup> ) | Duración BLEVE (s) | Altura bola (m) | Equivalente TNT (kg) |
|--|----------------------------|--|--------------------|-----------------|----------------------|
| a) Explota toda la carga (21.580 kg)         | 166,0                      | 132,2                                    | 11,0               | 124,5           | 9.190,1              |
| b) Explota la mitad de la carga (10.790 kg)  | 132,5                      | 79,1                                     | 9,2                | 99,3            | 4.599,5              |
| c) Modelo de dispersión (Explotan 767,80 Kg) | 56,0                       | 21,8                                     | 4,6                | 42              | 900,5                |

Elaboración propia. Fuente: J.M. Santamaría y P.A. Braña.

Existe un factor determinante respecto a la sobrepresión, que es la posición de la cisterna respecto del entorno topográfico. La cisterna se encontraba muy próxima a un desmonte de la autovía, de aproximadamente 10 metros. Este terreno actuó como parapeto, redirigiendo la onda reflejada en dirección sur, apreciándose cuantiosos daños en la gasolinera y su entorno.

En cuanto a la cubierta de la gasolinera, las lamas de cerramiento interior se desprendieron y deformaron en la arista oeste, tomando como referencia la autovía A-91 en sentido del accidente como este-oeste. Asimismo, se produjeron algunas grietas en la fachada del edificio de la gasolinera.

Las ventanas de la gasolinera fueron derribadas hacia el interior, incluidas, en algunos casos, sus juntas. Se produjo la rotura generalizada de cristales. En la parte destinada a multiservicio, el falso techo está resuelto a base de placas de escayola sobre rieles de aluminio. Algunas de ellas se levantaron como consecuen-

cia de la onda expansiva. Se observan, además, algunas grietas, sin afección estructural, en el recubrimiento de pilares. A tenor de la rotura del 80% de los cristales, se estima que la sobrepresión tuvo un valor máximo comprendido entre 0,03 y 0,04 bar (Figura 9).

Por último, cabe destacar que en el perímetro de urbanización de la gasolinera, a 170 metros del origen de la explosión, una farola de 15 metros de báculo se deformó 25° respecto de la vertical.

**B) Radiación térmica.** La intensidad de la radiación térmica recibida por un ser vivo u objeto situado en el campo de influencia de un incendio depende de las condiciones atmosféricas (humedad ambiente), de la geometría del incendio (diámetro de la base del incendio, altura de las llamas y distancia al punto irradiado) y de las características físico-químicas del

producto en combustión. Las radiaciones que dan lugar a efectos térmicos en su interacción con la materia están en la banda del ultravioleta, visible e infrarrojo.

La radiación es el efecto más devastador de una explosión BLEVE. Mediante cálculo, se han realizado las estimaciones mostradas en la Tabla 3.

Los efectos de la radiación térmica observados sobre el terreno en el caso de Zarzalico parecen confirmar estas distancias. En la fotografía adjunta, se observa el límite de acción de la bola de fuego, con su reflejo en la señal de tráfico. Hubo un contenedor en que se inflamó la madera existente, de donde puede desprenderse que en ese punto (a 141 metros de la cisterna) se alcanzaron 12,5 kW/m<sup>2</sup>. Por ejemplo, con 4 kW/m<sup>2</sup> las personas sufren dolor si no son capaces de alcanzar lugares protegidos. Esto no fue

**De los 89 accidentes con materias peligrosas ocurridos en el mundo entre 1926 y 2004, solo uno se originó en una cisterna de GNL sometida a un incendio de la carga**

registrado en Zarzalico, donde la radiación que llegó a las personas estuvo en torno a  $1,6 \text{ kW/m}^2$ .

Uno de los testigos situados a 600 metros dijo que sintieron una ráfaga de aire caliente, tolerable pero claramente perceptible.

Según J.E.E., tras la explosión había fuego por todas partes, como se puede apreciar en la propagación de pequeños fuegos de matorrales, a partir de las huellas dejadas en el terreno, principalmente en arcones de vía de servicio y mediana de la autovía. Los olivos y sus frutos, situados a 110 metros del punto de la explosión, se vieron afectados, como se puede ver en la fotografía de la derecha (Figura 10).

En el accidente de Zarzalico, a pesar de que se llevó a cabo la evacuación de la gasolinera, de sus inmediaciones y el corte de la autovía en ambos sentidos, hubo dos personas que permanecieron a escasos metros en el momento de la explosión. Uno de ellos accedió con su turismo a la vía de servicio por un camino rural y el otro estaba pernoctando en la gasolinera con un camión frigorífico. Ninguno de ellos sufrió daños personales, ya que en el habitáculo del vehículo se mantuvieron condiciones compatibles con la vida. Sin duda, el tener las ventanillas cerradas les salvó la vida (Figura 11).

**Proyección de fragmentos.** En este tipo de explosiones, los fragmentos suelen ser escasos y de gran tamaño, lanzados a grandes distancias, pudiendo incluso superar los 1.000 metros (como sucedió en 1984 en Ciudad de México y en el accidente de Romeoville, Illinois, EE UU). Se considera que pueden lanzarse fragmentos de cisterna a una distancia de 4-6 veces el radio de la bola de fuego, y en algunos casos hasta 15R. Como se comentó antes, la cisterna quedó fragmentada en tres gran-



**Figura 10.** Daños ocasionados por la radiación en un panel informativo y un olivo. Fuente: Autores.

des trozos que quedaron sobre la calzada, merced a la barrera que supusieron el talud y la mediana de la autovía.

En la Figura 12, la mayor intensidad de la radiación térmica de la bola de fuego se representa dentro del círculo amarillo, en tanto que la proyección de fragmentos alcanzó distancias que se encuentran dentro del radio del círculo blanco. Las figuras pentagonales que aparecen en color blanco representan los siete rompeolas que contenía el interior de la cisterna. La proyección espacial de la cisterna aparece en mallado rojo y blanco, estando en su punto medio la ubicación de la misma. A la izquierda, en el margen superior de la ilustración, aparece la gasolinera.

Un rompeolas golpeó contra la parte frontal (canto) de la cubierta a base de chapa metálica ondulada del aparcamiento de la gasolinera, situado a unos 150 metros de la cisterna.

Dos de los rompeolas quedaron junto a la cisterna, como se aprecia en la siguiente fotografía. Otro cruzó la calzada e impactó en la cuneta del margen contrario (Figura 13). Se recogieron pequeños fragmentos del vehículo a una distancia de 200 metros de la cisterna.

## Cómo actuar ante incendios de cisternas de GNL

Cuando el rescate carece de prioridad, el recipiente que contiene el gas criogénico e inflamable se encuentra inmerso en un dardo de fuego alimentado por sí mismo y la presión interior se manifiesta por una salida continua de gas a través del dispositivo de venteo, entonces la acción más inmediata debe ser la evacuación de la población. Estas son algunas de las razones:

### El tiempo

La mayoría de BLEVE suceden en los primeros 10-15 minutos de haber incidido el fuego sobre la cisterna. El hecho de que la fuga incendiada estuviese en la parte líquida de la cisterna quizá fue el motivo del retraso en la explosión de Zarzalico. Si el dispositivo de venteo ha empezado a liberar gas de manera continuada, la presión en el interior es crítica y hay que abandonar la zona inmediatamente.



**Figura 11.** Huellas de la radiación sobre un automóvil. Fuente: Autores.

**Dos personas cercanas a la explosión de la cisterna salvaron la vida por tener las ventanillas de sus vehículos cerradas**



**Figura 12.** Radio de acción de la explosión y zona de caída de los rompeolas. Ilustración: Autores.

### ¿Refrigerar o calentar?

En estas condiciones, la ubicación de monitores de agua para refrigerar solamente expone a los intervinientes a un riesgo innecesario por dos motivos. El primero es que el agua, cuando se aplica sobre una cisterna criogénica desnuda, *calienta* el gas natural licuado. Aplicando un líquido a una temperatura de 200° C sobre una superficie que está a 20° C, el resultado no es refrigerar esta superficie. El mismo caso es el de rociar agua que está a 20° C sobre algo que se encuentra a -160° C. Podemos, sin ser conscientes de

ello, aumentar la presión interna y acelerar el fenómeno BLEVE. De forma estricta, si proyectamos agua sobre la cisterna, lo que hacemos, en todo caso, es refrigerar el aislante, lo cual tampoco consigue ningún efecto. Cuando el aislante se ve afectado, entonces es posible que el agua contacte con la pared metálica que contiene el gas natural licuado y vaporice mayor cantidad de líquido.

La refrigeración de la cisterna solo tiene sentido cuando la envolvente está intacta y el fuego que incide sobre la misma proviene de una fuente de calor ex-

terna. En este caso, los expertos estiman que es preciso un caudal de, al menos, 10 litros por minuto, por metro cuadrado de cisterna. Considerando el área de la cisterna igual a:  $A = 2\pi(r^2 + rh')$ , despreciando en los cálculos de la esfericidad de los fondos, para un radio de 1,15 m y una longitud  $h$  de 14 metros, tenemos que  $A = 110 \text{ m}^2$ . Por tanto, para la refrigeración con agua se necesitaría, al menos, un caudal de 1.100 litros por minuto. Si no es posible lograr, hay que desistir de la refrigeración. Esos caudales escapan del alcance de un servicio de bomberos que se desplaza a un accidente de estas características.

El otro motivo es que, por muy lejos que nos situemos de la cisterna, el alcance máximo de un chorro de agua proyectada por un monitor es, en el mejor de los casos, de unos 50 metros, con lo que habría que valorar si está justificado asumir el riesgo de exponer a los bomberos a estas exiguas distancias de intervención. Por otra parte, a esa distancia la mayor parte del agua proyectada se dispersaría antes de incidir sobre la cisterna, con lo que tampoco cumpliría su objetivo.

También debe tenerse muy presente que no se proyecte agua sobre la válvula de alivio de presión, situada en la parte superior de la cisterna, ya que se corre el riesgo de que se congele, obstruyéndola y generando una situación insegura.



**Figura 13.** En primer término, dos de los rompeolas de la cisterna. Fuente: Testigo presencial.

## Hay que instar a las autoridades competentes a que el transporte de gas natural licuado se realice en cisternas de doble casco al vacío, por su mayor seguridad

### ¿Extinción?

Por otro lado, si lo que se persigue con la aplicación del agua es apagar la llama de la fuga, digamos que para afrontar la extinción de un fuego de gases el agua es el agente menos eficaz. El enorme riesgo que supone llegar hasta el punto mismo de la fuga para intentar su extinción, unido al riesgo de congelación que existe, caso de apagarla, descartan esta posibilidad. En tal caso, se generaría una nube gaseosa sin arder (recordemos, en este supuesto, que los vapores salen a  $-160^{\circ}\text{C}$  y que son 1,4 veces más pesados que el aire, por lo que se podría tener una UVCE (*Unconfined Vapor Cloud Explosion*)).

### Evacuación

Queda claro, por tanto, que evacuar a la población en un radio amplio, situar los equipos de intervención en la zona más favorable, con relación a la cisterna, y en sentido contrario al viento, son las únicas acciones eficaces y realistas ante un problema de esta magnitud.

En cuanto a la mejor ubicación con respecto a la cisterna, colocarse detrás de alguno de los fondos es la peor elección. Sin embargo, van a ser las condiciones orográficas la que nos forzarán la disposición de los medios. Como medida de autoprotección, se considera que la distancia mínima de seguridad que debe guardar un bombero equipado, para este caso, debería ser de  $4R$  (siendo  $R$  el radio de la teórica bola de fuego), es decir,  $4 \times 83 = 332$  metros. En todo caso, se recomienda que la distancia no sea inferior a 100 metros.

La distancia mínima de evacuación de la población, según los expertos, se situaría en torno a  $15R$ , es decir,  $15 \times 83 = 1.245$  metros.

## Conclusiones

De este accidente se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Ante el accidente de una cisterna de GNL que se encuentra envuelta en un fuego originado por el escape de su propio producto, la primera acción a realizar será el rescate de personas y la evacuación de la población. La extinción del incendio debe abordarse cuando su origen sea exterior a la cisterna y se pueda combatir con medios suficientes. Respecto del rescate de personas, en la mayoría de los casos se desconoce el tiempo que la cisterna está sometida a la llama, por lo que deberá valorarse el riesgo que se asume si se lleva a cabo el salvamento de personas. Es una situación compleja, ya que si existen personas atrapadas, la operaciones de salvamento deberán realizarse en condiciones hostiles (al no disponerse de medios para afrontar el incendio), con el consiguiente consumo de tiempo. Ello podría ocasionar múltiples víctimas. Recordemos que asistimos a estos siniestros con el objetivo de lograr su control y mitigar sus consecuencias. Posiblemente, como sucedió en Zarzalico, apenas haya tiempo para ha-

cer un reconocimiento y salvamento rápido. Por tanto, debe evacuarse la población a una distancia suficiente, en el exterior de edificaciones. El parapetarse a distancias inferiores a las establecidas no garantiza la protección, como se ha demostrado en estas situaciones.

2. Solicitar apoyo para llevar a cabo la evacuación y asistencia sanitaria en prevención. Delegar las funciones de evacuación y corte de vías a las fuerzas y cuerpos de seguridad cuando se personen.

3. Inspeccionar todos los posibles lugares donde pueda haber personas, o desde donde puedan acceder al lugar siniestrado, por inverosímil que pueda parecer. En este accidente, una persona estaba presente en las proximidades del lugar del accidente y otra accedió a sus cercanías sin ninguna restricción de paso. La primera no fue evacuada y el acceso de la segunda no fue previsto.

4. Por último, y no por ello menos importante, hay que instar a las autoridades competentes a normalizar el transporte de gas natural licuado en cisternas de doble casco al vacío, por su mayor seguridad, o en su caso, impedir que las cisternas monocasco dispongan de conducciones que comuniquen directamente las fases líquida y gaseosa con el exterior, sin ningún dispositivo adicional de corte en caso de seccionamiento accidental. ♦

### PARA SABER MÁS

- [1] Instituto Geográfico Nacional. Visor IBERPIX de mapas topográficos. Coordenadas del accidente:  $37^{\circ}37'9,56''\text{N}$ ;  $1^{\circ}56'45,09''\text{W}$ .
- [2] Appendix E: LNG Road Tanker Incidents. LNG Fire Protection & Emergency Response. BP Process Safety Series-ICHEM. August 15, 2007. ISBN-13:978-0852955154.
- [3] Ros Roca Indox Cryo Energy S.L. <http://www.cryoenergy.net>
- [4] Phil Cleaver, Mike Johnson, Ben Ho. Review: A summary of some experimental data on LNG safety. Journal of Hazardous Materials 140 (2007) 429-438.
- [5] Tasneem Abbasi, S.A. Abbasi. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. Journal of Hazardous Materials 141, 2007, p489-519.
- [6] Lees, F.P. Loss prevention in the process industries-hazard identification, assessment, and control, vols. 1-3, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1996.
- [7] Planas-Cuchi, E., Gasulla, N., Ventosa, A y Casal, J. Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas, J. Loss Prev. Process Ind. 17, 2004, p315-321.
- [8] Venart, J.E.S. Boiling liquid expanding vapor explosions (BLEVE); possible failure mechanisms and their consequences. In Proceedings of the IChemE Symposium Series No. 147, 2000, p121-137.
- [9] Santamaría J.M. y Braña, P.A. Análisis y reducción de riesgos en la industria química. Editorial MAPFRE. Madrid, 1994.
- [10] Phani K. Raj. Exposure of a liquefied gas container to an external fire. Journal of Hazardous Materials A122 (2005) 37-49.