



dipartimento
di ingegneria
e architettura

MODULO 1 • LEZIONE 4

Fenomeni incidentali *da incendio*

Incendi, esplosioni e analisi del rischio negli impianti industriali

Pool • Jet • Flash • Fireball • BLEVE • VCE
Seveso III (D.Lgs. 105/2015) • ALARP • QRA

Indice della lezione

Quattro parti • dai fondamenti agli scenari industriali e all'analisi del rischio

PARTE I • INQUADRAMENTO | PARTE II • INCENDI

1. Perché studiare i fenomeni incidentali
2. I fattori che governano lo scenario
3. I 7 fenomeni e le 3 categorie

PARTE II — Gli incendi industriali

4. Pool fire • 5. Jet fire
6. Flash fire • 7. Fireball (modello TNO)

PARTE III • ESPLOSIONI | PARTE IV • RISCHIO

8. BLEVE • 9. VCE
 10. Deflagrazione vs detonazione (DDT)
 11. Quadro di confronto dei fenomeni
- ### PARTE IV — Normativa e analisi del rischio
12. Normativa e codici • 13. Effetto domino
 14. Analisi del rischio (HAZOP•LOPA•SIL•QRA)
 15. Incidenti storici • 16. Sintesi e verifica

OBIETTIVI FORMATIVI

Al termine lo studente sarà in grado di: riconoscere e distinguere i principali scenari incidentali industriali (pool/jet/flash fire, fireball, BLEVE, VCE) • associare a ciascuno i meccanismi fisici, gli effetti dominanti (termici/meccanici) e i modelli di stima • collocare i fenomeni nel quadro Seveso III e applicare i criteri di analisi e accettabilità del rischio (ALARP, QRA).

1. Perché studiare i fenomeni incidentali

Negli impianti a rischio l'incendio è spesso solo il primo anello di una catena

SCALA DELLE CONSEGUENZE

Negli impianti chimici, petrolchimici e nei depositi non si ragiona più sul singolo locale: un rilascio può coinvolgere l'intero stabilimento e l'esterno, con effetti a centinaia di metri.

EFFETTO DOMINO

Un evento iniziale (jet/pool fire) può innescare eventi secondari a cascata — esplosioni, BLEVE, nuovi incendi — in layout interconnessi.

DOPPIA NATURA DEL DANNO

Convivono effetti termici (irraggiamento, kW/m^2) ed effetti meccanici (onda d'urto, ΔP in bar): la difesa va dimensionata su entrambi.

OBBLIGO NORMATIVO

La Direttiva Seveso III (D.Lgs. 105/2015) impone l'identificazione e la quantificazione degli scenari incidentali credibili.

Dal locale all'impianto

Le lezioni 1–3 hanno trattato l'incendio nell'edificio (curve, materiali, strategie). Qui cambia la scala: combustibili sotto pressione, grandi quantità, sostanze infiammabili o instabili. La prevenzione passa dall'identificare lo scenario credibile, stimarne le conseguenze e ridurre il rischio a livelli accettabili.

2. I fattori che governano lo scenario

La stessa sostanza può dare incendi o esplosioni molto diversi

STATO FISICO

Solido, liquido o gassoso: i gas formano miscele esplosive con l'aria; i liquidi infiammabili generano vapori facilmente innescabili.

DINAMICA DI RILASCIO

Velocità, pressione e direzione: un rilascio pressurizzato dà jet fire; una fuoriuscita lenta dà pool fire o nube.

CONDIZIONI AMBIENTALI

Temperatura, vento, stabilità atmosferica e topografia governano evaporazione, dispersione e propagazione.

CONTENIMENTO

Bacini, drenaggi, valvole di blocco ed ESD decidono se il rilascio resta confinato o si estende (effetto domino).

Le due variabili-chiave per le esplosioni: confinamento e congestione

Confinamento — la presenza di strutture che limitano l'espansione dei gas combustibili. **Congestione** — l'ostruzione del volume (tubazioni, serbatoi, rack) che genera turbolenza.

Più alti sono entrambi, maggiore è la velocità di fiamma e quindi la sovrappressione generata: è ciò che trasforma una semplice fiammata (flash fire) in un'esplosione distruttiva (VCE), e che può portare alla transizione deflagrazione→detonazione (DDT).

3. I sette fenomeni e le tre categorie

Una mappa per orientarsi prima di entrare nel dettaglio

INCENDIO LOCALIZZATO

Fuoco confinato a una zona.
Es. pool fire, jet fire.

INCENDIO DIFFUSO

Fuoco non confinato su aree ampie.
Es. flash fire.

ESPLOSIONE

Rilascio violento di energia con onda d'urto.
Es. BLEVE, VCE.

Fenomeno	Natura	Effetto dominante	Durata
Pool fire	Incendio di pozza	Termico (irraggiamento)	Lunga
Jet fire	Getto in pressione	Termico molto intenso	Lunga
Flash fire	Fiammata di nube	Termico esteso	Secondi
Fireball	Palla di fuoco	Termico intensissimo	Breve
BLEVE	Espl. fisica recipiente	Meccanico + termico	Istantanea
VCE	Espl. chimica nube	Meccanico (ΔP)	Breve
Deflagr./Detonaz.	Regimi di combustione	Meccanico (onda)	Istantanea

Nelle prossime slide ogni fenomeno è sviluppato con meccanismo fisico, effetti, modelli di stima e misure di prevenzione.

PARTE II

Gli incendi industriali

Pool fire • Jet fire • Flash fire • Fireball

Meccanismi fisici • effetti termici • modelli di stima • prevenzione

4. Pool fire — incendio di pozza

Combustione superficiale di un liquido infiammabile raccolto in pozza

MECCANISMO

La combustione avviene all'interfaccia liquido-aria. La fiamma irraggia calore alla pozza, ne sostiene l'evaporazione e si autoalimenta.

CARATTERISTICHE

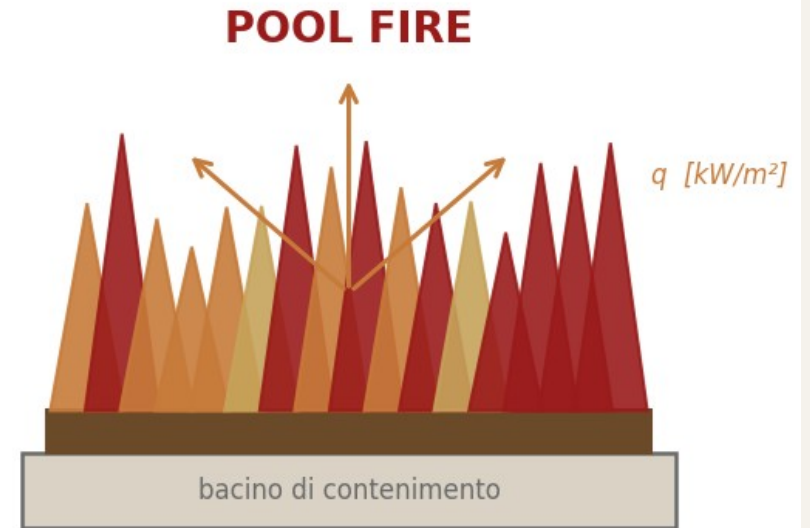
Durata lunga · T media 800–1100 °C · superficie radiante ampia · forte irraggiamento verso strutture e serbatoi adiacenti.

EFFETTI

Danni da irraggiamento termico · possibile cedimento di strutture portanti · innesco di serbatoi vicini (domino).

PREVENZIONE

Bacini di contenimento e canaline · sistemi di raccolta e drenaggio · estinzione a schiuma / acqua nebulizzata.



Stima ingegneristica

Altezza di fiamma (Heskestad): $L = 0,235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \cdot D$ con $\dot{Q}$ potenza termica [kW] e D diametro pozza [m].

Irraggiamento al ricettore: $q = \tau \cdot \varphi \cdot E$ (trasmissività atmosferica τ , fattore di vista φ , potere emissivo E). Soglia di danno alle persone $\approx 37,5 \text{ kW/m}^2$ (letalità) e $12,5 \text{ kW/m}^2$ (ustioni gravi).

5. Jet fire — getto di fiamma

Combustione di un gas o liquido pressurizzato che fuoriesce da un orifizio

MECCANISMO

Flusso turbolento reattivo da perdita pressurizzata (tubazione, flangia, valvola). 20–30% dell'energia è rilasciata per irraggiamento.

CARATTERISTICHE

Tipico di idrocarburi leggeri sotto pressione · forma conica
· fino a 1300–1400 °C · fortemente direzionale.

EFFETTI

Thermal weakening, buckling e collasso di acciai ($T > 600$ °C) · trigger per BLEVE e domino. Caso: Piper Alpha (1988).

PREVENZIONE

Barriere fisiche e fireproofing (vermiculite, cementizi) · raffreddamento a spray · distanze di sicurezza (API 521, EN 1473).

JET FIRE



getto pressurizzato · fiamma conica · fino a 1300–1400 °C

Differenza chiave rispetto al pool fire

Il pool fire nasce da un rilascio lento che si raccoglie in pozza (gravità); il jet fire da un rilascio pressurizzato (quantità di moto). Il jet fire è più energetico, localizzato e direzionale: l'impatto su una struttura o su un serbatoio adiacente è il principale innesco di scenari domino e BLEVE.

6. Flash fire — fiammata di nube

Accensione istantanea di una nube infiammabile entro i limiti LFL–UFL

MECCANISMO

Una nube di vapori che ha raggiunto una concentrazione tra LFL e UFL trova un innesco: la fiamma la attraversa rapidamente. Fenomeno non confinato, senza onda d'urto.

CARATTERISTICHE

Durata da frazioni di secondo a pochi secondi • nessuna sovrappressione significativa • può essere quasi invisibile (es. metano) • alto impatto termico.

PARAMETRI CRITICI

Combustibile (gas leggeri, VOC, vapori da serbatoi) • condizioni atmosferiche stabili → minore dispersione • ritardo tra rilascio e accensione.

EFFETTI E CONSEGUENZE

Ustioni gravi a chi si trova dentro la nube • innesco di altre sostanze (danni secondari) • nessuna onda d'urto ma effetti termici estesi sull'area interessata.

PREVENZIONE E MODELLAZIONE

Rilevatori di gas (LEL) • contenimento perdite • ventilazione forzata. Modellazione della dispersione con modelli gaussiani (ALOHA, PHAST) in funzione della distanza.

Flash fire o VCE? Lo decide il confinamento

La stessa nube infiammabile, se brucia in spazio aperto e senza ostacoli, dà un flash fire (solo effetti termici). Se invece incontra confinamento e congestione, la combustione accelera, genera sovrappressione e si trasforma in VCE (slide 9). È la transizione più importante da saper riconoscere in fase di analisi.

7. Fireball — palla di fuoco e modello TNO

Combustione rapida di una massa di combustibile rilasciata istantaneamente

QUANDO SI GENERA

Rottura di serbatoi con gas/liquidi infiammabili · BLEVE · rottura di pipeline ad alta pressione. È la componente termica intensa e di breve durata che accompagna l'esplosione fisica.

MODELLO TNO (semi-empirico)

Sviluppato da TNO su dati sperimentali e incidenti reali. Stime conservative di: diametro massimo, altezza, durata, flusso termico radiante e frazione di massa che irraggia.

Equazioni chiave del modello TNO

Diametro: $D = k_1 \cdot m^{(1/3)}$ ($k_1 \approx 5-7$) **Durata:** $t = k_2 \cdot m^{(1/3)}$

Flusso radiante: $q = \chi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \cdot F_v$ con χ frazione radiante, ε emissività, σ costante di Stefan-Boltzmann, T 1200–1800 K, F_v fattore di vista.

Perché $m^{(1/3)}$?

Diametro e durata scalano con la radice cubica della massa perché legati al volume del combustibile coinvolto. Il flusso termico ricevuto a distanza dipende invece dalla geometria (fattore di vista F_v): raddoppiando la distanza, l'irraggiamento cala rapidamente — principio alla base delle distanze di sicurezza.

PARTE III

Le esplosioni

BLEVE • VCE • Deflagrazione e detonazione

Energia meccanica • onda d'urto • transizione DDT

8. BLEVE — Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion

Cedimento improvviso di un recipiente con liquido surriscaldato sotto pressione

1. Fuoco esterno



2. Indebolimento parete



3. Cedimento + fireball



CONDIZIONI

Liquido a $T > T_{\text{ebollizione}} \text{ atmosferica}$ sotto pressione · riscaldamento esterno ($>200 \text{ }^{\circ}\text{C}$) che indebolisce la parete · cedimento meccanico improvviso.

EFFETTI

Onda d'urto meccanica (blast) · fireball se infiammabile · proiezione di frammenti (missili) · soglia di letalità $37,5 \text{ kW/m}^2$ · incendi secondari.

PREVENZIONE

Raffreddamento spray/deluge sul vessel · valvole PSV · progettazione ASME/PED · fireproofing · distanze e barriere (layout).

Sostanze tipiche: GPL (butano, propano), ammoniaca anidra, cloro liquido. **Normativa:** API 521 · EN 13445 · Seveso III (D.Lgs. 105/2015).

Punto chiave: il BLEVE è un'esplosione FISICA (espansione del fluido). La componente chimica (fireball) si aggiunge solo se il fluido è infiammabile.

9. VCE — Vapor Cloud Explosion

Esplosione di una nube di vapore infiammabile dispersa, innescata e confinata

MECCANISMO

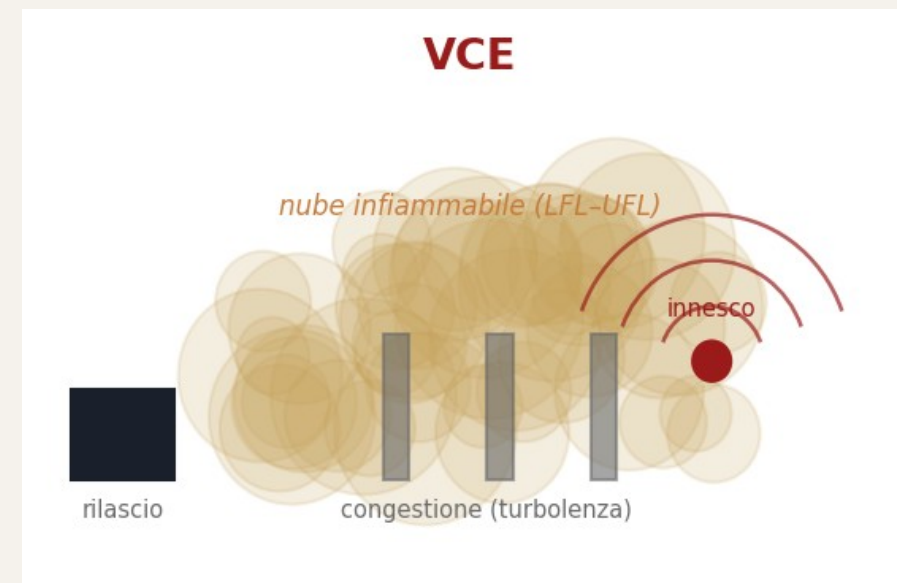
Esplosione deflagrante in nube infiammabile parzialmente confinata o disturbata da ostacoli (turbulent combustion): onda d'urto e distruzione.

CARATTERISTICHE

Richiede confinamento parziale • danni a centinaia di metri • fronte di fiamma e onda d'urto ad alta velocità.

MODELLI E SOGLIE DI DANNO (ΔP)

TNT-equivalent • Multi-Energy (MEM) • Baker-Strehlow-Tang. Soglie: 0,03 bar rottura vetri • 0,1 bar danni lievi • 0,3 bar collasso strutture leggere • 1 bar danni gravi a impianti.



BLEVE = esplosione fisica del recipiente • VCE = esplosione chimica in atmosfera

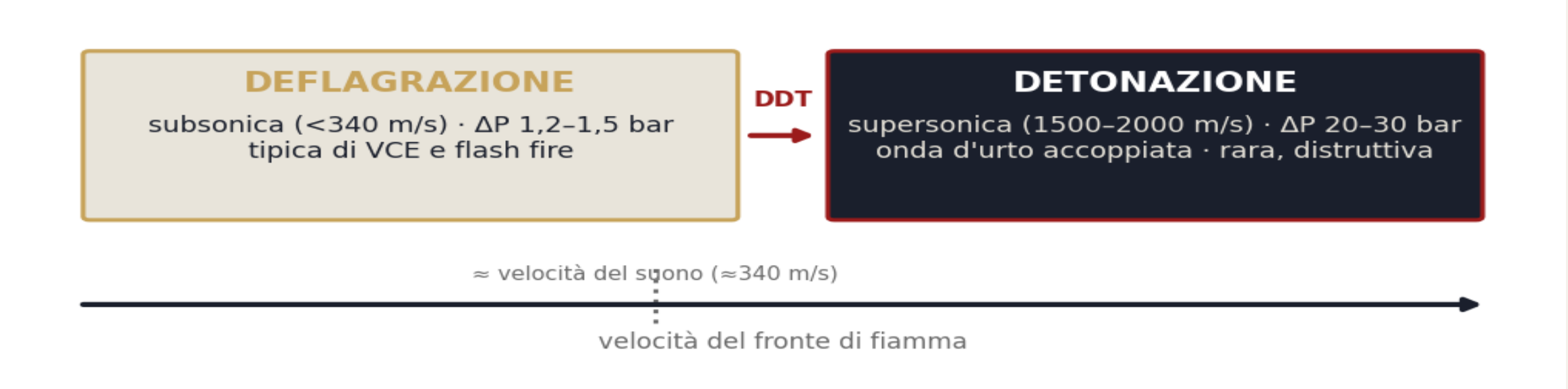
TNT-equivalent — esempio applicativo

$m_{TNT} = \eta \cdot m \cdot \Delta H_c / \Delta H_{TNT}$ (η efficienza 0,01–0,10 • $\Delta H_{TNT} \approx 4500$ kJ/kg)

1000 kg di propano ($\Delta H_c \approx 46\,400$ kJ/kg, $\eta = 0,05$) $\rightarrow \approx 515$ kg TNT. Con la scala di Sachs ($Z = R/m_{TNT}^{(1/3)}$) si stimano sovrapressione e danni vs distanza: onda letale fino a ~20–30 m, danni significativi fino a 60–100 m.

10. Deflagrazione e detonazione

Due regimi di combustione, due livelli di distruttività



Parametro	Deflagrazione	Detonazione
Velocità fronte	Subsonica (<340 m/s)	Supersonica (>1500 m/s)
Pressione di picco	1,2–1,5 bar	fino a 20–30 bar
Energia liberata	Media	Elevata
Tipicità	VCE, flash fire	Esplosivi solidi, mix critici

DDT (Deflagration-to-Detonation Transition): in condizioni di forte congestione e reattività elevata una deflagrazione può accelerare fino a detonare. È il caso peggiore da prevenire nel layout degli impianti.

11. Quadro di confronto dei fenomeni

Un'unica tabella per fissare le differenze

Fenomeno	Energia meccanica	Energia termica	Durata	Esempio tipico
Jet fire	Bassa	Alta	Lunga	Rottura tubazione gas
Pool fire	Bassa	Alta	Lunga	Pozza di benzina
Flash fire	Nessuna	Alta	Breve	Nube di gas infiammabile
Fireball	Nessuna	Molto alta	Breve	BLEVE / rilascio istantaneo
BLEVE	Alta	Alta (se infiamm.)	Istantanea	Serbatoio GPL riscaldato
VCE	Alta	Media	Breve	Rilascio tra ostacoli
Deflagrazione	Media	Media	Breve	VCE
Detonazione	Molto alta	Alta	Istantanea	Esplosivo ad alta potenza

Come leggerla

La colonna dominante (meccanica vs termica) detta la difesa: contro il termico si lavora su distanze, fireproofing e raffreddamento; contro il meccanico su layout, sfoghi e riduzione della congestione. La durata indica invece il tempo utile per intervenire.

PARTE IV

Quadro normativo e analisi del rischio

Seveso III · effetto domino · HAZOP · LOPA · SIL · QRA · ALARP

Dai fenomeni alla gestione strutturata del rischio

12. Quadro normativo e codici di riferimento

L'ingegneria della sicurezza industriale poggia su un ampio corpo normativo

NORMATIVA EUROPEA E ITALIANA

Direttiva Seveso III (2012/18/UE) → D.Lgs. 105/2015: stabilimenti a rischio di incidente rilevante con obbligo di SGS-PIR e identificazione scenari (jet fire, BLEVE, VCE).

D.M. 3 agosto 2015 (Codice P.I.): metodo prestazionale con scenari di progetto.

UNI EN 1127-1 atmosfere esplosive • **UNI EN 14491** sfoghi esplosione polveri.

ATEX (dir. 2014/34/UE e 1999/92/CE) • **IEC 61511** sicurezza funzionale.

CODICI INTERNAZIONALI

NFPA (USA)

NFPA 30 (liquidi infiammabili) • NFPA 59A (GNL) • NFPA 68/69 (mitigazione esplosioni).

API (American Petroleum Institute)

API 521 (pressure relief) • API 650/620 (serbatoi) • ISO 23251.

CCPS / AIChE

Best practice ingegneristiche per la gestione dei rischi di processo.

Aggiornamenti recenti (2024-2025)

- **D.L. 63/2024 (art. 14)** — per gli impianti di interesse strategico nazionale, se da carenze del Rapporto di Sicurezza non deriva rischio grave e imminente, il CTR dispone misure di salvaguardia con termine fino a 48 mesi.
- **Nuove categorie di sostanze O1/O2** nell'Allegato 1 e nuova classificazione armonizzata CLP del piombo (in vigore da settembre 2025).
- **Relazione UE 19/09/2025** sull'attuazione e il buon funzionamento della Direttiva Seveso III.

13. Effetto domino e accettabilità del rischio

Quando un evento ne innesca altri — e fino a che punto un rischio è tollerabile

EFFETTO DOMINO

Un evento iniziale (pool/jet fire) innesca eventi secondari a cascata — esplosioni, BLEVE, nuovi incendi — in layout interconnessi.

Analisi: Bow-Tie, Event Tree (ETA), Fault Tree (FTA) + simulazione degli effetti.

Obbligo normativo: Allegato 3 del D.Lgs. 105/2015 (analisi dei rischi domino).

Prevenzione: segmentazione fisica · ESD ridondanti · layout che isola le unità critiche.

CRITERIO ALARP

Il rischio va ridotto «As Low As Reasonably Practicable»: equilibrio tra costi, benefici e rischio residuo.

Strumenti: curve F-N (frequenza vs numero di fatalità) · QRA (Quantitative Risk Assessment) · indice di rischio individuale e sociale.

Criteri di accettabilità (riferimento): $< 10^{-5}$ /anno per il singolo individuo · $< 10^{-3}$ /anno per il rischio collettivo.

Software: @RISK, RiskSpectrum, BowTieXP.

La regione ALARP in tre fasce

INACCETTABILE

Rischio non tollerabile salvo circostanze eccezionali: l'attività va modificata o interrotta.

REGIONE ALARP

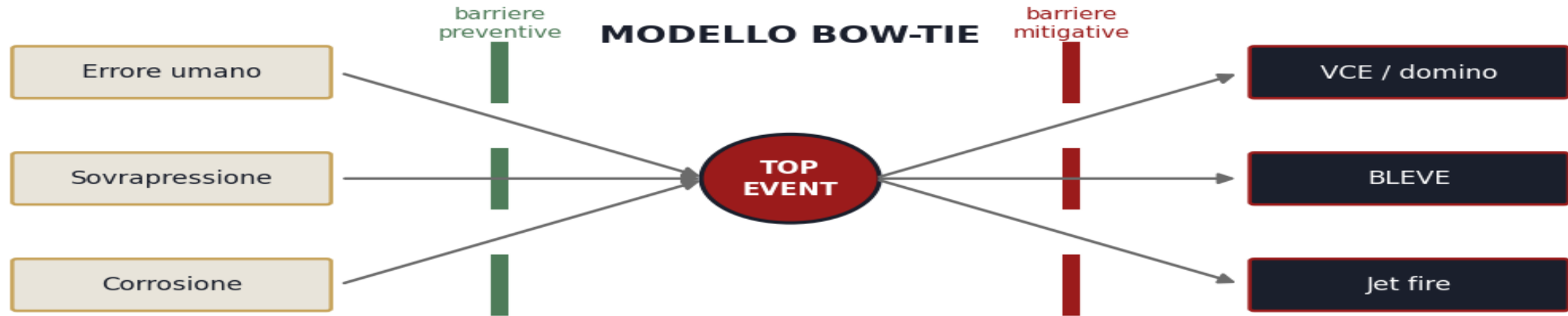
Tollerabile solo se la riduzione ulteriore è impraticabile o sproporzionata rispetto al beneficio.

ampiamente ACCETTABILE

Rischio trascurabile: nessuna azione ulteriore richiesta, mantenimento delle misure esistenti.

14. Tecniche di analisi del rischio di processo

Dall'identificazione del pericolo alla quantificazione: un percorso strutturato



HAZOP

Hazard & Operability: analisi sistematica per parole-guida (no, più, meno, inverso...) su ogni nodo di processo per individuare deviazioni pericolose.

LOPA

Layer of Protection Analysis: valuta se i livelli di protezione indipendenti (IPL) riducono la frequenza dell'evento entro la soglia tollerabile.

SIL

Safety Integrity Level (IEC 61511): classifica l'affidabilità richiesta alle funzioni strumentate di sicurezza (SIS), da SIL 1 a SIL 4.

QRA

Quantitative Risk Assessment: integra frequenze e conseguenze (modelli di effetto) per produrre rischio individuale e curve F-N.

15. Incidenti storici — lezioni dal passato

Quattro casi che hanno plasmato la normativa e la cultura della sicurezza

FEYZIN — Francia, 1966

Dinamica: Spurgo di propano → nube → deflagrazione → BLEVE a catena. 18 morti.

Lezione appresa: Distanze tra serbatoi · intercettazione rapida · formazione.

TEXAS CITY — USA, 2005

Dinamica: Riavvio unità ISOM: rilascio di isopentano → VCE. 15 morti, 170+ feriti.

Lezione appresa: Procedure di riavvio · cultura della sicurezza di processo.

BUNCEFIELD — UK, 2005

Dinamica: Overflow di benzina (sensore guasto) → nube → VCE. Onda d'urto oltre 500 m.

Lezione appresa: Allarmi ridondanti · ruolo del fattore umano.

SANNAZZARO — Italia, 2016

Dinamica: Esplosione + incendio sul topping EST. Nessun morto; impianto fermo per mesi.

Lezione appresa: Corrosione sotto coibentazione (CUI) · PEI/PEE · sicurezza attiva e passiva.

Filo comune: le cause-radice ricorrono — fattore umano, sensori/allarmi, procedure, manutenzione (CUI). La tecnica protegge solo se gestita.

16. Riepilogo · i messaggi chiave

Sette concetti da portare con sé

1

Sette fenomeni, due nature di danno: termico (kW/m^2) e meccanico (ΔP in bar).

3

BLEVE = esplosione fisica del recipiente; VCE = esplosione chimica in atmosfera.

5

L'effetto domino è l'elemento che distingue il rischio industriale da quello edilizio.

2

Confinamento e congestione decidono se una nube dà flash fire o VCE (e la DDT).

4

I modelli (TNO, TNT-eq, Multi-Energy, Heskestad) servono a stimare le conseguenze.

6

Seveso III (D.Lgs. 105/2015) impone SGS-PIR e identificazione degli scenari credibili.

Il filo del corso

Lez. 1-2 combustione e materiali

Lez. 3 sistema normativo

Lez. 4 (**questa**) fenomeni industriali e rischio

Lez. 5-6 le 10 strategie antincendio (S.1-S.10) e la progettazione prestazionale.

AUTOVALUTAZIONE

1. Perché un jet fire è un innesco tipico di BLEVE?
2. Quali condizioni trasformano un flash fire in VCE?
3. Spiega il significato di η nella formula TNT-equivalent.
4. Cosa rappresentano gli IPL nella LOPA?
5. Differenza tra rischio individuale e sociale (curve F-N).



UNA RIFLESSIONE FINALE

« Nessun fenomeno è imprevedibile
se lo si è già immaginato. *L'analisi del rischio*
è l'arte di pensare l'incidente prima che accada. »

Lezione 4 - Fenomeni incidentali da incendio