

Il BLEVE del Borgo.

Nota dell'autore

Scopo del presente testo non è quello di dare una risposta agli interrogativi che si sono affacciati fin dai primi momenti, ma soltanto quello di dare un contributo alla maggiore comprensione del fenomeno.

I modelli matematici illustrati sono semplificati e consentono un dimensionamento “di massima” degli effetti misurati.

Lo stile scelto è quello del racconto.

Il fatto.

Stavolta è successo, è reale.

Uno scenario da film catastrofico: una autocisterna carica di GPL che impatta, ad una velocità assurda, un camion incolonnato che trasporta solventi in contenitori di polietilene.

L'urto è devastante, l'incendio immediato. Come non bastasse, l'incidente avviene in un raccordo che collega le due autostrade forse più trafficate del Paese, un raccordo che corre affiancato a quella che è conosciuta come la tangenziale, ma che in realtà, lì, è una secante: un nastro di asfalto largo 70 metri che incontra pezzi di città, a destra come a sinistra.

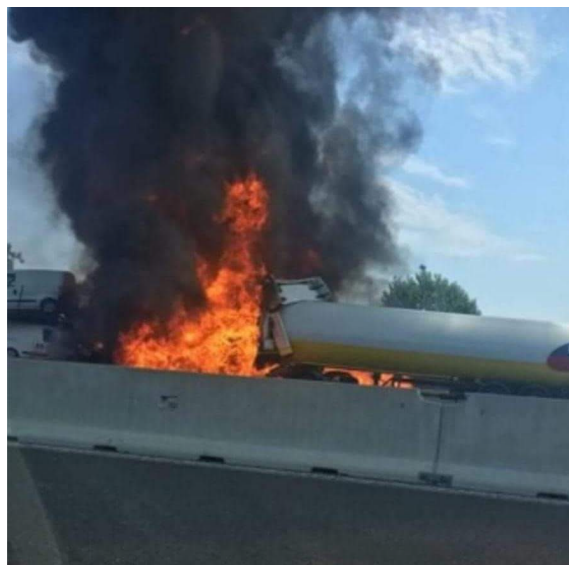


Figura 1 – L'evento iniziatore.

L'evento iniziatore porta ad un rilascio di energia possente, ad un fenomeno conosciuto, studiato e riprodotto ma che mai, prima d'ora, era stato così manifesto e documentato.

In una manciata di minuti, a tempo di record, il violento incendio porta la cisterna al collasso, liberando istantaneamente il gas liquefatto in essa contenuto.

L'esplosione è catastrofica, danneggia gli edifici circostanti fino ad una distanza di 200 metri e spezza le travi del ponte autostradale sul quale l'autocisterna si trova, le travi e l'impalcato si schiantano sulla strada sottostante.

La strage, prevedibile, è solo sfiorata perché è agosto, i lavoratori delle aziende che si affacciano sull'autostrada e che non sono chiuse per ferie, sono in pausa pranzo e comunque fuori fa troppo caldo per andarsene in giro.

I pochi minuti che passano, dal momento dell'incidente allo scoppio sono, seppur un tempo brevissimo, comunque sufficiente a sciogliere l'incolonnamento che aveva causato il violento tamponamento; il denso fumo nero che inizialmente sale in colonna e si rende visibile in tutta la città, improvvisamente si abbassa sul manto stradale e inibisce quel traffico che, imprudentemente, nonostante la gravità della situazione, continuava a fluire, alimentato dalle molteplici direttrici del traffico.

Le persone presenti sul ponte a livello dell'incidente si allontanano, quel tanto che risulterà loro bastare per sopravvivere, quelle accorse nelle strade del quartiere sottostante, non essendo disturbate dal fumo, invece, si avvicinano. Le salverà la dinamica ascendente dell'evento: la sfera di fuoco che si produce sulla strada sopraelevata, si solleva in una manciata di secondi allontanandosi da loro. Il feroce calore prodotto dall'irraggiamento decresce istantaneamente, un attimo prima di provocare ulteriori vittime.

I soccorritori non fanno in tempo a raggiungere il luogo del sinistro prima che l'autocisterna esploda e questo, forse, li salva.

Il quartiere, già famoso per aver dato il nome alle moto più belle, lì prodotte, sarà ricordato per quanto successo il 6 agosto 2018.

Il BLEVE del Borgo.

L'esplosione può essere definita come un rilascio di energia in un intervallo di tempo sufficientemente breve, tale da generare un'onda di pressione di entità definita, che si allontana dal punto di rilascio.

Quanto più è rapido il rilascio di energia, tanto più è violenta l'esplosione.

Ci sono vari modi per classificare le esplosioni, uno di questi è in base alla loro natura.

Le esplosioni possono essere dunque di tipo:

- chimico (caratterizzate da una combustione molto rapida);
- fisico (a seguito di una espansione molto rapida di un gas).

Quanto avviene nel quartiere di Borgo Panigale è una semplice esplosione fisica, il cedimento meccanico di un contenitore sotto pressione che viene fortemente surriscaldato in modo accidentale; nessuna reazione chimica esotermica fuggitiva fuori controllo (runaway), nessun rilascio di gas o di sostanze volatili contenute nei reagenti, nessuna espansione violenta dell'azoto a causa del calore di reazione, niente di tutto questo, soltanto una grande pentola a pressione, fortemente danneggiata, messa sul fuoco, un fuoco che però, stavolta, è troppo potente.

Lo schema logico di Figura 2 può essere visto come un albero degli eventi qualitativo che, a partire dal TOP EVENT, ovvero il crash dell'autocisterna, conduce, nell'impossibilità di attuare interventi mitigativi, alle possibili drammatiche evoluzioni dello scenario incidentale.

Le esplosioni fisiche sono caratteristiche di contenitori di gas che, riscaldati, cedono meccanicamente a seguito di una elevata sovrappressione interna.

Se all'interno del contenitore è presente un gas compresso, come può essere il caso del metano, si verifica quella che viene definita una pressur vapour explosion (esplosione di vapore sotto pressione), se invece è presente anche la fase liquida del gas, come nel caso del GPL, può verificarsi, come è successo al Borgo, il BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion), ovvero l'esplosione del vapore sviluppato dall'ebollizione del liquido.

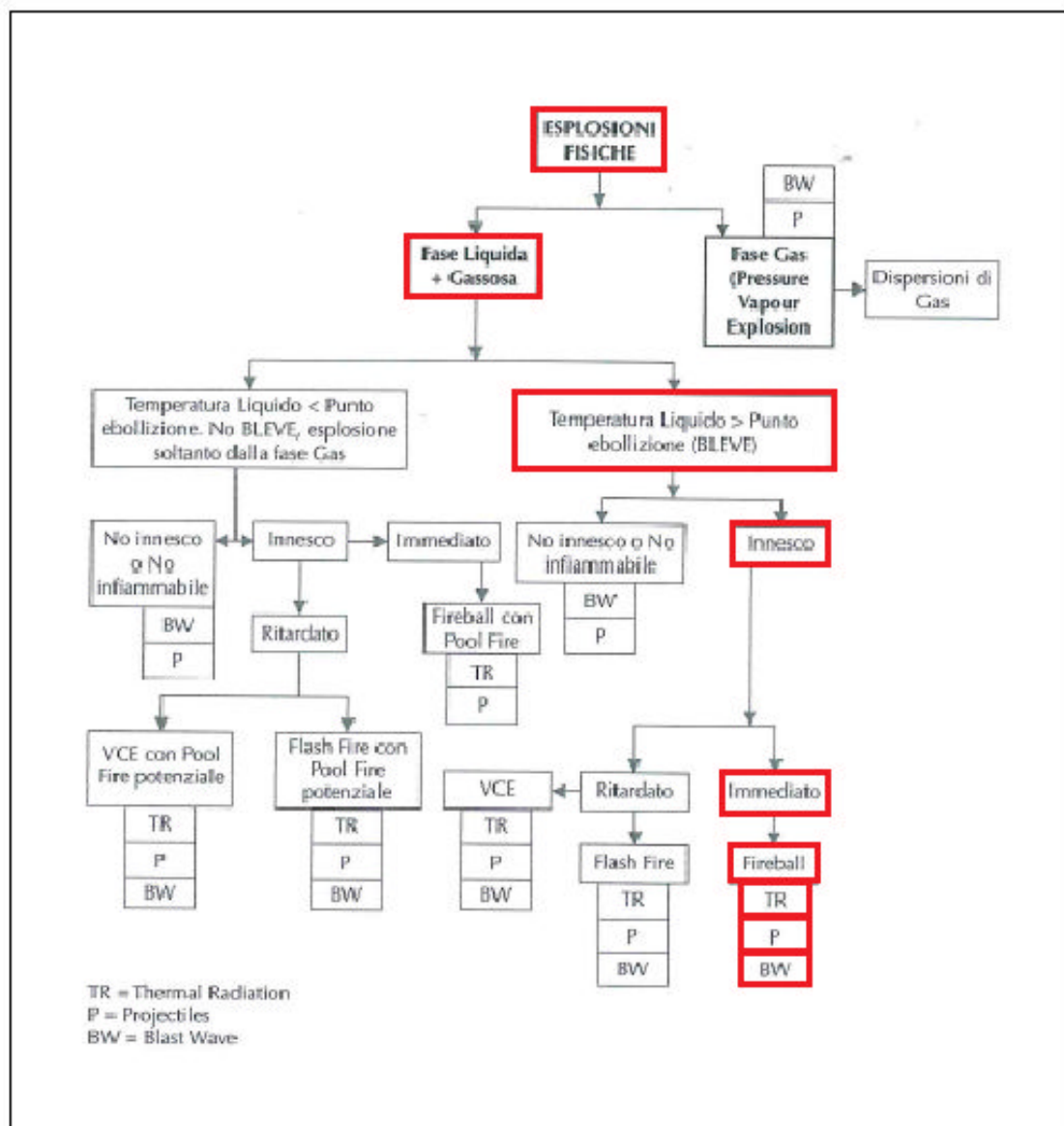


Figura 2 - Diagramma logico per le esplosioni fisiche.

Il BLEVE avviene quando il serbatoio a seguito del surriscaldamento (in questo caso si è verificato anche un violento urto meccanico) cede e si fessura, il vapore contenuto fuoriesce molto rapidamente e porta istantaneamente il liquido sottostante a pressione ambiente; il liquido si trova così in una condizione di non equilibrio e di elevato surriscaldamento, quindi evapora in modo istantaneo; l'evaporazione è così violenta (solitamente indicata con l'acronimo RPT, Rapid Phase Transition) che il vapore formato non riesce a sfogare attraverso la fessura e pressurizza nuovamente il serbatoio, provocandone l'esplosione.

Nel BLEVE del Borgo, il riscaldamento del serbatoio ha provocato un aumento della temperatura della parete dello stesso, probabilmente in modo più marcato nella zona a contatto con il vapore dove lo scambio termico con il fluido interno è meno efficace rispetto alla zona a contatto con il liquido.

L'elevata temperatura raggiunta dall'acciaio della cisterna, unitamente al gradiente termico delle pareti a contatto con il liquido e con il vapore e le relative tensioni generate, potrebbero aver portato al cedimento del serbatoio a pressioni anche inferiori a quella di esercizio.

Lo stress termico e meccanico subito dall'autocisterna (gli acciai dei serbatoi di GPL possono cedere a pressioni comprese tra 15 e 20 bar se le pareti sono portate a temperature prossime ai 700°C) ha dunque portato alla rapida evoluzione dell'evento.

Le condizioni affinché si possa verificare il BLEVE sono quindi ben definite:

- il contenitore deve rompersi con uno squarcio sufficientemente ampio;
- il liquido deve essere portato rapidamente (ad esempio a seguito di pool fire, incendio da pozza, o di jet fire, fiamme da getto turbolento, o di flash fire, incendio di nube di gas o di vapori infiammabili) in condizioni di non equilibrio, caratterizzate da una temperatura superiore alla sua temperatura di ebollizione a pressione atmosferica. La rapidità dell'operazione è una condizione necessaria affinché il liquido evapori immediatamente, riportandosi nelle condizioni di equilibrio in modo pressoché istantaneo, cioè nei tempi caratteristici molto brevi, necessari per generare un'esplosione;
- il surriscaldamento deve essere sufficiente, cioè la temperatura deve essere superiore al valore limite per l'innesco della nucleazione omogenea.

La nucleazione omogenea, ovvero la formazione di bolle diffuse all'interno del liquido in assenza di centri di nucleazione, che vengono solitamente forniti dalle asperità presenti sulle pareti del recipiente, può avere luogo solo se il liquido è sufficientemente surriscaldato. Non è quindi sufficiente che la temperatura del liquido sia superiore alla sua temperatura di ebollizione normale, ma deve anche essere superiore a un altro valore limite caratteristico di ciascun composto. Il valore della temperatura critica per l'innesco della nucleazione omogenea per il propano puro è di circa 58°C,

mentre affinché si verifichi la rottura è necessario che la temperatura del GPL all'interno del serbatoio sia superiore a 53°C (con pressioni maggiori di 16,5 bar).

La nucleazione omogenea accelera ulteriormente il fenomeno del *flash*, ovvero l'evaporazione sostanzialmente immediata di una parte del liquido a seguito di una rapida depressurizzazione, in modo da generare un'onda d'urto di notevole intensità.

Con riferimento alla figura 3 si consideri un fluido, contenuto in un recipiente alla temperatura ambiente, T_A , che si trovi nel punto 1 sulla curva della tensione di vapore. Il liquido è in equilibrio con il suo vapore, alla pressione P_V , che è pari alla tensione di vapore del GPL alla temperatura T_A .

Un riscaldamento del serbatoio porterà le condizioni del liquido nel punto 2, sulla curva della tensione di vapore, sempre in equilibrio con il suo vapore.

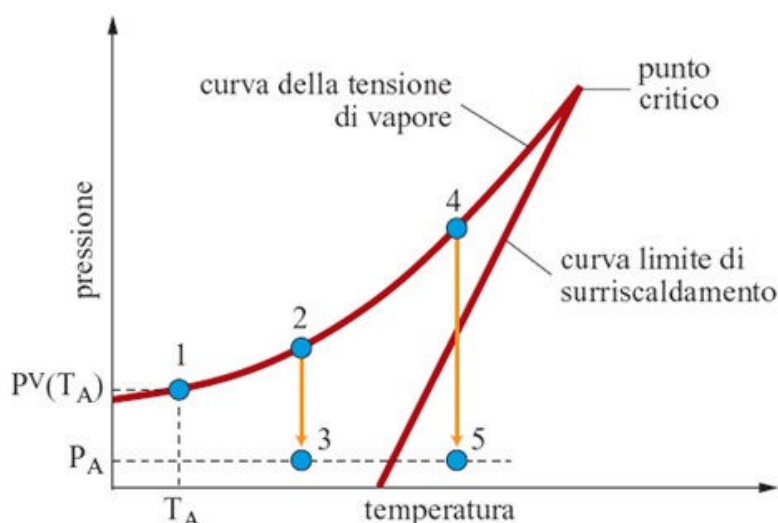


Figura 3 - Curve della tensione di vapore e del surriscaldamento limite per la nucleazione omogenea.

Se a questa pressione il contenitore cede, la pressione crolla istantaneamente al valore atmosferico P_A , individuato dal punto 3. Il liquido si verrà a trovare in condizioni di non equilibrio, in quanto la sua temperatura è superiore a quella di ebollizione normale, e quindi evaporerà rapidamente (*flash*). Non si innescherà tuttavia il fenomeno della nucleazione omogenea in quanto il surriscaldamento del liquido non è sufficiente. Se invece il collasso del

serbatoio avviene quando la temperatura (e di conseguenza la pressione) del liquido è arrivata al punto 4, la brusca depressurizzazione porterà il liquido nelle condizioni caratteristiche del punto 5, oltre la curva limite del surriscaldamento, dunque oltre il confine del BLEVE.

Se il recipiente non collassa completamente ma, come avviene più comunemente, semplicemente si fessura, la conseguente rapida depressurizzazione e l'estrema rapidità dell'evaporazione non consente al vapore formatosi di scaricarsi, il recipiente pressurizza ulteriormente e collassa in modo catastrofico proiettando frammenti nell'ambiente circostante.



Figura 4 – Attimo dell'innescò del BLEVE.

Non tutta l'energia rilasciata dal sistema finisce per generare l'onda d'urto. Una parte consistente di questa energia viene dispersa da diversi fenomeni, quali la deformazione plastica del serbatoio o l'energia cinetica conferita ai frammenti del recipiente.

Come stima di massima, si può definire che:

- circa il 30% dell'energia presente nel gas compresso generi l'onda d'urto;
- circa il 40% fornisca l'energia cinetica ai frammenti che possono quindi essere proiettati a distanze considerevoli,
- il rimanente 30% viene dissipato.

Se il BLEVE è generato da un gas liquefatto non infiammabile, come può avvenire ad esempio per i refrigeranti, non si ha l'innesco dei vapori, quindi non si registrano radiazioni termiche, il fenomeno si esaurisce con la generazione di un'onda di pressione (blast wave) e con la proiezione di frammenti (projectiles).

Nel caso specifico del GPL, in caso di innesco immediato, come avvenuto al Borgo, il BLEVE è seguito da un fireball. Il volume sferico di gas vaporizzato istantaneamente per flash, a seguito del cedimento strutturale del serbatoio, si incendia, mentre l'intera massa si solleva per effetto della riduzione di densità indotta dal surriscaldamento.

Il Fireball (sfera di fuoco).



Figura 5 - Il Fireball

Le riprese e le immagini dell'evento di Borgo Panigale sono da manuale: alla prima esplosione, avvenuta sul ponte autostradale e dalla caratteristica forma sferica, in grado di proiettare frammenti pesanti dell'autocisterna fino a 200 metri dall'evento, segue un incendio che sale verso il cielo con forma di fungo.

La nube ha una elevatissima concentrazione di gas e brucia solo nella cortecchia, dove il GPL viene a contatto con l'aria. L'irraggiamento è formidabile, l'evoluzione del fenomeno inarrestabile.

Se l'innesco fosse stato ritardato si sarebbe potuto verificare un flash fire (per quantitativi di gas modesti con effetti di sovrappressione trascurabili) oppure, per quantitativi di gas significativi, una esplosione della nube premiscelata di gas in aria detta VCE (vapour cloud explosion), con ulteriori rilevanti effetti di sovrappressione.

In generale, la successiva formazione di un fireball ha conseguenze più gravi sulle persone rispetto a quelle del BLEVE.

La modellizzazione degli effetti di una sfera di fuoco segue solitamente i seguenti passi sequenziali:

1. determinazione del diametro della sfera di fuoco;
2. determinazione della durata dell'incendio;
3. determinazione dell'innalzamento della sfera di fuoco;
4. calcolo dell'irraggiamento;
5. determinazione degli effetti sulle persone esposte.

In primo luogo si determina la geometria della fiamma e poi si calcola l'irraggiamento su un dato bersaglio.

Sono disponibili diversi modelli, tutti di origine empirica, che forniscono la geometria del fireball e delle linee guida per la stima dell'irraggiamento sulla base della quantità di combustibile coinvolta nel fenomeno; tali modelli, potranno ora essere perfezionati confrontandone gli esiti con gli effetti rilevati. Le equazioni proposte sono le seguenti:

$$D_{\max} = 6,48 \cdot M^{0,325}$$

$$t = 0,582 \cdot M^{0,26}$$

$$H = 0,75 \cdot D_{\max}$$

dove:

$D_{\max}$ = diametro massimo del fireball (m);

M = massa di infiammabile coinvolta (kg);

t = durata del fireball (s);

H = altezza del centro del fireball rispetto al punto di rilascio (m).

Supponendo che a Borgo Panigale la massa coinvolta di GPL sia stata pari a 25.000 kg, la geometria della sfera di fuoco può essere determinata come segue:

$$\begin{aligned} D_{\max} &= 174,14 \text{ m;} \\ t &= 8,10 \text{ s;} \\ H &= 130,61 \text{ m.} \end{aligned}$$

Ai fini della comprensione del fenomeno, si può valutare, in maniera speditiva, l'intensità della radiazione ricevuta da un bersaglio, nell'ipotesi che esso assorba tutta l'energia incidente, senza alcuna riflessione (ossia che esso si comporti come un corpo nero), in un tempo pari alla durata del fireball, con l'equazione:

$$Q_{\text{target}} = E \cdot F_{21} \cdot \tau_A$$

dove

Q_{target} = radiazione ricevuta dal corpo nero bersaglio (kW/m²);
 E = flusso termico emesso dalla superficie del fireball (kW/m²);
 F_{21} = fattore di vista geometrico tra la sfera e la superficie bersaglio;
 τ_A = trasmissività atmosferica.

Il flusso termico emesso dalla superficie del fireball, per il GPL, si può calcolare secondo:

$$E = \frac{F_{\text{rad}} \cdot M \cdot E_c}{\pi \cdot D_{\max}^2 \cdot t}$$

dove, oltre a quanto già visto:

F_{rad} = frazione di calore irraggiato (tipicamente 0,25-0,4);
 E_c = calore di combustione (kJ/kg);
 t = durata del fireball (s).

Tipici valori del flusso termico nel caso di fireball sono di 200-350 kW/m².
Il fattore di vista, inteso come frazione dell'energia radiante emessa dalla superficie del fireball, che colpisce un recettore bersaglio, si valuta secondo:

$$F_{21} = \frac{D_{max}^2}{4 \cdot r^2}$$

dove, oltre a quanto già visto:

r = distanza tra il centro della sfera e il bersaglio (m).

La trasmissività atmosferica, ovvero la frazione dell'energia irraggiata che non viene assorbita dall'atmosfera, per le varie lunghezze d'onda considerate, può assumere valori compresi fra 0 e 1 ed è funzione delle condizioni meteorologiche in atto, dell'umidità e della purezza dell'aria (presenza di CO₂, inquinamento, ecc.).

Essa per distanze r inferiori a 20-30 metri non deve essere considerata, quindi viene posta pari a 1, mentre per distanze r superiori può essere valutata, senza effettuare calcoli piuttosto complessi pari a 0,9.

Oltre i 100 metri può essere considerata una percentuale del 20% di flusso termico assorbito o deviato dall'atmosfera.

Andando ad inserire i valori precedentemente calcolati, risulta che un bersaglio che si fosse trovato a cento metri dall'autocisterna esplosa a Borgo Panigale avrebbe ricevuto un flusso termico pari a circa:

$$Q_{target100} = 350 \cdot 0,76 \cdot 0,9 = 239,4 \text{ kW/m}^2$$

mentre lo stesso bersaglio posto a duecento metri di distanza avrebbe assorbito:

$$Q_{target200} = 350 \cdot 0,18 \cdot 0,8 = 53,07 \text{ kW/m}^2$$

Se tale stima è riferita alla radiazione ricevuta dal bersaglio durante tutto il fireball, per quanto riguarda la determinazione degli effetti sulle persone

esposte, si deve osservare che, mentre per i fenomeni termici di lunga durata quali i pool fire e i jet fire, che vengono considerati stazionari, solitamente si assumono soglie di irraggiamento indipendenti dal tempo di esposizione, per quanto riguarda il fireball, fenomeno considerato variabile, si deve invece tener conto oltre che dell'intensità, certamente formidabile, anche della durata, essendo questa solitamente piuttosto breve.

I valori valutati attorno ai 30 kW/m² a 100 metri di distanza e a 1,66 kW/m² a 200 metri di distanza, per ciascun secondo di durata del fireball, sono sicuramente piuttosto elevati, se si considera che l'energia irradiata dal sole attraverso l'atmosfera arriva al suolo con una intensità mediamente pari a circa 1 kW/m² (irraggiamento al suolo, in condizioni di giornata serena e con sole a mezzogiorno).

Approcci semplificati suggeriscono direttamente soglie di intensità di radiazione pari a 5 kW/m² per le lesioni gravi e a 10 kW/m² per la morte.

Con irraggiamento pari a 40 kW/m² la probabilità di sopravvivenza è indicata dell'1%.

Per la valutazione dei danni alle persone, nel caso di fenomeni variabili, quale è il fireball, si utilizza generalmente un criterio basato sull'energia termica assorbita dalla pelle, espressa in kJ/m² (1 kW = 3600 kJ/h).

Il D.M. 15/05/1996 "Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas e petrolio liquefatto (GPL)", fissa per i fireball le seguenti soglie di danno per le persone:

Scenario incidentale	Elevata letalità	Inizio letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili
Incendio (radiazione termica stazionaria)	12,5 kW/m ²	7 kW/m ²	5 kW/m ²	3 kW/m ²
Fireball (radiazione termica variabile)	Raggio fireball	350 kJ/m ²	200 kJ/m ²	125 kJ/m ²

Proiezione di frammenti



Figura 6 - Proiettili

L'onda d'urto generata dall'esplosione ha provocato la formazione di diverse masse dotate di energia cinetica, dette proiettili o missili, che sono stati rinvenuti anche a duecento metri di distanza dal luogo dell'evento.

In particolare si è trattato di frammenti primari, ovvero provenienti dalla frammentazione dell'involucro in cui si è prodotta l'esplosione confinata.

Mentre nelle detonazioni i missili primari hanno una massa dell'ordine del grammo e una velocità di parecchie migliaia di metri al secondo, nelle deflagrazioni (con reazione a velocità sostenuta) i missili primari hanno massa dell'ordine del kg e velocità di diverse centinaia di metri al secondo.

Per quanto riguarda invece le sollecitazioni superiori ai limiti strutturali, si formano solitamente pochi missili primari, di massa ancora superiore, con velocità dell'ordine di qualche decina di m/s.

La stima delle conseguenze di questi fenomeni è piuttosto complessa e dipende dalla:

- energia sviluppata
- velocità iniziale e dalla traiettoria dei frammenti
- zona di ricaduta dei frammenti

Propagazione dell'onda d'urto (blast wave).



Figura 7 – Il crollo dell'impalcato

Se i danni maggiori alle persone sono stati determinati dalla radiazione termica (thermal radiation), i danni strutturali al ponte dell'autostrada e agli edifici prospicienti sono stati determinati dall'onda di pressione (blast wave).

Le caratteristiche dell'onda d'urto variano al variare della velocità dell'esplosione; se il processo reattivo è molto rapido, come nel caso delle esplosioni ideali, o delle detonazioni, la pressione massima viene raggiunta quasi istantaneamente e si ha la formazione di un'onda d'urto detta shock-wave, mentre se il fenomeno non è troppo veloce si ha la formazione di un'onda di pressione detta pressure-wave, rappresentata in figura 8.

Si osserva che prima dell'arrivo dell'onda, la pressione ha il valore della pressione atmosferica. All'istante del suo arrivo, la pressione sale bruscamente al valore di picco, per poi diminuire fino ad assumere valori negativi, per tornare infine al valore di pressione iniziale.

La frazione di tempo in cui la pressione è superiore a quella ambientale è denominata fase positiva mentre quella in cui la pressione è inferiore a quella ambiente è detta fase negativa.

I parametri caratterizzanti l'esplosione sono la pressione di picco, la durata della fase positiva e l'impulso dell'onda rappresentato dall'area sottesa dalla curva pressione-tempo.

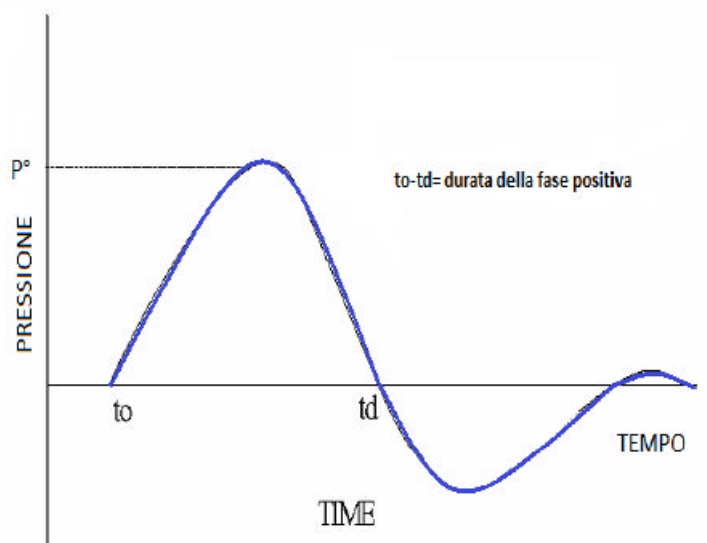


Figura 8 – Rappresentazione dell'onda d'urto

Valori di sovrappressione incidente superiori a 0,83 bar possono portare alla distruzione totale delle strutture, in modo da non essere più utilizzabili; gravi danni alle strutture, intesi come parziale collasso a causa dei danni subiti da elementi strutturali, sono attesi per valori di sovrappressione incidente compresi tra 0,83 e 0,35 bar; danni moderati che implicano gravi danni alla struttura (come la distruzione di pareti), che però può essere riparata, sono attesi per valori di sovrappressione incidente compresi tra 0,35 e 0,17 bar; danni limitati, quali la rottura di porte e finestre o la fessurazione di pareti o di elementi di copertura, sono attesi per valori di sovrappressione incidente compresi fra 0.17 e 0.035 bar.

Il livello di danneggiamento prodotto da un'esplosione non dipende solamente dalla magnitudine relativa del picco di pressione generato e dalla pressione richiesta per superare la resistenza della struttura.

In realtà la risposta dei componenti strutturali alle sollecitazioni da esplosione è molto complessa in quanto la forza di pressione esercitata varia nel tempo, così come, di conseguenza, la risposta strutturale.

All'onda d'urto si associa infatti oltre alla sovrappressione statica di picco, anche la pressione dinamica.

Se la sovrappressione statica è l'incremento di pressione dovuto all'azione esercitata dal muro denso di aria compressa che forma il fronte d'onda, la

pressione dinamica è, sostanzialmente, quella dovuta alla velocità dell'aria che si imbatte contro il corpo.

Il valore di picco si raggiunge nella fase positiva, ma la durata di quest'ultima è generalmente inferiore rispetto a quella della fase negativa.

La risposta strutturale dipende oltre che dalla pressione di picco, anche dal rapporto tra la durata del carico imposto ed il periodo proprio di vibrazione del componente strutturale.

Se la durata della sovrappressione è più lunga del periodo proprio di vibrazione dell'elemento strutturale, il carico effettivamente sopportato sarà equivalente ad un carico statico di magnitudine corrispondente al valore di picco della sovrappressione generata nell'esplosione; se la durata della sovrappressione è circa la stessa del periodo di vibrazione proprio dell'elemento strutturale, il carico effettivamente sopportato è equivalente ad un carico statico di magnitudine superiore a quella corrispondente al valore di picco della sovrappressione generata nell'esplosione che può raggiungere un fattore di $p/2$ volte la magnitudine della pressione effettiva; se la durata della sovrappressione da esplosione è più breve del periodo proprio di vibrazione dell'elemento strutturale, allora la pressione sarà parzialmente assorbita e sarà equivalente ad un carico statico di magnitudine inferiore a quella corrispondente al valore di picco della sovrappressione generata nell'esplosione (in tale condizione la struttura può sopportare una pressione dinamica superiore al carico statico necessario per portarla a rottura).

Per un solaio in calcestruzzo armato il periodo proprio di vibrazione può durare dai 10 ai 30 millisecondi, mentre un'esplosione confinata di gas può generare una sollecitazione impulsiva che va dai 100 ai 300 millisecondi.

Il fattore che determina se avviene il cedimento di un elemento strutturale in conseguenza di un qualunque carico imposto è lo spostamento dell'elemento stesso a seguito dell'imposizione di tale carico. Elementi strutturali differenti, potranno sopportare differenti valori di spostamenti prima del cedimento.

Una misura di questa proprietà è data dal valore di duttilità del materiale, definito come la quantità totale di deformazione che un materiale sopporta in rapporto al limite massimo di deformazione elastica (che può essere assorbita).

I materiali duttili, come l'acciaio normalmente dimostrano di possedere elevati valori di duttilità in assenza di lesioni. In questi casi la deformazione

plastica (non riassorbibile) anche se indica una deformazione permanente non implica necessariamente la distruzione totale della struttura.

E' in questo contesto che vanno inquadrati i gravi danni strutturali rilevati relativamente al ponte autostradale e agli edifici circostanti, provocati sia dalla fase positiva dell'esplosione, che dalla fase negativa (depressione) per quanto riguarda la proiezione di infissi verso l'esterno dei fabbricati.

La sovrappressione prodotta, che ha generato il collasso del serbatoio è stata piuttosto elevata ed in grado di distruggere gli elementi strutturali scarsamente duttili (rigidi), non progettati per resistere a tali onde di pressione.



Figura 9 – Lo squarcio nel viadotto

Inoltre, bisogna osservare che, quando il fronte d'onda diretta, che si propaga radialmente dal punto di scoppio, incontra una superficie piana (come nel caso del ponte) essa si arresta bruscamente ed inverte il proprio moto originando un fronte d'onda riflessa, notevolmente rinforzato. L'entità della pressione riflessa dipende dal valore della pressione incidente e da un coefficiente di riflessione che, in presenza di riflessione frontale (angolo d'incidenza nullo) è massimo.



Figura 10 – Danni agli infissi

Gli effetti prodotti dall'azione combinata di queste due onde (diretta e riflessa) sono molto distruttivi, in quanto in alcuni casi la sola onda di pressione che impatta su una struttura, quale può essere ad esempio il ponte, provoca inizialmente delle semplici lesioni, senza alterarne la staticità. Sarà poi l'onda riflessa a provocarne il successivo crollo.

Tutto ciò avviene in un periodo di tempo dell'ordine di grandezza di pochi millisecondi, tale da non far apprezzare l'effetto prodotto dalle due onde singolarmente.

Tamponamento fra pesanti, pool fire da solventi, BLEVE del GPL con blast wave e projectiles, fireball con thermal radiation, crollo del ponte dell'autostrada, conseguenti incendi diffusi, danni strutturali agli edifici, 2 vittime, oltre 150 ustionati, ricerca di eventuali dispersi sotto le macerie, assistenza alla popolazione,... non è stato un lunedì come tanti a Borgo Panigale, quel 06 agosto 2018.

FONTI E BIBLIOGRAFIA:

- Baldassarre Genova – Michele Genova – Massimo Silvestrini. UTET. "Sicurezza degli edifici nei riguardi dei fenomeni esplosivi".

- Politecnico di Milano. Facoltà di ingegneria industriale. Dipartimento di energia. “Sicurezza nell’impiego e nel trasporto del gas di petrolio liquefatto (GPL)“.
- Università degli Studi di Padova. Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale. “Modellazione di esplosioni in ambienti confinati”.
- Etea “Consequence analysis esplosioni”.
- Dialoghi con gli abitanti di Borgo Panigale.