



ESCUELA NAVAL "ARTURO PRAT"
DEPARTAMENTO DE EDUCACIÓN
CÁTEDRA DE QUÍMICA

INFORME PROYECTO ABP: ANÁLISIS DE CASO - EL ACCIDENTE DE BUNCEFIELD

Integrantes:

Francisco Angermayer

Benjamín Devoto

Constanza Silva

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se analizará científicamente el accidente del depósito de carburante "Buncefield" ocurrido en el Reino Unido en diciembre de 2005. Se estudiarán minuciosamente las circunstancias del incidente, el etiquetado de las mercancías peligrosas involucradas, las reacciones químicas de combustión y las fallas en los sistemas de contención hidráulica, relacionando las lecciones aprendidas directamente con las competencias de la asignatura.

DESARROLLO DEL TRABAJO

a) Descripción Detallada del Caso, Cronología, Lugar y Circunstancias Fisicomecánicas

El desastre industrial de la terminal de almacenamiento de Buncefield se inició formalmente durante la noche del sábado 10 de diciembre de 2005 y culminó con una detonación masiva el domingo 11 de diciembre de 2005 a las 06:01:32 horas (UTC). El escenario del incidente fue la terminal de almacenamiento de combustible de Buncefield, situada en Hemel Hempstead, Hertfordshire, Reino Unido, un emplazamiento estratégico encargado de la distribución de cerca del 8% de los combustibles líquidos del país, operado por consorcios como Hertfordshire Oil Storage Ltd (HOSL), Texaco, Total SA y British Petroleum (BP).

Las circunstancias de la catástrofe se desencadenaron en el Tanque 912 (T912), una estructura vertical de acero de gran capacidad dedicada al acopio de gasolina sin plomo de alta volatilidad. El tanque se encontraba recibiendo combustible proveniente de una refinería costera a través de un oleoducto subterráneo de alta presión, manteniendo un régimen de bombeo constante de 550 m³/h. A partir de las 03:00 am, el servomecanismo del medidor de nivel mecánico principal (un sistema de flotador computarizado) sufrió un agarrotamiento físico, bloqueando la lectura en un valor fijo e invariable en las pantallas de la sala de control. De manera simultánea, el interruptor independiente de alarma de muy alto nivel (High-High Level Switch - HHLS), diseñado de forma redundante para enviar una señal electromecánica que cerrara las válvulas de admisión neumáticas de

emergencia (Emergency Shutdown Valves - ESDV), falló críticamente debido a la falta de calibración técnica y un mantenimiento preventivo deficiente.

Al no existir alertas en la consola del operador, el bombeo ininterrumpido provocó que a las 05:20 am el combustible colmara el volumen geométrico útil del Tanque 912. La gasolina comenzó a desbordarse libremente a través de los respiraderos y ranuras de ventilación periféricas situados en la parte superior del techo flotante, precipitándose en caída libre desde una altura aproximada de 15 metros. Este fenómeno de caída libre generó un severo impacto mecánico contra la infraestructura inferior, desencadenando la atomización inmediata del hidrocarburo líquido. La fragmentación mecánica fragmentó la corriente líquida en miles de millones de microgotas (aerosoles), expandiendo de forma exponencial la superficie de transferencia de masa expuesta a la atmósfera. Debido a las condiciones meteorológicas de la madrugada —caracterizadas por una estabilidad atmosférica absoluta, ausencia de vientos significativos y una humedad relativa del aire extremadamente elevada—, las microgotas se evaporaron instantáneamente, saturando el aire circundante. Esto dio origen a una densa y visible nube de vapor inflamable de baja altura (aproximadamente 1 metro de espesor a ras de suelo), la cual superó la barrera del dique de contención secundario.

En los análisis periciales e ingenieriles posteriores al incidente, se evaluaron e integraron minuciosamente las variables de esfuerzo físico que afectaron a los tanques adyacentes antes y durante el colapso. Entre estas variables destacaron la acción de fuerzas aerodinámicas transitorias provocadas por vientos locales, la generación de presiones diferenciales severas asociadas a vacíos interiores (fenómeno de implosión por consumo rápido de oxígeno u enfriamiento térmico abrupto) y el descenso mecánico originado por el asentamiento diferencial de la base de las fundaciones de los tanques, factores que debilitaron la integridad estructural de la planta HOSL antes de la ignición final. A las 06:01 am, la nube de vapor, que se había desplazado hacia el sector oeste de las instalaciones, entró en contacto con un foco de ignición de origen eléctrico (probablemente el motor de un generador o el sistema de conmutación de una bomba de descarga), lo que desató una violenta Explosión de Vapor en Espacio Abierto (VCE)

que registró una magnitud de 2.4 en la escala de Richter y destruyó gran parte de la terminal.

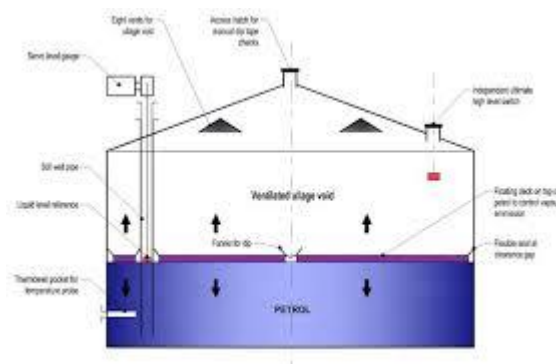


Figura 1: Diagrama de flujo u organigrama de la Terminal de Buncefield mostrando el sobrellenado del tanque 912 y la formación de la nube de vapor.

b) Etiquetado, Embalaje y Clasificación Internacional de la Mercancía Peligrosa

De acuerdo con las normativas internacionales vigentes para el transporte y almacenamiento de sustancias químicas estipuladas por la Organización Marítima Internacional (OMI), el Comité de Expertos de las Naciones Unidas y el Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (Código IMDG), la sustancia involucrada posee las siguientes especificaciones técnicas de seguridad:

Nombre Técnico de Embarque: Gasolina / Combustible para motores de encendido por chispa.

Número de Identificación de las Naciones Unidas: UN 1203.

Clasificación de Riesgo Principal: Clase 3: Líquidos Inflamables. Esta clase química agrupa a todos los fluidos líquidos, mezclas de líquidos o líquidos que contienen materias sólidas en solución o suspensión, capaces de emitir vapores inflamables a temperaturas iguales o inferiores a los 60°C en ensayos de copa cerrada.

Grupo de Embalaje / Envase: Grupo de Embalaje II (GE II). De acuerdo con los criterios del Código IMDG, este grupo denota una peligrosidad media. Se asigna a sustancias inflamables que presentan un punto de ebullición inicial estrictamente superior a los 35°C y un punto de inflamación (flash point) inferior a los 23°C. La gasolina automotriz de Buncefield poseía un punto de inflamación típico de aproximadamente 43°C, lo que ratifica su extrema volatilidad operacional.

Sistemas de Etiquetado y Rotulación: Las paredes exteriores de las unidades portuarias, camiones cisterna y los accesos a los tanques de almacenamiento debían exhibir de forma obligatoria los siguientes pictogramas normalizados:

Placa de Clase 3: Un rombo de seguridad con fondo de color rojo sólido. En la parte superior, el símbolo universal de una llama (en color blanco o negro) y, en el vértice inferior, el número de la clase de riesgo 3.

Panel de Identificación de Peligro (Código de Riesgo): Un rectángulo de color naranja con bordes negros. En la fila superior se exhibe el número de identificación de riesgo 33, el cual denota técnicamente un "líquido muy inflamable" (punto de inflamación inferior a 21°C. En la fila inferior, se inscribe el número de las Naciones Unidas 1203.



Figura 2: Rombo de seguridad internacional para la Clase 3 (Líquidos Inflamables) y el panel naranja ONU 1203.

c) Causalidad Científica, Termodinámica y Cinética de las Reacciones Químicas

El accidente se explica por una falla en los depósitos de almacenamiento que derivó en el rebalse del líquido. Químicamente, el suceso obedece a las propiedades de los hidrocarburos refinados del petróleo. La gasolina es una mezcla de alcanos (como el octano y hexano) que se caracteriza por una alta volatilidad, elevada presión de vapor y un punto de inflamación muy bajo. Al caer el líquido y dispersarse, las fracciones más ligeras se vaporiza instantáneamente.

Al mezclarse con el oxígeno del aire en proporciones dentro de sus límites de inflamabilidad (LII y LSI), se conformó una Atmósfera Explosiva, así lo señala Carlos E. Rumbio (2001) Las explosiones que se consideran de este tipo, son las denominadas explosiones de nubes de vapor no confinadas, traducción de la expresión inglesa Unconfined Vapour Cloud Explosion, y de ahí su acrónimo UVCE. La reacción química principal fue una combustión exotérmica que, al alcanzar la energía de activación (flash point), desencadenó una liberación violenta de gases y calor.

La rápida expansión de los productos de esta reacción exotérmica generó la onda expansiva que destruyó el recinto.

La causa raíz de la magnitud del desastre radica en las propiedades fisicoquímicas de los hidrocarburos refinados. La gasolina no es una molécula pura, sino una solución compleja de hidrocarburos alifáticos, ramificados y aromáticos cuyas cadenas moleculares oscilan mayoritariamente entre 4 y 12 átomos de carbono. Durante el proceso de desborde y atomización en el sector oeste de HOSL, se produjo la evaporación preferencial y masiva de las fracciones ligeras y altamente volátiles de la mezcla. Estos componentes corresponden a los alcanos menores de baja masa molecular, identificados mediante sus fórmulas químicas estructurales exactas:

Butano: C_4H_{10}

Pentano: C₅H₁₂

Hexano: C₆H₁₄

Heptano: C₇H₁₆

Estos gases presentan una presión de vapor muy elevada y una densidad relativa de vapor situada entre 3.0 y 4.0 (tomando la densidad del aire seco como 1.0). Debido a que estos vapores son significativamente más pesados que el aire, las fuerzas gravitacionales impidieron su dispersión o convección vertical hacia las capas altas de la atmósfera. Por el contrario, los gases se asentaron a nivel de suelo, fluyendo horizontalmente y adaptándose a la topografía del terreno, lo que favoreció la acumulación de una mezcla aire-combustible homogénea de gran extensión.

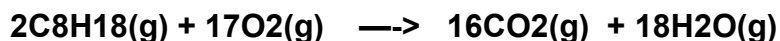
Cuando la concentración volumétrica de estos vapores en el aire alcanzó el rango estequiométrico crítico —delimitado por el Límite Inferior de Inflamabilidad (LII ≈ 1.4%) y el Límite Superior de Inflamabilidad (LSI ≈ 7.6%)—, la introducción de una chispa aportó la energía de activación mínima necesaria para romper los enlaces covalentes e iniciar una reacción en cadena por radicales libres.

Para los análisis analíticos y los balances de masa de la asignatura, se emplea formalmente el isooctano (C₈H₁₈) de manera exclusiva como el modelo estequiométrico representativo de la gasolina. La reacción química de combustión completa, altamente exotérmica, se fundamenta en la oxidación total de los átomos de carbono e hidrógeno, expresada en la siguiente ecuación termoquímica balanceada:



Donde el cambio de entalpía estándar de combustión (ΔH) es de aproximadamente -5,460 kJ/mol. Esta inmensa liberación de energía térmica elevó de forma instantánea la temperatura de los gases circundantes a más de 1,500°C, provocando una expansión volumétrica violenta que generó la onda de choque sobrepresiva.

No obstante, las investigaciones forenses demostraron que debido a la alta densidad de la nube y a las restricciones locales en el suministro y difusión de oxígeno gaseoso (O₂) hacia el núcleo central del vapor acumulado, coexistió de forma paralela una cinética de combustión incompleta. Esta reacción se caracteriza por una oxidación parcial del carbono, liberando subproductos de alta toxicidad molecular como el monóxido de carbono (CO), según la siguiente ecuación balanceada:



La velocidad de propagación de la llama se aceleró drásticamente al interactuar con la alta congestión de estructuras, soportes de tuberías y árboles perimetrales de la terminal, actuando como un fenómeno de turbulencia mecánica que transformó una deflagración simple en una detonación de alta destrucción física.



Figura 3: Gráfico o ecuación representativa del triángulo del fuego y la reacción de combustión exotérmica de un hidrocarburo.

d) Propuesta Detallada de Procedimientos de Ingeniería y Medidas de Mitigación

Con el propósito de mitigar de manera absoluta la ocurrencia de incidentes por sobrellenado y confinamiento ineficaz de sustancias inflamables de la Clase 3, se proponen los siguientes procedimientos operacionales y tecnológicos:

Implementación de Sistemas de Seguridad Instrumentados (SIS) con Independencia Lógica: Todo tanque de almacenamiento de hidrocarburos de la Clase 3 debe contar con un lazo de seguridad automatizado certificado bajo estándares internacionales de seguridad funcional (normas IEC 61508 / IEC 61511), con un nivel de integridad de seguridad SIL 2 o SIL 3. Este sistema debe constar de sensores de nivel redundantes con tecnologías físicas distintas (por ejemplo, un sensor ultrasónico continuo y un interruptor de horquilla vibratoria para muy alto nivel). Estos dispositivos deben operar de forma 100% independiente de las computadoras de control de procesos diarios de la planta y deben estar programados para accionar directamente, mediante pérdida de energía eléctrica o neumática de seguridad (fail-safe), válvulas de corte de emergencia automáticas (Emergency Shutdown Valves - ESDV) instaladas en la línea de llenado del tanque, interrumpiendo el flujo de inmediato sin requerir la toma de decisiones humana.

Aseguramiento del Desempeño Hidráulico Total de los Diques de Contención Secundarios: Los cubetos o diques de contención perimetral no deben ser evaluados únicamente bajo criterios de resistencia mecánica estructural, sino bajo parámetros estrictos de desempeño hidráulico total. El hormigón armado empleado debe ser tratado con recubrimientos epóxicos y elastoméricos impermeabilizantes de alta densidad para anular la porosidad intrínseca del concreto. Las juntas de dilatación estructural deben sellarse con perfiles poliméricos resistentes a hidrocarburos y altas temperaturas. Asimismo, los agujeros o pasadas de tuberías a través de los muros del dique deben sellarse de forma hermética utilizando prensaestopas mecánicos y compuestos sellantes cortafuego de grado industrial que eviten que el material se consuma ante el fuego directo, impidiendo la migración de fluidos contaminantes hacia el exterior.

Sistemas Automatizados de Supresión y Dilución de Vapores Inflamables: Instalar un sistema de monitoreo perimetral de atmósferas explosivas compuesto por detectores ópticos fijos por infrarrojos distribuidos a baja altura. Al detectar concentraciones equivalentes al 10% del LII, el sistema activará de manera automática un sistema de cortinas de agua nebulizada de alta presión fija y la inyección de espuma de baja expansión sobre el cubeto, diluyendo la concentración de los gases inflamables y reduciendo la tasa de evaporación superficial.



Figura 4: Fractura del muro de hormigón de un dique de contención (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006).



Figura 5: Agujeros en un dique de contención de hormigón para el paso de tuberías. El material sellante se había consumido (Buncefield Major Incident Investigation Board, 2006).

e) Lecciones Aprendidas de la Catástrofe de Buncefield

El análisis multidisciplinario del accidente de Buncefield generó transformaciones obligatorias en la gestión mundial del riesgo tecnológico:

Lección 1: Primacía del Desempeño Hidráulico ante la Porosidad Estructural. La contención secundaria y terciaria de la terminal falló de forma masiva debido a que los diques de hormigón sufrieron filtraciones directas causadas por la porosidad del concreto y el colapso térmico de los sellados defectuosos en las juntas y agujeros de paso de tuberías en la zona oeste de HOSL. Esto demostró que las estructuras de contención deben ser ensayadas periódicamente bajo pruebas de estanqueidad hidráulica líquida absoluta, impidiendo que los hidrocarburos insolubles y las espumas químicas contaminen el subsuelo.

Lección 2: Ineficiencia de la Fiscalización y Control Manual. La asignación de la seguridad crítica a la interpretación y reacción de los operadores humanos ante fallas instrumentales es un factor de alto riesgo. Los lazos de parada de emergencia deben ser automáticos, prioritarios y blindados contra errores de diagnóstico de la consola central.

Lección 3: Relevancia Obligatoria del Ordenamiento Territorial y Portuario. El planeamiento de la infraestructura urbana y portuaria debe imponer de manera estricta zonas de exclusión y distancias de amortiguación física entre las terminales de mercancías peligrosas y los centros poblados o de servicios, garantizando que los efectos destructivos de las ondas de sobrepresión o la radiación térmica de incendios de larga duración no alcancen ni causen daños colaterales a terceras personas.

CONCLUSIÓN

El análisis técnico del accidente de Buncefield ratifica la relevancia crítica de aplicar los principios de seguridad, segregación y control de mercancías peligrosas clase 3 en instalaciones de almacenamiento masivo. El desastre evidenció que las fallas instrumentales combinadas con la pérdida de capacidad hidráulica de los diques de hormigón por porosidad y sellados defectuosos, pueden transformar un derrame operacional en una catástrofe ambiental y estructural de gran magnitud. Como futuros

Oficiales del Litoral, la comprensión de estos fenómenos fisicoquímicos y normativos resulta imperativa para liderar procesos estrictos de fiscalización portuaria y costera, garantizando la preservación del medio ambiente acuático y la vida humana.

REFLEXIONES FINALES

Desarrollar este proyecto de Aprendizaje Basado en proyectos (ABP) sobre el accidente de Buncefield ha significado mucho más que cumplir con una tarea académica o memorizar ecuaciones de la asignatura; ha constituido un ejercicio profundo de análisis y una inmersión directa en la realidad de la gestión del riesgo tecnológico. Al reconstruir los eventos de diciembre de 2005, nos enfrentamos al desafío de asimilar cómo un cúmulo de negligencias operacionales (aparentemente menores y aisladas) pueden alinearse de forma catastrófica bajo las leyes de la física y la química, destruyendo por completo una infraestructura estratégica.

Desde el punto de vista investigativo, lo más complejo y a la vez enriquecedor fue desglosar la dinámica de la nube de vapor. Comprender que la gasolina automotriz (UN 1203) no debe visualizarse simplemente como un líquido inflamable de clase 3, sino como una matriz compleja de hidrocarburos volátiles, cambió nuestra perspectiva. Analizar cómo la caída del combustible desde una altura de 15 metros provocó una atomización mecánica instantánea, fragmentando el fluido en aerosoles, nos permitió conectar la teoría de la transferencia de masa en un desastre real. Fue impactante modelar matemáticamente que los vapores de los alcanos menores (como el butano, pentano, hexano y heptano) poseen una densidad relativa de 3 a 4 veces superior a la del aire. Esta propiedad química explica de forma lógica por qué los gases no se disiparon verticalmente, sino que se arrastraron a ras de suelo en el sector oeste de las instalaciones de HOSL, desafiando las barreras físicas convencionales en una madrugada de calma atmosférica.

En el plano de la prevención, el caso nos dejó una lección contundente: la contención estructural es inútil si carece de desempeño hidráulico líquido total. Descubrir en los informes periciales que los diques de hormigón armado fallaron masivamente debido a

la porosidad intrínseca del concreto y al colapso térmico de los sellados en las juntas y pasadas de tuberías, nos hizo cuestionar los estándares de fiscalización actuales. El verdadero desastre de Buncefield no terminó cuando se apagaron las llamas; continuó de manera silenciosa en el subsuelo, donde hidrocarburos insolubles y compuestos tensoactivos de las espumas de extinción contaminaron de forma irreversible los mantos acuíferos subterráneos de Hertfordshire.

Esta investigación nos deja una profunda reflexión sobre nuestro futuro rol profesional en la Armada de Chile. Como futuro Oficial del Litoral, la responsabilidad de fiscalizar terminales marítimas, muelles de carga, plantas de almacenamiento costeras y en embarcaciones, no puede ser un trámite administrativo superficial. Hemos aprendido que la seguridad crítica debe descansar en Sistemas de Seguridad Instrumentados (SIS) con certificación SIL 2 o SIL 3 que posean lazos lógicos y automatizados independientes de la intervención humana. Ante una falla de control de procesos, los sistemas deben actuar de forma autónoma bloqueando las válvulas de corte de emergencia (ESDV).

Asimismo, este ABP nos demostró la importancia mandatoria del ordenamiento territorial y portuario. Imponer zonas de exclusión estrictas y distancias de amortiguación física respecto a los centros urbanos es la única barrera definitiva para salvaguardar la vida humana ante las proyecciones destructivas de una onda de sobrepresión (VCE) o la radiación térmica de un incendio de proporciones históricas. Este trabajo ha moldeado nuestro criterio técnico y ético, entregándonos las herramientas científicas necesarias para liderar con rigor la protección de la vida humana en el mar, la seguridad de las operaciones portuarias y la preservación del medio ambiente acuático nacional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, J. B., & Godoy, L. A. (2009). Investigación de causas de explosiones en plantas petrolíferas: El accidente de Buncefield. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 9(1-2), 187-200.

Buncefield Major Incident Investigation Board (2006). The Buncefield Incident 11 December 2005: Final Report of the Major Incident Investigation Board. MIIB, UK.

Cátedra de Química Aplicada (2026). Apuntes de Clases: Los Elementos, Mercancías y Cargas Peligrosas. Escuela Naval "Arturo Prat", Chile.

Grupo GUIAR - Universidad de Zaragoza (s.f). Explosiones de vapor no confinadas (UVCE). Recuperado de https://guiar.unizar.es/1/Accident/An_conse/UVCE.htm