
¿OCULTARSE O HUIR? DISEÑO DE UNA SOLUCIÓN ECLÉCTICA PARA GESTIONAR EL RIESGO

JORDI SANS PINYOL¹

Ingeniero industrial, inspector de Cuerpo de Bomberos de la Generalitat de Cataluña, responsable de investigación del Instituto de Seguridad Pública de Cataluña

OLGA SERRANO PÉREZ²

Ingeniera química, asistente de investigación del Instituto de Seguridad Pública de Cataluña

La humanidad se ha visto siempre expuesta a los peligros de la naturaleza. Estos peligros han provocado riesgos cuantificables de los cuales las personas inicialmente se han defendido y han gestionado de forma intuitiva y empírica, en función de los daños provocados y de las frecuencias de los éxitos. Básicamente escondiéndose en cuevas (confinamiento) o huyendo (evacuación).

Con la evolución de la tecnología han nacido nuevos peligros y se han acentuado los derivados de los riesgos naturales, ya existentes. La gestión de la interfaz formada entre los riesgos provocados por los avances tecnológicos, los beneficios obtenidos, y la seguridad de las personas, los bienes y el medio ambiente es todavía hoy en día objeto de largas discusiones entre los diferentes agentes de los sistemas de seguridad, públicos y privados, y la sociedad civil. Hemos inventado artefactos que a menudo no podemos controlar totalmente; sólo hay que pensar en la energía nuclear. Por el mismo motivo debemos inventar también soluciones creativas para gestionar los riesgos que se derivan.

Humanity has always been exposed to dangers of nature. These dangers have provoked quantifiable risks, from which people have initially defended themselves and have managed in an intuitive and empirical way, depending on the damages provoked and the frequency of the events. Basically, two reactions were derived: hide in caves (confinement) or escaping (evacuation).

Due to the evolution of technology, new dangers have arisen and the already existing natural risks have been magnified. Nowadays, the private and public safety agents and civil society have long discussions regarding the management of the interface formed between the risks provoked by technological advances, the benefits obtained, the protection of goods and the environment and people's safety. We have invented artefacts that often we can't control completely; it is only necessary to think of the nuclear energy. And it is for this reason that we must also invent creative solutions to manage the risks that derive from these artefacts.

1. josans@gencat.cat

2. olga.serrano@gencat.cat

En este trabajo se pretende revisar el estado de la cuestión y apuntar algunas soluciones que, de una forma estructural y pasiva y basadas en el diseño y el cálculo, reduzcan la vulnerabilidad de los elementos expuestos a riesgos importantes y, por lo tanto, reduzcan daños en los casos en que no es posible adoptar soluciones radicales ni definitivas. Y bien pensadas y proyectadas, estas soluciones no son caras y se pueden integrar en un planeamiento urbanístico sostenible.

This paper intends to revise the state of the art and to point out some solutions that, in a structural and passive way, and based on the design and the calculation, should reduce the vulnerability of the elements exposed to major risks and, therefore, reduce the damage in the cases that radical or not definite solutions aren't possible to take. Well thought and projected, these solutions shouldn't be expensive and could be integrated into a sustainable urban planning.

1. INTRODUCCIÓN

El riesgo existe desde el inicio de la humanidad pero se ha convertido en un tema de importancia en la sociedad actual debido al gran efecto que pueden ocasionar las nuevas situaciones de peligro causadas por el avance de la tecnología y la mayor ocupación del territorio con infraestructuras y viviendas.

La divergencia de opiniones tanto en la clasificación como en la definición de los riesgos, y en general de la terminología relacionada con la seguridad, es consecuencia del amplio abanico temático en que son útiles. De la actividad humana derivan riesgos tanto antrópicos como tecnológicos. Los riesgos antrópicos, definidos como los causados por el comportamiento de las personas, y los tecnológicos, los que derivan de la propia actividad técnica y científica, son difíciles de diferenciar en caso de que estén implicados instrumentos y artefactos.³ En este artículo, se hace una recopilación de definiciones clave de la materia desde las más clásicas, pasando por las sobradamente aceptadas, hasta las más innovadoras.

Los escenarios de mayor riesgo tecnológico y, en consecuencia, los que provocan la mayoría de accidentes graves son los debidos a la manipulación o almacenaje en establecimientos industriales o al transporte por carretera y ferrocarril de sustancias peligrosas.⁴ Su peligrosidad intrínseca crea zonas de influencia⁵ a su alrededor generando unos valores de riesgo muchas veces superiores a los tolerables. Los criterios de tolerabilidad admitidos se explicarán con más detalle más adelante.

A raíz de las diversas emergencias sucedidas con sustancias peligrosas involucradas, se ha desarrollado una normativa al respecto, como son las directivas europeas que se han ido adaptando y trasponiendo al ordenamiento jurídico del Estado español y a la normativa catalana.

El crecimiento incontrolado ya sea de la zona industrial o de la urbanización de zonas residenciales, equipamientos, infraestructuras, o bien de los dos al mismo

3. Un artefacto, a pesar de la connotación bélica asociada a la palabra, no es más que un objeto producido por el ser humano de gran tamaño, de cierta complejidad pero con poca técnica.

4. Del inglés HAZMAT, *hazardous materials*, son aquellas que por sus características fisicoquímicas presentan un riesgo para las personas o medio ambiente.

5. Las zonas de influencia se definen como el espacio donde las consecuencias de un accidente pueden causar daños a las personas, bienes y medio ambiente.

tiempo, han ocasionado que estas zonas de influencia mencionadas anteriormente tengan niveles de riesgo no tolerable en zonas habitadas, lo que se denomina solapamiento de riesgo y territorio.

Estas zonas de solapamiento no tendrían que existir con una buena identificación y evaluación de los riesgos realizada previamente a la fase de construcción. Esta primera fase debe permitir realizar predicciones sobre los posibles accidentes que se puedan originar y, por lo tanto, poner en práctica medidas de protección.

En esta circunstancia reside la importancia de realizar una buena regulación mediante una planificación territorial ordenada que integre el factor riesgo. Si no ha sido así, y una vez se ha originado esta situación, la solución no es fácil. Si se agotan los recursos disponibles para mejorar la seguridad y es imposible gestionar las emergencias se llegará a una situación límite que puede conducir al traslado de la industria en cuestión. Ello implica unas consecuencias sociales y económicas que no favorecen ni a la industria ni a la sociedad en general.

Ante esta situación, frecuente en las zonas industrializadas, y agotadas las metodologías clásicas de reducción de riesgos, cabe plantearse la instalación de barreras físicas.⁶

Una barrera física es un elemento de protección integrado en el territorio que permite resguardar a la población de los posibles accidentes de la industria, soportando los efectos químicos (nubes tóxicas y/o contaminación), mecánicos (ola de sobrepresión y proyección de fragmentos) y térmicos (radiación). Las metodologías de cálculo de los efectos posibles también se exponen en este artículo y son necesarios para el dimensionado de las barreras físicas.

La instalación de las barreras no se limita a situaciones donde el problema ya existe, son también una solución a tener en cuenta en fase de diseño según las características de la zona a urbanizar.

Hay una línea abierta de investigación para estudiar los posibles efectos beneficiosos de instalar barreras físicas de protección por riesgos de tipo natural. Se trata, en concreto, de la propuesta de construir un muro de 300 metros de altura que evite la formación de tornados parando las corrientes de aire.⁷

Las barreras son una solución de protección ecléctica;⁸ son compatibles con otras metodologías de protección pasiva, tanto las aplicadas en viviendas como en industrias, y al mismo tiempo tienen un uso para la ciudad incorporándose de manera sostenible en el tejido urbanístico.

6. Su instalación está recomendada por la normativa autonómica catalana referente a la gestión de riesgos, específicamente la Resolución IRP/971/2010, de 31 de marzo.

7. «Could giant walls protect the Midwest from tornadoes?», artículo en línea publicado el 26 de febrero de 2014 en *MailOnline*, disponible en: <<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2568448/Could-Great-Wall-Kansas-protect-Midwest-TORNADOES-1-000ft-tall-barriers-thwart-storm-threat-forever-claims-physicist.html>>.

8. *Ecléctico definido como la aplicación de medidas intermedias y conciliadoras, alejadas de soluciones extremas.*

2. EL RIESGO

2.1 DEFINICIÓN DE RIESGO, PELIGRO Y DAÑOS. TIPO DE RIESGO

La definición de la palabra *riesgo*, a pesar de parecer obvia, no es simple. Si se busca en libros de texto, diccionarios, artículos, etc. se encuentran resultados diferentes y a menudo contradictorios.

El término riesgo tiene orígenes desconocidos, eso explica la ambigüedad al definir esta palabra. Se cree que fue en la antigua Grecia donde nació esta palabra⁹ a partir de un término utilizado en navegación *rhizikon*, *rhiza*. Se trata de un concepto metafórico que indica la dificultad de ser evitado en el mar.¹⁰ Esta palabra dio lugar a los términos latinos *resicum*, *risicum* y *riscos*, que han derivado en el actual término *riesgo* y los equivalentes en otras lenguas. Por otra parte, otra corriente de pensamiento asocia la palabra riesgo con la palabra *rizq* árabe.

La palabra riesgo se define como «contingencia en la cual está expuesto alguien o alguna cosa, peligro incierto.»¹¹ La mayoría de definiciones llevan asociadas al concepto de riesgo las ideas de incertidumbre, de vulnerabilidad y de exposición a un accidente (Riesgo = Peligrosidad · Vulnerabilidad · Exposición). Se han propuesto muchas definiciones pero la más simple y aceptada técnicamente es la que define el riesgo como el producto de probabilidad de un acontecimiento por sus consecuencias (Riesgo = Probabilidad · Consecuencias). Las consecuencias, definidas como la expresión conjunta de la vulnerabilidad y la exposición, se pueden expresar de formas diferentes dependiendo del tipo de accidente o de los elementos vulnerables expuestos [Mir, 1999: 33]: número de siniestros, daños económicos, pérdida de vidas humanas, lesiones personales, etc.

Otra manera de definir el riesgo [Delgado, 2012], menos habitual, es expresándolo como la cuantificación del peligro expresado en las unidades adecuadas a cada hipótesis de trabajo.

El riesgo puede ser definido desde una vertiente más social y de gestión de consecuencias, como propone Ulrich Beck en la obra *Sociedad de riesgo* (1980). En base a estos parámetros se define el riesgo como una consecuencia propia de la modernización, que conduce a un dilema entre los beneficios que nos aporta la tecnología y las consecuencias no deseadas provocadas por su uso. La magnitud de estos riesgos se describe como incalculable, imprevisible e incontrolable, de forma que éstos no sólo pueden afectar a una comunidad sino que son globales y pueden afectar a nivel mundial. Para gestionar estos riesgos, propone la construcción de nuevas estructuras políticas para su gestión global.

A diferencia del riesgo, el término peligro (*hazard*) se define como la situación de carácter químico o físico que puede provocar un accidente o un daño tanto a

9. «The origins of the word Risk (etymology)», artículo de Vicente Sandoval, disponible en: <<http://www.vicentesandoval.com/phd-thesis/thinking-about-risk-and-chile/theoriginsofthewordrisketymology>> (Consulta: 28 febrero 2014).

10. Véase la web *Riskology* en <<http://risk-ology.com/tag/peter-bernstein/>> (Consulta: 28 febrero 2014)

11. *Diccionari de la llengua catalana* [2ª ed.]. Institut d'Estudis Catalans (Consulta: 30 diciembre 2013).

personas (muertos y heridos), bienes materiales (en la industria afectada, el propio polígono, almacenes, vehículos, carreteras, viviendas, infraestructuras) o medio ambiente (daños en la biosfera, el aire, la tierra y el agua).¹²

La magnitud de las consecuencias de un accidente, es decir, los daños (*damage*) producidos, dependen de varios parámetros: cantidad de materias peligrosas presentes en la planta, cantidad de energía contenida en el sistema en forma de presión o de energía química, tiempo durante el cual han sido liberadas las materias peligrosas o la energía y la distancia de exposición entre la población y la fuente del accidente.

Los riesgos se pueden dividir en tres categorías que constituyen un marco de referencia respecto a los criterios de tolerabilidad del riesgo [Casal, 2008: 2]:

- *categoría A*: los riesgos que son inevitables y aceptados sin compensación, por ejemplo ser fulminado por un rayo;
- *categoría B*: los riesgos que serían evitables pero imprescindibles en la vida diaria actual, por ejemplo la muerte en un accidente de tráfico;
- *categoría C*: los riesgos que son absolutamente evitables y es decisión personal exponerse a ellos, por ejemplo morir practicando deportes de aventura extremos.

Por otra parte, si los riesgos son tecnológicos se pueden clasificar en tres categorías más [Casal, 2008: 2]:

- *riesgos convencionales*: los relacionados con las actividades y el equipamiento que se encuentra típicamente en las industrias, por ejemplo morir por electrocución;
- *riesgos específicos*: los asociados al tratamiento o uso de sustancias que están clasificadas como peligrosas, por ejemplo el hecho de tratar con materiales radiactivos;
- *riesgos graves*: los asociados a los accidentes excepcionales, cuyas consecuencias pueden ser severas.

Los efectos de los riesgos convencionales y específicos suelen afectar sólo a los trabajadores implicados y se pueden prevenir con medidas de seguridad adecuadas. En cambio, los riesgos graves son inesperados y suelen afectar a mayores distancias, lo cual conlleva que haya más población expuesta.

12. Casal, J.; Vilchez, J.A. «El riesgo químico y el territorio». *Revista Catalana de Seguridad Pública*, nº. 23 (noviembre 2010) p. 127-152.

2.2 RIESGO INDIVIDUAL Y RIESGO SOCIAL. MAPAS DE RIESGO

Por riesgo individual [Instrucción 8/2007]¹³ se entiende la probabilidad de que una persona sufra unas consecuencias determinadas como resultado de su exposición, en un lugar y trescientos sesenta y cinco días a tiempo completo, a uno o diferentes peligros. Se expresa en víctimas · año⁻¹.

Por riesgo colectivo se entiende la probabilidad por año de que un grupo de personas sea víctima de un accidente al mismo tiempo, es decir, el número total de muertos por año.

El riesgo individual se suele representar en mapas de riesgo mediante las curvas de riesgo. Una curva de isorriesgo o de riesgo constante es la unión de todos los puntos geográficos en torno a una instalación donde la probabilidad de muerte es la misma. Las curvas de riesgo son unas líneas de riesgo constante que muestran cómo varía el riesgo individual sobre un terreno determinado. Mientras que las curvas de frecuencia/número de muertos (FN) son una representación del riesgo social.

2.3 RIESGO TOLERABLE. RIESGO ÓPTIMO

En la sociedad actual, prácticamente todas las actividades humanas cotidianas están asociadas al uso de instalaciones o de productos industriales. Su utilización supone innumerables ventajas pero también consecuencias negativas. Es habitual la expresión de que «el riesgo cero no existe». Esta expresión no sería válida si se definiera el riesgo como cuantificación de la actividad o peligro ya que si no existe el peligro, el riesgo asociado es cero.

Los criterios de tolerabilidad o aceptabilidad dependen de la metodología seguida para calcular valores de riesgo individual y riesgo social, y también permiten delimitar las zonas donde no es posible la presencia de elementos vulnerables.

Existen cuatro metodologías disponibles para tomar las decisiones urbanísticas en el entorno de estos establecimientos:

- imposición de distancias fijas entre las instalaciones y los elementos vulnerables,
- seguir una metodología determinista basada en las consecuencias de los accidentes,
- realización del análisis cuantitativo del riesgo (AQR) y
- seguir una metodología mixta, combinación de alguna de las anteriores.¹⁴

13. Instrucción 8/2007 SIE sobre los crecimientos urbanos en torno a establecimientos afectados por la legislación de accidentes graves (criterios para la elaboración del informe previsto en el artículo 83.5 del Decreto legislativo 1/2005, de 26 de julio, por el cual se aprueba el texto refundido de la Ley de urbanismo de Cataluña).

14. Los criterios internacionales más utilizados y considerados referentes en la aplicación de estas metodologías son los definidos por el Gobierno holandés y el organismo TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research).

La mayoría de países de la Unión Europea disponen de un modelo de planificación urbanística en torno a los establecimientos con riesgo de accidente grave con metodología más adecuada para su caso particular. En Cataluña se sigue una metodología mixta que combina el método probabilístico de análisis cuantitativo de riesgo complementado con unas distancias fijas y mínimas de alejamiento, denominadas franjas de seguridad. El análisis de riesgo está elaborado según el *Purple Book* donde se describe la metodología holandesa.

El análisis cuantitativo de riesgo es un procedimiento estructurado cualitativo y/o cuantitativo que permite identificar las fuentes generadoras de riesgo. El propósito del análisis de riesgo es proporcionar la información necesaria para tomar decisiones.

Las administraciones públicas han intentado establecer unos valores de riesgo aceptable, creando y aplicando unas políticas públicas que puedan garantizar la seguridad de los intervinientes, llegando a unos valores límites de riesgo. En Cataluña, según la Instrucción 8/2007, el valor máximo tolerable al que pueden estar expuestos los elementos vulnerables y los elementos muy vulnerables es de 10^{-6} víctimas · año⁻¹. El riesgo social no se considera vinculante aunque se puede utilizar en casos hipotéticos donde el riesgo es muy bajo pero existe un núcleo muy habitado, donde si se produjera un accidente sería altamente afectado. El criterio de tolerabilidad, indicado en la figura 1, del riesgo social es el utilizado en el *Purple Book*.

Figura 1. Criterio de tolerabilidad del riesgo social del *Purple Book* (Holanda)



En términos económicos existe un riesgo óptimo [Mir, 1999] que se puede plantear a partir de la minimización en el aumento de los costes que comportan los recursos económicos que se han utilizado con el fin de reducir la frecuencia o disminuir los daños asociados a unos accidentes y el coste de los daños esperados. Mediante un análisis coste/beneficio se pueden evaluar las políticas públicas aplicables y seleccionar la más adecuada.

Son varias las políticas públicas de regulación que afectan a la reducción de los riesgos [Mir, 1999]: la regulación directa mediante la utilización de estándares

(reglamentos o condiciones a los que están sometidos los objetos productores de riesgo), centrarse en la responsabilidad que ocasiona el riesgo haciendo responsables civiles a los particulares acompañados de la intervención de las compañías de seguros y la posibilidad de la Administración pública de incentivar la reducción del riesgo, concediendo subvenciones, o al revés, penalizarlo, aplicando por ejemplo impuestos sobre el riesgo. En Cataluña, las instalaciones industriales generadoras de riesgos ya están sujetas a un gravamen especial según la Ley 4/1997, de 20 de mayo, de protección civil de Cataluña.

Finalmente, no hay que perder de vista que es imposible que el balance entre riesgo y beneficio se reparta equitativamente entre todos los individuos que están implicados, trabajadores, habitantes de la zona geográfica próxima, etc.

2.4 VULNERABILIDAD Y ELEMENTOS VULNERABLES

La vulnerabilidad es la predisposición intrínseca de un elemento a sufrir daños motivados por de un fenómeno ante un peligro concreto.

Según el artículo 12 de la directiva Seveso II que trata sobre el control de la urbanización, los elementos vulnerables quedan definidos como las zonas de viviendas, edificios y zonas frecuentadas por el público, ejes importantes de transporte, zonas recreativas y de interés natural de carácter especialmente sensible.

Por otra parte, la Instrucción 8/2007 SIE define de una forma más detallada si el área estudiada constituye o no un elemento vulnerable. Al definir los elementos¹⁵ se tienen en cuenta factores como la necesidad de ayuda externa, el número potencial de víctimas, falta de protección de la ubicación...

3. NORMATIVA¹⁶

La normativa relacionada con los accidentes graves se ha ido desarrollando a raíz del análisis de accidentes graves con importantes efectos sobre las personas, medio ambiente y bienes. Algunos de los que han cambiado el curso de la normativa debido al gran impacto tanto en número de muertos como en pérdidas patrimoniales son Flixborough (1974), Seveso (1976), San Juanico (1984), Bhopal (1984) entre otros.

Estos accidentes pusieron de manifiesto el peligro que supone la proximidad de establecimientos industriales a zonas habitadas, ya sean infraestructuras, zonas residenciales, zonas de carácter público o zonas de interés ambiental... Una de las regulaciones es la que intenta asegurar la separación entre las zonas

15. La relación de elementos vulnerables y muy vulnerables se puede consultar en la Instrucción 8/2007 SIE.

16. La recopilación de normativa aplicable a los establecimientos industriales con riesgo de accidente grave y al transporte de mercancías peligrosas se puede encontrar en la web de la Generalitat de Catalunya <<http://infonorma.gencat.cat/>>.

vulnerables y los establecimientos industriales o infraestructuras de nueva construcción y que las ya existentes tengan en cuenta medidas técnicas complementarias para disminuir sus efectos.

Hay que distinguir entre las dos vertientes de la seguridad, que en términos anglosajones se llaman: *safety* y *security*. El primer término se refiere a la seguridad ante accidentes, mientras que el segundo término es la seguridad ante actos ilícitos en los cuales el daño, además de una consecuencia, es también el objetivo final del acto en si mismo. La seguridad es una materia muy amplia y los límites entre sus competencias son difusas. Sin embargo, en general, sus competencias están repartidas entre diferentes ministerios del Estado español y departamentos de la Generalitat de Cataluña.

El escape de dioxinas en Seveso (Italia) en 1976 dio origen a la primera Directiva europea, que se ha ido adaptando y trasponiendo al ordenamiento jurídico español y a la normativa catalana. Sin embargo, en España las primeras regulaciones vinieron a través de unos reglamentos específicos de seguridad industrial que se han complementado y armonizado globalmente con el resto de países de los Estados miembros mediante las directivas Seveso. La seguridad industrial tiene como objetivo la prevención y la mitigación de los accidentes en las instalaciones industriales o con productos industriales. Los establecimientos con riesgo de accidente grave están clasificados dentro de los establecimientos industriales con reglamento técnico de seguridad y con una directiva europea. El reglamento de los accidentes graves afecta al conjunto de las instalaciones industriales de un establecimiento independientemente y más allá del resto de reglamentos técnicos aplicables.

La legislación europea sobre identificación, clasificación, etiquetado y gestión de la puesta en el mercado y el uso de productos químicos se basa en el Reglamento (CE) 1907/2006 REACH (registro, evaluación, autorización y restricción de las sustancias y preparados químicos) y su modificación mediante el Reglamento (CE) 1272/2008 CLP (clasificación, etiquetado y envasado). Sucesivamente, se han modificado otros apartados y anexos. Estas modificaciones representan la adaptación a la UE del sistema globalmente armonizado (SGH), que es una regulación aprobada a nivel mundial. El reglamento ha significado un cambio en los sistemas de clasificación y una definición mucho más precisa de las sustancias y sus mezclas. Además, ha supuesto un cambio en los mecanismos de comunicación del riesgo químico.

En cuanto al transporte de mercancías peligrosas por carretera existe el Acuerdo europeo sobre el transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR), aprobado en Ginebra el 30 de septiembre de 1957. Por otra parte, el RID es el Reglamento relativo al transporte internacional por ferrocarril de mercancías peligrosas recogido en el Convenio sobre los transportes internacionales por ferrocarril (COTIF), creado en Berna el año 1980.

4. SISTEMAS DE PREVENCIÓN Y PROTECCIÓN ANTE ACCIDENTES

Los sistemas de protección ante accidentes tienen como objetivo mitigar los daños sobre las personas, bienes y medio ambiente. La selección de un determina-

do método de mitigación dependerá del peligro en particular: la cantidad de material presente, la localización de las instalaciones, el proceso, etc., y del análisis cuantitativo de riesgo en cada caso.

Los accidentes pueden provenir tanto de establecimientos industriales que manipulan sustancias peligrosas como del transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril. Uno de los objetivos de estos sistemas es el de evitar el efecto dominó.¹⁷ Se puede reducir o eliminar el riesgo interviniendo sobre la fuente de peligro y disminuir así la probabilidad de ocurrencia del suceso, o bien aplicando medidas de protección. En el primer caso, se puede actuar sobre el establecimiento: cambiando el proceso productivo, las sustancias químicas utilizadas, enterrando depósitos, mejorando el diseño de los equipos para aumentar la fiabilidad de la instalación, etc., o sobre el medio: mejorando las condiciones de ventilación por dilución con el fin de reducir la concentración de agentes químicos inflamables o explosivos utilizados en el proceso.

No siempre se pueden modificar las condiciones de peligro en origen para reducir el riesgo hasta valores aceptables y, por eso, en estos casos es necesario aplicar medidas compensatorias que reduzcan el impacto potencial sobre los elementos vulnerables. En el segundo caso, se pueden aplicar medidas de protección activa y pasiva que protejan a las personas de los efectos y consecuencias en caso de que se haya producido el accidente. La aplicación de estas medidas va más allá del cumplimiento de los reglamentos vigentes.

En las situaciones donde las medidas clásicas de mitigación no son aplicables, las metodologías de prevención y protección alternativas a aplicar serían:

- planeamiento del territorio en función del riesgo;
- parámetros de diseño arquitectónico en función del riesgo (piroconstrucción,¹⁸ *venteo*)¹⁹ y estructuras resistentes a sobrepresiones y/o temperatura;²⁰
- control específico de la estanquidad y ventilación de los edificios;
- sistemas de protección mediante barreras, diques o dunas integradas en el territorio y la incorporación de tecnología de detección de escapes de sustancias peligrosas.

4.1 PLANEAMIENTO DEL TERRITORIO EN FUNCIÓN DEL RIESGO

La incorrecta estrategia urbanística y ordenación del territorio que determina la ubicación física de los elementos vulnerables en relación a los establecimientos industriales es la causante de situaciones de riesgo sobre las que habrá que actuar.

17. El efecto dominó es el conjunto de efectos sucesivos que provoca un accidente en un establecimiento industrial o transporte por carretera o ferrocarril, que afectan a otros elementos o generan en cadena nuevos accidentes.

18. La piroconstrucción es la técnica que consiste en escoger los materiales con adecuada reacción al fuego y que contribuyan mínimamente en la propagación del fuego.

19. El *venteo* consiste en la liberación de la presión mediante los elementos constructivos débiles, es la traducción del inglés *venting*.

20. Materiales resistentes al fuego.

En este ámbito se distinguen dos situaciones a tratar de forma diferente: las situaciones ya generadas que necesitan medidas de protección alternativas y las futuras interacciones de riesgo y territorio que hay que planificar y donde una correcta ordenación de las asignaciones de usos del suelo es suficiente.

Para una buena integración del riesgo y del territorio, la prevención de los riesgos graves no puede ser una actividad exclusiva de ciertos organismos. Todas las administraciones públicas tienen que participar en la integración del binomio riesgo y territorio en materia de seguridad y urbanismo.²¹ Uno de los aspectos claves en el planeamiento del territorio es conocer sus particularidades en cuanto a riesgos graves y otros factores vinculados con el fin de combinar la prevención de los riesgos graves en la gestión del territorio.

El desarrollo urbanístico debe gestionar tanto el riesgo químico procedente de instalaciones industriales como el derivado del transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril; éste último está poco considerado pero tiene una gran importancia en la planificación urbanística. En muchos casos hay un gran número de accidentes e incidentes sobre todo en el transporte por carretera y se suelen producir cerca de zonas con una gran concentración de población, sin olvidar que recientemente ha habido crecimientos urbanos en torno a las principales vías como las autopistas. En el transporte de mercancías por carretera es inevitable el uso vías secundarias, normalmente más próximas a la población y menos preparadas para hacer frente a los efectos de un posible accidente, para llegar al establecimiento industrial que hace uso. En cuanto a las redes ferroviarias, también atraviesan muchos núcleos urbanos. Hay que considerar también las posibles incompatibilidades entre una vía de transporte con gran flujo de mercancías peligrosas con establecimientos industriales.

Como hemos dicho, la mayoría de países de la Unión Europea disponen de un modelo de planificación urbanística en torno a los establecimientos con riesgo de accidente grave con metodología adecuada para su caso particular. No es tan común la realización de análisis de riesgo en el transporte de mercancías peligrosas. El análisis de riesgo es la base para la toma de decisiones relacionadas con la planificación del territorio. Si no se cuantifica el riesgo con metodologías adecuadas habrá una falta de información para la toma de decisiones que provoca juicios poco subjetivos debido a la dificultad en la comparación de riesgos de diferentes situaciones y en la implementación de mejoras fiables.

El artículo 13 de la normativa Seveso III, que trata sobre la planificación de la ocupación del territorio, otorga la responsabilidad a los Estados miembros de velar por los objetivos de prevención de accidentes graves y limitar sus consecuencias para la salud y el medio ambiente con políticas de ocupación del territorio y otras políticas necesarias. Con el fin de cumplir este objetivo propone el control de: el emplazamiento de nuevos establecimientos, las modificaciones de establecimien-

21. El Grupo de investigación de riesgo y territorio del Instituto de Seguridad Pública de Cataluña está trabajando en una guía donde se identifiquen y propongan líneas de actuación coherentes y viables, armonizadas con la situación actual y que consigan la participación de los agentes implicados en la materia.

tos ya existentes y las obras públicas nuevas que puedan ser afectadas por las consecuencias de un accidente grave.

Las políticas de planificación del territorio a largo plazo proponen dejar unas distancias adecuadas entre los establecimientos con riesgo de accidente grave y zonas de viviendas, zonas frecuentadas por el público, áreas recreativas, vías de transportes y zonas con un interés natural particular o sensibles. Siempre que los establecimientos ya existan se deberán tomar medidas técnicas adicionales para no incrementar el riesgo para la salud humana y el medio ambiente.

Los procedimientos adecuados para facilitar la acción de las políticas a seguir tienen que basarse en el estudio de los riesgos vinculados a los establecimientos y en un dictamen técnico.

En emergencias en los exteriores de establecimientos industriales o de infraestructuras lineales de transporte²² se definen dos zonas de afectación según las posibles hipótesis accidentales, que también marcarán la planificación del territorio en función de la protección de la población.

- a) *Zona de intervención*: en la que las consecuencias de los accidentes producen un nivel de daños que justifica la aplicación inmediata de medidas de protección.
- b) *Zona de alerta*: zona en la que las consecuencias de los accidentes provocan efectos que, a pesar de ser perceptibles por la población, no justifican la aplicación inmediata de medidas de protección, excepto para los grupos de población críticos.

Estas dos zonas suelen definirse de forma circular en torno a los establecimientos, dependiendo de la distancia respecto al lugar donde pueden suceder ciertos tipos de accidentes.

4.1.1 Nuevos establecimientos y cambios importantes en establecimientos ya existentes con riesgo de accidente grave

El establecimiento tiene que elaborar un informe de seguridad donde se prevean los escenarios accidentales asociados a sus instalaciones.²³ El Departamento de Territorio y Sostenibilidad de la Generalitat de Cataluña emite un informe donde se decide conceder o no la autorización ambiental. El instrumento utilizado para el control de la planificación del territorio en establecimientos con riesgo de accidente grave ya existentes, o los que han sufrido cambios importantes, es el informe emitido por dicho Departamento. En el informe se incluyen consideraciones urbanísticas de planificación en torno a establecimientos con riesgo de accidente grave, de

22. Los planes especiales vigentes en Cataluña sobre accidentes con sustancias peligrosas o con el transporte por carretera y ferrocarril de mercancías peligrosas son el PLASEQCAT y el TRANSCAT.

23. Según criterios contemplados en la normativa. Real decreto 1196/2003, de 19 de septiembre, por el que se aprueba la Directriz básica de protección civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en que intervienen sustancias peligrosas.

manera que sólo es aceptable en caso de que se garantice la seguridad de las personas en las proximidades del establecimiento.

4.1.2 Adecuación de la situación urbanística y crecimientos urbanísticos compatibles con la proximidad de establecimientos con riesgo de accidente grave

La situación urbanística en torno a los establecimientos con riesgo de accidente grave puede cambiar a causa de modificaciones en la planificación urbanística y, por lo tanto, pueden surgir nuevos desarrollos urbanos allí donde inicialmente no había previsión. En este caso, en Cataluña, las modificaciones en la ordenación territorial tienen que condicionar una nueva estrategia urbanística en la cual haya una compatibilidad de las nuevas actividades con las ya existentes.

4.2 PARÁMETROS DE DISEÑO ARQUITECTÓNICO EN FUNCIÓN DEL RIESGO Y ADECUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE LAS VIVIENDAS

Las zonas residenciales o de equipamientos que estén en zonas de riesgo pueden incorporar en su diseño parámetros que aumenten su resistencia y seguridad en caso de accidente, es decir, que reduzcan su vulnerabilidad. Se pretende estimular la utilización del riesgo como parámetro de diseño arquitectónico pero sin dar el detalle que es necesario aplicar a cada situación particular.

4.2.1 Orientación de las viviendas respecto a la zona industrial

Al planificar la zona de edificación de un solar se tienen en cuenta parámetros que son independientes del riesgo al que estén expuestos y de la distancia en las zonas industriales. La mayoría de viviendas se construyen teniendo en cuenta la orientación solar, que supone un ahorro energético importante pero que no ofrece protección en caso de accidente.

Aparte de las condiciones meteorológicas (dirección y velocidad de los vientos predominantes, radiación solar y trayectorias de desplazamiento), la orografía y la topografía del terreno, debe introducirse la potencialidad de afectación por accidentes en la orientación de la vivienda. En las fachadas más afectadas se aplicarán modificaciones en su diseño y, en el caso que el edificio esté construido, habrá que tomar medidas para minimizar los efectos.

Existen herramientas de cálculo de la orientación óptima de los edificios con la que se consigue reducir el impacto que provoca la ola de sobrepresión.

4.2.2 Modificaciones en el diseño de la vivienda

Las fachadas con más probabilidad de estar expuestas a nubes tóxicas, efectos de sobrepresiones, radiación y proyecciones de fragmentos tendrán que tener un diseño diferente de las que tienen pocas posibilidades de sufrir estos efectos.

En primer lugar, hay que procurar que la vivienda tenga la máxima estanquidad. Una medida en fase de diseño sería la minimización de ventanas procurando, sin embargo, tener la máxima iluminación posible. Los cristales, con el grueso máximo y si es posible no practicables. Con estas medidas se mejorará considerablemente el confinamiento, habrá más protección ante los fragmentos que se hayan proyectado y habrá una menor exposición del cristal a la sobrepresión. Como mejora adicional, las ventanas tendrían que ser resistentes al fuego, ya sea el cristal o el conjunto de cristal y marcos, con una resistencia mínima al fuego E-30.²⁴

Por otra parte, para mejorar la resistencia a la sobrepresión se pueden aplicar técnicas de protección clásicas [Sanos, 2009: 10-11] como son los supresores y el *venteo*. Cuando la vivienda sufre el efecto de la sobrepresión, el aumento de presión interna se libera con la destrucción parcial de los cierres no estructurales del edificio.

Por otra parte, los edificios de pública concurrencia o de alta ocupación poseen zonas de confinamiento seguras definidas en el plan de autoprotección del edificio. Se escogen aquellas salas con más capacidad de confinamiento, es decir, las menos expuestas a los focos de peligro. Estas salas podrían también estar diseñadas en origen aplicando los criterios de diseño mencionados anteriormente.

4.2.3 Material de construcción resistente y con reacción al fuego

Es importante que los materiales utilizados en la construcción tengan una buena reacción y resistencia al fuego.²⁵ La resistencia al fuego es la capacidad de un elemento de cumplir, durante un periodo de tiempo, la estabilidad, la estanquidad o la integridad al fuego y humos, el aislamiento térmico u otras funciones exigibles, especificadas en la norma de ensayo. En cambio, la reacción al fuego es la respuesta del material en cuanto a su propia descomposición ante el fuego al cual ha sido expuesto, en condiciones específicas.²⁶

Hay que evitar la utilización de materiales con características de reacción al fuego altas. En este caso, debido a la radiación térmica y la proyección de fragmentos los materiales deberían tener una baja temperatura de autoinflamación.

Se utilizan revestimientos para proteger los elementos estructurales de la acción del fuego y mantener la capacidad portante de la estructura ante la acción del fuego. Con este fin se pueden utilizar morteros como la perlita, la vermiculita, lana de roca, materiales cerámicos, etc. Se pueden aplicar tanto interiormente como exteriormente mediante la proyección mecánica del elemento.

24. El CTE (Código Técnico en Edificación) clasifica los materiales E-30 como los que conservan la estanquidad y la resistencia a la acción del fuego durante treinta minutos según la curva normalizada UNE.

25. La clasificación de los productos de construcción y elementos constructivos en función de sus propiedades de reacción y resistencia ante el fuego se recoge en el Real decreto 842/2013, de 31 de octubre.

26. Las definiciones se recogen en el CTE-DB-SI (Código Técnico de la Edificación, documento básico de protección contra incendios), en la Norma UNO-EN ISO 13943 de Vocabulario en Seguridad contra Incendios, en la Ley 3/2010, del 18 de febrero, de prevención y seguridad en materia de incendios en establecimientos, actividad, infraestructuras y edificios.

También se pueden utilizar revestimientos como las pinturas o barnices intumescentes. Éstos evitan la propagación de calor porque aíslan el elemento a proteger ya que se expanden con el calor generado en el incendio.

4.2.4 Infraestructuras resistentes

Son muchos los parámetros que influyen en el diseño habitual de un edificio por la gran cantidad de cargas que le afectan: las propias de la misma construcción, las características del terreno, la tipología del edificio, los materiales estructurales y no estructurales utilizados, etc.

En caso de que el edificio esté ubicado en una zona de riesgo habría que añadir a los cálculos habituales las solicitudes provenientes de un posible accidente. Por eso, el diseño arquitectónico y estructural tiene que considerar desde el inicio la posibilidad de sufrir consecuencias de un accidente.

4.3 CONTROL ESPECÍFICO DE LA ESTANQUIDAD Y VENTILACIÓN DE LOS EDIFICIOS

En la inhalación de sustancias tóxicas, el tiempo de exposición y la concentración son los factores claves que determinan las consecuencias negativas sobre la salud.

En la industria, una vez se ha producido un escape tóxico o inflamable hay que intentar limitar su alcance desde el origen, tratando de diluirla al máximo y reducir la cantidad de producto que se emite a la atmósfera. Se pueden utilizar tecnologías que impidan la dispersión de la nube tóxica como las cortinas de agua, que provocan el abatimiento parcial de la nube ya sea por dilución (entrada de aire en la nube), disolución (si se trata de una sustancia química soluble en agua) o arrastre físico del gas o vapor. Si el vertido es un líquido también se pueden utilizar espumas parecidas a las utilizadas en la extinción contra incendios para reducir la evaporación.

En cuanto a las personas sorprendidas en la intemperie, tienen que intentar reducir al máximo el tiempo de exposición huyendo en una dirección diferente, preferentemente perpendicular a la que sigue el penacho. Por otra parte, la protección que ofrecen los edificios y, por lo tanto, el grado de confinamiento, es esencial para limitar los efectos nocivos para la salud. En confinamiento se reducen gran parte de estos efectos, siempre que la ventilación sea prácticamente inexistente. Las soluciones de ahorro energético son válidas siempre y cuando se pueda garantizar una ventilación nula en el momento de la detección del escape de sustancias peligrosas. La propia señal de alerta de los sensores (véase el siguiente apartado sobre sistemas de protección mediante barreras en el territorio) puede activar automáticamente el cierre del sistema de ventilación de forma que sea rearmable manualmente una vez pasada la nube.

El modelo ideal es el que utiliza parámetros de ahorro energético extremo con un sistema para controlar la ventilación. En el caso de escape tóxico, deberían detenerse los sistemas de renovación de aire para conseguir el mayor grado de estanquidad posible.

El polígono industrial químico de Tarragona presenta una gran concentración de empresas con riesgo de accidente grave y un elevado flujo de transporte de mercancías peligrosas, por eso hay muchas situaciones de proximidad de establecimientos industriales afectados por la normativa Seveso y zonas urbanas no industriales. En la comisaría de la Policía de la Generalitat-Mossos d'Esquadra en Tarragona se han aplicado algunas de las técnicas recogidas en este artículo, con motivo de su proximidad al sector industrial: se han incorporado parámetros arquitectónicos de resistencia a explosiones, también un control específico de la estanquidad y ventilación del edificio mediante cristales resistentes y el cierre automático de los sistemas de ventilación a partir de la validación de la alarma detectada por sensores específicos.

4.4 SISTEMAS DE PROTECCIÓN MEDIANTE BARRERAS INTEGRADAS EN EL TERRITORIO

Si el conjunto de actuaciones preventivas de planificación territorial y de diseño arquitectónico no son suficientes para evitar situaciones de convivencia entre elementos vulnerables y de peligro, se tendrán que adoptar sistemas de protección alternativos como la utilización de barreras físicas integradas en el territorio.

Tabla 1. Resumen de la franja de seguridad necesaria según presencia y volumen de sustancias peligrosas

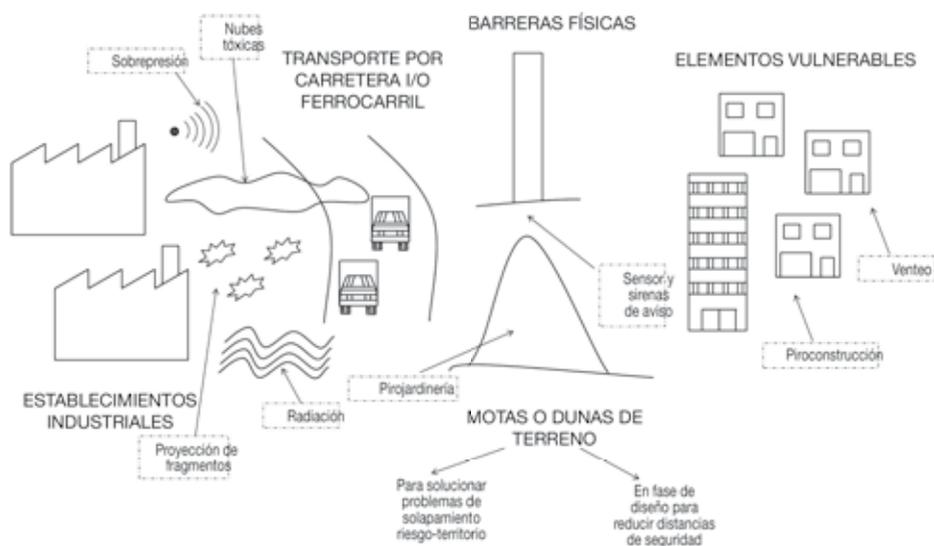
Franja de seguridad	Instalaciones industriales con:	Transporte con flujo representativo de:
500 m	Alto volumen de almacenaje: – gases del petróleo (metano, butano y propano) – combustibles líquidos derivados del petróleo (queroseno, gasolina y gasóleo)	Mercancías tóxicas que pueden generar nube de gran alcance.
250 m	Gases licuados inflamables (especialmente gases licuados de petróleo). Sustancias que pueden generar nubes inflamables, deflagraciones o explosiones. Sustancias que pueden generar BLEVE. Sustancias tóxicas que no pueden producir grandes nubes tóxicas.	Gases licuados inflamables (especialmente gases licuados de petróleo). Sustancias que pueden generar BLEVE. Sustancias que pueden generar nubes inflamables, deflagraciones o explosiones. Sustancias tóxicas que no pueden provocar grandes nubes tóxicas.
100 m	Sustancias inflamables o muy inflamables que no pueden generar nubes inflamables ni deflagraciones.	
75 m		Mercancías líquidas inflamables o muy inflamables que no pueden generar nubes inflamables ni deflagraciones.
50 m	El resto de casos	

La utilización de barreras físicas no sólo se limita a reducir el riesgo en situaciones ya producidas sino que pueden ser utilizadas en la fase de planificación territorial para reducir las franjas de seguridad.

Las franjas de seguridad están condicionadas por la presencia y volumen de almacenaje que presentan las instalaciones industriales. La Resolución IRP/971/2010, que presenta criterios aplicados a la prevención de los riesgos graves, da unos valores de franjas de seguridad que se muestran en la tabla 1.

Actualmente, aunque el almacenaje está regido por varias normativas, una gran concentración de productos químicos añade un incremento en el riesgo que se reflejará en el diseño de las barreras. Las barreras de protección tienen que soportar los fenómenos físicos de radiación térmica y sobrepresión de accidentes procedentes de establecimientos industriales que manipulan sustancias peligrosas y/o del transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril. Las barreras deben poder reducir la estimación de la distancia hasta unos valores que permitan la mínima distancia entre ambos elementos urbanísticos en caso de ser necesario, tal como se muestra a la figura 2.

Figura 2. Resumen de la problemática con el uso de barreras físicas como medio de protección



La Resolución IRP/971/2010 da unos parámetros de diseño que permiten soportar los fenómenos físicos de la radiación térmica y sobrepresión. No sólo por la barrera física sino también por los máximos admisibles después de ésta. Se hace un resumen de estos valores en la tabla 2. Hay que tener en cuenta que se continúa necesitando un espacio de seguridad que permita la no afectación de los elementos vulnerables protegidos por la barrera física. Este espacio de seguridad tiene

que considerar también el avance de la nube tóxica y la posible trayectoria de los proyectiles.

Tabla 2. Valores que deben soportar las barreras y valores de los máximos admisibles después de estas barreras

	La barrera tiene que soportar	Después de la barrera, no se puede superar
Radiación térmica	37 kW/m ²	8 kW/m ²
Sobrepresión	350 mbar	60 mbar
Alcance de la proyección de fragmentos	Mayores	Menor

Si se instalan las barreras y cumplen estas mínimas características, las distancias de seguridad se podrán reducir y se podrán acercar los establecimientos industriales a la población.

Tabla 3. Reducción de la franja de seguridad mediante barreras físicas de protección

Valor inicial franja de seguridad	Valor final franja de seguridad
500 metros	250 metros
250 metros	100 metros
100 metros	75 metros
	50 metros

El diseño (material, forma, altura, longitud o anchura, entre otros) y la ubicación exacta (distancia al establecimiento, orientación u otros) de la estructura de protección serán diferentes para cada caso particular. Las barreras físicas también podrán ser por motas o dunas de terreno artificiales que realicen la misma función.

Las barreras físicas se pueden implantar de forma que se evite el contacto visual entre los elementos vulnerables y las actividades industriales, pero no son un elemento de separación sino que están concebidas para integrar de manera segura las zonas industriales y las zonas residenciales. El concepto de barrera es el de corredor verde integrado en el tejido urbanístico de la ciudad. Este corredor verde puede integrar metodologías de pirojardinería²⁷ para reducir la probabilidad

27. La pirojardinería es una técnica de diseño de jardines que utiliza especies vegetales con poca facilidad de autoinflamación; asimismo se encarga de la adecuada distribución y estructura de las especies con el

de inicio de un incendio o su propagación si es afectado por los fenómenos de un accidente grave.

Junto a las barreras es recomendable la instalación de una red perimetral de sensores que detecten sustancias tóxicas. Los sensores transforman la información química recibida en una señal útil. Para cada caso particular las sustancias químicas involucradas son conocidas y los sensores pueden ser selectivos exclusivamente a ellas. Las últimas líneas de investigación en el campo de los sensores apuntan hacia el concepto de nariz electrónica capaz de detectar un amplio abanico de sustancias químicas. Las señales de alarma obtenidas por estos sensores tienen que ser gestionadas desde la industria y han de estar conectadas a un centro receptor de alarmas (CRA) que haga una comprobación con la industria para evitar falsas alarmas. Una vez gestionada la señal de alerta, ésta tendría que activar unas sirenas de aviso a la población. Tanto con los sensores como con las sirenas deben establecerse unos protocolos de mantenimiento a fin de garantizar su operatividad. Todo eso integrado en el plan de autoprotección elaborado de conformidad con el Decreto 82/2010, de 29 de junio, por el cual se aprueba el catálogo de actividades y centros obligados a adoptar medidas de autoprotección y se fija el contenido de estas medidas.

En referencia a las *metodologías de cálculo*, aunque están recomendadas por algunas normativas, no existe una guía que especifique un método estandarizado de diseño y cálculo de barreras físicas.

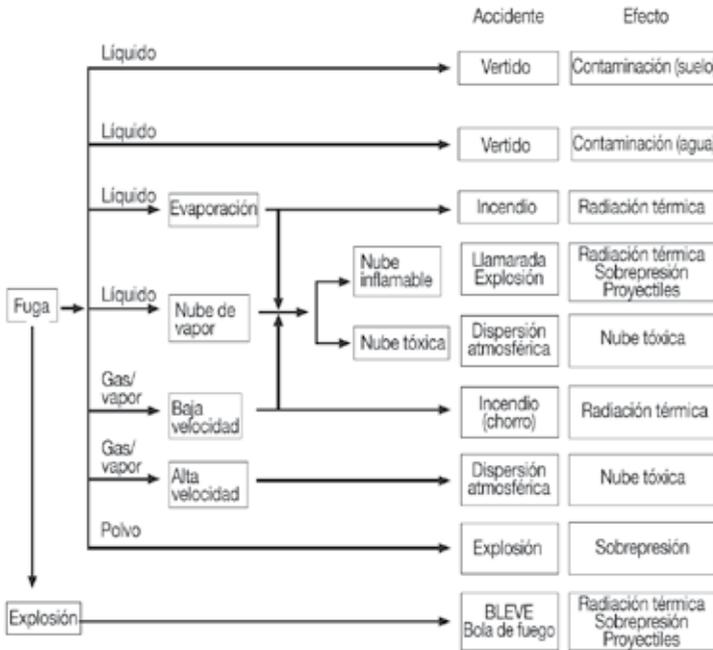
Los criterios para diseñar una barrera física dependen de las propiedades y ubicación de las sustancias peligrosas, de las propiedades físicas y forma de la barrera, así como de la intensidad de las magnitudes físicas y/o químicas que debe soportar la barrera.

Los cálculos necesarios para dimensionar las barreras físicas han de tener en cuenta los diferentes escenarios accidentales que pueden provocar las sustancias peligrosas utilizadas o almacenadas en el establecimiento industrial. Los posibles escenarios accidentales vienen determinados por el estado físico del escape que inicia el escenario accidental, es decir, si se encuentran en estado sólido (polvo), líquido o gas (vapor). Los escenarios habituales son vertidos, incendios, explosiones, dispersiones atmosféricas y BLEVE.²⁸ Estos accidentes tendrán unos efectos químicos (nubes tóxicas y/o contaminación), mecánicos (olade sobrepresión y proyección de fragmentos) y térmicos (radiación), que serán los utilizados en el dimensionado de las barreras físicas. En la figura 3 se puede observar cómo puede evolucionar una fuga dependiendo de su estado y condiciones a las que ha sido sometida.

fin de evitar que se produzcan altas intensidades de fuego y que, en el caso extremo de que se inflamen, estén distribuidas de forma que se facilite su extinción.

28. Una BLEVE, del inglés *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*, es una explosión mecánica de los recipientes a presión, por lo que se produce un vertido repentino a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado en estado de sobrecalentamiento [Casal *et al.*, 1999: 176].

Figura 3. Escenarios accidentales y posibles efectos de una fuga²⁹



Los métodos de cálculos aplicados al dimensionado de las barreras físicas son los utilizados en el diseño de estructuras resistentes a explosiones. No son adecuadas las metodologías de diseño de estructuras sometidas a terremotos.³⁰

No hay documentos específicos que aborden el diseño de barreras orientadas a la protección de accidentes industriales. Sin embargo, sí pueden encontrarse libros y manuales de orientación en el diseño de estructuras resistentes a los efectos de las explosiones y de los fragmentos.

Así pues, para cada escenario accidental habrá que estudiar la proyección de fragmentos, la radiación térmica y la sobrepresión.

4.4.1 Cálculo del accidente: incendio

El objetivo de este cálculo es establecer distancias de seguridad y, en el caso de las barreras, saber cuál es la radiación que tiene que soportar. Hay diferentes tipos de incendio: incendio de charco, dardo de fuego, llamarada y bola de fuego. Muchos modelos intentan hacer una estimación de la radiación debida a los incen-

29. Figura publicada en la *Revista Catalana de Seguridad Pública*, nº. 23, p. 128.

30. Véase el estudio de Manish Kumar, de la University of Buffalo (EEUU) en la página web <<http://www.acsu.buffalo.edu/~mkumar2/Research/Coursework/CIE500W/index.html>>.

dios. El más utilizado comúnmente es el modelo del cuerpo sólido. Por la magnitud de sus efectos, se estudiará el caso particular de la bola de fuego.

a) *Modelo del cuerpo sólido*

Para calcular los efectos térmicos sólo se tendrá en cuenta la radiación. En el caso de estar inmerso en el incendio actuarían tanto la convección como la radiación. En el modelo del cuerpo sólido sólo se tienen en cuenta las partes de la llama que emiten radiación.

$$I = \tau \cdot F \cdot E$$

donde I es la intensidad de la radiación (kW/m^2), τ es el coeficiente de transmisión atmosférica, F es el factor de vista y E es la potencia emisiva de la llama (kW/m^2).

La transmisividad se calcula en función de las características del medio y se atenúa por los efectos de la absorción (debida principalmente al dióxido de carbono y al vapor de agua) y la reflexión del medio. La fórmula empírica más simple es la siguiente:

$$\tau = 2,02 \cdot (\overline{P_w} \cdot x)^{-0,09}$$

donde $\overline{P_w}$ es la presión parcial del vapor de agua (Pa) $\overline{P_w} = \frac{H_R \cdot P_{sat}}{100}$, H_R es la humedad relativa y P_{sat} es la presión de saturación del vapor de agua (Pa).

El factor de vista es el ratio entre la radiación térmica emitida por la llama y la cantidad de radiación térmica recibida por el objeto que no está en contacto con la llama. El factor de vista depende de la forma y del tamaño de la llama, de la distancia y la posición relativa entre la llama y el elemento que recibe la radiación térmica.

La ecuación general [Casal, 2008: 78] que describe el factor de vista es:

$$F_{A_1 \rightarrow A_2} = \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cdot \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1$$

donde θ_1 y θ_2 son los ángulos entre la normal en dA_1 y dA_2 respectivamente y los vectores que unen dA_1 y dA_2 en radianes, A_1 es la superficie de la llama y A_2 es la superficie del objeto próximo a ésta.

La potencia emisiva de la llama (kW/m^2) es la energía radiante emitida por unidad de superficie y unidad de tiempo.

El cálculo del factor de vista para diferentes configuraciones puede hallarse en la mayoría de la bibliografía especializada en transmisión de calor o libros de análisis de riesgo con las fórmulas correspondientes.

El poder emisivo E [Casal, 2008: 78] se puede calcular a partir de la emisividad y la temperatura de la llama:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_F^4 - T_A^4)$$

donde ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-11} \text{ kWm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), T_F es la temperatura de la llama (K) y T_A temperatura ambiente (K).

La dificultad en la estimación de la emisividad ε y la temperatura de la llama T_F conducen a la estimación empírica del valor de E .

Este modelo se tiene que aplicar de manera particular a cada uno de los diferentes tipos de incendio.

b) Caso particular: bola de fuego

La bola de fuego puede ser provocada por una explosión BLEVE siempre que ésta sea de tipo inflamable. En una bola de fuego se genera una ignición inmediata de toda la masa de combustible en un tiempo muy corto, lo que provoca grandes radiaciones térmicas en las inmediaciones.

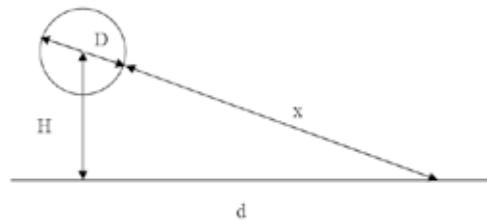
La radiación térmica de las bolas de fuego pueden calcularse según diferentes correlaciones que predicen el diámetro y la duración de la bola de fuego a partir del combustible involucrado.

$$D = a \cdot M^b$$

$$t = c \cdot M^e$$

donde D es el diámetro en m, M la masa de combustible en kg y a, b, c, e son constantes empíricas o semiempíricas que dependen de las correlaciones realizadas por los diferentes autores.³¹

Figura 4. Esquema con los parámetros de una bola de fuego: altura (H), diámetro (D) y distancias (x y d)



La expresión más simple para el cálculo de la bola de fuego es la siguiente [Casal *et al.*, 1999, 185]:

$$H = 0,75 \cdot D$$

El factor de vista F es entre una superficie esférica y una superficie plana normal a la radiación expresada con la fórmula:

$$F = \frac{D^2}{4 \cdot r^2}$$

31. Una recopilación de los valores propuestos por diferentes autores se encuentra en Casal *et al.*, 1999, 185.

donde D es el diámetro de la bola de fuego en m y $r = \frac{1}{2}D + x$ es la distancia entre el receptor y el centro de la bola en m.

La intensidad de radiación de la llama (E) se puede calcular como:

$$E = \frac{f_r \cdot M \cdot H_c}{\pi \cdot D^2 \cdot t}$$

donde M es la masa total de combustible en kg, H_c es el calor de combustión (kJ/kg), D es el diámetro de la bola de fuego en m, t es la duración de la bola de fuego en s y, finalmente, f_r es el coeficiente de radiación, de difícil determinación y según diversos autores comprendido entre $0,13 \div 0,35$ y $0,24 \div 0,4$.

4.4.2 Cálculo del accidente: explosión

Uno de los manuales más completos y de libre acceso es el creado por la UCF (Unified Facilities Criteria) donde se analiza exhaustivamente la construcción de barreras físicas de protección que resistan el efecto de las explosiones.³² En este manual se dan criterios de diseño tanto para estructuras de acero como de hormigón armado. Entre los métodos existentes para calcular la sobrepresión como el del TNT equivalente o el método multienergía y otros programas que implementan ecuaciones de conservación de la masa, el momento y la energía, este documento sigue una vía clásica utilizando el método del TNT equivalente. El estudio a la hora de establecer el rango de diseño diferencia si es una gran explosión o una explosión menor ya que la carga generada sobre la estructura no será la misma y, además, la proyección de fragmentos tendrá un alcance diferente.

Algunos autores [Crawford *et al.* 2006] proponen nuevos diseños de barreras resistentes a explosiones con resultados satisfactorios pero que, siguiendo la línea de este artículo, tienen en cuenta la integración estética en el medio donde tienen que ser instalados.

Por otra parte para evitar explosiones también hay criterios de protección [Barknech, 1981] aplicables a los equipamientos para evitar que las explosiones se propaguen en partes no protegidas de la instalación.

Una explosión [Casal *et al.*, 1999: 153] es una liberación repentina de energía que produce una oleada de presión que se desplaza alejándose de la fuente mientras disipa energía. Por lo tanto, hay que estudiar la ola de sobrepresión que será la generadora de consecuencias tanto para el propio establecimiento industrial (daños en los equipos, estructuras, trabajadores...) como para otras instalaciones, infraestructuras y viviendas vecinas.

Hay dos tipos de explosiones según si la explosión se produce en un espacio confinado o no. Las explosiones de vapores confinados (CVE)³³ pueden ser muy destructivas para la instalación donde se producen. Sin embargo, los efectos exteriores son menores siendo la proyección de fragmentos el efecto indirecto más

32. El documento en inglés se puede consultar en línea en: <http://www.wbdg.org/ccb/DOD/UFC/ufc_3_340_02_pdf.pdf> (Consulta: 28 febrero 2014).

33. CVE son las siglas en inglés de *confined vapour explosions*.

significativo ya que se puede generar efecto dominó provocando nuevos accidentes. Las explosiones de recipientes, por detonación interna de origen químico (provocados por reacciones fuera de control) o por la generación de gases, tendrán efectos similares a los producidos por las CVE. El caso de explosión de recipientes por BLEVE se considerará como un caso independiente de estudio debido a la complejidad y gravedad de los efectos. Las explosiones de vapor no confinados (UVCE)³⁴ se deben a la fuga de un gas inflamable o de un líquido a partir del cual se forma una nube de gas. Entre las posibles casuísticas de evolución de la nube nos interesa el caso en que la ignición produce también una ola de sobrepresión.

Las explosiones pueden ser deflagraciones o detonaciones. La diferencia radica en la velocidad de la ola de presión en el medio sin reaccionar, siendo subsónica en la deflagración y supersónica en la detonación.

Los parámetros que hay que hallar con el fin de caracterizar la explosión son la sobrepresión ΔP (aumento y descenso de la presión en el tiempo), la duración de las fases negativa t^- y positiva t^+ y el impulso.

Para realizar el cálculo de las explosiones se pueden utilizar los métodos clásicos como el método del TNT equivalente y el método multienergía. En ambos casos primero se determinará la energía total involucrada en la explosión y la parte de esta energía que se invierte en la generación de la ola de sobrepresión; luego se determinará la distancia escalada, que depende de la energía de la explosión y de la distancia entre el origen del accidente y el punto que recibe el impacto de la ola y, por último, se determinará la sobrepresión e impulso a partir de unos gráficos.

a) Método del TNT equivalente

El trinitrotolueno, o TNT, es un explosivo sobradamente utilizado y estudiado. El hecho de que sus parámetros estén tabulados ayuda a predecir los daños ocasionados por nubes de vapor a partir de la masa de TNT equivalente de la nube, es decir, a la que ocasionaría el mismo nivel de daños. La relación entre la masa de sustancia peligrosa y el equivalente TNT resulta de la ecuación:

$$W_{TNT} = \alpha \cdot W_c \cdot \frac{\Delta H_c}{\Delta H_{TNT}}$$

donde W_{TNT} es el equivalente en kg de TNT de la sustancia estudiada, α es una constante de rendimiento de la explosión, W_c es la cantidad en kg de la sustancia estudiada, ΔH_c es el calor de combustión de la sustancia estudiada en J/kg y ΔH_{TNT} es el calor de combustión del TNT (4,6x106 J/kg).

Los parámetros característicos mencionados se calculan en un punto situado a una distancia d respecto del lugar donde se ha producido la explosión mediante una serie de gráficos. En las gráficas este parámetro de distancia viene dado por lo que se denomina distancia normalizada, con la ecuación siguiente:

$$d_n = \frac{d}{\sqrt[3]{W_{TNT}}}$$

34. UCVE son las siglas en inglés de *unconfined vapour cloud explosion*.

El parámetro de rendimiento de la explosión α es el más difícil de determinar. Mediante el estudio de accidentes se ha llegado a la conclusión de que el valor 0,1 es muy conservador y se recomienda [Casal *et al.*, 1999: 162] utilizar valores entre $0,03 \div 0,04$, porque la mayoría de energía desprendida no es energía mecánica sino energía luminosa.

Como criterio general,³⁵ se pueden tomar los valores de α dependiendo del grado de reactividad: para sustancias muy reactivas $\alpha=0,1$, para sustancias medianamente reactivas $\alpha=0,06$ y para sustancias poco reactivas $\alpha=0,04$.

Este método nos sitúa en el peor de los casos posibles: el resultado será una sobreestimación de la realidad ya que no toda la nube se encontrará dentro de los límites de inflamabilidad. Por otra parte, la ola de sobrepresión del explosivo TNT y el de una nube de vapor es bastante diferente a distancias cortas. Por lo tanto, será útil en los casos de gran distancia (como criterio se establecen distancias de unas diez veces el diámetro de la nube [Casal *et al.*, 1999: 153]).

b) Método multienergía

En el método de multienergía se considera la explosión de la nube de vapor como un número de subexplosiones correspondientes a las diferentes fuentes de ignición de la nube, a diferencia del método del TNT, que considera la nube de vapor como una entidad.

Sólo una parte de la nube inflamable genera la ola de sobrepresión; el resto de la nube inflamable quema lentamente, sin contribución significativa a la explosión.

Se considera que la carga generada por la combustión tiene una forma semiesférica con radio R_0 que se calcula mediante la siguiente ecuación [Casal *et al.*, 1999: 165]:

$$R_0 = \left[1,5 \cdot \frac{V_{\text{área confinada}}}{\pi} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Para hallar los parámetros del modelo hay que utilizar gráficas que dependen de los parámetros y la distancia normalizada:

$$\bar{R} = \frac{R}{\left(E/P_0 \right)^{\frac{1}{3}}}$$

$$E = \eta \frac{V_{\text{área confinada}}}{c \cdot \rho_f} \cdot \Delta H_c$$

$$\Delta \bar{P} = \frac{\Delta P_s}{P_0}$$

$$\bar{t}^+ = \frac{t^+ \cdot c_0}{\left(E/P_0 \right)^{\frac{1}{3}}}$$

35. De los planes especiales de protección civil en Cataluña véase: *Annex 5. Tipus d'accidents i càlcul de magnituds, del Pla de protecció civil per accidents en el transport de mercaderies perilloses per carretera i ferrocarril a Catalunya* (TRANSCAT), documento revisado e informado favorablemente en junio de 2013.

donde R es la distancia en m, \bar{R} es la distancia normalizada, E es la energía liberada a la combustión J, c_0 es la velocidad del sonido en condiciones normales m/s, P_0 es la presión atmosférica en bar, ΔP_s es la sobrepresión en bar, ΔH_c es el calor de combustión de la sustancia estudiada en J/kg, t^+ es la duración de la fase positiva de la ola de sobrepresión en s, t^+ es la duración de la fase positiva adimensional.

El parámetro de energía inicial E es el más difícil de determinar en este caso. Si no es posible determinarlo, se leen las gráficas de manera más conservadora. Es un método más conservador y con resultados más reales que el método del TNT equivalente.

c) Caso particular de explosión: BLEVE

La BLEVE es un tipo de explosión física en unas condiciones determinadas (presión repentina en el interior del recipiente, superación de la temperatura límite de calentamiento y presencia de un líquido sobrecalentado) que originan la ebullición en masa de la sustancia y la ruptura del recipiente en grandes trozos.

El efecto térmico de una BLEVE es la bola de fuego, aunque puede haber BLEVE con sólo efectos mecánicos.

La energía de una explosión BLEVE se puede calcular mediante el método del TNT equivalente, aunque hay que modificar las ecuaciones para considerar la expansión isentrópica del gas. También se puede añadir la energía si el recipiente contenía también líquido sobrecalentado. Una vez calculada la masa de TNT equivalente ya se puede calcular la distancia normalizada y aplicar las gráficas normalizadas.

4.4.3 Cálculo del accidente: proyección de fragmentos

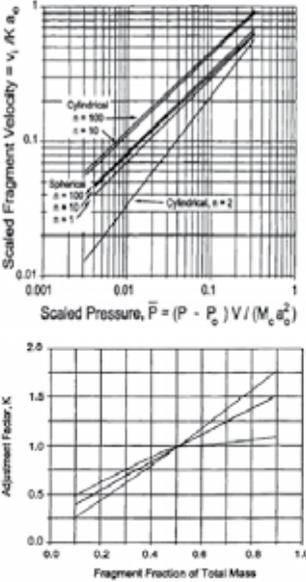
En general existen dos tipos de fragmentos: los procedentes de la rotura de un recipiente porque la energía de la explosión convierte a los fragmentos en misiles, y los que son impulsados por la energía de la ola de sobrepresión en su recorrido.

Por lo tanto, la primera parte del cálculo incluye una estimación de la velocidad inicial. Idealmente los fragmentos seguirán una trayectoria parabólica donde lo más difícil de determinar será la velocidad inicial de los fragmentos y el ángulo de la velocidad inicial sobre la horizontal. Para calcular la velocidad inicial se pueden aplicar diferentes metodologías como considerar la fuerza o presión sobre el fragmento, la transferencia de momento al fragmento o la transferencia de energía al fragmento.

Respecto al ángulo de la velocidad inicial sobre la horizontal depende de cada caso particular, como por ejemplo de la cantidad de fragmentos desprendidos. Un primer método aplicable, y el más conservador, es considerar que los fragmentos se proyectan en todas direcciones. Aunque la forma más razonable y eficiente es adoptar como ángulo de proyección aquél en que se encuentran los elementos vulnerables.

De las metodologías aplicables, la de Moore (1967) es la más simple. Baker *et al.* (1983) desarrollaron unas gráficas a partir del estudio empírico.

Tabla 4. Algunas metodologías de cálculo de la velocidad inicial de los fragmentos (Moore 1967; Baker et al. 1983)

Tipo	Ecuación	Parámetros
Recipientes no presurizados Moore (1967)	$u_0 = 1,902 \sqrt{\frac{E \cdot G}{M}}$ Esféricos: $G = \left(1 + \frac{3C}{5 \cdot M}\right)^{-1}$ Cilíndricos: $G = \left(1 + \frac{C}{2 \cdot M}\right)^{-1}$	u_0 velocidad inicial del fragmento (m/s) C la cantidad contenida (kg) E energía (J) M masa del recipiente (kg)
Recipiente a presión Moore (1967)	$u_0 = 2,05 \sqrt{\frac{P \cdot D^3}{W}}$	u_0 velocidad inicial del fragmento (ft/s) P presión del recipiente (psig) D diámetro del fragmento (inches) W peso del fragmento (lb)
Recipientes Baker et al. (1983)		\bar{P} presión adimensional \bar{u} velocidad adimensional $\bar{u} = \frac{u}{K \cdot a_0}$ una velocidad del fragmento (m/s) P presión de la explosión (Pan) P_0 presión ambiente (Pan) V volumen del recipiente (m ³) M_c masa del recipiente (kg) a_0 velocidad del sonido (m/s) $a_0 = \left(\frac{T \cdot \gamma \cdot R_g}{M}\right)^{\frac{1}{2}}$ T temperatura absoluta (K) $\gamma = C_p / C_v$ R_g Constat de gas ideal (8,314 J/kg·mol) M Peso molecular

Una vez el fragmento ha sido proyectado seguirá una trayectoria en el aire hasta que impacte con otro objeto o contra el suelo. La segunda parte del cálculo será, pues, la estimación de la distancia a la cual llega el proyectil.

El cálculo más conservador es considerar que el ángulo de la velocidad inicial sobre la horizontal es de 45° ya que es el que cubre distancias mayores.

$$r = \frac{u_0^2}{g}$$

donde d es la máxima distancia horizontal en m, u_0 es la velocidad inicial m/s y gr es la gravedad en m/s².

Algunos métodos incluyen la masa de explosivo [Kinney *et al.* 1985] y sugieren una fórmula para estimar la distancia de seguridad.

$$r = 120 \cdot W_{TNT}^{\frac{1}{3}}$$

donde W_{TNT} es la masa de TNT equivalente en kg (véase apartado *Método del TNT equivalente*).

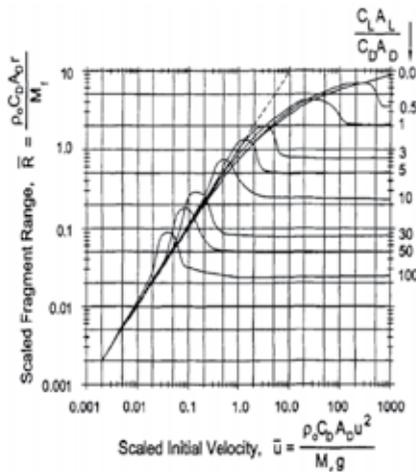
Por otra parte hay métodos que consideran las fuerzas fluidodinámicas del aire: la fuerza de levantamiento normal en la trayectoria y que se opone a la gravedad,

$$F_L = C_L \cdot A_L \cdot \frac{\rho \cdot u_0^2}{2}$$

y la fuerza de rozamiento a lo largo de la trayectoria

$$F_D = C_D \cdot A_D \cdot \frac{\rho \cdot u_0^2}{2}$$

Figura 5. Correlación entre la velocidad inicial y la distancia adimensional [Baker *et al.* 1983]



donde \bar{R} i \bar{u} son la distancia y velocidad adimensional, r es la distancia máxima, ρ_0 es la densidad del aire kg/m³, C_D es el coeficiente adimensional de rozamiento (se proponen diferentes valores dependiendo de la forma de los fragmentos [Baker *et al.* 1983] el coeficiente toma diferentes valores), C_L es el coeficiente adimensional de levantamiento, A_D es el área expuesta perpendicularmente a la trayectoria en m², A_L es el área expuesta perpendicularmente a la trayectoria en m², gr es la gravedad en m/s² y M es la masa del fragmento en kg.

4.4.4 Utilización de los parámetros en el dimensionado de las barreras

Con el fin de escoger si el elemento a instalar es un muro o una mota o duna de terreno debe valorarse para cada caso concreto la separación entre el establecimiento industrial o infraestructura y los elementos vulnerables a proteger. Si la distancia es grande, se podrán construir motas o dunas con taludes adecuados y unos materiales de construcción adecuados, en cambio, si hay una limitación de espacio, habrá que recurrir a la instalación de un muro.

La altura de la barrera, la longitud a cubrir y la resistencia/estabilidad son los parámetros que sirven para hacer el cálculo estructural que garantice la viabilidad arquitectónica de la barrera. Éstos dependen del alcance máximo y la altura máxima de vuelo de los fragmentos, la radiación térmica, la sobrepresión (se han indicado en el apartado anterior algunas de las metodologías disponibles de cálculo) y de la distancia entre el foco de peligro y los elementos vulnerables a la que se tiene que instalar la barrera.

Con el fin de seguir las recomendaciones de diseño de la Resolución IRP/971/2010 (tabla 2), la distancia puede venir dada por el cálculo de los efectos en los cuales se alcanzan estos valores. Los resultados obtenidos serán diferentes para cada efecto calculado y se tendrá que llegar a una solución de compromiso dónde todos estén previstos. Puede pasar que la distancia calculada esté en realidad ubicada en un solar donde la construcción esté restringida por varias causas como la incompatibilidad de usos, la no disponibilidad del solar, etc. Por lo tanto, es posible que la distancia sea un parámetro fijado desde el inicio, condicionado por restricciones urbanísticas.

La altura de la barrera dependerá de la distancia a la cual se plantee la instalación. Tiene que ser capaz de detener la mayor parte de los fragmentos proyectados y hacer de pantalla de la radiación emitida. La ola de sobrepresión necesita un análisis más profundo por las interacciones existentes entre las olas de sobrepresión y la barrera, que provocan olas reflejadas que interaccionando con la ola inicial originan una sobrepresión adicional sobre la cara expuesta de la estructura. Para evitar que las olas se reflejen en todas las caras rodeando la estructura, se propone la instalación de deflectores en la parte superior de la estructura que eviten que las olas sobrepasen la barrera física. La instalación de éstos puede formar parte de un nuevo tipo de mobiliario urbano que una el diseño con la protección. Por otra parte, las olas sufren unas aceleraciones en espacios confinados que pueden suponer efectos más graves de los esperados mediante cálculo numérico. La altura de la barrera física no tendría que exceder los 30 metros de altura, con el fin de no alejarse del objetivo de integrar urbanísticamente la barrera.

Son muchos los parámetros que están implicados y dependiendo de cada caso particular se tendrá que seguir un procedimiento u otro. Por esa razón es necesario un análisis más profundo de la materia con el fin de conseguir integrar todos los parámetros y casuísticas posibles.

5. CONCLUSIONES

La prevención consiste en evitar los accidentes antes de que pasen y la protección es el conjunto de técnicas que reducen las consecuencias cuando ya han pasado. Las medidas de prevención y de protección aplicables se regulan mediante reglamentos técnicos fijados por los organismos reguladores. Existen muchos métodos de prevención y protección contra accidentes y con costes de diseño y de implantación muy variables. Por eso no hay que olvidar que la seguridad también se mide en términos económicos y que hay que alcanzar finalmente un compromiso coste-beneficio.

Agotadas estas medidas clásicas, el diseño de barreras físicas empieza a tener sentido, con un estudio previo de cada caso y yendo más allá del cumplimiento de la normativa. Las barreras físicas concebidas como corredores verdes de la ciudad son una solución económica, sostenible, de uso público y con posibilidades de integrarse armónicamente en el tejido urbano de la ciudad y las zonas industriales. Para dimensionar las barreras físicas y la distancia a la que se deben situar hay que tener en cuenta todos los efectos posibles.

El estado del arte en simulación computacional permite abordar con garantías los cálculos necesarios para diseñar las barreras de protección con metodologías prestacionales. Para alcanzarlo hace falta la implicación de un equipo pluridisciplinario que conozca los aspectos urbanísticos, arquitectónicos, sociales y económicos para el diseño de las soluciones óptimas en cada caso, sean proyectos nuevos o situaciones ya existentes.

BIBLIOGRAFÍA

- BAKER W.E. (et al.) *Explosion Hazards and Evaluation, of Fundamental studies in engineering*. New York: Elsevier, 1983.
- BARTKNECHT, W. *Explosions. Course, prevention, protection*. Berlin: Heidelberg, Springer-Verlag, 1981.
- CASAL, J.; MONTIEL, H.; PLANAS, E.; VÍLCHEZ, J.A. *Análisis de riesgo en instalaciones industriales*. Barcelona: Ediciones UPC, 1999.
- CASAL, J. *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- CATALUÑA. «Instrucción 8/2007 SIE: Crecimientos urbanos en el entorno de establecimientos existentes afectados por la legislación de accidentes graves (criterios para la elaboración del informe previsto en el artículo 83.5 del DL 1/2005, de 26 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de urbanismo de Cataluña)».
- CRAWFORD, J.E.; SHENGRUI, L. *Blast Barrier Design and Testing*. Structures Congress 2006: Structural Engineering and Public Safety, p. 1-10, 2006.
- DELGADO, S. *El risc com a paràmetre de les estratègies de planejament del territori* [en línea]. Trabajo final de master, 2010. <<http://www.recercat.net/handle/2072/195752>> (Consulta: 28 febrero 2014).

KINNEY, G.F.; GRAHAM, K.J. *Explosive Shocks in Air* [2ª ed.]. Berlin: Springer Verlag, 1985.

MIR, N. *Sociedad, Estado y Riesgo*. Barcelona: Beta Editorial, 1999.

MOORE, C.V. «The Design of Barricades for Hazardous Pressure Systems». *Nuclear Engineering and Design*, vol. 5, 1, 1967.

REVISTA CATALANA DE SEURETAT PÚBLICA. Generalitat de Catalunya. Instituto de Seguridad Pública de Catalunya. «Riesgo y territorio», nº 23, noviembre 2010.

SANS, J. «Mitos y realidades sobre las explosiones accidentales». *Fulls dels Enginyers* (Colegio Oficial de Ingenieros Industriales), nº 259, p. 10-11, 2009.

TOST, S. «Panorama de la seguridad industrial en Catalunya. El caso de la planificación del territorio en los alrededores de los establecimientos con riesgo de accidente grave». *Revista Catalana de Seguridad Pública*, nº 19, noviembre 2008, p. 103-132.