

# Studio Integrato d'Area

di Porto Marghera

**ALLEGATO:**

**Metodologia di approccio per  
l'identificazione e la valutazione  
del rischio di effetto domino  
nell'industria di processo**







**Agenzia Regionale per la Prevenzione e  
Protezione Ambientale del Veneto**

Dipartimento Provinciale di Venezia  
Direttore Dr. Renzo Biancotto  
Via Lissa, 6  
30172 Mestre Venezia



**Ente della Zona Industriale  
di Porto Marghera**

Presidente Ing. Lucio Pisani  
Direttore Dr. Gianluca Palma  
via delle Industrie 19  
VEGA 1 - Palazzo LYBRA  
30175 Marghera Venezia

**AUTORI**

Servizio Rischio Industriale e Bonifiche (SRIB)

Responsabile del progetto

Ing. Loris Tomiato (Dirigente SRIB)

Ing. Davide De Dominicis (Uff. Rischio Industriale ed Emergenze)

Ing. Marco Concion

Ing. Carlo Ferrari

Ing. Alessandro Monetti

Ing. Paolo Zilli

Ing. Marco Ziron

Dr. Fabio Zulato

Illustrazione di copertina:

Francesca Gobbo

Foto:

Ente della Zona Industriale di Porto Marghera

# Studio Integrato d'Area

---

di Porto Marghera

**ALLEGATO:**

Metodologia di approccio per  
l'identificazione e la valutazione  
del rischio di effetto domino  
nell'industria di processo





## INDICE

<b>RIASSUNTO.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>PARTE I - Considerazioni sull'effetto domino.....</b>	<b>5</b>
<b>1 Scopo dello studio e problemi relativi.....</b>	<b>7</b>
<b>2 Stato dell'arte nella valutazione dell'effetto domino .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 L'effetto domino nel Decreto Legislativo n° 334 del 17 agosto 1999.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Approccio a soglie (D.M. del L.P. 9 maggio 2001).....</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Introduzione del concetto di probabilità nell'approccio a soglie .....</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Approccio probabilistico .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5 Necessità e problematiche emerse .....</b>	<b>18</b>
<b>3 Metodologia analitica sviluppata.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Conoscenze e tecniche necessarie .....</b>	<b>19</b>
3.1.1 Criteri per gerarchizzare serbatoi, apparecchiature e tubazioni bersaglio.....	21
3.1.2 Affidabilità delle protezioni .....	22
3.1.3 Caratteristiche delle sostanze contenute.....	22
3.1.4 Area di danno degli incidenti indotti.....	23
3.1.5 Pericolosità dei bersagli in base all'area di danno. ....	24
3.1.6 Valutazione del rischio legato al posizionamento e al tipo di scenario: calcolo della probabilità di interessamento.....	25
3.1.7 Analisi strutturale: Verifica di resistenza a sollecitazioni meccaniche e termiche.....	28
3.1.8 Valutazione della frequenza degli incidenti indotti.....	29
3.1.9 Introduzione di nuovi scenari incidentali per l'analisi di sicurezza .....	29
<b>PARTE II – Analisi termica e strutturale di apparecchiature soggette ad irraggiamento.....</b>	<b>31</b>
<b>4 Analisi della successione degli eventi .....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 Descrizione della successione degli eventi .....</b>	<b>33</b>
<b>5 Metodi semplificati .....</b>	<b>37</b>

<b>5.1</b>	<b>Norma UNI 9503.....</b>	<b>37</b>
5.1.1	Descrizione.....	37
5.1.2	Proprietà meccaniche .....	38
5.1.3	Caso pratico.....	39
<b>5.2</b>	<b>Metodo TNO.....</b>	<b>41</b>
5.2.1	Descrizione.....	41
5.2.2	Intensità di calore critico per livello di danno 1 .....	42
5.2.3	Intensità di calore critico per livello di danno 2 .....	42
5.2.4	Durata di esposizione all'irraggiamento.....	43
<b>5.3</b>	<b>Sperimentazioni API.....</b>	<b>43</b>
<b>5.4</b>	<b>Limiti dei metodi semplificati .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>Analisi Termica.....</b>	<b>47</b>
<b>6.1</b>	<b>Bilanci termici.....</b>	<b>47</b>
<b>6.2</b>	<b>Calore da fiamma.....</b>	<b>54</b>
6.2.1	Modelli esistenti .....	55
6.2.2	Scelta dei modelli .....	57
6.2.3	Potere emissivo della superficie .....	58
6.2.4	Calore radiato dalla fiamma .....	59
<b>6.3</b>	<b>Calore irraggiato dalla parete verso l'atmosfera .....</b>	<b>60</b>
<b>6.4</b>	<b>Calore convettivo dalla parete all'atmosfera .....</b>	<b>60</b>
<b>6.5</b>	<b>Calore di conduzione attraverso la parete.....</b>	<b>61</b>
<b>6.6</b>	<b>Calore di irraggiamento dalla parete al gas.....</b>	<b>63</b>
<b>6.7</b>	<b>Calore di irraggiamento dalla parete a contatto con il gas al liquido.....</b>	<b>64</b>
<b>6.8</b>	<b>Calore di convezione dalla parete al gas.....</b>	<b>64</b>
<b>6.9</b>	<b>Calore di irraggiamento scambiato tra gas e liquido.....</b>	<b>65</b>
<b>6.10</b>	<b>Calore di convezione scambiato tra gas e liquido .....</b>	<b>66</b>
<b>6.11</b>	<b>Generalità sullo scambio termico tra parete e liquido.....</b>	<b>66</b>
<b>6.12</b>	<b>Calore di convezione dalla parete al liquido .....</b>	<b>69</b>
<b>6.13</b>	<b>Calore di irraggiamento dalla parete al liquido.....</b>	<b>70</b>
<b>6.14</b>	<b>Calore latente di ebollizione .....</b>	<b>71</b>





<b>7</b>	<b>Apertura della PSV .....</b>	<b>73</b>
7.1	<i>Descrizione dell'evento .....</i>	73
7.2	<i>Portata di massa uscente.....</i>	74
7.3	<i>Modifiche del bilancio termico .....</i>	77
7.4	<i>Incertezze nella valutazione della pressione interna del serbatoio .....</i>	79
<b>8</b>	<b>Analisi strutturale.....</b>	<b>81</b>
8.1	<i>Acciai caratteristici dell'industria di processo .....</i>	81
8.1.1	Tipologia di acciai.....	81
8.1.2	Proprietà degli acciai alle alte temperature .....	82
8.2	<i>Verifica strutturale.....</i>	85
8.3	<i>Collasso strutturale .....</i>	87
<b>9</b>	<b>Problematiche e limiti emersi .....</b>	<b>89</b>
	<b>GLOSSARIO .....</b>	<b>91</b>
	<b>APPENDICI.....</b>	<b>97</b>
<b>10</b>	<b>Appendice A: Casi storici di incidenti con effetto domino.....</b>	<b>99</b>
10.1	<i>Bleve di Città del Messico .....</i>	99
10.1.1	Descrizione dello stabilimento .....	99
10.1.2	Descrizione dell'incidente.....	100
10.1.3	Considerazioni generali.....	101
10.2	<i>Incidente impianto TDI di DOW.....</i>	102
10.2.1	Descrizione del processo produttivo .....	102
10.2.2	Descrizione della sezione d'impianto sede dell'evento incidentale .....	103
10.2.3	Descrizione dell'incidente.....	103
10.2.4	Cause generatrici dell'incidente .....	104
10.2.5	Considerazioni generali.....	104
<b>11</b>	<b>Appendice B: Trasmissività atmosferica e area della superficie della fiamma.....</b>	<b>107</b>
11.1	<i>Trasmissività atmosferica .....</i>	107
11.2	<i>Area della superficie della fiamma. Metodo di Chamberlain.....</i>	109
<b>12</b>	<b>Appendice C .....</b>	<b>113</b>

<i>12.1 Metodo alle differenze finite</i> .....	<i>113</i>
<i>12.2 Metodo agli elementi finiti</i> .....	<i>119</i>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>122</b>



## RIASSUNTO

L'analisi storica condotta su incidenti avvenuti all'interno di impianti a rischio di incidente rilevante riporta numerosi esempi di scenari che, a causa di un fenomeno di concatenazione di eventi, hanno assunto effetti devastanti. Tale interdipendenza di eventi incidentali è nota con il termine di effetto domino.

Il problema dell'effetto domino è oggetto di studio degli analisti del rischio da diverso tempo, grazie anche alla spinta normativa (vedi direttiva del Consiglio CEE/CEEA/CE n. 501 del 24/06/1982 e successive modifiche), al fine di proporre una metodologia che permetta di effettuare una valutazione qualitativa e quantitativa del fenomeno stesso.

L'analisi del rischio si preoccupa tradizionalmente di definire solamente il rischio derivante dagli eventi incidentali primari, definendo frequenze e magnitudo attraverso l'utilizzo di tecniche consolidate e ampiamente descritte nella letteratura tecnica specialistica. Inoltre, se è vero che da un lato l'analisi dell'evento incidentale sorgente è affrontato con sufficiente approfondimento nell'analisi di sicurezza, sia in termini fisici e sia in termini probabilistici, dall'altro lato manca completamente uno studio rigoroso sulla valutazione degli effetti su un possibile bersaglio.

Nel presente studio viene proposta una nuova metodologia<sup>[1] e [2]</sup> di approccio all'effetto domino, sistematica e compatibile anche con i tempi di stesura di un rapporto di sicurezza. I risultati di quest'ultimo costituiscono il punto di partenza. In particolare vengono individuate le sorgenti ed i bersagli che possono dar luogo ad effetto domino, stimando la probabilità di propagazione degli incidenti e arrivando a ricalcolare le frequenze di accadimento dei vari scenari incidentali ipotizzati nell'analisi di sicurezza dei gestori. La probabilità di propagazione degli incidenti viene valutata attraverso considerazioni sulla disposizione degli apparecchi, sulla resistenza a sollecitazioni meccaniche e termiche che questi subiscono durante l'incidente e sulle protezioni attive o passive eventualmente presenti.

La metodica prevede di individuare esclusivamente i bersagli in grado di ampliare significativamente le conseguenze di un incidente sorgente e fornisce, per tali bersagli, una gerarchizzazione in base alla loro pericolosità intrinseca. Ciò permette di concentrarsi effettivamente sugli obiettivi significativi: in alcuni impianti (quali ad esempio raffinerie, impianti di cracking e altri stabilimenti chimici dove sono molteplici i fluidi pericolosi trattati ed ingenti le loro quantità), l'analisi di tutti gli apparecchi, che potenzialmente potrebbero essere bersagli di un incidente, richiederebbe tempi lunghissimi, dato il gran numero di serbatoi, tubazioni e altri componenti di processo, presenti nell'impianto stesso. Riuscire ad individuare velocemente, ma con sufficiente rigorosità, questi bersagli è quindi essenziale per procedere nell'analisi e dare risultati significativi.

Nella metodologia proposta, al fine di valutare il rischio di effetto domino, è necessario quantificare, il rischio di cedimento di apparecchiature di processo investite da radiazione termica, onda di sovrappressione e proiezione di frammenti, ovvero gli effetti che sono tipicamente causa di concatenazione di eventi incidentali. In particolare nella Parte II del presente

lavoro viene approfondito il problema del cedimento di apparecchiature soggette ad irraggiamento termico. Lo scopo è fornire uno studio qualitativo che, partendo dallo stato dell'arte, individui le variabili controllanti il fenomeno. Si sono studiate diverse tipologie di apparecchiature, in particolare serbatoi atmosferici ed in pressione, di varie forme (sferica, cilindrica orizzontale e verticale). Lo studio è stato introdotto con tre metodi semplificativi proposti dall'UNI, dal TNO e dall'API, il cui utilizzo è stato preso in considerazione come primo approccio al problema, verificandone da un lato la velocità con cui si raggiungono i risultati e dall'altro l'eccessiva approssimazione ai fini di una dettagliata analisi. Il lavoro successivo è stato suddiviso in due parti: l'analisi termica e l'analisi strutturale.



## INTRODUZIONE

Molti dei prodotti che accompagnano le nostre azioni quotidiane derivano da produzioni industriali che, spesso, utilizzano sostanze pericolose e processi gestiti in condizioni operative gravose.

La realizzazione di questi prodotti richiede fasi contraddistinte da numerose “operazioni unitarie”, come definite dall’ingegneria chimica, che interessano varietà di apparecchiature e macchinari intimamente collegati.

La manipolazione di sostanze intrinsecamente pericolose, per infiammabilità, esplosibilità o tossicità, le gravose condizioni di esercizio, ed il contesto territoriale nel quale sono inseriti gli stabilimenti, rendono l’industria di processo una tipica attività a rischio di “incidente rilevante”.

Con tale termine si indica un avvenimento quale un’emissione, un incendio o un’esplosione connessi ad un’attività industriale, che dia luogo ad un pericolo grave, immediato o differito, sia per l’uomo, sia per l’ambiente.

L’analisi di sicurezza nei processi chimici, sino ad oggi utilizzata, è priva di una metodologia che valuti l’incremento della magnitudo degli scenari incidentali, derivante dall’interdipendenza degli eventi dannosi. Numerosi sono gli incidenti avvenuti in un passato più o meno recente, nati da un evento sorgente di gravità anche limitata, che si sono amplificati a seguito di un fenomeno di propagazione. Tecnicamente questo tipo di evento è definito come effetto domino.

Con la terminologia “effetto domino” s’intende caratterizzare e definire la propagazione di un singolo evento incidentale, detto “primario”, con il verificarsi d’altri incidenti, concatenati da rapporto causale, identificati come “secondari”, che possono incrementare le aree d’impatto coinvolte. L’amplificazione dell’incidente primario comporta spesso un incremento dei danni causati.

Le cause del propagarsi dell’incidente possono essere:

- irraggiamento termico;
- onda di sovrappressione;
- proiezione di frammenti.

Nonostante l’importanza di questo tipo di eventi e delle loro ripercussioni in aree industriali ad elevata concentrazione, non è ancora stata introdotta una tecnica analitica sia qualitativa che quantitativa del rischio dovuto ad effetto domino.

Lo scopo fondamentale del presente studio è l’analisi e la valutazione del rischio industriale all’interno di un impianto, considerando l’effetto domino come possibile causa d’incremento di questo. L’obiettivo prefissato è lo sviluppo di una metodologia sistematica

per l'analisi del rischio dovuto ad effetto domino, applicabile nell'analisi di sicurezza. Tutto ciò al fine di ottenere importanti indicazioni atte a rendere più sicuro un impianto, focalizzando l'attenzione sulle apparecchiature di processo potenzialmente pericolose perché in grado di innescare una catena incidentale con effetti gravosi per lavoratori, popolazione e ambiente. L'individuazione di queste apparecchiature permette di apportare migliorie sia a livello di prevenzione, che di protezione attiva e passiva, in modo da abbassare sia la frequenza che la magnitudo di particolari incidenti.

La complessità e varietà delle realtà industriali richiede anche, nell'analisi del rischio, approcci diversificati che consentano di fornire elementi di giudizio rispetto all'apparente inconciliabilità tra sviluppo produttivo, tutela e salvaguardia delle popolazioni e dell'ambiente.

L'analisi e la regolamentazione del rischio di incidente rilevante sono state avviate per la prima volta, nell'ambito della Comunità Europea, con la Direttiva 82/501/CE (detta "Direttiva Seveso"). In Italia, tale direttiva è stata recepita con il DPR 17 maggio 1988 n° 175 e successive modifiche o integrazioni. Nel corso degli anni seguenti, l'applicazione della direttiva comunitaria ha condotto ad una revisione della stessa, portando all'emanazione della Direttiva 96/82 (detta "Seveso BIS"), recepita in Italia con il D.Lgs. n° 334 del 17 agosto 1999.

L'evoluzione del quadro normativo traccia con chiarezza il mutato approccio che la Comunità Europea e la comunità scientifica hanno delineato. Si passa infatti da un concetto di sicurezza rivolto principalmente alle installazioni industriali e ai lavoratori, ad uno che vede le attività produttive nel contesto territoriale, urbano ed ambientale in cui sorgono, con riferimento anche alla tutela di popolazione e ambiente circostante.

Lo sviluppo di modelli affidabili e sistematici, ma allo stesso tempo anche speditivi, adatti all'analisi degli effetti domino, è presupposto fondamentale per affrontare studi completi sulla ricomposizione dei rischi, i cui risultati possono essere sfruttati per l'analisi di sicurezza su vaste aree industriali, come avviene per la stesura dello Studio Integrato d'Area.

Il lavoro svolto e descritto in seguito è diviso fondamentalmente in due parti, di cui la prima, partendo dalle tecniche attualmente utilizzate, illustra la metodologia proposta e le problematiche e limiti connessi, la seconda propone un approfondimento legato all'analisi termica e strutturale di apparecchiature soggette ad irraggiamento.



## **PARTE I - Considerazioni sull'effetto domino**







## 1 SCOPO DELLO STUDIO E PROBLEMI RELATIVI

La propagazione di un evento incidentale è legata sostanzialmente a tre cause:

- **IRRAGGIAMENTO**, che può essere distinto, sostanzialmente, in due tipologie:
  - *Incendio di pozza* (nel caso di liquidi infiammabili). In tal caso si può avere il collasso termico di apparecchiature non protette da rivestimento e non irrogate d'acqua, anche in una decina di minuti, oppure il cedimento dei supporti dell'apparecchiatura, con caduta e successiva rottura della stessa.
  - *Getto incendiato* (nel caso di gas compressi o liquefatti). Si può avere collasso termico localizzato di apparecchiature, anche in un breve periodo di tempo, per esempio in pochi minuti, soprattutto se queste contengono gas.
- **ONDA DI SOVRAPPRESSIONE**: generalmente, essa è generata da UVCE o VCE di nubi di vapori, oppure da scoppio di recipienti in pressione (dovuto ad esplosione interna, reazioni esotermiche fuggitive, improvvisa depressurizzazione e vaporizzazione, Bleve, ecc). La propagazione dell'onda di pressione ("shock wave"), provoca ribaltamenti, spostamenti, rottura di apparecchiature e tubazioni connesse, con successiva fuoriuscita di fluido pericoloso in esse contenuto.
- **PROIEZIONE DI FRAMMENTI**: spesso si tratta di frammenti metallici, proiettati dall'esplosione di apparecchiature limitrofe, nel caso ad esempio di BLEVE. I frammenti possono provocare ammaccature o forature nelle tubazioni e nei serbatoi, con conseguenti fuoriuscite.

L'effetto domino può incrementare in maniera significativa gli indici di rischio in una zona industriale (come nel caso), dove sono molteplici le sorgenti di rischio relativamente vicine tra loro, a causa dell'elevata concentrazione degli impianti di processo, riferendosi ad "aree ad elevata concentrazione di stabilimenti" ai sensi dell'articolo 13 del D.Lgs. 334/99.

Gli effetti domino possono essere interni allo stabilimento in cui l'incidente ha avuto origine, oppure si possono estendere anche all'esterno. Nel primo caso, uno studio dell'effetto domino comporta solamente un completamento dell'analisi del rischio nello stabilimento stesso e una revisione del rapporto di sicurezza. Nel secondo caso, invece, il problema è ben più complesso e prevede sia uno scambio di informazioni tra i gestori dei vari stabilimenti, sia una pianificazione territoriale ed urbanistica che tenga conto di questo tipo di incidenti, il che si attua nel presente Studio Integrato d'Area.

Un attento studio dovrebbe individuare gli elementi impiantistici, territoriali e infrastrutturali che possono costituire un fattore aggravante o mitigante per il tipo di danno considerato, anche al fine di una corretta formulazione del piano di emergenza d'area e delle proposte per il piano d'intervento, a livello infrastrutturale ed integrato.

Fino ad ora, lo studio dell'effetto domino è stato preso in considerazione nell'ambito della stesura del rapporto di sicurezza (RdS) del singolo stabilimento ed in maniera piuttosto superficiale, senza seguire una metodologia rigorosa e sistematica.

L'identificazione degli effetti domino e la loro valutazione dovrebbero essere condotte per:

- Rivalutare l'insieme di eventi incidentali ipotizzati nel RdS, in termini di casistica, frequenze attese e/o conseguenze;
- Prevedere la possibilità di concatenazione di incidenti, ai fini della loro considerazione nell'ambito di una ricomposizione del rischio originato da fonti e soggetti diversi;
- Stabilire la necessità di mantenere determinate distanze di separazione tra componenti critici, al fine di evitare la propagazione di un incidente;
- Individuare i provvedimenti migliorativi possibili, in termini di mitigazione e/o prevenzione;
- Formulare correttamente i piani di emergenza interni, con particolare riferimento agli interventi sul campo;
- Formulare correttamente i piani di emergenza esterni, da parte delle Autorità competenti.

In linea generale, l'identificazione degli effetti domino dovrebbe essere effettuata al fine di prendere in considerazione le possibili interazioni all'interno di un singolo stabilimento, tra stabilimenti diversi, da/a vettori di trasporto merci pericolose e da/a condotte.

L'analisi dell'effetto domino si può fare in seguito alla stesura del rapporto di sicurezza, in modo da sfruttare i risultati di tali analisi. Ciò, in virtù del fatto che uno studio corretto richiede inizialmente i seguenti elementi:

- Una mappa di tutta l'area industriale, così da verificare collocazione e distanze dei vari stabilimenti rispetto a quello considerato;
- La planimetria in scala dello stabilimento industriale, dove si può trovare la disposizione dei vari componenti di processo, la loro orientazione, la quota di posizionamento e le distanze;
- L'elenco dei vari incidenti rilevanti che si possono ipotizzare, con frequenze attese e aree di danno, secondo la tradizionale analisi del rischio;
- Le protezioni attive e passive presenti in impianto, con le caratteristiche funzionali e i tempi di entrata in funzione;
- I provvedimenti gestionali in grado di ridurre le frequenze attese d'incidente e la probabilità di accadimento dell'effetto domino;
- I tempi e i modi d'intervento delle squadre di emergenza.



Tutte queste informazioni si possono reperire nel rapporto di sicurezza, per gli stabilimenti soggetti all'articolo 8 del Decreto Legislativo 334/99, oppure nella documentazione dello stabilimento, se questo è soggetto al solo articolo 6 del Decreto stesso.

Servono, inoltre, elementi che non sempre si trovano nel rapporto di sicurezza, quali:

- Caratteristiche costruttive dei componenti (dimensioni, spessori, dischi di rottura e valvole di sicurezza, tubazioni in ingresso e in uscita);
- Condizioni di esercizio (pressione e temperatura);
- Tipo di sostanze presenti e percentuali delle miscele;
- Quantità medie presenti;
- Livelli e grado di riempimento.

Nell'ambito del SIA, lo studio deve quindi partire prendendo in considerazione gli incidenti e la possibilità di effetto domino già analizzata nella stesura del Rapporto di Sicurezza. In seguito si dovrà compiere una revisione critica dell'analisi, individuando ulteriori possibilità di effetto domino, considerando sorgenti e bersagli non valutati precedentemente. Questo, sulla base del fatto che lo studio integrato d'area sfrutta interscambio di informazioni e mezzi di analisi territoriale più completi ed esaustivi, rispetto a quelli utilizzati nella normale stesura del Rapporto di Sicurezza. Durante lo studio, si possono escludere alcuni eventi incidentali considerati non significativi, per frequenza e magnitudo, giustificando questa scelta con considerazioni qualitative e secondo giudizio ingegneristico.

Gli incidenti e gli scenari ipotizzati, da prendere inizialmente in considerazione, sono quelli le cui aree di danno si estendono oltre i confini dello stabilimento, oppure anche all'interno dello stesso, se interessano zone dove vi sono elementi di processo vulnerabili e pericolosi o elevata presenza di personale.

I problemi principali che si incontrano, nell'analisi dei possibili effetti domino all'interno di un impianto, si possono raggruppare essenzialmente in tre categorie:

- **Studio dell'incidente primario ipotizzato:** nel RdS viene fornita la distanza di danno dell'incidente come se avvenisse in luogo aperto e privo di ostacoli, quindi manca uno studio dell'incidente "primario", in particolare:
  - 1) Fluidodinamica, per il fuoco;
  - 2) Modalità di propagazione delle onde, per la sovrappressione.
- **Probabilità di propagazione:** non è detto che all'interno dell'area di danno la probabilità di propagazione sia unitaria; ciò corrisponderebbe ad una visione troppo catastrofica. Occorre invece tener conto delle protezioni e dei fattori vari di mitigazione, della probabilità di un bersaglio di venire effettivamente investito dall'incidente e dell'effettivo layout delle apparecchiature di processo.

- **Verifica della risposta meccanica del bersaglio colpito:** un bersaglio, a seconda delle caratteristiche costruttive, delle condizioni di esercizio, della tipologia di fluido contenuto, ecc., può essere più o meno vulnerabile, rispetto ad uno scenario incidentale. Lo studio della risposta meccanica può fornire utili indicazioni sul fatto che il bersaglio sia in grado di resistere oppure no alle sollecitazioni termiche e/o meccaniche create dall'incidente.

Uno studio completo e sistematico deve quindi considerare i tre problemi in precedenza elencati e approfondire l'analisi secondo il grado di dettaglio che si vuole ottenere.



## 2 STATO DELL'ARTE NELLA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DOMINO

Lo studio e la valutazione dell'effetto domino ha subito, negli ultimi anni, successive variazioni del grado di approfondimento. A questo hanno contribuito significativamente sia l'emanazione di alcuni decreti, sia la necessità di valutare l'effetto domino in casi pratici particolari.

In pratica, l'evoluzione del metodo di approccio al problema è stata graduale e segnata da fasi successive, ognuna delle quali ha dato un nuovo contributo e nuove idee per valutare la propagazione di incidenti, nell'ambito dell'analisi del rischio.

Di seguito sono analizzate queste fasi in ordine cronologico, così da rendere l'idea di come si è evoluta la valutazione dell'effetto domino.

### 2.1 L'effetto domino nel Decreto Legislativo n° 334 del 17 agosto 1999

Nell'articolo 12 della 334/99, si legge:

*“12. (Effetto domino).*

- 1. In attesa di quanto previsto dall'articolo 72 del D.L.vo 31 marzo 1998, n. 112, il ministero dell'ambiente, sentiti la regione interessata e il Comitato, in base alle informazioni ricevute dai gestori a norma dell'articolo 6 e 8:*
  - a) Individua gli stabilimenti tra quelli di cui all'articolo 2, comma 1, per i quali la probabilità o la possibilità o le conseguenze di un incidente rilevante possano essere maggiori a cause del luogo, della vicinanza degli stabilimenti stessi e dell'inventario delle sostanze pericolose presenti in essi;*
  - b) Accerta che avvenga lo scambio, fra i gestori, delle informazioni necessarie per consentire di riesaminare, ed eventualmente modificare, in considerazione della natura e dell'entità del pericolo globale di incidente rilevante, i rispettivi sistemi di gestione della sicurezza, i rapporti di sicurezza ed i piani di emergenza interni a la diffusione delle informazioni alla popolazione*

2. I gestori degli stabilimenti di cui al comma 1 devono trasmettere al prefetto e alla provincia entro quattro mesi dall'individuazione del possibile effetto domino, le informazioni necessarie per gli adempimenti di competenza di cui all'articolo 20".

Come si può notare, il decreto tratta il problema dell'effetto domino, ma solamente in maniera marginale, senza dare né linee guida adeguatamente dettagliate su quale sia la metodologia da seguire, né come condurre un'analisi qualitativa e quantitativa per calcolare la probabilità di propagazione di eventi incidentali. Così, nemmeno nella letteratura tecnica specialistica si trova una definizione precisa, né la delimitazione di ciò che si debba effettivamente intendere con il termine "effetto domino". Tanto meno viene descritta in alcun modo una metodologia corretta e generalizzabile per la valutazione dei rischi legati a questi eventi incidentali.

## 2.2 Approccio a soglie (D.M. dei L.P. 9 maggio 2001)

Nel Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 9 maggio 2001 si trovano delle "tabelle di vulnerabilità" con i valori soglia di danno minimi dei fenomeni fisici in grado di produrre rottura di una apparecchiatura (irraggiamento, sovrappressione e proiezione di frammenti) da tenere in considerazione nello studio dell'effetto domino (vedi Tabella 1).

Tabella 1: Valori di soglia da D.M. 09/05/2001

Scenario Incidentale	Elevata letalità	Inizio Letalità	Lesioni irreversibili	Lesioni reversibili	Danni alle strutture / Effetti Domino
	1	2	3	4	5
Incendio (radiazione termica stazionaria)	12,5 kW/m <sup>2</sup>	7 kW/m <sup>2</sup>	5 kW/m <sup>2</sup>	3 kW/m <sup>2</sup>	12,5 kW/m <sup>2</sup>
BLEVE/Fireball (radiazione termica variabile)	Raggio fireball	350 kJ/m <sup>2</sup>	200 kJ/m <sup>2</sup>	125 kJ/m <sup>2</sup>	200-800 m (*)
Flash-fire (radiazione termica istantanea)	LFL	½ LFL			
VCE (sovrappressione di picco)	0,3 bar (0,6 bar spazi aperti)	0,14 bar	0,07 bar	0,03 bar	0,3 bar
Rilascio tossico (dose assorbita)	LC50 (30min, hmn)		IDLH		

(\*) secondo la tipologia del serbatoio



L'utilizzo di queste soglie è una metodologia di tipo "deterministico", piuttosto conservativa, secondo la quale tubazioni, serbatoi o apparecchiature di processo, coinvolte in un incidente con effetto fisico superiore alle soglie suddette, arrivano immediatamente al collasso.

In particolare, l'approccio è conservativo perché le soglie di danno prese a riferimento per l'effetto domino (colonna 5) sono quelle "minime" di danno, nel senso che, appena al di sopra di queste, solamente i componenti più vulnerabili subiscono danno, mentre ben più elevati risultano, dalla letteratura riguardante l'argomento, le soglie per serbatoi e grosse apparecchiature di processo. In questo modo, si assegna probabilità unitaria di rottura alle apparecchiature situate nell'area in cui si hanno effetti fisici superiori a quelli del valore soglia, per lo scenario considerato. Allo stesso modo, le unità esterne all'area hanno probabilità nulla di danno.

Un approccio di questo tipo non tiene conto che le strutture soggette ad irraggiamento non collassano istantaneamente, in quanto ciò dipende dall'energia termica assorbita e dal tempo in cui sono sottoposte a tale irraggiamento. E' quindi assolutamente necessario prendere in considerazione il tempo di esposizione della struttura ad un determinato irraggiamento, legandolo all'energia e al calore assorbito. Risulta chiaro ed intuitivo che il cedimento di serbatoi, tubazioni e apparecchiature di processo possa avvenire con irraggiamento intenso per brevi periodi, ma anche con un irraggiamento debole, per un periodo di tempo prolungato. Per tale motivo il "tempo di cedimento" è un concetto molto importante e da prendere in considerazione in questo tipo di analisi.

In letteratura si possono trovare varie fonti che riportano soglie diverse, anche di un ordine di grandezza, il che dimostra come un approccio di tipo esclusivamente deterministico sia discutibile e necessiti d'ulteriori approfonditi studi per verificare l'affidabilità di queste soglie di danno. Secondo l'analisi di tipo deterministico quindi, l'entità delle conseguenze fornisce una misura della gravità dei potenziali incidenti, indipendentemente dalla probabilità con cui possono accadere.

Contrapposto a tale metodo vi è l'approccio "probabilistico" che utilizza funzioni empiriche o funzioni di probit per il calcolo della probabilità di propagazione di un incidente primario. Tali funzioni tengono conto del tipo di incidente iniziatore e della tipologia di bersagli coinvolti in esso, risultando meno conservativi dei modelli deterministici a soglie e portando ad una visione più accurata del rischio aggiunto dovuto ad effetto domino. Così, in questo tipo di approccio, si tiene conto della probabilità di accadimento di un incidente considerando, anche i sistemi protettivi e le misure di sicurezza.

## 2.3 Introduzione del concetto di probabilità nell'approccio a soglie

Nell'approccio deterministico precedente è stato introdotto in seguito il concetto di probabilità di propagazione dell'evento incidentale primario, considerando i tempi di esposizione e gli effetti fisici dell'incidente.

L'introduzione del concetto di probabilità nell'approccio a soglie si avvale di assunzioni indicative riguardanti il calcolo della probabilità di propagazione per vari incidenti, qualora vi fossero incertezze nelle valutazioni analitiche possibili o assenza di dati dettagliati, riguardo le circostanze considerate. Nel caso dell'irraggiamento si è tentato di correlare i tempi di cedimento delle apparecchiature e l'irraggiamento con la probabilità di propagazione dell'incidente, cosa che fino ad ora non era stata ancora considerata. Trattando la propagazione di un incidente a causa di un'onda d'urto, invece, il tentativo è stato quello di dare un valore di probabilità lineare rispetto alla sovrappressione, per mitigare in qualche modo l'effetto "a gradino" delle soglie di danno. I criteri generali seguiti in questo caso sono riportati di seguito (Tabella 1, Tabella 2, Tabella 3).

Tabella 2: Probabilità di propagazione di un incidente primario che provoca irraggiamento

Effetto sorgente (Irraggiamento)	Probabilità di effetto domino	Nota
Ingolfamento in fiamma con durata inferiore a 5 min.	0	
Ingolfamento in fiamma con durata tra 5 e 10 min.	0.5	
Ingolfamento in fiamma con durata superiore a 10 min.	1	
Irraggiamento superiore a 37.5 kW/m <sup>2</sup> con durata inferiore a 10 min.	0	(1)
Irraggiamento superiore a 37.5 kW/m <sup>2</sup> con durata superiore a 10 min (per obiettivo serbatoi atmosferici).	1	(2)
Irraggiamento superiore a 37.5 kW/m <sup>2</sup> con durata superiore a 10 min (per obiettivo serbatoi pressurizzati e tubazioni).	0.5	(2)
Irraggiamento superiore a 37.5 kW/m <sup>2</sup> con durata superiore a 20 min.	1	(2)
Irraggiamento inferiore o uguale a 12.5 kW/m <sup>2</sup> .	0	(1)
Irraggiamento tra 12.5 e 37.5 kW/m <sup>2</sup> con durata inferiore a 10 min.	0	(1)
Irraggiamento tra 12.5 e 37.5 kW/m <sup>2</sup> con durata superiore a 10 min.	Vedi nota	(3)
Irraggiamento tra 12.5 e 37.5 kW/m <sup>2</sup> con durata superiore a 20 min.	Vedi nota	(4)

Nota 1: Salvo i casi in cui sia ipotizzabile una propagazione dell'incendio a causa di materiale strutturale o componentistico infiammabile (es. pannellature di materiale plastico, ecc.) ovvero un danneggiamento dei com-





ponenti particolarmente vulnerabili (es. recipienti o tubazioni in vetroresina, serbatoi o tubazioni con rivestimenti plastici, ecc.).

*Nota 2:* Nel caso in cui siano presenti sistemi di protezione attivi (raffreddamento) automatici o manuali, aventi probabilità  $P$  di mancato intervento su domanda o di efficacia per tutta la durata dell'effetto sorgente, le probabilità di effetto domino vanno moltiplicate per  $P$ . Nel caso in cui siano presenti sistemi di protezione passiva (fire-proofing, interrimento, barriere tagliafiamme) le probabilità di effetto domino sono trascurabili per durata dell'effetto fisico pari o inferiore a quella eventuale di resistenza del sistema. Qualora tale valore non sia disponibile saranno adottati i valori 0.01 (per sistemi passivi o automatici) o 0.1 (per sistemi manuali).

*Nota 3:* Probabilità interpolata linearmente tra 0 e 0.5.

*Nota 4:* Probabilità interpolata linearmente tra 0 e 1.

*Tabella 3: Probabilità di propagazione di un incidente primario che provoca sovrappressione*

Effetto sorgente (Sovrappressione)	Probabilità di effetto domino	Nota
Sovrappressione inferiore o uguale a 0.3 bar.	0	
Sovrappressione superiore a 0.6 bar (per obiettivo serbatoi atmosferici).	1	
Sovrappressione superiore a 1 bar (per obiettivo serbatoi pressurizzati e tubazioni).	1	
Sovrappressione tra 0.3 e 0.6 bar per obiettivo serbatoi atmosferici).	Vedi nota	(1)
Sovrappressione tra 0.3 e 1 bar (per obiettivo serbatoi pressurizzati e tubazioni).	Vedi nota	(1)

*Nota 1:* Probabilità interpolata linearmente rispetto alle probabilità corrispondenti ai due estremi del valore di sovrappressione.

*Tabella 4: Probabilità di propagazione di un incidente primario con proiezione di frammenti*

Effetto sorgente (Proiezione di frammenti)	Probabilità di effetto domino	Nota
Frammenti da componenti minori (tubazioni, bombole, ecc).	Vedi nota	(1)
Frammenti da collasso di recipiente essenzialmente isometrico o eq. (sfera, serbatoi verticali).	Vedi nota	(1)
Frammenti da collasso di recipiente a sviluppo longitudinale o eq. (serbatoi orizzontali).	Vedi nota	(2)

*Nota 1:* Probabilità pari a 1 dato l'impatto con l'obiettivo vulnerabile, fino a distanze dell'ordine di 200 metri.

*Nota 2:* Probabilità pari a 1 dato l'impatto con l'obiettivo vulnerabile, fino a distanze dell'ordine di 800 metri.

## 2.4 Approccio probabilistico

Recentemente alcuni studi hanno proposto metodologie di approccio all'effetto domino più rigorose e specifiche. La probabilità di propagazione dell'incidente primario è infatti calcolata tramite l'utilizzo di funzioni di Probit, piuttosto che sfruttando l'approccio deterministico. In seguito verrà descritto brevemente il metodo, distinguendo se l'incidente primario dia luogo ad un incendio o ad una sovrappressione.

Si considera il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione, legato ad una probabilità di propagazione dell'incidente, dipendente dal picco di pressione dell'onda d'urto nel particolare punto in cui è posta l'apparecchiatura bersaglio.

Dall'analisi di molti dati riguardanti il danneggiamento per sovrappressione sono state modellate delle funzioni di Probit per il calcolo della probabilità, tra le quali in letteratura ha maggiore importanza quella di Eisemberg (1975):

$$Y = a + b \cdot \ln(P)$$

Dove:

Y: è il valore di probit, da cui si ricava la probabilità;

a e b: sono due coefficienti della funzione;

P: è il picco statico di sovrappressione.

In realtà, l'interazione dell'onda d'urto con un qualsiasi bersaglio è un processo molto complesso, che richiederebbe lo studio dei fenomeni di riflessione, rifrazione e deformazione dell'onda stessa, qualora essa incontri un ostacolo. Per capire la complessità di uno studio del genere, si vedano Figura 2 e Figura 3, che rappresentano l'impatto di un'onda d'urto su di un ostacolo. Con un approccio di questo tipo, si esula da uno studio così oneroso, ottenendo semplicemente un valore numerico per la probabilità di propagazione.

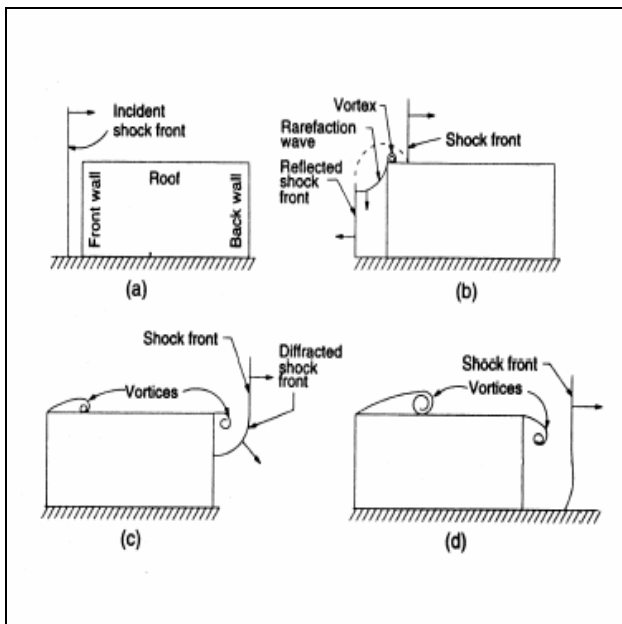


Figura 1: Onda d'urto e struttura: Vista laterale

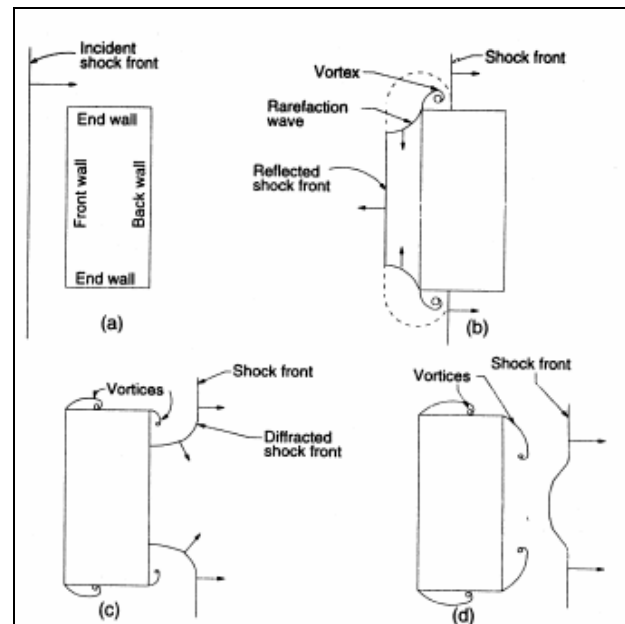


Figura 2: Onda d'urto e struttura: Vista in pianta

Anche il collasso di un'apparecchiatura dovuto ad irraggiamento è legato ad una probabilità, ricavabile ancora una volta da funzioni di Probit. In questo caso i dati da letteratura sono meno numerosi, anche se ultimamente sono in corso diversi studi di varie Università ed aziende del settore. In particolare tra le varie tipologie proposte quelle che appaiono più interessanti riguardano la modellazione probabilistica per alcune particolari tipologie di serbatoi atmosferici o sotto pressione al fine di sviluppare dei criteri semplificati di cedimento e calcolare il tempo di collasso di questi serbatoi sottoposti ad irraggiamento. La metodologia prevede di confrontare i tempi di cedimento ottenuti, funzione dell'irraggiamento, con il tempo necessario per gli interventi di mitigazione, ottenendo così delle funzioni di Probit per il calcolo della probabilità di propagazione dell'incidente primario. Nel caso di un serbatoio atmosferico cilindrico verticale, si è ricavata la funzione di Probit<sup>[16]</sup>:

$$Y = 9.252 - 1.847 \cdot \ln(ttf)$$

Dove:

Y: è il valore di probit, da cui si ricava la probabilità;

ttf: è il tempo di cedimento in minuti.

## 2.5 Necessità e problematiche emerse

L'area oggetto di studio dell'effetto domino è generalmente un impianto (nell'ambito della stesura del RdS), o un'area ad elevata concentrazione di stabilimenti (nell'ambito del SIA). Per tale motivo emerge la necessità di applicare una metodologia su vasta scala che al tempo stesso sia applicabile e generalizzabile ai vari impianti soggetti alla normativa 334/99. Risulta quindi di particolare importanza, ma anche di notevole complessità, riuscire in tale intento, considerando quali sono le difficoltà che si incontrano nell'applicare un metodo su vasta scala:

- Presenza di varie tipologie di fluidi;
- Vari tipi di apparecchi, tubazioni e serbatoi;
- Varie condizioni di processo;
- Fattore layout, importantissimo nel caso di effetto domino, che va visto sul campo, a seconda della disposizione delle apparecchiature.

Negli impianti chimici, quindi, si deve procedere alla selezione delle zone più pericolose ovvero quelle che effettivamente possono indurre o incrementare i rischi di incidente rilevante, dato l'elevato numero di apparecchi e tubazioni.

Il metodo visto precedentemente, riguardante l'irraggiamento, è accademico e difficilmente applicabile su vasta scala, perché:

- La tipologia di serbatoi studiati è prefissata, così come il fluido interno;
- Le condizioni al contorno sono semplici e riguardano un irraggiamento stazionario senza contatto diretto con fiamma;
- Non vi è alcuna considerazione a monte, in particolare sul layout d'impianto e su un criterio di gerarchizzazione delle apparecchiature "sorgenti" e "bersaglio", che permetta di focalizzare l'analisi su quelle più pericolose.

Uno studio completo e sistematico sulle varie apparecchiature d'impianto richiederebbe molto tempo e quindi è applicabile solo focalizzando l'attenzione sui bersagli più vulnerabili e pericolosi, ovvero sviluppando una metodologia di gerarchizzazione adeguata. È quindi di particolare importanza lo sviluppo di un approccio rigoroso e sistematico, ma nello stesso tempo anche sostenibile per quanto riguarda tempistica e complessità di applicazione: i tempi di analisi devono essere compatibili con i tempi richiesti per il SIA.



## 3 METODOLOGIA ANALITICA SVILUPPATA

### 3.1 Conoscenze e tecniche necessarie

Nell'elaborare una metodologia sistematica e puntuale per lo studio dell'effetto domino all'interno di un impianto industriale, occorre distinguere le "unità sorgenti", di un determinato scenario incidentale, da quelle "bersaglio". Le unità sorgenti sono quelle che, in caso di guasto, possono danneggiare altre unità, a seguito di un incidente che si definisce "primario". Le unità bersaglio, invece, sono quelle che, una volta investite dall'evento primario, possono dar luogo ad un incidente rilevante, definito "incidente secondario" o "indotto". Mentre gli effetti primari possono essere solamente meccanici o termici (perché si ipotizza che un rilascio tossico non comporti il cedimento di una struttura bersaglio), tra gli effetti secondari sono considerate anche le emissioni di sostanze tossiche.

La metodologia di approccio sviluppata in questo studio, volta all'analisi di effetto domino nell'ambito del SIA, è in seguito descritta e applicata ad un caso pratico<sup>[1] e [2]</sup>. La procedura è strutturata in maniera da poter essere applicabile ad un codice per la ricomposizione del rischio. Essa si basa sui seguenti step fondamentali:

- 1) Individuazione delle apparecchiature e degli incidenti "sorgente";
- 2) Individuazione di "bersagli" che sono potenzialmente in grado di incrementare il danno dell'incidente primario;
- 3) Valutazione dell'affidabilità di eventuali protezioni del bersaglio in funzione dell'evento sorgente;
- 4) Diversificazione dei bersagli in funzione delle sostanze contenute;
- 5) Aree di danno degli incidenti indotti;
- 6) Pericolosità dei bersagli in base alle aree di danno;
- 7) Calcolo della probabilità, per un particolare bersaglio, di essere investito da un determinato scenario incidentale;
- 8) Analisi strutturale, per verificare la resistenza del bersaglio a sollecitazioni termiche e meccaniche, relative all'incidente;
- 9) Introduzione di nuovi scenari incidentali per l'analisi di sicurezza;
- 10) Rivalutazione, considerando anche l'effetto domino, delle frequenze di guasto precedentemente calcolate nell'analisi di sicurezza.

Nei seguenti paragrafi saranno considerati, uno ad uno, gli step precedenti, descrivendo quali sono le tecniche e le conoscenze necessarie per la loro applicazione.

I serbatoi, le apparecchiature e le tubazioni che si possono considerare possibili sorgenti di effetto domino sono quelli contenenti sostanze infiammabili o esplosive, considerate nella 334/99, parte seconda dell'allegato 2. Di particolare importanza, sono le sostanze seguenti, classificate in base a frasi di rischio definite dalla normativa:

- Esplosive o estremamente esplosive: R1, R2, R3, R4, R5, R6;
- Infiammabili, estremamente infiammabili o comburenti: R7, R8, R9, R10, R11, R12, R13;
- Sostanze esplosive o infiammabili se a contatto con aria o acqua: R14, R15, R15/29, R14/15, R16, R17, R18, R19;
- Sostanze esplosive o facilmente infiammabili in particolari condizioni: R44, R30.

Inoltre andrebbero considerate anche le apparecchiature non prese in considerazione al punto precedente, ma interessate da fluidi a condizioni di temperatura e pressione gravosi. Queste, naturalmente, andranno trattate in un secondo tempo e non rientreranno nella classificazione seguente, data la loro minor pericolosità rispetto alle altre.

Lo studio dell'effetto domino individua un insieme di incidenti concatenati tra loro ed innescati da un incidente primario che possono amplificare gli effetti e le conseguenze di quest'ultimo, sia dal punto di vista spazio-tempo, che dal punto di vista della magnitudo. L'incremento delle conseguenze si determina con un involuppo delle aree di impatto di tutti gli scenari incidentali, sia degli incidenti indotti, sia del primario.

Un'analisi preliminare viene condotta al fine di identificare i possibili incidenti primari che si possono verificare e le relative zone d'impatto. Queste vengono individuate dove gli effetti fisici dell'incidente sono tali da dar luogo al potenziale danno di altri componenti d'impianto, senza considerare la pericolosità per le persone o per l'ambiente. Solitamente si ha il danneggiamento delle apparecchiature a partire da valori soglia maggiori rispetto a quelli di inizio letalità, quindi, le relative zone d'impatto sono inferiori di quelle di danno per le persone.

Un metodo speditivo ma non per questo incompleto può essere l'analisi dei top event considerati nel RdS, utilizzando così le informazioni ricavabili da questo. Si dovrà scegliere, innanzitutto, gli scenari incidentali aventi una certa frequenza, ad esempio superiore a  $10^{-6}$  occasioni/anno, affinando e approfondendo lo studio in seguito. Nonostante tale metodo non sia esaustivo, nel senso che potrebbe trascurare alcune sorgenti di effetto domino, ha comunque la caratteristica di non richiedere tempi di applicazione eccessivi, se applicato a valle della stesura del RdS ed implementato in una procedura.



### 3.1.1 Criteri per gerarchizzare serbatoi, apparecchiature e tubazioni bersaglio

Il criterio in seguito descritto si basa su considerazioni di tipo conservativo (quantità coinvolte, tipo di rottura, soglie di riferimento per il calcolo, condizioni meteo, ecc.), in modo da non sottostimare la propagazione di un incidente primario.

Tuttavia, si vuole nello stesso tempo non fornire un metodo troppo oneroso, per costi e tempi di applicazione, ma atto ad individuare solamente gli obiettivi più significativi, cioè quelli che possono amplificare notevolmente effetti e conseguenze di uno scenario iniziale. Si devono quindi identificare i bersagli che, una volta investiti dall'incidente primario, potrebbero dar luogo ad un incidente indotto in grado di incrementare le conseguenze del primo in maniera considerevole, rispettando così il concetto fondamentale dell'effetto domino.

I principali fattori, che contribuiscono a rendere più "pericoloso" un bersaglio rispetto ad un altro, sono di seguito elencati, raggruppati in due categorie:

1) *Rischio intrinseco dell'apparecchiatura:*

- Tipo di sostanza;
- Quantità di fluido presente nel bersaglio considerato;
- Hold-up;
- Condizioni di esercizio (pressione e temperatura);
- Caratteristiche costruttive dell'apparecchio.

2) *Rischio legato al posizionamento e al tipo di scenario:*

- Layout dell'impianto e disposizione rispetto ad altri componenti;
- Quota di posizionamento;
- Fattori di vista;
- Presenza ed efficienza di protezioni attive e passive.

La prima di queste categorie è legata alla pericolosità in sé del bersaglio, la seconda, invece, contiene elementi da prendere in considerazione quando si valuta la probabilità di propagazione dell'evento incidentale.

#### ***Valutazione del rischio intrinseco per un bersaglio***

Il rischio intrinseco di un bersaglio potrebbe già indirizzare l'analista nell'esaminare inizialmente le apparecchiature più pericolose e trascurare, almeno in prima approssimazione, quelle che non rappresentano reali fonti di pericolo, qualora colpite da un incidente primario.

Dalle considerazioni precedenti, emerge l'esigenza di classificare dapprima, in maniera piuttosto rapida e speditiva, i possibili bersagli di un incidente primario, in base alla loro pericolosità intrinseca, stabilendo delle soglie minime, rispetto alle quali procedere nell'analisi

successiva. Una classificazione che tenga conto di tutti gli elementi precedenti, è quindi indispensabile per iniziare l'analisi dai punti più critici dell'impianto. Una soluzione al problema è rappresentata dall'utilizzo dei metodi ad indici, ad esempio come utilizzato nella stesura di un Rapporto di Sicurezza, per una classificazione indicativa della pericolosità. Il loro utilizzo però deve essere valutato con attenzione poiché essi tengono conto di alcune variabili che possono incrementare il rischio intrinseco di una sorgente, ma che non influiscono a rendere più pericoloso un bersaglio rispetto ad un altro. Alcune di queste variabili sono ad esempio i pericoli generali e particolari di processo dell'indice F&EI, oppure i fattori per il calcolo della probabilità dell'indice RBI.

### 3.1.2 Affidabilità delle protezioni

Per quanto riguarda la presenza di protezioni attive e passive, la loro efficacia si valuta in funzione dello scenario incidentale considerato. Dall'elenco dei bersagli presenti nell'area di danno dell'incidente primario, si escludono quelli aventi le seguenti caratteristiche:

- Dotati di adeguate protezioni passive (ad esempio tumulate o coibentate, tipo i serbatoi di stoccaggio di GPL soggetti a normativa nel DM 14.04.1994), salvo però, verificare se tali protezioni sono in grado di resistere a una determinata sovrappressione, o ad un certo irraggiamento, relativi proprio allo scenario considerato;
- Dotati di protezioni attive in grado di entrare in funzione dopo pochi secondi e di consentire la protezione dell'apparecchio per un tempo sufficiente all'intervento di altri sistemi di emergenza.

Non vengono ulteriormente considerati nemmeno i bersagli che sono totalmente schermati, rispetto al punto d'origine dell'incidente primario, da ostacoli di qualsiasi genere, tipo muri di contenimento o altre apparecchiature.

### 3.1.3 Caratteristiche delle sostanze contenute

I bersagli individuati vengono suddivisi in tre categorie a seconda della sostanza contenuta:

- Sostanze che possono creare danni solo per effetti tossici;
- Sostanze infiammabili ed esplosive, ma non tossiche;
- Sostanze esplosive o infiammabili, ma nello stesso tempo anche tossiche, oppure quelle i cui fumi di combustione contengono sostanze tossiche.

Per la prima di queste categorie si valutano le aree di danno che potenzialmente un loro cedimento catastrofico può comportare, considerando solamente il "bersaglio uomo", mentre





per le altre si valuta sia l'area in cui si possono avere lesioni irreversibili per l'uomo, sia l'area di potenziale danno ad altre apparecchiature.

### 3.1.4 Area di danno degli incidenti indotti

I vari elementi che contribuiscono ad aumentare il rischio intrinseco, concorrono tutti ad incrementare l'area di danno generata da rottura catastrofica di un bersaglio, se questo viene investito dall'incidente primario. Per questo, il criterio in seguito descritto, classifica la pericolosità dei bersagli in base all'area di danno del possibile incidente indotto, proprio perché essa si ritiene direttamente proporzionale al rischio intrinseco del bersaglio.

Per le apparecchiature la rottura catastrofica è seguita da un rilascio istantaneo dell'intero hold-up contenuto in essa e da un successivo rilascio di tutto il quantitativo contenuto nelle tubazioni (tra intercettazioni di blocco affidabili, tipo valvole di non ritorno o a relé) adducanti all'apparecchiatura stessa.

Per le tubazioni, si considera rottura catastrofica:

- 100% del DN, quando questo è inferiore a 200 mm;
- 20% del DN, quando questo è superiore a 200 mm.

Per le tubazioni, l'hold-up è quello compreso tra intercettazioni di blocco affidabili. A seconda dell'incidente primario e del tipo di bersaglio che viene investito, che per questo può collassare, si possono avere diversi scenari indotti, quindi si devono fare alcune considerazioni su quali siano effettivamente le aree di danno da tenere in considerazione, per gerarchizzare le apparecchiature in base al rischio intrinseco.

Serbatoi, tubazioni e apparecchiature contenenti sostanze infiammabili o esplosive, se investiti direttamente dal **fuoco** o da **radiazione termica**, possono collassare dando luogo ai seguenti scenari indotti:

- *Jet fire* (nel caso di gas, gas compressi o liquefatti);
- *Pool fire* (nel caso di liquidi o gas liquefatti);
- *Esplosione* dell'apparecchio (nel caso di gas, gas compressi o liquefatti e liquidi che durante il riscaldamento raggiungono la temperatura di ebollizione);
- *Uvce* (nel caso di gas, gas compressi o liquefatti): molto meno probabile dei precedenti, si ha quando l'apparecchio non è ingolfato nella fiamma, ma collassa per effetto della radiazione termica, la quale però non è in grado di innescare il combustibile istantaneamente. Questo permette la formazione di una nube esplosiva, che in seguito può trovare un innesco ritardato nell'impianto;
- Emissione di una *nube tossica* (se la sostanza contenuta è solamente tossica e non ha caratteristiche d'infiammabilità, altrimenti s'incendirebbe). Una nube tossica può anche seguire un'esplosione.

Quando le apparecchiature di processo sono interessate da **sovrappressione**, poiché l'onda d'urto può provocare ribaltamenti, rotture e fuoriuscite, si possono generare i seguenti scenari:

- *Jet fire e pool fire*, qualora il fluido fuoriuscito si inneschi istantaneamente;
- *Uvce*, se la nube esplosiva formatasi trova un innesco ritardato;
- Emissione di una *nube tossica*.

Le aree di danno da prendere in considerazione sono quelle in cui si creano effetti fisici al di sopra dei limiti soglia, delineati nel “Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici, 9 maggio 2001”. Si deve distinguere se si considera l'effetto domino rispetto alla pericolosità per le apparecchiature, utilizzando i dati relativi alla colonna 5, oppure rispetto alla pericolosità per le persone, con i dati relativi alla colonna 2. Nel primo caso, non viene esaminata la possibilità di formazione di una nube tossica e si considerano “a rischio d'incidente rilevante”, tutti i bersagli la cui area di danno è superiore a quella dell'incidente primario: per il calcolo delle zone d'impatto si possono utilizzare, date le caratteristiche del bersaglio, software di simulazione oppure metodi empirici più speditivi.

Nel caso invece si consideri la pericolosità di un incidente indotto per le persone, vanno calcolate le zone d'impatto, a seconda del tipo di incidente, considerando l'area in cui i valori superano quelli relativi all'inizio di letalità, riportati nel decreto, usando comunque software o metodi empirici. In questo caso conviene considerare solamente quei bersagli che provocherebbero vittime al di fuori dello stabilimento e classificare la loro pericolosità in funzione dell'ampiezza delle zone d'impatto.

### 3.1.5 Pericolosità dei bersagli in base all'area di danno.

Come già più sopra detto, si classifica la pericolosità dei bersagli in base all'area di danno del possibile incidente indotto, proprio perché essa si ritiene direttamente proporzionale al rischio intrinseco del bersaglio.

Per l'analisi successiva vengono considerate tutte le apparecchiature il cui cedimento provocherebbe:

- Danno esterno ai confini di stabilimento, considerando il bersaglio uomo;
- Area di danno superiore a quella dell'incidente primario, considerando il danno per altre apparecchiature

In base all'estensione delle aree di danno ipotizzabili si gerarchizza quindi la pericolosità delle apparecchiature bersaglio.



### 3.1.6 Valutazione del rischio legato al posizionamento e al tipo di scenario: calcolo della probabilità di interessamento

Mentre, come visto, si può generalizzare la metodologia per la valutazione del rischio intrinseco di una apparecchiatura, ben più complesso e non generalizzabile risulta lo studio del rischio legato al posizionamento e al layout d'impianto. Questo aspetto, infatti, è molto specifico e richiede una rassegna della disposizione di apparecchiature e tubazioni direttamente nell'impianto preso in considerazione. È molto importante calcolare il rischio connesso con il posizionamento dell'apparecchiatura e col tipo di scenario considerato, in quanto, dai fattori che lo compongono, si stima la probabilità con cui un dato bersaglio può essere investito dall'incidente considerato.

Le caratteristiche per ogni scenario sorgente, che influiscono sulla probabilità per un dato bersaglio di essere investito dall'incidente, sono di seguito illustrate.

#### Jet fire

Per determinare la probabilità con cui una certa apparecchiatura può essere investita da un "jet fire", si devono considerare:

- Forma e dimensioni del jet: in particolare, interessa la forma geometrica della superficie esterna della fiamma (normalmente conica), in funzione della direzione di uscita dalla tubazione o dall'apparecchiatura, l'angolo di apertura all'uscita del foro, la lunghezza e la turbolenza interna;
- Forma e dimensioni della superficie attorno alla fiamma;
- Ostacoli che può incontrare il getto incendiato: in tal caso si dovrà valutare come si deforma la fiamma;
- Posizione reciproca tra il foro dove ha origine il jet e il bersaglio;
- Fattori di vista: si possono calcolare analiticamente per superfici semplici, oppure con l'utilizzo di codici di calcolo menzionati in letteratura, utilizzabili anche per geometrie complesse.

I vari punti precedenti richiedono un attento studio sulla fluidodinamica dei jet incendiati, o, almeno in prima approssimazione, alcune considerazioni che diano risposte di tipo conservativo, per non rendere troppo onerosa l'analisi dell'effetto domino. Vi sono in commercio codici che si basano su un'analisi CFD (Computational Fluid Dynamics) che permettono di analizzare la fluidodinamica di un getto anche in presenza di ostacoli e di valutare il calore che colpisce un bersaglio qualsiasi.

**Pool fire**

Nel caso l'incidente primario sia un "pool fire", bisogna tenere conto di:

- Quota di posizionamento dell'apparecchio, in quanto l'irraggiamento non coinvolge bersagli posti a determinate altezze;
- Contenimenti e canali di scolo in grado di arginare la pozza e deviarla;
- Effettiva natura del terreno;
- Fattori di vista tra l'incendio generato e il bersaglio, considerando anche la presenza di eventuali ostacoli;

**UVCE e VCE**

Quando l'incidente primario è un "Vce" o un "Uvce", l'onda di pressione coinvolge determinati bersagli a seconda delle seguenti variabili:

- Dimensione della nube esplosiva, quantità e sostanza in essa contenuta;
- Posizione della nube nell'aria al momento dell'innesco. Questa dipende dal layout dell'impianto, che permetterà passaggi più accessibili di altri, e dalle condizioni meteorologiche (frequenza delle classi di stabilità nella zona, della velocità e della direzione del vento);
- Presenza di ostacoli sui quali s'infrange l'onda o dai quali essa viene deviata. Questo punto richiede uno studio sulla riflessione, diffrazione e rarefazione creata dalle onde di pressione in ambiente confinato, così da determinare il carico impresso. Inoltre, serve valutare se ci sono direzioni preferenziali di sfogo delle esplosioni, dovute, per esempio, alla presenza di parti più o meno aperte o cedevoli.

**Flash fire**

Normalmente non si considera il "Flash-fire" come una possibile causa di effetto domino, questo per il fatto che è un fenomeno di rapida durata (qualche secondo), non in grado di distruggere le apparecchiature, ma di creare solamente danni a cavi elettrici e alla strumentazione.

**BLEVE**

Per quanto riguarda il "Bleve" si considera il possibile danno ad apparecchiature, legato solamente alla sovrappressione originata in questo incidente, poiché la radiazione, se pur molto intensa, avviene per un periodo di tempo normalmente inferiore al minuto, come può essere dimostrato tramite la seguente equazione empirica (tratta dallo Yellow Book del TNO):

$$t = c_1 \cdot m^{0.26}$$

Dove:

$c_1$ : 0.852 s/kg<sup>0.26</sup>;

t: durata del fireball, in s;



m: massa del materiale infiammabile, in kg.

Calcolando in tal modo la durata di un fireball, dovuto per esempio ad un rilascio istantaneo di 100 tonnellate di LPG, questa risulta di circa 20 secondi.

Si può avallare questo calcolo con la formula ottenuta da due ricercatori della NASA, Gayle e Bransford (1965):

$$t = c_2 \cdot m^{0.349}$$

Dove:

$c_2$ : 0.196 s/lb<sup>0.349</sup>;

t: durata del fireball, in s;

m: massa del materiale infiammabile, in lb.

In questo caso la durata del fireball di 100 tonnellate di LPG è di circa 15 secondi.

Per quanto detto, si può ritenere, in prima approssimazione, che un bleve provochi danno ad altre unità solo per proiezione di frammenti e per l'onda di sovrappressione, generatasi con epicentro nel punto in cui si trova l'apparecchiatura sorgente dell'incidente.

Per quanto riguarda la proiezione di frammenti, la probabilità di esserne bersaglio è funzione delle seguenti variabili:

- Numero di frammenti generati, forma e dimensioni: questi dati dipendono sia dalle caratteristiche costruttive e di esercizio del serbatoio, sia anche dal tipo di esplosione che si genera;
- Velocità iniziale dei "missili primari" (cioè pezzi del serbatoio esploso, scagliati dall'onda d'urto) e distanza alla quale possono venire proiettati, che dipende dall'angolo iniziale di proiezione;
- Presenza o meno di ostacoli, che possono intercettare i frammenti prima che arrivino alla massima distanza di caduta;
- Proiezione di "missili secondari": questi sono oggetti collocati nelle vicinanze del luogo dove ha avuto origine l'esplosione, trascinati dall'onda di pressione che ha proiettato anche i frammenti "primari".

Per i possibili "bersagli" di un Bleve, la probabilità di essere colpiti da frammenti, data la sua valenza essenzialmente puntuale, è solitamente molto inferiore di quella di essere investiti dall'onda di pressione, inoltre, uno studio sul moto effettivo dei missili è molto complicato. Si cercherà allora di valutare solamente la probabilità per i bersagli di venire interessati dalla sola onda di pressione, qualora l'incidente origine sia appunto un Bleve. Nel caso dell'onda d'urto, andranno considerate le seguenti caratteristiche:

- Estensione dell'area di danno, determinabile con software di simulazione o con il metodo empirico del TNO;

- Presenza di ostacoli, che possono deformare l'onda, o di cammini preferenziali che questa può trovare.

### 3.1.7 Analisi strutturale: Verifica di resistenza a sollecitazioni meccaniche e termiche.

I calcoli di resistenza alle sollecitazioni meccaniche indotte dall'incidente "iniziatore", possono essere condotti in vari modi. Durante lo studio presente è stata fatta una ricerca sull'attuale stato dell'arte circa il modo di affrontare tale problema che risulta effettivamente molto complesso e richiede tempi di svolgimento piuttosto lunghi. Dalla ricerca effettuata, risulta che i modi descritti in letteratura tecnica e utilizzati dalle aziende che si occupano di rischio industriale si possono raggruppare essenzialmente come seguito illustrato:

- Confronto con dati storici: analizzando situazioni incidentali con caratteristiche simili a quelle dell'incidente considerato, si valutano quali potrebbero essere i meccanismi e i tempi di cedimento di particolari bersagli investiti;
- Analisi e confronto con dati sperimentali riscontrabili in letteratura: si possono trovare dati ottenuti sperimentalmente sulla resistenza a determinate sollecitazioni di semplici elementi costruttivi, come ad esempio nella norma UNI 9503, per quanto riguarda le sollecitazioni termiche;
- Modelli probabilistici, tipo "funzioni di probit": alcuni studi, come visto, prevedono l'utilizzo di tali funzioni per la sovrappressione e per l'irraggiamento;
- Utilizzo di codici ad elementi finiti: in commercio vi sono complessi e completi programmi, basati su codici ad elementi finiti, tra cui ad esempio ANSYS;
- Software di simulazione: in campo internazionale, sono stati sviluppati altri software che si occupano dell'analisi termica e della risposta meccanica di serbatoi e apparecchi "ingolfati" nel fuoco (vedi Tabella 5);

Tabella 5: Software di analisi termica e meccanica

Software	Azienda produttrice
FRED	Shell Global Solution
BLOWFIRE	Shell
HEATUP	Shell
RADTHERM	Thermoanalytics (XC Engineering per l'Italia)
ENGULF	AEA Technology
TCTCM	Queen University Ontario
PIA	SINTEF (Applied Thermodynamics Division)



Software	Azienda produttrice
PLGS	University of New Brunswick
VT*VESSEL	Veritec
VESSFIRE	Petrell.no

### 3.1.8 Valutazione della frequenza degli incidenti indotti

La frequenza con cui un bersaglio può venire investito da un particolare incidente primario viene ottenuta dal prodotto tra la probabilità di collasso e la frequenza dell'evento primario. Per lo stesso bersaglio vanno considerati tutti gli incidenti che lo possono coinvolgere, iterando il procedimento. Alla fine per uno stesso potenziale bersaglio si ottengono varie frequenze di collasso, ognuna legata ad un diverso incidente sorgente. La somma di queste viene comparata con la frequenza di guasto che avrebbe il bersaglio, calcolata con le tecniche della tradizionale analisi del rischio con le quali non verrebbe valutata la possibilità di effetto domino.

### 3.1.9 Introduzione di nuovi scenari incidentali per l'analisi di sicurezza

Considerando solo gli incidenti indotti con la propria frequenza, si ottengono nuovi scenari incidentali da prendere in considerazione nell'analisi di sicurezza. In particolare si considerano a monte della metodologia i nuovi scenari che contemplano esplosioni o incendi per valutare una ulteriore probabilità di propagazione.







## **PARTE II – Analisi termica e strutturale di apparecchiature soggette ad irraggiamento**

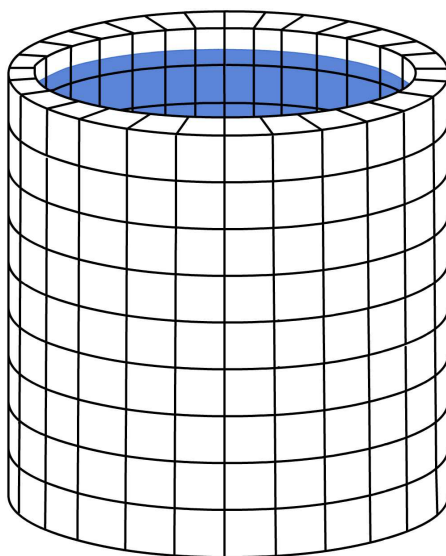




## 4 ANALISI DELLA SUCCESSIONE DEGLI EVENTI

### 4.1 Descrizione della successione degli eventi

Lo studio di apparecchiature soggette a radiazione termica richiede la scelta di un congruo modello fisico. In questo studio si è scelto di fare riferimento ad un serbatoio verticale di forma cilindrica, parzialmente riempito di liquido in equilibrio di fase con i suoi vapori, dotato di valvola di sfiato. Per la rappresentazione dello scambio termico si farà riferimento ad un modello a nodi termici. Questo permette di suddividere la parete del serbatoio e il fluido in esso contenuto in una serie di sottounità, in grado di rappresentare lo scambio termico tra la superficie del serbatoio ed il fluido contenuto.



*Figura 3: Serbatoio cilindrico diviso in nodi termici*

Il numero congruo di nodi termici dipende dal grado di approssimazione del modello: un centinaio di nodi dà l'ordine di grandezza che consente un'analisi quantomeno accettabile. Per non appesantire l'esposizione di questo studio, si è scelto di fare riferimento ad un esiguo numero di nodi, a vantaggio della comprensione del metodo.

Si riassume di seguito la successione degli eventi di un serbatoio soggetto a radiazione termica.

La radiazione termica incidente su un serbatoio comporta l'aumento della temperatura della parete. Il fenomeno di conduzione termica contribuisce al trasferimento di calore dalla parete al fluido contenuto nel serbatoio. È noto che il coefficiente di scambio termico del liquido è, almeno in prima approssimazione, due ordini di grandezza più grande rispetto a quello del gas. Per tale motivo, a parità di calore incidente, il gas tende a raggiungere temperature molto più elevate rispetto al liquido, in tempi relativamente brevi. Tale aspetto è particolarmente importante nel momento in cui si valuta la zona del serbatoio sottoposta a maggiore intensità di radiazione.

L'assorbimento di calore comporta l'incremento della temperatura del liquido, che inizialmente assorbe calore sensibile per poi tendere ad evaporare, con conseguente aumento della pressione interna. Dal punto di vista strutturale, ciò equivale ad un incremento della tensione equivalente. L'incremento di temperatura della parete contribuisce sensibilmente all'abbassamento della tensione ammissibile del materiale cui è costituito. Questi due aspetti costituiscono un effetto negativo ai fini della tenuta strutturale, in quanto favoriscono la possibilità del superamento della tensione equivalente rispetto alla tensione ammissibile, con conseguente collasso della struttura.

I serbatoi sono normalmente dotati di una valvola di sicurezza, che, attraverso la sua apertura, consente di bloccare l'eventuale incremento di pressione all'interno del serbatoio. L'apertura della PSV (Pressure Safety Valve) comporta, almeno in prima approssimazione, il passaggio del sistema da isocoro ad isobaro. Se il tempo in cui permane la radiazione termica è sufficientemente lungo e l'intensità sufficientemente elevata, l'evaporazione del liquido può essere totale, con la conseguente presenza della sola fase gas all'interno del serbatoio. A questo punto il sistema gassoso è incapace di assorbire il calore che precedentemente smaltiva il liquido in ebollizione, e ciò comporta un repentino aumento della temperatura della parete con conseguente abbattimento della tensione ammissibile, successivo collasso della struttura con fuoriuscita del gas ed immediato innesco esplosivo. Oltre a tale evento, bisogna tener presente che la radiazione termica può comportare la formazione di una falla sul serbatoio, prima ancora che si raggiunga la completa evaporazione del liquido. In tal caso, se il fluido si trova ad una temperatura sensibilmente superiore alla temperatura di ebollizione normale, si ha una violenta evaporazione del liquido con conseguente sprigionamento di energia. Tecnicamente tale incidente è noto come BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion).

Dalla descrizione del fenomeno appare chiaro che lo studio deve essere condotto facendo riferimento ad un'analisi termica, che esprima l'andamento della temperatura della parete nel tempo, ed un'analisi strutturale, che correli contemporaneamente l'andamento della tensione equivalente e della tensione ammissibile nel tempo. L'intersezione di queste ultime due curve consente di determinare il tempo di cedimento della struttura. Inoltre appare opportuno analizzare con particolare attenzione la tenuta strutturale dei punti più critici del serbatoio, come ad esempio saldature e appoggi sui basamenti.

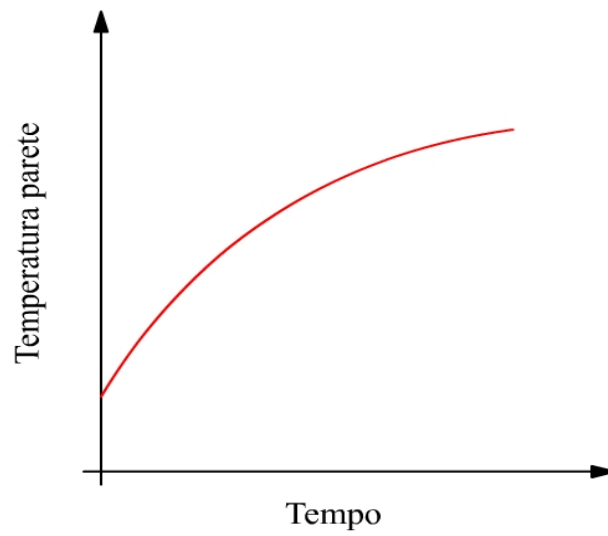


Figura 4: Andamento qualitativo della temperatura della parete

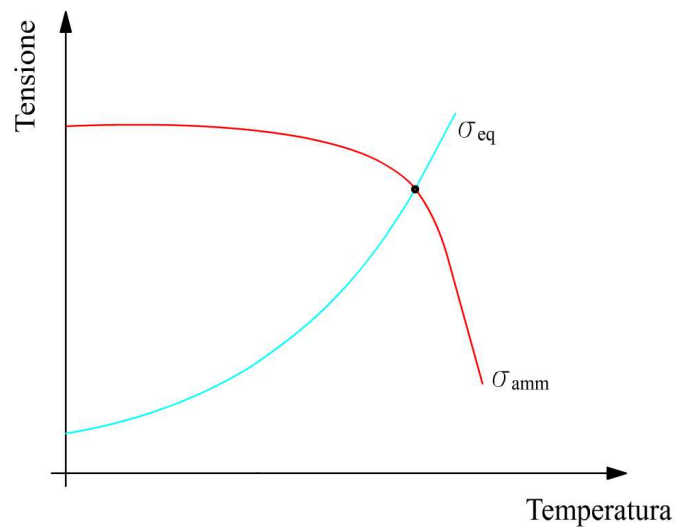


Figura 5: Andamento qualitativo della tensione della parete nel tempo nella sua parte finale





## 5 METODI SEMPLIFICATI

L'analisi termica di strutture sottoposte a radiazione termica può essere affrontata con tre metodi semplificati, proposti dall'UNI, dal TNO e dall'API.

### 5.1 Norma UNI 9503

#### 5.1.1 Descrizione

Il metodo proposto dall'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione), nella norma 9503, consente di calcolare la temperatura della parete di una struttura in acciaio dopo un certo tempo di esposizione al fuoco. Il calcolo si esegue stabilendo un bilancio tra la quantità di energia termica trasmessa all'elemento dai gas di combustione, e l'incremento di energia interna propria dell'elemento stesso.

Supponendo che non vi sia dispersione di energia attraverso l'elemento, il flusso termico è dato dalla seguente relazione:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \alpha \cdot S \cdot (T_f - T_p) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot (T_f^4 - T_p^4) = \rho_p \cdot c_a \cdot V \cdot \frac{\Delta T_p}{\Delta t}$$

dove:

- $\alpha$  : coefficiente di convezione termica, in  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$  ;
- $S$  : superficie della struttura esposta al fuoco, in  $\text{m}^2$  ;
- $T_p$  : temperatura della parete della struttura, in  $\text{°K}$  ;
- $\sigma$  ; costante di Stefan-Boltzmann, pari a  $5.77 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}^4}$  ;
- $\varepsilon$  : emissività dei gas di combustione, adimensionale;
- $\rho_p$  : densità dell'acciaio, in  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  ;
- $c_a$  : capacità termica dell'acciaio, in  $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°C}}$  ;
- $V$  : volume totale della struttura, in  $\text{m}^3$  ;
- $\Delta T_p$  : incremento di temperatura della struttura, in  $\text{°C}$  ;

$\Delta t$ : intervallo di tempo, in sec.

Dalla formula si nota che nel termine di irraggiamento si è considerata la superficie  $S$  della struttura piuttosto che la superficie del corpo irraggiante, ovvero della fiamma. Questa semplificazione consente di evitare lo studio, peraltro oneroso, della dimensione della fiamma, ponendo per semplicità che la fiamma abbia la stessa superficie della struttura irraggiata.  $T_f$  è la temperatura dei gas di combustione che lambiscono la parete della struttura. Essa viene espressa in funzione del tempo  $t$  di esposizione al fuoco, secondo la seguente relazione empirica:

$$T_f = T_0 + 345 \cdot \log\left(\frac{8 \cdot t}{60} + 1\right)$$

dove:

$T_0 = 25$  °C, temperatura ambiente.

Il calcolo dell'incremento di temperatura viene eseguito con un procedimento a step, secondo la seguente relazione:

$$\Delta T_{p/i} = \frac{\alpha \cdot (T_{f/i-1} - T_{p/i-1}) + \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_{f/i-1}^4 - T_{p/i-1}^4)}{\rho_p \cdot c_p} \cdot \frac{S}{V} \cdot \Delta t$$

Il rapporto  $\frac{S}{V}$  è noto con il nome di fattore di massività.

### 5.1.2 Proprietà meccaniche

La variazione, con la temperatura, del limite convenzionale di snervamento dell'acciaio, può essere qualitativamente rappresentato con la Figura 6, dove compare il fattore di riduzione della tensione di snervamento 0.2%, ovvero  $\frac{\sigma_{s,0.2,T}}{\sigma_{s,0.2,20^\circ C}}$ .



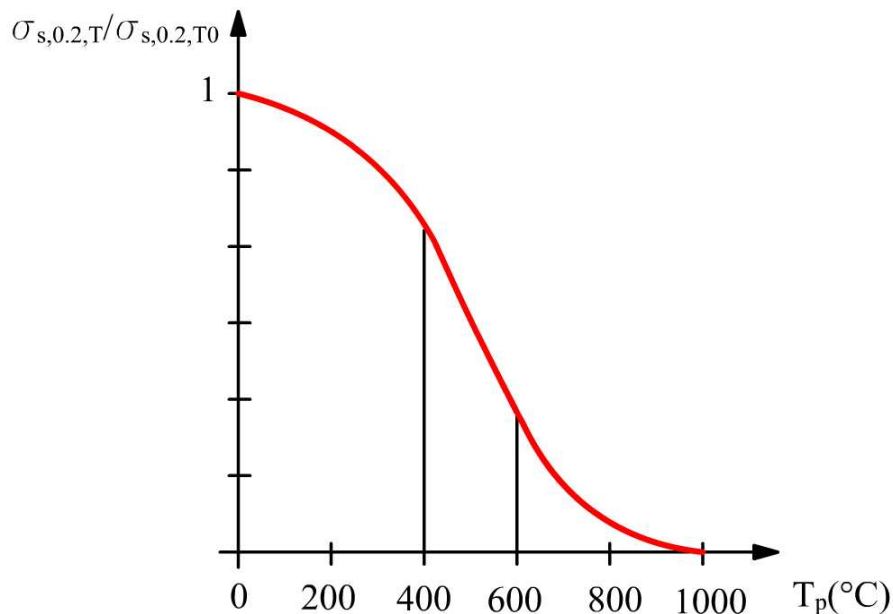


Figura 6: Limite di snervamento dell'acciaio in funzione della temperatura

Dalla Figura 6: Limite di snervamento dell'acciaio in funzione della temperatura si evince che nell'intervallo di temperatura 400-600 °C, la tensione di snervamento subisce una drastica diminuzione. Per questo motivo è possibile ipotizzare che, raggiunta una temperatura pari a 500 °C, la struttura collassi. Fine di questo metodo è proprio valutare il tempo impiegato, dalla struttura esposta al fuoco, per raggiungere i 500 °C.

### 5.1.3 Caso pratico

Viene descritto di seguito un caso pratico di calcolo, utilizzando le ipotesi sopra esposte. Si ipotizza che la struttura irradiata sia un serbatoio cilindrico orizzontale di diametro  $D$  1,8 m e di spessore  $s$  14 mm. Si suppone, inoltre, che il serbatoio sia completamente ingolfato dalla fiamma e quindi il rapporto di massività è pari a:

$$\frac{S}{V} = \frac{D}{s(D-s)} \cong 70m^{-1}$$

Per il calcolo si è utilizzato uno step  $\Delta t$  di 10 secondi. I valori dei parametri sono:

$$\rho_p = 7850 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3};$$

$$c_p = 520 \frac{\text{J}}{\text{Kg}^\circ\text{C}};$$

$$\varepsilon = 1;$$

$$\alpha = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2^\circ\text{C}}, \text{ ipotizzando una convezione naturale dell'aria.}$$

Con queste ipotesi si ottiene che il tempo impiegato dal serbatoio per raggiungere  $500^\circ\text{C}$  è pari a 850 secondi, ovvero circa 14 minuti, con un valore di irraggiamento pari a circa  $38 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$ , come evidenziato dalla Figura seguente.

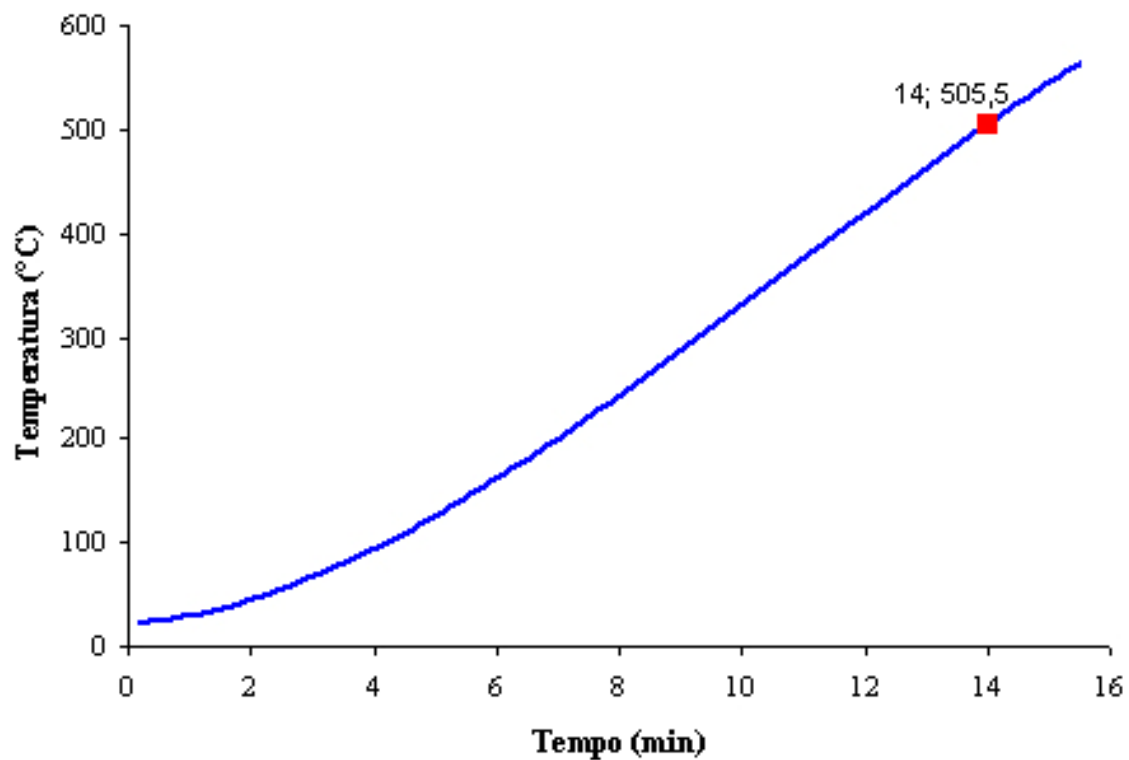


Figura 7: Variazione della temperatura della parete nel tempo



## 5.2 Metodo TNO

### 5.2.1 Descrizione

Il metodo del TNO (“The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research”) permette di calcolare il flusso di calore di irraggiamento, espresso in  $\frac{kW}{m^2}$ , una volta fissata la temperatura di collasso della struttura, anche in questo caso posta a 500 °C.

Il bilancio termico di riferimento è basato sull’uguaglianza tra calore proveniente dall’incendio assorbito dalla struttura, e calore di irraggiamento e di convezione ceduto dalla parete non irraggiata verso l’ambiente esterno:

$$a \cdot I = \frac{S_u}{S_i} \cdot \left[ \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_a^4) + \alpha \cdot (T_p - T_a) \right]$$

dove:

- $I$  : calore di irraggiamento proveniente dalla fiamma,  $\frac{W}{m^2}$ ;
- $a$  : coefficiente di assorbimento della parete della struttura, adimensionale;
- $\varepsilon$  : emissività della parete, adimensionale, adimensionale;
- $S_u$  : superficie totale della struttura, in  $m^2$ ;
- $S_i$  : superficie della struttura irraggiata, in  $m^2$ ;
- $T_a$  : temperatura ambiente, 25 °C.

In funzione dell’intensità di irraggiamento, alla quale può essere esposta una superficie, e della relativa durata, si possono individuare due livelli di danno:

- livello di danno 1: innesco di superfici esposte all’irraggiamento e/o collasso degli elementi strutturali;
- livello di danno 2: apprezzabile deformazione degli elementi strutturali, senza collasso.

L’intensità di irraggiamento, necessaria per produrre gli effetti sopra esposti, è inversamente proporzionale alla durata dell’esposizione. Più elevato è il tempo di esposizione, più bassa sarà l’intensità di irraggiamento richiesta per determinare conseguenze significative sui materiali interessati dall’irraggiamento. Al di sotto di un certo valore di intensità di irraggiamento, non si avranno più apprezzabili danni alla struttura, indipendentemente al tempo di esposizione. Tale valore è definito come intensità di irraggiamento critica.

### 5.2.2 Intensità di calore critico per livello di danno 1

Si procede alla determinazione dell'intensità di irraggiamento critico per livelli di danno 1. I valori dei parametri utilizzati sono i seguenti:

$$a = 1;$$

$$\varepsilon = 1;$$

$$T_p = 500 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\alpha = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}}.$$

Nella tabella seguente si riassumo i risultati ottenuti, al variare dei parametri:

Tabella 6: Flusso di calore critico per livello di danno 1

$\frac{S_u}{S_i}$	<b>a</b>	<b>Flusso di calore critico</b> $\left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right)$
4	1	<b>99.6</b>
4	0.7	<b>142.3</b>
1	1	<b>24.9</b>
1	0.7	<b>35.6</b>

### 5.2.3 Intensità di calore critico per livello di danno 2

Si ipotizza che, sulla base di prove sperimentali, la deformazione di una struttura di acciaio avvenga attorno ai 200 °C. Questo è il valore attribuito a  $T_p$ . Nella tabella seguente si riassumo i risultati ottenuti al variare dei parametri:

Tabella 7: Flusso di calore critico per livello di danno 2

$\frac{S_u}{S_i}$	<b>a</b>	<b>Flusso di calore critico</b> $\left(\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right)$
4	1	<b>16.7</b>
4	0.7	<b>23.9</b>
1	1	<b>4.1</b>
1	0.7	<b>5.9</b>



#### 5.2.4 Durata di esposizione all'irraggiamento

Per raggiungere le temperature che conducono al collasso termico di una struttura o alla deformazione della stessa, è necessario che le superfici siano esposte alla radiazione per un tempo sufficiente. Sono disponibili a tal riguardo i risultati di prove sperimentali, condotte però su strutture tipo travi di acciaio e perciò estendibili ai serbatoi con una certa cautela. In particolare si è provato che una trave in acciaio, sottoposta ad irraggiamento termico di  $100 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ , per livello di danno 1, ha raggiunto il collasso in circa 20 minuti. La stessa trave, sottoposta ad irraggiamento termico di  $25 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ , per un livello di danno 2, ha raggiunto la deformazione plastica in circa 15 minuti.

In base a questi risultati, storicamente è stato considerato come riferimento nell'analisi di sicurezza la soglia di irraggiamento di  $37.5 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ , applicata per 15 minuti, poiché in queste condizioni è plausibile ipotizzare al massimo la deformazione e non il collasso delle strutture.

### 5.3 Sperimentazioni API

L'API (American Petroleum Institute) ha eseguito una serie di sperimentazioni [27] su piatti in acciaio esposti a fiamma diretta, al fine di verificare la temperatura raggiunta dal piatto, il corrispondente limite di snervamento e il tempo di rottura. Lo scopo è stato quello di estrapolare tali risultati su serbatoi investiti da radiazione termica, nel caso in cui la fiamma non lambisca la parete a contatto diretto con il liquido. I risultati vengono riportati nei seguenti diagrammi.

La temperatura di 500 °C viene raggiunta in 1.1, 4.6 e 9.3 minuti, rispettivamente per piatti di spessore 1/8, 1/2 e 1 pollice. Sono quindi tempi lontani dai 14 minuti calcolati con il metodo UNI, anche se il confronto diventa difficile per le ipotesi di base diverse.

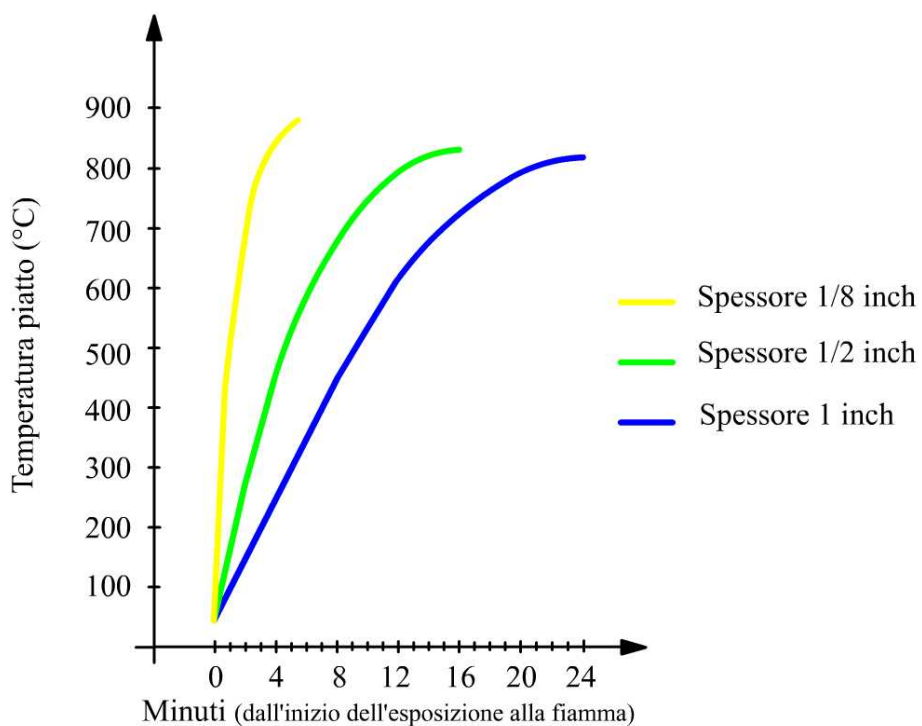


Figura 8: Temperatura del piatto

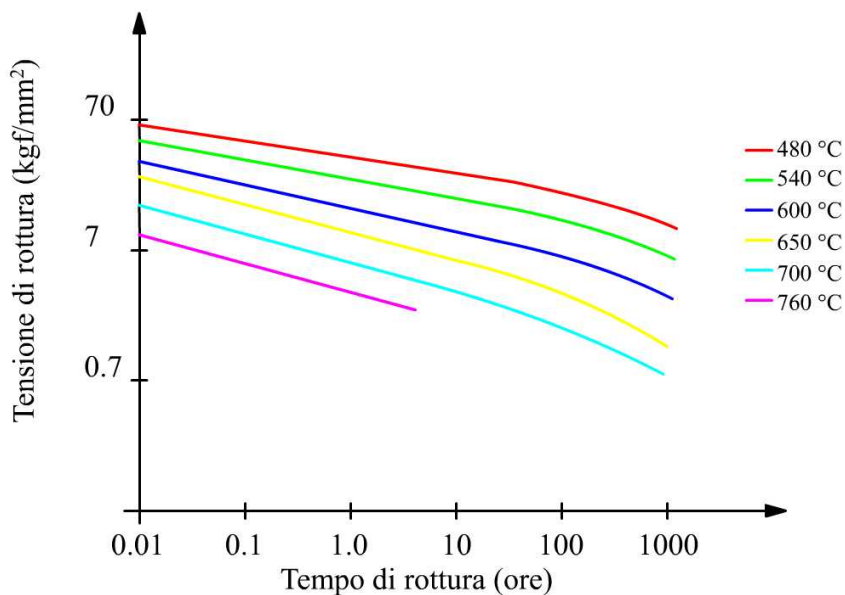


Figura 9: Tensione di rottura del piatto

Dal diagramma di Figura precedente si ricava la tensione che provoca la rottura del materiale ad una certa temperatura, dopo un certo tempo di esposizione alla fiamma.



## 5.4 Limiti dei metodi semplificati

I metodi proposti dall'UNI e dal TNO, e le sperimentazioni dell'API sono stati creati per lo studio dell'effetto dell'irraggiamento su profilati, travi, piatti o strutture simili in acciaio. Per tale motivo, il tentativo di estrapolarne dei risultati e renderli validi per i serbatoi, appare inopportuno, non solo per la palese differenza strutturale. I metodi semplificati possono essere considerati validi, in prima approssimazione, per il calcolo della temperatura della parete a contatto con il gas. In questo caso infatti, il fluido ha un coefficiente di scambio termico piuttosto ridotto, tale da poter essere considerato anche nullo, in modo da trascurare la sua capacità di asporto di calore.

Lo studio condotto con questi metodi non tratta con sufficiente dettaglio alcuni aspetti fisici di particolare importanza:

- il calore proveniente da fiamma, poiché è la fonte dell'irraggiamento: un'approssimazione eccessiva su questo termine, comporta un'approssimazione, quantomeno dello stesso ordine, su tutto il resto della trattazione;
- la mancanza dell'ipotesi del fluido all'interno del serbatoio, in quanto capace di assorbire parte del calore;
- mancanza di prove sperimentali condotte su serbatoi, che comprovino la validità di questi metodi semplificati.

Appare quindi evidente la necessità di affrontare lo studio dell'analisi termica e strutturale di apparecchiature soggette a radiazione termica con un maggiore livello di dettaglio.







## 6 ANALISI TERMICA

L'analisi termica di un serbatoio soggetto ad irraggiamento richiede un bilancio di energia e un bilancio di massa. Il bilancio termico implica la conoscenza del trasferimento di calore dalla fiamma alla parete della struttura, dalla parete al fluido contenuto e, nel caso di apertura della PSV, dall'interno del serbatoio verso l'ambiente esterno. In quest'ultimo caso è richiesto anche un bilancio di massa. Si tratta quindi di analizzare un fenomeno variabile nel tempo.

### 6.1 Bilanci termici

I bilanci termici sono stati eseguiti con riferimento alla successione degli avvenimenti che caratterizzano l'evento:

- trasmissione di calore dalla fiamma alla parete del serbatoio;
- trasmissione di calore dal serbatoio al fluido;
- trasmissione di calore liquido-gas;
- eventuale apertura della valvola di sicurezza.

Come precedentemente anticipato, si fa riferimento ad un modello a nodi termici, ipotizzando costanti le temperature nelle diverse zone della parete, del liquido e del gas. Al fine del calcolo dei bilanci termici, si è fatto riferimento ai nodi rappresentati nella seguente immagine:

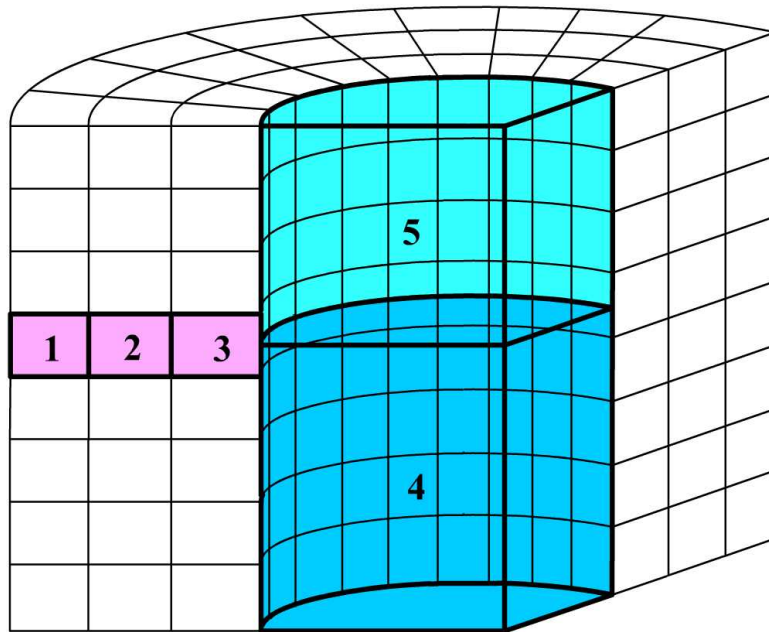


Figura 10: Sezione serbatoio con in evidenza i nodi oggetto dei bilanci termici

Nodo 1, 2, 3: suddivisione parete del serbatoio;

Nodo 4: nodo del liquido;

Nodo 5: nodo del gas.

Per ogni nodo numerato, approssimato ad un parallelepipedo, si è proceduto ad eseguire il rispettivo bilancio termico.



## Nodo 1

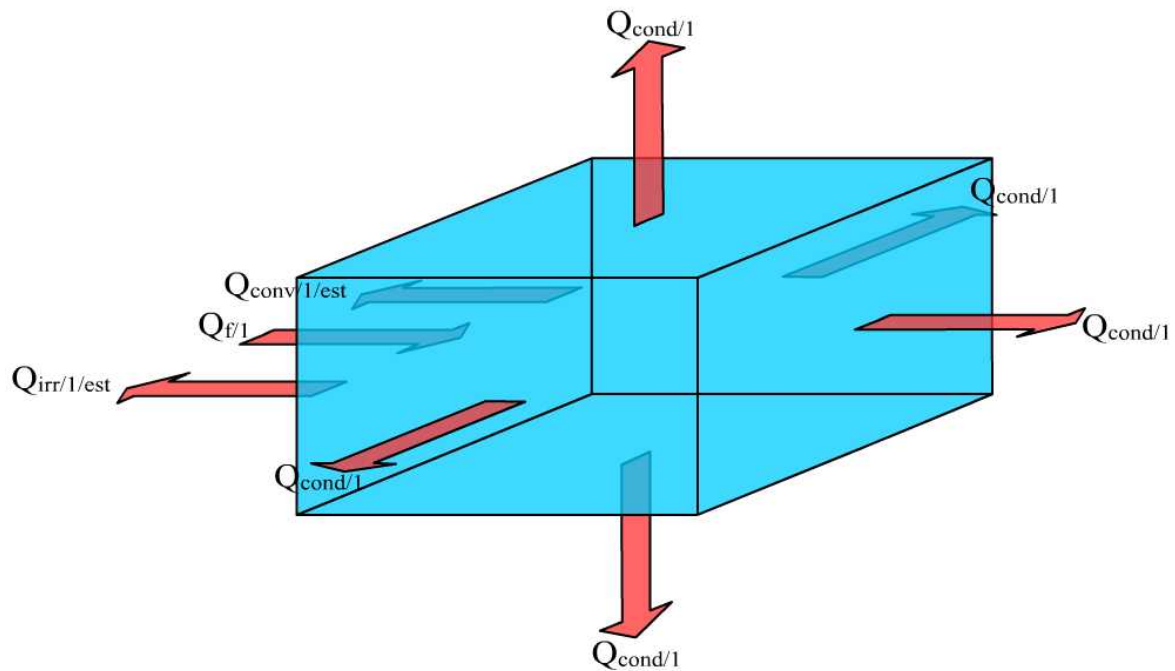


Figura 11: Nodo 1

$$\left[ \frac{\partial(\rho \cdot V \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} \right]_p = Q_{f/1} - Q_{irr/1/est} - Q_{conv/1/est} - Q_{cond/1}$$

Pedice  $p$ : parete;

$\rho$ : densità, in  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;

$V$ : volume del nodo, in  $\text{m}^3$ ;

$c_p$ : valore specifico, in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$ ;

$T$ : temperatura, in  $^\circ\text{C}$ ;

$t$ : variabile temporale, in sec;

$Q_{f/1}$ : calore, per unità di tempo, proveniente dalla fiamma, incidente sulla parete esterna del nodo 1, in kW ;

- $Q_{irr/1/est}$  : calore, per unità di tempo, ceduto dalla parete all'atmosfera esterna, in kW ;
- $Q_{conv/1/est}$  : calore, per unità di tempo, ceduto dalla parete all'atmosfera esterna per convezione, in kW ;
- $Q_{cond/1}$  : calore, per unità di tempo, trasmesso dalla parete per conduzione, in kW .

## Nodo 2

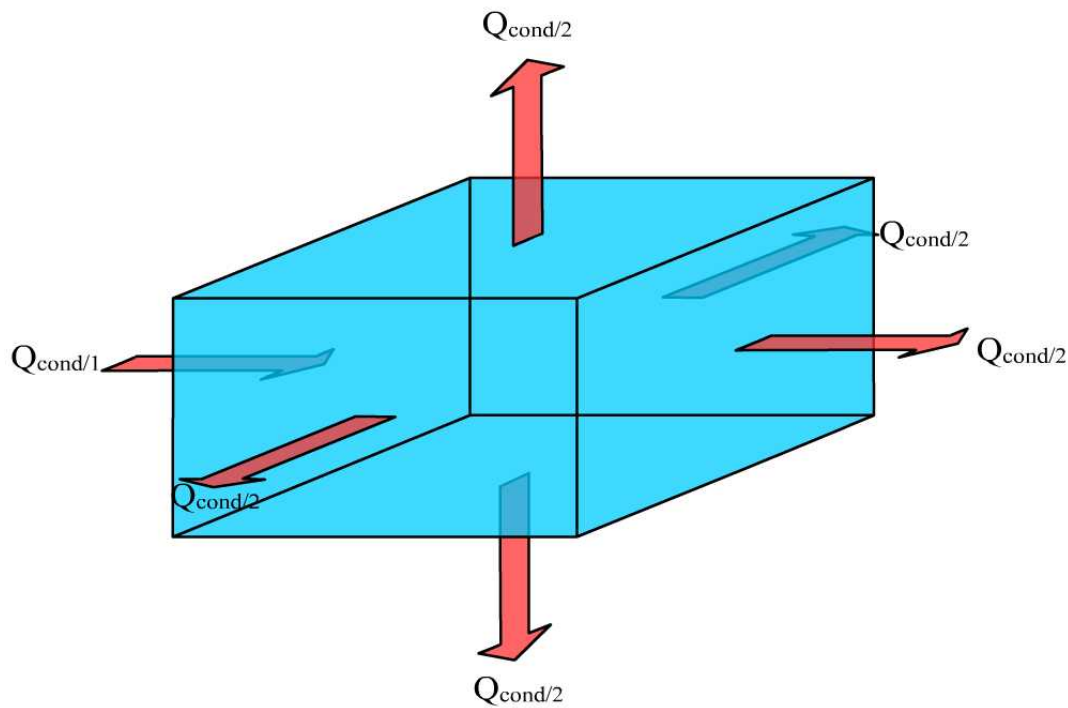


Figura 12: Nodo 2

$$\left[ \frac{\partial(\rho \cdot V \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} \right]_p = Q_{cond/1} - Q_{cond/2}$$

- $Q_{cond/2}$  : calore, per unità di tempo, trasmesso per conduzione dal nodo 2 alle pareti confinanti, in kW .



### Nodo 3

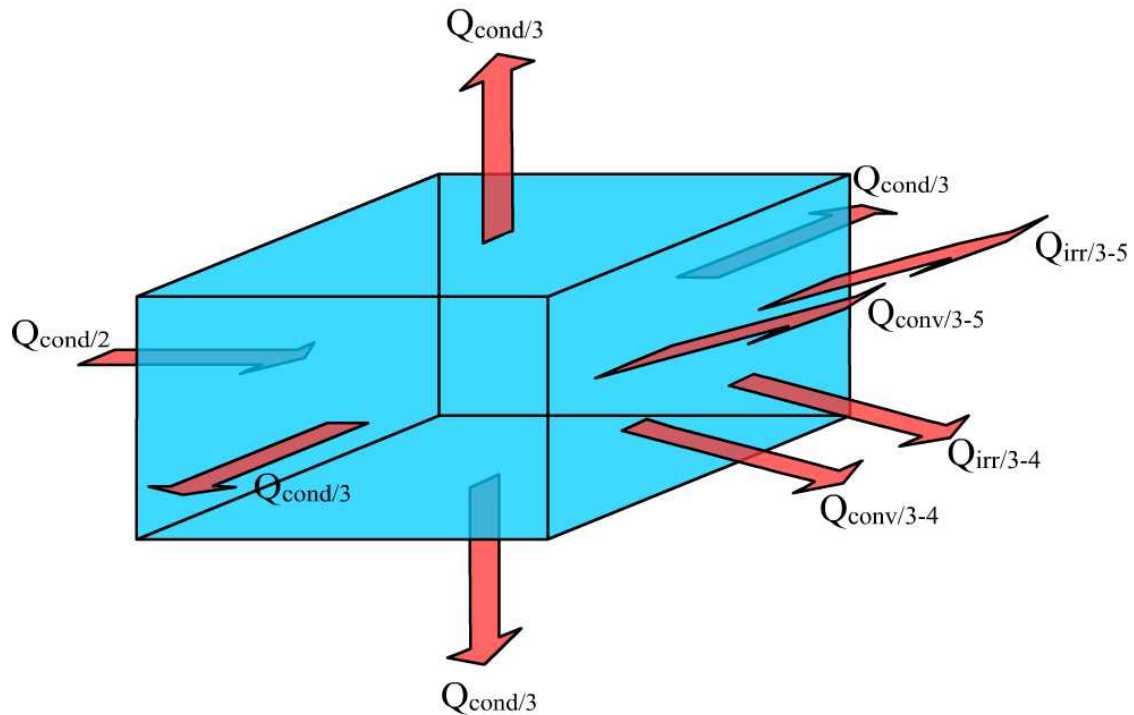


Figura 13: Nodo 3

$$\left[ \frac{\partial(\rho \cdot V \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} \right]_p = Q_{cond/2} - Q_{cond/3} - Q_{irr/3-4} - Q_{conv/3-4} - Q_{irr/3-5} - Q_{conv/3-5}$$

- $Q_{cond/3}$  : calore, per unità di tempo, trasmesso per conduzione dal nodo 3 alle pareti confinanti, in kW ;
- $Q_{irr/3-4}$  : calore per unità di tempo trasmesso per irraggiamento dal nodo 3 al nodo 4, in kW ;
- $Q_{conv/3-4}$  : calore per unità di tempo trasmesso per convezione dal nodo 3 al nodo 4, in kW ;
- $Q_{irr/3-5}$  : calore per unità di tempo trasmesso per irraggiamento dal nodo 3 al nodo 5, in kW ;
- $Q_{conv/3-5}$  : calore per unità di tempo trasmesso per convezione dal nodo 3 al nodo 5, in kW .

### Nodo 4

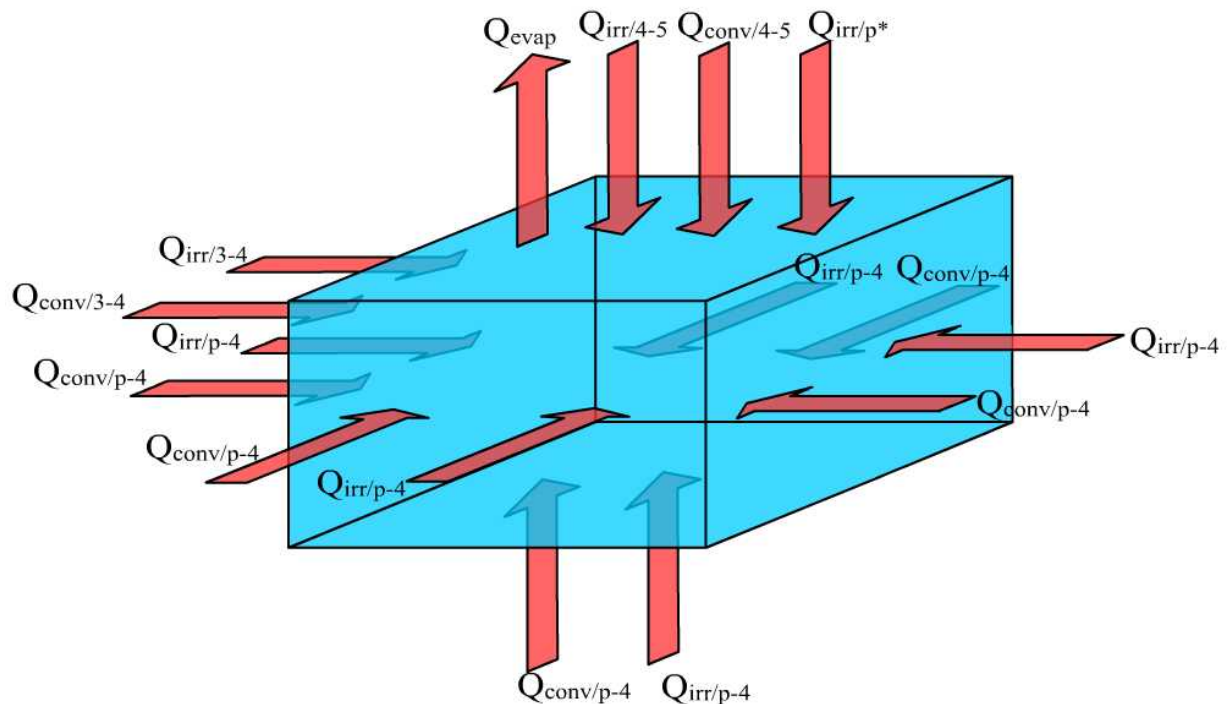


Figura 14: Nodo 4

$$\left[ \frac{\partial(\rho \cdot V \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} \right]_l = [Q_{conv} + Q_{irr}]_{3-4} + [Q_{conv} + Q_{irr}]_{p-4} + [Q_{conv} + Q_{irr}]_{4-5} + Q_{irr/p^*} - Q_{evap}$$

Pedice  $l$ : liquido;

$Q_{conv/p-4}$ : calore per unità di tempo trasmesso per convezione dalla parete al nodo 4, in kW ;

$Q_{irr/p-4}$ : calore per unità di tempo trasmesso per irraggiamento dalla parete al nodo 4, in kW ;

$Q_{conv/p-4}$ : calore per unità di tempo trasmesso per convezione dalla parete al nodo 4, kW ;

$Q_{conv/4-5}$ : calore per unità di tempo scambiato per convezione tra il nodo 4 ed il nodo 5, in kW ;



- $Q_{irr/4-5}$  : calore per unità di tempo scambiato per irraggiamento tra il nodo 4 ed il nodo 5;
- $Q_{irr/p*}$  : calore per unità di tempo di irraggiamento dalla parete a contatto con il gas al liquido, in kW ;
- $Q_{evap}$  : calore per unità di tempo latente di vaporizzazione, in kW .

## Nodo 5

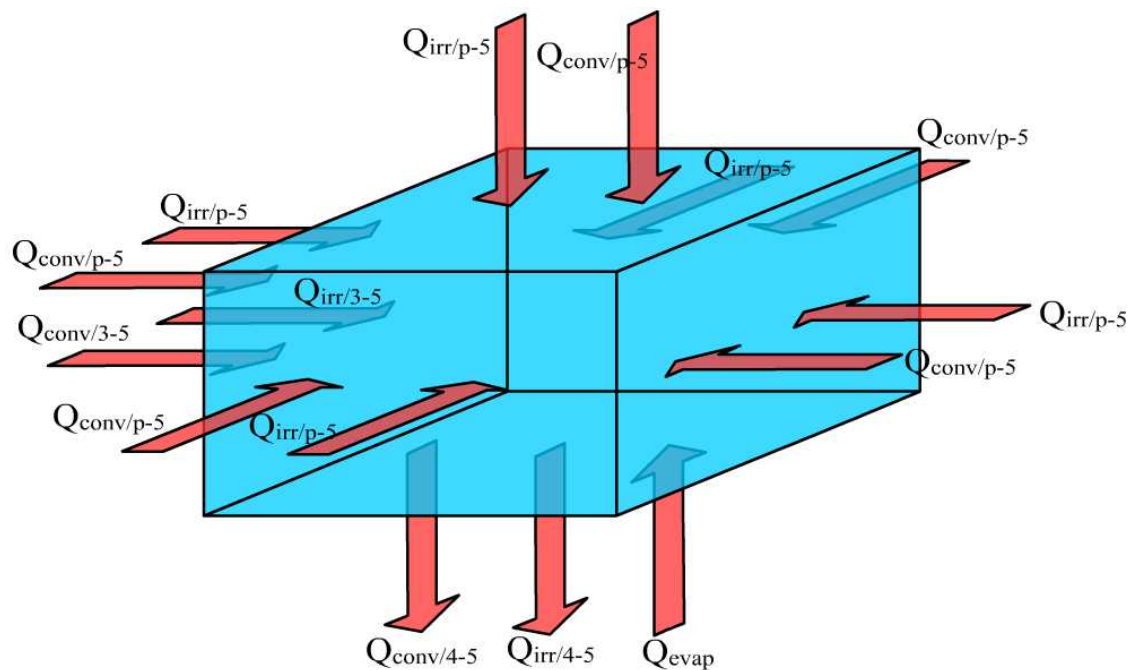


Figura 15: Nodo 5

$$\left[ \frac{\partial(\rho \cdot V \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} \right]_g = [Q_{conv} + Q_{irr}]_{3-5} + [Q_{conv} + Q_{irr}]_{p-5} - [Q_{conv} + Q_{irr}]_{4-5} + Q_{evap}$$

- $Q_{conv/p-5}$  : calore per unità di tempo trasmesso per convezione dalla parete al nodo 4, in kW ;
- $Q_{irr/p-5}$  : calore per unità di tempo trasmesso per irraggiamento dalla parete al nodo 4, in kW .

La magnitudo del flusso termico dipenderà dal tipo di fiamma e dalla posizione della stessa rispetto al serbatoio. Esistono fondamentalmente tre modi secondo i quali un serbatoio può essere esposto ad un incendio:

- ingolfamento da fiamma, totale o parziale;
- jet fire localizzato;
- radiazione termica proveniente da incendio ad una certa distanza.

Nei paragrafi che seguono, facendo riferimento ai bilanci di energia eseguiti nei nodi termici, si descrivono dettagliatamente di ogni singolo addendo alla destra delle uguaglianze delle equazioni di bilancio.

## 6.2 Calore da fiamma

La trasmissione di calore da una fiamma è un fenomeno fortemente influenzato da una serie di variabili:

- Forma e dimensione della superficie della fiamma;
- Calore generato nella combustione (dipende dal tipo di combustibile e dal rapporto tra la massa del comburente e del combustibile);
- Temperatura della fiamma (per HC varia tra 800 e 1600 °K) e spettro della radiazione;
- Frazione di calore emesso come radiazione termica;
- Posizione dell'oggetto investito dalla radiazione;
- Anidride carbonica e vapor d'acqua presenti nell'aria, in quanto in grado di assorbire parte della radiazione emessa;
- Quantità di nerofumo prodotto nella fiamma, per il suo potere emissivo ed assorbente.

La fiamma non emette radiazione solamente attraverso la sua superficie visibile, quindi il fenomeno della radiazione termica non è semplicemente bidimensionale, ma è un complicato fenomeno tridimensionale.

Se il serbatoio è completamente ingolfato dalla fiamma, come può avvenire nel caso di un pool fire, la trasmissione di calore avviene per irraggiamento diretto dalla fiamma e per convezione da parte dei prodotti caldi della combustione. L'ingolfamento del serbatoio richiede lo studio approfondito della modellazione della variazione della temperatura della fiamma e della sua emissività nel tempo.





Se la fonte di radiazione termica è un jet fire, dovuto generalmente all'innesco di un rilascio gassoso sotto pressione, si ha una generazione di calore maggiore rispetto ad un pool fire a causa dell'aumento della turbolenza e della miscelazione. Di conseguenza l'irraggiamento diventa più severo per la struttura investita, anche a causa della natura localizzata della fiamma. In questo caso la distribuzione del flusso di calore sulla superficie del serbatoio non può essere ritenuta costante nel tempo.

Se la radiazione termica proviene da una fiamma che non lambisce direttamente il serbatoio, il flusso di calore solitamente viene trattato come una sorgente termica a flusso costante. La trasmissività atmosferica può creare un flusso di calore variabile nel tempo. Ciò è dovuto alla presenza di prodotti della combustione quali anidride carbonica e vapor d'acqua, dotati di potere assorbente. In questo caso è necessario tener conto anche della frazione della totale potenza radiante che partendo dalla fiamma raggiunge la parete, attraverso l'introduzione degli adeguati fattori di vista.

### 6.2.1 Modelli esistenti

Per il calcolo del calore trasmesso dalla radiazione termica esistono in letteratura vari modelli, i quali possono essere suddivisi in tre categorie:

- 1) Modelli semiempirici;
- 2) Field model;
- 3) Integral model.

#### 1) Modelli semiempirici

Non danno una descrizione puntuale della geometria della fiamma, ma una stima quantitativa della sua forma e del flusso di calore che investe un oggetto.

Si possono avere due approcci diversi, a seconda che la radiazione sia emessa da:

- un punto;
- una superficie (di solito conica o cilindrica).

Sono modelli facilmente implementabili in un programma. Hanno il difetto d'essere applicabili solamente ai casi che sono stati studiati empiricamente.

#### Jet fire

Se si considera che il jet abbia una superficie cilindrica o conica, i fattori di vista si trovano analiticamente.

Ci sono tre tipi di modello per descrivere un jet flame, a seconda che la sorgente sia:

- un punto (modello dell'API);

- più punti;
- una superficie.

### Pool fire

I modelli solitamente utilizzati hanno un approccio puntuale, che deriva fondamentalmente dalla formula di Thomas (Yellow Book):

$$q = \frac{\left[ \left( \pi \cdot D \cdot L + \pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) \cdot m \cdot F_s \cdot \Delta H_c \right]}{\left[ (c_1 \cdot m^{0.61} + 1) \cdot (4 \cdot \pi \cdot X^2) \right]}$$

dove:

$D$ : diametro della pozza, in m;

$L$ : altezza media della fiamma, in m;

$m$ : flusso di fluido bruciante, in  $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \text{sec}}$ ;

$\Delta H_c$ : calore di combustione del fluido infiammabile al punto di ebollizione, in  $\frac{\text{J}}{\text{Kg}}$ ;

$F_s$ : frazione del calore generato dalla superficie della fiamma, adimensionale;

$X$ : distanza dal punto di innesco, in m;

$c_1$ : costante, pari a  $72 \frac{\text{m}^{1.22} \text{sec}^{0.61}}{\text{Kg}^{0.61}}$ .

## 2) Field model

Si basano su equazioni differenziali di Navier-Stokes, usate solitamente per la fluidodinamica di fluidi non interessati da combustione. Sono implementati in programmi consistenti e solitamente impiegati nei modelli CFD (Computational Fluid Dynamics).

## 3) Integral model

Questo è un approccio intermedio ai due precedenti, dove le equazioni differenziali dei "field model" sono integrate. Queste equazioni riguardano la conservazione della massa, della quantità di moto e i bilanci termici.



### 6.2.2 Scelta dei modelli

I modelli vanno scelti secondo:

- dati sperimentali sufficienti a convalidare il modello;
- complessità del modello.

In particolare il modello per jet flames “Geometric solid flame shape” (Chamberlain, 1987) è stato ben convalidato da dati sperimentali, e per tale motivo è stato utilizzato successivamente nello sviluppo delle formulazioni [Appendice A].

I parametri più importanti nel trasferimento di calore attraverso meccanismo radioattivo sono:

- emissività della superficie della fiamma;
- fattori di vista;
- trasmissività atmosferica.

Il rilascio di calore dalla combustione dipende da:

- calore di combustione del materiale infiammabile;
- quantità di combustibile che brucia nell’unità di tempo (“*Burning Rate*”), che, nel caso del jet flame in condizioni stazionarie, corrisponde alla quantità di combustibile che fuoriesce (misurata in kg/s).

La frazione di calore radiato dipende da:

- tipo di fiamma (jet flame, pool fire, fire ball, ecc.);
- tipo di combustibile.

L’emissività della fiamma diminuisce con l’aumentare del diametro, questo probabilmente per la formazione di nerofumo e fuliggine, che assorbono parte del calore. Nel calcolo del calore radiato si deve dunque tenere in considerazione la presenza di nerofumo e fuliggine appunto.

Il fattore di vista dipende da:

- forma e dimensioni della superficie della fiamma e del ricevente;
- orientamento dell’emittente e del ricevente.

I fattori di vista si possono ottenere in vari modi:

- per via teorica;
- attraverso grafici e correlazioni empiriche;
- attraverso codici di calcolo.

La trasmissività e l’emissività dell’aria dipendono da:

- campo spettrale della fiamma;
- componenti dell'aria che possono assorbire (in particolare H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>, tipici prodotti di combustione).

La capacità di assorbimento da parte dei componenti dell'aria dipende da vari fattori:

- pressione parziale del vapore (che dipende dalla temperatura e dall'umidità relativa), mentre non interessa quella della CO<sub>2</sub> perché non influenza la sua emissività;
- lunghezza caratteristica L, che dipende dal volume del gas e dall'area che lo confina, la quale raccoglie l'energia radiante che il gas emette;
- concentrazione del gas;
- temperatura della sorgente: questa è importante perché tali componenti assorbono ed emettono in particolare a determinate lunghezze d'onda;
- temperatura ambiente.

Ci sono dei metodi, basati su correlazioni empiriche, che consentono di calcolare l'emissività del gas, tenendo conto dei vari parametri precedentemente elencati.

La trasmissività è il complemento ad uno dell'emissività; entrambe sono proprietà estensive del mezzo, in quanto funzioni dei coefficienti di assorbimento del mezzo (grandezze intensive) e di una lunghezza. La trasmissività corrisponde al "cammino" percorso dalla radiazione, il quale naturalmente varia a seconda dei punti di partenza e di arrivo: si deve quindi considerare una "lunghezza equivalente", la quale tiene conto del volume occupato dal mezzo e della sua superficie.

### 6.2.3 Potere emissivo della superficie

Si definisce Potere Emissivo di una Superficie (SEP), il flusso di calore derivante da radiazione termica di una fiamma, espresso in W/m<sup>2</sup>:

$$SEP = \frac{q_{rad}}{A_f} = \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot (T_f^4 - T_a^4)$$

dove:

$\varepsilon_f$ : emissività della fiamma, ipotizzata indipendente dalla lunghezza d'onda (ipotesi di corpo grigio), adimensionale;

$\sigma$ : costante di Stefan-Boltzmann, pari a  $5.77 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 T^4}$ ;

$T_f$ : temperatura della fiamma, in °K;

$T_a$ : temperatura dell'ambiente esterno, in °K;

$A_f$ : area della superficie emittente, in m<sup>2</sup>.



Questa è la tipica formulazione della legge di irraggiamento secondo Stefan-Boltzmann. In realtà, la difficoltà di determinare la temperatura della fiamma a causa della sua disomogeneità spaziale, limita l'uso di tale equazione.

Si è qui deciso di utilizzare un metodo semplificato, noto con il nome di “fiamma solida”, che ipotizza che il calore di combustione venga radiato attraverso la superficie visibile della fiamma. In realtà la fiamma non emette radiazione solamente attraverso la sua superficie visibile in quanto il fenomeno della radiazione termica non è semplicemente bidimensionale, come approssimato nel metodo a fiamma solida, ma è un complicato fenomeno tridimensionale.

#### 6.2.4 Calore radiato dalla fiamma

Il calore radiato dalla fiamma può essere espresso con l'equazione:

$$Q_f = SEP_{act} \cdot F_{view} \cdot \tau_a \cdot A_f$$

dove:

$$SEP_{act} = SEP_{max} \cdot (1 - \zeta) + SEP_{soot} \cdot \zeta$$

$\zeta$ : frazione di superficie della fiamma ricoperta da fuliggine (nerofumo);

$$SEP_{max} = F_s \cdot SEP_{theor} = F_s \cdot \frac{Q'}{A_f};$$

$F_s = 0.21 \cdot \exp(-0.00323 \cdot u_j) + 0.11$ , frazione di energia di combustione radiata dalla fiamma;

$u_j$ : velocità del jet, in  $\frac{m}{s}$ ;

$Q'$ : energia di combustione della fiamma, in  $\frac{J}{s}$ ;

$SEP_{soot}$ : potere emissivo del nerofumo per unità di superficie, pari a  $20 \cdot 10^3 \frac{J}{m^2 \cdot sec}$ ,

secondo la teoria di Hägglund a  $T = 800^\circ C$ ;

$F_{view}$ : fattore di vista, adimensionale;

$\tau_a$ : trasmissività atmosferica.

La formula diventa quindi:

$$q_{rad} = \left( \left( F_s \cdot \frac{Q'}{A_f} \right) \cdot (1 - \zeta) + 20 \cdot 10^3 \cdot \zeta \right) \cdot F_{view} \cdot \tau_a \cdot A_f$$

La formula tiene conto della presenza di nerofumo in quanto dotato di potere assorbente.

Per il calcolo della trasmissività atmosferica ( $\tau_a$ ) e dell'area della superficie della fiamma si veda l'appendice A.

### 6.3 Calore irraggiato dalla parete verso l'atmosfera

Il calore scambiato tra parete esterna, non direttamente lambita da fiamma, e l'atmosfera, può avvenire tramite irraggiamento e convezione. Il termine di irraggiamento può essere espresso secondo l'equazione:

$$Q_{irr/p/esterna} = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot (T_{p/1}^4 - T_{aria}^4) \cdot A_{p/1-aria}$$

dove:

$A_{p/1-aria}$ : area della parete del nodo 1 a contatto con l'aria atmosferica, in  $m^2$ ;

$T_{aria}$ : temperatura dell'aria atmosferica, in  $^{\circ}C$ .

È opportuno notare che il termine  $Q_{irr/p/esterna}$ , come  $Q_{conv/p/esterna}$  del paragrafo seguente, può essere trascurato se riferito alla parete direttamente lambita dalle fiamme. Il contributo maggiore in tal senso è dato dalla parete non esposta al fuoco, in quanto dotata di un maggiore gradiente di temperatura nei confronti dell'atmosfera circostante.

### 6.4 Calore convettivo dalla parete all'atmosfera

Il calore trasmesso dalla parete esterna all'atmosfera può essere descritto secondo la formula:

$$Q_{conv/p/esterna} = \alpha_{p/3-aria} \cdot (T_{p/3} - T_{aria}) \cdot A_{p/1-aria}$$

dove:

$\alpha_{p/3-aria}$ : coefficiente di convezione tra la parete del nodo 3 e l'aria, che può essere determinato con l'equazione `Heat_Transmission_McAdams`:



$$\alpha_{p/3-aria} = 0.105 \cdot \left( \frac{\lambda^2 \cdot \rho_{aria}^2 \cdot \beta_{aria} \cdot c_{p/aria} \cdot g \cdot (T_{p/3} - T_{aria})}{\mu_{aria}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

dove:

$\beta_{aria}$ : coefficiente dell'espansione termica isobara dell'aria.

## 6.5 Calore di conduzione attraverso la parete

La determinazione rigorosa del trasferimento di calore attraverso la parete del serbatoio richiede la soluzione dell'equazione di bilancio termico, che per ovvi motivi di simmetria, è stata sviluppata in coordinate cartesiane.

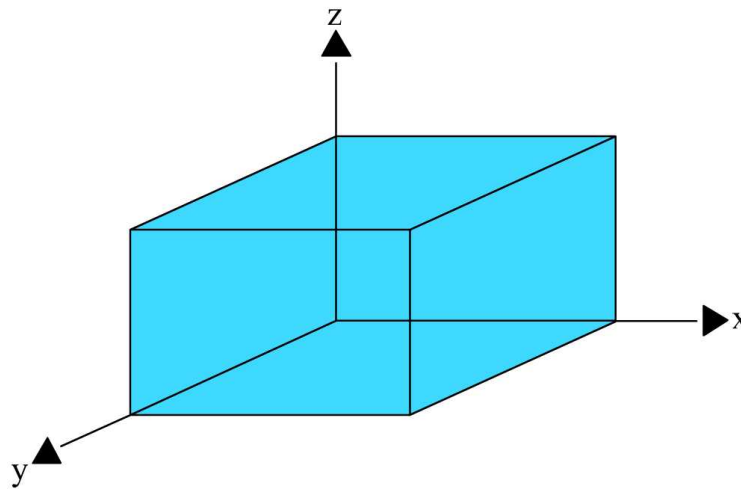


Figura 16: Nodo termico in coordinate cartesiane

$$\left( c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \right)_p = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left( \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right]_p$$

dove:

pedice p: parete;

$c_p$ : calore specifico a pressione costante, in  $\frac{J}{Kg^\circ C}$ ;

$\rho$ :	densità, in $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ;
$T$ :	temperatura, in $^{\circ}\text{C}$ ;
$t$ :	tempo, in sec;
$x, y, z$ :	coordinate cartesiane;
$\lambda$ :	coefficiente di conduzione, in $\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$ .

Esistono numerosi metodi per risolvere i problemi di conduzione. I più importanti vengono riassunti di seguito:

I) metodi analitici esatti:

- a) separazione delle variabili (per la risoluzione di problemi di conduzione in stazionario);
- b) teorema di Duhamel (per la risoluzione di problemi di conduzione dipendenti dal tempo);
- c) funzioni di Green;
- d) trasformate di Laplace;

II) metodi analitici approssimati:

- a) metodo integrale;
- b) metodo di Galerkin;
- c) metodo dell'integrazione parziale;

III) metodi numerici:

- a) metodo alle differenze finite;
- b) metodo agli elementi finiti.

In generale i metodi numerici sono utili quando la risoluzione delle equazioni differenziali di bilancio termico sono difficilmente risolvibili con metodi analitici esatti, a causa di condizioni al contorno non omogenee e di geometrie particolarmente complesse.





## 6.6 Calore di irraggiamento dalla parete al gas

Il trasferimento di calore dalla parete al gas avviene per irraggiamento e convezione naturale, sebbene l'aumento di temperatura possa far aumentare la velocità del gas favorendo la convezione forzata. Come spiegato di sopra, a causa del basso coefficiente di scambio termico del gas, solitamente la zona della parete che lambisce il gas si trova ad una temperatura molto elevata. Per tale motivo l'irraggiamento in genere domina sulla convezione. Molti gas assorbono la radiazione termica in una ristretta banda di lunghezza d'onda. Per tale motivo, il gas può anche essere considerato trasparente. Questo significa quindi, che il riscaldamento del gas per irraggiamento dipende dal suo coefficiente di assorbimento e quindi dalla lunghezza dell'onda radiante. Nella trattazione si farà sempre riferimento a coefficienti di assorbimento, trasparenza e riflessione globali, cioè indipendenti dalla lunghezza d'onda.

Il calore radiato dalla parete viene in parte assorbito dal gas e in parte trasmesso verso zone della parete non coinvolte direttamente da una radiazione termica primaria e verso il liquido stesso.

Una volta reperiti tutti i dati dei due modi di scambio termico, è possibile calcolare la temperatura del gas. Questa però solo in prima approssimazione può essere considerata costante. Infatti sarà elevata nelle vicinanze della parete direttamente radiata dal flusso termico primario, mentre sensibilmente più ridotta altrove. Questa situazione crea delle stratificazioni termiche in quanto non è possibile assumere che la convezione naturale entro il vapore sia sufficiente a permettere una buona miscelazione e quindi una isotermicità spaziale.

La formulazione del calore di irraggiamento proveniente dal nodo 3 ed incidente sul nodo 5 è la seguente:

$$Q_{irr/3-5} = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot \alpha_g \cdot (T_{p/3}^4 - T_{g/5}^4) \cdot A_{3-5}$$

dove:

$\sigma$ : costante di Stefan-Boltzmann;

$\varepsilon_p$ : emissività della parete, adimensionale;

$\alpha_g$ : coefficiente di assorbimento del gas, adimensionale;

$T_{p/3}$ : temperatura parete del nodo 3, in °C;

$T_{g/5}$ : temperatura del gas del nodo 5, °C;

$A_{3-5}$ : area della superficie del nodo 5 a diretto contatto con il nodo 3, in m<sup>2</sup>.

In maniera analoga può essere espresso il termine generico  $Q_{irr/p-5}$ :

$$Q_{irr/p-5} = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot \alpha_g \cdot (T_p^4 - T_{g/5}^4) \cdot A_{p-5}$$

con chiaro significato dei simboli.

## 6.7 Calore di irraggiamento dalla parete a contatto con il gas al liquido

Non tutto il calore trasmesso per irraggiamento dalla parete al nodo 5 viene assorbito dal gas. Una parte traspare attraverso il gas, dotato di coefficiente di trasparenza  $\tau_g = 1 - \alpha_g$ , e viene assorbita dal liquido. Il termine  $Q_{irr/p*}$  tiene conto di questo fenomeno:

$$Q_{irr/p*} = Q_{irr/p-5} \cdot \frac{1 - \alpha_g}{\alpha_g} = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot (1 - \alpha_g) \cdot (T_p^4 - T_{g/5}^4) \cdot A_{p-5}$$

Nella trattazione si è fatta l'ipotesi di coefficiente di riflessione globale nullo.

## 6.8 Calore di convezione dalla parete al gas

Per il calcolo del calore scambiato per convezione tra la parete e il gas del nodo 5, si utilizzano le correlazioni derivanti dall'analisi dimensionale. Appare quantomeno opportuno considerare inizialmente uno scambio convettivo di tipo naturale, utilizzando le seguenti correlazioni di carattere empirico:

$$Nu = k \cdot (Pr \cdot Gr)^m$$

dove:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad \text{numero adimensionale di Nusselt;}$$

$\alpha$ : coefficiente di convezione;

$l$ : lunghezza caratteristica, nel caso specifico lunghezza del lato del nodo 5;

$\lambda$ : conduttività termica;

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{\lambda}, \quad \text{numero adimensionale di Prandl;}$$

$c_p$ : calore specifico a pressione costante;

$\mu$ : viscosità dinamica;

$$Gr = \frac{l^3 \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\mu^2}, \quad \text{numero adimensionale di Grashof;}$$

$\rho$ : densità del gas;



- $\beta$ : coefficiente dell'espansione termica isobara;  
 $g$ : accelerazione gravitazionale;  
 $\Delta T$ : differenza tra temperatura della parete e del gas;  
 $k, m$ : costanti funzioni del tipo di scambio convettivo.

Valori tipici solitamente utilizzati sono:

Tabella 8: Numero di Grashof

Costante	$Gr < 10^9$ (regime laminare)	$Gr > 10^9$ (regime turbolento)
k	0.555	0.021
m	0.25	0.4

Tramite il numero di Nusselt è possibile risalire al valore del coefficiente di convezione  $\alpha_{3/5}$  e quindi calcolare:

$$Q_{conv/3-5} = \alpha_{3-5} \cdot (T_{p/3} - T_{g/5}) \cdot A_{3-5}$$

## 6.9 Calore di irraggiamento scambiato tra gas e liquido

Lo scambio termico per irraggiamento tra gas e liquido può essere espresso nella maniera seguente:

$$Q_{irr/4-5} = \sigma \cdot (T_{g/5}^4 - T_{l/4}^4) \cdot A_{4-5}$$

dove:

- $T_{l/4}$ : temperatura del liquido del nodo 4;  
 $A_{4-5}$ : area della superficie di separazione tra il liquido del nodo 4 e il gas del nodo 5.

## 6.10 Calore di convezione scambiato tra gas e liquido

Lo scambio di calore per convezione naturale tra liquido e gas può essere espresso facendo riferimento nuovamente all'analisi dimensionale:

$$Nu = k \cdot (Gr \cdot Pr)^m$$

I coefficienti  $k$  ed  $m$  possono essere valutati tramite la tabella seguente [23]:

Tabella 9: Valori dei coeff.  $k$  e  $m$

$\Delta T$	$Gr \cdot Pr$	$k$	$m$
$T_g > T_l$		0.25	0.27
$T_g < T_l$	$> 2 \cdot 10^7$	0.333	0.14
	$< 2 \cdot 10^7$	0.25	0.54

Dal numero di Nusselt si ricava il coefficiente di convezione e si ottiene:

$$Q_{conv/4-5} = \alpha_{4-5} \cdot (T_{g/5} - T_{l/4}) \cdot A_{4-5}$$

## 6.11 Generalità sullo scambio termico tra parete e liquido

Lo scambio di calore tra liquido e parete è notevolmente influenzato dalla presenza e dal tipo di ebollizione del liquido.

È noto infatti che esistono due tipi di ebollizione: nucleata e a film. A seconda che sia presente uno o l'altro regime di ebollizione, varia notevolmente il flusso di calore assorbito dal liquido. Nella Figura 17: Curva del flusso di calore ceduto dalla parete al fluido è rappresentato l'andamento del flusso termico per unità di area in funzione dell'eccesso di temperatura  $\Delta T = T_p - T_s$ , dove  $T_p$  è la temperatura della parete e  $T_s$  è la temperatura del liquido saturo. Il grafico fa riferimento ad acqua saturo, in ebollizione, a pressione atmosferica normale, su superfici piane o cilindriche orizzontali e lisce; l'andamento è comunque qualitativamente valido anche per altri fluidi. Si possono distinguere quattro zone nelle quali si susseguono distinti regimi di ebollizione:



- zona 1: il meccanismo di scambio termico è attribuito alla convezione naturale di liquido surriscaldato che evapora dalla superficie libera;
- zona 2: ha inizio la formazione delle bolle di vapore, che nei tratti a  $\Delta T$  più ridotti (2 – 6 °C), condensano prima di arrivare al pelo libero. Per  $\Delta T$  dell'ordine dei 20 °C si raggiunge una vera e propria ebollizione nucleata. Il calore è ceduto dalla superficie riscaldata solo in minima parte alle bolle in formazione (calore latente), in quanto la maggior parte è trasferita al liquido surriscaldato (calore sensibile);
- zona 3: è la zona di transizione tra regime di ebollizione nucleato e a film, che inizia nel punto in cui viene raggiunto un flusso di calore pari al calore critico;
- zona 4: passaggio al regime di ebollizione a film.

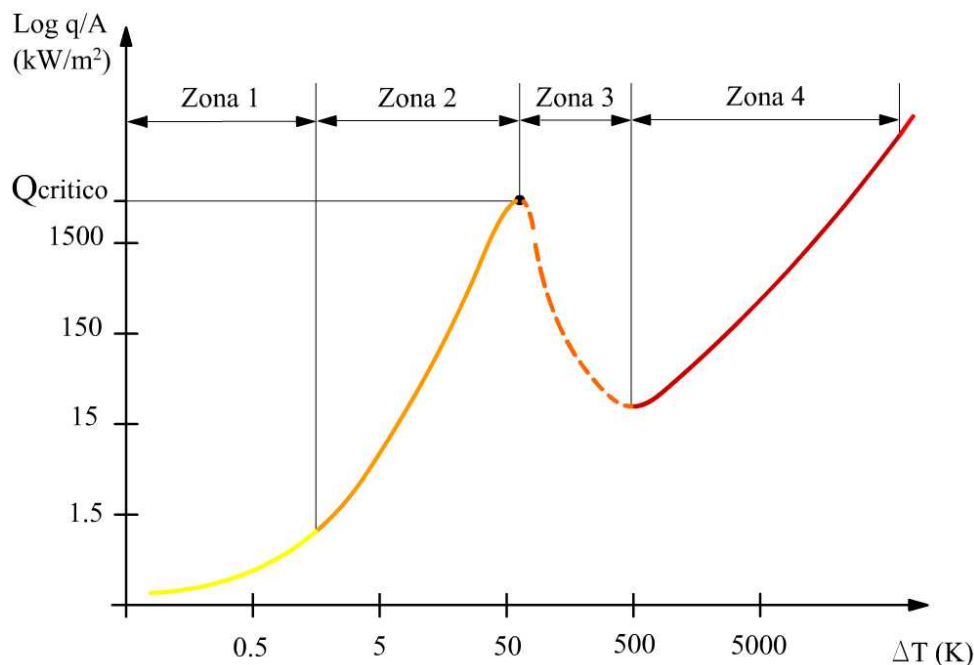


Figura 17: Curva del flusso di calore ceduto dalla parete al fluido

Come descritto dalla Figura 31, a seguito di un notevole aumento della temperatura della parete, a parità di temperatura del liquido, si ha il passaggio dal regime nucleato a quello a film, con conseguente diminuzione del calore assorbito da parte del liquido. La ragione della diminuzione del flusso termico è dovuta alla presenza dello strato di vapore, a bassa conduttività termica, in contatto con la superficie e che rappresenta quindi una forte resistenza al passaggio di calore.

Considerando che l'ebollizione avviene in un ambiente chiuso quale è un serbatoio, si ha un aumento della pressione interna che determina quindi un passaggio di fase non isoterma, nonostante il fluido sia puro.

La curva Figura 17: Curva del flusso di calore ceduto dalla parete al fluido è riferita ad un liquido in condizioni di eccipiente ebollizione. Nel caso di ebollizione in liquido sottoraffreddato, si osservano gli stessi regimi visti per l'ebollizione entro liquido saturo. In questo caso, l'aumento della temperatura della parete comporta la crescita del numero dei centri di nucleazione, l'agitazione indotta ed il richiamo di liquido freddo. La crisi idrodinamica avviene per valori di flusso termico e  $\Delta T$  più elevati di quelli riscontrati con liquidi saturi e crescenti al crescere del sottoraffreddamento del liquido. Per tale motivo, l'aumento della temperatura del liquido comporta una diminuzione del flusso termico critico e un quindi una minore capacità del sistema parete serbatoio-fluido nel far fronte allo smaltimento di calore.

La Figura 18: Flusso di calore critico in funzione della pressione, valida per idrocarburi leggeri, mostra invece come l'aumento di pressione comporti un iniziale aumento del flusso di calore critico fino ad arrivare ad un massimo per poi calare.

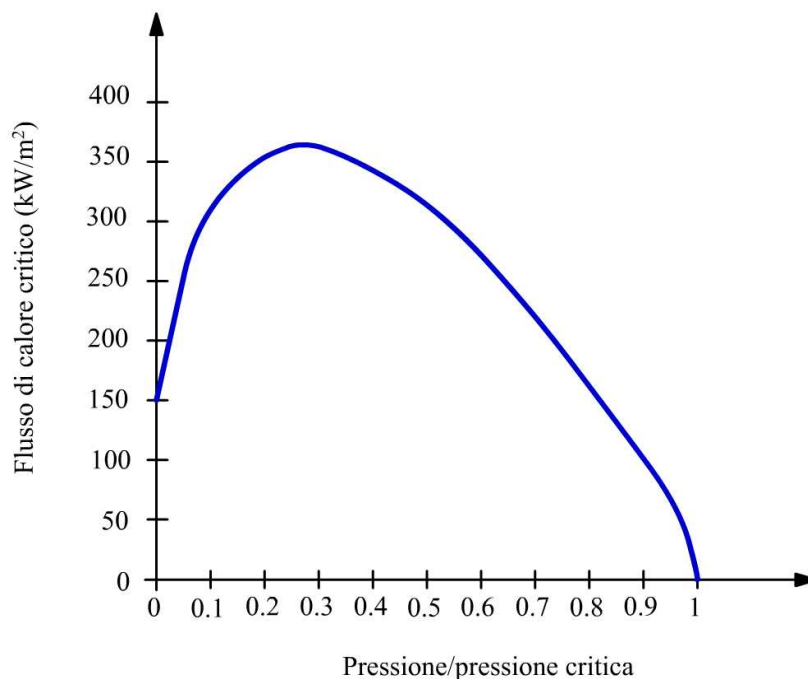


Figura 18: Flusso di calore critico in funzione della pressione

L'ebollizione a film sarà favorita alle basse e alte pressioni. Esistono in letteratura varie funzioni ricavate empiricamente che descrivono il passaggio dal regime a bolle al regime a film. La temperatura del liquido non è costante nello spazio e, come per il gas, non è pensabile che la sola convezione naturale sia sufficiente a permettere una omogeneità termica. A tale scopo può essere utile risolvere il problema attraverso un modello a stratificazione, dove supporre la temperatura costante in ogni strato.

Per la risoluzione dei bilanci termici è necessario conoscere tutte le proprietà termodinamiche della sostanza contenuta nel serbatoio e del materiale del serbatoio, al variare della temperatura e della pressione. È noto che un problema di questo tipo non desta particolari preoccupazioni se il fluido è puro e lontano dalle condizioni critiche, mentre comporta uno



studio approfondito nel caso in cui sia prossimo alle condizioni critiche o sia costituito da una miscela.

## 6.12 Calore di convezione dalla parete al liquido

Il calore scambiato per convezione tra la parete del nodo 3 ed il liquido del nodo 4, può essere espresso nel modo seguente:

$$Q_{conv/3-4} = \alpha_{3-4} \cdot (T_{p/3} - T_{l/4}) \cdot A_{3-4}$$

Nel calcolo del coefficiente di convezione è necessario distinguere tra i vari regimi di ebollizione.

Se l'ebollizione avviene nella zona 1, si può utilizzare la seguente correlazione [22]:

$$Nu = k \cdot (Gr \cdot Pr)^m$$

Tabella 10: Valori dei coefficienti  $k$  e  $m$

Regime di moto	$k$	$m$
$10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9$ (moto laminare)	0.56	0.25
$Gr \cdot Pr > 10^9$ e $1 < Pr < 10$ (moto turbolento)	0.146	0.333

Entrando nel regime di ebollizione nucleata, il meccanismo di scambio termico va ricercato negli intensi moti del liquido causati dalle bolle. Per tale motivo si possono ritenere valide le relazioni provenienti dalla convezione forzata, facendo però riferimento alle proprietà fisiche del liquido ed ai parametri che caratterizzano il regime dinamico indotto dalle bolle. Si può a tal proposito utilizzare la seguente correlazione [22]:

$$\alpha_{3-4/eb.nucl.} = 4.5 \cdot 10^5 \cdot \frac{(T_{p/3} - T_{sat/4})^3}{(T_{p/3} - T_4)} \cdot \frac{\lambda_l^{5.1}}{c_{l/4}^{2.1}} \cdot \frac{1}{\Delta H_{evap}^2} \cdot \frac{1}{\mu^{4.1}} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_l - \rho_v)}{\sigma}}$$

dove:

$T_{sat/4}$ : temperatura del liquido saturo del nodo 4;

$c_{l/4}$ : calore specifico del liquido del nodo 4;

$\Delta H_{evap}$ : calore latente di evaporazione del liquido del nodo 4;

$\sigma$ : tensione superficiale del liquido.

Se il flusso di calore  $Q_{conv/3-4}$  supera il flusso di calore critico, allora il regime di ebollizione passa a film. Per il calcolo del flusso di calore critico si può utilizzare la correlazione di Zuber:

$$Q_{critico} = 0.18 \cdot \Delta H_{evap} \cdot \rho_{fv} \cdot \left[ \frac{g \cdot \sigma \cdot (\rho_l - \rho_g)}{\rho_{fv}^2} \right]^{0.25} \cdot \left( \frac{\rho_l}{\rho_l + \rho_{fv}} \right)^{0.5}$$

dove:

$Q_{critico}$ : espresso in  $\frac{W}{m^2}$ ;

$\rho_{fv}$ : densità del film di vapore.

Il coefficiente di convezione nell'ebollizione a film, si può calcolare con la seguente relazione di Zuber:

$$\alpha_{3-4/eb.film} = \frac{0.369}{(T_{p/3} - T_4)} \cdot \left[ \frac{g \cdot \Delta H_{evap} \cdot \rho_{fv} \cdot (\rho_l - \rho_{fv}) \cdot \lambda_{fv}^{2.75} \cdot (T_p - T_{sat/4})^{2.75}}{\mu_{fv} \cdot L_{p/3}^2} \cdot \left( \frac{g \cdot (\rho_l - \rho_{fv})}{\sigma} \right)^{0.37} \right]^{0.267}$$

dove:

$L_{p/3}$ : altezza della parete del nodo 3;

Le grandezze con il pedice  $fv$  sono riferite al film di vapore.

## 6.13 Calore di irraggiamento dalla parete al liquido

Il calore scambiato tra la parete del nodo 3 e il liquido del nodo 4 può essere espresso nella forma seguente:





$$Q_{irr/3-4} = \sigma \cdot \varepsilon_p \cdot \alpha_{l/4} \cdot (T_{p/3}^4 - T_4^4) \cdot A_{3-4}$$

dove:

$\alpha_{l/4}$ : coefficiente di assorbimento globale del liquido del nodo 4.

A causa dell'elevato coefficiente di scambio termico della fase liquida, sembra logico prevedere una differenza di temperatura, tra la parete e il liquido, non eccessiva. Per questo motivo il termine  $Q_{irr/3-4}$  probabilmente non pesa molto all'interno dei bilanci.

## 6.14 Calore latente di ebollizione

Il calore latente di ebollizione di un fluido puro è funzione della pressione e della temperatura del fluido stesso. In letteratura esistono molte correlazioni che permettono di calcolare il calore latente di ebollizione per un puro, con un buon grado di precisione. Il problema riguarda semmai stabilire una temperatura e una pressione appropriate, che, vista la dinamica degli eventi, variano continuamente nel tempo. Per questo motivo, nelle equazioni di bilancio termico, è possibile inserire il calore latente come funzione della temperatura di saturazione del liquido e dal gas.

Tra le correlazioni si può usare la seguente [32]:

$$\psi = \frac{Q_{evap}}{R \cdot T_c \cdot \Delta Z_v} = \frac{-d \ln P_{vpr}}{d \left( \frac{1}{T_r} \right)}$$

Esistono varie correlazioni sperimentali per la valutazione del termine  $\psi$ . Per il propano si possono utilizzare le correlazioni di tabella seguente.

Tabella 11: Valore del termine  $\psi$  per diverse tipologie di equazioni

Equazione	$\psi$
Lee-Kesler	$6.09648 - 1.28862 \cdot T_r + 1.016 \cdot T_r^7 + \omega \cdot (15.6875 - 13.4721 \cdot T_r + 2.615 \cdot T_r^7)$
Antoine	$\frac{B}{T_c} \cdot \left( \frac{T_r}{T_r + \frac{C}{T_c}} \right)^2$
Wagner	$-a + b \cdot r^{0.5} \cdot (0.5 \cdot r - 1.5) + c \cdot r^2 \cdot (2 \cdot r - 3) + d \cdot r^5 \cdot (5 \cdot r - 6)$





## 7 APERTURA DELLA PSV

### 7.1 Descrizione dell'evento

Come già spiegato di sopra, l'ebollizione del liquido, con conseguente produzione di gas, comporta un aumento di pressione all'interno del serbatoio tale da poter raggiungere il valore di apertura della valvola di sfiato. Tale apertura consente di aumentare i tempi di resistenza dell'intera struttura, poiché consente di controllare la pressione all'interno del serbatoio.

La modellazione dello sfiato della valvola richiede le seguenti conoscenze:

- caratteristiche della PSV, in particolare la variazione dell'area di flusso con la pressione, ovvero la variazione del grado di apertura;
- la natura del flusso a valle della PSV;
- la natura del flusso attraverso la PSV.

In particolare quest'ultima caratteristica è particolarmente importante e di non facile determinazione. Se il flusso attraverso la valvola è monofasico, cioè solo vapore o solo liquido, la modellazione è relativamente semplice. Gli altri casi possibili possono essere:

- sfiato di gas contenente gocce di liquido;
- sfiato di liquido contenente bolle di vapore;
- sfiato di liquido che evapora nel passaggio attraverso la valvola.

Il primo caso può essere trattato come lo sfiato di un gas puro se le gocce sono sufficientemente piccole. Il secondo caso è possibile quando in un serbatoio la frazione di liquido è così grande che il passaggio delle bolle di gas attraverso il liquido è praticamente impossibile.

Il terzo caso merita un'analisi più dettagliata. Il liquido compresso, nel passaggio attraverso la valvola compie una espansione adiabatica fino a che raggiunge la saturazione. A questo punto, se la nucleazione a formare le bolle di vapore è lenta, il flash del liquido non è immediato. In tal caso l'espansione prosegue ed il liquido entra nella regione metastabile. Tale stato si mantiene per breve tempo fino a che l'aumento della formazione delle bolle è tale da riportare il fluido in equilibrio di fase.

## 7.2 Portata di massa uscente

La portata in uscita da una restrizione può essere valutata con l'equazione proposta dall'A.S.M.E.:

$$G = F \cdot \rho = C \cdot Y \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \psi \cdot (p_1 - p_2) \cdot \rho_1}{1 - \beta^4}}$$

dove:

$G$ : portata massiva attraverso la restrizione,  $\frac{\text{Kg}}{\text{sec}}$ ;

$F$ : portata volumetrica,  $\frac{\text{m}^3}{\text{sec}}$ ;

$\rho$ : densità del fluido,  $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ;

$C$ : coefficiente di efflusso, adimensionale;

$Y$ : fattore di espansione, adimensionale;

$A$ : area della sezione della restrizione, in  $\text{m}^2$ ;

$\psi$ : costante dimensionale,

$p_1$ : pressione a monte della restrizione, in Pascal;

$p_2$ : pressione a valle della restrizione, in Pascal;

$\rho_1$ : densità del fluido a monte della restrizione,  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ;

$\beta$ : rapporto tra il diametro della restrizione e il diametro della tubazione a monte della restrizione, adimensionale.

Il coefficiente di efflusso può essere determinato utilizzando i grafici  $C$  vs  $\text{Re}$ , parametrici in  $\beta$ , dove  $\text{Re}$  è il numero adimensionale di Reynolds.

Il fattore di espansione  $Y$  tiene conto del cambiamento di densità del gas nell'espansione adiabatica attraverso la valvola. Viene espresso con la relazione seguente:

$$Y = \sqrt{r^{\frac{2}{k}} \cdot \left(\frac{k}{k-1}\right) \cdot \left(\frac{1-r^{\frac{k-1}{k}}}{1-r}\right) \cdot \left(\frac{1-\beta^4}{1-\beta^4 \cdot r^{\frac{2}{k}}}\right)}$$

dove:

$k = \frac{c_p}{c_v}$ : rapporto dei calori specifici, adimensionale;



$$r = \frac{p_2}{p_1} \text{ adimensionale.}$$

I valori del fattore di espansione possono essere determinati utilizzando dei grafici  $Y$  vs  $\frac{1-r}{k}$ , parametrici in  $\beta$ . Per un liquido,  $Y$  ha valore unitario.

Queste relazioni possono essere usate nel calcolo della portata della massa in uscita dalla valvola di sicurezza del serbatoio. È necessario però considerare la possibilità della formazione di un flusso critico o sonico. La pressione critica, cioè la pressione alla quale il fluido raggiunge la velocità del suono, viene descritta dalla seguente equazione, valide per un gas ideale:

$$r_c^{\frac{1-k}{k}} + \left(\frac{k-1}{2}\right) \cdot \beta^4 \cdot r_c^{\frac{2}{k}} = \frac{k+1}{2}$$

dove:

$$r_c = \frac{p_c}{p_1}, \text{ con } p_c \text{ pressione critica.}$$

L'equazione precedente può essere semplificata nei casi in cui  $\beta \leq 0.2$ :

$$r_c = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Sempre nella stessa ipotesi, la portata di massa uscente dalla valvola vale:

$$G_{\max} = C \cdot A \cdot \sqrt{\psi \cdot k \cdot \left(\frac{p_1}{v_1}\right) \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

dove:

$$v_1: \text{ volume specifico del fluido a monte della valvola, } \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}.$$

L'area della sezione minima necessaria all'efflusso del gas, può essere valutata con la formula riportata nelle API 520:

$$A = \frac{18.41 \cdot F' \cdot S^{0.82}}{\sqrt{P_1} \cdot K}$$

dove:

- $S$ : superficie del serbatoio esposta all'irraggiamento, in  $\text{m}^2$ ;
- $P_1$ : pressione che si verifica al dispositivo di sicurezza, durante lo scarico della piene portata prevista attraverso di esso, in bar;
- $K$ : coefficiente di contropressione;

$F'$  è il coefficiente di espansione, ricavato dal diagramma di Figura 33.

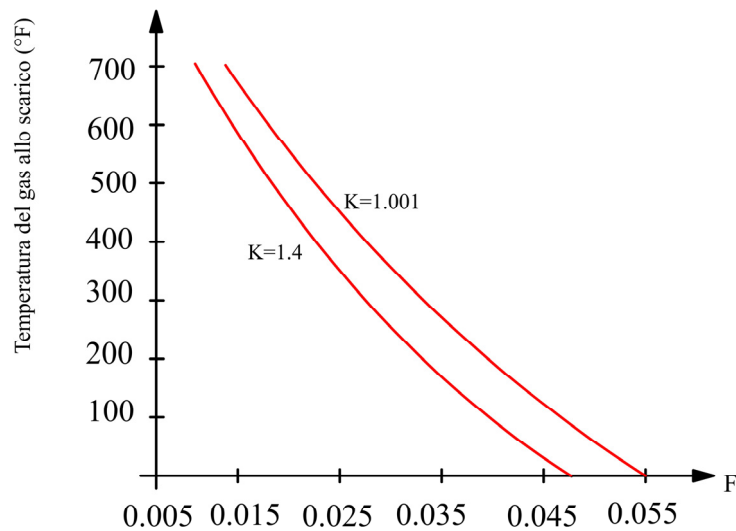


Figura 19: Coefficiente di espansione

La pubblicazione API 520 raccomanda di usare la l'equazione seguente per la valutazione della portata di massa in uscita dalla valvola:

$$G = 0.1406 \cdot \sqrt{M \cdot P_1} \cdot \left( \frac{A' \cdot (T_p - T_g)^{1.25}}{T_g^{1.1506}} \right)$$

dove:

$M$ : massa molecolare del gas, in  $\frac{\text{g}}{\text{mol}}$ ;

$P_1$ : pressione che si verifica al dispositivo di sicurezza, durante lo scarico della piene  
portata prevista attraverso di esso, in  $\frac{\text{lb}}{\text{inch}^2}$ ;

$T_p$ : temperatura parete, in °F;

$T_g$ : temperatura del gas, in °F;

$A'$ : area della superficie esposta alla fiamma, in  $\text{inch}^2$ .

Per quanto riguarda la valutazione della portata di massa di fluido che è necessario far evacuare dal serbatoio in caso di incendio, l'ANCC impone la seguente formula, per recipienti contenenti liquidi in equilibrio con la loro fase gassosa:

$$G = 10.3 \cdot \frac{H \cdot S^{0.82}}{Q_{evap}}$$



dove:

$G$ : portata, in  $\frac{\text{Kg}}{\text{sec}}$ ;

$H$ : fattore di isolamento termico, funzione del coefficiente di trasmissione di calore dell'eventuale coibentazione presente, da assumere secondo la tabella.

Tabella 12: Fattore di isolamento termico

Coeff. di trasmissione (Kcal/h·m <sup>2</sup> ·°C)	H
> 19	1
9÷19	0.5
< 9	0.3

$S$ : superficie esposta al fuoco del recipiente a contatto con il liquido, in m<sup>2</sup>. Se il serbatoio si trova ad una distanza inferiore di 7 m dalla radiazione, nella superficie  $S$  deve includersi, se non già compresa nell'ipotesi precedente, la porzione di superficie esposta a radiazione.

0.82: è un fattore di esposizione che tiene conto del diverso grado con cui le parti di un'apparecchiatura possono essere riscaldate da un incendio.

$Q_{evap}$ : calore latente di vaporizzazione valutato alla pressione massima al dispositivo di sicurezza durante lo scarico, in  $\frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$ .

### 7.3 Modifiche del bilancio termico

L'apertura della valvola comporta la fuoriuscita di fluido dal serbatoio, accompagnata da una perdita di calore. Il bilancio termico viene eseguito facendo riferimento ad una fuoriuscita di fase gas.

$$\left[ \frac{\partial(\rho \cdot V \cdot c_p \cdot T)}{\partial t} \right]_g = [Q_{conv} + Q_{irr}]_{3-5} + [Q_{conv} + Q_{irr}]_{p/5} - [Q_{conv} + Q_{irr}]_{4-5} + Q_{evap} - Q_v$$

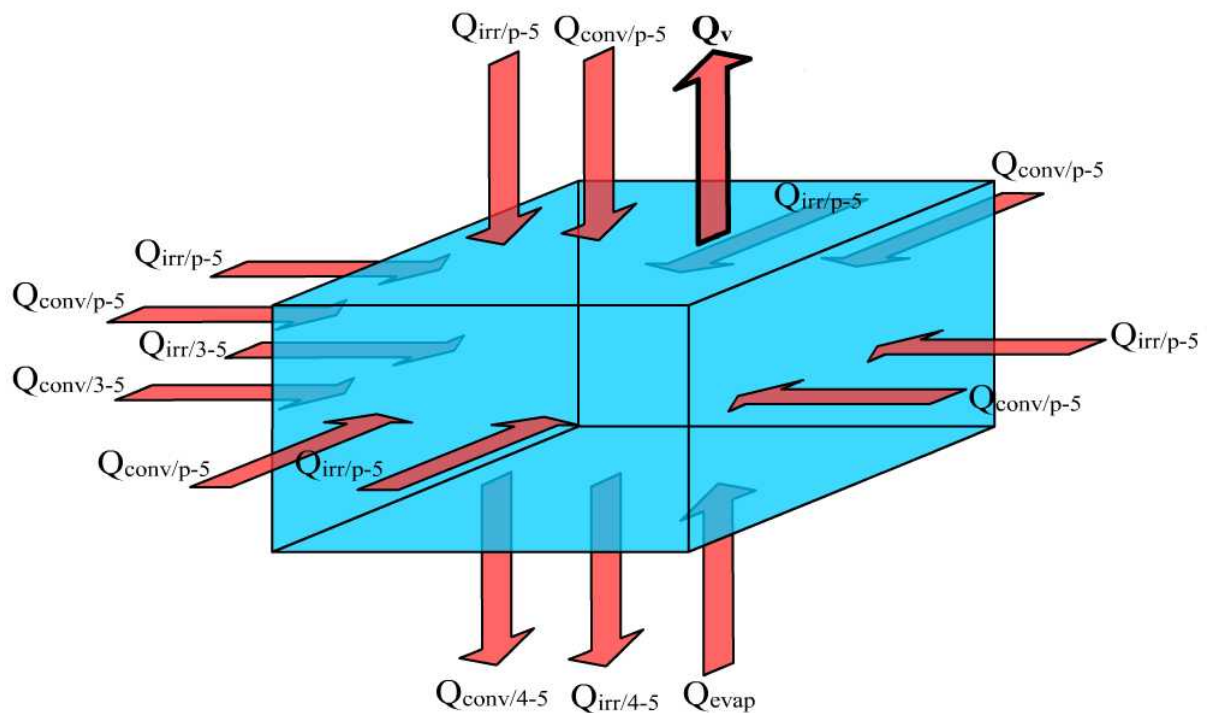


Figura 20: Nodo 5 dopo apertura PSV

$Q_v$  rappresenta il calore perso dal sistema a seguito della fuoriuscita di gas di portata  $G$ :

$$Q_v = G \cdot h_{gas}(T_v, P_v)$$

dove:

$h_{gas}(T_v, P_v)$ : entalpia del gas in uscita dal serbatoio attraverso la valvola, calcolato alla  $T_v$  e alla  $P_v$ , rispettivamente temperatura e pressione del gas al momento dell'apertura della valvola.

Il valore di  $G$  da adottare, secondo criteri cautelativi, può essere il minore tra quello valutato secondo le formule di sopra.

Il fluido in uscita dalla PSV crea un moto turbolento all'interno del serbatoio e gli scambi termici passano da un regime di convezione naturale ad un regime di convezione forzata. In particolare può essere usata la relazione [28]:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4}$$





## 7.4 Incertezze nella valutazione della pressione interna del serbatoio

La valutazione della pressione all'interno del serbatoio è fonte di grande incertezze. Il problema può essere diviso in due fasi distinte: valvola di sfiato chiusa e aperta.

Quando la valvola di sfiato è chiusa, l'incremento di pressione all'interno del serbatoio è dovuto all'evaporazione del liquido.

Le modalità di dimensionamento "corretto" delle PSV è oggi previsto per legge con due ipotesi di scelta:

- incendio esterno;
- errore di manovra.

In casi di questo tipo, risulta dominante il criterio di dimensionamento per incendio.

All'apertura della valvola di sfiato, la diminuzione della pressione è legata al tipo di valvola e alla massa di liquido che continua ad evaporare.

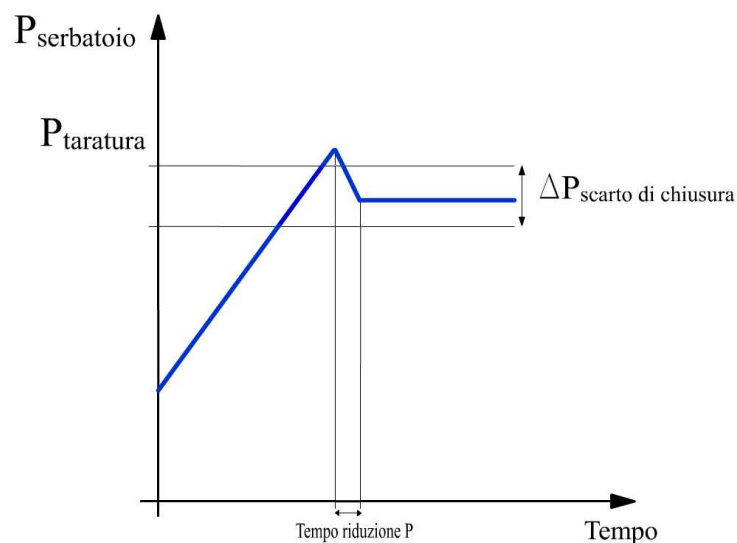


Figura 21: Andamento della pressione nel serbatoio all'apertura della valvola di sfiato

Se la valvola è in grado di sfiatare una quantità di fluido tale da controbilanciare la produzione di vapore per ebollizione di liquido, allora la pressione potrà essere considerata costante all'interno del serbatoio e il processo, nel suo insieme, isobaro. Questa ipotesi è tanto più valida quanto più trascurabile è il tempo che intercorre tra l'apertura della valvola e l'assestamento della pressione, indicato come "Tempo riduzione P" nella Figura 21: Andamento della pressione nel serbatoio all'apertura della valvola di sfiato





## 8 ANALISI STRUTTURALE

L'analisi strutturale di apparecchiature soggette a radiazione termica richiede a monte i risultati dell'analisi termica. La conoscenza infatti della variazione della temperatura della parete nel tempo, consente di conoscere la variazione della tensione ammissibile del serbatoio nel tempo. Allo stesso modo, la conoscenza dell'aumento della pressione interna dovuto all'evaporazione del liquido, consente di determinare la variazione della tensione equivalente nel tempo.

### 8.1 Acciai caratteristici dell'industria di processo

Lo studio della risposta di apparecchiature soggette a radiazione termica non può esimersi dalla conoscenza delle caratteristiche dei materiali coinvolti e della variazione delle loro proprietà all'aumentare della temperatura.

#### 8.1.1 Tipologia di acciai

Gli acciai normalmente utilizzati nell'industria di processo [29] possono essere classificati nella maniera seguente:

- al carbonio;
- resistenti al fuoco;
- inossidabili;
- RQT.

Gli acciai resistenti al fuoco sono caratterizzati, da valori della tensione di rottura maggiore dei normali acciai al carbonio. Tra i più noti vi sono, secondo la nomenclatura inglese BS (British Steel), l'acciaio "Ducol" e, secondo la normativa giapponese NFR (Nippon Fire Resistance), l'acciaio SM40-NFR.

Gli acciai inossidabili, sono caratterizzati, alle temperature superiori ai 550 °C, da una tensione di rottura maggiore degli acciai normali al carbonio. Quest'ultimi infatti, sopra i 400 °C, subiscono una drastica diminuzione di tale tensione.

Nel Figura 36 si riporta l'andamento del fattore di riduzione della tensione di snervamento 0.2%, ovvero  $\frac{\sigma_{s,0.2,T}}{\sigma_{s,0.2,20^{\circ}C}}$ , in funzione della temperatura, per due acciai inossidabili austenitici, AISI 316 e 304, per l'acciaio SM40-NFR e un comune acciaio al carbonio.

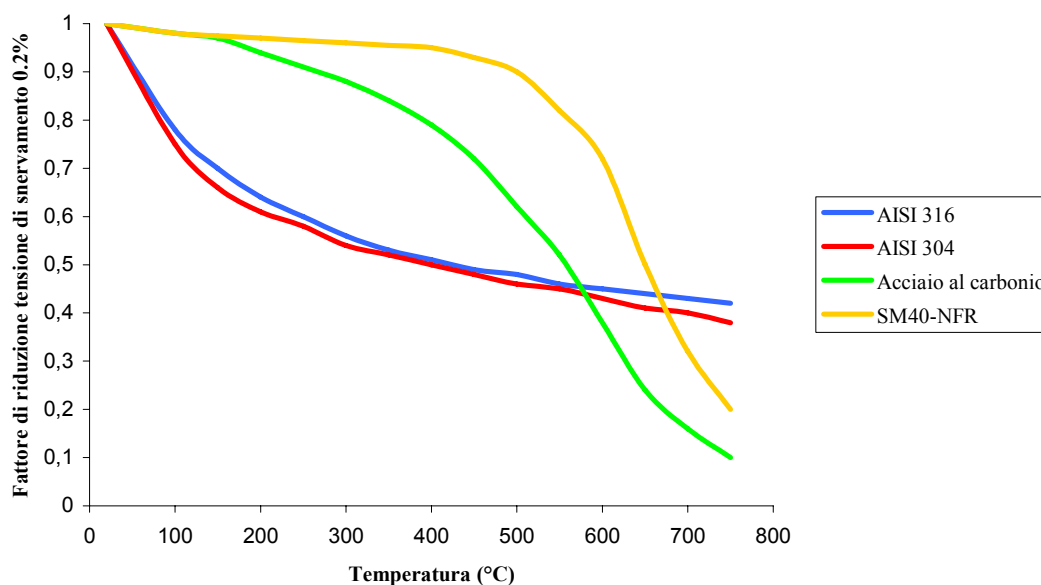


Figura 22: Fattore di riduzione tensione di snervamento

Gli acciai RQT, Roller Quenched and Tempered Steel, sono caratterizzati da tensioni di rottura piuttosto elevate, variabili tra  $450 \text{ N/mm}^2$  e  $700 \text{ N/mm}^2$ . Questa particolare caratteristica, unita alla buona tenacità, è ottenuta attraverso un riscaldamento a  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , successivo quenching, mediante acqua ad alta pressione e tempra.

### 8.1.2 Proprietà degli acciai alle alte temperature

Le proprietà degli acciai possono essere distinte in termiche e strutturali.

Le proprietà termiche più importanti ai fini di questo studio sono:

- coefficiente di espansione termica;
- conduttività termica;
- calore specifico.



Si riassumono di seguito, la variazione di tali proprietà in funzione della temperatura, per un acciaio inossidabile.

Tabella 13: Variazione delle proprietà termiche per un acciaio inossidabile

Temperatura (°C)	Coeff. di espansione termica (°C·10 <sup>-5</sup> )	Conduttività termica (W/m·°C)	Calore specifico (J/kg·°C)
20	1.60	14.3	499
100	1.60	15.5	499
200	1.66	17.0	510
300	1.72	18.4	522
400	1.77	20.0	533
500	1.83	21.5	544
600	1.87	23.0	553
700	1.91	24.5	560
800	1.93	26.0	563

In generale, per tutti gli acciai, l'aumento di temperatura comporta un aumento delle tre proprietà termiche sopra menzionate.

Le proprietà strutturali più importanti sono:

- curve sollecitazione-deformazione;
- modulo di elasticità.

Tali proprietà subiscono dei peggioramenti all'aumentare della temperatura. Ciò si è già potuto notare con il grafico di sopra.

La Figura 23: Andamento qualitativo della sollecitazione mostra invece come, qualitativamente, un acciaio subisca un abbassamento delle curve sollecitazione-deformazione all'aumentare della temperatura: la stessa deformazione viene raggiunta con una sollecitazione via via minore.

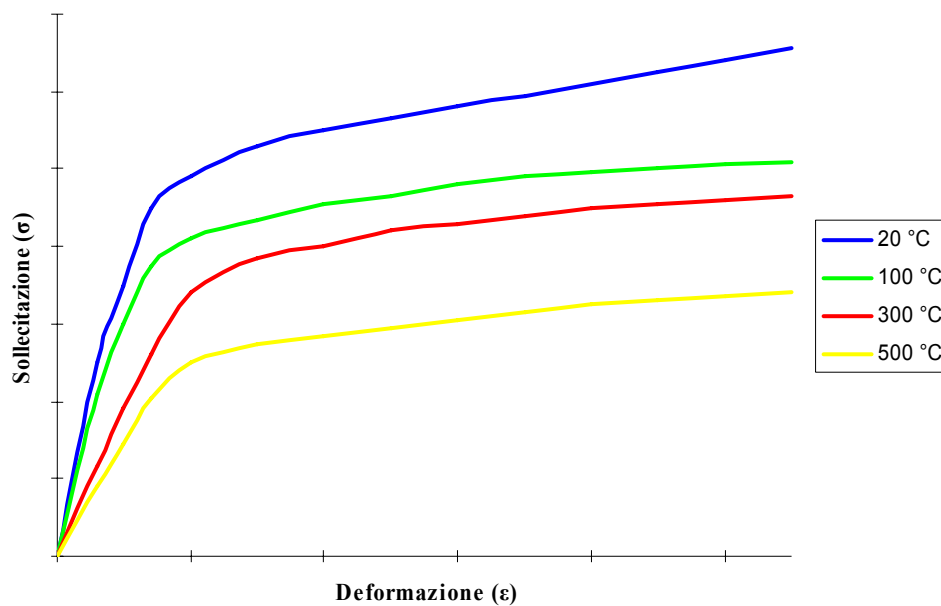


Figura 23: Andamento qualitativo della sollecitazione

Dalla Figura 24: Modulo di Young per un comune acciaio al carbonio si evince che il modulo di Young subisce una netta diminuzione all'aumentare della temperatura. Nel grafico seguente si riporta l'andamento di tale parametro, per un comune acciaio al carbonio, in funzione della temperatura.

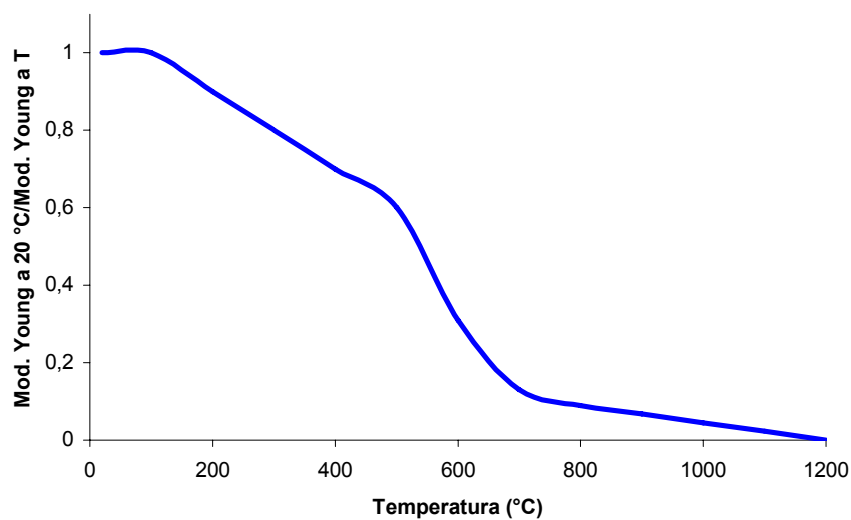


Figura 24: Modulo di Young per un comune acciaio al carbonio

Un ultimo problema che merita attenzione è il creep dell'acciaio, ovvero la possibilità che il materiale collassi, nonostante sia soggetto, nel tempo, ad una sollecitazione inferiore al-



lo stress di rottura. Il fenomeno del creep può essere comunque trascurato in prima approssimazione nel caso di radiazioni termiche, incidenti su un'apparecchiatura, particolarmente intense, tali ad esempio da causare incrementi di temperatura di 100 °C al minuto.

## 8.2 Verifica strutturale

Nella verifica strutturale di un serbatoio cilindrico appare di particolare importanza valutare lo spessore della struttura, in quanto ad esso sono legate due tipologie di trattazioni:

- spessore del serbatoio trascurabile;
- spessore del serbatoio non trascurabile.

Nel caso di spessore trascurabile vale la seguente relazione, nota come formula di Amburgo:

$$\frac{P_i}{K-1} \leq \sigma_{am}$$

dove:

$P_i$ : pressione interna al cilindro,  $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ;

$$K = \frac{r_e}{r_i};$$

$r_e, r_i$ : raggio esterno ed interno del cilindro, in m;

$s$ : spessore del cilindro, in m;

$\sigma_s$ : tensione di snervamento del materiale,  $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ;

$f.s.$ : fattore di sicurezza, adimensionale;

$\sigma_{am} = \frac{\sigma_s}{f.s.}$ : tensione ammissibile del materiale,  $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ .

Sempre nell'ipotesi di spessore trascurabile vale la seguente relazione approssimata:

$$s = r_i \cdot (K-1) \cong r \cdot (K-1)$$

Nel caso di spessore non trascurabile, è necessario considerare le tensioni lungo le direzioni radiale, longitudinale e trasversale. Per un cilindro chiuso, ovvero per un cilindro il cui fondo e la cui testa sono saldati o flangiati sul resto del corpo, le tensioni longitudinali ( $\sigma_l$ ), radiali ( $\sigma_r$ ) e tangenziali ( $\sigma_t$ ), possono essere così espresse:

$$\sigma_l = \frac{p_i - K^2 \cdot p_e}{K^2 - 1}$$

$$\sigma_r = \frac{p_i - K^2 \cdot p_e}{K^2 - 1} - \frac{p_i - p_e}{K^2 - 1} \cdot \left(\frac{r_e}{r}\right)^2$$

$$\sigma_t = \frac{p_i - K^2 \cdot p_e}{K^2 - 1} + \frac{p_i - p_e}{K^2 - 1} \cdot \left(\frac{r_e}{r}\right)^2$$

dove:

$p_e$ : pressione esterna al serbatoio;

$r$ : raggio generico del serbatoio.

In questo caso nasce l'esigenza di esprimere in un'unica tensione, che chiameremo equivalente, l'insieme delle tensioni cui una struttura è sottoposta. Esistono in letteratura varie correlazioni usate per esprimere la tensione equivalente. In questa sede si è deciso di fare riferimento al criterio di Von Mises, basato sull'ipotesi che lo snervamento della struttura venga innescato dallo sforzo di taglio  $\tau$ , e che quindi la relazione di verifica strutturale si possa esprimere nella maniera seguente:

$$\tau_{eq} \leq \tau_{am}$$

Si introduce lo sforzo di taglio equivalente, secondo la seguente relazione:

$$\tau_{eq}^2 = \tau_{ij}^2 + \tau_{iz}^2 + \tau_{jz}^2$$

dove:

$$\tau_{i,j} = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2};$$

i, j, z: pedici riferiti alle tensioni longitudinale, trasversale e radiale.

La relazione di Von Mises finale è la seguente:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \cdot \frac{K^2}{K^2 - 1} \cdot P_i \leq \sigma_{am}$$

Nella Figura 25: Confronto tra la tensione equivalente Amburgo e Von Misesi riconoscono i limiti dell'estensione della formula di Amburgo, anche nei casi di spessori non trascurabili.



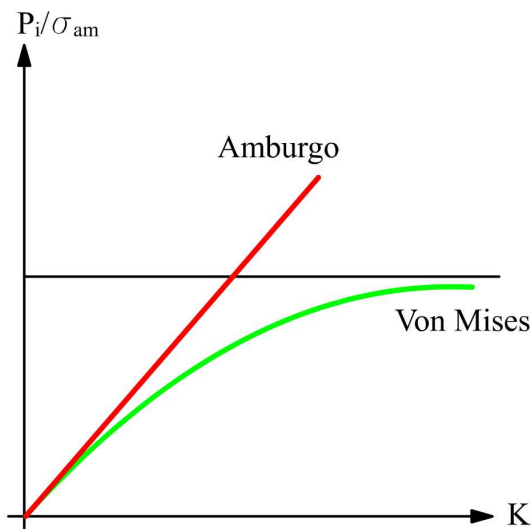


Figura 25: Confronto tra la tensione equivalente Amburgo e Von Mises

La retta di Amburgo diverge e ciò significa che teoricamente, per qualsiasi materiale, esiste un valore di  $K$  che soddisfa alla verifica strutturale per qualsiasi pressione applicata. La curva di Von Mises invece, presenta un asintoto che ha il significato di limite della capacità di resistenza alla pressione interna di una struttura, indipendentemente dal valore di  $K$ .

### 8.3 Collasso strutturale

Il cedimento di un'apparecchiatura soggetta a radiazione termica può avvenire fondamentalmente per due motivi:

- 1) cedimento per plasticizzazione;
- 2) cedimento per instabilità.

Il cedimento per plasticizzazione avviene a causa del superamento della tensione equivalente rispetto alla tensione ammissibile. Tale fenomeno può avvenire in una zona dell'apparecchiatura più o meno localizzata. Per tale motivo è necessario confrontare i due valori di tensione in ogni punto dell'apparecchiatura, e non solo quindi nei punti a temperatura maggiore.

Il cedimento per instabilità avviene quando le tensioni tangenziali o longitudinali superano quelle critiche. Ciò comporta la perdita dell'equilibrio stabile della struttura che tende a collassare.

Per prevedere il collasso di un serbatoio è quindi necessario conoscere la tensione equivalente, la tensione ammissibile, la tensione tangenziale e longitudinale in ogni punto della struttura ed in ogni istante di tempo. In particolare nella Tabella 14: Variabili da determinare per l'analisi strutturale si riassumono le variabili da determinare, necessarie per effettuare un'analisi strutturale adeguata.

Tabella 14: Variabili da determinare per l'analisi strutturale

Variabile	Descrizione
$\sigma_{eq}$	Dalla formula di Von Mises, è necessario conoscere la variazione della pressione interna, $P_i$ , nel tempo e nello spazio.
$\sigma_{am}$	È necessario conoscere l'influenza della temperatura sulla tensione ammissibile di un materiale. Poiché la temperatura è una funzione del tempo, lo è anche la tensione ammissibile.
$\sigma_l, \sigma_t$	È necessario conoscere l'influenza della temperatura sulle tensioni longitudinali e trasversali.

Il raggiungimento di tale obiettivo non è certamente semplice e richiede l'ausilio di software che operino con codici di calcolo agli elementi finiti.



## 9 PROBLEMATICHE E LIMITI EMERSI

Lo studio di apparecchiature soggette ad irraggiamento richiede di fissare puntualmente le condizioni al contorno che dettano le caratteristiche della radiazione incidente sul bersaglio. L'analisi rigorosa del problema si scontra però con le mutevoli condizioni dell'evento incidentale sorgente. Quest'ultimo, infatti, è caratterizzato da una serie di variabili, quali:

- tipo di evento (jet-fire, pool fire, ...)
- posizionamento del bersaglio rispetto all'evento sorgente
- che rendono incerta una trattazione puntuale, anche se ben sviluppata. Fissare determinate condizioni al contorno, significa decidere le caratteristiche dell'evento incidentale, di cui ovviamente non si ha certezza, ma si è solo in grado di fornire una frequenza attesa. Per questi motivi appare fondamentale essere in possesso di un'accurata conoscenza dell'evento sorgente, sia in termini chimico-fisici, sia in termini probabilistici, al fine di evitare di ottenere dei risultati intrinsecamente esatti, ma incoerenti con la reale problematica del contesto.

Stabilite le caratteristiche dell'evento sorgente, è necessario ipotizzare la zona della superficie del bersaglio che viene colpita maggiormente dall'incidente. L'unica certezza in tal senso è l'eventuale zona dell'apparecchiatura che "non vede" l'evento sorgente. In questo caso è necessario sfruttare il fattore di vista legandolo ad una probabilità. In particolare se la fiamma lambisce la parete a contatto col liquido, allora il sistema serbatoio-fluido avrà maggiori capacità di smaltimento del calore, e quindi tempi di cedimento più lunghi, rispetto al caso in cui la fiamma tocchi la parete a contatto col gas. Nel caso di serbatoi completamente ingolfati, la percentuale di liquido presente influenza ancora una volta la capacità di smaltimento di calore: all'aumentare di tale percentuale diminuisce la temperatura raggiunta dalla parete. Ciò è stato anche comprovato da varie sperimentazioni, su serbatoi di GPL non protetti, ingolfati da un pool-fire, come di seguito riportato nella Tabella 15: Risultati delle sperimentazioni condotte su serbatoi di GPL [20].

Tabella 15: Risultati delle sperimentazioni condotte su serbatoi di GPL

Capacità nominale del serbatoio e % di riempimento di liquido	Quantità iniziale di GPL (litri)	Temperatura massima della parte (°C)	Pressione alla temperatura massima (bar)	Tempo di apertura della PSV (sec)	Flusso di calore (kW/m <sup>2</sup> )
¼ t, 40%	185	600	35	190	-
1t, 20%	308	680	7	297	-
1t, 40%	789	620	8.8	262	-
1t, 80%	1635	570	6.3	226	-
5t, 20%	2250	635	11	373	99
5t, 40%	3676	657	10	415	101

Capacità nominale del serbatoio e % di riempimento di liquido	Quantità iniziale di GPL (litri)	Temperatura massima della parte (°C)	Pressione alla temperatura massima (bar)	Tempo di apertura della PSV (sec)	Flusso di calore (kW/m <sup>2</sup> )
5t, 60%	5900	610	11	401	-
5t, 80%	7644	572	11	312	96

Per quanto concerne il calcolo del calore che dalla fiamma arriva alla struttura (precedentemente indicato con  $Q_f$ ), non è un problema che desta particolari preoccupazioni, vista l'ampia letteratura presente. Lo stesso dicasi per il calore di conduzione attraverso la parete. L'aspetto che più necessita di attenzione, è il calcolo del calore assorbito dal liquido in ebollizione, legato all'incertezza del regime di ebollizione e quindi alla scelta dei coefficienti di scambio termico. Accanto a questo aspetto vi è anche la problematica relativa al calcolo della massa evaporata e del relativo incremento di pressione all'interno della struttura. La variazione di temperatura e di pressione all'interno dell'apparecchiatura, rende necessaria una valutazione continua nel tempo del calore latente di vaporizzazione del liquido in ebollizione. Inoltre, la continua diminuzione del livello di liquido comporta l'aggiunta di una variabile nell'eventuale utilizzo di un metodo a nodi. Infatti il nodo corrispondente alla massa di liquido che evapora, cambia conformazione nel tempo a seguito della variazione del suo stato di aggregazione.

Infine l'analisi strutturale non può limitarsi al semplice confronto delle tensioni equivalenti ed ammissibili, ma è auspicabile l'utilizzo di un metodo agli elementi finiti, che permette di conoscere l'andamento delle tensioni in ogni punto della struttura.



## GLOSSARIO

**Affidabilità:** capacità di un elemento nel compiere una determinata funzione per un intervallo di tempo continuo.

**Albero dei guasti:** metodo induttivo (top-down) per calcolare la frequenza di accadimento di un *Top Event*. A partire dal top event, si scende verso il basso per calcolare le concatenazioni di eventi che lo causano.

**Albero degli eventi:** metodo deduttivo per la valutazione della frequenza di accadimento del *Top-Event*. Per ogni componente si valutano le conseguenze relative al verificarsi o meno di una data azione che il componente deve compiere.

**Analisi operativa o di operabilità:** con lo "Studio di Operabilità" si svolge un'analisi sistematica di un impianto, allo scopo di precisare e chiarirne tutti gli aspetti nonché di identificarne quelle aree che, per la loro complessità o per altri motivi, richiedono un esame più attento ed approfondito. In questo esame l'attenzione si fissa essenzialmente sulla funzione che un particolare *elemento* dell'impianto svolge nel processo.

**Attivo o attivato:** *componente* in utilizzo (acceso, collegato,...).

**Availability:** vedi *disponibilità*.

**Bersaglio:** struttura o area di rilevante interesse soggetta agli effetti di un incidente chimico.

**Bleve:** Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – Evento di rottura duttile delle lamiere di un serbatoio sottoposte contemporaneamente alla pressione interna del fluido e ad un riscaldamento che ne attenua la resistenza meccanica. In tal caso si ha il cedimento del serbatoio con brusca espansione del fluido contenuto e proiezione di frammenti di lamiera a notevoli distanze. Il fluido rilasciato comporta la formazione di una sfera di gas infuocato (fireball) che si dilata e si eleva nell'aria irraggiando calore. Per quanto riguarda il BLEVE ed il conseguente FIREBALL si precisa che non è un evento determinato dal solo innesco di una perdita ma, perché abbia luogo, si deve verificare una concatenazione di cause. Infatti, il BLEVE avviene perché un incendio coinvolge un serbatoio contenente gas compresso liquefatto e quest'incendio permane ed interessa direttamente una zona del mantello non in contatto con il liquido, per cui si ha il cedimento del serbatoio prima che tutto il liquido sia evaporato.

**Componente:** la più piccola entità riscontrabile in grado di compiere una data funzione.

**Creep o scorrimento a caldo:** lenta e continua deformazione, nel tempo, di un materiale in determinate condizioni di sollecitazione e temperatura. È il fenomeno secondo il quale carichi inferiori al limite elastico possono portare, per applicazioni prolungate nel tempo, a deformazioni permanenti.

**CVE:** Confined Vapour Explosion – Esplosione confinata all'interno di un'apparecchiatura o di un elemento impiantistico.

**Deflagrazione:** combustione di gas o vapore infiammabili con formazione di un'onda di pressione che precede il fronte della fiamma a velocità inferiore a quella del suono.

**Detonazione:** combustione di gas o vapore infiammabili con formazione di un'onda di pressione che precede il fronte della fiamma a velocità superiore a quella del suono.

**Deposito:** presenza di una certa quantità di sostanze pericolose a scopo di immagazzinamento, deposito per custodia in condizioni di sicurezza o stoccaggio.

**Disattivato:** *componente* non utilizzato (spento, scollegato, ...).

**Dispersione:** rilascio di sostanze tossiche, infiammabili o pericolose per l'ambiente non seguito da incendio

**Disponibilità:** capacità di un *componente* di rimanere in uno stato *operativo* per poter compiere la funzione richiestagli, sotto certe condizioni, ad un dato istante di tempo.

**Effetto domino:** sequenza d'incidenti in cui il precedente evento è la causa del successivo.

**Evento incidentale primario:** l'evento incidentale che è causa della concatenazione di altri eventi incidentali.

**Fireball:** combustione rapida dei vapori prodotti dalla vaporizzazione di gas compressi liquefatti con un fenomeno classico di innalzamento della palla di fuoco.

**Flash fire:** incendio in massa di una nuvola di vapore infiammabile con effetto non esplosivo.

**Gestore:** la persona fisica o giuridica che gestisce o detiene lo stabilimento o l'impianto.

**GPL:** gas di petrolio liquefatto. Miscela di idrocarburi leggeri (soprattutto propano e butano), gassosa a pressione atmosferica ma facilmente liquefattibile a temperatura ambiente, attraverso una limitata compressione.

**Guasto:** *componente* che si trova in uno stato tale per cui non è in grado di svolgere correttamente la propria funzione. Esso può guastarsi mentre è *attivo* o *disattivato*.

**Haz-Op Analysis:** vedi *Analisi operativa o di operabilità*.

**IDLH:** concentrazione in aria, espressa in mg/l, di sostanza tossica fino alla quale l'individuo sano, in seguito ad esposizione di 30 minuti, non subisce per inalazione danni irreversibili alla salute e sintomi tali da impedire l'esecuzione delle appropriate azioni protettive

**Impianto:** una unità tecnica all'interno di uno stabilimento, in cui sono prodotte, utilizzate, manipolate o depositate sostanze pericolose. Comprende tutte le apparecchiature, le strutture, le condotte, i macchinari, gli utensili, le diramazioni ferroviarie particolari, le banchine, i pontili che servono all'impianto, i moli, i magazzini e le strutture analoghe, galleggianti o meno, necessari per il funzionamento dell'impianto.

**Inaffidabilità:** la capacità di **non** compiere una data funzione in un dato intervallo di tempo.

**Incendio:** sviluppo stabile per periodi prolungati di tempo di irraggiamento termico con conseguenze dirette sugli individui impossibilitati a sottrarsi per tempo dall'irraggiamento sulle strutture con conseguenti eventi derivati per effetto domino.

**Incidente rilevante:** avvenimento rilevante quale un'emissione, un incendio o un'esplosione di rilievo connessi ad uno sviluppo incontrollato di una attività industriale che dia luogo ad un



pericolo grave, immediato o differito per l'uomo, all'interno o all'esterno dello stabilimento, e per l'ambiente e che comporti l'uso di una o più sostanze pericolose. Tali sostanze sono composti chimici che provocano effetti nocivi sull'organismo umano quando sono inalati, ingeriti o assorbiti per via cutanea (*sostanze tossiche*), oppure che possono liberare grandi quantità di energia termica (*sostanze infiammabili*) e/o energia dinamica (*sostanze esplosive*).

**Indisponibilità:** la capacità di un *componente* di **non** trovarsi in uno stato *operativo* per poter compiere la funzione richiestagli ad un dato istante.

**Jet fire:** incendio di un getto gassoso turbolento infiammabile, effluente da un componente impiantistico in pressione.

**LC50:** concentrazione di sostanza tossica, letale per il 50% dei soggetti esposti per un determinato tempo.

**LFL:** limite inferiore di infiammabilità

**Magnitudo:** quantificazione qualitativa e quantitativa delle conseguenze di accadimento del *Top-Event*.

**Maintainability:** vedi *Riparabilità*.

**Manutenzione:** controlli ed interventi periodici eseguiti sull'impianto. Per manutenzione si può intendere anche il "sistema organizzativo" che li regola.

**Minimal-Cut-Set:** minima concatenazione di eventi che porta al *Top-Event* identificabile nell'*albero dei guasti*.

**Modulo di elasticità normale o modulo di Young:** è il rapporto tra la sollecitazione unitaria di trazione e la corrispondente deformazione unitaria longitudinale. Deriva dalla legge di Hooke, secondo cui, in regime elastico, le deformazioni di un materiale sono proporzionali alle sollecitazioni.

**Operativo:** *Componente* che si trova in uno stato tale per cui è in grado di svolgere la propria funzione. Esso può essere *attivo* o *disattivato*.

**Pericolo:** la proprietà intrinseca di una sostanza pericolosa o della situazione fisica esistente in uno stabilimento di provocare danni per la salute umana o per l'ambiente.

**Pool fire:** incendio di una pozza di liquido infiammabile al suolo.

**Prevenzione:** adozione di "sistemi" mirati alla diminuzione della frequenza di accadimento di un evento indesiderato (*stand-by*, *ridondanza*, *manutenzione*, ...).

**Protezione:** adozione di "sistemi" mirati alla diminuzione delle conseguenze (*magnitudo*) di un evento indesiderato (autoprotettori, piani di evacuazione, cortine d'acqua, ...).

**Quenching:** brusco raffreddamento di un materiale o di un fluido ottenuto mediante l'immersione in un liquido o in un gas freddi.

**Rapporto di Sicurezza (RdS):** Documento redatto dalle aziende soggette ad articolo 8 del Decreto 334/99, in cui il gestore è tenuto a: descrivere dettagliatamente l'attività svolta; analizzare sistematicamente i rischi connessi; garantire l'adozione delle necessarie misure di sicurezza e di prevenzione, nonché dei programmi di informazione e addestramento del personale

addeito; riportare le informazioni di supporto alle decisioni in merito all'insediamento di nuovi stabilimenti o alla costruzione di insediamenti attorno agli stabilimenti già esistenti.

**Rateo:** frequenza con cui un elemento passa da uno stato ad un altro. In particolare distinguiamo tra:

- **rateo di guasto per chiamata:** frequenza di accadimento evento di transizione dallo stato *operativo* a quello *guasto* misurata rispetto al numero di volte in cui il *componente* o *sistema* viene *attivato*;
- **rateo di guasto:** frequenza di accadimento evento di transizione dallo stato *operativo* a quello *guasto* misurata rispetto al tempo;
- **rateo di riparazione:** frequenza di accadimento evento di transizione dallo stato *guasto* a quello *operativo* misurata rispetto al tempo.

**Reazione runaway:** reazioni esotermiche fuggitive a decorso indesiderato.

**Reliability:** vedi *Affidabilità*

**Ridondanza:** introduzione di *componenti* in soprannumero rispetto alle esigenze di impianto per far fronte all'eventuale *guasto* di alcuni di loro.

**Riparabilità:** la capacità di un *componente* di essere di nuovo *operativo* all'istante T, essendosi guastato (*guasto*) al tempo  $T_0=0$ .

**Rischio:** danno incerto a cui un soggetto e/o l'ambiente si trova esposto in seguito a possibili incidenti o concatenazioni di eventi sfavorevoli.

**Scenario:** insieme delle condizioni al contorno che descrivono l'accadimento del *Top-Event*.

**Scenario incidentale:** prefigurazione del tipo d'incidente che si può verificare in un impianto tecnologico. I principali scenari incidentali sono il rilascio di gas o vapori, il rilascio di liquidi, l'incendio, l'esplosione confinata o semiconfinata, l'esplosione fisica, l'esplosione chimica, lo scoppio di un recipiente.

**Sostanze pericolose:** le sostanze, miscele o preparati elencati nel Decreto 334/99, che sono presenti come materie prime, prodotti, sottoprodotti, residui o prodotti intermedi, ivi compresi quelli che possono ragionevolmente ritenersi generati in caso d'incidente.

**Stabilimento:** tutta l'area sottoposta al controllo di un gestore, nella quale sono presenti *sostanze pericolose* all'interno di uno o più impianti, comprese le infrastrutture o le attività comuni o connesse.

**Stand-By:** *componente disattivato* pronto da attivarsi (*attivato*) in caso di emergenza. Esso può essere *operativo* o *guasto*.

**Tempo di esposizione:** periodo di tempo durante il quale si è sottoposti ad una concentrazione in atmosfera superiore ad livello prefissato.

**Tenacità:** è la resistenza di un materiale alla frattura fragile. Si determina con la prova di Charpy che misura l'energia richiesta per rompere ad urto un determinato campione.





**Tensione ammissibile:** è il rapporto tra tensione di rottura e un opportuno fattore di sicurezza (maggiore di uno). È normalmente utilizzata come tensione massima di riferimento per la progettazione di apparecchiature in pressione.

**Tensione di snervamento:** valore della tensione applicata ad un materiale che segna il passaggio da comportamento elastico a comportamento plastico.

**Tensione di rottura:** valore della tensione applicata ad un materiale che comporta la rottura dello stesso.

**Top Event:** evento incidentale indesiderato che si trova alla fine di una catena di eventi.

**UVCE:** Unconfined Vapour Cloud Explosion – Esplosione non confinata di una nuvola di vapore.

**Unreliability:** vedi *inaffidabilità*.

**Unavailability:** vedi *indisponibilità*.

**Vessel:** serbatoio.





## **APPENDICI**





## 10 Appendice A: Casi storici di incidenti con effetto domino

### 10.1 Bleve di Città del Messico

Si riportano, in questo paragrafo e nel successivo, due esempi di incidenti avvenuti in tempi e luoghi differenti, ma simili in alcuni aspetti:

- entrambi non erano contemplati nell'analisi di sicurezza di stabilimento;
- entrambi rappresentano un tipico esempio di effetto domino;
- l'evoluzione di entrambi gli incidenti è legata alla progettazione e ai materiali usati nelle apparecchiature di processo.

#### 10.1.1 Descrizione dello stabilimento

Nel 1984 la società Pemex LPG Terminal gestiva un deposito di GPL a San Juan Ixhuatepec, a 15 chilometri a nord di Città del Messico. Lo stabilimento era costituito da 6 serbatoi sferici e da 48 serbatoi cilindrici. Lo stabilimento comprendeva anche una torcia a terra per bruciare gli eccessi di gas e un bacino di riserva idrica, disposti come nella Figura sottostante.

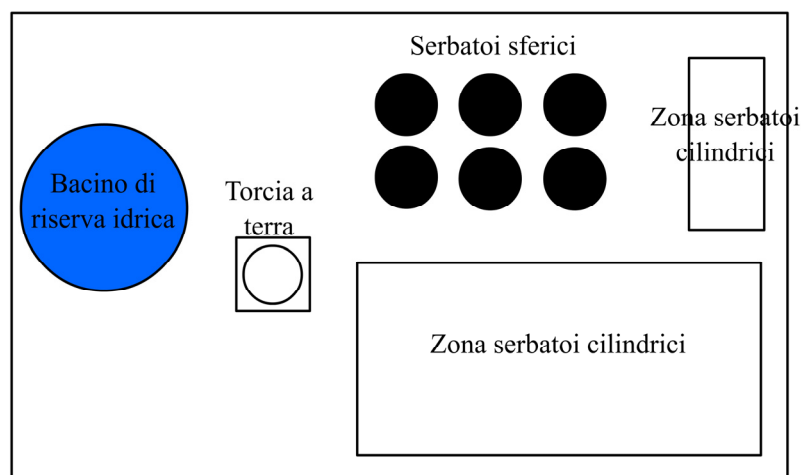


Figura 26: Pianta del deposito di GPL della Pemex

Lo sviluppo selvaggio dell'urbanizzazione, nella zona limitrofa allo stabilimento, aveva portato alla costruzione di abitazioni a non più di 130 metri dai serbatoi, senza quindi tener conto dell'enorme pericolo derivante dall'eccessiva vicinanza ad un tale sito industriale.

### 10.1.2 Descrizione dell'incidente

Il 19 novembre dello stesso anno, alle 5:30, a causa di un aumento imprevisto di pressione, si ebbe la rottura di una tubazione da 8 pollici, con conseguente fuoriuscita di GPL. Dopo 10 minuti la nube aveva già raggiunto una dimensione stimata di 200 x 150 metri di superficie e 2 metri di altezza.

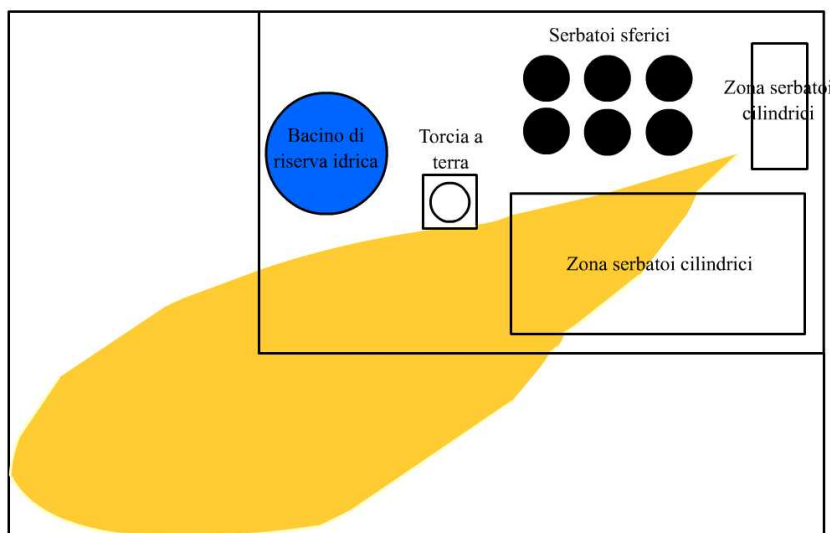


Figura 27: Dimensione del rilascio prima dell'innescamento

Il gas trovò l'innescamento proprio nella torcia a terra, causando un UVCE che raggiunse alcune case e altre tubazioni dello stabilimento, che scoppiarono a loro volta. In quel momento, dei 6 serbatoi sferici, 2 erano riempiti al 90% e gli altri 4 al 50%. Le fiamme raggiunsero un serbatoio sferico che, dopo un minuto, fu soggetto a bleve. Questo a sua volta generò una falla su un altro serbatoio sferico limitrofo che fu soggetto ad un altro bleve, il più devastante. Quest'ultimo incidente generò un fire ball del diametro di 300-400 metri che si proiettò verso il cielo generando una esplosione del tutto simile ad un fungo atomico. Il gpl in fase liquida venne proiettato verso le case con conseguenti incendi. Poco prima delle sei vi fu un altro bleve di un altro serbatoio. Nei successivi 90 minuti si ebbero altre 12 esplosioni. Pezzi di lamiera furono ritrovati a 800 metri dal luogo del disastro e un serbatoio cilindrico fu proiettato a 1200 metri di distanza.



Nei pressi dello stabilimento vi era anche un deposito di bombole di gas per uso domestico. L'incidente coinvolse anche questo sito, comportando l'esplosione di 5000 bombole e degli automezzi impiegati per il loro trasporto.

La zona circostante per un raggio di 400 metri e quindi per un totale di circa 500.000 metri quadrati, venne letteralmente incenerita dal calore di irraggiamento dei bleve. I morti furono 500 e i feriti circa 7.000.

Furono impiegati 200 pompieri per 6 ore per spegnere gli incendi più consistenti e 18 ore in tutto per estinguere completamente le fiamme. I primi interventi di raffreddamento furono eseguiti sui serbatoi, mediante l'irrorazione con acqua per evitare ulteriori bleve.

### 10.1.3 Considerazioni generali

L'incidente di Città del Messico, per il numero di vittime e per la proporzione dei danni, è stato il più grave disastro nei depositi di GPL della storia. La dinamica degli eventi dannosi è stata tale da poterlo considerare un tipico esempio di effetto domino. La successione degli eventi è stata riassunta nella Figura seguente e descritta come una chiara concatenazione di eventi.

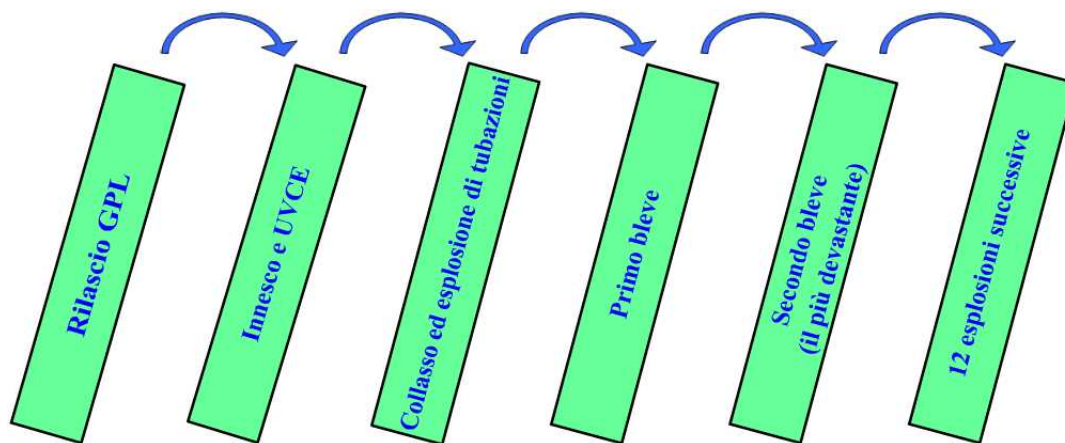


Figura 28: Schematizzazione della successione degli eventi

La drammaticità e le proporzioni di questo incidente, unito a molti altri avvenuti nella storia, danno la consapevolezza che il gestore di uno stabilimento industriale non può esimersi dall'affrontare il problema legato al domino. Viste le proporzioni che possono raggiungere episodi di questo tipo, non è pensabile affrontare la problematica ad un livello di dettaglio riferito al singolo impianto, ma, è necessario prendere in considerazione l'intero polo industriale dove l'impianto stesso è inserito. Il fatto che, nell'incidente di Città del Messico, sia stato coinvolto anche un deposito di bombole di gas, ne è un esempio. Serve quindi un interscam-

bio di informazioni tra stabilimenti limitrofi, indispensabile requisito per poter poi applicare una valida metodologia di approccio all'effetto domino.

## 10.2 Incidente impianto TDI di DOW

### 10.2.1 Descrizione del processo produttivo

Lo stabilimento DOW Poliuretani S.r.l., situato all'interno del polo chimico di Porto Marghera, è ubicato tra gli impianti CS 23-24-25 di Syndial lato nord, tra l'impianto SG 31 al lato est e gli impianti Cracking della Polimeri Europa al lato sud.

Il ciclo produttivo prevede :

- produzione di dinitrotoluolo/recupero acido solforico: reparto TD1/TD7;
- produzione di metatoluendiammina: reparto TD3;
- produzione di fosgene: reparto TD4;
- produzione di toluendiisocianato (TDI): reparto TD5;
- stoccaggio e spedizione TDI: reparto TD6;
- produzione di monossido di carbonio e idrogeno: reparto TD12.

Il dinitrotoluene viene ottenuto per reazione tra toluolo e acido nitrico in presenza di acido solforico che agisce da promotore della reazione e da disidratazione dell'acqua di reazione che si forma come sottoprodotto. La metatoluendiammina viene ottenuta dalla reazione tra dinitrotoluene e idrogeno in presenza di catalizzatore al palladio; come sottoprodotto della reazione si ottiene acqua. Il fosgene viene ottenuto per reazione fra ossido di carbonio e cloro allo stato gassoso su catalizzatore costituito da carbone attivo. L'ossido di carbonio ed il cloro provengono a mezzo di tubazioni rispettivamente dai reparti TD12 e CS23. Il toluendiisocianato si ottiene per reazione fra la metatoluendiammina ed il fosgene in presenza di diclorobenzene come solvente. I sottoprodotti sono l'acido cloridrico e composti altobollenti.

Il TDI purificato è inviato in un serbatoio dove viene aggiunto lo ionolo (stabilizzante per il colore), poi stoccato nei serbatoi dove, se necessario, si effettua la correzione dell'acidità con aggiunta di benzoile cloruro. Il TDI prelevato da questi serbatoi viene inviato all'impianto di infustamento, o alle rampe di carico idonee sia al caricamento di autobotti che di ferrocisterne, o allo stoccaggio di stabilimento presso il Parco Serbatoi Sud.





## 10.2.2 Descrizione della sezione d'impianto sede dell'evento incidentale

L'evento incidentale si è verificato nella sezione altobollenti TDI del reparto TD5. La reazione viene condotta in tre stadi successivi a temperatura crescente da 80°C a 170 °C circa e a pressione decrescente, con formazione di acido cloridrico come sottoprodotto.

Nella sezione altobollenti, viene effettuato il recupero in discontinuo sottovuoto di parte del TDI presente nella miscela, costituita al 50% da TDI e al 50 % da altobollenti. Tale miscela viene stoccata nel serbatoio D 522, dotato di agitatore e serpentine di raffreddamento ad acqua.

Il recupero del TDI viene effettuato mediante evaporazione nel concentratore D 525/1 dotato di agitatore di serpentina di riscaldamento a circolazione di vapore e mantenuto sotto vuoto. Il concentratore D 525/1 viene alimentato dai serbatoi D 528/1-2-3 aventi funzione di polmone.

Il TDI evaporato viene quindi condensato, il liquido inviato a stoccaggio, i gas rimanenti passano attraverso un separatore e quindi aspirati dai gruppi a vuoto a 3 stadi P 509/1-3.

Il concentrato presente nel fondo del D 525/1, costituito da TDI al 18-20% e restanti peci altobollenti, viene diluito con toluene, miscelato e trasferito a mezzo pompa nel serbatoio D 541. Qui viene mantenuto in agitazione alla temperatura di 115-120°C, allo scopo di avere una massa sufficientemente fluida e stabile. Successivamente, viene inviato al forno inceneritore B 502/2 per la combustione.

## 10.2.3 Descrizione dell'incidente

Il giorno 28.11.2002 si sono verificate nell'impianto TD5 di DOW Poliuretani Italia due esplosioni di serbatoi contenenti peci clorurate.

A seguito della fermata dell'agitatore del serbatoio D522 si è verificato un anomalo innalzamento della temperatura dei serbatoi D528/1-2-3 (che ricevono in alimentazione TDI e altobollenti).

Con l'intento di aumentare il volano termico ed ottenere quindi un abbassamento della temperatura del serbatoio D528/2, che risultava essere il più critico per quanto riguarda la temperatura raggiunta, questo veniva messo in caricamento. Sempre con l'intento di gestire l'incremento di temperatura veniva successivamente scaricato il D528/2 al serbatoio di concentrazione D525/1 di maggiore capacità e dotato di camicia esterna di raffreddamento. In considerazione della chiusura dell'alimentazione al D528/2 predisponendolo per lo scarico, si evidenziava un repentino incremento della temperatura nello stesso serbatoio. Si è in realtà verificato che dalla linea di collegamento non vi era scarico di prodotto liquido ma esclusivamente di fase gassosa dal D528/2. Anche la temperatura del D525 iniziava repentinamente ad innalzarsi oltre i valori di attenzione.

Dopo poco veniva avvertito lo scoppio del serbatoio D528/2. I vapori fuoriusciti dopo 5 min. trovano innesco incendiandosi.

Le squadre di pronto intervento iniziavano a circoscrivere l'incendio in atto raffreddando altresì le apparecchiature limitrofe. Successivamente si verificava un secondo scoppio che interessava il serbatoio D528/3 con conseguente esplosione della miscela ivi contenuta. L'onda di sovrappressione originatasi determinava lo spegnimento dell'incidente in atto, per lo spostamento della massa d'aria nell'incendio.

#### 10.2.4 Cause generatrici dell'incidente

Le cause principali ipotizzate sono le seguenti:

- mancanza di agitazione nel serbatoio D522;
- mancata presenza di una istruzione operativa relativa alla gestione dell'anomalia di alta temperatura nei serbatoi D522 e D528 1/2/3;
- mancata indicazione sui rischi derivanti dalla gestione in condizioni anomale del processo relativamente all'evento in oggetto;
- mancato controllo e di indicazione della pressione nei serbatoi D 528 1/2/3.

Dalle informazioni fornite dal Gestore e dalla consultazione dei dati d'impianto della sezione interessata dell'incidente, si ritiene che l'evento incidentale sia stato causato da reazioni indesiderate termo-attivate di condensazione tra altobollenti e TDI avviate dapprima nel serbatoio D 522 e sviluppatesi poi nel serbatoio D 528/2 con rilascio di calore e anidride carbonica che ha causato, per sovrappressione, l'esplosione meccanica del serbatoio D 528/2.

#### 10.2.5 Considerazioni generali

L'esplosione del serbatoio D528/2, ha generato un'onda di pressione in rapidissima espansione con fuoriuscita del liquido caldo contenuto nel serbatoio che alla temperatura ambiente si è solidificato.

L'onda di pressione ha comportato effetti distruttivi alle apparecchiature e parti di impianto limitrofe al serbatoio con proiezione di frammenti metallici, danni al rack di sostegno delle apparecchiature presenti in impianto, rottura/danneggiamento delle tubazioni di interconnessione e delle linee elettriche e utilities.

Secondo le stime fornite dal gestore, le quantità di sostanze chimiche coinvolte e rilasciate nel corso dell'evento incidentale sono:

Tabella 16: Tipo e quantità di sostanze rilasciate a seguito dell'incidente

Sostanza	Quantità	Stato fisico
TDI e altobollenti	15000 Kg	Liquido/solido
Toluene	1000 Kg	Liquido
Olio diatermico (Aertherm)	20000 Kg	Liquido



Le quantità sono congruenti con i livelli di TDI e altobollenti presenti nel serbatoio D 528/1-2 immediatamente prima dell'evento. L'incendio è stato alimentato dalla rottura della linea di toluene e dalla rottura della linea di olio diatermico posta a quota 8 metri. Le fiamme hanno interessato il serbatoio D 528/1 contenente anch'esso TDI e altobollenti, il cui livello al momento dello scoppio indicava l'85%. Lo scoppio del serbatoio D 528/1 si ritiene sia stato causato dalla sovrappressione generata dalle reazioni di decomposizione del TDI a causa della temperatura delle fiamme e dell'irraggiamento che hanno investito il serbatoio medesimo. Così come per il serbatoio D528/2, l'alta temperatura ha innescato e accelerato le stesse reazioni esotermiche di decomposizione del TDI e altobollenti, liberando anidride carbonica.

L'azione congiunta dell'onda di pressione generata dall'esplosione del serbatoio D 528/1, seguita dal forte vento che si produce a seguito dell'onda d'urto (blast wave), e l'azione dell'anidride carbonica sviluppatasi dalle reazioni sopra indicate, hanno provocato uno spostamento delle sorgenti di fiamma determinando lo spegnimento parziale dell'incendio e scongiurando la possibilità di coinvolgere impianti limitrofi.

La concatenazione degli eventi che hanno caratterizzato questo incidente, sono un evidente esempio di effetto domino.





## 11 Appendice B: Trasmissività atmosferica e area della superficie della fiamma

### 11.1 Trasmissività atmosferica

Il flusso di calore radiato dalla fiamma che arriva alla parete del serbatoio, è influenzato dalla trasmissività atmosferica. La presenza infatti nell'aria di vapor d'acqua e di anidride carbonica, tipici prodotti di combustione, comporta la non completa trasparenza di tale mezzo. La trasmissività atmosferica può essere espressa nella seguente forma:

$$\tau_a = 1 - \alpha_w - \alpha_c$$

dove:

$\alpha_w$ : coefficiente di assorbimento del vapor d'acqua;

$\alpha_c$ : coefficiente di assorbimento dell'anidride carbonica;

Il coefficiente di riflessione si considera nullo.

Tali coefficienti sono considerati globali, cioè indipendenti dalla lunghezza d'onda. Si fa quindi l'ipotesi di corpo grigio, che permette di semplificare la trattazione senza commettere gravi errori. Entrambi i coefficienti di assorbimento del vapore e dell'anidride carbonica dipendono dalla loro pressione parziale nell'aria, dal raggio medio equivalente, dalla temperatura della fiamma e dell'ambiente.

Esistono in letteratura vari metodi per la determinazione della trasmissività atmosferica. Vengono citati in questo studio il metodo di Hotel-Mudan e relative correlazioni grafiche:

a) determinazione della pressione parziale del vapore  $p_w$  e dell'anidride carbonica

$p_c \cdot p_w$  è funzione dell'umidità relativa e della temperatura.  $p_c$  può essere posta

con buon giudizio pari a  $30 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ;

b) calcolo del raggio medio equivalente (L), tramite tabelle;

c) calcolo della pressione di vapore "ridotta":

$$P_w^* = p_w \cdot \left( \frac{T_f}{T_a} \right)$$

$$P_c^* = p_c \cdot \left( \frac{T_f}{T_a} \right)$$

dove:

$T_f$ : temperatura della fiamma;

$T_a$ : temperatura dell'ambiente.

- d) determinazione dei coefficienti di emissione del vapore  $\varepsilon_w$  e dell'anidride carbonica  $\varepsilon_c$ , tramite i diagrammi  $\varepsilon$  vs  $T$ , parametrico in  $p \cdot L$  ;  
 e) calcolo dei coefficienti di assorbimento:

$$\alpha_w = \varepsilon_w \cdot \left( \frac{T_a}{T_f} \right)^{0.45}$$

$$\alpha_c = \varepsilon_c \cdot \left( \frac{T_a}{T_f} \right)^{0.65}$$

In questo modo i coefficienti di assorbimento vengono scritti come funzione di  $T_f$ ,  $p_w \cdot L$  e  $p_c \cdot L$ .

Può essere usata anche la semplice formulazione di Bagster:

$$\tau_a = c \cdot (p_w \cdot L)^{-0.09}$$

dove:

$$c = 2.02, \quad \text{in} \left( \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)^{0.09} \cdot \text{m}^{0.09}$$

La precedente è valida per  $10^4 < p_w \cdot L < 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ .



## 11.2 Area della superficie della fiamma. Metodo di Chamberlain

Il calcolo dell'area della superficie della fiamma  $A_f$  dipende dal tipo di fiamma analizzata. In questa trattazione si prende come riferimento un jet-fire secondo il "Thornton model" di Chamberlain (Yellow Book). È modello del tipo semiempirico, che approssima il jet-fire ad un tronco di cono di potere emissivo uniforme su tutta la superficie.

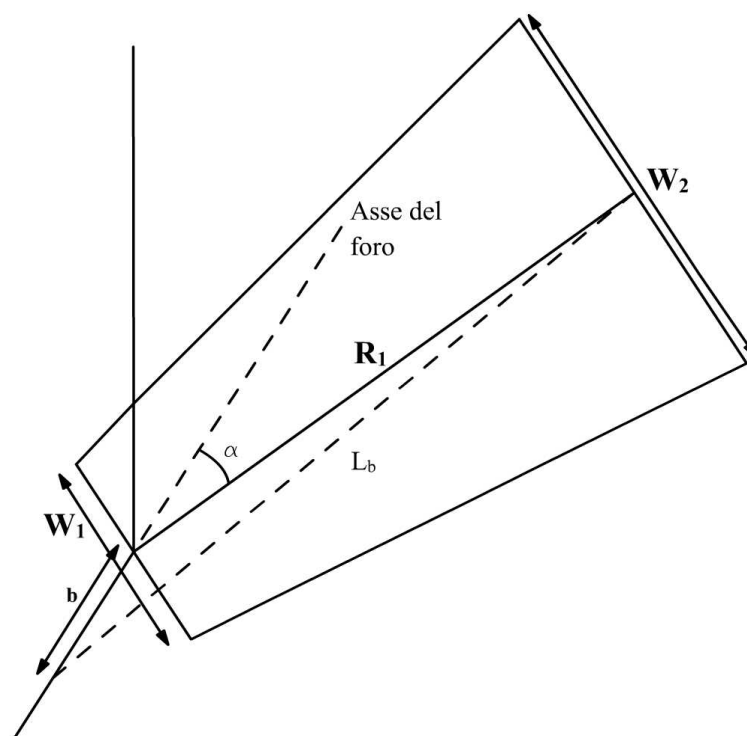


Figura 29: Schematizzazione del jet fire

$$A_f = \frac{\pi}{4} \cdot (W_1^2 + W_2^2) + \frac{\pi}{2} \cdot (W_1 + W_2) \cdot \left[ R_1^2 + \left( \frac{W_2 - W_1}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

dove:

$W_1$  e  $W_2$ : rispettivamente il diametro della base inferiore e della base superiore;

$R_1$ : altezza del tronco di cono.

In particolare:

$$W_1 = D_s \cdot (13.5 \cdot \exp(-6R_w) + 1.5) \cdot \left( 1 - \left( 1 - \frac{\left( \frac{\rho_{air}}{\rho_j} \right)^{\frac{1}{2}}}{15} \right) \cdot \exp(-70 \cdot R_i(D_s) \cdot C' \cdot R_w) \right)$$

$$D_s = \left( 4 \cdot \frac{m'}{\pi \cdot \rho_{air} \cdot u_j} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \text{diametro del foro di rottura in m;}$$

$$m' : \quad \text{flusso di massa, in } \frac{kg}{s};$$

$$\rho_{air} : \quad \text{densità aria, in } \frac{kg}{m^3};$$

$$\rho_j : \quad \text{densità del gas nel jet, in } \frac{kg}{m^3};$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}, \quad \text{accelerazione gravitazionale;}$$

$$R_w = \frac{u_w}{u_j}, \quad \text{rapporto tra velocità del vento } (u_j) \text{ e la velocità del jet;}$$

$$R_i(D_s) = \left( \frac{g}{(D_s^2 \cdot u_j^2)} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot D_s;$$

$$C' = 1000 \cdot \exp(-100 \cdot R_w) + 0.8;$$

Il prodotto  $R_i(D_s) \cdot C'$  è noto come numero di Richardson.

$$u_j = M_j \cdot \left( \gamma \cdot R_c \cdot \frac{T_j}{W_g} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \text{velocità del jet, in } \frac{m}{s};$$

$$T_j = T_s \cdot \left( \frac{P_{air}}{P_{int}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad \text{temperatura del gas nel jet, in K;}$$

$$W_g : \quad \text{peso molecolare del gas, in } \frac{kg}{mol}$$





$$\gamma = \frac{c_p}{c_v},$$

costante di Poisson, funzione di  $T_j$ ;

$$M_j = \left( \frac{\left( (\gamma + 1) \cdot \left( \frac{P_c}{P_{air}} \right) \right)^{\left( \frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)} - 2}{(\gamma - 1)} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$R_c = 8.314 \frac{J}{mol \cdot K}, \text{ costante del gas ideale;}$$

$$W_2 = L_b \cdot (0.18 \cdot \exp(-1.5 \cdot R_w) + 0.31) \cdot (1 - 0.47 \cdot \exp(-25 \cdot R_w))$$

$L_b = L_{b0} \cdot (0.51 \cdot \exp(-0.4 \cdot u_w) + 0.49) \cdot (1.0 - 6.07 \cdot 10^{-3} \cdot (\Theta_{iv} - 90^\circ))$ , distanza del foro dal centro del piano d'uscita della fiamma, in m;

$\Theta_{iv}$  = angolo tra l'asse del foro e la direzione orizzontale del vento;

$L_{b0} = Y \cdot D_s$ , distanza del foro dal centro del piano d'uscita della fiamma in assenza di vento, in m;

$Y$  = variabile adimensionale calcolata risolvendo l'equazione:

$$0.024 \cdot \left( g \cdot \frac{D_s}{u_j^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot Y^{\frac{5}{3}} + 0.2 \cdot Y^{\frac{2}{3}} - \left( \frac{2.85}{W} \right)^{\frac{2}{3}} = 0$$

$W = \frac{W_g}{15.816 \cdot W_g + 0.0395}$ , frazione massiva di materiale infiammabile in una miscela stechiometrica con aria.





## 12 Appendice C

La soluzione delle equazioni di un modello matematico viene attualmente calcolata attraverso l'impiego di potenti metodi numerici. Si descrivono sinteticamente di seguito due di tali metodi che trovano applicazione nella soluzione di tipici problemi dell'ingegneria, legati alla trasmissione del calore e all'analisi strutturale.

### 12.1 Metodo alle differenze finite

Il metodo alle differenze finite è un metodo numerico per la risoluzione delle equazioni differenziali. È basato sulla discretizzazione delle equazioni differenziali, lasciando inalterato il modello fisico. Il dominio analizzato viene visto come una serie di punti di un reticolo.

Esistono 4 tipi di approcci:

- 1) direct approximation
- 2) polynomial representation
- 3) Taylor series
- 4) control volume.

#### 1) Direct approximation

Le derivate parziali sono sostituite da rapporti di differenze discrete (=finite).

Si consideri una regione bidimensionale divisa da una griglia in intervalli  $\Delta x$  e  $\Delta y$ . I punti della griglia vengono identificati dagli indici interi  $i$  e  $j$ . L'intersezione delle linee della griglia definiscono i punti nodali nei quali la variabile dipendente generica  $\varphi(x,y)$  è definita. Viene adottata la notazione  $\varphi_{i,j}(x_i,y_j)$ , dove  $x_i$  e  $y_j$  indicano i valori  $(x,y)$  del punto nodale  $(i,j)$ .

Più in generale, la notazione deve tenere conto della terza dimensione e della variabile temporale:  $\varphi_{i,j,k}^{(l)} = \varphi(x_i, y_j, z_k, t_l)$ , dove i pedici  $i, j, k$ , indicano la locazione spaziale del nodo, mentre l'apice  $l$  indica il livello temporale. Il tempo viene indicizzato come  $t_{l+1} = t_l + \Delta t$ , dove  $\Delta t$  è lo step temporale.

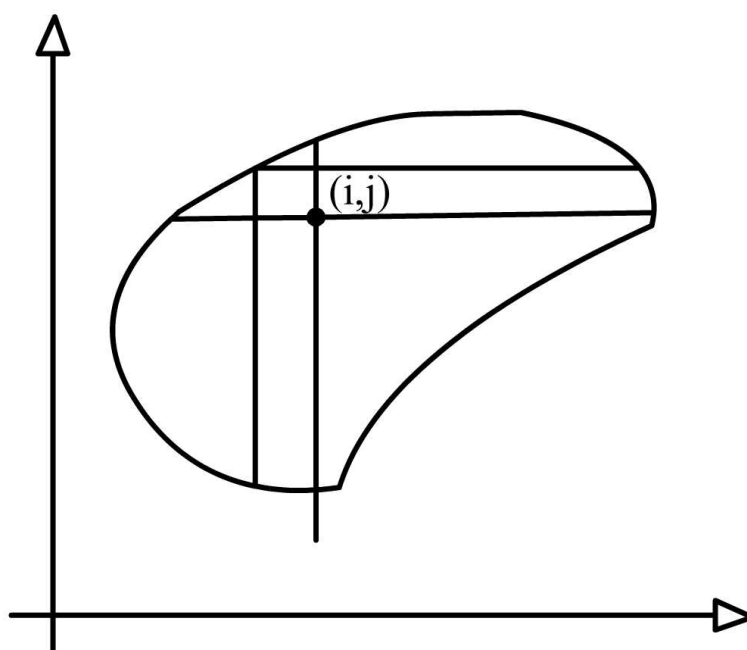


Figura 30: Regione bidimensionale divisa in griglia

La variazione di  $\varphi$  lungo una griglia orizzontale può essere descritta come di seguito.

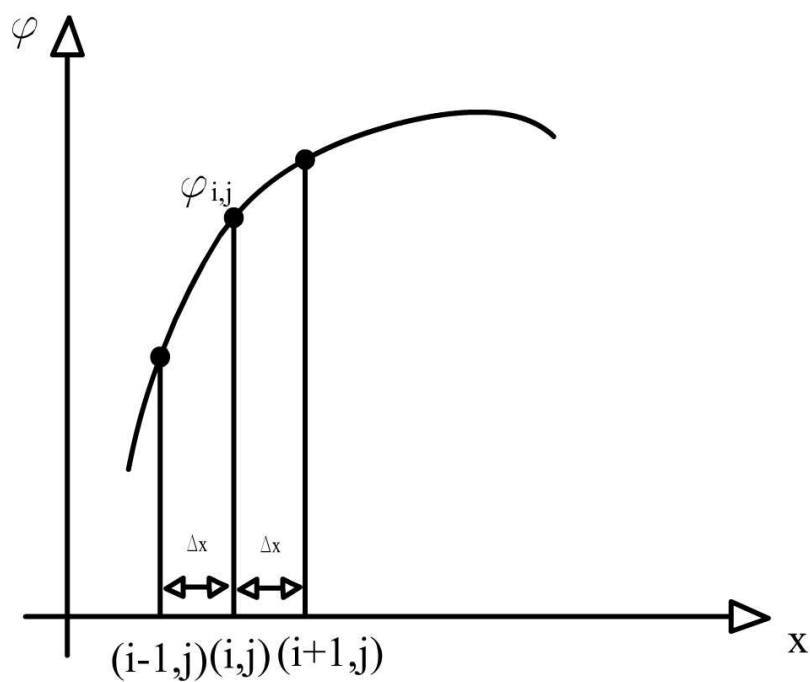


Figura 31: Andamento di  $\varphi$



Il metodo consente di approssimare la derivata  $\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{i,j}$  con le seguenti scritte:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{i,j} \doteq \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta x} \equiv \delta^+_{x} \varphi_{i,j}$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{i,j} \doteq \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{2\Delta x} \equiv \delta_x \varphi_{i,j}$$

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{i,j} \doteq \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{\Delta x} \equiv \delta^-_{x} \varphi_{i,j}$$

Il simbolo ( $\doteq$ ) sta ad indicare la soluzione approssimata. Da notare che si è omessa la scrittura del pedice  $j$  e dell'apice  $l$ , che comunque si sottintendono presenti. Inoltre queste definizioni valgono sia nel caso di stato stazionario che di stato transiente.

Analoga è l'approssimazione della derivata seconda e successive.

## 2) Polynomial representation

Il metodo è basato sul fitting polinomiale dei valori della griglia. L'ordine del polinomio è scelto in base all'ordine delle derivate che devono essere approssimate e al livello di accuratezza che si vuole raggiungere con tale approssimazione. Per una rappresentazione polinomiale di ordine ( $n$ ), servono ( $n+1$ ) punti della griglia per valutare i coefficienti della curva polinomiale.

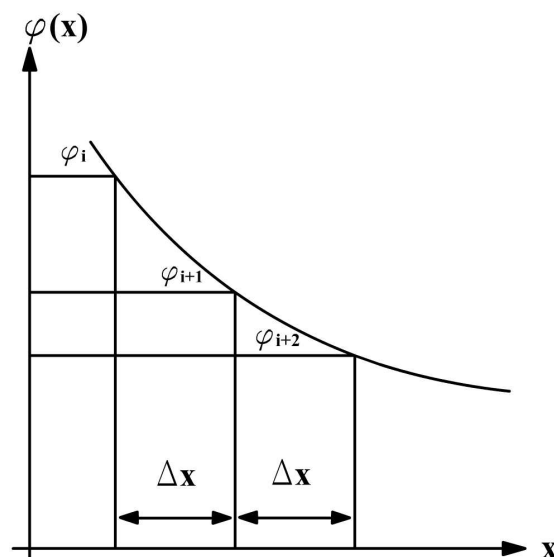


Figura 32: Andamento di  $\varphi$  nel metodo polinomiale

Ad esempio, considerando una griglia di 3 punti di coordinate  $(x_i, y_i)$ ,  $(x_{i+1}, y_i)$ ,  $(x_{i+2}, y_i)$  e i corrispondenti valori della generica funzione  $\varphi$ ,  $\varphi_i$ ,  $\varphi_{i+1}$ ,  $\varphi_{i+2}$ , la curva polinomiale può essere così espressa:

$$\varphi(x, y) = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot x^2$$

dove  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  sono funzione di  $y$ . Dal fitting di questa parabola con i 3 punti dati, si ottiene:

$$\varphi_{i,j} = A_0 + A_1 \cdot x_i + A_2 \cdot x_i^2$$

$$\varphi_{i+1,j} = A_0 + A_1 \cdot (x_i + \Delta x) + A_2 \cdot (x_i + \Delta x)^2$$

$$\varphi_{i+2,j} = A_0 + A_1 \cdot (x_i + 2 \cdot \Delta x) + A_2 \cdot (x_i + 2 \cdot \Delta x)^2$$

Da queste equazioni possono essere ricavati i coefficienti  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ . La prima e la seconda derivata della funzione danno:

$$\left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{i,j} = A_1 + 2 \cdot A_2 \cdot x_i = \frac{-\varphi_{i+2} + 4 \cdot \varphi_{i+1} - 3 \cdot \varphi_i}{2 \cdot \Delta x}$$

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)_{i,j} = 2 \cdot A_2 = \frac{\varphi_{i+2} - 2 \cdot \varphi_{i+1} + \varphi_i}{(\Delta x)^2}$$

dove anche in questo caso si è trascurato di scrivere il pedice  $j$ .

Questo metodo è particolarmente conveniente quando la griglia di punti non è uniforme.

### 3) Taylor series

Con questo metodo i valori della griglia possono essere convenientemente espressi in termini dell'espansione in serie di Taylor, come descritto di seguito:

$$\varphi_{i\pm 1,j} = \varphi_{i+1} \pm \Delta x \cdot \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{i,j} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right)_{i,j} \pm \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left( \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^3} \right)_{i,j} + \frac{(\Delta x)^4}{4!} \left( \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} \right)_{i,j} \pm \dots + O[(\Delta x)^m]$$

dove il termine  $O[(\Delta x)^m]$  è il resto o errore del troncamento della serie che può essere

$$\text{espresso come } O[(\Delta x)^m] = \left[ (-1)^m \cdot \frac{(\Delta x)^m}{m!} \cdot \left( \frac{\partial^m \varphi}{\partial x^m} \right)_{i+\zeta,j} \right].$$



La derivata che appare nel resto della formula di Taylor viene valutata in alcuni punti  $\zeta$  dell'intervallo  $i$  e  $i+1$ , o  $i$  e  $i-1$ . Ad esempio, per  $-1 < \zeta < 1$  si ottiene:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_{i-1}}{2 \cdot \Delta x} - \frac{(\Delta x)^2}{6} \cdot \left(\frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^3}\right)_{i+\zeta} = \delta_x \cdot \varphi_{i,j} + O[(\Delta x)^2]$$

$$\left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}\right)_{i,j} = \frac{\varphi_{i+1} - 2 \cdot \varphi_i + \varphi_{i-1}}{(\Delta x)^2} - \frac{(\Delta x)^2}{12} \cdot \left(\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}\right)_{i+\zeta} = \delta_x^2 \cdot \varphi_{i,j} + O[(\Delta x)^2]$$

#### 4) Control volume

I metodi fin qui descritti si basano sull'approssimazione delle derivate con differenze finite. Il metodo control volume è basato sulla conservazione di una quantità fisica specifica, come massa, momento o energia termica.

Il primo step del metodo consiste nell'introdurre il principio di conservazione nella forma integrale, la cui forma più generica può essere espressa come segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_R \varphi \cdot dR = \alpha \int_C \frac{\partial \varphi}{\partial n} \cdot dC + \int_R \frac{Q_g}{\rho \cdot c} \cdot dR$$

dove  $Q_g$  rappresenta, nel caso di conduzione termica, il calore generato internamente al sistema, mentre  $\alpha$ ,  $\rho$ ,  $c$  sono rispettivamente i coefficienti di diffusione, densità e capacità per unità di massa, riferiti ad un generico bilancio.

Il secondo step consiste nel dividere la regione fisica interessata, in un set di volumi di controllo, come esplicito dalla seguente Figura:

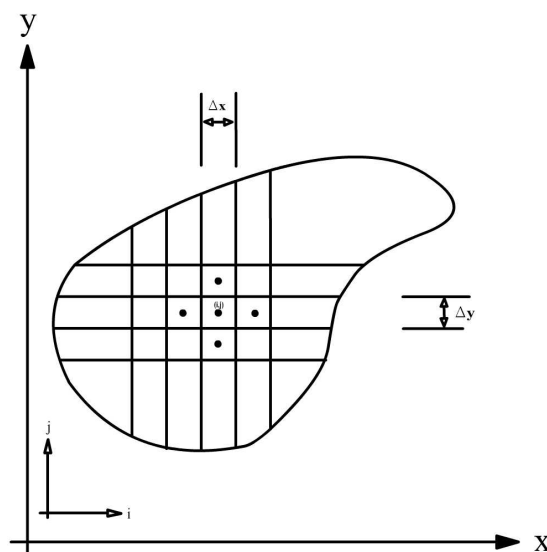


Figura 33: Divisione della regione in volumi di controllo

Il terzo step consiste nell'associare al volume di controllo, il rispettivo integrale, come di seguito esemplificato:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \cdot \int_{\Delta x \Delta y} \varphi \cdot dx \cdot dy = - \int_{i-1/2} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot dy - \int_{j-1/2} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot dx + \int_{i+1/2} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cdot dy + \int_{j+1/2} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cdot dx + \int_{\Delta x \Delta y} \frac{Q_g}{k} \cdot dx \cdot dy$$

Gli integrandi della formula possono essere approssimati utilizzando le informazioni disponibili sui punti nodali. Ad esempio il valore di  $\varphi$  di un punto nodale all'interno di un volume di controllo, può essere approssimato con l'integrando a sinistra del segno dell'uguaglianza. Lo stesso dicasi per  $Q_g$ , approssimabile con il rispettivo  $Q_{g/i,j}$ , relativo al nodo  $i,j$ .

Per la risoluzione dei rimanenti addenti, funzioni delle variabili spaziali, facciamo riferimento al pratico esempio della conduzione termica, i cui problemi vengono spesso risolti con questa tecnica. L'equazione della conduzione termica può essere così espressa:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot \vec{q} + Q_g$$

dove  $Q_g$  è il calore generato internamente al sistema e  $\vec{q}$  è il vettore flusso di calore secondo la legge di Fourier:

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla T$$

L'equazione, integrata in un volume fissato, porge:

$$\int_V \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dV = - \int_V \nabla \cdot \vec{q} \cdot dV + \int_V Q_g \cdot dV$$

L'integrale di volume della divergenza del vettore flusso di calore può essere trasformato in un integrale di superficie tramite il teorema della divergenza, ottenendo:

$$V \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = - \int_S \vec{q} \cdot \vec{n} \cdot dS + V \cdot \bar{Q}_g$$

dove  $S$  è l'area della superficie del volume di controllo, mentre  $\bar{T}$  e  $\bar{Q}_g$ , valori medi di  $T$  e  $Q_g$ , sostituiscono l'integrale nel volume in base al teorema del valor medio.

Il metodo alle differenze finite diventa di difficile applicazione nel caso in cui subentrino geometrie irregolari e particolari condizioni al contorno.





## 12.2 Metodo agli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti costituisce uno dei più importanti metodi numerici per la soluzione delle equazioni differenziali alle derivate parziali, nei problemi propri dell'ingegneria. I suoi campi di utilizzo sono vastissimi: dall'analisi strutturale ai processi industriali, dalla meteorologia all'ingegneria biomedica. Il metodo degli elementi finiti si presta all'analisi di problematiche tra loro molto diverse nella formulazione analitica, e questo lo rende uno strumento molto versatile ed affidabile.

Il grande vantaggio di questa tecnica computazionale consiste nell'implementazione in un codice di algoritmi iterativi, relativamente semplice, con la possibilità di ottenere, in tempi di calcolo ridottissimi, soluzioni con un grado di approssimazione più che accettabile, altrimenti non ottenibili per altra via.

Il dominio del metodo agli elementi finiti consiste nell'unione di tanti sottodomini di forma elementare. Le equazioni differenziali, relativamente a ciascun elemento finito, vengono lasciate inalterate mentre il dominio viene discretizzato.

In un problema al continuo di qualsivoglia dimensione, cioè in un corpo o in una regione dello spazio in cui abbia luogo un particolare fenomeno, la variabile di campo, come la pressione, lo spostamento, la temperatura, la velocità o la densità, è funzione di ciascun generico punto del dominio di definizione. Di conseguenza il problema presenta un numero infinito di incognite. La procedura di discretizzazione agli elementi finiti lo riduce ad un problema con un numero finito di incognite, suddividendo il dominio in elementi finiti ed esprimendo il campo incognito in termini di funzioni approssimanti, definite all'interno di ogni elemento. Le funzioni approssimanti, chiamate anche funzioni di forma, vengono individuate mediante i valori che la variabile dipendente assume in punti specifici, detti nodi. I nodi sono posti di solito sul contorno degli elementi, in punti comuni a due o più elementi. Oltre ai nodi sul contorno, un elemento può presentare dei nodi al suo interno. I valori che la variabile di campo assume sui nodi, ne definiscono univocamente l'andamento all'interno dell'elemento. Nella rappresentazione agli elementi finiti di un problema, i valori nodali della variabile di campo rappresentano le nuove incognite.

**Indice delle Tabelle:**

Tabella 1: Valori di soglia da D.M. 09/05/2001 .....	12
Tabella 2: Probabilità di propagazione di un incidente primario che provoca irraggiamento.....	14
Tabella 3: Probabilità di propagazione di un incidente primario che provoca sovrappressione.....	15
Tabella 4: Probabilità di propagazione di un incidente primario con proiezione di frammenti .....	15
Tabella 5: Software di analisi termica e meccanica .....	28
Tabella 6: Flusso di calore critico per livello di danno 1.....	42
Tabella 7: Flusso di calore critico per livello di danno 2.....	42
Tabella 8: Numero di Grashof.....	65
Tabella 9: Valori dei coeff. k e m.....	66
Tabella 10: Valori dei coefficienti k e m.....	69
Tabella 11: Valore del termine $\psi$ per diverse tipologie di equazioni .....	71
Tabella 12: Fattore di isolamento termico .....	77
Tabella 13: Variazione delle proprietà termiche per un acciaio inossidabile.....	83
Tabella 14: Variabili da determinare per l'analisi strutturale.....	88
Tabella 15: Risultati delle sperimentazioni condotte su serbatoi di GPL.....	89
Tabella 16: Tipo e quantità di sostanze rilasciate a seguito dell'incidente.....	104

**Indice delle Figure:**

Figura 1: Onda d'urto e struttura: Vista laterale.....	17
Figura 2: Onda d'urto e struttura: Vista in pianta.....	17
Figura 3: Serbatoio cilindrico diviso in nodi termici .....	33
Figura 4: Andamento qualitativo della temperatura della parete.....	35
Figura 5: Andamento qualitativo della tensione della parete nel tempo nella sua parte finale.....	35
Figura 6: Limite di snervamento dell'acciaio in funzione della temperatura.....	39
Figura 7: Variazione della temperatura della parete nel tempo.....	40
Figura 8: Temperatura del piatto .....	44
Figura 9: Tensione di rottura del piatto .....	44
Figura 10: Sezione serbatoio con in evidenza i nodi oggetto dei bilanci termici.....	48
Figura 11: Nodo 1 .....	49
Figura 12: Nodo 2 .....	50
Figura 13: Nodo 3 .....	51
Figura 14: Nodo 4 .....	52



<i>Figura 15: Nodo 5</i> .....	53
<i>Figura 16: Nodo termico in coordinate cartesiane</i> .....	61
<i>Figura 17: Curva del flusso di calore ceduto dalla parete al fluido</i> .....	67
<i>Figura 18: Flusso di calore critico in funzione della pressione</i> .....	68
<i>Figura 19: Coefficiente di espansione</i> .....	76
<i>Figura 20: Nodo 5 dopo apertura PSV</i> .....	78
<i>Figura 21: Andamento della pressione nel serbatoio all'apertura della valvola di sfiato</i> .....	79
<i>Figura 22: Fattore di riduzione tensione di snervamento</i> .....	82
<i>Figura 23: Andamento qualitativo della sollecitazione</i> .....	84
<i>Figura 24: Modulo di Young per un comune acciaio al carbonio</i> .....	84
<i>Figura 25: Confronto tra la tensione equivalente Amburgo e Von Mises</i> .....	87
<i>Figura 26: Pianta del deposito di GPL della Pemex</i> .....	99
<i>Figura 27: Dimensione del rilascio prima dell'innesco</i> .....	100
<i>Figura 28: Schematizzazione della successione degli eventi</i> .....	101
<i>Figura 29: Schematizzazione del jet fire</i> .....	109
<i>Figura 30: Regione bidimensionale divisa in griglia</i> .....	114
<i>Figura 31: Andamento di <math>\varphi</math></i> .....	114
<i>Figura 32: Andamento di <math>\varphi</math> nel metodo polinomiale</i> .....	115
<i>Figura 33: Divisione della regione in volumi di controllo</i> .....	117

**BIBLIOGRAFIA**

- [1] C. Ferrari, "Il rischio di effetto domino nell'industria di processo. Problematiche connesse con l'analisi termica e strutturale di apparecchiature soggette ad irraggiamento termico". Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, 2003.
- [2] A. Monetti, "Il rischio di effetto domino nell'industria di processo. Metodo di identificazione e valutazione nell'ambito della realizzazione dello Studio Integrato per l'Area di Porto Marghera. Caso di studio: impianto di cracking". Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, 2003.
- [3] Lovati, "L'analisi del rischio", EPC Roma.
- [4] Ragusa, "Introduzione all'analisi del rischio nell'industria", Safety Improvement S.R.L.
- [5] Pubblicazioni ANPA, "Valutazione dei rischi d'area".
- [6] F. P. Lees F.P., "Loss prevention in the process industries" Butterworths, London and Boston.
- [7] Center for Chemical Process of the American Institute of Chemical Engineers, "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis".
- [8] Dow Chemical, "Fire & Explosion index hazard classification guide", 1994.
- [9] ARPAV, "Rapporto Ambientale d'Area della Zona Industriale di Porto Marghera".
- [10] TECSA, "Rapporto di sicurezza di stabilimento: Impianto di cracking, CR 1-3, 20-23. Enichem S.p.A. Stabilimento di Porto Marghera".
- [11] C. Bonacina, A. Cavallini, L. Mattarolo, "Trasmissione del calore".
- [12] J.R. Taylor, "Risk analysis for process plant, pipelines and transport", 1994.
- [13] Roy Billinton, Ronald N. Allan, "Reliability evaluation of engineering system", 1983.
- [14] C.J.H. van den Bosh, R.A.P.M. Weterings, "Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book)", Third edition 1997.
- [15] V. Cozzani, S. Zanelli, "Strategies for the quantitative risk assessment of knock-on scenarios", Proc. 9 th meeting Eur.Soc. Risk Analysis, Delft University Press, Delft (NL), 1999.
- [16] Cozzani, Franchi, Pierno, Vitale, Zanelli, "Il contributo dell'effetto domino al R.I.", 3° convegno nazionale valutazione e gestione del Rischio negli insediamenti civili ed industriali", Pisa, 2002.



- [17] Zanelli, Foschi, Francalanza, Cozzani, "Metodologie quantitative per l'analisi dell'effetto domino in studi di rischio d'area", Convegno nazionale valutazione e gestione del rischio negli insediamenti civili ed industriali.
- [18] E. Salzano, V. Cozzani, "The use of probit functions in the quantitative risk assesment of domino accident caused by overpressure".
- [19] Modie, Cowley, Denny, Williams, "Fire Engulfment Tests on a 5 Tonne LPG Tank".
- [20] J. N. Davenport, S. M. Richardson, G. Saville, "Thermal Response of Vessels and Pipe-work Exposed to Fire", OTI 92 610.
- [21] T. A. Roberts, S. Medonos, L. C. Shirvill "Review of the Response of Pressurised Process Vessels and Equipment to Fire Attack", OTO 2000 051.
- [22] Rohsenow, Choi, "Heat, Mass and Momentum Transfer".
- [23] McCabe, Smith, "Unit Operations of Chemical Engineering".
- [24] UNI 9503, "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di acciaio", aprile 1989.
- [25] Vari autori, "Methods for the determination of possible damage" (Green Book), First Edition 1992.
- [26] Y. Jaluria, K. E. Torrance, "Computational Heat Transfer".
- [27] API "Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems", Recommended Practice 521, Fourth Edition, marzo 1997.
- [28] McAdams, "Heat Transmission".
- [29] The Steel Construction Institute for HSE, "Experimental Data Relating to the Performance of Steel Components at Elevated Temperatures", OTI 92 604.
- [30] Y. Jaluria, K. E. Torrance, "Computational Heat Transfer".
- [31] P.K. Ramskill "Engulf II – "A Computer Code to Model the Thermal Response of a Tank Partially or Totally Engulfed in Fire", United Kingdom Atomic Energy Authority SRD/HSE/ R 480.
- [32] R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling, "The Properties of Gases and Liquids".
- [33] Bonacina C., Cavallini A., Mattarolo L., "Trasmissione del calore".
- [34] Howell, Siegel, John R., "Thermal radiation heat transfer", Washington <etc.>, Hemisphere, 3th edition, 1992.
- [35] Wiebelt J.A. "Engineering radiation heat transfer", New York, 1966.







**Ente della Zona Industriale  
di Porto Marghera**

Presidente Ing. Lucio Pisani  
Direttore Dr. Gianluca Palma  
via delle Industrie 19  
VEGA 1 - Palazzo LYBRA  
30175 Venezia - Marghera



**ARPAV**

Agenzia Regionale  
per la Prevenzione e  
Protezione Ambientale  
del Veneto

Direzione Generale  
Via Matteotti 27  
35137 Padova  
Italy  
Tel. +39 049 8239301  
Fax +39 049 660966  
e-mail: [info@arpa.veneto.it](mailto:info@arpa.veneto.it)  
[www.arpa.veneto.it](http://www.arpa.veneto.it)

Direzione Area Tecnico Scientifica  
Direzione Area Ricerca e Informazione  
Tel. +39 049 8767610-633  
Fax +39 049 8767670