

TEMA 4. Explosiones. Concepto y clasificaciones. Ondas expansivas y sus efectos. Fenómenos físicos-químicos asociados a incendios en interiores: FlashOver- Backdraft- RollOver- BoilOver y fenómeno BLEVE.

1. EXPLOSIONES CONCEPTO Y CLASIFICACION.....	24
1.1. CLASIFICACION DE LAS EXPLOSIONES.....	24
2.FENÓMENOS ASOCIADOS A LOS INCENDIOS DE INTERIORES.....	
2.1. DESARROLLO DE INCENDIOS EN INTERIORES.....	
2.2. FLASHOVER.....	
2.3. ROLLOVER O FLAMEOVER.....	
2.4. BACKDRAFT O BACKDRAUGHT.....	
2.5. BOIL OVER.....	
3. EL FENÓMENO BLEVE.....	

1. EXPLOSIONES CONCEPTO Y CLASIFICACION

Históricamente el término explosión ha sido difícil de definir con exactitud. Generalmente, la manifestación de que ha ocurrido una explosión son los daños o cambios producidos por los obstáculos a la onda expansiva de la explosión como elemento integrante, que ha producido efectos físicos en el continente o en las superficies cercanas. Estos efectos pueden ser resultado del obstáculo encontrado por la onda expansiva o del impacto de una onda expansiva libre o su choque contra un objeto, persona o edificio.

Una explosión puede definirse sencillamente como **la liberación súbita de gas a alta presión en el ambiente**. Atendiendo a esta definición, vamos a analizar brevemente algunos aspectos que caracterizan una explosión:

- ⇒ Este fenómeno es el resultado de una conversión repentina de energía potencial en energía cinética, aunque como puede observarse, la definición no menciona el origen de esa energía potencial, que puede ser química o mecánica.
- ⇒ La liberación de gases debe ser súbita, de forma que la energía contenida en el gas se disipe mediante una onda de choque. Una liberación gradual implicaría una disipación de energía sin los efectos propios que caracterizan a una explosión.
- ⇒ Otro aspecto a tener en cuenta, recogido en la definición, es el término *alta presión*. Resulta evidente, pero en el instante de la liberación la presión del gas es superior a la de la atmósfera circundante. Cuanto mayor sea esa diferencia de presión, mayores serán los efectos de la explosión.

Como conclusión, podemos afirmar que las explosiones son un fenómeno de la dinámica de gases. La generación de una onda de presión que se propaga por el aire, transportadora de la energía liberada, es el eje común a toda explosión y el suceso más peligroso asociado a la misma. Además, como el fenómeno es de duración muy breve, la única forma de actuación sobre ellas es la prevención, puesto que no existe ningún método de mitigación posible.

6.1. CLASIFICACIÓN DE LAS EXPLOSIONES

Existen dos tipos principales de explosiones: físicas o mecánicas y químicas. La diferencia viene dada por la fuente o el mecanismo mediante el que se producen las presiones explosivas.

EXPLOSIONES FÍSICAS O MECÁNICAS

En determinados casos el gas a alta presión se genera por medios mecánicos o por fenómenos sin presencia de un cambio fundamental en la sustancia química. El aporte de calor a gases, líquidos o sólidos puede conseguir un aumento de la presión, al igual que una transición rápida de fase de un líquido sobrecalentado. Todos estos hechos pueden ser el origen de explosiones, pero la característica común es que ninguno de estos fenómenos implica cambios químicos en las sustancias involucradas. Todo el proceso de generación de alta presión, descarga y efectos de la explosión puede entenderse de acuerdo a las leyes fundamentales de la física.

La mayor parte de las explosiones físicas involucran a un contenedor tal como calderas, cilindros de gas, compresores, etc. En el contenedor se genera alta presión por compresión mecánica de gas, calentamiento del contenido o introducción de otro gas a elevada presión desde otro contenedor.

Cuando la presión alcanza el límite de resistencia de la parte más débil del contenedor se produce el fallo. Los daños generados dependen básicamente del modo de fallo. Si fallan pequeños elementos, pero el contenedor permanece prácticamente intacto, la metralla proyectada resulta peligrosa como balas, pero la descarga de gas es direccional y controlada. En estas condiciones los daños causados se limitan a penetración de metrallas, quemaduras y otros efectos dañinos por gases calientes.

Cuando el fallo ocurre en las paredes del contenedor se producen proyecciones de metrallas de mayor tamaño provocando un violento empuje de la estructura del contenedor en la dirección opuesta a la descarga del gas. En este caso la liberación del gas es extremadamente rápida y genera una violenta onda de choque.

Hay un tipo de explosión física denominado BLEVE, que constituye el ejemplo más característico, y que trataremos en un apartado específico más adelante. Otro fenómeno que puede provocar violentas explosiones es la evaporación de un líquido puesto en contacto con otra sustancia a una temperatura muy por encima del punto de ebullición del líquido, como es el caso de la introducción de agua de tubos de calderas, intercambiadores de calor, etc.

EXPLOSIONES QUÍMICAS

Tienen lugar cuando, merced a un cambio químico, se producen gases con una presión muy superior a la de los productos originales y con un cambio significativo en la energía potencial del sistema.

Las explosiones químicas pueden clasificarse en:

Reacciones uniformes. Son transformaciones químicas que involucran toda la masa reactiva. En este tipo de reacciones la velocidad sólo depende de la temperatura y la concentración de los agentes de la reacción manteniéndose constante en toda la masa reactiva. Las explosiones térmicas son el ejemplo de reacciones uniformes y son reacciones "autónomas" con fuerte liberación de calor y gases.

Reacciones de propagación. Existe un frente de reacción claramente definido que separa el material sin reaccionar con el ya reaccionado. Puesto que una reacción de propagación se inicia en un punto específico y se propaga a través de la masa reactiva, la velocidad de disipación depende de la propagación del frente de reacción. Las velocidades de propagación varían desde cero a varias veces la velocidad del sonido, dependiendo de la composición, temperatura, presión, grado de confinamiento y otros factores.

En las Reacciones de propagación se pueden diferenciar 3 zonas:

- ⇒ Zona de reacción. Llama.
- ⇒ Zona de producto. Detrás de la llama.
- ⇒ Zona sin reacción. Frente a la llama.

En función de las velocidades de propagación, las explosiones químicas se dividen a su vez en:

- ⇒ **Deflagraciones.** Cuando el frente de propagación avanza a velocidades inferiores a la del sonido.
- ⇒ **Detonaciones.** Cuando la zona de reacción se propaga a una velocidad superior a la del sonido.

Reacciones químicas fuera de control, o la descomposición de productos energéticos en el interior de recipientes (peróxidos, acetileno y derivados, compuestos nitrados, etc) pueden ser el desencadenante de explosiones. No obstante, las explosiones químicas más comunes son las causadas por la ignición de sustancias combustibles, que se caracterizan por la presencia del combustible y el aire como oxidante o comburente. En las explosiones por combustión se generan elevadas presiones por la combustión rápida del combustible y la consiguiente producción de subproductos y gases calientes en gran volumen.

Pueden distinguirse varios subtipos de explosiones por combustión, según el combustible afectado, siendo las más habituales:

De gases inflamables. Una de las explosiones más típicas son las de nubes de vapor no confinadas, denominadas como UVCE (acrónimo de la expresión inglesa Unconfined Vapour Cloud Explosion), y que se puede definir como: la deflagración explosiva de una nube de gas inflamable que se halla en un espacio amplio, cuya onda de presión alcanza una sobrepresión máxima del orden de 1 bar en la zona de ignición.

Este tipo de explosiones se originan debido a un escape rápido de gran cantidad de gas o vapor inflamable que se dispersa en el aire o por evaporación rápida de un líquido inflamable para formar una nube de características inflamables mezclada con el aire. Cuando un gas inflamable se encuentra una fuente de ignición (normalmente superficies calientes, chispas, motores eléctricos, etc.), una parte de esta masa de gas (la que se encuentra entre los límites de inflamabilidad de la sustancia de que se trate), deflagra por efecto de la fuente de ignición y se produce la explosión. Normalmente son deflagraciones y en raras ocasiones se transforman en detonaciones.

De vapores de líquidos inflamables y combustibles. Lo expuesto en el apartado anterior es aplicable igualmente a este tipo de explosiones. Sólo añadir que en los efectos de las explosiones de mezclas de gases o vapores de líquidos inflamables, influye el porcentaje de mezcla y el confinamiento. Las explosiones por mezclas en el LIE o LSE (o concentraciones próximas a los mismos), son menos violentas que las que se producen a concentraciones óptimas (mezcla estequiométrica o ligeramente por encima). La mezcla óptima produce una combustión más eficaz y, por tanto, con mayor rapidez de la llama, mayor velocidad de aumento de presión, mayor presión máxima y, por consiguiente, mayores destrozos. Por otra parte, el confinamiento produce una mayor subida de la presión para una mezcla dada combustible-aire, lo que se traduce en explosiones más violentas. Igualmente, puede ser el elemento de transición de una deflagración a detonación.

De sólidos en estado pulverulento. Los materiales sólidos finamente divididos y dispersos en el aire, pueden causar explosiones especialmente violentas y destructivas. Las explosiones de polvos se producen con una gran variedad de materiales: polvos de cereales y serrín; carbón vegetal y mineral; productos químicos como la aspirina y el ácido ascórbico (vitamina C); metales como el aluminio, magnesio o titanio; plásticos y resinas, etc. La reacción de combustión se produce en la superficie de la partícula de polvo y, por tanto, el aumento de la presión depende en gran medida del área de esas partículas. Para una masa dada de polvo, su superficie total y, por consiguiente la violencia de la explosión, aumenta a medida que disminuye el tamaño de las partículas. En general, se produce riesgo de explosión por concentración de polvos combustibles cuando están formados por partículas de 420 micras de diámetro, o menos.

De forma análoga a como sucede con los gases y vapores inflamables, se requiere una concentración mínima de polvo para que se produzca la reacción de combustión, que puede variar desde los 20 g/m³ hasta los 2.000 g/m³. Por el contrario, los polvos no presentan un límite máximo de concentración que se pueda considerar fiable.

Por otra parte, al igual que los gases y vapores, la velocidad de aumento de la presión y la presión máxima producidas en una explosión de polvos son mayores si la concentración previa estaba en el punto de mezcla óptima o cerca de él.

De explosivos. Los explosivos son sustancias con un gran potencial energético, capaces de descomponerse casi instantáneamente, si sufren la estimulación adecuada, liberando un gran volumen de gases a muy alta temperatura. En líneas generales existen dos tipos: los explosivos lentos, o de baja potencia, y los rápidos o de alta potencia, llamados también "rompedores". Los primeros se caracterizan por bajas velocidades de reacción, lo que se traduce en la creación de bajas presiones y un efecto de empuje o desplazamiento producidos por los gases calientes. Los de alta potencia, se caracterizan por velocidades de reacción muy elevadas (por encima de 7.500 m/s), lo que implica una enorme velocidad de aumento de la presión y una altísima presión de detonación, siendo sus efectos devastadores por naturaleza.

De humo y productos inflamables de la combustión incompleta. Cuando un incendio se desarrolla en una habitación o edificio relativamente hermético, al cabo de cierto tiempo es habitual que exista un déficit de oxígeno. En estos casos se pueden producir altas concentraciones de partículas calientes en suspensión en el aire, aerosoles, monóxido de carbono y otros gases inflamables debido a la combustión incompleta, acumulándose en aquellas zonas donde no existe oxígeno suficiente para su combustión ni ventilación suficiente para permitir que escapen.

Cuando estos gases se mezclan con el aire, por ejemplo al abrir una puerta o ventana, pueden arder y quemarse lo suficientemente rápido como para producir daños de pequeña cuantía. Este fenómeno se denomina "explosión de humo" o "de contratiro" ("backdraft" o "backdraugh", en lengua anglosajona), y pueden generar sobrepresiones que, de forma habitual, serán inferiores a 0,15 bar.



2. FENÓMENOS ASOCIADOS A LOS INCENDIOS DE INTERIORES: FLASHOVER, ROLLOVER Y BACKDRAFT

8.1. DESARROLLO DE INCENDIOS EN INTERIORES

Cuando un incendio transcurre en un espacio abierto (en el exterior o en un gran edificio), el cojín de gases calientes que genera (también llamado pluma de incendio en algunos manuales) crece sin impedimento, y se alimenta de aire en la medida que crece. Precisamente porque este aire aportado está mas frío que los gases del incendio, esta acción tiene un efecto refrigerante en los gases generados por el incendio. La propagación del incendio en un área abierta se debe en origen a la energía calorífica que se transmite desde el cojín de gases a los combustibles cercanos. La propagación del incendio en exteriores puede aumentar por la acción del viento y la inclinación del terreno que facilita el precalentamiento de los combustibles por exposición.

El desarrollo de incendios en recintos cerrados es mucho más complejo que los declarados en espacios abiertos. Se define como incendio de interior al que transcurre en recintos cerrados, considerando como tal a las habitaciones o espacios cerrados en el interior de un edificio. El 6 % + % .B0 J8 660((0J<.J%. . %0 J %.: 6 %Q 6 J 0.:60) 26%. %2 (+206J J %820.% %(%0+J<8:% B J J0AF# .08:0J J :6 < J .08208% %8% J ?0)< %H.J)J%. . %0) %.= .. 08J. < .:6 J controlado por el combustible (ILC)⁵ y cuando se encuentra controlado por la ventilación (ILV).

Cuando un incendio se encuentra controlado por el combustible, la cantidad de calor liberado viene determinada por la cantidad de combustible que está participando en el proceso de combustión. En tales casos, la disponibilidad de oxígeno es suficiente para todo el combustible que en ese momento se encuentra involucrado en el proceso, y por ello es la cantidad de combustible la que limita la velocidad de crecimiento del incendio (podemos decir que la cantidad de oxígeno es "ilimitada"). Durante las etapas iniciales del incendio, éste está a menudo controlado por el combustible.

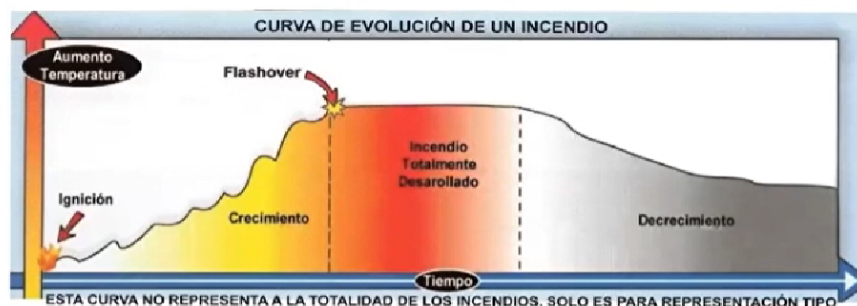
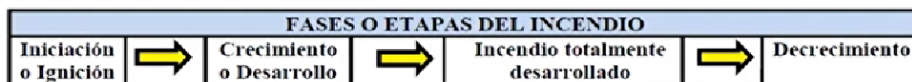
Cuando un incendio se . < .:6 J0.:60) 206J J .:%) %H.J J .: % JJ 0AF# .0820.% .0 06 %.:0J6'J+2(0 J J'= . %H.(J , G0J J(8J 6:<68 (J J 4= J8: (0 J .: % JJ)06)J% 6 B J= J.J 8: J 80 8 J %820. J#6 .J .: % JJ+ : 6 % J+ =8: %).J)J260 80JJ 0+ <8: %B JJ%: 6 (+ ..:0J8 J %820. J8<"% % 2:06: JJ %62 J6 4< + 6:J 08(08#J8 8J) J)0 % J(J 4= J 8 J8:C.260 < % . 06 .: 3.J%. . %0J:60) 206(J J .:%) %2B.J0+% . 6 C J =. J0+ =8: %B.J 0+2(JB 2 6: JJ(J0+ <8: %8H JJ 8 660)(6C(JJA: 6 %0J JJ \$ %: %H.. J . % J

FASES DEL DESARROLLO DE INCENDIO EN UN RECINTO CERRADO

En los últimos tiempos, los investigadores han decidido describir los incendios que se desarrollan en recintos cerrados en términos de etapas o fases que se suceden en la medida en que el incendio se desarrolla. Estas fases son las siguientes:

- ➡ **Ignición.**
- ➡ **Crecimiento.**
- ➡ **Flashover.**
- ➡ **Incendio totalmente desarrollado.**
- ➡ **Decrecimiento.**

⁵ ILC. Incendio limitado por el combustible. ILV. Incendio limitado por la ventilación.



ETAPA DE IGNICIÓN



IGNICIÓN. La ignición describe el periodo donde todos los elementos capaces de iniciar el incendio comienzan a interaccionar. El acto físico de la ignición puede ser provocado (mediante una chispa o flama) o no provocado (cuando un material alcanza su temperatura de ignición como resultado de autocalentamiento), tal como sucede en una combustión espontánea. En este punto, el incendio es pequeño y generalmente se restringe al material (combustible) que se incendia en primer lugar. Todos los incendios (en espacios abiertos o recintos cerrados) ocurren como resultado de algún tipo de ignición.

ETAPA DE DESARROLLO DEL INCENDIO



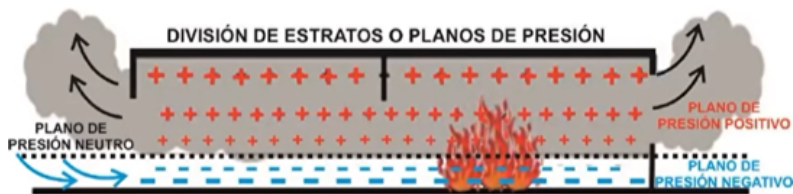
CRECIMIENTO. Poco después de la ignición, comienza a formarse un cojín de gases de incendio sobre el combustible incendiado. En la medida en que el cojín se desarrolla, comienza la succión o entrada de aire desde los espacios circundantes hacia el interior de la columna de gases. El crecimiento inicial es similar al de un incendio que transcurre en el exterior, en un espacio no confinado, y su crecimiento está en función del combustible que ha comenzado a arder en primer lugar. No obstante, a diferencia de un incendio no confinado, el cojín de gases en un recinto cerrado se ve rápidamente afectado por la distancia al techo y las paredes del recinto. El primer factor de influencia es la cantidad de aire que se incorpora a la columna de gases. Dado que el aire está más frío que los gases calientes procedentes del incendio, el aire ejerce un efecto refrigerante en las temperaturas del interior del cojín. La ubicación de la fuente de combustible en relación con las paredes del recinto determina la cantidad de aire que se introduce y, en consecuencia, el grado de enfriamiento que tiene lugar. Fuentes de combustible cercanas a las paredes implican un menor aporte de aire y, por consiguiente, unas mayores temperaturas en las columnas de gases. Fuentes de combustibles en las esquinas todavía limitan más la entrada de aire en la columna de humo y es donde se consiguen mayores temperaturas. Este factor afecta significativamente las temperaturas en el desarrollo de las capas calientes de gases que se encuentran sobre el incendio. Como el volumen de gases calientes aumenta, estos comienzan a propagarse hacia el exterior del recinto cuando alcanzan el nivel de techo, y continúan dispersándose hasta que alcanzan las paredes. La profundidad de la capa de gases comienza entonces a aumentar.

La temperatura en el recinto durante este periodo depende de la cantidad de calor por conducción en el techo y paredes, así como del flujo calórico procedente de los gases que se sitúan en la parte superior, la ubicación del foco del incendio inicial y de la cantidad de aire que entra. Las investigaciones muestran que la temperatura de los gases disminuye conforme aumenta la distancia a la línea central de la columna de gases.

La etapa de crecimiento continúa si se dispone de suficiente combustible y oxígeno. Los incendios en interiores en la etapa de crecimiento están generalmente controlados por el combustible. En la medida que el incendio crece, aumenta la temperatura en todo el recinto, al igual que lo hace la temperatura de la capa de gases a nivel del techo.

Si la cantidad de aire aportado al incendio no es suficiente (incendio controlado por la ventilación) los gases calientes (pero por debajo de la temperatura de autoinflamación) saldrán al exterior provocando, según las condiciones, una elevación del plano neutro, y la entrada de aire limpio a través de la zona de presión negativa, únicamente como consecuencia de la liberación de presión en la zona de presión positiva. Cuando este aire alcance el foco o los focos de ignición, el efecto se traduce en un nuevo aumento de la cantidad de gases de pirólisis y de la presión en el recinto, un nuevo descenso de la cantidad de oxígeno y la liberación de gases enriquecidos de incendio al exterior a través de la vía de entrada de aire.

La entrada de aire siempre debe realizarse por encima del plano neutro para facilitar la salida de gases. Si lo hacemos por debajo lo que hacemos es inyectar aire (oxígeno) al incendio



Una vez alcanzado este punto, el proceso descrito no cesará, al contrario, tenderá a reiterarse de forma que el ciclo establecido se irá repitiendo de forma sucesiva generando lo que conocemos como pulsaciones (o respiración) del incendio. Estas acrecentarán su intensidad en la medida en que los valores de temperatura dentro del recinto aumenten como consecuencia de las aportaciones energéticas procedentes de las combustiones que se generan, lo que provoca a su vez que la cantidad de aire que entra cada vez sea mayor.

FLASHOVER. El flashover consiste en la transición entre las etapas de un incendio en fase de crecimiento a la de incendio totalmente desarrollado. Durante la etapa de flashover, las condiciones en el recinto cambian muy rápidamente, siendo esta la consecuencia que más claramente marca esta etapa. Estos cambios se producen en la medida en que el incendio pasa de estar controlado por la combustión de los materiales que han comenzado a arder en primer lugar hasta que este se extiende a todas las superficies de los materiales combustibles que se encuentran dentro del recinto. La capa de gases calientes que se desarrolla a nivel de techo durante la etapa de crecimiento provoca calor radiante sobre materiales combustibles lejanos al origen del incendio.

Por lo general, la energía radiante desde la capa de gases calientes excede los 20 kW/m^2 cuando ocurre el flashover. Este calor radiante genera la pirólisis en los materiales combustibles que se encuentran en el interior de recinto. Los gases generados durante esta etapa son calentados hasta su temperatura de ignición por la energía radiante procedente de la capa de gases del techo.

A pesar de que los científicos definen el flashover de diferentes formas, la mayoría basan su definición (momento en el cual comienza a producirse) apoyándose en la temperatura del recinto, y como consecuencia de la cual resulta la ignición simultánea e incluso la autoignición de todos los combustibles contenidos en el mismo. Aunque no se asocia una temperatura exacta con este fenómeno, este **suele darse** en un rango comprendido entre **los 480°C y 650°C** . Este rango se corresponde con la temperatura de autoinflamación (609°C) del monóxido de carbono, uno de los gases más comunes obtenidos como resultado de la pirólisis. Justo antes de producirse el flashover, se suceden diferentes fenómenos dentro del recinto incendiado: las temperaturas aumentan rápidamente, los combustibles adicionales en el recinto se ven envueltos en el proceso, y todos ellos emanan gases combustibles como resultado de la pirólisis. Cuando el flashover ocurre, los materiales combustibles en el recinto y los gases generados por la pirólisis se incendian. El resultado es un incendio totalmente desarrollado en el recinto. El calor liberado por una habitación totalmente incendiada en la fase de flashover puede ser del orden de más de 10.000 kW.

Los ocupantes que no hayan escapado de un recinto antes de que ocurra un flashover probablemente no sobrevivirán. Los bomberos que se encuentren en un recinto cerrado cuando se produce un flashover se encuentran en una situación de extremo peligro aunque se encuentren equipados con su equipo de protección personal.

INCENDIO TOTALMENTE DESARROLLADO. La etapa de incendio totalmente desarrollado ocurre cuando todos los materiales combustibles en el recinto se encuentran incendiados. Durante este periodo de tiempo, los combustibles incendiados en el recinto están liberando la máxima cantidad de calor posible procedente de todos los materiales disponibles, generándose grandes cantidades de gases de incendio. El calor liberado y el volumen de gases producido dependen del número y tamaño de las aberturas de ventilación en el recinto. El incendio pasa a estar frecuentemente controlado por la ventilación, y de esta manera se producen grandes cantidades de gases no quemados, que probablemente empiecen a fluir desde el recinto donde se está desarrollando el incendio hacia espacios adyacentes u otros recintos. Estos gases se inflaman si entran en espacios donde el aire es más abundante y si se encuentran a las temperaturas de inflamación o autoinflamación.



DECRECIMIENTO. En la medida que el fuego consume el combustible disponible, la cantidad de calor liberado comienza a disminuir. Una vez el incendio se convierte en controlado por el combustible, la cantidad de calor liberado disminuye, y la temperatura dentro del recinto comienza a descender. La cantidad de restos ardiendo (rescaldos) pueden, sin embargo, generar temperaturas moderadamente altas en el recinto durante algún tiempo.

Desde la etapa de ignición hasta la de decrecimiento, son varios los factores que afectan al comportamiento y desarrollo del incendio en el interior del recinto:

- ⇒ Tamaño, número y distribución de los huecos (aberturas) de ventilación.
- ⇒ Volumen del recinto.
- ⇒ Propiedades térmicas de los cerramientos del recinto.
- ⇒ Altura del techo del recinto.
- ⇒ Tamaño, composición y localización de las fuentes de combustible que se incendian en primer lugar.
- ⇒ Disponibilidad y ubicación de fuentes de combustible adicionales (combustibles objetivos del incendio).

Para que un incendio se desarrolle, debe existir suficiente aporte de aire para mantener la combustión en la etapa de ignición. El tamaño y número de los huecos de ventilación en un recinto determinan si el incendio se desarrollará o no en su interior. El tamaño del recinto, su forma y la altura del techo determinan si se formará una capa de gases calientes significativa.

La **ubicación** de la fuente de combustible inicial es también muy importante en el desarrollo de la capa de gases calientes. Los cojines generados por fuentes de combustible en el **centro de un recinto** toman **más cantidad de aire y se enfrían más** que aquellas que se encuentran contra **las paredes o esquinas del recinto**.

De los factores de influencia expuestos, cabe destacar el papel fundamental que adoptan en la velocidad con que el incendio se desarrolla en el recinto, las propiedades térmicas de los cerramientos, o lo que es lo mismo, su capacidad de transmitir calor y la altura del techo del recinto.

Capacidad de la estructura de transmitir calor. Va a determinar la cantidad de calor que se puede concentrar para contribuir a la velocidad de desarrollo del incendio y la que se va a disipar al ambiente exterior.

Altura del techo del recinto. Los techos juegan un papel no menos importante en la velocidad de propagación del incendio, de tal forma que los **techos bajos** van a favorecer una **propagación mucho más rápida** que los techos altos, ya que en los primeros, la llama alcanza rápidamente el techo propagándose rápidamente a lo largo de él, suministrando de esta forma la energía de radiación necesaria para que los elementos combustibles contenidos en el recinto alcancen en menos tiempo la energía de activación necesaria y contribuir así a la rápida evolución del incendio. Si las llamas no llegan al techo, la cantidad de calor radiado es menor y la evolución del incendio queda condicionada por la proximidad de los materiales al foco de ignición. Podemos decir, y este es un factor importante a la hora de evaluar la fase del incendio donde nos encontramos, que el momento crítico o de transición del incendio llega precisamente cuando las llamas alcanzan el techo, ya que como hemos dicho, el valor de la energía radiante aumenta de forma considerable.



8.2. FLASHOVER

Al hablar de las etapas del incendio se ha definido el flashover, sin embargo, hay que remarcar el hecho de que cuando este fenómeno se produce, marca un incremento drástico en las condiciones del incendio debido al confinamiento de la habitación. Si en un incendio se alcanzan las condiciones de flashover, implica **siempre que el incendio alcanzará su etapa de totalmente desarrollado**, en la cual todo el combustible que se encuentra dentro del recinto participa en el mismo y la temperatura aumenta.

Puede darse el caso de que en el recinto no todos los gases generados ardan, debido a que la cantidad de aire disponible está limitada. Para ser más precisos, diremos que un incendio que se está viendo limitado por la cantidad de aire aportada es un incendio "controlado por la ventilación". Cuando se alcanza esta situación, la producción de CO junto con el resto de productos de combustión que componen el humo y la energía desprendida, alcanzan sus máximos valores. Así mismo, la concentración de oxígeno en la capa de humo se hace prácticamente cero. El periodo de flashover marca la transición en la cual el desarrollo del incendio que previamente estaba siendo controlado por los materiales combustibles pasa a estar controlado por las condiciones de ventilación, las cuales dependen del recinto y de la geometría del edificio.

Además de todo lo descrito, hay que incidir en que en un incendio sólo llegaremos a esta etapa si se dispone de la suficiente cantidad de aire para que todo el proceso descrito tenga lugar, lo cual no implica necesariamente que todo el gas combustible generado pueda quemarse.

Finalmente, y a pesar de toda la controversia que la denominación del término flashover ha generado con el paso del tiempo, hay que señalar que es el único término (a diferencia de los de backdraught/backdraft, explosiones de gases de incendio, rollover, etc.) recogido por la norma ISO 8421-8 de 1990 (International Standards Organization), donde se define como:

"Transición rápida al estado donde todas las superficies de los materiales contenidos en un compartimento se ven involucrados en un incendio".

8.3. ROLLOVER O FLAMEOVER

Durante el proceso de combustión en el interior de un recinto, y previo a la fase de pleno desarrollo, los gases combustibles liberados en fases anteriores, se acumulan a nivel de techo. Estos gases recalentados son empujados, bajo presión, desde el incendio hacia áreas no involucradas donde se mezclan con el oxígeno.

Cuando llegan a su rango de inflamabilidad, se inflaman y crean un **frente de llama** que se **expande rápidamente rodando por el techo**, que es lo que se conoce con los términos *flameover* o *rollover*.

El rollover se diferencia del flashover en que sólo arden los gases de los niveles superiores, no todo el contenido del local, y continuará hasta que el fuego deje de emitir los gases inflamables que le están alimentando. La extinción del foco de incendio es la mejor manera de eliminar dichos gases.

8.4. BACKDRAFT O BACKDRAUGHT

El fenómeno backdraft recibe diversos nombres; de este modo *backdraft* será la expresión norteamericana, *backdraught* en Inglaterra, y *explosión de humo* es el término más generalizado en lengua castellana (para la escuela sueca el backdraft es un tipo de flashover, denominado rico y demorado).



El backdraft es una **explosión de violencia variable**, causada por la **entrada de aire fresco en un compartimento que contiene o ha contenido fuego**, y donde se ha producido una **acumulación de humos combustibles** como consecuencia de una combustión en condiciones de deficiencia de oxígeno. Para su desarrollo son imprescindibles dos factores: existencia de una mezcla rica de gases y la presencia de una fuente de ignición a gran distancia, que esté oculta o que sea intermitente. En términos generales, el proceso puede concretarse en los siguientes pasos:

- ⇒ Acumulación de gases calientes de combustión.
- ⇒ Empobrecimiento del aire en el interior y enriquecimiento de los gases calientes.
- ⇒ Aparición de una corriente inferior entrante como consecuencia de la repentina ventilación del compartimento (por ejemplo, por la apertura de una puerta o ventana) y la consiguiente creación de una zona dentro del rango de inflamabilidad que avanza hacia el interior.
- ⇒ Ignición y propagación de la llama de forma turbulenta hasta el exterior del compartimento. La fuente de ignición más común es el fuego inicial; si éste se encuentra situado cerca de la entrada de aire, la mezcla se inflamará desde el comienzo y tendrá poca violencia. Por el contrario, cuando el fuego se encuentra en el fondo de la habitación, el aire se mezclará libremente con los gases antes de que la mezcla inflamable alcance la fuente de ignición. En este caso, el volumen de la mezcla de gases inflamables será mayor y el aumento de la temperatura y **la fuerza de expansión de los gases** también (**hasta 10 kPa**).

Como características fundamentales del backdraft se pueden citar:

Respiración del incendio; es uno de los síntomas que siempre se mencionan al estudiar el backdraft: el flujo y reflujo pulsátil de gases por las rendijas del compartimento en que se ha desarrollado el incendio con ausencia de ventilación. Esta secuencia succión-expulsión de gases a través de las pequeñas aberturas se ha denominado "respiración" o "pulsación" del incendio.

Deflagración. En realidad, un backdraft no es la inflamación repentina de toda la masa de gases contenida en el recinto, sino una combustión rápida pero progresiva del volumen parcial de gases, dentro del rango de inflamabilidad, creado por el contacto entre los humos calientes y la corriente de aire entrante por la parte inferior de un hueco de ventilación abierto en una fase avanzada de desarrollo del incendio.

El volumen de esta mezcla inflamable depende de las turbulencias creadas en el interior del recinto por la interacción entre las corrientes de gases o por factores externos, tales como la entrada de personas o ventilación forzada, y siempre depende del tiempo transcurrido entre la apertura del hueco y la ignición de la mezcla. La violencia de esta combustión es función de la cantidad de mezcla dentro del rango de inflamabilidad, de la posición de la proporción combustible-comburente en relación a la "mezcla ideal" dentro de este rango, y de las características del local. En cualquier caso, en situaciones normales, la combustión será siempre subsónica por lo que no se debe hablar de explosión, entendida como detonación, sino de deflagración.

No debe confundirse una explosión de humo o backdraft con una explosión de gases inflamables. En una explosión de gas, el combustible es un gas diferente al producido por una combustión pobre en comburente. La acumulación de combustible no se debe a un incendio, sino generalmente, a un escape de gases inflamables o a una volatilización.

8.5. BOIL OVER

Uno de los principales problemas a los que se enfrentan los bomberos en los incendios de terminales de combustibles, es la eventualidad de la ocurrencia de un BOIL OVER o rebosamiento por ebullición. Este fenómeno generalmente afectará al petróleo crudo, que se caracteriza por tener un amplio rango de puntos de ebullición, provocándose en su caso una explosión de vapor de catastróficas consecuencias.

De acuerdo a la norma 30 de la National Fire Protection Association-NFPA, podemos describir el BOIL OVER como un evento en la combustión de ciertos aceites (Fuel Oil) en un estanque abierto en el cual se presenta, después de un largo período de combustión lenta, un súbito aumento en la intensidad del fuego asociado con la expulsión del producto incendiado fuera del estanque. Un Boil Over se presenta cuando los residuos de la combustión superficial se vuelven más pesados, se hunden y forman una capa caliente descendente y bajan más rápidamente que la recuperación de la superficie del líquido. Cuando esta capa llamada "onda calorífica" alcanza el agua, o una emulsión de agua y aceite en el fondo del tanque, el agua es sobrecalentada y entra en ebullición de forma casi explosiva desbordando el tanque. Los aceites que causan Boil-Over tienen componentes de un amplio rango de puntos de ebullición, incluyendo fracciones livianas y residuos viscosos. Estas características son propias del petróleo crudo y pueden producirse igualmente en mezclas sintéticas.

Para que se produzca un Boil Over deben estar presentes tres condiciones:

1. Un fuego en un estanque con un techo abierto.
2. Una capa de agua en el estanque, mezclada con el líquido combustible.
3. Desarrollo de una onda calórica al interior del estanque, la cual es determinada por la naturaleza del producto almacenado.

Cuando comienza a arder un tanque cuyo contenido es un combustible como el petróleo crudo, con un amplio rango de puntos de ebullición, las fracciones más livianas arden primero y los componentes de mayor punto de ebullición se hunden formando una capa caliente más pesada. Esa capa transmite calor al aceite frío inferior, donde los componentes más livianos con menos puntos de ebullición continúan su movimiento ascendente a la superficie y alimentan el incendio, el cual a su vez, devuelve calor radiante al contenido del estanque. Al continuar el proceso, la onda calórica se vuelve más densa y caliente con temperaturas en el rango 150°C a 315°C. Esta onda calórica continúa destilando las fracciones livianas de bajo punto de ebullición del producto que encuentra en su camino. Cuando llega a la capa de agua o de emulsión agua-aceite primero la sobrecalienta y luego produce una explosión de vapor. El agua se convierte rápidamente en vapor en temperaturas por encima de los 100°C y puede expandirse en una relación de 1.700 a 1.

Se estima que una explosión de vapor puede propulsar el combustible incendiado y vapor a una altura de 10 veces el diámetro del tanque.

Se ha podido determinar que la ONDA CALORÍFICA, baja hacia el fondo a un promedio de un metro por hora, cálculo sólo tentativo e ilustrativo, ya que en ocasiones el período se ha acelerado más. Un buen método, recomendado especialmente por la NFPA, es dirigir un chorro de agua (preferentemente de un monitor sin personal), hacia el lugar ubicado inmediatamente por debajo del lugar en que el calor ya haya deformado la pared exterior del estanque y que nos indica el nivel del líquido caliente en su interior. Si se produce vapor al bajar en forma gradual el chorro, el punto en que el agua se evapora es aquel en que la "Onda" baja, lo que posibilita el adoptar de inmediato las necesarias providencias, considerando especialmente que una vez expulsado el

combustible al exterior éste al caer cubrirá una vasta superficie equivalente a 10 veces el diámetro del estanque correspondiente. A esta experiencia, debe también agregarse la observación visual sobre el nivel al cual se encuentra el contenido del estanque, también importante y valiosa fuente de información.

Conclusiones

De lo expuesto, cabe concluir que no existe refinería o terminal de combustibles libre de sufrir un riesgo como el que analizamos, siendo requisito para ello sólo el que existan estanques con techo flotante abierto, una capa de agua en el fondo del mismo y una onda calórica, que, actuando sobre el petróleo crudo contenido en el interior, crea las necesarias condiciones para producir el BOIL OVER. En atención a ello, estas ideas y experiencias han sido escritas como un medio de alertar contra la eventualidad del riesgo indicado, a la vez que de señalar métodos y procedimientos para prevenir una catástrofe que, en caso contrario, sería imposible de dimensionar.

Las Fases del BOIL OVER

1. Estanque deformado
2. Corrientes Interiores
3. Onda Calorífica
4. Capa de Agua en el fondo
5. Método para determinar lugar en que se encuentra "Onda Calorífica" o "Costra Caliente".

La Explosión

1. El agua se transforma en vapor
2. El contenido del estanque es proyectado al exterior
3. El radio a 10 veces el diámetro del tanque es cubierto por la onda Calórica
4. El combustible, como lluvia ardiente, aniquila todo lo ubicado en la zona inmediata al estanque.

3. EL FENOMENO BLEVE

La palabra BLEVE es el acrónimo de la expresión en lengua inglesa "Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion" cuyo significado sería "Explosión de los vapores en expansión de un líquido en ebullición", o si se prefiere "Expansión explosiva de los vapores al hervir un líquido".

Puede definirse a la BLEVE como la ruptura en dos o más pedazos de un recipiente, con proyección y grandes desplazamientos de dichos pedazos, producida por un tipo de explosión especial que se da en unas determinadas circunstancias, pero que exige como primera condición necesaria esencial, pero no suficiente, que el gas licuado o el líquido contenido en el recipiente esté a una temperatura bastante mayor que la que le correspondería estar si estuviera a la presión atmosférica normal. Así pues, la temperatura de ebullición (a 1 atmósfera), ha de ser bastante menor que la temperatura a la que está realmente el recipiente y la masa del líquido.

El termino BLEVE fue utilizado por primera vez en el año 1957 cuando los ingenieros norteamericanos James B. Smith, Williams S. Marsh y Wilbur L. Walls investigaban las causas de una explosión de un recipiente de acero utilizado para la producción de resina fenólica a partir de la formalina (disolución de formaldehído en agua) y fenol. Estos ingenieros llegaron a la conclusión de que el entendimiento de este fenómeno podría explicar muchos otros accidentes y que el modelo físico pensado para estudiar dichas explosiones se podía aplicar a cualquier líquido sobrecalentado. No era pues preciso ninguna reacción química ni problemas de combustibilidad. Por tanto pueden sufrir BLEVEs incluso hasta los calentadores de agua y las calderas a vapor.

Evidentemente si, además, el líquido era químicamente reactivo, o combustible, el problema de la BLEVE propiamente dicho se podía complicar pero, quedaba de manifiesto que dicha explosión se podía producir con cualquier líquido si se cumplían, conjuntamente, las siguientes condiciones:

1. La sustancia contenida en el recipiente debe ser un **líquido sobrecalentado**.
2. Debe producirse una **súbita bajada de la presión** en el interior del recipiente, que puede ser originada por la fisura o rotura del recipiente, actuación de discos de ruptura o válvula de alivio con diseño inadecuado, etc.
3. Es necesario, además, que se den unas condiciones de presión y temperatura tales que se pueda producir el fenómeno de **nucleación espontánea**, con lo que se originaría una evaporación "en masa" rapidísima, tipo "flash", generada por la rotura del equilibrio metaestable como consecuencia de sobrecalentamiento del líquido o gas licuado.

LÍQUIDOS SOBRECALENTADOS

Toda sustancia que se encuentre en estado líquido a una determinada presión y temperatura, se encuentra en situación de equilibrio (a volumen constante), con su propio vapor. A nivel del mar, la temperatura a la cual la presión de vapor del líquido iguala a la presión atmosférica, se denomina punto de ebullición del líquido. Igualmente, es importante señalar que la temperatura a la que hierve un líquido depende de la presión a que se encuentre. Así, el agua hierve a temperaturas menores de 100°C a medida que disminuye la presión. De manera inversa, es posible mantener el agua en estado líquido a temperaturas muy superiores a los 100° C, siempre y cuando la presión esté por encima de la presión atmosférica.

Cuando un líquido, en un recipiente, se encuentra a temperatura bastante superior a su punto de ebullición (es importante insistir en este aspecto puesto que no es suficiente que esté dos o tres grados por encima), se le denomina "líquido sobrecalentado".

Esta son condiciones habituales en la mayoría de gases licuados (G.L.P, amoníaco, cloro, ...), y algunos gases criogénicos (dióxido de carbono, nitrógeno, oxígeno, ...) También existen líquidos que están por encima de su punto de ebullición, cuando los recipientes que los contienen, por la causa que sea, entran en contacto con fuentes importantes de calor y estando bien cerrados, incrementan su presión. Es corriente el caso de líquidos que se calientan mucho cuando se ven involucrados en incendios que afectan a las inmediaciones de sus envases, o a otros recipientes próximos.

Así pues, las dos grandes categorías de productos que en principio pueden producir BLEVEs son:

- ⇒ Todos los gases licuados almacenados a la temperatura ambiente, ya que su temperatura de ebullición a presión atmosférica será mucho menor que la temperatura a la que se encuentra en el recipiente.
- ⇒ Los líquidos que, accidentalmente, entren en contacto con focos importantes de calor, puesto que pueden alcanzar las condiciones de sobrecalentamiento.

De manera implícita, queda en evidencia que dichas sustancias estarán contenidas en recipientes herméticos y sometidos a presión. Por otra parte, hay que destacar que si bien la condición de "líquido sobrecalentado" es necesaria para que pueda producirse una BLEVE, ello no implica ninguna consideración sobre la naturaleza inflamable de la sustancia. En definitiva, una BLEVE puede producirse en gases licuados y líquidos no combustibles.

DESPRESURIZACIÓN SÚBITA DEL RECIPIENTE

La segunda condición necesaria pero no suficiente es que dentro del recipiente que contiene el líquido se produzca un súbito descenso de la presión. Cualquier fallo, fisura u oquedad que se produzca en las paredes del recipiente, así como la entrada en funcionamiento de algún dispositivo de aplicación directa sobre el recipiente que libere, incontrolada y súbitamente, la presión, puede ser, en ciertos casos, y dependiendo de las circunstancias, el origen desencadenante de una BLEVE.

Dicha fisura u oquedad puede ser producida, principalmente, por **causas mecánicas** (grietas en la chapa del recipiente, impactos sobre el recipiente, choque o vuelco de una cisterna a presión en su transporte, etc) Normalmente, los líquidos (y en particular los inflamables), no suelen estar presurizados. Por ello, aunque hubiese un impacto o choque sobre el tanque que los contiene, no se produciría BLEVE. Evidentemente, puede existir una fuga del producto e incluso producirse un incendio, pero es bastante improbable, en estas condiciones, que se produzca una BLEVE.

También puede producirse por **causas térmicas**. En efecto, el calentamiento excesivo de la chapa del recipiente o contenedor produce una pérdida de la resistencia mecánica del metal, con lo que sus paredes pueden llegar a ser incapaces de aguantar la presión del recipiente –que además habrá aumentado con el calentamiento– produciéndose entonces las grietas o fisuras que pueden iniciar una BLEVE. Así, por ejemplo, los aceros habitualmente empleados en recipientes para contener GLP (butano, propano, etc), pueden fallar a presiones de unos 14 a 20 kg/cm², cuando la temperatura del metal se encuentra entre 650-700°C, ya que a estas temperaturas su resistencia mecánica se reduce a, aproximadamente, el 30% de la que posee a temperaturas normales.

Por otra parte, tal como se apuntó anteriormente, los dispositivos de alivio de presión pueden, bajo ciertas condiciones, ser los iniciadores de la explosión. Estos elementos se instalan en los recipientes presurizados precisamente para protegerlos contra la rotura, debido al incremento excesivo de la presión, e incluyen fundamentalmente las válvulas de seguridad –mejor de alivio de sobrepresiones– y los discos de ruptura. Tales dispositivos se especifican e instalan de acuerdo con determinados códigos de diseño, con objeto de asegurar la suficiente descarga del producto para que la presión dentro del recipiente no resulte peligrosa para su integridad. Sin embargo, no protegerán al recipiente si se produce el debilitamiento del metal por exposición a un incendio externo. Ello es así, por cuanto la presión de rotura del recipiente debilitado puede llegar a ser inferior a la presión de actuación del dispositivo instalado, aun cumpliendo los códigos de diseño vigentes.

Asimismo, una válvula de alivio puede funcionar perfectamente y no evitar la BLEVE producida por choque o impacto físico de una cisterna o recipiente que lleve gas licuado, pues la presión no se incrementará apreciablemente por el impacto y, por tanto, no abrirá. Sin embargo, el choque sí puede producir fisuras o grietas que despresuricen el recipiente hasta una presión cercana a la atmosférica, lo que puede ser el desencadenante de la BLEVE.

Desde un punto de vista teórico, puede darse el caso de que una válvula de alivio sea el origen de una BLEVE si se dan estas dos condiciones al mismo tiempo:

- 1) Que este calibrada a una presión superior aquella cuya correspondiente temperatura (en la curva de equilibrio de presiones-temperaturas), sea más elevada que la de corte de la *línea límite de sobrecalentamiento* (Superheat Limit Locus), con el eje de temperaturas –abcisas–, por lo que la nucleación espontánea es posible.
- 2) Que sea una válvula de alivio de un gran caudal con lo que, al abraze, permitirá la evacuación en pocos instantes de una gran cantidad de fluido y, consecuentemente, una bajada muy rápida de la presión, con el consiguiente peligro de BLEVE.

NUCLEACIÓN ESPONTÁNEA O EBULLICIÓN EN MASA

Para diversos investigadores sobre el tema, la tercera y más específica condición que debe ocurrir para que pueda darse una explosión BLEVE, es que el fluido se encuentre en unas condiciones de presión y temperatura que favorezcan el fenómeno de “nucleación espontánea” para que se produzca una evaporación en masa rapidísima –en milésimas de segundo– que haga de desencadenante de la explosión BLEVE.

Según la teoría cinética de los gases, no se producirá nucleación hasta que se alcance una determinada temperatura para cada producto. Además, en la sola variación de unos pocos grados centígrados, el rango de producción de núcleos iniciadores de la evaporación pasa a ser, de apenas apreciable, a un valor enorme. Se estima que una explosión BLEVE se podrá producir cuando “un millón de núcleos-embrión se generen en cada milisegundo por milímetro cúbico de líquido sobrecalentado”.

Para exponer de forma simplificada el fenómeno de la aparición de “núcleos de ebullición”, puede seguirse un caso práctico para el propano que, por similitud y con las correspondientes gráficas, puede ser aplicado a la mayoría de gases licuados.

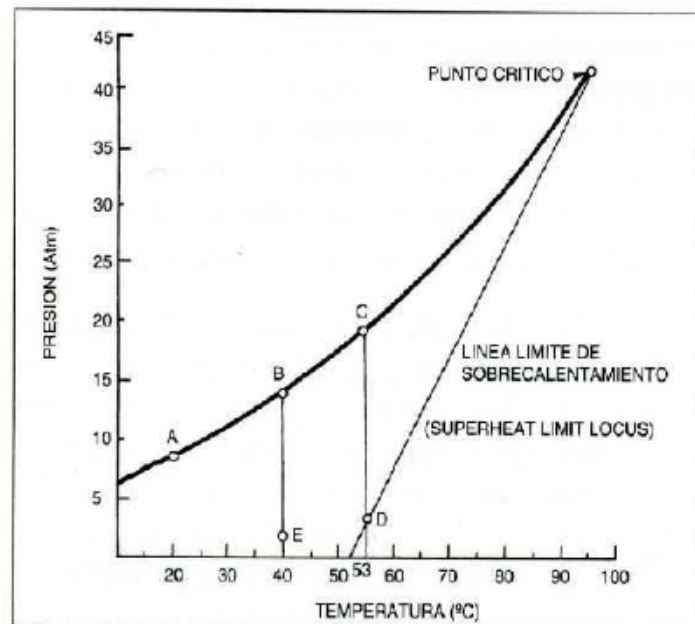
En el dibujo de la página siguiente está representada, por un lado, la curva de equilibrio del líquido/gas en función de la presión y la temperatura y, por otro, la gráfica que representa, sobre los mismos ejes de coordenadas, la línea límite donde es posible el “sobrecalentamiento” del líquido. Esta línea es tangente a la curva de equilibrio en el punto crítico y puede construirse para cada sustancia mediante ciertos cálculos matemáticos, que no son objeto de este tema.

La línea límite de sobrecalentamiento representa la divisoria hasta donde puede existir propano líquido sin que se produzca la nucleación espontánea ni, por tanto, la explosión BLEVE. A partir de dicha línea la nucleación tiene lugar instantánea y espontáneamente, con lo que la explosión BLEVE es posible.

Tomemos como ejemplo un depósito con propano licuado a temperatura ambiente (unos 20° C) Viendo la curva de equilibrio, habrá fase gas y fase líquido, en equilibrio, a una presión de unas 8 ó 9 atmósferas. Supongamos que las paredes de este depósito entran en contacto, accidentalmente, con un fuego o foco de calor; la temperatura aumentará y, por tanto, la presión. Imaginemos que llega a unos 40° C, situándose en las condiciones del punto B. Si en este momento, bien por impacto, o por fallo del material, se abre una grieta o agujero, la presión descenderá bruscamente según una línea vertical hasta alcanzar las condiciones del punto E. Pasados unos instantes ocurrirá una ebullición violenta del líquido, pero, como no se ha alcanzado la línea límite de sobrecalentamiento, no es previsible que se produzca una explosión BLEVE puesto que no habrá nucleación espontánea. Por supuesto que se vaporizará una gran cantidad de propano en pocos segundos que producirá efectos violentos e, incluso, puede rajarse el depósito y producir otros daños en el lugar, pero no habrá la temida explosión por la expansión del vapor. Si, por el contrario, no se produjera la ruptura del depósito -vaporización menos violenta- por el agujero o grieta saldría propano que, probablemente, si encuentra una chispa o llama entraría en ignición. Pero en ninguno de estos dos supuestos se habría producido una BLEVE.

Supongamos ahora, como segunda hipótesis, que el fallo del material ocurre en las condiciones del punto "C", es decir, a unos 55° C. Su rápida despresurización tendrá lugar por la línea vertical hasta una presión de unas 3,3 atmósferas, donde sí se producirá la nucleación espontánea al haber alcanzado la "Superheat Limit Locus", pudiendo entonces ocurrir una explosión BLEVE en una fracción de milisegundos. Aquí, más que abrirse el depósito, lo que se produce es un auténtico estallido del mismo, que se proyecta en pedazos de metralla, al vaporizarse súbitamente entre un tercio y la mitad del volumen del propano contenido (el propano líquido cuando se evapora genera unos 280 volúmenes de gas) Para los líquidos inflamables, la vaporización súbita en caso de BLEVE puede ser del orden de un 10%. Para los gases varía entre un 25% (gases criogénicos), y un 50% (gases no criogénicos).

La energía de esta explosión es función directa de la masa total del fluido que tuviera el depósito y de la diferencia de presión entre la presión de vapor del punto donde se halle en equilibrio en aquel momento y la correspondiente presión del punto de corte en la línea de sobrecalentamiento. Es curioso, pues, comprobar que la explosión BLEVE, para la misma masa, puede ser más violenta si el fallo del depósito tiene lugar a temperaturas y presiones bastante más bajas que las del punto crítico que en las proximidades de éste, aunque, paradójicamente, la energía acumulada cerca del punto crítico sea bastante mayor.



CURVA DE PRESIÓN DE VAPOR Y LÍNEA LÍMITE DE SOBRECALENTAMIENTO PARA EL PROPANO.

EFECTOS DE LA BLEVE

Al producirse una BLEVE en un recipiente, según el mecanismo expuesto en el apartado anterior, se originan los siguientes efectos inmediatos:

- ⇒ Sobrepresión.
- ⇒ Proyección de fragmentos debido a la rotura del recipiente.
- ⇒ Escape de producto al exterior.

Sobrepresión. Al producirse la desintegración del recipiente, el vapor existente en su interior se expande originando una onda de sobrepresión. Adicionalmente, el líquido que se encontraba presurizado dentro del recipiente, sufre una súbita vaporización, lo cual origina también una sobrepresión en el medio ambiente circundante.

Como se ha apuntado anteriormente, la importancia relativa de una y otra fuente de sobrepresión depende, entre otros factores, de la cantidad respectiva de vapor y líquido y de las condiciones de presión y temperatura previas a la rotura, así como del tipo de sustancia de que se trate.

Para nuestro propósito, baste indicar que el efecto de la sobrepresión sobre una estructura depende, básicamente, de su intensidad y duración, así como de las características de deformación plástica que dicha estructura presente. Curiosamente, el cuerpo humano es capaz de absorber niveles de sobrepresión notablemente superiores a los de estructuras típicas industriales o de viviendas. Así, se conocen casos de accidentes en los que personas situadas a distancias tan cortas como 30 metros del recipiente en que ocurrió una BLEVE, no sufrieron lesiones graves a pesar de resultar derribada por la onda de sobrepresión.

Proyección de fragmentos. Las consecuencias debidas a la proyección de los fragmentos originados en la rotura de un recipiente por efecto de una BLEVE, son muy difíciles de anticipar debido a las incertidumbres en el tamaño y, en consecuencia, a la cantidad de energía que la BLEVE puede transmitir a tales fragmentos.

Los casos históricos producidos muestran que fragmentos tan grandes como la mitad de un vagón-cisterna (aproximadamente 40.000 kg de peso en vacío), han sido lanzados a 460 m de distancia; otros lo suficientemente grandes para producir lesiones graves o mortales a una persona, han sido encontrados a distancias entre 1.000 y 2.500 m del lugar original.

Algunos investigadores recomiendan que cuando se prevee la ocurrencia de una BLEVE, todo el personal sea retirado a más de 600 m del lugar. La National Fire Protection Association (NFPA) recomienda que dicha distancia sea como mínimo de 750 metros. De cualquier forma, hay que destacar que accidentes ocurridos por BLEVEs, inducidas por incendio externo en recipientes, se han producido solamente a los 3 minutos de iniciarse el contacto de las llamas con el recipiente, haciendo imposible cualquier evacuación masiva en tan corto espacio de tiempo.

Escape de producto al exterior. Tras la rotura del recipiente, el producto contenido es liberado al exterior, pudiendo ocasionar diferentes efectos en función de su naturaleza química.

Así, si el producto es tóxico, el escape representará un elevado riesgo para las personas y el medio ambiente, en función de sus características y de las condiciones atmosféricas existentes. En el caso de que el producto sea inflamable, pueden producirse variados efectos en función de las circunstancias particulares en que se produce la BLEVE. Así, si se produce la ignición inmediata de la nube de vapor, se origina una "bola de fuego" de elevada intensidad de radiación térmica y muy corta duración. Si la ignición se difiere y la nube de vapor es más pesada que el aire, puede producirse una explosión. Cuando no se produce la ignición, la nube de vapor se dispersa en la atmósfera sin otros efectos. En el caso de productos inflamables, las BLEVEs inducidas por fuegos externos terminan, lógicamente, en "bolas de fuego", por cuanto inevitablemente, se produce su ignición inmediata.

El efecto de un incendio sobre los seres vivos y las estructuras expuestas depende fundamentalmente de la intensidad de la radiación térmica y del tiempo de exposición. Las consecuencias de la radiación térmica sobre personas y estructuras afectadas por una "bola de fuego" es más difícil de predecir que en el caso de un incendio de larga duración en un líquido. Ello es así, por cuanto el tamaño y localización de la "bola de fuego" cambia constantemente durante el corto tiempo en que se produce el fenómeno.

En accidentes ocurridos en vagones cisterna (80 metros cúbicos de capacidad) se han producido quemaduras de segundo grado en personas situadas hasta 300 m del vagón que ha sufrido la BLEVE.