

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Chimica e dei Processi Sostenibili**

Tesi di Laurea Magistrale

**Sviluppo di metodi indicizzati per la
valutazione del rischio in ambito industriale**



Relatore

Prof. Luca Marmo

Candidato

Giacomo Bergamo

Dicembre 2017

Ai nonni e a Gianfranco

Indice

Indice	i
Premessa	iii
1. Introduzione	1
2. Metodi ad indici per la valutazione del Rischio	3
2.1. Descrizione dei metodi applicati	5
2.1.1. La Metodologia RAMSES 4	5
2.1.2. SW&HI: safety weighted hazard index.....	8
2.1.3. F&EI: Fire and Explosion Index	12
2.1.4. The Mond Index	15
3. Descrizione dei differenti casi studio	19
3.1. Esplosione avvenuta presso la Carmagnani Piemonte S.p.A.	19
3.2. Esplosione avvenuta presso la DARKEM SRL di Scarmagno	20
3.3. Incendio sviluppato nello stabilimento Thyssen-Krupp di Torino	22
4. Applicazione dei metodi indicizzati ai casi studio	25
4.1. Carmagnani S.p.A.....	25
4.1.1. Ramses 4 applicato al caso studio Carmagnani S.p.A.	26
4.1.2. SW&HI applicato al caso studio Carmagnani S.p.A.	27
4.1.3. F&EI applicato al caso studio di Carmagnani S.p.A.....	28
4.1.4. The Mond Index applicato al caso studio di Carmagnani S.p.A.....	29
4.2. Darkem Srl	30
4.2.1. Ramses 4 applicato al caso studio Darkem Srl	31
4.2.2. SW&HI applicato al caso studio Darkem Srl.....	32
4.2.3. F&EI applicato al caso studio Darkem Srl.....	33
4.2.4. The Mond Index applicato al caso studio Darkem Srl.....	34
4.3. Thyssen-krupp Torino	35
4.3.1. Ramses 4 applicato al caso studio Thyssen-krupp.....	36
4.3.2. SW&HI applicato al caso studio Thyssen-krupp	37
4.3.3. F&EI applicato al caso studio Thyssen-krupp	38
4.3.4. The Mond Index applicato a Thyssen-krupp.....	39
5. Verifica della qualità della valutazione del rischio in relazione al reale incidente ..	41
6. Verifica dell'eventuale abbassamento delle soglie di rischio mediante l'attuazione di azioni compensative	47

7. Reparto di processo chimico “CP1” di ACME S.p.A	53
7.1. Linea di produzione P1	55
7.2. Linea di produzione P2	55
7.3. Linea di produzione P3	56
7.4. Linea di idrogenazione	56
7.5. Linea di confezionamento polveri	57
8. Analisi di rischio del reparto “CP1” di ACME S.p.A	59
8.1. Caratteristiche generali del reparto CP1	60
8.2. I metodi di analisi del rischio applicati a CP1	61
8.3. NRI: Normalised Risk Index	71
9. Analisi e sviluppo dei metodi per la valutazione del rischio	73
9.1. La Metodologia Ramses 4	73
9.2. SW&HI: Safety Weighted Hazard Index	74
9.2.1 Proposte di modifica per il metodo SW&HI	75
9.3. The Mond Index	78
9.4. Sensibilità dei metodi alle variazioni dei parametri di processo	79
9.4.1. Variazione di Pressione	79
9.4.2. Variazione di Temperatura	80
10. Conclusioni	83
Bibliografia	85
ALLEGATO I	I
ALLEGATO II	XV
ALLEGATO III	XXXI
ALLEGATO IV	XLVII

Premessa

Il presente lavoro è stato redatto con il supporto della Società di Consulenza Tecsa S.r.l. presso Via Figino, 101-20016 Pero (MI) che ha fornito al sottoscritto le strumentazioni e le conoscenze essenziali ai fini preposti.

Tecsa S.r.l. è una Società di Consulenza specialistica, fondata nel 1979 da Carlo Fiorentini. I suoi interessi ricadono nel campo della sicurezza in ambito industriale a livello nazionale e internazionale. Fornisce un supporto di consulenza nel campo dell'ingegneria dell'antincendio, con particolare attenzione alle aziende soggette all'applicazione delle direttive Seveso. Nel corso degli anni, la società ha assunto un ruolo di riferimento nel panorama italiano, principalmente nell'ingegneria antincendio e dell'analisi del rischio industriale.

La costante crescita aziendale ha portato, nel 2015, allo sviluppo di due divisioni specialistiche in due distinti ambiti:

- “*Operational Excellence*” applicata alla industria di processo.
- *MFC Forensic*, ingegneria forense, fondata da L. Marmo, L. Fiorentini, B. Chiaia.

Nel corso degli anni, Tecsa ha ampliato il proprio mercato di riferimento, a partire dal mondo della raffinazione e della petrolchimica, fino ad estendersi al settore militare, al settore dei trasporti o alle infrastrutture critiche (tra cui porti, aeroporti terminal ferroviari e stazioni).

Luca Fiorentini, Direttore esecutivo di Tecsa, è attualmente, uno dei maggiori esperti italiani in materia di analisi del rischio industriale, rischio di incendio ed ingegneria antincendio orientata alla prestazione, autore di numerose pubblicazioni, testi specializzati e responsabile di attività di peer review per numerose riviste del settore. Insieme a tutto il senior management della società, partecipa a contribuire alla condivisione del know-how nel campo della sicurezza e della continua attività di ricerca e sviluppo sviluppata dalla società.

1. Introduzione

La valutazione del livello di rischio in ambito industriale è uno strumento indispensabile che permette al datore di lavoro di individuare gli interventi necessari da attuare, in modo da garantire un livello di sicurezza adeguato nel luogo di lavoro di interesse.

La finalità principale della valutazione del rischio è quella di individuare gli scenari e la loro probabilità di accadimento, le eventuali conseguenze che si potrebbero generare, al netto dei sistemi di protezione presenti. Permette infine di verificare se tali sistemi siano adatti o meno, definendo le eventuali integrazioni necessarie.

Tale analisi può essere intrapresa basandosi sulle linee guida iniziali definite dal D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 [1], in materia di tutela della salute e sicurezza sul posto di lavoro. Si definisce altresì l'obbligo per il datore di lavoro di stesura del documento di valutazione dei rischi (DVR) secondo quanto disposto dall'Articolo 17 dello stesso Decreto, al fine di raggiungere l'obiettivo di una sostanziale riduzione e/o del controllo dei fattori di rischio presenti, nel rispetto della legislazione nazionale e delle norme di buona tecnica prodotte da organismi accreditati (UNI-EN, CEI, ecc.).

In fase preliminare, può essere intrapresa una valutazione del rischio, basata sulla compilazione di metodi indicizzati che permettono di effettuare un'analisi semplificata e parametrizzata. Questi metodi permettono di determinare un indice principale che andrà a individuare direttamente l'appartenenza a una determinata classe di rischio.

Il presente studio si basa sull'individuazione dei metodi di “*Risk Assessment*” sviluppati nel tempo da diverse società, sull'analisi operativa dei vari metodi e sull'applicazione degli stessi. La valutazione che si è deciso di intraprendere è fondamentalmente incentrata sull'analisi del rischio principale di incendio e/o esplosione, trascurando effetti secondari come rilascio tossico.

Si è potuto constatare come i metodi principali individuati con validità internazionale, siano stati concepiti circa 40 anni fa e aggiornati negli anni '90, ma sono ancora gli unici adeguati allo scopo. Questi, si soffermano solo sull'analisi di realtà industriali che rientrano sotto le specifiche di “Aziende a Rischio di Incidente Rilevante”, secondo quanto definito dal D. Lgs. 105/2015 [2], e la loro applicazione trascura tutte quelle industrie che, per quantitativi e tipologia di processo, sono fuori da tali obblighi legislativi, ma in egual modo possono presentare un livello di rischio elevato. Presentano spesso limiti applicativi inerenti ai quantitativi di sostanze presenti e caratteristiche di pericolosità delle stesse.

Tutto questo fa sì che vi sia bisogno di un aggiornamento degli stessi, in modo da renderli più specifici con il livello tecnologico attuale, e si renda necessario lo sviluppo futuro di nuovi modelli che permettano la valutazione delle diverse tipologie di insediamenti industriali.

La ricerca bibliografica condotta in fase preliminare, ha permesso di individuare diversi metodi, tra cui:

- F&EI “Fire and Explosion Index, sviluppato da “DOW Chemical Company”[3].
- The Mond Index, sviluppato da “Imperial Chemical Industries (ICI)”[4].
- Safety Weighted Hazard Index (SW&HI), sviluppato da Khan, Husain, Abbasi [5].
- La metodologia Ramses 4, sviluppato da Sindar S.r.l. [6].

I metodi qui elencati, hanno una validità internazionale, dato il tipo di normative su cui basano la loro applicazione, al di fuori del metodo Ramses 4, sviluppato in Italia, che può essere applicato solo in campo Europeo.

In ambito nazionale, il Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 31/03/1989- Allegato II [7] definisce le linee guida per un'analisi preliminare di rischio delle aree di interesse secondo un metodo indicizzato; tale decreto è stato prodotto essenzialmente sulla rielaborazione del F&EI e del "The Mond Index". Con l'emanazione del D. Lgs. 105/2015 (SEVESO III), che si è posto come testo unico per il controllo del rischio di incidente rilevante, viene data grande attenzione all'analisi preliminare del rischio. Nella parte 1 dell'allegato C, intitolata "Contenuti richiesti per il Rapporto di Sicurezza", viene disposto che l'analisi degli scenari incidentali sia preceduta da un'analisi preliminare del rischio per l'individuazione delle unità critiche dello stabilimento.

Nel presente lavoro, i metodi elencati sono stati applicati a 3 diversi casi studio di incidenti realmente verificatisi, quali:

- Esplosione presso lo stabilimento industriale Carmagnani Piemonte S.p.A.
- Esplosione presso lo stabilimento industriale Darkem S.r.l..
- Incendio presso lo stabilimento industriale Thyssen-krupp di Torino.

Questa parte del lavoro è stata effettuata in modo da evidenziare la capacità dei diversi metodi nel predire l'eventuale evento indesiderato (effettivamente verificatosi), e le criticità che possono emergere durante la valutazione, mettendo in risalto tutti quei fattori esclusi dall'analisi ma che allo stesso modo influiscono sull'evento principale. In seguito, i metodi individuati sono stati applicati in uno stabilimento, nel Reparto di processo chimico "CP1" di *ACME S.p.A.*, sigla indicante una realtà industriale realmente esistente nel nord Italia, in modo da effettuare un'analisi integrativa del livello di rischio delle unità analizzate e delle modifiche relative apportate al reparto. Tale studio è stato realizzato in collaborazione con la società di consulenza *Tecsa S.r.l. Via Figino, 101-20016 Pero (MI)*, dove si è svolto il lavoro.

Infine, si è intrapresa un'analisi critica e comparativa dei metodi utilizzati con l'intenzione di individuare le differenti problematiche nell'applicazione di ognuno di essi, la sensibilità nelle modifiche delle condizioni operative e le possibili opzioni di miglioramento degli stessi.

La prospettiva di questo lavoro è infatti orientata a fornire le basi per lo sviluppo di un nuovo metodo di valutazione, che mantenga le caratteristiche principali di quelli studiati qui, ma superi le criticità individuate, ovvero che possa avere:

- Ampio spettro di azione verso tutte le tipologie di Innesco industriale.
- Facile applicazione da parte del personale responsabile.
- Elevata sensibilità nella relazione tra Indice di rischio individuato e Classe di Rischio corrispondente.

L'insieme delle considerazioni effettuate e criticità individuate ha permesso di sviluppare un nuovo indice, il *Normalised Risk Index*, che definisce un livello di rischio normalizzato rispetto i vari metodi utilizzati. Inoltre sono state proposte delle modifiche e integrazioni dei parametri di calcolo dei metodi stessi, in modo da adattarli alle caratteristiche principali prima citate.

2. Metodi ad indici per la valutazione del Rischio

L'obiettivo di questo capitolo è quello di definire i concetti fondamentali che verranno elaborati, e descrivere in maniera sommaria le metodologie indicizzate di calcolo utilizzate nell'analisi del rischio che si è deciso di intraprendere.

In primis viene definito, secondo il D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 Articolo 2, lettera s [1] il concetto di Rischio come *“la probabilità di raggiungimento del livello potenziale di danno nelle condizioni di impiego o di esposizione ad un determinato fattore o agente oppure alla loro combinazione”*. Il rischio è un concetto probabilistico, è la probabilità che accada un certo evento capace di causare un danno. La nozione di rischio implica l'esistenza di una sorgente di pericolo e delle possibilità che essa si trasformi in un danno. Ciò che differenzia proprio il rischio dal pericolo è il fatto che nel rischio è tenuta in conto la probabilità che si verifichi un certo danno in relazione alla possibilità di esposizione a un pericolo. Seguendo questo tipo di approccio, il livello di rischio può essere espresso come:

$$R = f(m, p) \tag{2.1}$$

Dove:

m: magnitudo, gravità delle conseguenze attese.

p: probabilità di accadimento dell'evento.

Lo stesso Decreto Legislativo definisce come valutazione dei rischi la *“valutazione globale e documentata di tutti i rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori presenti nell'ambito dell'organizzazione in cui essi prestano la propria attività, finalizzata ad individuare le adeguate misure di prevenzione e di protezione e ad elaborare il programma delle misure atte a garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di salute e sicurezza”*. La valutazione può essere effettuata attraverso differenti tecniche di analisi del rischio che possono essere raggruppate in tre grandi macrogruppi, quali:

- Metodi quantitativi: si basano su un'analisi quantitativa del rischio, in cui la funzione che definisce la frequenza di accadimento può avere una elevata complessità, che tenga conto della maggior parte dei parametri che intervengono nel definire il livello di rischio. Vengono considerati anche altri fattori quali: estensione del danno, frequenza e durata di esposizione, possibilità di evitare o limitare il danno, ecc. In questa classe possiamo annoverare:
 - Hazop: Hazard and Operability analysis.
 - Fmea: Failure Mode and Effect Analysis.
 - Fault Tree.
 - Event Tree.
- Metodi semi-quantitativi: si basano sempre su un'analisi di tipo quantitativa del tipo $R = f(m, p)$ ma adottando un approccio più semplificato. I dati a disposizione sono quelli rilevati al momento dell'indagine ed i parametri di confronto sono quelli che prescrivono le norme tecniche, dipendenti sempre dalla probabilità di accadimento e dal danno che ne deriva.
- Metodi qualitativi: tali modelli non utilizzano espressioni matematiche del tipo $R = f(m, p)$, ma effettuano un'analisi qualitativa verificando la conformità alle norme vigenti (leggi, decreti o norme di buona tecnica). Si determinerà un giudizio finale di tipo qualitativo del rischio corrispondente.

La valutazione effettuata, permette di definire una scala di priorità degli interventi necessari da intraprendere da parte dell'azienda per modificare il livello di rischio percepito e verificare se questo è superiore rispetto a quello desiderato. Le azioni da intraprendere si differenziano in:

- Azioni di Prevenzione, che secondo il D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 Articolo 2 lettera n, definiscono il complesso delle “*disposizioni o misure necessarie anche secondo la particolarità del lavoro, l'esperienza e la tecnica, per evitare o diminuire i rischi professionali nel rispetto della salute della popolazione e dell'integrità dell'ambiente esterno*”.
- Azioni di Protezione, che agiscono diminuendo la gravità del danno (magnitudo). Queste si interpongono tra ciò che può provocare danno e l'elemento che lo può subire.

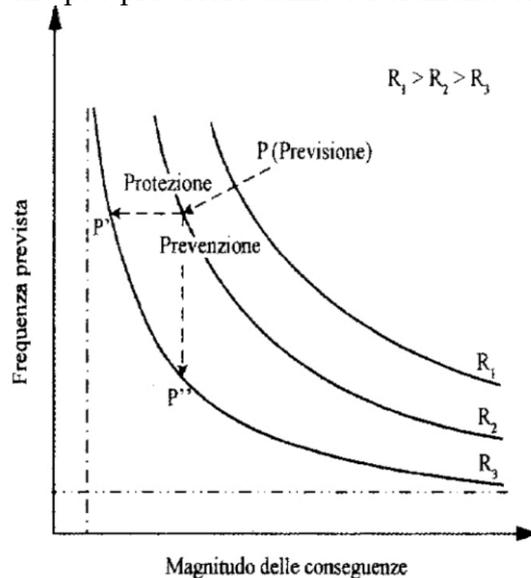


Figura 2.1: Riduzione del grado di rischio per azioni di protezione o prevenzione [8]

I metodi di valutazione del rischio a indici attualmente presenti, permettono un'analisi preliminare delle caratteristiche dell'impianto di interesse e possono essere classificati, data la loro formulazione, come metodi semi-quantitativi, definendo un indice finale di rischio che andrà a determinare la relativa classe di rischio corrispondente. La valutazione in sé, si sviluppa partendo dalla definizione di due elementi fondamentali e imprescindibili quali:

- Unità logica.
- Sostanze presenti nell'unità.

L'insediamento industriale per essere oggetto di tale valutazione, può essere o un'industria di processo semplice, o considerata come “Azienda a Rischio di Incidente Rilevante”, secondo quanto definito dal D. Lgs. 105/2015 (SEVESO III), e questo avviene in funzione del tipo e quantità di sostanze stoccate e/o processate, e dei processi sviluppati al suo interno, che possano dare luogo a un pericolo grave per persone e ambiente a breve e/o lungo termine.

Per essere applicato, ogni metodo richiede la suddivisione preliminare del reparto di ogni industria in unità logiche differenti. Questo avviene in funzione del tipo di attività svolta al suo interno che può indurre un rischio differente di maggiore o minore entità (zone di stoccaggio, zone di processo, scarico e carico ecc).

La classificazione delle sostanze prese in esame, può essere eseguita secondo quanto dichiarato dal regolamento CLP (regolamento europeo n. 1272/2008) [9] grazie al quale il sistema europeo relativo alla classificazione, etichettatura e imballaggio delle sostanze chimiche (e delle loro miscele) è stato allineato al sistema mondiale armonizzato di classificazione ed etichettatura delle sostanze chimiche (GHS). Questa classificazione definisce le Frasi H, Indicazioni di

Pericoli specifiche, che sostituiscono le Frasi R delle precedenti direttive europee oggi abrogate. Le Frasi H possono essere suddivise in:

- Pericoli Fisici.
- Pericoli per la Salute.
- Pericoli per l'Ambiente.
- Informazioni supplementari sui pericoli.
- Elementi dell'etichetta e informazioni supplementari per talune sostanze e miscele.

Un'altra classificazione delle sostanze può essere effettuata secondo le indicazioni fornite dalla NFPA 704 [10], di validità internazionale, in cui si indentificano i pericoli di un materiale in funzione delle tre seguenti categorie:

- Salute.
- Infiammabilità.
- Instabilità.

Il metodo indica il grado di gravità della categoria attribuendo un valore che può variare da 0 a 4, indicando con 4 il grado di pericolo maggiore. L'attribuzione del valore avviene in base alle caratteristiche chimico/fisiche e di pericolosità del materiale. Il valore così attribuito viene inserito in un pittogramma chiamato Diamante del Fuoco, come nell'esempio riportato in Figura 2.2 riferito al Cloro. Si nota come nella parte bassa di questo, sono inserite le eventuali sigle inerenti a rischi particolari, in accordo con il capitolo 8 dello stesso standard (colore bianco).

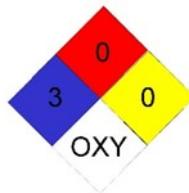


Figura 2.2: Diamante di Fuoco riferito al Cloro

2.1. Descrizione dei metodi applicati

2.1.1. La Metodologia RAMSES 4

La Metodologia RAMSES 4 (Risk Assessment Methodology for workers Safety against ExplosionS) [6] è un metodo indicizzato prodotto dalla società *Sindar s.r.l.* per la valutazione del rischio di formazione di atmosfere potenzialmente esplosive secondo le direttive ATEX indicate dal D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 Titolo XI – Protezione da atmosfere Esplosive [1]. La versione analizzata in questo studio è quella edita il 12 Marzo 2014 in cui sono indicate le procedure da eseguire per la valutazione. Questa permette di determinare tre differenti indici:

- IP : Indice di Pericolo associati agli Agenti Chimici, in grado di generare Sorgenti di emissione che possano portare alla formazione di atmosfere infiammabili.
- IR_{SE} : Indice di Rischio per sorgente di Emissione, ossia indice di rischio associati al rischio di esplosione.
- IR_M : Indice di Rischio per Mansioni, indicativi dell'effettivo rischio per le persone a causa della potenziale presenza di atmosfere esplosive.

Il metodo distingue, riguardo alla valutazione dei rischi dovuti alla presenza sul luogo di lavoro di atmosfere esplosive, tra danni dovuti alle conseguenze meccaniche dell'esplosione e effetti indiretti per possibile inalazione dei prodotti di combustione nocivi e/o possibile asfissia da consumo di ossigeno.

Per questo, riferendosi alle caratteristiche intrinseche di pericolosità, associa a ciascuna sostanza due indici distinti, quali:

- IP_E : Indice di pericolo per Irraggiamento/onda di pressione.
- IP_T : Indice di pericolo per inalazione a seguito dell'esplosione.

Il valore di entrambi gli indici può essere determinato attraverso il metodo di calcolo definito in Allegato 1 del metodo Ramses 4. L'indice di pericolo riferito all'esplosione è ricavato da:

$$IP_E = 2.5 + IPI + IPC1 + IPC2 + IPE1 + IPE2 \quad (2.2)$$

dove il valore di 2.5 rappresenta un valore costante attribuito dal metodo Ramses 4 ai fini della normalizzazione del campo di variabilità del valore IP_E entro un intervallo prefissato. Gli indici della Formula 2.2 indicano rispettivamente:

- IPI : Indice riferito all'Energia di Innesco della Sostanza.
- $IPC1$: Concentrazione del Combustibile definito in funzione della classificazione CLP (Frase H), o della Temperatura di infiammabilità della sostanza (Flash Point).
- $IPC2$: Concentrazione del Combustibile definito in funzione dell'ampiezza del campo di Esplosività (UEL-LEL) o del Limite inferiore di esplosività (LEL).
- $IPE1$: Caratteristiche dell'esplosione, come Sovrapressione di Esplosione o Energia di combustione della miscela combustibile-aria.
- $IPE2$: Caratteristiche dell'esplosione in funzione della velocità di fiamma o dell'indice di deflagrazione di una nube gassosa (K_g) o di una polvere solida (K_{ST}) e relativa classe di esplosività (St).

Si evince come il calcolo dell'indice di pericolo della sostanza e i relativi valori numerici si differenziano se si è nel caso di gas, vapori o nebbie di liquidi, oppure se si considerano polveri solide in grado di generare esplosioni. L'assegnazione del valore dell'indice di pericolo per inalazione a seguito dell'esplosione (IP_T) viene determinato solo se ritenuto pertinente da chi svolge l'analisi di rischio (valore costante pari a 5), come da indicazioni del metodo proposto. Per ogni sostanza presa in esame, il metodo indica infine di effettuare delle modifiche agli indici individuati in funzione di alcune caratteristiche particolari della sostanza e della qualità delle fonti reperite in letteratura scientifica o in funzione di prove sperimentali.

Tabella 2.1: Campo di variabilità indici di pericolo per agente chimico.

Indice di pericolo	Caratteristiche chimico-fisiche	Qualità delle fonti informative	Totale
IP_E	3.5÷6.7	0 ÷ +1	3.5 ÷ 7.7
IP_T	5	0 ÷ +1	5 ÷ 6

L'indice di rischio per sorgente di emissione dipende dalla probabilità di formazione di un'atmosfera esplosiva, dalla probabilità della presenza di un innesco e dall'estensione dei danni. Si differenzia, come prima, se ci si riferisce agli effetti indotti dall'esplosione in sé, oppure se ci si riferisce agli effetti tossici dovuti al rilascio di sostanza. I due indici numerici vengono determinati da:

$$IR_{E-SE} = IP_E + \Delta_{ZONA} + \Delta_{INNESCHI} + \Delta_{DANNI\ ESPLOSIONE} + K_{SE-E} \quad (2.3)$$

$$IR_{T-SE} = IP_T + \Delta_{ZONA} + \Delta_{INNESCHI} + \Delta_{DANNI\ TOSSICITA'} + K_{SE-T} \quad (2.4)$$

dove:

- IR_{E-SE} : Indice di Rischio da Esplosione per Sorgente di Emissione.

- IR_{T-SE} : Indice di Rischio da Tossicità per Sorgente di Emissione.
- IP_E, IP_T : Indici di Pericolo da Esplosione e Tossicità riferiti all'agente chimico che genera la Sorgente di Emissione.
- Δ_{ZONA} : Variazione del rischio dovuto alla classificazione della zona generata dalla Sorgente di Emissione.
- $\Delta_{INNESCHI}$: Variazione del rischio dovuto alla probabilità di presenza di Sorgenti di Innesco.
- $\Delta_{DANNI\ ESPLOSIONE}, \Delta_{DANNI\ TOSSICITA'}$: Variazione del rischio dovuto all'entità dei danni diretti da esplosione e indiretti da tossicità dei prodotti di combustione.

La valutazione dei diversi fattori viene effettuata attraverso le direttive dettate dal metodo. Si noti come la determinazione dell'indice di rischio riferito alla sorgente di emissione specifica sia per effetti diretti da esplosione che indiretti tossici, dipende direttamente nel calcolo dall'indice di pericolo prima ottenuto.

La classificazione della zona prima citata, in cui è presente la sorgente di emissione presa in esame, è quella introdotta dalla classificazione delle aree ATEX, indicata nell'art. 293 del D. Lgs. 81/08 secondo l'Allegato XLIX [1] effettuata secondo le linee guida definite dalla normativa tecnica CEI 31-87 per fluidi infiammabili e CEI 31-88 per le polveri combustibili.

Le sorgenti di innesco vengono valutate invece, secondo le direttive imposte dalla normativa tecnica UNI EN 1127-1 [11], che classifica queste in:

- Superfici calde.
- Superfici calde.
- Scintille di saldatura, fiamme e gas caldi di altra origine.
- Superfici calde di origine meccanica.
- Scintille di origine meccanica.
- Materiale elettrico.
- Correnti vaganti.
- Cariche elettrostatiche.
- Onde elettromagnetiche a radiofrequenza (RF) da 10^4 Hz a 3×10^{12} Hz.
- Onde elettromagnetiche da 3×10^{11} Hz a 3×10^{15} Hz.
- Radiazioni ionizzanti.
- Ultrasuoni.
- Compressione adiabatica e onde d'urto.
- Aumenti di temperatura dovuti a reazioni chimiche o a materiali instabili.
- Combustione di uno strato di polveri o di altro materiale combustibile.
- Fulmini.

Nell'Allegato 2 del metodo Ramses 4, si riportano le direttive definite per effettuare il calcolo della distanza di danno diretta causata dall'esplosione in sé e per danno indiretto dovuto al rilascio di sostanze tossiche. Questo valore ottenuto, viene modificato attraverso i "Fattori di Correzione della distanza di Danno" riportati in Allegato 3 del metodo, che tengono in conto delle Condizioni di danno aumentato, Mitigazione del danno diretto da esplosione, Gestione delle emergenze e Possibilità di danno inalatorio post esplosione. Le costanti inserite nel calcolo prodotto, sono necessarie al fine di normalizzare i valori all'interno di un campo di validità dell'indice.

L'ultimo indice di rischio che viene determinato dal metodo è l'Indice di Rischio per Mansione, che viene ottenuto da:

$$IR_{E-M} = IP_{E-SE} + \Delta_{prossimità-E} + \Delta_{frequenza} + \Delta_{formazione} + K_{M-E} \quad (2.5)$$

$$IR_{T-M} = IP_{T-SE} + \Delta_{prossimità-T} + \Delta_{frequenza} + \Delta_{formazione} + K_{M-T} \quad (2.6)$$

Come si può notare, dalle equazioni 2.5 e 2.6, il calcolo si differenzia sempre in funzione degli effetti dovuti dall'esplosione in sé rispetto al rilascio tossico che può derivarne. La valutazione include diversi fattori al suo interno quali:

- $\Delta_{prossimità-E}$ e $\Delta_{prossimità-T}$: variazione del rischio dovuto alla posizione della mansione all'interno dell'area dei danni diretti da esplosione e indiretti da tossicità dei prodotti di combustione.
- $\Delta_{frequenza}$: Variazione del rischio dovuto alla frequenza della presenza della mansione.
- $\Delta_{formazione}$: Variazione del rischio dovuto al livello di formazione della mansione.

Anche in questo calcolo, vengono inseriti dei valori costanti necessari al fine di normalizzare i valori all'interno di un campo di validità dell'indice.

La Metodologia Ramses 4 attribuisce ad ogni indice di pericolo e rischio ottenuto una classe corrispondente, a cui associa gli interventi programmati da attuare da parte dell'azienda responsabile. In questo lavoro si è deciso, anche se non riportato nella descrizione ufficiale dei metodi, di attribuire una colorazione specifica per ogni classe di rischio come riportato in Tabella 2.2, in modo da rendere più semplice e immediata la sua individuazione nei diversi casi studio. Tale distinzione è stata eseguita per tutti e 4 i metodi analizzati nel presente elaborato.

Tabella 2.2: Classi di Rischio della Metodologia Ramses 4

Indice	Livello di rischio	Programma interventi
4÷6	ALTO	Effettuare azioni correttive indilazionabili
3÷4	MEDIO	Programmare interventi di miglioramento urgenti
2÷3	BASSO	Programmare interventi di miglioramento nel medio termine
1÷2	ACCETTABILE	Non è strettamente necessario programmare interventi di miglioramento
0÷1	TRASCURABILE	Non è necessario programmare interventi di miglioramento

2.1.2. SW&HI: safety weighted hazard index

Il metodo SW&HI (Safety Weighted Hazard Index) [5], è il risultato della collaborazione di F.I. Khan e T. Husain della facoltà di Ingegneria e Scienze Applicate, della Memorial University of Newfoundland, St John's, NF, Canada, con S.A. Abbasi, del "Centre for Pollution & Energy Technology, Pondicherry University, Pondicherry, India. Questo metodo rappresenta un'elaborazione più approfondita dell' HIRA (Hazard Identification and Ranking) [12], sviluppato sempre da Khan e Abbasi. Il metodo di Risk Assessment HIRA, non considera la presenza dei sistemi di controllo e delle misure di sicurezza, e se queste siano sufficienti in numero e in tipo per la protezione dell'unità. Non definisce, allo stesso modo, il sistema di risposta per le emergenze (ERP) dell'azienda presa in esame, né il piano di gestione dei disastri

(DMP). Dallo studio dei due metodi, si evince come essi siano stati sviluppati a partire dall'analisi approfondita degli indici di Risk Assessment degli altri due metodi qui analizzati [3] [4]. Il metodo SW&HI, permette di definire un indice di livello di rischio, lo SW&HI appunto, che rappresenta in termini quantitativi, il raggio dell'area (in metri) in cui sussistono condizioni di pericolo moderato, cioè in cui si abbia il 50% della probabilità di morte/danno, in relazione al processo/ unità di processo analizzata. In termini matematici, il valore si definisce come:

$$SW\&HI = B/A \quad (2.7)$$

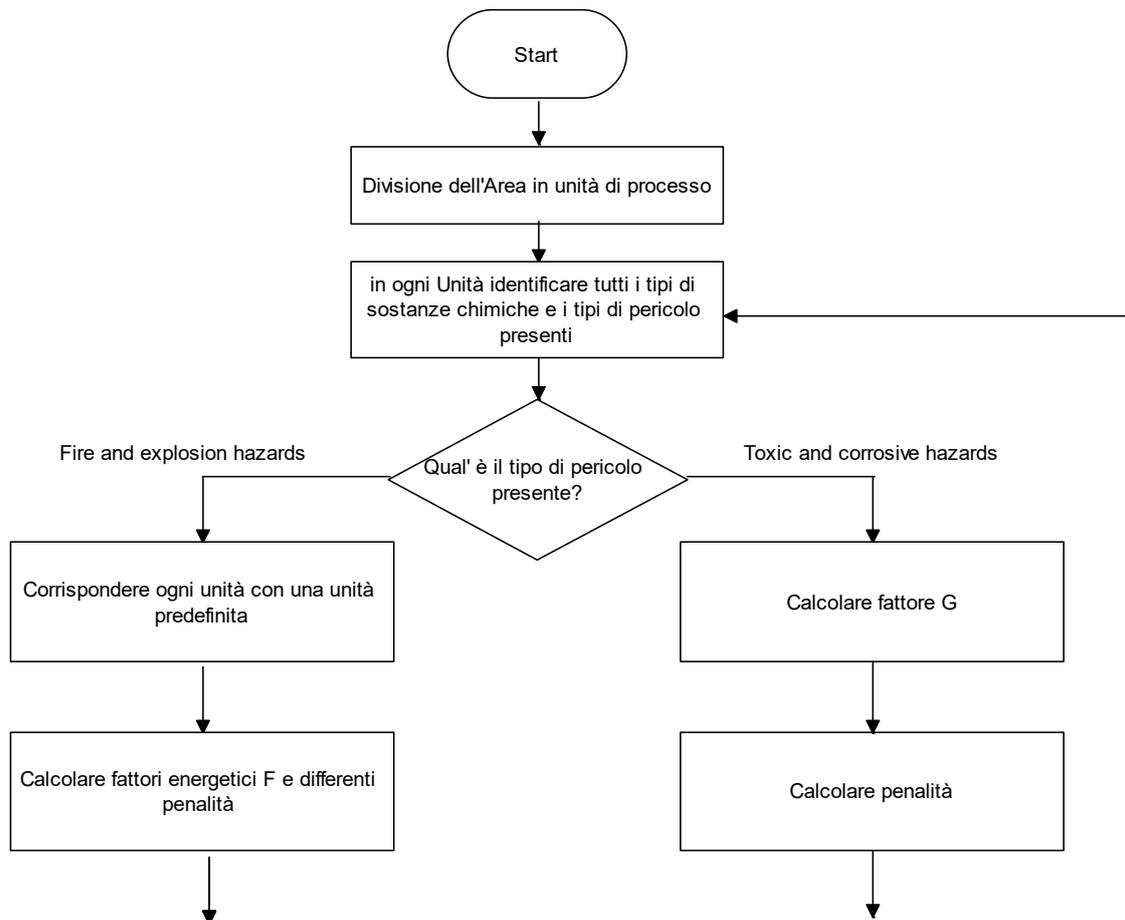
dove:

- B rappresenta la misura quantitativa del danno causato dall'unità di processo. Area che considera il 50% della probabilità di danno (m²).
- A rappresenta la somma dei crediti attribuiti ai sistemi di protezione installati.

A sua volta l'indice B si suddivide in:

- B1: danno dovuto a incendio ed esplosione.
- B2: danno dovuto al rilascio tossico e dispersione.

B viene determinato quindi prendendo in considerazione il valore massimo tra B1 e B2. La metodologia di analisi riportata all'interno dell'articolo, può essere riassunta all'interno di un diagramma a blocchi, come in Figura 2.3:



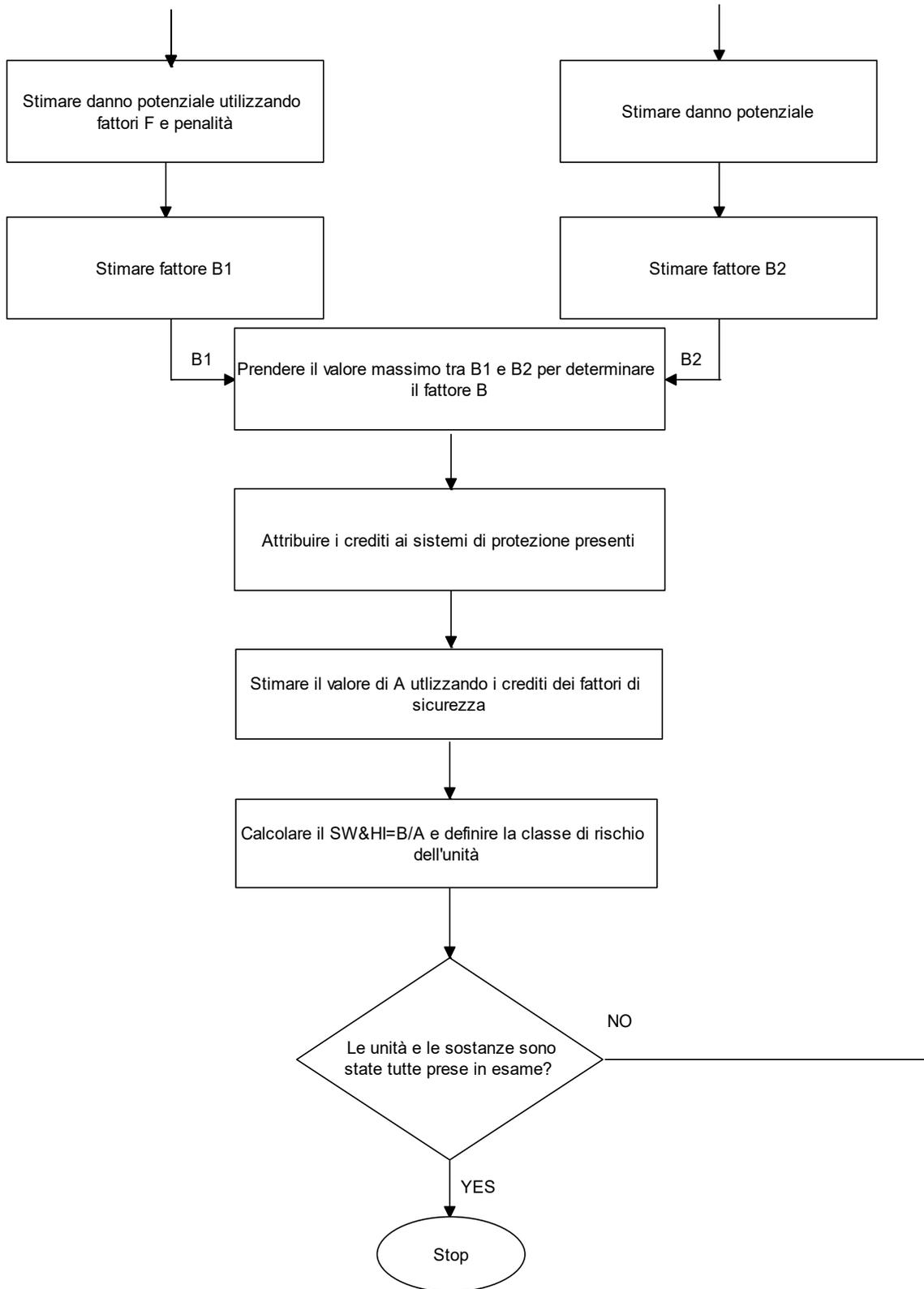


Figura 2.3: Metodologia di calcolo del SW&HI.

Le unità di un impianto, secondo SW&HI possono essere catalogate in 5 macro categorie:

- Unità di stoccaggio.

- Unità in cui si eseguono operazioni fisiche (trasporto di materiali, cambiamenti di fase, pompaggio, compressione, ecc.).
- Unità che coinvolgono reazione chimiche.
- Unità di trasporto.
- Altre unità pericolose come caldaie, scambiatori di calore a fiamma diretta.

Sono state riportate solo le caratteristiche del calcolo riferite al tipo di unità considerate in questo studio, ovvero quelle in cui si eseguono operazioni chimiche, fisiche e processi di stoccaggio. Si noti come il considerare unità operative differenti porti all'attribuzione di penalità differenti sia in tipo che in peso delle stesse. L'analisi è stata eseguita prendendo in considerazione solo gli effetti dovuti all'esplosione o incendio, intesa come rilascio energetico, e tralasciando la valutazione di tutte le conseguenze dovute al rilascio tossico delle sostanze chimiche nell'unità.

I fattori energetici tengono conto di parametri di processo (pressione, temperatura e portata) e caratteristiche della sostanza, e sono stati ricavati dall'analisi di complesse equazioni termodinamiche riguardanti l'espansione isoentropica di sostanze gassose o liquide pressurizzate, ottenendo:

$$F1 = 0,1 * Hc / K \quad (2.8)$$

$$F2 = 6/K * PP * V = 1,304 * 10^{-3} * PP * V \quad (2.9)$$

$$F3 = 1 * 10^{-3} * \frac{1}{(T+273)} * (PP - VP)^2 * V \quad (2.10)$$

$$F4 = M * \frac{Hrxn}{K} \quad (2.11)$$

Al contributo dei fattori energetici sono addizionate dei fattori di penalità, che prendono in considerazione tutte le criticità di un'unità che possono portare all'aumento del rischio della stessa:

- pn1: effetto della temperatura.
- pn2: effetto della pressione
- pn3: effetto della vicinanza unità pericolosa.
- pn4: effetto quantità della sostanza.
- pn5: effetto delle caratteristiche di reattività e infiammabilità.
- pn6: effetto della % spazio occupato dall'unità.
- pn7: effetto dei fattori esterni come eventi catastrofici naturali.
- pn8: effetto fattori sociali.
- pn9: effetto del tipo di reazione chimica.
- pn10: effetto dello svilupparsi di reazioni indesiderate.

. Per questo le valutazioni sono state eseguite considerando solo il termine B1, ottenuto da:

$$Hazard\ Potential = (F1 + pn1 + F * pn2 + F4 * pn9 * pn10) * pn3 * pn4 * pn5 * pn6 * pn7 * pn8$$

$$B1 = 4,76 * (Hazard\ Potential)^{1/3} \quad (2.12\ e\ 2.13)$$

La determinazione del livello di rischio dell'unità presa in analisi, passa dall'individuazione del valore di A, parametro che include in sé tutte quelle misure di protezione e prevenzione intraprese dall'azienda. Quindi, a differenza del valore di B, che viene determinato con dei

fattori penalizzanti e si differenzia in base al tipo di unità, il valore di A ingloba in sé dei fattori definiti “crediti” dipende in maniera poco rilevante dal tipo di unità analizzata:

- cr1: presenza di un Piano per la gestione delle Emergenze.
- cr2: quantificazione effettiva del Piano per la gestione delle Emergenze.
- cr3: presenza di sistemi per la misura e controllo delle avarie.
- cr4: presenza per la presenza di sistemi di controllo sulle apparecchiature.
- cr5: presenza di sistemi di rilevamento.
- cr6: presenza di controlli di emergenza.
- cr7a: caratterizzazione del tipo di processo (automatizzato o manuale).
- cr7b: caratteristiche dell’operatore.
- cr8: affidabilità delle apparecchiature.

Il metodo SW&HI, dispone che ad ogni indice di pericolo e rischio ottenuto sia attribuita la classe corrispondente, come riportato in Tabella 2.3.

Tabella 2.3: classi di rischio secondo SW&HI.

<i>Indice</i>	<i>Livello di rischio</i>
>20	ESTREMO
10 ÷ 20	ALTO
5 ÷ 10	MODERATO
1 ÷ 5	BASSO
0 ÷ 1	LIEVE

2.1.3. F&EI: Fire and Explosion Index

Il Fire and Explosion Index è stato sviluppato dalla Dow Chemical Company. È noto come indice DOW ed una sua descrizione è presente all’interno del *Fire and Explosion Index (DOW), 6th edition*, AIChE (American Institute of Chemical Engineers), 1987 [3]. Questo metodo è principalmente indicato per l’industria petrolifera ed è stato redatto ai fini assicurativi per poter valutare il premio in modo semplificato. Rappresenta probabilmente la prima forma di analisi del rischio in ambito industriale, e molti dei metodi che sono stati oggi sviluppati, si ispirano al F&EI. La sua forza, trae spunto da un’approfondita analisi storica di numerosi incidenti industriali avvenuti negli Stati Uniti. Il metodo permette di ottenere una valutazione quantitativa dei danni previsti dalla formazione di potenziali incendi ed esplosioni e di identificare le apparecchiature presenti nell’unità analizzata che potrebbero contribuire alla creazione o all’escalation di un incidente. L’analisi è basata sulla definizione iniziale della sostanza, considerata più pericolosa in un’unità di processo. Ciò fa sì che si renda necessario eseguire differenti valutazioni per ogni singola sostanza nell’unità.

Presenta comunque carenze riguardanti la valutazione degli effetti tossici prodotti dalle sostanze chimiche presenti e non permette la valutazione simultanea di differenti tipi di materiale nell’unità di interesse. Il metodo permette di definire tre fattori principali, legati al tipo di sostanze e alle condizioni di processo, ovvero:

- MF: Material factor.
- F1: General Process Hazards Factor.
- F2: Special Process Hazards Factor.

La definizione del fattore sostanza MF può essere effettuata secondo l'Allegato A del manuale del metodo F&EI per molte delle sostanze note. In assenza, si noti come la valutazione di MF dipende direttamente dal NFPA Ranking definito all'interno dello Standard NFPA 704, di infiammabilità e reattività delle sostanze. Attraverso la Tabella di scelta del Material Factor (MF) presente nella guida del metodo, si può altresì classificare le sostanze solide combustibili e le polveri combustibili e/o infiammabili attraverso la classe di esplosività (St) della polvere.

La valutazione prosegue con la determinazione del "General Process Hazard" (F1), indice che svolge un ruolo primario nella valutazione delle criticità del tipo di processo svolto. Le penalità si attribuiscono per:

- 1A: Reazioni esotermiche.
- 1B: Reazioni endotermiche.
- 1C: Trasferimento e manipolazione delle sostanze.
- 1D: Processi svolti all'aperto o in ambiente confinato, o unità in cui si stocca materiale infiammabile.
- 1E: Facilità di accesso per i soccorritori in caso di emergenza.
- 1F: Sistemi di controllo dei rilasci di materiale.

"Special Process Hazard" (F2), comprende tutti quei fattori che giocano un ruolo fondamentale nell'aumentare la probabilità di un potenziale incidente e comprendono le specifiche condizioni di processo che storicamente contribuiscono alle principali cause degli incendi e delle esplosioni, compresa una valutazione sommaria degli effetti tossici. Le criticità prese in esame sono:

- 2A: Tossicità del materiale processato.
- 2B: Processi che avvengono sottovuoto.
- 2C: Operazioni che avvengono nel campo di infiammabilità delle sostanze.
- 2D: Esplosioni di polveri combustibili.
- 2E: Penalità indotte dalle alte Pressioni.
- 2F: Operazioni svolte a bassa Temperatura.
- 2G1: Materiale infiammabile o combustibile nel processo.
- 2G2: Stoccaggio di sostanze liquide o gas.
- 2G3: Stoccaggio o processi che coinvolgono sostanze solide.
- 2H: Fenomeni di corrosione e/o erosione dei materiali.
- 2I: Perdite, Giunti, imballaggi e giunti flessibili.
- 2J: Utilizzo di apparecchiature con presenza di fiamme libere.
- 2K: Apparecchiature per lo scambio di calore che utilizzano olio diatermico.
- 2L: Apparecchiature rotanti, tipo pompe, compressori, ecc.

A termine della determinazione di tutti i termini brevemente elencati, è possibile valutare il valore numerico dell'indice di rischio F&EI in assenza dei sistemi compensativi, attraverso l'equazione 2.14:

$$F\&EI = MF * F1 * F2 \quad (2.14)$$

Il F&EI ottenuto viene modificato dall'applicazione dei "Loss Control Credit Factors", che comprende l'analisi di tutti i sistemi di protezione e prevenzione attuati dall'azienda nell'unità analizzata. Questo indice viene valutato attraverso il prodotto di tre termini distinti:

$$C_{total} = C1 * C2 * C3 \quad (2.15)$$

dove:

- C1: Sistemi di controllo del processo.
- C2: Sistemi di confinamento delle sostanze.
- C3: Sistemi antincendio.

L'applicazione di tali fattori all'indice F&EI permette un abbassamento del valore numerico dello stesso, proporzionalmente al peso dei sistemi di protezione e prevenzione attuati, dove:

$$F\&EI \text{ con sistemi compensativi} = F\&EI * C_{total} \quad (2.16)$$

Tale procedimento, differenziandosi da tutti gli altri metodi indicizzati analizzati nel presente studio, permette di valutare non solo l'indice di rischio (F&EI), ma anche di definire gli indici relativi a:

- DF: Fattore di danno;
- RE: Raggio dell'Area di esposizione (feet);
- MPPD: Valore Massimo dei probabili danni materiali;
- MPDO: Numero massimo di giorni di interruzione del processo.

Nella realtà di questa analisi, si è deciso di tralasciare tutti i fattori inerenti ad una valutazione prettamente economica del potenziale danno che si potrebbe generare all'unità considerata, e soffermarsi al fattore che permette la determinazione dell'Area di esposizione al rischio di incendio o esplosione.

Tale Raggio (RE) rappresenta l'area contenente le apparecchiature e/o il personale, che può essere esposto alla potenziale formazione di un incendio o di un'esplosione, generato dall'unità logica principale. L'ampiezza di queste aree dipende direttamente dall'indice F&EI determinato, attraverso un fattore moltiplicativo costante (0,84) che restituisce un raggio in feet. È evidente come gli effetti di incendi e/o esplosione non si propagano attraverso delle aree perfettamente circolari in tutte le direzioni. L'entità dei danni dipende da numerosi fattori, come posizione degli elementi bersaglio, direzione del vento e sistemi di protezione presenti. Comunque, tali aree sono un buon punto di partenza per successive valutazioni.

Anche in questo caso si riporta la scala di rischio dei valori ottenuti attraverso la valutazione dell'indice, come in Tabella 2.4, sempre in funzione di una colorazione attribuita per meglio individuare la classe di rischio ottenuta per ogni unità.

Tabella 2.4: Classi di Rischio attraverso il F&EI.

Indice	Livello di rischio
>159	SEVERO
128÷158	ELEVATO
97÷127	INTERMEDIO
61÷96	MODERATO
1÷60	LEGGERO

2.1.4. The Mond Index

Per poter ampliare il raggio di applicazione dei metodi indicizzati, ad un maggior numero di azienda a rischio di incidente rilevante, è stato sviluppato da parte della società ICI, *Imperial Chemical Industries*, un metodo di analisi e valutazione preliminare del rischio, il The Mond Index, basato sul miglioramento e ampliamento del metodo proposto dalla DOW. Questo, in contrapposizione agli altri metodi proposti, analizza la possibilità di formazione di un incendio o esplosione, e solo in seguito valuta la possibilità degli effetti tossici, come una conseguenza indesiderata di un evento primario, intesa come un fattore penalizzante. Tale metodo è applicabile a tutte le aziende considerate a rischio di incidente rilevante, in particolar modo trova applicazione nell'industria chimica. La versione analizzata nel presente studio, si riferisce all'ultima versione presente sul mercato, redatta nel Marzo del 1985.

Questo metodo, come già detto, rappresenta la base sulla quale sono state emanate le linee guida e le direttive del Decreto del 31/03/1989-Allegato II [7] per una valutazione del livello di rischio dell'azienda divenuta obbligatoria in fase preliminare. L'analisi presenta delle differenze sostanziali rispetto al metodo Mond solo nella determinazione del peso da attribuire alla pericolosità della sostanza presa in esame per la definizione del Fattore Sostanza (B). Il D.P.C.M. del 31/03/1989 definisce il fattore sostanza come il valore numerico ottenuto dalla Tabella 2 del Decreto, o in assenza della sostanza presa in esame, esso può essere definito attraverso la NFPA Ranking 704 di Infiammabilità e Reattività delle sostanze, in maniera analoga da quanto disposto dal metodo DOW.

Il metodo della Mond richiede il calcolo dei fattori principali quali:

- B: Material Factor;
- M: Special Material Hazards;
- P: General Process Hazards;
- S: Special Process Hazards;
- Q: Quantity Hazards;
- L: Layout Hazards;
- T: Acute Health Hazards.

Il Material Factor nel metodo Mond, a differenza del Decreto prima citato, viene definito sulla base del tipo di sostanza e delle sue caratteristiche chimico/fisiche e di pericolosità. Il valore corrisponde ad una “*misura quantitativa di rilascio potenziale di energia della sostanza chiave per incendio o esplosione*”. Il valore deve essere riferito alla *sostanza chiave*, cioè quella sostanza che tra tutte quelle presenti nel sito porta ad ottenere una condizione di pericolo maggiore. Viene calcolato in funzione del tipo di sostanza, sia essa:

- Sostanza infiammabile;
- Miscela;
- Sostanza infiammabile in particolari condizioni;
- Sostanza con composizione non specificata;
- Combinazione reattiva di sostanze;
- Sostanze in grado di provocare esplosioni in fase condensata.

Il calcolo varia in base all'appartenenza della sostanza ad una delle categorie prima citate; ad esempio con riferimento ad una sostanza infiammabile viene determinato come:

$$B = 1,8 * \Delta H_c [kcal/g] \quad (2.17)$$

Dove B è espresso in Btu/lb.

In coda a questa prima valutazione delle sostanze, si definiscono dei termini aggiuntivi di stima delle stesse, definiti “Special Material Hazards”. Questa classe di penalità definisce l’analisi di tutti i pericoli aggiuntivi indotti dalle caratteristiche “speciali” delle sostanze, come:

- Sostanze ossidanti;
- Sostanze che sviluppano gas combustibile reagendo con acqua;
- Caratteristiche di formazione di miscele e di dispersione;
- Sostanze soggette a riscaldamento spontaneo;
- Sostanze che polimerizzano rapidamente e spontaneamente;
- Caratteristica di facilità di innesco della sostanza;
- Sostanze che presentano decomposizione esplosiva;
- Sostanze che possono dare detonazione gassosa;
- Proprietà esplosive della fase condensata;
- Altre proprietà pericolose delle sostanze.

In contrapposizione a quanto definito prima per il Fattore Sostanza, in questa sezione le penalità vengono attribuite anche se la sostanza non è quella chiave (si veda per presenza di perossidi), in funzione delle caratteristiche di pericolosità e delle quantità presenti nell’unità.

In aggiunta si ha valutazione dei pericoli generali indotti dal tipo di processo, sia esso di stoccaggio, di trasferimento o di reazioni chimico/fisiche. Questo avviene attraverso l’attribuzione delle varie penalità in “General Process Hazards”, che si distinguono in:

- Processi di movimentazione o variazione dello stato fisico della sostanza;
- Caratteristiche di reazione chimica;
- Reazioni di tipo Batch;
- Sviluppo di reazioni multiple;
- Trasferimento di sostanze;
- Tipi di Sistemi di trasferimento delle sostanze.

In “Special Process Hazards” l’analisi prende in esame i pericoli indotti dalla lavorazione delle sostanze alle varie condizioni di Temperatura e Pressione, i pericoli supplementari indotti dal processo in funzione delle caratteristiche di infiammabilità e reattività delle sostanze. Le penalità si suddividono in:

- Processi sottovuoto;
- Processi ad alta pressione;
- Processi ad alta o bassa temperatura;
- Formazione di fenomeni di corrosione ed erosione dei materiali;
- Formazione di perdite dagli imballaggi dei materiali;
- Processi che includono sistemi vibranti, ...
- Reazioni chimiche difficili da controllare;
- Operazioni all’interno del campo di infiammabilità delle sostanze;
- Processi che inducono pericoli di esplosione;
- Pericoli di esplosione di polveri;
- Presenza di forti ossidanti;
- Sensibilità all’innesco dei processi;
- Pericoli elettrostatici del processo.

Tutto ciò viene corredato da un'analisi della quantità delle sostanze utilizzate, assegnate in funzione di un pericolo aggiuntivo associato all'uso di una grande quantità di materiale combustibile, infiammabile, esplosivo o che si decompone. È effettuata un'analisi delle diverse caratteristiche di progettazione e disposizione dell'unità, identificando un tipo di proprietà che può introdurre un pericolo supplementare. Queste considerazioni permettono un ampliamento dell'analisi rispetto ai metodi prima definiti. Il fattore di rischio riferito al rilascio di materiale tossico proposte dal metodo è strettamente correlato ai valori limite di soglia TLV, non però in grado di definire un rischio reale in funzione della tossicità nelle condizioni di rilascio.

In ultimo si elencano i crediti riferiti ai fattori di compensazione presi in analisi dal metodo, in modo da valutare le azioni di protezione e prevenzione intraprese dall'azienda per l'unità considerata. Questi si suddividono in:

- K1: Sistemi di Contenimento;
- K2: Processi di Controllo;
- K3: Attitudine alla Sicurezza dell'azienda;
- K4: Sistemi attuati per la protezione dagli incendi;
- K5: Sistemiche permettono l'isolamento delle sostanze;
- K6: Sistemi attuati per la lotta contro gli incendi.

La valutazione viene eseguita in relazione all'ottemperanza dei requisiti minimi di legge nel momento dell'analisi. Il metodo, altresì definisce una serie di indici di rischio finale, con o senza sistemi compensativi, distinguendosi per una valutazione più complessa e che si differenzia in:

- D: Indice di Rischio Dow equivalente;
- F: Indice di Rischio Incendio;
- E: Indice di Rischio Esplosione Confinata;
- A: Indice di Rischio Esplosione Aerea;
- R: Indice di Rischio Generale dell'unità.

In aggiunta alla definizione degli indici di rischio, il metodo permette di determinare un Carico di Incendio, direttamente proporzionale al corrispettivo indice, definendo oltretutto una durata attesa dell'incendio, secondo le direttive indicate nel manuale del metodo preso in esame. Anche in quest'ultimo caso si riportano le correlazioni tra gli indici ottenuti e le relative classi di rischio e la colorazione identificativa come riportato in Tabella 2.5 e 2.6.

Tabella 2.5: Classi di Rischio Incendio ed Esplosione Confinata, The Mond Index.

MOND FIRE INDEX		MOND EXPLOSION INDEX	
<i>Indice</i>	<i>Classe Rischio Incendio</i>	<i>Indice</i>	<i>Classe rischio Esplosione Confinata.</i>
>250	MOLTO ESTREMO	>6	MOLTO ALTO
100 ÷ 250	ESTREMO	4 ÷ 6	ALTO
50 ÷ 100	INTENSIVO	2.5 ÷ 4	MODERATO
20 ÷ 50	MOLTO ALTO	1.5 ÷ 2.5	BASSO
10 ÷ 20	ALTO	0 ÷ 1.5	LEGGERO
5 ÷ 10	MODERATO		
2 ÷ 5	BASSO		
0 ÷ 2	LEGGERO		

Tabella 2.6: Classi di Rischio Esplosione Aerea e Rischio Generale dell'unità, The Mond Index.

AERIAL EXPLOSION INDEX		MOND OVERALL INDEX	
Indice	Classe Rischio Esplosione Aerea	Indice	Classe Rischio Generale
>1700	ESTREMO	>65000	MOLTO ESTREMO
4000 ÷ 17000	MOLTO ALTO	12500 ÷ 65000	ESTREMO
100 ÷ 4000	ALTO	2500 ÷ 12500	MOLTO ALTO
30 ÷ 100	MODERATO	1100 ÷ 2500	ALTO(CAT.2)
10 ÷ 30	BASSO	500 ÷ 1100	ALTO(CAT.1)
0 ÷ 10	LEGGERO	100 ÷ 500	MODERATO
		20 ÷ 100	BASSO
		0 ÷ 20	LIEVE

3. Descrizione dei differenti casi studio

In questo lavoro si è deciso di applicare tutti i metodi indicizzati descritti nel precedente capitolo in tre differenti casi studio di incidenti rilevanti verificatisi nella realtà italiana. La valutazione sommaria di tutti gli aspetti inerenti agli incidenti è stata effettuata traendo spunto dalle relazioni tecniche a disposizione prodotte dai vari Consulenti Tecnici nominati dai Pubblici Ministeri e da altre fonti reperite che verranno citate all'interno della descrizione di questi. Spesso quindi si farà riferimento alle Consulenze Tecniche prodotte dall' Ing. Luca Marmo. Queste hanno permesso di avere una visione più dettagliata dei luoghi presi in esame e dei fatti verificatisi.

Le differenti valutazioni sono state effettuate rimanendo quanto più fedeli possibile alle descrizioni riportate nelle varie Consulenze Tecniche. In questo capitolo si effettuerà una descrizione alquanto sommaria delle varie dinamiche di incidente nei tre diversi casi, riportando non solo le dinamiche dell'evento ma anche una descrizione degli aspetti inerenti alle eventuali carenze delle aziende dal punto di vista legislativo nel rispetto della normativa vigente in tema di sicurezza.

3.1. *Esplosione avvenuta presso la Carmagnani Piemonte S.p.A.*

La descrizione della dinamica dell'incidente verificatosi nel locale di infustamento dei prodotti infiammabili della Carmagnani Piemonte S.p.A. sita in Grugliasco (TO), è basata sulle informazioni contenute nella Consulenza Tecnica [13] dell'Ing. Luca Marmo per la Procura della Repubblica presso il Tribunale di Torino. Si definisce che *“durante lo scolo della linea d'infustamento, si è avuto l'innesco dei vapori all'interno del fusto in lavorazione che ne ha provocato l'esplosione”*. L'esplosione quindi è avvenuta all'interno di un fusto di 200 litri, adibito allo stoccaggio e trasporto di sostanze infiammabili, per la precisione Acetato di n-butile, che ha generato la rottura del fondo del fusto. Dalle analisi dello stato dei danni si evince come la quantità responsabile dell'incidente sia all'incirca di 20-30 litri di prodotto, corrispondente all'incirca con quella di scolo della linea. L'innesco che ha provocato l'accensione dell'atmosfera esplosiva, venuta a generarsi, è stato identificato nella generazione di scariche elettrostatiche sviluppate durante la fase di travaso della sostanza. Queste si sono generate a causa della cattiva manutenzione o mal funzionamento della pinza di messa a terra da utilizzare durante queste fasi, con l'aggiunta della non continuità elettrica della rulliera su cui era disposto il fusto con le altre apparecchiature o verso terra. A tutto ciò si aggiungono considerazioni sulla presenza di verniciatura sul bordo del fusto su cui si doveva agganciare la pinza, che ha indotto una diminuzione notevole della continuità elettrica. Oltre alla formazione di un'esplosione, che ha portato alla morte dell'operatore, si è generato un piccolo incendio causato dalla quantità di liquido sversato durante l'evento primario verificatosi. Nella realtà del calcolo, è stata considerata la presenza reale di un serbatoio di stoccaggio da 1000 litri riferito all'unità contenente Acetato di n-butile. Vengono descritti gli impianti antincendio a spegnimento automatico presenti, la presenza di aspiratori in modo da eliminare atmosfere potenzialmente esplosive, la presenza di un impianto fisso di spegnimento ad acqua e un ulteriore impianto a schiuma a media espansione. Il locale in cui è avvenuto l'evento, è

classificato come area con possibile presenza di atmosfere esplosive “Zona 2” secondo le direttive ATEX, e vengono definite tutte le possibili sorgenti di emissione presenti.



Figura 3.1 Incrocio delle rulliere per il travaso più il fondello del fusto esplosivo.[13]

Nella Relazione Tecnica infine, si enuncia come “*i presidi di sicurezza contro l’accumulo di cariche elettrostatiche...non corrispondevano alla migliore tecnologia disponibile...e le pinze in uso non potevano pertanto garantire l’assoluta efficacia del presidio*” e anche che “*le precedenti verifiche di continuità elettrica erano state effettuate con la dovuta cadenza biennale e il risultato era sempre stato positivo*”. Dal punto di vista della gestione delle emergenze, si dichiara come, al momento dei fatti, la Carmagnani era in possesso del Documento di Valutazione dei rischi (DVR) ai sensi del D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81 e di un Piano di Emergenza Interno in adempimento al D. Lgs. 105/2015 (SEVESO III) [2] in cui vengono definite le Istruzioni per le emergenze. Vengono riportate anche il numero e la frequenza delle esercitazioni interne svolte da parte del personale dell’azienda.

3.2. Esplosione avvenuta presso la DARKEM SRL di Scarmagno

Anche in questo caso, la descrizione della dinamica dell’incidente verificatosi nel capannone di stoccaggio di Darkem sito in Scarmagno, via Masero 31, è stata eseguita basandosi sulla Consulenza Tecnica dell’Ing. Luca Marmo per la Procura della Repubblica presso il Tribunale ordinario di Ivrea [14]. Di seguito si riporta una breve descrizione, in cui sono stati inseriti gli aspetti più importanti ai fini della valutazione con i metodi indicizzati proposti. Dall’analisi delle perizie tecniche, si deduce che nel capannone di stoccaggio di sostanze chimiche solide si è venuto a generare un incendio iniziale, seguito da più violente detonazioni. Queste hanno portato al cedimento strutturale del capannone di stoccaggio (come si nota in Figura 3.1) e al ferimento di diversi Vigili del Fuoco che erano intervenuti per domare l’incendio iniziale.



Figura 3.1: Effetti della detonazione delle sostanze presenti nel capannone Darkem.[14]

Come dichiarato nella Consulenza Tecnica, l'incendio primario *“ha generato condizioni termiche severe a carico dei molti agenti chimici presenti nel capannone, ... per effetto dell'irraggiamento termico provocato dalle fiamme direttamente sugli agenti chimici, tra cui numerosi combustibili”*. Si sono sviluppati quindi fenomeni di irraggiamento diretto sulle diverse sostanze solide presenti, tra le quali Solfato di Idrossilammina, Clorato e Perclorato di Potassio, che hanno indotto di conseguenza una detonazione esplosiva generata a causa della loro decomposizione chimica la quale ha prodotto sostanze esplosive.

È stato dedotto come la causa dell'innescò sia di tipo accidentale, ma imputata ad un inadeguato stato di stoccaggio e manipolazione delle sostanze chimiche solide attuato dall'azienda, sotto forma di pacchetti con pesi differenti. Dal punto di vista dei quantitativi, secondo le dichiarazioni riportate nel documento di Consulenza Tecnica, non vi era evidenza di superamenti dei valori di soglia delle sostanze pericolose, secondo quanto disposto dal D. Lgs. 105/2015 Allegato 1 Parte 1, anche se spesso la quantità era molto prossima a tali limiti di soglia.

Dal punto di vista della documentazione necessaria, la Darkem non possedeva un Piano di Emergenza Interno al momento dell'evento, fatto che ha precluso la gestione ottimale della situazione di emergenza. Non possedeva neanche un Certificato di Prevenzione Incendi, necessario per le attività svolte. Tutto ciò è stato amplificato dalla politica di stoccaggio delle sostanze attuata dall'azienda, la quale disponeva sostanze con classe di stoccaggio completamente differente, non in conformità a quanto dichiarato nella sezione 7 delle Schede di Sicurezza delle diverse sostanze presenti, intitolata *“Manipolazione e Immagazzinamento”*. Nel deposito si nota, sempre dalla Relazione tecnica, l'assenza di un sistema di prevenzione della propagazione delle fiamme, come sistemi di compartimentazione, pareti tagliafuoco o di impianto sprinkler che avrebbero quantomeno limitato l'entità dell'evento verificatosi. L'esplosione generata, può essere ritenuta la normale conseguenza anche della sottovalutazione delle caratteristiche di decomposizione di sostanze stabili a temperatura ambiente, come il Solfato di Idrossilammina, ma che già a temperature intorno ai 170-180°C sono in grado di decomporsi e dare origine a delle vere detonazioni massive, con energie simili a quelle di TNT.

3.3. Incendio sviluppato nello stabilimento Thyssen-Krupp di Torino

La descrizione si riferisce all'incendio che si è sviluppato nel Dicembre 2007 nello stabilimento industriale di proprietà Thyssen-Krupp sito in Torino, presso la raddrizzatrice dell'Aspo 2 della Linea 5 di ricottura e decapaggio per nastri di acciaio inossidabile provenienti dalla laminazione a freddo. Le informazioni riportate derivano dall'esame delle diverse Consulenze Tecniche prodotte da L. Fiorentini, L. Marmo, U. Allamano e N. Piccinini per la Procura della Repubblica presso il Tribunale di Torino.



Figura 3.1: Vista d'insieme dell'area della Linea 5 colpita dalle fiamme. [15]

L'evento corrisponde ad un incendio di durata abbastanza breve, ma che fu estremamente violento, generando un Jet Fire di notevole entità. L'innescò si può ricondurre a scintille meccaniche sviluppate dallo sfregamento del nastro contro la struttura metallica della cesoia dell'Aspo o dallo sfregamento del nastro contro la carta accumulatasi sulla struttura metallica che sostiene la medesima cesoia. Si è generato un primo focolaio causato dalla presenza di carta di protezione che viene rimossa dai fogli per la laminazione, accumulatasi a terra. A ciò si è aggiunta la presenza di una pozza di liquido, originata dagli sgocciolamenti di olio di laminazione dai fogli di acciaio processati, formatasi in un supporto con profilato in acciaio a "doppio T", della raddrizzatrice dell'Aspo 2. Questi oli di laminazione presentano Temperature di Flash Point comprese tra i 125 e i 175°C. La movimentazione del sistema di laminazione è garantita prevalentemente dalla presenza di due sistemi idraulici (tipo A e tipo B), che lavorano alla pressione di 140 bar il primo e di 70 bar l'altro. Tali sistemi idraulici presenti sulla linea 5 funzionano utilizzando dell'olio idraulico di varie marche con Temperature di Flash Point che variano tra i 200 e i 225°C. La violenza dell'incendio è generata da *"un primo collasso di un flessibile del circuito idraulico ad altissima pressione, a cui segue il collasso di altri, che permettono la nebulizzazione e lo spandimento di grandi quantità di olio sino a che le pompe della centralina idraulica non si arrestano, a causa dell'intervento dell'allarme di livello minimo nella vasca di accumulo. Danni sensibili si sono avuti alle linee e quadri elettrici, mentre i danni alla struttura portante e ai macchinari sono meno gravi"*. [15]

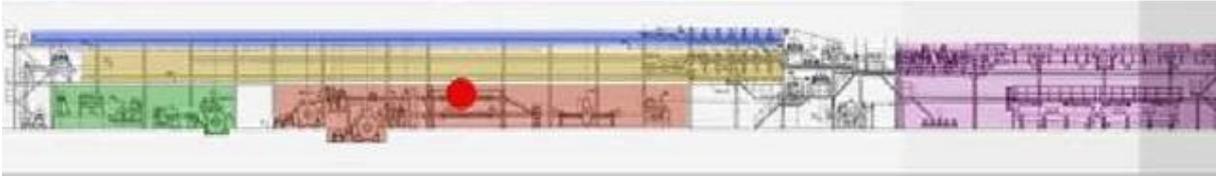


Figura 3.2: Vista di insieme della Linea 5. Il punto Rosso indica dove si è verificato l'incendio. [15]

La quantità di olio sversato, corrisponde a quella contenuta all'interno del serbatoio di raccolta dello stesso, prima dell'attivazione dell'allarme di basso livello e l'arresto dei circuiti oleodinamici. Ai fini del calcolo con i metodi indicizzati, si è deciso di utilizzare come sostanza rappresentativa delle diverse tipologie di olii di laminazione, il n-nonadecano, idrocarburo solido a temperatura ambiente, ma che presenta caratteristiche molto simili agli oli nelle condizioni di lavorazione, in maniera totalmente simile a quanto fatto da L. Fiorentini nella simulazione dell'evento con codici di calcolo numerici.[16]

Dal punto di vista della sicurezza dell'impianto si deduce dalle conclusioni della relazione tecnica di consulenza di Marmo [15] che la valutazione del rischio incendio della Linea 5, contenuta nel Documento di Valutazione dei Rischi (DVR), non era adeguata, nonostante vi fosse evidenza degli elementi che costituivano un elevato rischio nel reparto. Tale carenza ha comportato come conseguenza l'assenza di proporzionati sistemi fissi di rilevazione e spegnimento incendio nell'area interessata dall'evento. La presenza di attrezzature antincendio manuali, estintori portatili e carrellati, idranti e naspì antincendio non è da ritenersi sufficiente. In aggiunta, gli estintori portatili presenti non erano adeguati per intervenire nel domare l'incendio verificato, in quanto parzialmente o completamente vuoti. Tutto ciò è stato constatato nonostante la Linea 5 sia stata soggetta a frequenti incendi come riferito dai testi e testimoniato dalla frequenza delle ricariche degli estintori. Si nota, sempre dalla stessa Relazione Tecnica, come *“anche alla luce degli eventi incendiari pregressi... che rendevano evidenti i rischi specifici, questi continuassero ad essere trascurati dal Datore di Lavoro perché nessuna consistente revisione della valutazione del rischio incendio pare essere stata effettuata dai tempi della sua prima stesura”*.

Un ulteriore aspetto che avrebbe potuto evitare la formazione dell'evento incidentale è la carenza di un dispositivo di centratura automatico del nastro nella zona di ingresso, che avrebbe portato all'allineamento del foglio di acciaio da laminare con la sezione di lavoro, evitando quindi la formazione di scintille meccaniche.

Il livello di pulizia che si riscontrava all'interno del reparto non era adeguato, fatto che ha causato inevitabilmente l'accumulo di sostanze combustibili che hanno funto da sistema di propagazione iniziale delle fiamme, come carta di laminazione intrisa di olii vari nella parte bassa della linea e per terra. Si deduce anche come buona parte del personale fosse poco esperto, data la continua sostituzione del personale incaricato al reparto, e soprattutto non adeguatamente formato sulle procedure da intraprendere in caso di incendio, come disposto dal Piano di Emergenza Interna. Lo stesso era carente dal punto di vista delle considerazioni dei vari scenari incidentali possibili, in quanto non prevedeva la messa in sicurezza dei circuiti oleodinamici della Linea 5 in caso d'incendio o per il loro arresto. Fatto rilevante ai fini della sicurezza dell'impianto, era l'inadeguatezza del pannello di controllo dello stesso, e

principalmente la non conformità a normativa vigente (UNI EN 418, EN 13850) del pulsante di arresto di emergenza della linea, che non presentava le caratteristiche necessarie.

4. Applicazione dei metodi indicizzati ai casi studio

In questo capitolo, si propone al lettore l'applicazione dei metodi indicizzati per la valutazione del rischio, presentati nel Capitolo 2, ai tre diversi casi studio di incidenti industriali realmente avvenuti. L'obiettivo che ci si è posti è quello di illustrare tutte le scelte fatte nella compilazione dei quattro metodi utilizzati e delle ipotesi che sono state necessarie al fine di identificare l'indice di rischio finale e verificare se la classe di rischio corrispondente ottenuta avrebbe, in qualche modo, indotto il Datore di Lavoro ad attuare nuove procedure per aumentare il senso di sicurezza all'interno dell'unità presa in esame.

Questo lavoro ha permesso di evidenziare le problematiche generate nella fase di applicazione dei metodi, indotte spesso da un non facile adattamento degli stessi ai vari casi studio. Di seguito, si riporteranno i valori finali degli indici di Risk Assessment di tutti i casi analizzati e si cercherà di indicare, per ogni indice ottenuto, quali sono state le approssimazioni fatte. Per la visione della completa analisi di rischio preliminare, si rimanda agli Allegati 1, 2 e 3.

4.1. Carmagnani S.p.A.

L'esplosione, avvenuta presso il locale di infustamento della Carmagnani Piemonte S.p.A., è stata analizzata attraverso i metodi di risk assessment. In fase preliminare, si è condotta una ricerca bibliografica riguardante lo studio dei dati riferiti all'Acetato di n-butile. Questa sostanza liquida presenta delle caratteristiche fisico-chimiche e di pericolosità riportate nell'Allegato 1, nel quale si indicano le fonti di origine di ogni singolo dato ricavato in letteratura.

Dopo la fase di individuazione dei dati della sostanza, si è resa necessaria la determinazione della Sovrappressione di Esplosione (P_{max}) generata dall'esplosione del fusto contenente l'acetato di n-butile. Le formule di origine empirica, ancora in uso nonostante l'avvento dei codici CFD (Computational Fluid Dynamic), consentono di valutare in maniera rapida la sovrappressione generata, a seguito di un'esplosione, o di dimensionare le superfici di sfogo. Una formula empirica è un'espressione di origine sperimentale che lega tra loro le grandezze più significative che convergono in quel determinato fenomeno. Il loro uso è tipico sia per scopi progettuali, quali determinazione di una "superficie di vent" di un reattore, sia per la determinazione della P_{max} intervenuta in un'esplosione confinata o semi confinata. Queste presentano un'espressione generale del tipo:

$$P = f(P_v, V, W, K, S_l) \quad (4.1)$$

Dove:

- P : sovrappressione generata dall'esplosione;
- P_v : sovrappressione di rottura dell'elemento di sfogo;
- V : volume del contenitore in cui ha luogo l'esplosione;
- W : massa per unità di superficie dell'elemento di sfogo;
- K : coefficiente di sfogo [adim];
- S_l : velocità laminare di combustione.

Tra i modelli più importanti rilevati in letteratura, ci si è serviti della legge empirica sviluppata da *Cubbage-Simmonds* [17], secondo l'equazione 4.2, 4.3 e 4.4:

$$P_1 = S_L * (0,45 * K * W + 2,6) / V^{1/3} \quad (4.2)$$

$$P_2 = 5,84 * S_L * K \quad (4.3)$$

$$P_m = P_1 + P_2 \quad (4.4)$$

Nella pratica di questo studio, si è ipotizzato seguendo la dinamica dell'evento, che il fondello potesse essere assimilato ad un elemento di sfogo, con un coefficiente di sfogo pari a uno. Con tali ipotesi si è ottenuto:

$$P_{max} = 6,19 \text{ bar}$$

4.1.1. Ramses 4 applicato al caso studio Carmagnani S.p.A.

Successivamente a questa fase preliminare di calcolo e ricerca in letteratura, si è potuto determinare il valore degli indici di risk assessment, valutati attraverso la metodologia Ramses 4, ottenendo una classe di pericolo Alto riferito alla sostanza in esame, come in Tabella 4.1:

Tabella 4.1: Indici di pericolo associato agli agenti chimici, secondo Ramses 4

Indice di pericolo associato agli agenti chimici			
Indice	Valore	Valore finale	Classe di Pericolo
IPe	5	5,625	Alto
IPt	5	5,625	Alto

Nella definizione del valore finale, non è stata assegnata nessuna penalità aggiuntiva, in funzione delle condizioni particolari in cui si viene a trovare la sostanza, secondo quanto imposto dalla metodologia Ramses 4. Nel calcolo, si è deciso di considerare la presenza di dati con valori derivanti da fonti diverse in letteratura, spesso senza la possibilità di confronto dei singoli dati. In ultimo, si è preso atto che almeno alcuni dei dati siano stati ricavati da misure sperimentali sull'agente considerato. L'indice di pericolo tossico, riferito all'agente, è stato assegnato in quanto ritenuto pertinente, secondo l'indice di NFPA Rating della sostanza (2).

La sorgente di emissione, che è stata presa in considerazione all'interno del calcolo, è quella riferita al volume interno del fusto. Ciò è strettamente correlato all'evento realmente avvenuto, in quanto secondo la relazione tecnica, “*si è avuto l'innescò dei vapori all'interno del fusto in lavorazione, che ne ha provocato l'esplosione*”. I valori degli indici di rischio per sorgente di emissione, passano dalla determinazione della distanza di danno teorica. Essa viene calcolata, in base alle direttive imposte dal metodo, in funzione della sovrappressione di esplosione, ottenendo:

Distanza di danno: 5,48 m.

Questa viene modificata dai fattori correttivi, presentati in precedenza nella descrizione del metodo, nel Capitolo 2. Tutto ciò porta all'assegnazione degli indici di rischio riportati in Tabella 4.3, sia per rischio diretto da esplosione sia per quello tossicologico indotto dall'esplosione stessa:

Tabella 4.2 indici di rischio per sorgente di emissione, secondo Ramses 4.

Indice di rischio per sorgente di emissione		
Indice	Valore	Classe di Rischio
IR_{E-SE}	5,925	Alto
IR_{T-SE}	4,762	Alto

Gli indici di rischio ottenuti definiscono direttamente, secondo il metodo, il programma degli interventi da attuare, che indica di “*effettuare azioni correttive indilazionabili*”, con i relativi dettagli sulle modalità di attuazione riportate nel manuale del metodo.

In fase conclusiva si è considerato che, all’interno o nelle prossimità dell’unità di infustamento prodotti, il numero di personale presente era relativamente basso, fatto che ha limitato il numero di infortunati (pari ad un solo operatore deceduto). Il personale coinvolto però, durante le normali fasi di lavorazione è spesso in prossimità del confine del volume esplosivo, fatto ricavato dall’analisi del Documento di Valutazione dei Rischi presente. Queste e altre considerazioni, riportate in Allegato 1, hanno prodotto i valori di indici di rischio per mansione riportati in Tabella 4.3.

Tabella 4.3: Indici di rischio per mansione, secondo Ramses 4.

Indice di rischio per mansione		
Indice	Valore	Classe di Rischio
IR_{E-M}	5,625	Alto
IR_{T-M}	4,462	Alto

4.1.2. SW&HI applicato al caso studio Carmagnani S.p.A.

Come riferito nella descrizione dei casi studio, riportata nel Capitolo 3, si è deciso di soffermarsi sul pericolo generale dell’intera unità di infustamento dei prodotti. Per fare ciò, lo studio attraverso il metodo SW&HI è stato condotto focalizzando l’attenzione sulla presenza del serbatoio generale, con volume pari a 1000 litri, presente nel reparto. In Tabella 4.5 si riportano le informazioni utili ai fini dell’applicazione del metodo sopra citato.

Tabella 4.4: Lista di informazioni utili ai fini dell’applicazione di SW&HI.

Simbolo	Proprietà	Valore
M	Portata pompa alimentazione (kg/s)	2,2
H_c	Calore di combustione (kJ/mol)	3547526,4
K	Costante	3,148
PP	Pressione (kPa)	100
V	Volume (m ³)	1
VP	Tensione vapore (kPa)	1,5
T	Temperatura °C	20
AP	Pressione atm. (kPa)	101,325
t	Tempo emissione 1000 litri (sec)	400
m	Massa sostanza kg	881

L'applicazione del metodo al caso studio parte dalla determinazione del tipo di unità, presa in esame. In questa fase, l'unità considerata è quella riferita allo stoccaggio di prodotti. In base al calcolo dei fattori energetici e all'attribuzione delle penalità, secondo quanto riportato nel manuale del metodo, si ottiene:

$$\text{Hazard Potential} = 665078,87$$

$$B1 = 415,5$$

Successivamente, i fattori di credito vengono attribuiti in base alle caratteristiche dei sistemi di protezione e prevenzione presenti nell'unità, e ad altri fattori riferiti alle documentazioni esistenti. In questa realtà si evince come venga attuata una buona politica nel campo della sicurezza. Questa affermazione viene fatta data la presenza di un Documento di Valutazione dei Rischi e di un Piano di Emergenza Interna redatto da Carmagnani Piemonte S.p.A.. Questi testimoniano che l'azienda obblighi il personale a svolgere una prova antincendio con cadenza semestrale e a svolgere delle riunioni aziendali a tema sicurezza nello stabilimento. Al contrario, si può affermare come non vi sia stata una buona manutenzione della strumentazione in uso all'interno dell'unità, in quanto il malfunzionamento della pinza per la messa a terra elettrica del fusto soggetto a travaso sia stata una delle cause principali che ha prodotto un evento esplosivo. Una buona politica di manutenzione e sostituzione delle attrezzature non funzionanti avrebbe, forse, evitato l'evento incidentale generato. Queste informazioni, definiscono un elevato valore di indice (A) riferito ai fattori mitigativi:

$$A = 87,71$$

Il valore finale di indice ottenuto è determinato esclusivamente in funzione di B1 e di A, tralasciando il valore di B2 (indice di pericolo tossico) in quanto non ritenuto pertinente ai fini della valutazione intrapresa in questo studio.

Tabella 4.5: SW&HI con relativa classe di rischio

SW&HI: Safety Weighted Hazard Index	
Indice	4,737
Classe di Rischio	Moderato

4.1.3. F&EI applicato al caso studio di Carmagnani S.p.A.

Il valore di Material Factor, viene attribuito all'Acetato di n-butile attraverso l'Appendice A del manuale. Questo dipende direttamente dai valori di NFPA Rating della sostanza, definendo un MF=16. In Tabella 4.6 si riportano le penalità principali attribuite in relazione al caso studio di Carmagnani, ed eventuali ipotesi o considerazioni fatte ai fini di ottenimento di un risultato plausibile sono presenti in Allegato 2.

Tabella 4.6: penalità attribuite secondo F&EI.

Simbolo	Descrizione penalità	Valore
MF	Material Factor	16,00
F1	General Process Hazards Factor	3,35
F2	Special Process Hazards Factor	2,36
F&EI	Fire and Explosion Index	126,50

Il valore di Indice di Rischio finale ottenuto è stato modificato attraverso l'applicazione dei tre fattori di credito generali.

Tabella 4.8: indice di Rischio F&EI modificato con l'applicazione dei fattori di credito.

Simbolo	Descrizione Credito	Valore
C1	Process control credit factor	0,824
C2	Material isolation credit factor	0,96
C3	Fire protection credit factor	0,787
SW&HI*C	Fire and Explosion Index*Credit Factor	78,84

Si nota subito come l'applicazione dei fattori di credito, riferiti al metodo F&EI, porti alla diminuzione dell'indice di rischio dell'unità analizzata, passando da una classe di rischio Intermedio-Alto ad una classe di rischio Moderato, come da Tabella 2.4.

4.1.4. The Mond Index applicato al caso studio di Carmagnani S.p.A.

Il valore di Material Factor (B) viene determinato come da manuale attraverso il Calore di Combustione della sostanza. Questo si discosta da quello ottenuto attraverso le indicazioni del F&EI. L'attribuzione delle penalità e relative considerazioni, effettuate secondo le direttive imposte dal manuale del metodo, portano alla definizione degli indici di rischio della Tabella 4.9. Per una visione più dettagliata del calcolo si rimanda all' Allegato 1.

Tabella 4.9: Indici di Rischio secondo The Mond Index.

Simbolo	Descrizione Indici	Valore
D	Equivalent Dow Index	554,05
F	Fire Index	2152
E	Internal Explosion Index	8,6
A	Aerial Explosion Index	0,69
R	Overall Risk Rating	1721,68

I valori di Indice di Rischio ottenuti con l'applicazione delle penalità vengono modificati, anche in questo caso, attraverso l'attribuzione dei fattori di credito, determinati per l'unità in analisi.

Tabella 4.10: Indici di Rischio con applicazione dei Fattori di Credito attribuiti secondo The Mond Index.

Simbolo	Descrizione Indici	Valore
O-F	Offset Fire Index	0,79
O-E	Offset Internal Explosion Index	3,4
O-A	Offset Aerial Explosion Index	0,22
O-R	Offset Overall Risk Rating	246,72

Come si nota in Tabella 4.11 tutti i valori degli Indici di Rischio hanno subito una sostanziale diminuzione, e questo ha indotto consequenzialmente, un abbassamento delle relative Classi di Rischio per quasi tutti gli indici ottenuti.

Tabella 4.11: Variazione della Classe di Rischio

<i>Indice di Rischio</i>	<i>Classe Di Rischio iniziale</i>	<i>Classe di Rischio con fattori compensativi</i>
F	Basso	Leggero
E	Molto Alto	Moderato
A	Leggero	Leggero
R	Alto Cat.1	Moderato

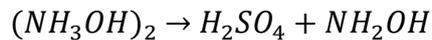
4.2. Darkem Srl

Nell'analisi del caso studio, riferito all'esplosione avvenuta nel capannone di Darkem Srl, si è resa necessaria una scelta della/e sostanza/e che hanno generato l'esplosione. Tra tutte le sostanze solide presenti ci si è soffermati sulle proprietà di pericolosità di tre sostanze in particolare, in linea a quanto indicato nella Consulenza Tecnica di L. Marmo[14]:

- Solfato di idrossilammina;
- Clorato di Potassio;
- Perclorato di Potassio.

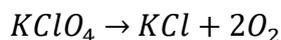
La scelta è stata dettata sia in base ai quantitativi di sostanze presenti sia dal fatto che le sostanze prima citate siano da ritenersi dei forti ossidanti e con caratteristiche di decomposizione spontanea, se soggette a un non elevato riscaldamento. A tutto ciò si aggiunge la definizione delle diverse Classi di Stoccaggio, che per le sostanze riportate era completamente incompatibile con il materiale combustibile presente, quali lignite o PolietilenGlicole (PEG).

Analizzando la capacità di reagire delle tre sostanze, si nota come il Solfato di Idrossilammina si decompone secondo la reazione:



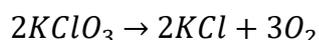
con reazione di decomposizione fortemente esotermica, che avviene a Temperature prossime a 170°C. L'Idrossilammina, ottenuta come prodotto di reazione di decomposizione, presenta delle spiccate caratteristiche esplosive, ampiamente documentate, che possono aver generato la detonazione principale all'interno del capannone.

Il Perclorato di Potassio reagisce come:



La particolarità di questa reazione è che avviene al di sopra dei 610°C fornendo ossigeno, fattore che determina elevate caratteristiche di comburente della sostanza.

In ultima fase, osservando la decomposizione del Clorato di Potassio si nota come tale sostanza fonde a temperature minori rispetto al Perclorato corrispondente, prossime ai 356°C con caratteristiche simili di decomposizione:



A partire dalle proprietà appena evidenziate si può affermare, come riportato in Relazione Tecnica, che la sostanza che ha prodotto l'esplosione primaria sia il Solfato di Idrossilammina,

in quanto ha temperatura minore di decomposizione. Per questo nella compilazione dei metodi indicizzati si farà quasi sempre riferimento a questa come sostanza “chiave”, tranne quando diversamente indicato. Di questa, si riportano nelle Tabelle in Allegato 2, le informazioni principali, reperite in letteratura.

4.2.1. Ramses 4 applicato al caso studio Darkem Srl

È stato effettuato il calcolo riferendosi al Solfato di Idrossilammina ottenendo gli indici di rischio riportati in Tabella 4.12.

Tabella4.12: Indici di rischio associati agli agenti chimici, secondo Ramses 4.

Indice di rischio associato agli agenti chimici		
Indice	Valore	Valore finale
IPe	4,1	4,72
IPt	5	5,62

Nell'applicazione del metodo non si è inserita nessuna penalità riferita alla classificazione delle sostanze CLP (inerente alle frasi H). Questo perché le direttive di Ramses 4 indicano di considerare solo le sostanze con caratteristiche combustibili e/o infiammabili a temperatura ambiente, tralasciando tutto il resto. Per questo si è posto l'indice IPC1 nullo. Nella definizione del valore finale non è stata assegnata nessuna penalità aggiuntiva in funzione delle condizioni particolari, in cui si viene a trovare la sostanza, come la granulometria. Infatti il materiale solido si presentava in confezioni da 20-25 kg e l'esplosione che ne è scaturita è più assimilabile ad una detonazione massiva, simile a quella di TNT (Trinitrotoluene). In tutto ciò, certamente poco ha influito la dimensione granulometrica dell'eventuale polvere presente, rispetto alle caratteristiche esplosive delle sostanze sviluppate.

Come in precedenza è stata eseguita la stessa metodologia sulla ricerca dei dati, per cui spesso non si è avuta la possibilità di effettuare un confronto tra le varie fonti. L'indice di pericolo tossico riferito all'agente è stato assegnato in quanto ritenuto pertinente, secondo l'indice di NFPA Rating della sostanza (3).

La sorgente di emissione a cui si fa riferimento, può essere definita come il volume della postazione di stoccaggio della sostanza. Essendo che in Darkem si presentava un'evidente carenza di documentazione, non si hanno riferimenti in relazione alla Classificazione delle Aree ATEX. Questo fa sì che non si possa completare accuratamente la compilazione del metodo, ma bisogna effettuare delle ipotesi. Per questo si è deciso di ipotizzare una Zona ATEX 22, molto affine alla descrizione dell'unità presa in analisi.

Inoltre, si nota come il Solfato di Idrossilammina presenti una Sovrappressione di esplosione elevatissima (>103,4 bar), come rilevato da Cisneros e altri [18]. Ciò ha indotto sia un elevato indice di pericolo corrispondente sia un aumento del valore della distanza di danno calcolata attraverso le formule, riportate nel manuale del metodo, dalle quali si è ottenuto un raggio di circa 757 metri.

A questo, va aggiunta la carenza di documentazione obbligatoria (Piano Emergenza Interno, DVRI), e la pessima politica di gestione della sicurezza dell'unità attuata dall'azienda, fatti che hanno indotto un sostanziale aumento delle penalità attribuite, fino ad ottenere i valori riportati

in Tabella 4.13, in cui si nota l'elevato valore degli indici di rischio riferiti alla sorgente di emissione.

Tabella 4.13: Indici di Rischio riferiti alla sorgente di emissione, secondo Ramses 4.

Indice di rischio per sorgente di emissione		
Indice	Valore	Classe di Rischio
IR_{E-SE}	3,60	Medio
IR_{T-SE}	4,2	Alto

Nel calcolo degli indici finali di rischio, si fa riferimento alle dichiarazioni riportate all'interno della Consulenza Tecnica di L. Marmo, come da [14] in cui si denuncia una carenza di informazione sulla potenziale formazione delle atmosfere esplosive (ATEX) nei confronti del personale, a cui si aggiunge una totale mancanza di corsi di formazione in termini di sicurezza. In ultimo, una elevata mancanza di sistemi di prevenzione e protezione hanno indotto l'assegnazione di elevate penalità aggiuntive. Tutto ciò porta ad ottenere degli indici di rischio per mansione molto elevati, come riportato in Tabella 4.14, che tendono addirittura ad uscire fuori scala, rispetto ai valori riportati in Tabella 2.2.

Tabella 4.14: Indici di rischio per mansione, secondo Ramses 4.

Indice di rischio per mansione		
Indice	Valore	Classe di Rischio
IR_{E-M}	5,905	Alto
IR_{T-M}	6,504	Alto

Gli indici ottenuti e relative classi di rischio indicano, anche in questo caso, di *effettuare azioni correttive indilazionabili*". Per il calcolo completo del metodo si rimanda all'Allegato 2.

4.2.2. SW&HI applicato al caso studio Darkem Srl

Per ottenere una valutazione quanto più esaustiva possibile, il calcolo dell'indice di rischio attraverso il metodo SW&HI è stato condotto riferendosi sia al Solfato di Idrossilammina, sia al Clorato di Potassio. Ciò ha prodotto due indici di valore differente, in quanto fortemente dipendenti dal tipo di sostanza. In questo studio sono state riportate le informazioni principali del calcolo inerente il Solfato di Idrossilammina, in quanto si è ottenuto un indice di rischio superiore.

Anche in questo caso la sequenza di calcolo è quella legata ad una unità di stoccaggio, e si ottiene:

$$\text{Hazard Potential} = 836179,165$$

$$B1 = 448,4427$$

Il valore dell'indice di danno dovuto agli effetti diretti di incendio o esplosione (B1) viene modificato dai fattori di credito. In questo caso studio, i fattori di credito presentano un valore numerico molto basso. Questo è determinato dall'assenza della Documentazione obbligatoria e di tutti quei dispositivi necessari per la prevenzione e protezione. A ciò si aggiunge una totale

mancanza di una corretta politica di stoccaggio delle sostanze presenti. L'azione simultanea di tutti questi fattori determina:

$$A = 2,35$$

Essendo il valore numerico così basso, non è sufficiente a mitigare il valore di B1, e ciò implica, di conseguenza, come riportato in Tabella 4.15, un indice molto superiore rispetto alla soglia della classe di rischio massima.

Tabella 4.15: Indice di rischio SW&HI con classe di rischio corrispondente.

SW&HI: Safety Weighted Hazard Index	
Indice	190,64
Classe di Rischio	Estremo

4.2.3. F&EI applicato al caso studio Darkem Srl

La particolarità che si è riscontrata nell'applicazione del metodo di analisi prodotto dalla Dow, al caso studio Darkem Srl, risiede nella scelta della sostanza "principale". Se da un lato la scelta del Solfato di Idrossilammina rispecchia quanto riportato in Relazione Tecnica [14], dall'altro il Clorato di Potassio presenta dei valori di NFPA Rating superiori, che determinano un valore maggiore di MF.

- $MF_{\text{Solfato idrossilammina}} = 14$;
- $MF_{\text{Perclorato di Potassio}} = 24$;
- $MF_{\text{Clorato di potassio}} = 29$.

Dato che si è stato deciso di improntare questo tipo di analisi in modo conservativo, si è affrontata la valutazione degli indici di rischio con F&EI basandosi sul Clorato di Potassio. Inoltre il manuale tecnico del metodo consiglia di aumentare la classe di reattività secondo NFPA, se si è in presenza di un forte ossidante, quale il Clorato di Potassio. Queste considerazioni, combinate con l'attribuzione delle penalità come in Tabella 4.16, portano ad un innalzamento dell'indice finale, più realistico rispetto alla magnitudo dell'evento esaminato.

Tabella 4.16: valori ottenuti secondo F&EI.

Simbolo	Descrizione penalità	Valore
MF	Material Factor	29
F1	General Process Hazards Factor	1,20
F2	Special Process Hazards Factor	2,80
F&EI	Fire and Explosion Index	97,44

Di notevole interesse risulta il valore di penalità attribuito dal metodo alla possibilità che avvenga un'esplosione di polveri solide. Questa è direttamente proporzionale al valore di granulometria della polvere. In questa circostanza, non si parla appropriatamente di polveri, bensì, come già detto, di materiale solido stoccato in forma di pacchetti confezionati, fatto che ha indotto un basso valore della penalità (0,25).

Anche in questo caso l'indice ottenuto viene ridotto dal prodotto dei crediti assegnati. Come si evince dal valore finale di Tabella 4.17, il cambiamento del F&EI è molto piccolo e non

favorisce una diminuzione significativa del livello di rischio, che si mantiene tra le classi Intermedio e Moderato.

Tabella 4.17: Fattori di credito e F&EI finale.

Simbolo	Descrizione Credito	Valore
C1	Process control credit factor	1
C2	Material isolation credit factor	1
C3	Fire protection credit factor	0,865
SW&HI*C	Fire and Explosion Index*Credit Factor	84,29

Se invece si effettua la valutazione considerando come sostanza chiave il Solfato di Idrossilammina invece del Clorato di Potassio, il metodo definisce un indice finale pari a:

- $F&EI_{\text{Solfato Idrossilammina}} = 47,04$

Si nota come, oltre ad avere un sostanziale abbassamento di valore dell'indice di rischio finale, si abbia anche una diminuzione di ben due classi di rischio, passando da Intermedio a Leggero, che corrisponde alla classe di rischio più bassa tra quelle indicate dal metodo.

Dal valore finale ottenuto (97,44) si può ricavare direttamente la distanza di danno, ottenendo un raggio di 84 piedi (circa 25,6 metri). Il valore riscontrato è abbastanza basso e comunque poco rappresentativo della distanza reale di danno dell'evento realmente generato.

4.2.4. The Mond Index applicato al caso studio Darkem Srl

Anche nell'applicazione di questo metodo la scelta principale da affrontare è stata quella di indicare la "sostanza chiave" ai fini della valutazione del rischio. Seguendo le direttive imposte dal metodo, la sostanza principale è stata identificata nel Solfato di Idrossilammina, in quanto è "quella sostanza che può maggiormente essere responsabile di condizioni reali di pericolo". L'analisi viene condotta considerando il Solfato di Idrossilammina non come una "Normal Flammable Material" bensì come un "Marginally Flammable Material" in modo da tenere conto dell'effettiva pericolosità e infiammabilità della sostanza a condizioni di P e T diverse da quelle ambiente, come nel caso esaminato. Il valore di B che ne scaturisce è molto basso perché direttamente proporzionale al Calore di Decomposizione, ma viene compensato dall'attribuzione di penalità aggiuntive riferite alla capacità della sostanza di detonare e della presenza contemporanea di un forte ossidante aggiuntivo nella stessa unità.

L'attribuzione delle penalità e relative considerazioni, portano alla definizione degli indici di rischio della Tabella 4.18. Per una visione più dettagliata del calcolo si rimanda all' Allegato 2.

Tabella 4.18: indici di Rischio, secondo The Mond Index.

Simbolo	Descrizione Indici	Valore
D	Equivalent Dow Index	136
F	Fire Index	6,35
E	Internal Explosion Index	14,3
A	Aerial Explosion Index	9,82
R	Overall Risk Rating	3210,4

I valori di Indice di Rischio ottenuti con l'applicazione delle penalità, vengono modificati anche in questo caso attraverso l'attribuzione dei fattori di credito determinati per l'unità in analisi.

Tabella 4.19: Indici di Rischio con applicazione dei Fattori di Credito attribuiti secondo The Mond Index.

Simbolo	Descrizione Indici	Valore
O-F	Offset Fire Index	5
O-E	Offset Internal Explosion Index	11
O-A	Offset Aerial Explosion Index	7,56
O-R	Offset Overall Risk Rating	1849

Dai valori riportati in Tabella 4.19 e dalle Classi di Rischio di Tabella 4.20, si nota come l'applicazione dei fattori di credito, anche con questo metodo di calcolo, ha indotto una leggera diminuzione dei valori numerici, ma lasciando completamente inalterata in quasi tutti i casi la Classe di Rischio corrispondente, ad eccezione dell'indice Generale, che si mantiene comunque molto elevato. Ciò sta a testimoniare ancora una volta come le misure attuate dall'azienda per la protezione e prevenzione dell'unità siano da ritenersi inadeguate.

Tabella 4.20: Variazione della Classe di Rischio

Indice di Rischio	Classe Di Rischio iniziale	Classe di Rischio con fattori compensativi
F	Moderato	Moderato
E	Molto Alto	Molto Alto
A	Leggero	Leggero
R	Molto Alto	Alto Cat. 2

4.3. Thyssen-krupp Torino

L'approccio iniziale per la valutazione del rischio dello scenario, sviluppatosi nell'unità di produzione presso la raddrizzatrice dell'Aspo 2 della Linea 5, ha richiesto la scelta della sostanza chiave da impiegare per l'analisi. Le due sostanze imputabili sono l'olio di laminazione e gli olii del circuito idraulico. Il primo, con caratteristiche di pericolosità assimilabili a un kerosene, con la compartecipazione alla combustione della carta di protezione dei fogli di acciaio, ha generato l'incendio primario. Inoltre depositandosi nelle vasche formate dal tipo di profilato, in seguito ad innesco, ha generato un incendio da pozza che ha portato all'aumento della temperatura nelle prossimità dell'unità e un irraggiamento diretto verso i flessibili del circuito idraulico. In seguito alla rottura di questi ultimi, è avvenuto il rilascio di olio idraulico (ad elevata pressione) che nebulizzandosi ha provocato un jet-fire di notevole violenza. Il jet fire è la causa primaria della morte di quasi tutto il personale presente.

Visto che si è deciso di improntare una valutazione del rischio di tipo conservativo, si è scelta la sostanza che tra le due ha generato la situazione più gravosa. L'analisi è stata improntata sullo studio delle caratteristiche dei vari olii idraulici presenti nei due circuiti (circuito A e B). Data la presenza di olii industriali difficilmente analizzabili direttamente (alta difficoltà nel reperimento di dati attendibili), seguendo le indicazioni del lavoro svolto in [16], si è scelto di assimilare gli olii idraulici ad un alcano con caratteristiche chimico/fisiche e di pericolosità molto simili, il n-nonadecano.

Per la quantità riportate nell'Allegato 3 si è fatto riferimento al contenuto del serbatoio di raccolta dello stesso, prima dell'attivazione dell'allarme di basso livello e l'arresto dei circuiti oleodinamici, come disposto in [19]. Ai fini dell'analisi, è stato interessante comprendere se un olio idraulico in queste condizioni (alta Pressione) possa generare un'esplosione in ambiente confinato. Lees nel suo lavoro [20], fa riferimento ad un caso studio che prende in analisi un'esplosione di notevole entità generata dalla formazione di uno spray di olii idraulici sviluppata su una piattaforma offshore. Per determinare la velocità di fiamma dell'idrocarburo, si è dapprima stimata la Temperatura adiabatica (circa 2100°C) e poi successivamente in base al grafico in Figura 4.1, si ottiene approssimativamente ai fini del metodo, una velocità di fiamma di circa 0,5 m/s.

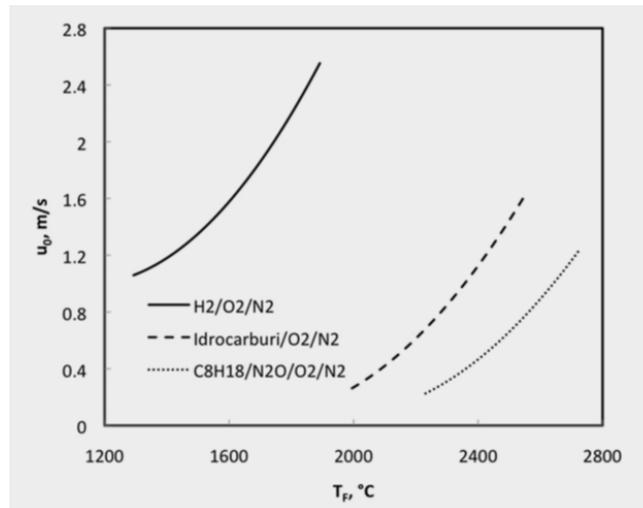


Figura 4.1: Velocità di fiamma in funzione della T. adiabatica, tratto da [21].

4.3.1. Ramses 4 applicato al caso studio Thyssen-krupp

Anche in questo caso studio sono stati applicati i 4 metodi per la valutazione del rischio indicizzato. Partendo dal metodo Ramses 4, si riscontra da subito in Tabella 4.21, che è di poca rilevanza il termine di pericolo riferito all'effetto tossico post esplosione della sostanza. Questo perché la stessa non presenta particolari problemi di tossicità per l'uomo, fatto testimoniato dal basso indice di NFPA Health (uguale a 1). Il valore di IPe, contiene al suo interno la valutazione della velocità di fiamma e di altri parametri di pericolosità della sostanza.

Tabella 4.21: Indici di pericolo della sostanza, secondo Ramses 4.

Indice di pericolo associato agli agenti chimici		
Indice	Valore	Valore finale
IPe	5,1	5,725
IPt	N.D.	N.D.

Nell'attribuzione degli indici al n-nonadecano, non è stata applicata nessuna particolare condizione tra quelle riportate dal metodo. Anche in questo caso, la raccolta dati ha coinvolto fonti diverse. Invece, alcuni dei dati utilizzati derivano da misure sperimentali.

La scelta della sorgente di emissione è ricaduta sui flessibili del sistema idraulico per la movimentazione dell'unità di laminazione, in cui scorreva l'olio idraulico analizzato, che hanno ceduto sotto irraggiamento diretto. Anche in questo caso, non vi era una classificazione dell'area ATEX, per questo si è ipotizzato una Zona 2, cioè secondo definizione un'area dove "non è probabile che sia presente un'atmosfera esplosiva, durante il funzionamento normale, e se ciò avviene, è possibile persista solo per brevi periodi."

Per la stima della distanza di danno, in assenza del valore di sovrappressione di esplosione essenziale ai fini del calcolo, si è considerata la lunghezza del getto del Jet Fire, con pressione dell'olio di 140 bar, determinata dai calcoli con simulazione numerica eseguiti da L. Fiorentini in [16]:

$$\text{Distanza di danno} = 33\text{m}$$

In aggiunta a ciò, è stata presa in considerazione la possibilità che si sviluppi un potenziale *effetto domino*, come da evento realmente accaduto. L'assenza dei sistemi di protezione e prevenzione, nonché le carenze dell'azienda documentate nel Capitolo 3, hanno portato ad ottenere gli indici di rischio per sorgente di emissione e per mansione dei lavoratori riportati in Tabella 4.22.

Tabella 4.22: Indice di Rischio per sorgente di emissione e per mansione, secondo Ramses 4.

Indice di rischio per sorgente di emissione e per mansione		
Indice	Valore	Classe di Rischio
<i>IR_{E-SE}</i>	<i>5,7203</i>	<i>Alto</i>
<i>IR_{E-M}</i>	<i>8,021</i>	<i>Alto</i>

4.3.2. SW&HI applicato al caso studio Thyssen-krupp

Il calcolo si riferisce solo al circuito idraulico di tipo A, quello con una pressione di esercizio di 140 bar, in quanto ci si è posti nella condizione più conservativa ai fini della valutazione. La temperatura di esercizio è stata valutata di circa 10°C superiore rispetto alla temperatura di solidificazione del n-nonadecano, pari a 32°C, in quanto comunque si operava ad una pressione elevatissima, che non avrebbe permesso la transizione di fase dell'olio.

Ai fini della valutazione con questo metodo è stata considerata la portata del circuito oleodinamico, di tipo A, pari a 3,86 kg/s. A differenza dei precedenti casi studio, il calcolo è stato riferito ad una "unità in cui si eseguono operazioni fisiche". Questo approccio denota un aumento del valore delle penalità rispetto alle unità di stoccaggio, specialmente se ci si riferisce all'innalzamento di Temperatura e Pressione. Queste, insieme ad altre penalità riportate in Allegato 3, definiscono i valori del pericolo potenziale con distanza di danno relativa:

$$\text{Hazard potential} = 8143,167$$

$$B = 95,7645$$

Il valore numerico dell'indice di danno potenziale per incendio ed esplosione, ai fini del calcolo, non è molto elevato, anzi è il valore nettamente più basso rispetto a tutti i casi studio presi in esame. Questo perché l'olio idraulico è di per sé una sostanza con Temp. di Flash Point più elevata e con una reattività praticamente nulla (NFPA reactivity Rating pari a zero). Si

ottengono quindi dei valori di fattori energetici e un indice di Hazard Potential relativamente bassi. In contrapposizione, è il valore di “A” che non è in grado di abbassare la misura dell’indice di danno:

$$A = 6,39$$

Questo deriva dalla sommatoria di tutte le problematiche nell’unità descritte nel Capitolo 3 che, invece di mitigare le potenzialità di danno, determinano un indice di rischio finale elevato, come riportato in Tabella 4.23.

Tabella 4.23: *Indice di rischio SW&HI con classe di rischio corrispondente.*

SW&HI: Safety Weighted Hazard Index	
Indice	14,9857
Classe di Rischio	Alto

4.3.3. F&EI applicato al caso studio Thyssen-krupp

Poiché il n-nonadecano non è tra le sostanze presenti nell’Appendice A del metodo, il suo MF è attribuito in funzione degli indici NFPA di infiammabilità e reattività. Essendo il Flash Point molto elevato (circa 170°C), si ha un valore di MF molto basso:

$$MF_{n\text{-nanadecano}} = 4$$

Questo MF, non viene modificato dalle condizioni operative (Pressione elevata), ma solo in relazione all’aumento della Temperatura di processo in relazione a quella di Flash Point della sostanza. A tutto ciò, si aggiungono le penalità attribuite secondo le direttive del metodo come riportato in Tabella 4.24:

Tabella 4.24: *Valori ottenuti secondo F&EI.*

Simbolo	Descrizione penalità	Valore
MF	Material Factor	4
F1	General Process Hazards Factor	1,55
F2	Special Process Hazards Factor	4,17
F&EI	Fire and Explosion Index	25,87

L’analisi dei risultati ottenuti evidenzia un valore delle penalità attribuite abbastanza elevato, definendo un fattore di processo complessivo piuttosto alto:

$$F = F1 * F2 = 6,47$$

Il valore elevato di F non porta tuttavia ad avere un alto indice di rischio finale, in funzione del valore di MF. L’applicazione dei fattori di credito nel calcolo non riesce né ad abbassare la classe di rischio dell’unità, la quale è già al valore minimo possibile (Leggero), né a modificare sensibilmente l’indice in sé, variato solo di poche unità decimali.

Tabella 4.25: Fattori di credito e F&EI finale.

Simbolo	Descrizione Credito	Valore
C1	Process control credit factor	0,947
C2	Material isolation credit factor	0,98
C3	Fire protection credit factor	1
SW&HI*C	Fire and Explosion Index*Credit Factor	24,015

4.3.4. The Mond Index applicato a Thyssen-krupp

Considerando il n-nonadecano come un “Normal Flammable Material” il fattore MF viene attribuito in funzione del suo calore di combustione. Questo, essendo il n-nonadecano un olio combustibile, è abbastanza elevato, circa 12661,5 kJ/mol. Di conseguenza il valore del Material Factor finale è 5 volte maggiore rispetto a quello definito con il precedente metodo.

$$MF_{n\text{-nanadecano}} = 20,275$$

A ciò si somma la penalità elevata che si attribuisce al processo, per la sua altissima pressione di esercizio (si consideri sempre il circuito idraulico tipo A, 140 bar). Di notevole rilevanza, ai fini della valutazione dell'indice di rischio incendio, è stata la definizione della “Working Area”. Si è considerato un circuito oleodinamico che si sviluppava per tutta la lunghezza della Linea 5, come approssimazione di partenza. Gli elementi del circuito quali pistoni, flessibili, ecc. avevano sezioni di passaggio differenti. Per questo, il diametro utilizzato ai fini del metodo è stato valutato come media tra diametro massimo e minimo (30 mm), su tutta la linea 5.

Queste, e altre considerazioni contenute nell'Allegato 3, hanno permesso di definire gli indici di rischio finale riportati in Tabella 4.26

Tabella 4.26: indici di Rischio, secondo The Mond Index.

Simbolo	Descrizione Indici	Valore
D	Equivalent Dow Index	201,7
F	Fire Index	0,91
E	Internal Explosion Index	4,92
A	Aerial Explosion Index	81,5
R	Overall Risk Rating	1915,9

Le carenze nel campo della sicurezza, precedentemente documentate, hanno indotto irrilevanti modifiche degli indici di rischio, riportati in Tabella 4.27, senza nessuna variazione delle corrispondenti classi. Attraverso il metodo, si è riusciti a valutare il credito relativo all'assenza di opportuni dispositivi di arresto di emergenza dell'impianto oleodinamico.

Tabella 4.27: Indici di Rischio con applicazione dei Fattori di Credito attribuiti secondo The Mond Index.

Simbolo	Descrizione Indici	Valore
O-F	Offset Fire Index	0,86
O-E	Offset Internal Explosion Index	4,4
O-A	Offset Aerial Explosion Index	69,3
O-R	Offset Overall Risk Rating	1626,7

È interessante, dal punto di vista qualitativo, confrontare il valore dell'Area di esposizione rispetto il valore della lunghezza del getto alimentato dal rilascio a 140 bar, determinato da L. Fiorentini nelle simulazioni con Phast professional © (33 m lungo la direzione del getto con il 100% di letalità), come da [16]. Il metodo proposto dalla Dow, data la sottostima della pericolosità della sostanza alla pressione di esercizio (MF molto basso), definisce un raggio di esposizione molto piccolo (circa 6,5 metri), rispetto a quello che si otterrebbe implementando lo stesso indice con il Material Factor, definito dal metodo della Mond ($MF \cong 21$). Il valore del raggio dell'Area di esposizione (circa 31 metri) in questo caso è molto simile rispetto quello di riferimento definito da L. Fiorentini. Se invece, si utilizzasse D (indice equivalente Dow):

$$D_{compensato} = 187,48$$

si otterrebbe un'area di esposizione con un raggio (circa 48 metri) simile alla lunghezza dell'ellisse con il 50 % di letalità del getto alimentato determinato da L. Fiorentini in [16]. Questo dimostra come l'errato utilizzo dell'indice della Dow, porta ad una sottostima rispetto all'area di esposizione reale di tutto il personale, nei pressi dell'unità.

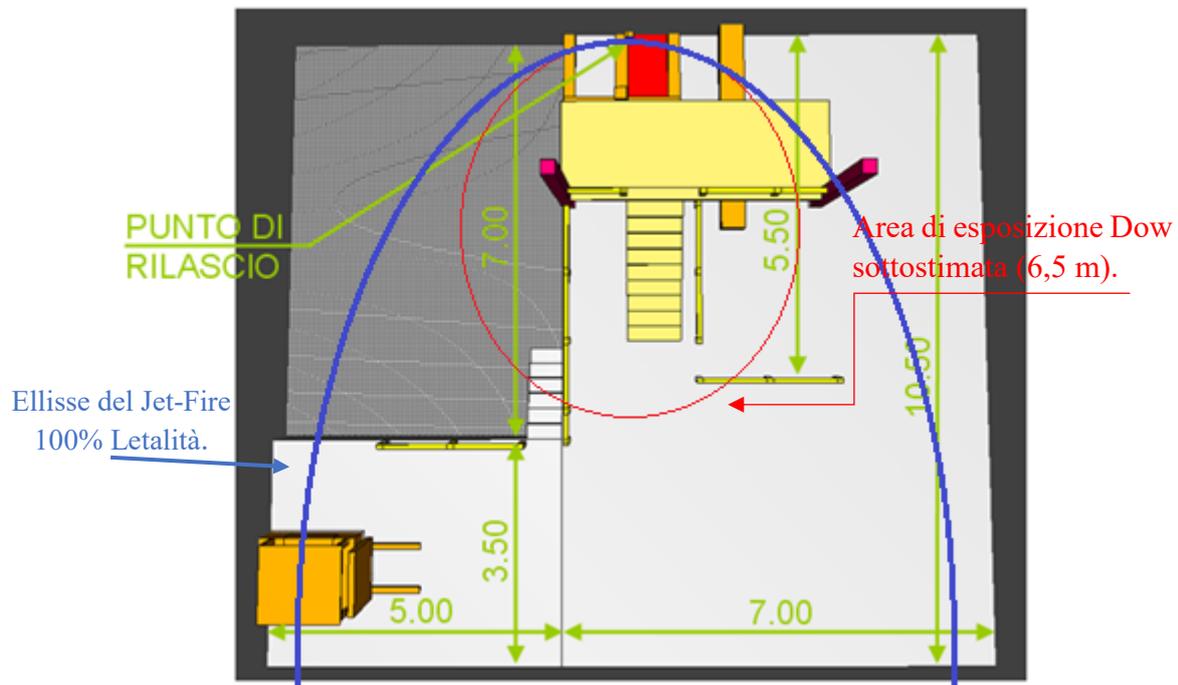


Figura 4.2: Vista generale in pianta degli elementi modellati del reparto, tratta dalla Relazione Tecnica di L. Fiorentini, con modifiche riferite all'Area di esposizione Dow sottostimata.

5. Verifica della qualità della valutazione del rischio in relazione al reale incidente

I risultati ottenuti dalle valutazioni effettuate su tutti e tre i casi studio, possono essere raggruppati in Tabella 5.1, in cui si fornisce al lettore una panoramica generale degli indici di rischio ottenuti. Per facilitare la lettura dei valori numerici, si è aggiunta una colorazione inerente ad ogni classe di rischio.

Tabella 5.1: riepilogo degli indici di rischio ottenuti nei tre casi studio.

	RAMSES			SW&HI	F&EI	F&EI Con fattori di Credito
	Pericolo Sostanza	Rischio s. emissione	Rischio Mansione			
<i>CARMAGNANI</i>	5,62	5,92	5,62	4,8	126,5	79
<i>DARKEM</i>	4,72	3,6	5,9	190,64	97,44	84,29
<i>THYSSEN-KRUPP</i>	5,72	5,72	8,02	14,99	25,870	24,01

	THE MOND INDEX			THE MOND INDEX CON FATTORI COMPENSATIVI		
	Incendio	Esplosione	Overall	Incendio	Esplosione	Overall
<i>CARMAGNANI</i>	2,15	8,6	1721,68	0,79	3,476	246,75
<i>DARKEM</i>	7,013	14,3	3366,23	5,53	11,00	1938,82
<i>THYSSEN-KRUPP</i>	0,913	4,92	1915,9	0,87	4,4	1626,73

Da un'analisi sommaria dei valori ottenuti, si può affermare come il metodo Ramses 4 sia probabilmente il più conservativo tra quelli proposti, con valori finali comunque sempre molto elevati. Il suo utilizzo, tuttavia permette di valutare solo il rischio di esplosione. In aggiunta, alcune scelte di valutazione hanno un elevato grado di soggettività e dipendono fortemente dall'esperienza dell'analista che le effettua.

SW&HI riporta una valutazione abbastanza realistica del rischio nei tre casi studio. Solo nel caso di Carmagnani, l'indice è più basso degli altri metodi. Tutto ciò deriva dalla bassa entità di esplosione, che è stata di modesta entità ed estensione, che però ha provocato conseguenze rilevanti (morte dell'operatore) a causa di fatali coincidenze dovute alla stretta vicinanza dell'operatore al fusto esplosivo. Si ha comunque una valutazione di rischio Basso-Moderato dell'unità analizzata.

Durante la valutazione si è osservato come il valore finale è altamente influenzato dai fattori compensativi di prevenzione e protezione (A), con un'incidenza maggiore rispetto agli altri metodi. Dai valori ricavati, risulta un valore dell'indice A nettamente superiore nel caso Carmagnani rispetto agli altri casi studio.

Tabella 5.2: Valore A dei tre casi studio a confronto.

<i>Caso Studio</i>	<i>Fattori Compensativi A</i>
<i>Carmagnani</i>	87,71
<i>Darkem</i>	2,35
<i>Thyssen-krupp (TO)</i>	6,39

I fattori che mitigano il rischio di incendio ed esplosione sono molto ben valutati dal metodo, rispecchiando abbastanza fedelmente la realtà. Infatti, sia in Darkem che Thyssen-krupp, il livello di importanza, dato ai sistemi di protezione e prevenzione è molto basso, o comunque minore di quasi un ordine di grandezza rispetto a Carmagnani, dove i presidi di protezione installati erano più adeguati al tipo di sostanze manipolate nel processo.

Al contrario, i valori del Fire and Explosion Damage Index (B), nei casi studio di Carmagnani e Darkem sono molto elevati e simili tra loro (maggiori di 400); mentre si è ottenuto un valore nettamente inferiore nel caso studio dello stabilimento di Torino della Thyssen-krupp (circa 96). Tutto ciò mette in risalto ancor di più come una migliore gestione delle emergenze e maggior presenza di sistemi di prevenzione e protezione nella linea dell'impianto dal rischio di incendio e esplosione, avrebbe prodotto un indice nettamente minore, e probabilmente avrebbe impedito l'accadimento di tutte le conseguenze catastrofiche. Quindi si può affermare come il metodo SW&HI, complessivamente, descriva molto fedelmente i tre casi studio e restituisca un valore di indice di rischio che corrisponde alla reale pericolosità dell'unità considerata.

Il metodo sviluppato dalla Dow, il F&EI, è risultato, il meno conservativo, restituendo dei valori degli indici relativamente più ridotti, con una valutazione del rischio che va da Leggero a Intermedio. La mitigazione dell'indice dovuta a i crediti per i sistemi di protezione, mitigazione, ecc., è maggiore nel caso studio di Carmagnani.

Si è osservato come l'applicazione sia maggiormente dipendente dal valore del Material Factor e quindi dalle caratteristiche della sostanza, rispetto a quanto non influiscano le caratteristiche dell'unità stessa. Nella compilazione del metodo per Darkem, è stata considerata come sostanza principale il Clorato di Potassio che ha restituito un valore finale dell'indice nella fascia di Rischio Elevato. Se si fosse utilizzata come sostanza principale il Solfato di idrossilammina, che ha effettivamente causato l'esplosione di notevole magnitudo, con MF=14, si sarebbe ottenuto un valore finale di F&EI appartenente alla fascia di pericolo Moderato, con una diminuzione di ben due fasce di rischio in maniera meno conservativa e poco realistica.

Allo stesso modo, nel caso studio di Thyssen-krupp, si è considerata come sostanza chiave un olio idraulico (come ad esempio il n-nonadecano), si ottiene un valore molto ridotto di MF (pari a 4), non realisticamente corrispondente alla reale pericolosità. Si nota infine, che la distanza di danno ottenuta in questo modo (circa 7 metri), è molto differente da quella determinata all'interno di [16] attraverso una simulazione CFD. Concludendo, nell'applicazione sui tre casi studio, si può affermare come il metodo sia poco conservativo e definisca delle Aree di esposizione che possono ritenersi sottostimate, rispetto alla loro reale estensione.

Infine, nell'utilizzo del The Mond Index, si è notato come il metodo è abbastanza rappresentativo degli scenari realisticamente verificatisi. Ad esempio, confrontando il valore di rischio esplosione, come riportato in Tabella 5.3 per i tre casi studio:

Tabella 5.3: confronto tra gli indici di esplosione dei tre casi studio, secondo The Mond Index.

Caso Studio	Indice Esplosione
<i>Carmagnani</i>	8,6
<i>Darkem</i>	14,3
<i>Thyssen-Krupp (TO)</i>	4,92

Il metodo restituisce come valore finale un indice inerente al rischio di incendio. Questo, spesso, ha un valore molto basso, e non rispecchia la realtà dei fatti, come nel caso Thyssen-krupp (formazione di un incendio da pozza e successivo jet fire). La valutazione del rischio in funzione del corrispettivo carico di incendio, è molto ottimistica e poco conservativa, quando nella realtà si è sviluppato un jet fire di notevole intensità. Il valore maggiore di rischio incendio si è riscontrato nel caso Darkem. Qui oltre ad avere una alta diversità di sostanze, si ha anche una elevata quantità delle stesse. Il fattore quantità, insieme alla superficie di lavoro, influenza direttamente il rischio incendio.

Confrontando questo metodo (Mond Index) con il F&EI, si nota come il primo risenta in maniera molto meno accentuata del tipo di sostanza considerata, ma al contrario è più influenzabile dalle condizioni operative generali.

Nel metodo Mond, si ha una forte incidenza del Calore di combustione della sostanza (ΔH_d) sui valori finali, tanto che se ad esempio si utilizzasse una sostanza con un valore del ΔH_d doppio, si otterrebbe un aumento generale di tutti gli indici, in particolare l'indice di Rischio Overall dell'unità in alcuni casi quadruplica, ma in generale aumenta notevolmente. Si noti, anche, come i crediti riferiti ai fattori compensativi influenzino maggiormente il valore finale rispetto al F&EI, facendo molto spesso variare fascia di rischio generale, con efficacia differente, a seconda del caso studio.

Per cercare di definire un indice di rischio generale dell'unità analizzata, che possa tenere conto degli indici ottenuti dai diversi metodi utilizzati, si sono riportati i valori ottenuti all'interno di 5 classi di rischio, così definite:

Tabella 5.4: Classi di rischio definite e rispettive colorazioni.

Classe di Rischio	Intervallo di Validità	Colore di riferimento
Leggero	0 ÷ 0,2	Verde chiaro
Basso	0,2 ÷ 0,4	Verde scuro
Moderato	0,4 ÷ 0,6	Giallo
Alto	0,6 ÷ 0,8	Arancione
Estremo	0,8 ÷ 1	Rosso

Il valore degli indici reali ottenuti attraverso i metodi, non presentano spesso un andamento lineare in relazione alla classe di rischio, per questo si è cercato di riportare il valore finale ottenuto all'interno delle classi fittizie, prima elencate, e uniformare il tutto in maniera proporzionale. L'obiettivo che ci si è posti è quello di definire quindi un indice di rischio medio per ogni caso studio.

Dato che il metodo Mond definisce quattro indici finali diversi, di questi si è deciso di utilizzare solo quello “Overall”. Questo (R), attraverso la formula di calcolo riportata nel manuale del metodo, contiene al suo interno anche riferimenti ai restanti indici individuati:

$$R = D * (1 + 0,2 * E * \sqrt{A * F}) \quad (6.1)$$

Dove:

- D: Indice equivalente DOW.
- E: Indice di esplosione interna.
- A: indice di esplosione aerea.
- F: indice di incendio.

L’aumento di questo indice non può essere approssimato ad una variazione lineare come fatto per gli altri metodi.

L’analisi ha definito i valori riportati in Figura 6.1, 6.2 e 6.3 (identificati dalle barre blu) dove, oltre ai vari risultati di ogni metodo, si è voluto identificare un indice medio di rischio generale dell’unità analizzata, dato dalla media degli indici finali.

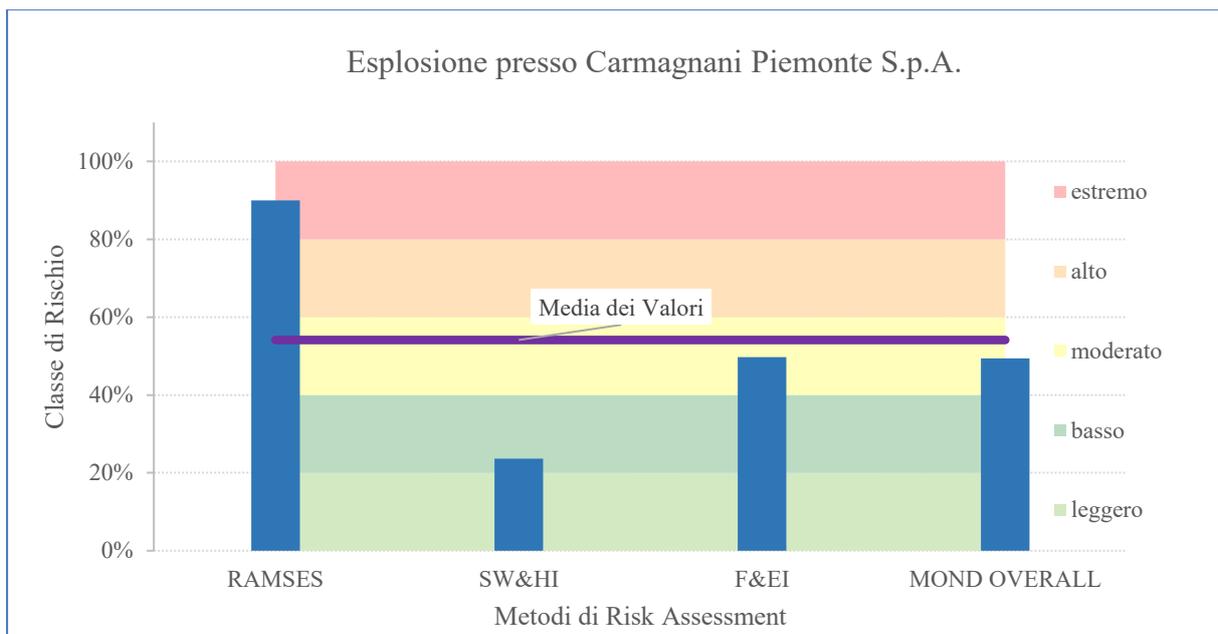


Figura 5.1 Indice di rischio generale dell’unità, Carmagnani S.p.A.

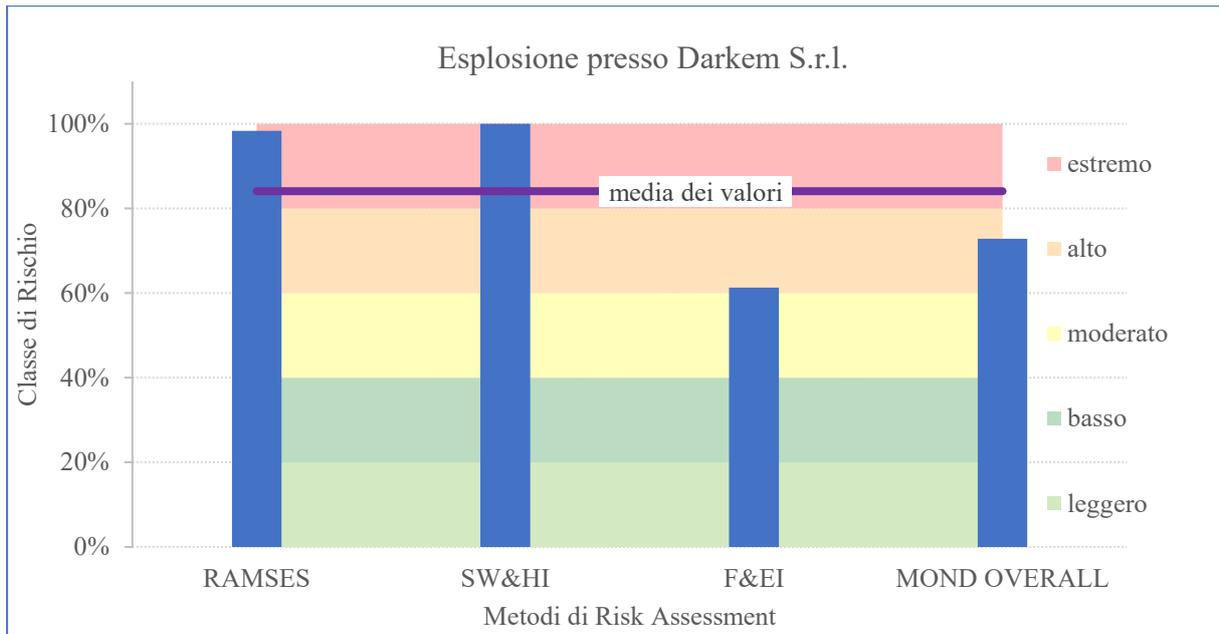


Figura 5.2: Indice di rischio generale medio Darkem S.r.l.

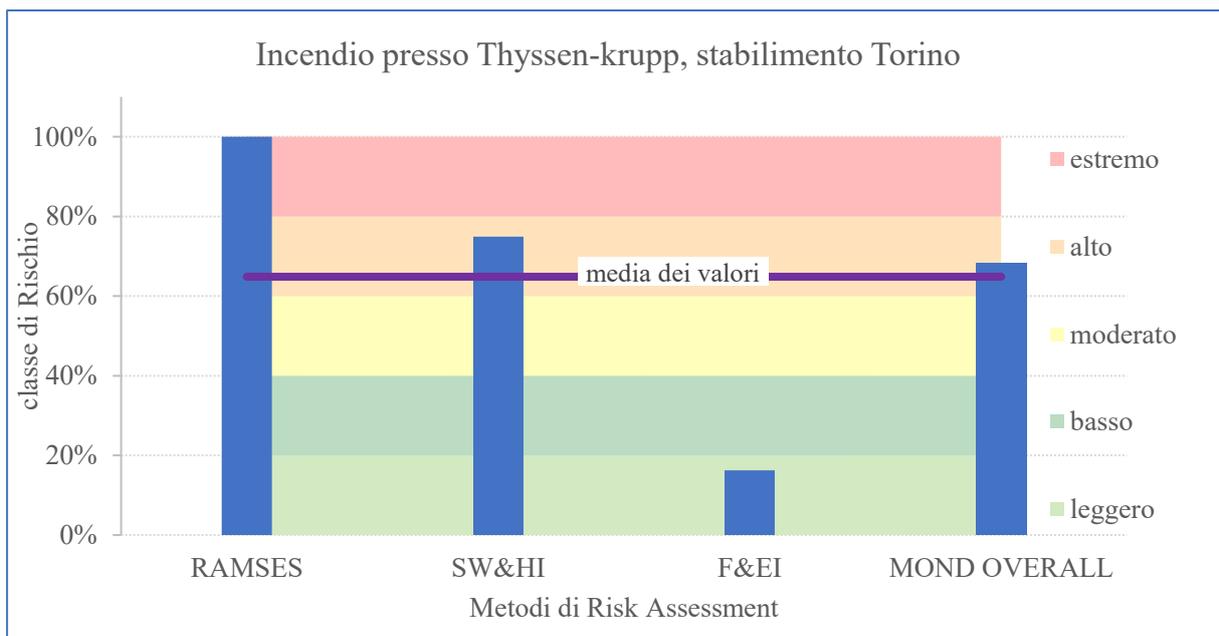


Figura 5.3: Indice di rischio generale medio Thyssen-krupp.

Il valore unico dell'indice di rischio dell'unità è stato ottenuto attraverso una media aritmetica dei 4 valori reali, normalizzati rispetto al massimo della rispettiva scala di appartenenza. Se per Ramses 4, SW&HI e F&EI si è potuto considerare in prima approssimazione un andamento lineare dell'indice in funzione della classe di rischio, quest'approssimazione non può essere eseguita per la variazione della scala dei valori dell'indice Mond Overall. Ci si è accorti che l'ampiezza di ogni intervallo cresce con una funzione approssimabile ad un'esponenziale, rispetto al valore dell'indice di rischio.

Per questo, nel definire il valore numerico dell'indice medio, si è deciso di procedere come in 6.2, dove è stata applicata la funzione logaritmica al termine della Mond prima di essere normalizzato al suo valore massimo:

$$\text{Indice Medio unità} = \frac{\frac{\text{Ramses}}{\text{Max Ramses}} + \frac{\text{SW\&HI}}{\text{Max SW\&HI}} + \frac{\text{F\&EI}}{\text{Max F\&EI}} + \frac{\ln \text{Mond}}{\ln \text{Max Mond}}}{4} \quad (6.2)$$

In Tabella 5.5, si riportano a titolo di esempio, la variazione dei valori che si è ottenuta prima e dopo normalizzazione all'interno delle 5 classi di rischio, definite precedentemente per il caso studio Carmagnani. Il valore degli indici, a seguito della normalizzazione, sono rimasti sempre nella medesima classe di rischio.

Tabella 5.5: Indici di rischio per il caso Carmagnani prima e dopo normalizzazione.

Metodo indicizzato	Indice Reale	Indice normalizzato
Ramses 4	5,62	0,93
SW&HI	4,73	0,236
F&EI	78,84	0,50
The Mond Overall Index	246,72	0,49

$$\text{Indice Medio unità} = \frac{\frac{5,6}{6} + \frac{4,73}{20} + \frac{79}{159} + 0,49}{4} = 0,54 \quad \text{Carmagnani}$$

La stessa analisi è stata fatta per i casi studio di Darkem e di Thyssen-krupp. Le considerazioni inerenti all'indice Overall della Mond, precedentemente riportate, sono state effettuate anche per questi due casi studio, e invece del valore di SW&HI del caso Darkem (120), si è riportato il valore massimo possibile in scala (20).

$$\text{Indice Medio unità} = \frac{\frac{5,9}{6} + \frac{20}{20} + \frac{84,29}{159} + 0,67}{4} = 0,82 \quad \text{Darkem}$$

$$\text{Indice Medio unità} = \frac{\frac{6}{6} + \frac{14,99}{20} + \frac{24,01}{159} + 0,81}{4} = 0,68 \quad \text{Thyssen - krupp}$$

Dai valori finali ottenuti e riportati nei grafici (Figure 6.1, 6.2, 6.3) si evidenziano le classi di rischio finali generali delle tre unità prese in esame. Nel caso Carmagnani si definisce una classe di rischio Moderato, inferiore rispetto a quanto ottenuto nel caso Thyssen-krupp (classe di rischio Alto). In Darkem invece, si ha la classe di rischio maggiore dei tre, definito Estremo. Tale risultato sembra rappresentare, oggettivamente, la condizione di rischio e pericolo dell'unità, tanto da indurre l'esplosione di un intero capannone.

6. Verifica dell'eventuale abbassamento delle soglie di rischio mediante l'attuazione di azioni compensative

L'obiettivo, che ci si è posti in questo capitolo, è quello di verificare se, con l'applicazione delle corrette politiche di gestione della sicurezza e l'eventuale presenza di dispositivi di protezione e prevenzione, si sarebbe potuto evitare la formazione dell'evento indesiderato nelle varie unità di processo e stoccaggio.

Tale analisi è stata intrapresa sui casi studio inerenti l'esplosione avvenuta nel deposito di Darkem Srl e l'incendio sviluppatosi nello stabilimento della Thyssen-krupp di Torino, descritti nel Capitolo 2. In termini di indici di rischio, l'evitare la formazione dell'evento indesiderato si riflette nella capacità, propria dei fattori di credito, di abbassare la classe di rischio corrispondente, fino ad ottenere teoricamente un rischio definito "*accettabile*".

Nel caso Darkem, l'esplosione è avvenuta, come già esposto in precedenza, a causa della cattiva gestione della fase di immagazzinamento dei prodotti, indotta dalle direttive aziendali che attuavano una non corretta politica di stoccaggio. Infatti, le sostanze devono essere stoccate con classi di stoccaggio compatibile tra loro, in modo da evitare fenomeni indesiderati. Banalmente, si deve evitare la formazione di reazione di autocombustione, come quella tra acidi e metalli, la formazione di incendi e/o esplosioni date dal contatto tra agenti ossidanti e sostanze organiche, o comunque di reazioni con sviluppo esotermico, come può avvenire tra sostanze acide e basiche. In Darkem, erano presenti sostanze fortemente ossidanti, come il Clorato e Perclorato di Potassio, e sostanze organiche facilmente combustibili, come Lignite o PoliEtilenGlicole (PEG). Una buona politica di stoccaggio, come riportato in [14], presuppone alcuni concetti fondamentali, anche di semplice attuazione:

- Sostanze pericolose devono essere stoccate separatamente senza possibilità di contatto diretto, in funzione delle proprietà e quantità presenti.
- Anche sostanze della stessa classe di stoccaggio, ma pericolose, vanno depositate separatamente senza possibilità di contatto, in compartimenti con pareti tagliafuoco.
- Le sostanze pericolose appartenenti a classi di stoccaggio differenti, possono essere stoccate nello stesso deposito, se le misure e i dispositivi di prevenzione e protezione contro gli incendi e le esplosioni sono adeguate alle proprietà delle sostanze.

Proprio quest'ultima considerazione è di grande rilevanza in questo caso studio. I dispositivi antincendio (sprinkler, estintori, ...) non erano adeguati al quantitativo e tipo di sostanze presenti e, inoltre, vi era evidenza di una carenza di dispositivi di rilevazione.

Per questo, oltre ad ipotizzare una buona politica di stoccaggio, si è voluto constatare l'eventuale variazione della classe di rischio qualora fossero stati presenti dispositivi di rilevamento e spegnimento automatico. Questi, se correttamente funzionanti e disponibili, intervenendo durante le prime fasi di sviluppo dell'incendio, avrebbero forse bloccato la propagazione delle fiamme, che ha invece avuto come conseguenza diretta l'innescò di sostanze termodinamicamente instabili ad alta temperatura, generando fenomeni di detonazione delle stesse.

La buona politica di stoccaggio è stata valutata positivamente attraverso il credito definito dal metodo indicizzato della Mond. Questo è contenuto nella sezione K1: “*Process Control*”, in cui vi è un fattore definito “*Operating Instructions*” che assegna un valore dato dalla presenza di chiare e comprensive istruzioni definite dall’azienda, da attuare durante i processi produttivi, per operare in completa sicurezza nel rispetto della normativa vigente, all’interno dell’unità in esame.

In Tabella 6.1, si nota subito che la sola applicazione della buona politica di stoccaggio, secondo il metodo, non permette l’abbassamento di nessuna delle classi di rischio corrispondenti, quindi non è risultata sufficiente ai fini preposti.

Tabella 6.1: Verifica della variazione della classe di rischio con buona politica di stoccaggio in Darkem.

INDICE	CREDITO AGGIUNTO		INDICE INIZIALE	INDICE FINALE	MODIFICA DELLA CLASSE DI RISCHIO?
	Tipo	Valore			
Fire Index	Operating Instructions	0,76	5,524	5,52	NO
Explosion Index	Operating Instructions	0,76	11	8,26	NO Viene abbassato l’indice, rimanendo nella stessa classe.
Overall Index	Operating Instructions	0,76	1938	1454,11	NO Viene abbassato l’indice, rimanendo nella stessa classe.

Invece, la presenza di dispositivi di rilevamento e spegnimento automatico, valutata sia con il metodo della Mond, che con SW&HI, definisce una riduzione quasi generale degli indici (Tabella 6.2). Nel caso dell’indice di incendio, si ha una riduzione della classe di rischio incendio, che andrà a coincidere con un rischio Basso.

Tabella 6.2: Verifica della variazione della classe di rischio con sistemi di rilevazione e spegnimento incendio, Darkem.

INDICE		CREDITO AGGIUNTO		INDICE INIZIALE	INDICE FINALE	MODIFICA DELLA CLASSE DI RISCHIO?
		Tipo	Valore			
The Mond Index	Fire Index	Fire Allarms	0,81	5,524	4,71	SI da Moderato a Basso.
	Explosion Index	Fire Allarms	0,81	11	11	NO
	Overall Index	Fire Allarms	0,81	1938	1653	NO viene abbassato il valore, rimanendo nella stessa classe.

SW&HI	- Emergency Control measure: Showers. - Foam in adequate quantity. - Detecting devices, flammable chemical detection - (Sense of security)	0,25 0,25 0,8 (1,2)	190,64	91,97 (51,3)	NO viene abbassato molto il valore, rimanendo nella stessa classe.
-------	--	------------------------------	--------	-----------------	--

Anche se realmente il metodo SW&HI indica che non vi è una diminuzione della classe di rischio, in base al valore dell'indice, bisogna ricordare come questo presenti elevati problemi nella valutazione di unità dove si processino sostanze solide, in quanto esso è sviluppato prevalentemente per l'analisi di liquidi o gas. Quindi, una diminuzione di quasi il 55% dell'indice, dovuto a un sostanziale miglioramento dei dispositivi di protezione e prevenzione, può essere considerata comunque un ottimo risultato a fini della valutazione del rischio. Se a questo si aggiunge, come naturale conseguenza dei fatti descritti, l'aumento del senso di sicurezza che il personale presente percepisce all'interno dell'unità, si ha un netto progresso. L'indice diminuisce di circa il 74% rispetto al valore iniziale e la valutazione del rischio, anche se pienamente negativa, migliora sensibilmente.

Nel caso studio di Thyssen-krupp, un fattore rilevante, anche ai fini del procedimento penale, è stato l'assenza di un dispositivo a norma di legge, che permettesse l'arresto del processo produttivo della Linea 5, in situazione di emergenza. Questo, se correttamente installato, avrebbe prodotto l'arresto con messa in quiete dei sistemi oleodinamici della linea. Tale dispositivo di emergenza, secondo la norma EN 13850, deve presentare un pulsante a forma di "fungo" rosso su un campo giallo, come in Figura 6.1, ma soprattutto deve essere di facile accesso per un repentino utilizzo. Invece, la realtà dello stabilimento di Torino presentava dei pulsanti di arresto in remoto o lungo la linea che o non possedevano tali caratteristiche, o non erano di facile raggiungimento. Inoltre non vi erano procedure chiare in merito all'arresto della linea in caso d'incendio.



Figura 6.1: Pulsante di arresto di emergenza secondo la norma EN13850

Ai fini dell'analisi si è effettuata la valutazione del rischio nello stabilimento della Thyssen-krupp di Torino, ipotizzando la presenza del dispositivo di arresto di emergenza con l'applicazione dei metodi SWEHI, F&EI e The Mond Index.

Non è stato possibile effettuare lo stesso lavoro con il metodo Ramses data la carenza dal punto di vista valutativo dello stesso, che non analizza in nessun modo questi aspetti, anche se fortemente influenzanti ai fini dell'analisi di rischio.

Si nota immediatamente (Tabella 6.3) come l'aggiunta del credito non influenza l'indice rischio incendio. L'effetto più interessante si evidenzia nel metodo SW&HI, dove non solo si ha un buon abbassamento del valore finale, di circa il 43%, ma si evidenzia anche una diminuzione della classe di rischio. Un discreto abbassamento del valore dell'indice (circa il 30%) si presenta anche in relazione al rischio esplosione interna, anche qui con una variazione della classe di rischio.

Tabella 6.3: variazione degli indici di rischio con la presenza di sistema di arresto di emergenza, in Thyssen-krupp.

INDICE		CREDITO AGGIUNTO		INDICE INIZIALE	INDICE FINALE	MODIFICA DELLA CLASSE DI RISCHIO?
		Tipo	Valore			
The Mond Index	Fire Index	Safety shutdown system	0,7	0,86	0,86	NO
	Explosion Index	Safety shutdown system	0,7	4,4	3,07	SI da Alto a Moderato.
	Overall Index	Safety shutdown system	0,7	1626,7	1138,7	NO viene abbassato il valore, rimanendo nella stessa classe.
SW&HI		Shut down measures	0,75	14,99	8,563	SI da Altamente Pericoloso a Pericoloso.
F&EI		Emergency shutdown	0,96	24,01	23	NO viene abbassato il valore, rimanendo nella stessa classe.

Nel complesso, quest'analisi dimostra come la sola presenza di un semplice dispositivo di arresto di emergenza influisca sul valore degli indici di rischio dell'unità. Questa misura da sola non è sufficiente per mitigare l'indice di rischio ad un livello accettabile.

Perciò, l'integrazione di questo dispositivo con altre strumentazione di protezione e prevenzione, e soprattutto la presenza dello scenario all'interno del Documento di Valutazione dei Rischi, rimane un'azione fondamentale ai fini della sicurezza.

In ultimo, data la presenza di due circuiti oleodinamici operanti a differente pressione, a 70 e 140 bar, si è voluto verificare la variazione del livello di rischio dell'unità, effettuando la valutazione sul circuito idraulico di tipo B, operante a pressione minore. La valutazione è stata eseguita trascurando la metodologia Ramses 4, in quanto non presenta variazioni al cambiamento diretto della pressione di esercizio.

Tabella 6.4: variazione della classe di rischio se il circuito oleodinamico considerato fosse stato di tipo b (70 bar di esercizio).

METODO	INDICE INIZIALE	INDICE FINALE	CLASSE OTTENUTA
<i>Ramses</i>	5.72	Invariato	Rischio Alto
<i>SW&HI</i>	14.98	14.35	Rischio Alto
<i>F&EI</i>	90.53	88.86	Rischio Moderato
<i>The Mond Index</i>	F.I.: 0.91 E.I.: 6.92 OVERALL I.: 9183	F.I.: invariato E.I.: 6.82 OVERALL I.: 8305.6	Rischio Leggero Rischio Molto Alto Rischio Molto Alto

Dai risultati ottenuti, riportati in Tabella 6.4 si nota immediatamente come non vi sia variazione della classe di rischio, che si attestano sempre su classi medio alte, ma come l'abbassamento di pressione in sé abbia poco influenzato tutti i metodi indicizzati utilizzati. Questo dimostra come, nella realtà, il rischio indotto dal circuito oleodinamico non dipenda effettivamente solo dalla pressione operativa di esercizio, essenziale per il funzionamento, ma sia correlato ad una pericolosità intrinseca dell'unità analizzata, derivante dalla sommatoria di tutte quelle problematiche precedentemente descritte.

7. Reparto di processo chimico “CP1” di ACME S.p.A

Dopo una prima fase di applicazione dei metodi ad incidenti reamente accaduti, si è deciso di applicarli ad un reparto chimico di uno stabilimento italiano, denominato ACME S.p.A., per mantenere la riservatezza necessaria nel rispetto delle informazioni sensibili trattate. L'azienda chimica presa in esame presenta delle caratteristiche che ben si prestano all'applicazione dei metodi indicizzati, data la complessità di produzione chimica e il grande numero di apparecchiature di processo presenti al suo interno. Il reparto “Chemical Products 1” (CP1) è inserito in un complesso produttivo ancora più esteso e rappresenta solo uno dei diversi reparti principali, serviti da vari magazzini adibiti allo stoccaggio, parco serbatoi, impianti ausiliari per la fornitura delle varie utilities, vari sistemi di trasporto limitrofi, laboratori, mense, uffici e da tutti i reparti necessari al corretto funzionamento del sistema produttivo. La valutazione del rischio del reparto quindi, diviene necessaria per la messa in sicurezza non solo del reparto in sé ma anche di tutto quanto appena elencato, in modo da evitare l'instaurarsi e il propagarsi di un possibile effetto domino.

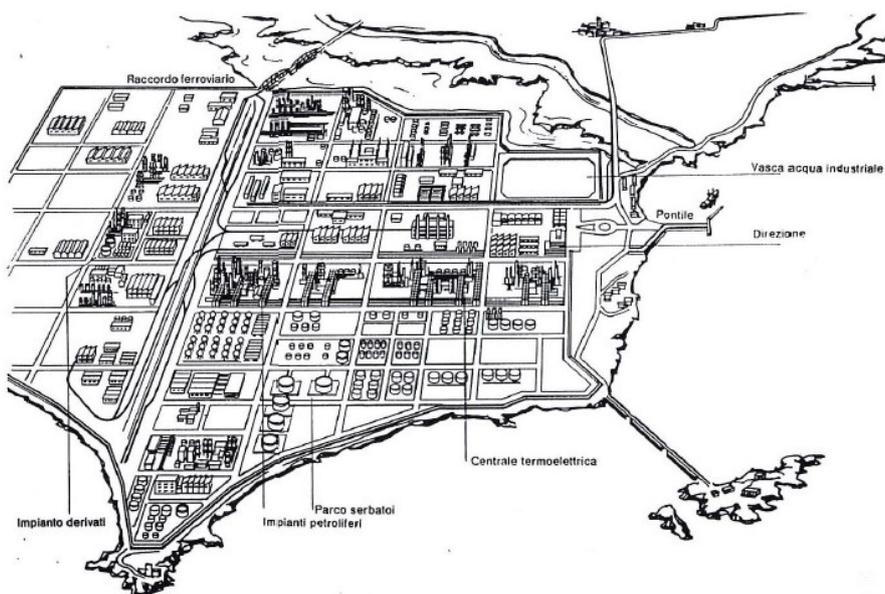


Figura 7.1: Planimetria di una generica azienda di processo.

L'azienda ACME S.p.A., rientra nella classe di “Azienda a Rischio di Incidente Rilevante”, secondo quanto definito dal D. Lgs. 105/2015 già citato nel Capitolo 2. Essa si sviluppa in un'area di circa 60000 m² e presenta una divisione dello stabilimento in reparti produttivi e delle aree di stoccaggio di merce imballata e sfusa. Nel reparto CP1, si producono principalmente additivi per la plastica. Si eseguono operazioni fisiche, reazioni chimiche e processi di confezionamento di prodotti solidi, pronti per la vendita al dettaglio o all'ingrosso. Le informazioni riferite alle caratteristiche principali del reparto e alla sua complessità derivano essenzialmente dallo studio del Rapporto di Sicurezza, obbligatorio per questo tipo di Azienda

e da un sopralluogo effettuato al suo interno. Questo ha permesso di recuperare informazioni non riscontrabili nei Documenti preposti, ma essenziali ai fini della valutazione.

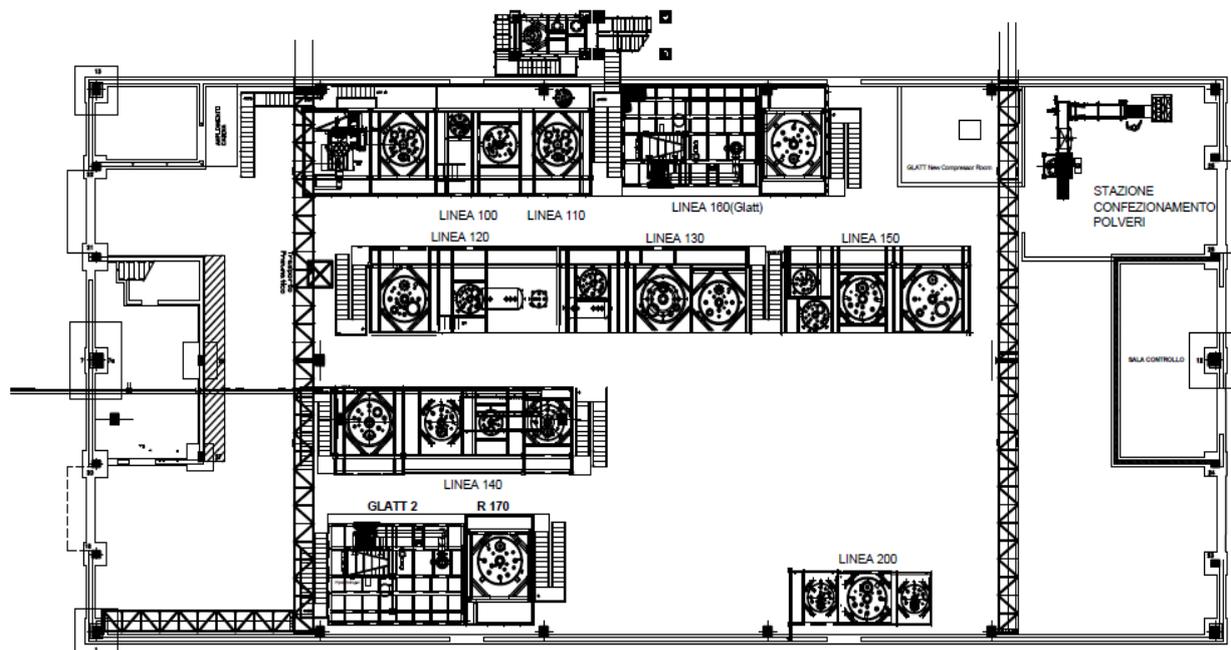


Figura 7.2: planimetria del reparto di processo CPI di ACME S.p.A.

Nel CP1, si eseguono diverse produzioni, che si differenziano per tipo di prodotto e processo. Le apparecchiature sono raggruppate in Linee di Produzione, in funzione del prodotto che si vuole ottenere. Attualmente, nel reparto si eseguono:

- Linea di produzione P1.
- Linea di produzione P2.
- Linea di produzione P3.
- Linea di idrogenazione.

È presente al suo interno anche una stazione di confezionamento polveri, effettuato mediante un’insacatrice, che permette di ottenere confezioni del prodotto necessario in formati che variano dai 20 ai 25 kg. Tale processo è scarsamente automatizzato e richiede l’intervento del personale.

Le linee di produzione sono costituite da un notevole numero di apparecchiature principali e secondarie e, alcune di queste, vengono utilizzate in più linee produttive, in modo da rendere il processo quanto più flessibile possibile. Le apparecchiature principali, abbinata con le Linee di produzione di appartenenza, possono essere sintetizzate come in Tabella 7.1:

Tabella 7.1: Apparecchiature principali delle varie Linee di produzione in CPI.

LINEA DI PRODUZIONE	UNITA' PRINCIPALI	
	REATTORE	SERBATOIO
P1	R-100 R-110	T-110 T-141 T-142 T-145
P2	R-120 R-130 R-140	T-121 T-131
P3	R-120, R-140 R-130, R-150	T-121, T-122 T-123 T-141, T-142 T-143 T-132, T-134
Idrogenazione R-200	R-200 R-210 R-220	

Le apparecchiature riportate si dividono principalmente in reattori e serbatoi, i quali sono spesso coadiuvati da strumentazioni secondarie necessarie ai fini del processo, come pompe, condensatori, estrusori, vibrovagli, ecc. Ai fini del calcolo, questi elementi non costituiscono un'unità a sé stante, ma ognuno viene considerato come parte dell'elemento principale (apparecchiatura primaria del processo) e il loro potenziale rischio va a sommarsi al rischio di tutta l'unità considerata.

7.1. Linea di produzione P1

La linea di produzione P1 permette di ottenere un prodotto polimerico sotto forma di microgranuli con dimensioni finali di circa 2 mm. La reazione è una esterificazione in massa, che si sviluppa all'interno del Reattore R-110. Questo ha un volume interno di circa 15 m³, inertizzato con azoto e agitato, con una camicia di olio riscaldante. Il reattore R-110 riceve dal R-100 il reagente in soluzione acquosa. La disidratazione del reagente avviene a circa 190°C e successivamente inviato nel reattore di reazione, che opera sottovuoto (circa -1 bar). La reazione è catalizzata da un catalizzatore che, opportunamente attivato, lavora per circa 20 ore di processo, fino a quando la velocità dell'agitatore nel reattore R-110 diminuisce ad un limite prestabilito. Il prodotto in uscita dal reattore è in forma liquida, non adatto alle richieste del mercato, per questo viene inviato ad un estrusore che opera per circa 15-16 ore, fino all'ottenimento di un prodotto P1, con granulometria definita. Qui si viene a generare un grosso problema inerente alla formazione di un grande quantitativo di polvere, il quale deve essere opportunamente gestito. Il prodotto, una volta ottenuto, viene raccolto in grossi Big-bags e inviato allo stoccaggio. Il sottoprodotto della reazione è una corrente di metanolo (circa 89%), la quale viene condensata nei condensatori ausiliari e inviata nei serbatoi di recupero T-110 e paralleli, raffreddati con acqua glicolata, per poi essere spedito allo stoccaggio primario.

7.2. Linea di produzione P2

La linea di produzione P2 permette di ottenere un prodotto finale in forma liquida, partendo da reagenti anch'essi liquidi. La reazione si sviluppa nei reattori R-120 e R-130 con volume interno

di circa 15 m³, inertizzati con azoto e agitato, con una camicia di olio riscaldante al suo esterno. Il reagente primario viene inviato da R-130, in cui subisce una disidratazione iniziale, nel reattore R-120 che, dopo l'eliminazione del solvente n-eptano con una corrente di vapore, effettua una fase principale di metilazione. La reazione di metilazione presenta al suo interno reagenti provenienti da R-150 (paraformaldeide e acqua) ed è una reazione fortemente esotermica, per questo necessita di un accurato controllo e della regolazione della temperatura nel reattore. La reazione, che si sviluppa per un tempo di circa 10 ore, presenta una fase acquosa molto ricca di componenti, che viene inviata in R-140 e neutralizzata con opportuni lavaggi, inizialmente eseguiti con soda e acqua, e in fase finale solo con acqua, della durata di circa 8 ore. A questo segue una fase di eliminazione del solvente con vapore, fino all'ottenimento di un prodotto finale liquido. Prima di procedere allo stoccaggio del prodotto in fusti o cisterne, si esegue una serie di filtrazioni su dei filtri a maglie, che permettono l'eliminazione dalla corrente uscente della parte granulare, indesiderata. L'operazione è effettuata ad una pressione massima di 3 bar.

7.3. Linea di produzione P3

La produzione del prodotto P3 si effettua in due linee parallele, una formata dai reattori R-120 e R-140, l'altra dai reattori R-130 e R-150. Questa linea di produzione è più complessa rispetto a quelle descritte nei paragrafi precedenti, dato il maggior numero di processi svolti e il gran quantitativo di apparecchiature utilizzate ai fini produttivi. La sequenza di reazioni si sviluppa in continuo: allo scarico del letto di reazione della produzione precedente, segue il carico dei reagenti nel reattore primario, in modo da dimezzare i tempi morti del processo. Nel reattore R-130 si opera una esterificazione in massa per la produzione del prodotto P3. Il reattore ha un volume interno di circa 15 m³, inertizzato con azoto, e agitato, con una camicia di olio riscaldante. Dopo la fase di scarica del letto di reazione precedente, si introducono al suo interno inizialmente l'n-eptano, come solvente primario, e il reagente principale in soluzione acquosa. La reazione, catalizzata per favorire l'aumento della temperatura di reazione, subisce una fase di disidratazione dei reagenti per mezzo di vapore surriscaldato. Si genera un sottoprodotto, il metanolo, che deve essere opportunamente allontanato e inviato allo stoccaggio finale. Il prodotto principale di reazione viene inviato alle fasi successive di lavaggi, in R-150, con circa 2000 litri di acqua in un sistema agitato, ad una temperatura di circa 90°C fino ad ottenere il prodotto desiderato. Questo viene successivamente distillato sottovuoto ad una temperatura massima di circa 200°C con una corrente in ingresso di vapore. Il prodotto finale viene prelevato e analizzato in laboratorio per conformità alle specifiche richieste e, successivamente, inviato in un granulatore Glatt, che opera in continuo. Attraverso un letto fluidizzato da una corrente di Azoto, nel granulatore si generano dei granuli di granulometria molto fine. Questi sono inviati ad un vibrovaglio meccanico che permette ai granuli di prodotto P3 di essere separati in base al diametro delle particelle. Questo sistema, che presenta un alto grado di movimentazione di polvere, va opportunamente gestito per evitare inconvenienti derivanti dal deposito di strati di polvere sulle superfici esterne del macchinario.

7.4. Linea di idrogenazione

I reattori R-200 e R-210 lavorano in fase continua. Il reattore R-200 (Jet-reactor) opera con una soluzione acquosa in ingresso del reagente primario, unita ad una corrente di vapore surriscaldato, fino al raggiungimento del set-point di avvio reazione. Seguono due cicli di inertizzazione con azoto (pressurizzazioni e sfiati continui). L'azoto introdotto, viene sostituito da una corrente di Idrogeno in ingresso, con una portata di circa 6 kg/h. La temperatura si attesta

nell'interno dei 90°C, mentre i problemi principali consistono nell'alto livello di pressione a cui si opera (circa 26 bar), dato dalla presenza della corrente di idrogeno. La reazione che si sviluppa è lievemente esotermica per un tempo di permanenza di circa 4-5 ore. La corrente di prodotto in uscita viene inviata ad un concentratore che opera a pressione atmosferica, riscaldato da vapore, permettendo la concentrazione del prodotto fino a concentrazione desiderata. Segue una fase finale di distillazione, con temperatura massima di 175°C che permette l'ottenimento del prodotto con le specifiche desiderate.

7.5. Linea di confezionamento polveri

Il processo opera con le polveri definite dai prodotti di reazione ottenuti, che presentano una granulometria variabile. Le fasi principali si possono definire come:

- Operazione eseguita da operatore, a cui si affida la gestione dell'insaccatrice.
- Sostanze in big-bags da 500 kg in ingresso.
- Prodotto finale in confezioni da 20-25 kg.
- Operazione eseguita per caduta del prodotto per gravità.
- Caduta sostanza in tramoggia con dosatore.
- Chiusura sacco con termosaldatrice a peso raggiunto.
- Rulliera di movimentazione sacchi sul bancale per stoccaggio finale.

8. Analisi di rischio del reparto “CP1” di ACME S.p.A

Nel presente Capitolo, si riporta l’applicazione dei metodi individuati di risk assessment alla realtà industriale del reparto CP1. Data la grande quantità di apparecchiature presenti, si è deciso di effettuare la valutazione per ogni unità logica che comprendesse il Reattore o il Serbatoio principale, con l’aggiunta di tutte quelle apparecchiature ausiliarie, necessarie ai fini della produzione. La realtà del calcolo ha richiesto, per ogni metodo, la definizione della sostanza “chiave” da prendere in esame. In Tabella 8.1 si noti come, esclusi pochi casi, la scelta ricada sempre su Metanolo e N-Eptano, sia per caratteristiche di pericolosità, che per quantità processate nelle varie unità operative.

Tabella 8.1: sostanze chiave per ogni unità analizzata in CP1.

UNITA' OPERATIVA	SOSTANZA CHIAVE
<i>R-100</i>	<i>METANOLO</i>
<i>R-110</i>	<i>METANOLO</i>
<i>R-120</i>	<i>N-EPTANO</i>
<i>R-130</i>	<i>N-EPTANO</i>
<i>R-140</i>	<i>N-EPTANO</i>
<i>R-150</i>	<i>N-EPTANO</i>
<i>R-160, R-170</i>	<i>P3</i>
<i>R-200</i>	<i>IDROGENO</i>
<i>T-121</i>	<i>N-EPTANO</i>
<i>T-132</i>	<i>N-EPTANO</i>
<i>T-121, T-141, T-151 e paralleli</i>	<i>N-EPTANO</i>
<i>T-114</i>	<i>METANOLO</i>
<i>T-115</i>	<i>METANOLO</i>
<i>Reparto Polveri</i>	<i>P3</i>

Nell’unità R-160, R-170, la sostanza chiave è stata identificata nel prodotto di reazione P3. Bisogna considerare come questa unità, presenti dei sistemi di movimentazione delle polveri, quali il granulatore Glatt e un vibrovaglio. Il primo funziona attraverso un letto fluidizzato, messo in movimentazione da una corrente di Azoto, che funge anche da sostanza inerte per la probabile formazione di atmosfera potenzialmente esplosiva di polveri disperse. Nel secondo dispositivo invece, oltre all’assenza di Azoto, si hanno numerosi problemi di perdite di polvere dalle giunzioni delle apparecchiature, come riscontrato visivamente durante la visita nel reparto di produzione CP1. Questa polvere, depositandosi sulle pareti e negli angoli della superficie delle apparecchiature in presenza di un possibile innesco, può essere soggetta a potenziale accensione dello strato, se non opportunamente rimossa, generando una possibile fonte di innesco per un’esplosione più o meno confinata. Quest’insieme di informazioni ha portato, quindi, alla scelta del prodotto P3 come sostanza chiave ai fini di quest’analisi di rischio.

8.1. Caratteristiche generali del reparto CPI

Nel reparto di processo CPI, vi sono delle caratteristiche generali, introdotte in questa sezione, che rimangono comuni a tutte le unità logiche analizzate. Per le informazioni peculiari ad ognuna di esse, si rimanda a quanto riportato in Allegato 4.

Il reparto presenta delle apparecchiature collegate attraverso un sistema di tubazioni, di tipo permanente, chiuso e con flange saldate in testa. Si hanno dei sistemi rimovibili che costituiscono il punto di ingresso ed uscita delle apparecchiature, per questo non si può escludere la formazione di perdite. Le unità presentano sistemi di movimentazione delle sostanze come pompe o agitatori interni ai reattori, anch’essi con un sistema di tenute per il quale non si possono escludere perdite.

I processi sono tutti di tipo batch, quindi discontinui, e richiedono una discreta iterazione degli operatori, principalmente nelle fasi di carico/scarico delle sostanze. Non vi è un sistema di raffreddamento, in quanto non necessario ai fini del processo, ma si ha un sistema di inertizzazione con Azoto, che evita la formazione di potenziale atmosfere esplosive, fatto che pregiudica la presenza di dispositivi di protezione contro le esplosioni all’interno di ogni reattore. Sono invece presenti sempre delle Safety Valves (con pressione di apertura tarata a 5 bar), che inviano i possibili sfiati direttamente allo scarico in vasche di raccolta (Blow Down).

Tali processi vengono gestiti da una sala controllo munita di Computer, presente all’interno del reparto stesso, che regola il tutto con l’ausilio di sistemi di controllo delle proprietà principali, quali: livello, pressione, temperatura e portata. Gli operatori della sala controllo sono in grado di individuare un’eventuale perdita e porre l’opportuno rimedio.

L’impianto in sé presenta dei sistemi di Interlock delle apparecchiature ad arresto semplice, per prevenire la formazione di stati indesiderati. Ogni deviazione dalle normali condizioni operative viene segnalata da un sistema di allarme sonoro e visivo, presente in tutto il reparto CPI. Gli eventuali sfiati vengono convogliati nei corrispettivi sistemi di abbattimento e inviati nelle varie vasche di raccolta con una rete di raccolta delle perdite che interseca tutte le apparecchiature presenti. Queste presentano un rateo di corrosione del metallo inferiore a 0,1 mm/anno, e sono tutte costituite di acciaio con caratteristiche idonee al processo, che permette alle apparecchiature stesse di lavorare con un “sottovuoto” più o meno spinto. I loro volumi si diversificano in base al tipo di processo e il loro collocamento nel reparto è fissato ad altezze differenti, tanto da definire un sistema di passerelle, a tre piani, che circonda l’intero blocco di apparecchiature, permettendo all’operatore di raggiungere direttamente anche le parti più alte. Queste passerelle sono in acciaio zincato, in modo da prevenire i fenomeni di corrosione e sono di tipo grigliato, favorendo migliore protezione in caso di perdita di sostanze.

La struttura del reparto non presenta sistemi di protezione antincendio su tutti i supporti portanti, in quanto non progettata per resistere all’incendio secondo le ultime normative. Ogni unità logica al suo interno, non è isolata da pareti tagliafuoco che permetterebbero di dividere questa dal resto dell’impianto e, oltretutto, non è presente attualmente un impianto fisso a spegnimento automatico, che si attivi in caso di incendio, pregiudicando una protezione antincendio anche per le apparecchiature. È presente, però, una adeguata provvista di estintori di vario tipo (carrellati e manuali) in tutto il reparto CPI e dei sistemi a Naspo con una fornitura di acqua con una portata di 0,3 m³/h a 7 bar effettivi. In caso di improvvisi distacchi dell’energia elettrica, interviene a supporto un gruppo elettrogeno di emergenza, che fornisce la copertura adeguata per l’intero reparto di processo.

Sono presenti sistemi di rilevazione di sostanze infiammabili in tutto il reparto, assente invece la rilevazione in funzione delle sostanze tossiche. In aggiunta, è assente anche un sistema con ventilatore per il controllo di eventuali fumi. I rilevatori di fiamma, attualmente sono installati solo esternamente alle apparecchiature e non inseriti come sensori interni.

L’azienda presenta un sistema di vigilanza h24, coordinato da una ditta appaltatrice esterna. La sicurezza del perimetro dell’impianto è gestito attraverso un sistema di videocamere a circuito chiuso. La manutenzione delle apparecchiature viene gestita su base programmata, effettuando delle regolari ispezioni delle stesse da parte del personale responsabile.

È presente, inoltre, la documentazione necessaria obbligatoria ai sensi di legge, come Documento di Valutazione dei Rischi (DVR), Rapporto di Sicurezza, redatto con cadenza quinquennale, e un Piano di Emergenza Esterno e Interno. L’azienda dispone che il personale venga regolarmente addestrato in situazioni di emergenza, attraverso dei corsi di sicurezza obbligatori con sistema di rilevazione delle conoscenze acquisite. Le comunicazioni, al di fuori di quelle di emergenza gestite con sistemi visivi e di allarmi sonori, sono effettuate attraverso dei dispositivi telefonici, secondo normative ATEX.

8.2. I metodi di analisi del rischio applicati a CPI

Le unità logiche presenti nel reparto di processo CPI sono state oggetto di valutazione attraverso i metodi di analisi del rischio. L’obiettivo primario di tale analisi è quella di estrapolare un indice finale e il più generale possibile del reparto, in modo da valutarne in prima approssimazione il livello di rischio al suo interno. In ultimo, questo tipo di lavoro permette di avere una visione più dettagliata di una unità di processo, non riferita ad un evento incidentale avvenuto, ma utile a priori per permettere l’identificazione dei sistemi di protezione, eventualmente necessari, per un livello adeguato di prevenzione e protezione. Le informazioni riferite alle sostanze principali, derivano dalle Schede di Sicurezza (SDS) fornite dall’azienda ACME S.p.A., e integrate da ricerche bibliografiche su manuali specializzati. Ogni fonte dei dati di diversa origine viene presentata in Allegato 4.

Il primo metodo applicato al reparto CPI è Ramses 4. Il calcolo è stato distintamente riferito a polveri combustibili o gas/liquidi infiammabili a seconda dell’unità analizzata. In Tabella 8.2 si riportano i valori finali di indici di rischio e pericolo ottenuti, che definiscono le classi di rischio di appartenenza.

Tabella 8.2: Indici di pericolo e rischio secondo Ramses 4 per reparto CPI.

La metodologia Ramses 4			
Unità Logica	Indice di Pericolo associato agli Agenti Chimici	Indice di rischio per Sorgente di Emissione	Indice di Rischio per Mansione
R-100	6,32	3,48	3,48
R-110	6,32	3,48	3,48
R-120	6,12	3,32	3,33
R-130	6,12	3,32	3,33
R-140	6,12	3,32	3,33
R-150	6,12	3,38	3,38
R-160, R-170	5,42	4,24	4,24
R-200	7,12	4,12	4,13

T-121	6,12	3,16	3,16
T-132	6,12	3,16	3,16
T-141, T-151	6,12	3,28	3,29
T-114	6,32	3,08	3,08
T-115	6,32	2,98	2,98
Reparto polveri	5,92	4,28	3,58

Dall’analisi dei dati ottenuti, è evidente come l’indice di pericolo riferito alle sostanze secondo il metodo sia sempre alto, il massimo possibile. Questo è abbastanza in linea con il fatto che il reparto CP1 ricada sotto direttive Seveso (D. Lgs. 105/2015), in funzione del tipo di sostanze utilizzate al suo interno e dei quantitativi presenti. Tale fattore, la quantità, non ricade però nell’analisi di rischio di Ramses 4, che prende in esame solo le caratteristiche intrinseche di pericolosità delle sostanze ai fini di una potenziale esplosione.

Dall’analisi delle planimetrie del reparto CP1, si rileva come questo presenti una classificazione delle aree ATEX così differenziata:

- Zona 2, per tutte le aree in cui sono presenti gas, vapori o nebbie infiammabili.
- Zona 22, per tutte le aree in cui sono presenti polveri combustibili.

La valutazione delle Aree ATEX, presente nel Rapporto di Sicurezza dell’Azienda ACME S.p.A, definisce direttamente i fattori dell’analisi di rischio per sorgente di emissione, facendo abbassare gli indici (-5 in entrambi casi). In riferimento ai sistemi di protezione e prevenzioni attuati dall’Azienda, è stato deciso di considerare le seguenti fonti di innesco nel reparto:

- Presenza di superfici calde.
- Scintille di origine meccanica.
- Fulmini.
- Cariche elettrostatiche.
- Correnti vaganti.
- Combustione di uno strato di polvere o di altro materiale combustibile.

La presenza di polveri combustibili in strati è stata considerata esclusivamente nelle unità R-160, R-170 e nel Reparto confezionamento Polveri, mentre trascurata nelle restanti unità. Ai fini di una corretta valutazione, le fonti di innesco prima citate, esclusa la presenza di strati di polvere non tempestivamente eliminati, sono assenti durante il “*Normale Esercizio*”, presenti, invece, con il verificarsi di “*Guasti Prevedibili o Rari*”. Questo perché nel reparto sono previsti sistemi idonei per la prevenzione delle fonti di innesco prima citate, quali:

- Impianto a Gabbia Faraday secondo normativa vigente, per la prevenzione dai fulmini.
- Collegamenti di equi potenzialità ed a terra, secondo Norme CEI CLC/TR 50404.
- Pinze di collegamento secondo normativa vigente nelle fasi di carico/scarico delle sostanze.
- Inertizzazione dell’interno dei vari Reattori e Serbatoi con Azoto.

I valori di indici di Rischio ottenuti definiscono globalmente una condizione di rischio Medio in quasi tutto il Reparto, ad eccezione delle unità R-200 e R-160, R-170. Il calcolo per la linea di idrogenazione è altamente influenzato dalle caratteristiche di pericolosità della sostanza,

(Idrogeno), che, oltre a presentare l’indice di pericolo più elevato, influenza direttamente i valori di rischio sia per sorgente di emissione che per mansione. L’assenza di dispositivi per lo sfogo diretto dell’esplosioni (dischi di rottura) non permette di abbattere il valore dell’indice. In realtà, in ogni apparecchiatura del reparto, comprese quelle della linea R-200, sono presenti PSV (Pressure Safety Valves) tarate per una pressione di apertura di 5 bar. Queste però sono esplicitamente da trascurarsi, ai fini del calcolo con Ramses 4, in quanto ritenute non sufficienti dal metodo ai fini della prevenzione da esplosione. In aggiunta, le pareti delle apparecchiature non sono progettate per resistere all’onda d’urto delle esplosioni, in quanto costituite da lamiere di acciaio inox o legato, ma non rinforzato.

Considerazioni differenti, invece, si possono fare sugli indici elevati ottenuti per il reparto R-160, R-170. Qui, le problematiche principali si hanno nella gestione della polvere di prodotto P3. Questo, presentando una granulometria molto bassa, si deposita esternamente alle pareti delle apparecchiature presenti, a causa delle perdite dalle giunzioni, come nel vibrovaglio. Il deposito di polvere non può essere trascurato in quanto, se unito all’eventuale presenza di superficie calda (probabile fonte di innesco presente), aumenta il livello di rischio dell’unità dovuto alla formazione di potenziale atmosfera esplosiva. Probabilmente una buona politica di pulizia della polvere dalle superfici di questa linea, eseguita in maniera intensiva e periodica, eliminerebbe completamente la problematica presente. Nel Reparto Polveri, invece, la presenza sporadica di personale nelle prossimità dell’unità permette di ottenere indici inferiori, che corrispondono ad una classe di rischio più bassa. In effetti, il reparto, se pur operando con caratteristiche di pericolosità riferite alle polveri abbastanza elevate, viene utilizzato ai fini produttivi molto raramente, in quanto rappresenta nella realtà una linea parallela di un’unità simile già esistente, utilizzata solo per sporadici periodi temporali.

I valori ottenuti vengono riassunti in Figura 8.1, in cui sono riportati solo gli Indici di Rischio per Mansione, che rappresentano il valore finale del calcolo secondo metodo Ramses 4.

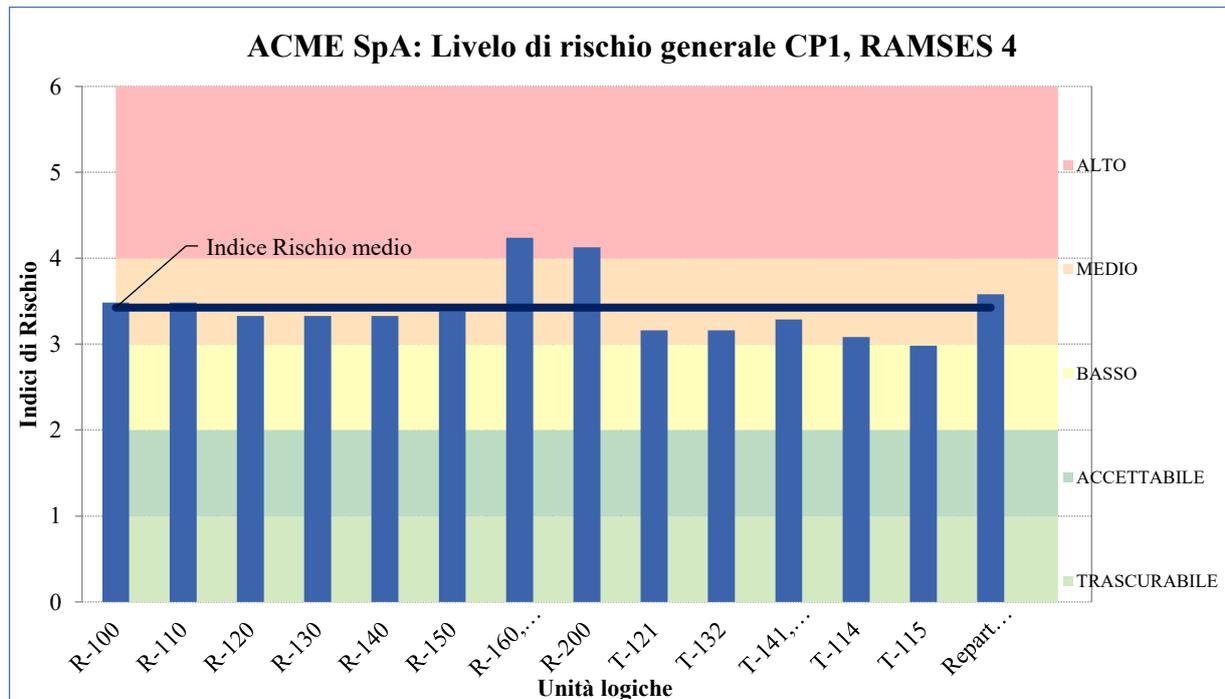


Figura 8.1: Risultati Ramses 4 per reparto CPI, con indice rischio medio.

L’indice di rischio ottenuto, mediato su tutte le unità, si attesta sul livello Medio. Questo, in prima approssimazione, può essere rappresentante dell’indice di Rischio dell’intero reparto CP1, secondo il metodo di analisi Ramses 4, che si attesta in una classe Media.

$$\text{Indice rischio CP1}_{\text{Ramses 4}} = 3,425$$

Ai fini di una valutazione più conservativa, questo Indice Medio permette di definire quali unità si presentino con valori maggiori di rischio superiori rispetto al valore medio di tutta l’unità. È su questi che si deve focalizzare l’attenzione del RSPP della società, il quale deve attuare le corrette politiche per abbassare questi indici inizialmente, almeno fino al livello medio, e successivamente, fino a valori di rischio ritenuti “accettabili”.

Il secondo metodo, utilizzato per l’analisi di rischio preliminare del reparto CP1 di ACME S.p.A., è il SW&HI (Safety Weighted Hazard Index). Questo ha richiesto la definizione dei quantitativi di sostanza chiave per ogni unità, e del relativo calore di combustione delle stesse. In realtà, visto che l’idrogeno stesso viene introdotto in continuo nella Linea di Idrogenazione, per mantenere la pressione costante (circa 30 bar) nei calcoli, invece del quantitativo di sostanza (circa 10 kg totali) è stata introdotta la portata di idrogeno a ciclo di processo, pari a 6,5 kg/h. In aggiunta, oltre ai calori di combustione reperibili facilmente in letteratura delle sostanze chiave più note (Idrogeno, Metanolo, N-Eptano), si è utilizzato il calore di combustione del prodotto di reazione P3, riferito all’unità R-160, R-170 con riferimento ad una sostanza polimerica con formula di struttura molto simile. Il calcolo con metodo SW&HI, riportato in Allegato 4, si è differenziato per tipo di unità considerata, sia esso di processo fisico, o di reazione chimica. Si evidenzia assenza di reazione chimica nell’unità R-160, R-170, maggiormente coinvolta in un processo di variazione di stato fisico del prodotto di reazione (granulatore Glatt), e naturalmente nel reparto polveri, in cui il confezionamento del prodotto solido avviene all’interno di una confezionatrice semi-manuale. I valori nella Tabella 8.3 definiscono una classe di rischio che oscilla tra Lieve e Basso per quasi tutte le unità.

Tabella 8.3: Indici di rischio SW&HI riferiti al reparto CPI di ACME S.p.A.

SW&HI		
Unità Logica	Indice	Classe di Rischio
R-100	1,19	BASSO
R-110	0,95	LIEVE
R-120	1,96	BASSO
R-130	1,96	BASSO
R-140	1,96	BASSO
R-150	1,96	BASSO
R-160, R-170	2,05	BASSO
R-200	0,34	LIEVE
T-121	1,42	BASSO
T-132	1,53	BASSO
T-141, T-151	1,51	BASSO
T-114	0,82	LIEVE
T-115	0,66	LIEVE
Reparto Polveri	6,93	MODERATO

Escluso il reparto polveri, le unità che rientrano in una classe di rischio Basso sono attinenti a apparecchiature che utilizzano N-Eptano come solvente. Questo, rispetto al Metanolo, presenta un Calore di Combustione sette volte maggiore, ma una temperatura di Flash Point nettamente minore, pari a -4°C . L’N-eptano è una sostanza facilmente infiammabile, classificata come H-225 dalla classificazione delle sostanze CLP (stessa classe del Metanolo).

Le reazioni eseguite in quasi tutte le unità, ad eccezione della linea R-200, sono delle esterificazioni in massa, con calori di reazioni molto bassi, che non superano i 100 kJ/kg. Invece, nella linea di idrogenazione, riferita all’unità R-200, la reazione eseguita è una idrogenazione di un chetone. Questa, essendo fortemente esotermica, richiede un controllo accurato di temperatura e pressione e presenta un calore di reazione abbastanza elevato, di circa 550 kJ/kg h. Nonostante questo valore sia preponderante rispetto a quello di esterificazione, la classe di rischio di questa unità è più bassa (Rischio Lieve).

Tale variazione dipende direttamente dall’utilizzo dell’Idrogeno che, anche se altamente infiammabile (H-220, Nf_{NFPA} 4), ha un calore di combustione molto basso, circa 15 volte inferiore rispetto al N-Eptano. Questo, insieme ai ridotti quantitativi di Idrogeno utilizzati per il processo (0,01 ton. rispetto ai limiti di soglia di 50 tons. di cui all’Allegato 1, Parti 1 e 2, del D. Lgs. 105/2015), definiscono un indice finale di rischio molto basso rispetto alle altre unità. Nella Figura 8.2, si evidenzia la differenza di valori tra tutte le unità di processo e il reparto di confezionamento polveri. L’analisi del risultato ottenuto con SW&HI, se da un lato fa emergere le difficoltà intrinseche del metodo di valutare l’uso di sostanze solide, ma anche l’accuratezza nel definire nell’analisi il tipo di processo svolto nel reparto di confezionamento polveri, procedura che impiega un contatto diretto dell’operatore con l’apparecchiatura e nessuna automazione. Inoltre non sono presenti sistemi di controllo, che avrebbero portato ad un aumento del fattore di credito dell’unità.

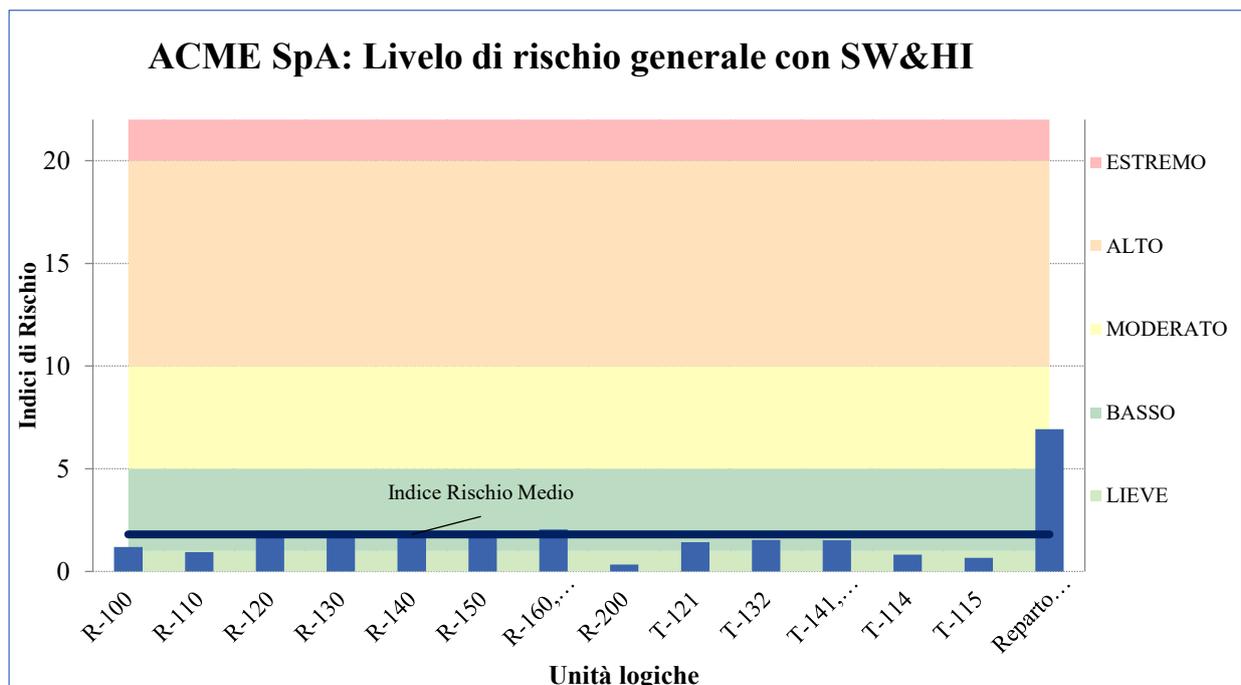


Figura 8.2: Risultati SW&HI per reparto CPI, con indice rischio medio.

Anche per questo metodo si è deciso di definire un indice medio, che permetta di avere una prima approssimazione diretta della classe di rischio dell'intero reparto. L'indice ottenuto non è fortemente influenzato dall'unico valore elevato dell'indice riferito alla stazione di confezionamento polvere, su un livello di rischio Moderato. L'indice finale invece definisce una classe di rischio Basso secondo metodo SW&HI.

$$\text{Indice rischio } CP1_{SW\&HI} = 1,81$$

È interessante valutare il caso dell'assenza del reparto di confezionamento dall'insieme dell'unità analizzate, come riportato in Figura 8.3, per ottenere un valore medio di indice di rischio del reparto CP1:

$$\text{Indice rischio } CP1_{SW\&HI} = 1,409$$

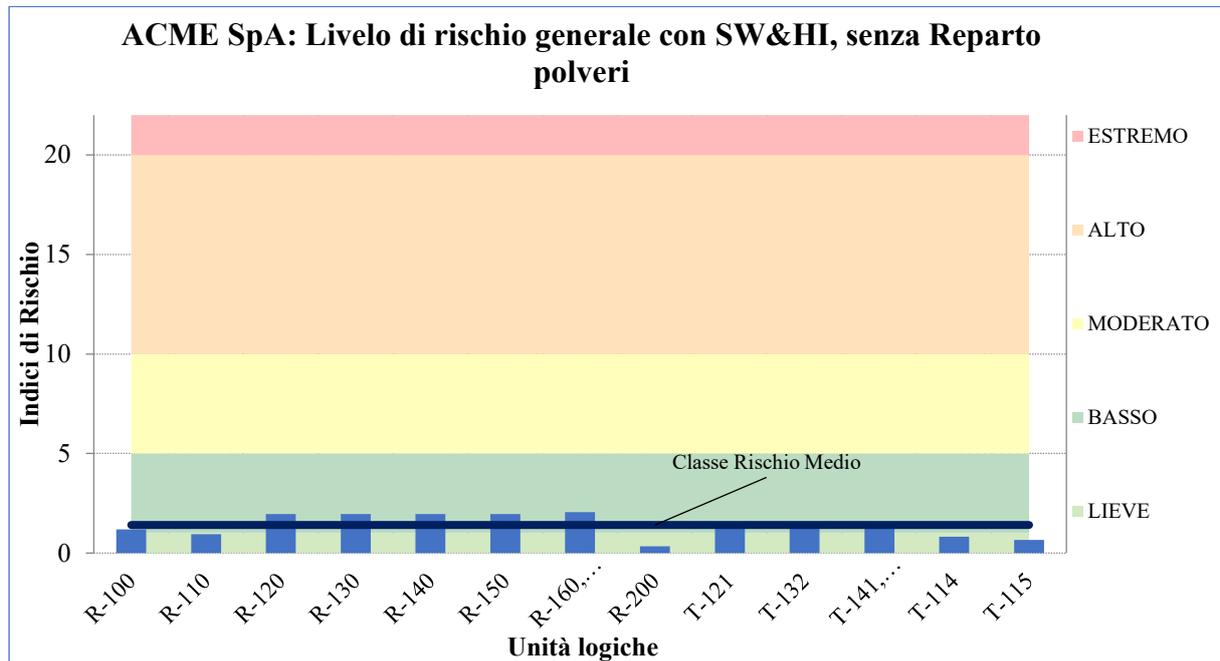


Figura 8.3: Risultati SW&HI per reparto CP1, con indice rischio medio, in assenza del Reparto di Confezionamento Polveri.

Questa scelta si basa su due considerazioni importanti:

- Il reparto di confezionamento polveri opera per brevi periodi durante l'anno e rappresenta, in realtà, la linea di confezionamento supplementare da utilizzare solo in caso di malfunzionamento della linea primaria.
- La valutazione di processi che utilizzano sostanze solide, con il metodo SW&HI, non è mai molto affidabile in quanto presenta elevate carenze in questo tipo di analisi (fattori energetici che cambiano molto tra l'utilizzo di una portata o una massa totale della sostanza, uso della tensione di vapore di un solido, ecc.).

Il valore di indice di rischio medio poco si discosta dal precedente, mantenendo comunque la medesima fascia di rischio (Basso). Un risultato rilevante però, è la presenza di unità con un livello di rischio maggiore rispetto a quello medio. Tra queste, oltre a quelle che utilizzano N-Eptano, si ritrova anche qui l'unità R-160, R-170, confermando almeno in questo caso i risultati ottenuti con la metodologia Ramses 4.

L’ultimo metodo di risk assessment utilizzato per il reparto CP1 è The Mond Index. Questo, attraverso il valore dell’indice equivalente della Dow, permetterà la definizione delle distanze di danno all’interno del reparto.

I valori di Material Factor delle differenti sostanze chiave di ogni unità dipendono direttamente dalle caratteristiche di pericolosità della sostanza e per il reparto CP1 sono:

$$MF_{\text{metanolo}} = 3,705$$

$$MF_{n\text{-eptano}} = 17,66$$

$$MF_{\text{idrogeno}} = 21$$

$$MF_{P3} = 24$$

Il valore di MF del prodotto P3, essendo questa una polvere, viene determinato direttamente dalla classe di esplosività della sostanza stessa, secondo le caratteristiche riportate in Tabella 8.4. Il prodotto P3 presenta elevato valore di Sovrappressione di esplosione, conseguenza diretta del basso valore di granulometria, conferendo elevati valori di pericolosità, principalmente in relazione alla formazione di potenziali atmosfere esplosive.

Tabella 8.4: caratteristiche di esplosione del prodotto di processo P3.

Prodotto di reazione P3	
Proprietà	Valore
Pmax (bar)	9
MIE (mJ)	1 < MIE < 3
Resistività vol. (Ω)	>84 Tera
Burning class	2
Ignition Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	290
Dust explosion class (Kst)	3 (312)

Da una prima analisi dei valori di MF, si può affermare come, nel reparto CP1, a parità di processi e di sistemi di protezione e prevenzione, le unità che operano con presenza di metanolo inducono degli indici di rischio minori rispetto alle altre unità. Questa veloce analisi trova riscontro negli indici di rischio finale Overall ottenuti, riportati in Tabella 8.5.

Tabella 8.5: Indici di rischio generale secondo Mond, riferiti al reparto CP1 di ACME S.p.A.

The Mond Overall Index		
Unità Logica	Indice	Classe di Rischio
R-100	17,9	LIEVE
R-110	19,22	LIEVE
R-120	165,24	MODERATO
R-130	169,48	MODERATO
R-140	425,99	MODERATO
R-150	425,99	MODERATO
R-160, R-170	398,72	MODERATO
R-200	6,17	LIEVE
T-121	9,58	LIEVE

T-132	35,39	BASSO
T-141, T-151	58,23	BASSO
T-114	5	LIEVE
T-115	9,88	LIEVE
Reparto polveri	65,86	BASSO

Questi valori sono quelli già comprensivi dei fattori di compensazione all'interno del reparto CP1. I livelli di rischio generale più elevato si riscontrano nelle unità con la presenza di N-eptano. In queste, avviene una reazione di esterificazione in massa dei reagenti e la presenza di una reazione chimica definisce l'intervento di una penalità aggiuntiva (fattore 50 di penalità). In queste unità si riscontra una classe di rischio Moderato, come anche in R-160, R-170, confermando i risultati precedentemente ottenuti con il metodo SW&HI. Il valore così elevato è la conseguenza della valutazione di tutte quelle problematiche inerenti il trattamento di sostanze polverose e la gestione non adeguata delle stesse (pulizia delle superfici esterne del vibrovaglio dal deposito di strati di polvere di prodotto P3). La visione globale, proposta in Figura 8.4, definisce quali apparecchiature presentano una classe di rischio maggiore rispetto a quella media. Anche qui si evidenzia la presenza, tra le altre, delle unità R-160, R-170 che richiedono l'adozione di azioni di miglioramento del grado di sicurezza, nell'ottica di un abbassamento della soglia di rischio. Per una migliore leggibilità dei valori riportati nella stessa Figura, gli indici sono espressi su scala logaritmica.

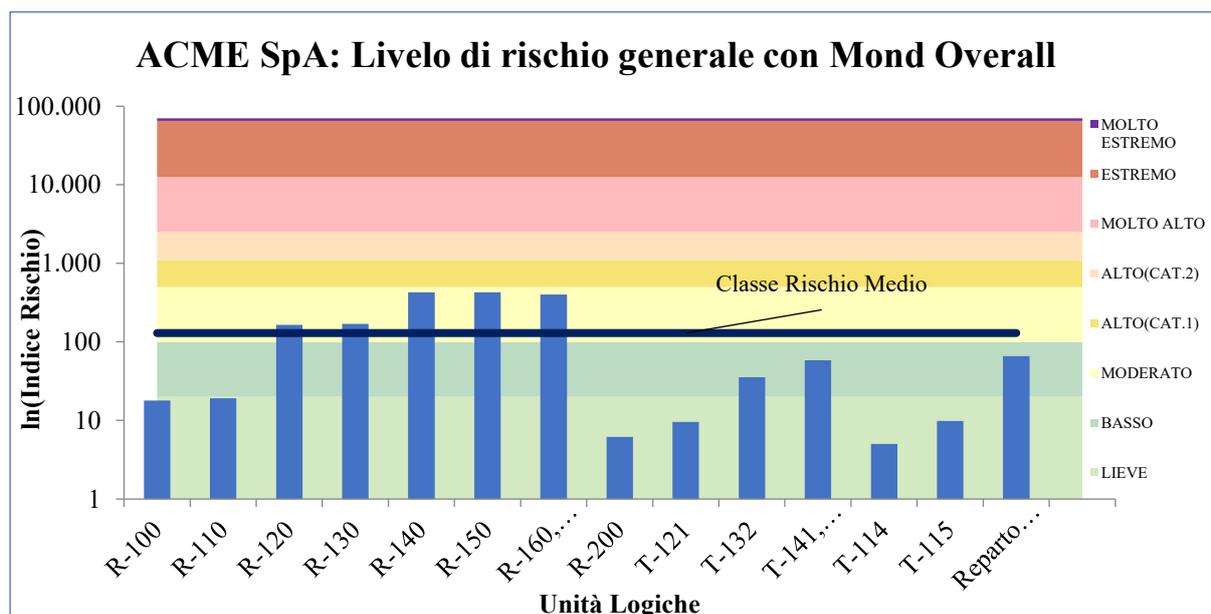


Figura 8.4: Risultati The Mond Index Overall, per reparto CPI, con indice rischio medio.

A seguito della definizione dei crediti, da attribuire in ogni unità logica, è stato calcolato l'indice di rischio equivalente della Dow, il F&EI. In Tabella 8.6, sono riportati i valori ottenuti con o senza i fattori di credito, in modo da far emergere le possibili diminuzioni delle classi di rischio che si sono ottenute.

Tabella 8.6 *Indice F&EI, riferiti al reparto CPI di ACME S.p.A., con distanze di danno per ogni unità.*

Fire and Explosion Index, Dow					
<i>Unità logiche</i>	<i>F&EI Iniziale</i>	<i>F&EI con fattori di credito</i>	<i>Variazione della Classe di Rischio Finale?</i>	<i>Classe di Rischio Residuo</i>	<i>Area di esposizione definita dall'Unità (m)</i>
R-100	25,6	15,62	No	LEGGERO	4
R-110	25,6	15,62	No	LEGGERO	4
R-120	121,86	74,49	Si	LEGGERO	19,1
R-130	121,86	74,49	Si	MODERATO	19,1
R-140	123,62	75,57	Si	MODERATO	19,4
R-150	123,63	75,58	Si	MODERATO	19,4
R-160, R-170	144,72	88,47	Si	MODERATO	22,7
R-200	111,36	61,95	Si	MODERATO	15,9
T-121	51,87	31,71	No	LEGGERO	8,1
T-132	62,36	38,12	Si	LEGGERO	9,8
T-141, T-151	65,08	39,78	Si	LEGGERO	10,2
T-114	19,85	12,13	No	LEGGERO	3,1
T-115	20,15	12,32	No	LEGGERO	3,2
Reparto polveri	156,87	95,8	Si	MODERATO	24,6

I valori ottenuti definiscono alcuni aspetti cruciali ai fini dell'analisi del livello rischio del reparto CP1:

- Variazione della classe di rischio a seguito dell'applicazione dei fattori compensativi.
- Distanza di danno residua di ogni unità.

Si può affermare come la classe di rischio in molte delle unità analizzate (R-100, R-110, ecc.) si presenti già al livello minimo possibile, e che in realtà i fattori di credito abbiano permesso di diminuire ancora di più solo l'indice finale. Inoltre, per molte di queste, si è avuta la diretta variazione della classe, con l'abbassamento, rispettivamente, da Intermedio a Moderato e da Moderato a Leggero. In aggiunta si nota come, eccezion fatta per l'unità R-160, R-170, i fattori di credito abbiano permesso la modifica verso classi più basse sempre e solo di un solo gradino, senza riuscire, ad ottenere un valore di rischio residuo minimo possibile (Rischio Leggero). Per l'unità prima citata invece, si è passati da una classe di rischio Elevato, fino ad ottenere una classe Moderato, ottenendo un declassamento di due gradini nella scala di rischio.

In figura 8.5, ai fini di agevolare il lettore nell'individuazione della variazione delle soglie, è stato riportato il livello di rischio medio dell'unità prima e dopo l'applicazione dei fattori di credito. Si è scelto volutamente di trascurare l'analisi riferita al reparto di confezionamento polveri, in quanto il suo utilizzo è sporadico nel tempo da parte degli operatori del reparto CP1.

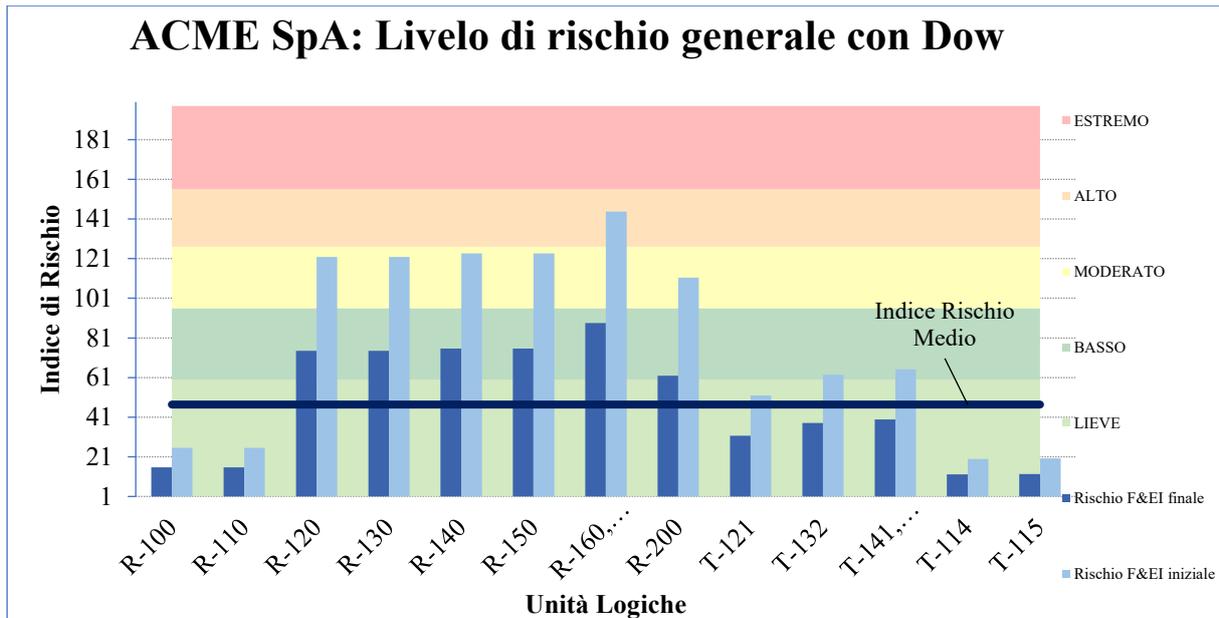


Figura 8.5: Risultati F&EI, per reparto CP1, con indice rischio medio con e senza fattori di credito.

Visivamente, è facile individuare l’elevato livello di rischio definito sempre dall’unità R-160, R-170 rispetto alle altre unità del reparto prima dell’applicazione dei fattori di credito. Il metodo indica comunque come le misure intraprese da parte dell’azienda abbiano permesso l’abbassamento di due classi di rischio per la suddetta unità, attestandosi ad un livello Basso. L’abbassamento della soglia invece, per la linea di idrogenazione (R-200), è in proporzione maggiore rispetto alle altre unità, data la presenza di sistemi di Arresto Fiamma installati attualmente solo su questa linea, che hanno indotto un livello di protezione superiore rispetto le unità dello stesso reparto.

$$\text{Indice rischio } CP1_{F\&EI} = 43,507$$

Attraverso il valore dell’indice della Dow, si possono definire direttamente i raggi delle distanze di danno di ogni unità analizzata. Questo Raggio di Esposizione definisce l’area contenente le apparecchiature, che possono essere esposte alla potenziale formazione di un incendio o di un’esplosione, generato dall’unità logica principale. L’ampiezza di queste aree, in realtà, include anche le modifiche definite per i “*Loss Coontrol Credit Factors*” che portano alla diminuzione del valore dell’indice, e di conseguenza, anche alla diminuzione del raggio.

I raggi ottenuti, invece, non dipendono dalla presenza o meno di strutture del reparto che siano o meno resistenti al fuoco o alla formazione di atmosfera esplosiva. Per questo, in Figura 8.6, le aree di esposizione rappresentate, presentano una linea tratteggiata all’esterno della struttura del reparto di produzione CP1. Le aree di esposizione con raggio maggiore, includono, al loro interno, apparecchiature che sarebbero esposte ad un potenziale effetto domino, se non opportunamente gestito. Si può considerare, ad esempio, come un potenziale evento catastrofico riguardante in primis l’unità R-160, coinvolgerebbe di conseguenza le linee R-110, R-120, R-130 e R-150, generando quindi dei potenziali effetti secondari.

Dalla planimetria completa, presente in Allegato 4, si nota come i cerchi di danno di quasi tutte le unità si estendono all’interno dei confini del reparto, ad eccezione di quelli relativi a R-160, R-170 e R-200. In aggiunta, si nota come lo spostamento delle R160, R-170 in posizioni differenti all’interno del reparto, porterebbe allo sviluppo di aree di esposizione che si

estenderebbero in ugual modo all'esterno del confine della struttura dello stesso. Contrariamente, invece, la posizione della Linea di Idrogenazione, in prossimità della struttura di confine, definisce un'area di esposizione che non coinvolge nessuna apparecchiatura di altre unità limitrofe.

La limitazione principale, che si evidenzia dall'applicazione diretta delle Aree di esposizione definite dal metodo F&EI, è l'assenza di una distinzione dei potenziali eventi incidentali che si possono generare, cioè incendio o esplosione. Questo diviene rilevante nella fase di sviluppo di sistemi che permettano un'adeguata protezione delle apparecchiature e del personale presente, consentendo una protezione mirata all'evento potenziale.

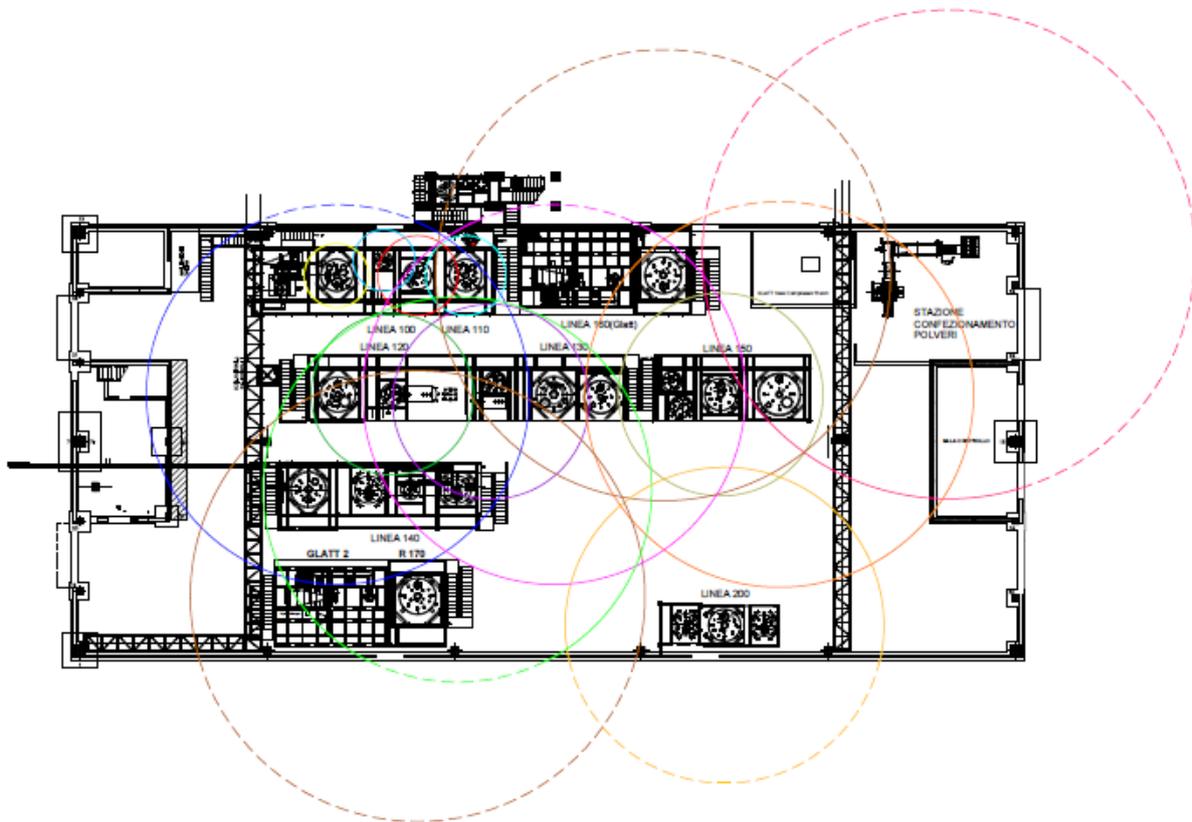


Figura 8.6: Planimetria reparto CPI, con Aree di esposizione per ogni Unità logica, secondo metodo F&EI, Allegato 4.

8.3. NRI: Normalised Risk Index

L'obiettivo finale dell'analisi di rischio del reparto CP1, è quello di definire un indice che sia il più generale possibile, in modo da individuare la Classe di Rischio complessiva presente all'interno del reparto, data dalla presenza delle diverse Unità logiche di processo precedentemente analizzate.

Questo si è reso necessario in conseguenza della disparità di valutazione dei metodi di risk assessment fin qui utilizzati, i quali non sempre hanno definito valori simili per le varie unità.

L'idea di base è quella di definire un nuovo indice di rischio generale del reparto analizzato, che comprenda i risultati ottenuti attraverso i metodi precedentemente utilizzati, normalizzando tali valori all'interno di una scala di rischio formata da 5 distinti livelli di rischio, in modo analogo alla Tabella 5.4.

Per tutto questo, gli indici di rischio medio estrapolati da ogni metodo sono stati confrontati tra loro definendo un valore complessivo che, sulla linea di una valutazione preliminare, permetta di indicare la Classe di Rischio generale di tutto il reparto CP1, cioè il *Normalised Risk Index (NRI)*.

I valori degli indici di rischio medio dei vari metodi sono stati normalizzati rispetto al loro valore massimo in modo da esprimere la valutazione attraverso una percentuale. Questa modifica si è resa possibile dato l’andamento lineare di tutti i metodi, escluso l’indice Mond Overall, rispetto le classi di rischio definite. L’indice finale della Mond, come precedentemente discusso nel Capitolo 5, definisce l’ampiezza della classe di rischio che aumenta in maniera approssimabile con una funzione esponenziale.

$$NRI = \frac{\frac{Average\ Ramses}{Max\ Ramses} + \frac{Average\ SW\&HI}{Max\ SW\&HI} + \frac{Average\ F\&EI}{Max\ F\&EI} + \frac{\ln\ Average\ Mond}{\ln\ Max\ Mond}}{4} \quad (8.1)$$

$$NRI_{CP1} = \frac{\frac{3,484}{6} + \frac{1,81}{20} + \frac{47,478}{159} + \frac{\ln\ 129,478}{\ln\ 65000}}{4} = 0,352$$

Il valore di NRI così definito, determina direttamente la Classe di Rischio di appartenenza del reparto CP1. Queste, in prima approssimazione, vengono rappresentate con ampiezza costante su una scala di valori percentuali. Dalla Figura 8.7, si può considerare che il reparto CP1 presenti un Livello di Rischio Basso.

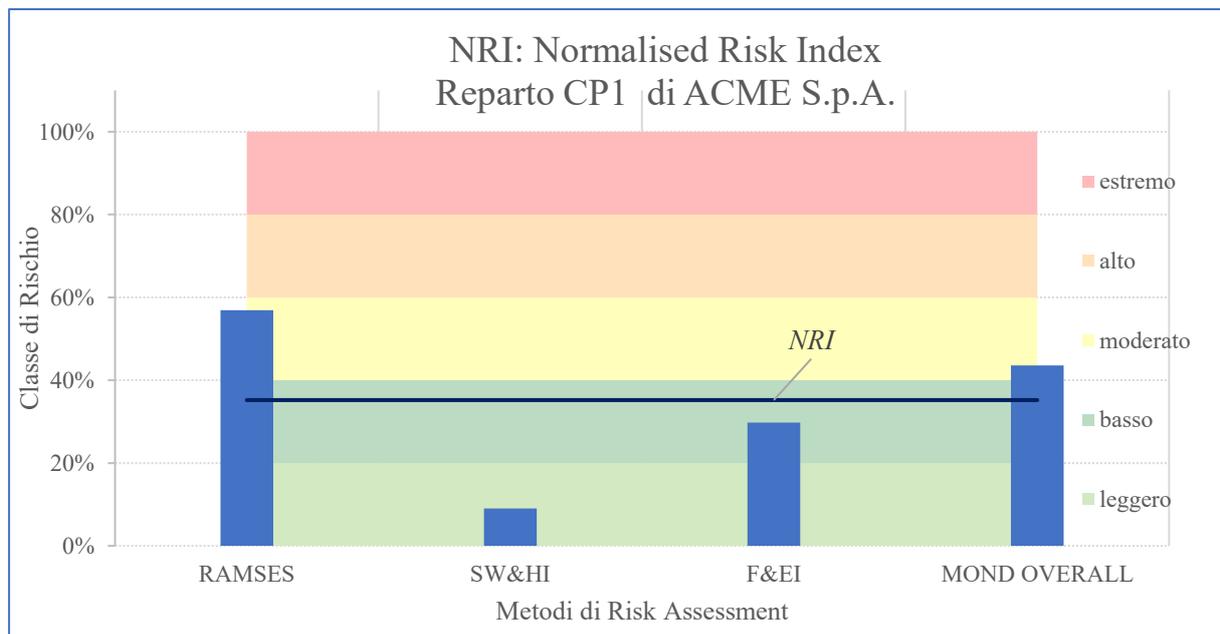


Figura 8.7: Normalised Risk Index (NRI), reparto CP1.

9. Analisi e sviluppo dei metodi per la valutazione del rischio

L'applicazione dei metodi di analisi del rischio ai tre casi studio e al reparto di processo CP1 ha permesso di esaltare tutte quelle problematiche intrinseche nei vari iter di calcolo, che possono indurre ad una valutazione non realistica del livello di rischio dell'unità. Nell'utilizzo dei 4 metodi, ci si è trovati di fronte a delle incongruenze riferite all'analisi del tipo di unità, delle condizioni di processo in cui si opera e, soprattutto, del tipo di sostanza utilizzata. La decisione nel trascurare o meno un fattore può indurre ad un giudizio troppo conservativo o, al contrario, molto ottimistico sulle problematiche nel campo della sicurezza, inducendo il personale responsabile a non proseguire ulteriormente nella valutazione del rischio con strumenti di analisi più accurati.

9.1. *La Metodologia Ramses 4*

Ramses 4 è un metodo che pone come obiettivo la valutazione del rischio di formazione di un'atmosfera esplosiva in ambito industriale, escludendo la valutazione del rischio incendio. Il metodo, adottando un tipo di approccio basato sulle Indicazioni di Pericolo (Frase H), o sulle indicazioni di Rischio (Frase R), non esamina tutte quelle classi di sostanze pericolose, fuori dalle combustibili e infiammabili, che possono in egual modo, in determinate condizioni diverse dalle standard, generare un'atmosfera potenzialmente esplosiva (quindi non descritte da frasi di pericolo). Tra le sostanze non analizzate dal metodo possiamo includere:

- Sostanze ossidanti.
- Sostanze che sviluppano gas combustibili se reagiscono con acqua.
- Sostanze stoccate in condizioni criogeniche.
- Sostanze soggette a detonazione spontanea.
- Sostanze soggette a polimerizzazione spontanea.
- Sostanze in grado di decomporsi ad alte temperature e sviluppare composti esplosivi.

Questa carenza è stata evidente principalmente nell'applicazione del metodo al caso studio di Darkem, dove sia il Solfato di Idrossilammina (H 290), che il Clorato e Perclorato di Potassio (H 271) non sono stati correttamente analizzati rispetto alle loro reali pericolosità. Per questo, ai fini di una più corretta e completa analisi, il metodo richiederebbe quanto meno l'integrazione di criteri che permetterebbero la valutazione di questi tipi di sostanze. In modo analogo agli altri metodi di Risk Assessment, si potrebbe pensare di adottare un approccio fondato sulla classificazione delle sostanze secondo lo Standard NFPA 704 [10], il quale, nel nostro caso, assegna un valore elevato di reattività alle due sostanze prima citate (2 per il Solfato, 3 per il Clorato/Perclorato di Potassio).

In aggiunta, il metodo dimostra l'incapacità di valutare, simultaneamente, la presenza di più sostanze nello stesso sito, o almeno di identificare secondo un principio comune, quella che può ritenersi la "Sostanza Chiave". Dato che ogni indice ottenuto (sostanza, sorgente emissione e mansione) dipende progressivamente da quello precedente, l'assenza di questo fattore viene riscontrata non solo nell'indice di pericolo per le sostanze, ma anche nell'indice di rischio per mansione (quella riferita al personale presente). Il metodo inoltre, trascura il quantitativo di

sostanza presente nell'unità, soffermandosi solo sulle caratteristiche di esplosività delle stesse (Pmax, MIE, Kst, ...).

L'indice per la sorgente di emissione non considera l'unità di processo. In aggiunta, le variazioni delle condizioni operative, come variazioni di Temperatura o Pressione, non rientrano nei parametri valutabili dal metodo, se non indirettamente con la modifica delle caratteristiche specifiche di pericolosità di ogni sostanza (ad esempio per la Velocità di fiamma o la Sovrappressione di esplosione). La temperatura del processo esaminato, se maggiore rispetto ai valori di Flash Point della sostanza, assume un ruolo essenziale ai fini della valutazione del rischio e, se un suo incremento non è correttamente controllato, potrebbe indurre la formazione di vapori, in quantità tale da sviluppare fenomeni di combustione, in presenza di un innesco.

L'indice di rischio per mansione (IR_{E-M}) trascura il numero di persone che possono essere potenzialmente coinvolte in una eventuale esplosione, ma tiene conto solo della loro vicinanza all'atmosfera potenzialmente esplosiva. Questa considerazione deriva dall'evidenza di un'approssimativa valutazione dei fattori mitigativi, che possono diminuire l'entità di un potenziale danno da esplosione, rispetto gli altri metodi analizzati. Mentre, un aspetto positivo riguarda certamente le considerazioni e penalità aggiuntive, sulla qualità delle fonti dei dati di Input; questo è un tipo di analisi non presente in nessun altro metodo.

Complessivamente nella fase applicativa, sia nei casi studio degli incidenti realmente avvenuti, che nel reparto di processo CP1, si individuano dei punti di analisi con delle scelte da effettuare molto soggettive, che portano ad un ampio spettro di variabilità degli indici di rischio finale. In ultimo, il metodo è risultato estremamente conservativo, rispetto a tutti gli altri metodi di analisi del rischio utilizzati, restituendo degli indici finali, in proporzione, sempre superiori. Ne è evidenza ad esempio l'Indice di Rischio Medio ottenuto per il reparto di processo CP1, che si colloca nella fascia di Rischio Moderato-Alto. L'indice finale del caso studio Carmagnani, ottenuto con il presente metodo, è il massimo possibile, nonostante in realtà non si sia riusciti a valutare tutti gli aspetti salienti del caso studio, e che comunque, come tipologia di evento, ha avuto un impatto minore rispetto agli altri incidenti analizzati, in termini di energia sviluppata.

9.2. SW&HI: Safety Weighted Hazard Index

Il metodo SW&HI, a differenza di Ramses 4 ha una visione più di insieme dell'Unità di Processo e della potenziale formazione di un'atmosfera esplosiva o di un incendio.

La valutazione inizia dall'individuazione del tipo di unità in cui si opera (stoccaggio, trasporto, reazioni fisico/chimiche), e prosegue con l'identificazione della Sostanza principale rispetto a tutte quelle presenti. È in base alle sue caratteristiche di pericolosità (Flash Point, Temperatura di Autoaccensione, Tensione di Vapore), che vengono valutate le condizioni di Temperatura e Pressione di processo. La definizione del fattore "*Hazard Potential*" si basa sull'identificazione dei "*Fattori Energetici*", ampiamente discussi nel presente lavoro. Si è potuto constatare come, in base all'equazione 2.10, che descrive il termine F3, all'aumentare della Temperatura vi sia una diminuzione del Fattore Energetico stesso. Questo andamento è in contrasto con il concetto di base secondo cui all'aumento della Temperatura corrisponda un aumento del pericolo indotto dal Gas/Vapore o Liquido. In aggiunta, oltre ad un effetto diretto, l'aumento di Temperatura influisce sulla Tensione di Vapore della Sostanza, che porta ad un ulteriore abbassamento di F3. Numericamente, si ha solo una parziale compensazione di tale abbassamento di indice di rischio indotto, attraverso il fattore penalità pn1.

Molte delle penalità definite dal metodo, sono influenzate dalla NFPA 704 Rating. Il concetto di base è quello secondo cui all'aumento degli indici di Reattività e Infiammabilità definiti dallo Standard NFPA, corrisponda un aumento del valore delle penalità attribuite. Attraverso i vari grafici, presenti nel manuale del metodo, il valore finale della penalità è di facile individuazione in proporzione al rapporto N_f/N_r .

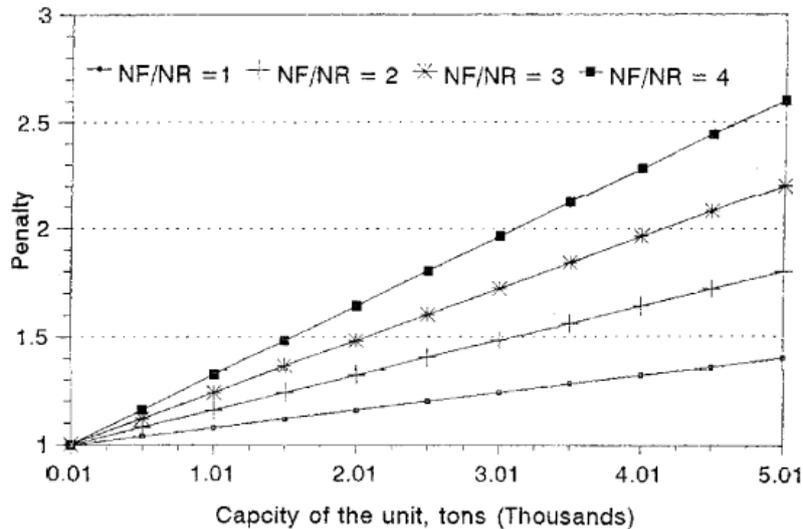


Figura 9.1: penalità da attribuire in funzione della quantità di sostanze, con riferimento al metodo SW&HI [5].

Nel caso in cui uno dei due indici sia nullo, si generano però delle incongruenze, nella definizione della penalità per la quantità di sostanza. La scelta effettuata nel presente lavoro, può essere così schematizzata:

Se: $N_f/N_r \rightarrow \infty$ Si utilizza retta: $N_f/N_r = 4$

Se: $N_f/N_r \rightarrow 0$ Si utilizza retta: $N_f/N_r = 1$

La carenza principale, riscontrata nell'utilizzo del metodo SW&HI, è quella relativa alla difficoltà di valutazione di unità operanti con sostanze solide. Il metodo, come stessa ammissione degli autori, si sviluppa partendo dalla definizione dei "Fattori energetici", che basano le loro espressioni sullo studio di "complesse equazioni termodinamiche per l'espansione isoentropica di gas e liquidi pressurizzati". Effettivamente, nell'applicazione del metodo stesso, ogni qual volta si valuti Unità con presenza di sostanze solide, si ottengono dei giudizi che si discostano notevolmente dai risultati degli altri criteri di risk assessment. Esempi rilevanti sono i risultati della valutazione del caso studio "Darkem" o l'analisi della soglia di rischio della stazione di confezionamento polveri del reparto di processo CP1. I Fattori Energetici, anche se sviluppati per gas, vapori e liquidi, possono essere comunque impiegati per l'analisi dei solidi, come proposto nel manuale solo per le Unità di Trasporto e non per i tipi di unità presi in esame (stoccaggio, processi fisici, reazioni chimiche).

9.2.1 Proposte di modifica per il metodo SW&HI

Sarebbe utile definire delle modifiche e/o integrazioni del metodo stesso, soprattutto per quanto riguarda:

- Polvere combustibile,
- Solidi capaci di dare detonazione di massa.

Secondo la norma CEI 31-88 [22], si definisce Polvere Combustibile: “*particelle solide finemente suddivise, di dimensioni nominali uguali o inferiori a 500 µm, che possono essere sospese nell’aria, possono depositarsi nell’atmosfera a causa del peso proprio, possono bruciare o divenire incandescenti e possono formare miscele esplosive con l’aria a pressione atmosferica e temperature normali.*” Quando una polvere non può creare nubi esplosive, rimane da valutare il pericolo di incendio dello strato.

La caratterizzazione della pericolosità di una polvere combustibile, passa dalla determinazione della sua granulometria. Si è deciso, in fase preliminare, di introdurre uno sviluppo ulteriore del metodo, inserendo una penalità aggiuntiva in funzione della Granulometria della polvere della sostanza solida considerata.

Si è definito un fattore aggiuntivo di penalità (pn_{gr}), funzione della granulometria, nella determinazione dell’Hazard Potential (HP), termine principale della definizione del valore finale di indice di rischio, come effettuato in 9.1:

$$HP = (F1 + pn1 + F * pn2 + F4 * pn9 * pn10) * pn3 * pn4 * pn5 * pn6 * pn7 * pn8 * pn_{gr} \quad (9.1)$$

Il fattore pn_{gr} deve essere introdotto solo quando la sostanza chiave, ai fini dell’analisi del rischio, presenta quelle caratteristiche definite dalla norma CEI 31-88 precedentemente enunciate. Se la sostanza chiave, invece, si presenta come un solido di dimensioni maggiori (ad esempio sotto forma di pastiglie) il termine pn_{gr} non è rilevante e, quindi, viene posto unitario. L’applicazione del termine introdotto viene proposta nella valutazione della stazione di confezionamento polveri del reparto di processo CP1. Secondo quanto definito in Tabella 9.1, pn_{gr} è compresa in un intervallo da 1 a 2. Con una granulometria della polvere compresa tra i 100 e i 200 µm, molto fine e assimilabile a quella del prodotto P3 (riferendosi al reparto di processo CP1), si ottiene un aumento dell’indice finale fino al valore di 8, senza variazione comunque della classe di rischio (Moderato).

Tabella 9.1: Proposta di modifica del metodo per l’analisi della granulometria delle polveri. Caso studio Reparto polveri.

Granulometria (µm)	pn_{gr}	Hazard Potential	BI	SW&HI
>1000	1	271649	308,3	6,9
500 ÷ 1000	1,1	298814	318,2	7,2
200 ÷ 500	1,4	380309	344,9	7,8
100 ÷ 200	1,6	434639	360,6	8,1
20 ÷ 100	1,8	488969	375,0	8,4
<20	2	543298	388,4	8,7

Il valore dell’indice di rischio (SW&HI) non viene modificato rispetto al valore iniziale ottenuto, se la sostanza non presenta i pericoli prima descritti sulla potenziale formazione di atmosfera esplosiva (granulometria > 1000 µm). La norma indica che, anche se si può trascurare il pericolo di atmosfere esplosive, rimane da valutare la formazione di un incendio dello strato di polvere combustibile. Per questo, il valore di penalità è stato attribuito, anche se minimo, a delle polveri con dimensioni comprese tra 500 e 1000 µm, che possono essere combustibili e generare un incendio dello strato. Infine si noti come il valore dell’indice di rischio cresce di circa 2 punti, se si è in presenza di polveri con una dimensione delle particelle molto fine.

In aggiunta a quanto appena definito per le polveri, si possono introdurre delle penalità aggiuntive, nella metodologia di calcolo, da utilizzare in presenza di sostanze con caratteristiche ossidanti, o con caratteristiche esplosive/detonanti:

- pn_{ox} : penalità riferita alle caratteristiche ossidanti delle sostanze.
- pn_{exp} : penalità riferita alle caratteristiche esplosive o detonanti delle sostanze.

Queste due penalità e i pesi a loro attribuiti, vengono definite in base alle linee guida dell'Allegato II del D.P.C.M. 31/03/89 [7], che indica i fattori di penalità da introdurre in presenza di sostanze con caratteristiche definite "speciali". I valori qui riportati, sono stati modificati per rientrare nel campo di validità del metodo SW&HI. Per ottenere un range di applicabilità, i valori delle due penalità vengono espressi come in Tabella 9.2.

Tabella 9.2: Proposta di modifica del metodo per l'analisi delle proprietà esplosive e ossidanti delle sostanze.

<i>Penalità introdotta</i>	<i>Valore</i>	<i>Condizioni di applicazione</i>
pn_{ox}	1,2	Se la sostanza presenta delle caratteristiche ossidanti, o sia un perossido con SADT < 90°C.
pn_{exp}	1,6	Se la sostanza deflagra o ha proprietà Propellenti in fase condensata. (Tabella 6 D.P.C.M. 31/03/89).
	$1,5 < pn_{exp} < 2$	Se la sostanza può detonare nelle condizioni di esercizio in fase condensata. (Tabella 6 D.P.C.M. 31/03/89).

La scelta del valore di Self Accelerating Decomposition Temperature (SADT) deriva da una raccolta dati effettuata sulle temperature di decomposizione di tutti i principali perossidi utilizzati nelle industrie di processo. Ci si è accorti come questi presentino tutti una SADT all'incirca minore di 90°C.

Quelle citate, sono solo alcune delle integrazioni che si potrebbero introdurre per permettere una corretta valutazione di unità operanti con sostanze solide. In realtà, quelli indicati, sono risultati dei fattori rilevanti ai fini delle valutazioni condotte in questo lavoro, che avrebbero definito una soglia di rischio più o meno elevata in base alla caratteristica introdotta

Nel caso in cui le sostanze presenti non presentassero nessuna delle caratteristiche qui definite, i fattori di penalità introdotti assumerebbero valore unitario e il loro contributo si annullerebbe completamente. Le penalità introdotte concorrono, anch'esse, all'aumento del HP secondo quanto riportato in equazione 9.2:

$$\text{Hazard Potential} = (F1 + pn1 + F * pn2 + F4 * pn9 * pn10) * pn3 * pn4 * pn5 * pn6 * pn7 * pn8 * pn_{gr} * pn_{ox} * pn_{exp} \quad (9.2)$$

L'applicazione diretta delle penalità descritte è stata effettuata nel caso studio Darkem, in cui si è sviluppata una esplosione primaria generata dalla presenza del Solfato di Idrossilammina. Questa non è considerata come sostanza esplosiva dallo standard europeo di classificazione delle sostanze CLP. In presenza di surriscaldamenti superiori alla sua temperatura di

decomposizione, però, può generare esplosioni con notevole rilascio energetico, a seguito dello sviluppo del composto Idrossilammina. Nella realtà dell'evento si è sviluppata una specie di detonazione massiva del composto nell'unità di stoccaggio dei prodotti solidi. Per questo si è deciso di attribuire il peso massimo alla penalità pn_{exp} , secondo quanto riportato in Tabella 9.3.

Tabella 9.3: Valori di Hazard Potential e B1 definiti a seguito della modifica del metodo SW&HI per il caso studio Darkem.

	Originale	Modificando con $pn_{exp}=2$
Hazard potential	836179	1672358
B1	448,4	565
SW&HI	190,6	240,2

I valori ottenuti, che escludono la valutazione dei sistemi di protezione e prevenzione, non rilevanti per i fini proposti, definiscono un aumento del valore finale di B1 di circa il 26 % rispetto al valore iniziale. È questo termine quello che direttamente definirà il livello di rischio e un'area di esposizione maggiore.

9.3. The Mond Index

Il metodo The Mond Index è probabilmente il metodo più completo tra quelli analizzati, o che comunque ha permesso una valutazione più dettagliata delle condizioni di potenziale pericolo che si possono sviluppare in un'industria di processo. Questo rappresenta l'evoluzione del metodo proposto dalla Dow, ma anche la base per lo sviluppo del D.P.C.M. 31/03/89 con solo delle piccole differenze applicative. La valutazione effettuata con questo metodo risulta più precisa e veloce, grazie soprattutto al dettagliato manuale di applicazioni operative del metodo stesso.

Oltre ad una completa analisi delle caratteristiche di pericolosità di tutte le sostanze, si possono esaminare le caratteristiche strutturali dell'unità logiche presenti, a differenza di tutti gli altri metodi. Il metodo permette inoltre, una buona e dettagliata classificazione e valutazione di tutti quei fattori mitigativi che possono diminuire l'entità di un potenziale danno da esplosione, incendio o rilascio tossico.

Nella fase applicativa del metodo ai diversi casi studio, invece, si evidenziano delle problematiche iniziali nella determinazione dell'indice di rischio incendio, secondo lo standard di calcolo proposto dal metodo, in quanto tale fattore dipende sia dal tipo e dalla quantità della sostanza, che dalla "Working Area". Questo parametro, determinato attraverso le linee guida definite nel manuale, ha restituito un indice di rischio incendio spesso molto basso, anche se la sua valutazione è stata la più conservativa possibile. Tutto ciò dipende dalla proporzione diretta tra la Working Area e l'indice di rischio incendio, secondo l'equazione 9.3:

$$F = \frac{B * K}{N} \quad (9.3)$$

Dove:

- B: Material Factor della sostanza.
- K: Quantità di sostanza, espresso in Tons.
- N: Area di esercizio, espressa in m².

Per risolvere tale problema si è deciso di adottare un approccio consigliato dagli specialisti del settore di Tecsra Srl, considerando, in assenza di dati confrontabili, un'area di lavoro pari alla lunghezza della linea per uno spessore di circa 0,5 m. Nella valutazione per Thyssen-krupp ad esempio si è utilizzata la lunghezza della linea idraulica per una sezione media dei tubi di circa 30 mm, compromesso tra la sezione interna dei flessibili e quella dei pistoni idraulici, ottenendo degli indici di rischio incendio finale accettabili.

9.4. Sensibilità dei metodi alle variazioni dei parametri di processo

Per valutare la risposta degli indici alla variazione di differenti parametri si è inizialmente deciso di modificare la Pressione di esercizio nei diversi casi studio. Tale analisi è stata effettuata solo per Carmagnani e Thyssen-Krupp, in quanto le sostanze chiave di questi casi studio sono fluidi, maggiormente sensibili alla variazione della pressione rispetto al caso studio di Scarmagno (Darkem), in cui tutte le sostanze erano esclusivamente allo stato solido.

9.4.1. Variazione di Pressione

Nel caso studio Carmagnani si è ipotizzata una pressione di stoccaggio della sostanza di 10 bar, a differenza della reale pressione atmosferica. Si nota subito che tale variazione, come precedentemente affermato, non incide direttamente sull'utilizzo del metodo Ramses 4, ma solo sulla modifica di alcune caratteristiche delle sostanze analizzate.

La variazione di Pressione, nel metodo SW&HI, modifica sia i fattori energetici F2, F3, sia la penalità pn2. In generale, si è riscontrato che l'aumento, anche se notevole, dei fattori precedenti, non corrisponde ad un aumento proporzionale dell'indice finale di rischio. Questo comportamento è imputabile al peso dei vari termini nell'espressione del Hazard Potential, in cui i termini energetici sono sommati al prodotto " $F1 * pn1$ ", che ha sempre in tutti i casi studio, un valore superiore di diversi ordini di grandezza. Comportamento simile si determina con la variazione della Tensione di Vapore della sostanza, la quale definisce anch'essa un aumento della penalità corrispondente (pn2) e del termine energetico. Si può affermare quindi che, riferendosi ad una unità di stoccaggio, il metodo sia effettivamente poco sensibile alla variazione di pressione.

In F&EI, la pressione modifica direttamente la "Pressure penalty", aggiungendo un fattore in funzione del tipo di sostanza (liquido infiammabile) e della pressione stessa, determinato attraverso il grafico corrispondente. Si ha un aumento di circa il 16% dell'indice, come riportato in Tabella 9.4, che comporta direttamente anche una variazione della fascia di rischio.

Applicando la modifica all'indice della Mond, si nota un comportamento particolare dei diversi indici definiti dal metodo. Mentre l'indice di incendio rimane inalterato a qualsiasi variazione di pressione, i restanti due indici aumentano di diversi punti percentuali il loro valore. L'effetto predominante lo si nota nell'aumento dell'indice di Rischio generale, che aumenta del 79% circa. Possiamo quindi affermare che nel caso studio Carmagnani, l'indice Mond viene notevolmente influenzato dalla variazione della pressione di esercizio.

La pressione, nel caso studio della Thyssen-krupp, invece di essere decuplicata, è stata solo raddoppiata rispetto al suo valore massimo. Questo perché l'unità considerata lavorava a una pressione di 140 bar e portarla ad una pressione di 1400 bar poteva essere una considerazione poco realistica dal punto di vista impiantistico, richiedendo strutture completamente differenti. Per questo è stata utilizzata una pressione di circa 280-300 bar.

In SW&HI, con una P= 280 bar, si ha un aumento notevole di F3, ma a differenza del caso studio precedente, la penalità pn2 rimane invariata. Ciò è dovuto al metodo di calcolo della penalità (che tiene conto della Tensione di vapore), che differisce se si considera un'unità di stoccaggio, o come in questo caso, un'unità in cui si eseguono operazioni fisiche. L'indice finale presenta un aumento percentuale del 12% del suo valore, mantenendo sempre la fascia massima di rischio tra quelle indicate.

In F&EI, l'indice rimane sostanzialmente invariato, in quanto la penalità riferita alla pressione ha già un valore abbastanza elevato. Diverso sarebbe stato il caso in cui, a titolo di esempio, la pressione fosse stata superiore ai 700 bar, in cui l'indice avrebbe assunto il valore di circa 98 e si sarebbe ottenuto un aumento diretto della fascia di rischio da Moderato a Intermedio.

In conclusione, si può affermare che il metodo che è risultato più sensibile alla variazione della pressione di esercizio è sicuramente il The Mond Index. Il valore elevato di Indice di Rischio raggiunto dal SW&HI in Thyssen-Krupp, dipende probabilmente dalla variazione del metodo di calcolo rispetto al caso studio Carmagnani (da unità di stoccaggio a unità in cui si eseguono operazioni fisiche), e dal tipo di sostanza analizzata (o dalla sua Tensione di Vapore), ma non da una sensibilità intrinseca del metodo.

Tabella 9.4: Variazione % degli indici di rischio all'aumento della Pressione di esercizio.

	<i>SW&HI</i>	<i>F&EI</i>	<i>MOND EXP</i>	<i>MOND GEN</i>
<i>Carmagnani</i>	0,002 %	15,8 %	3,6 %	78,9 %
<i>Thyssen-krupp</i>	12,4 %	3,8 %	2,3 %	13,9 %

9.4.2. *Variazione di Temperatura*

La variazione della temperatura di esercizio è stata effettuata nella valutazione di tutti e tre i differenti casi studio. Si è deciso di ipotizzare una temperatura modificata di 100°C sia nel caso studio di Carmagnani che in quello Darkem. Le valutazioni sono risultate abbastanza simili, in quanto in entrambi la temperatura di stoccaggio coincideva con quella ambiente. Nella valutazione del caso studio Thyssen-krupp invece, si è deciso di considerare una temperatura di 200°C, doppia rispetto alla precedente, in quanto la temperatura di partenza era superiore (circa 40°C).

Nel caso Carmagnani, la variazione in Ramses 4, come per la pressione, è evidente solo con effetti indiretti, modificando ad esempio la velocità di fiamma. In SW&HI, si ha la variazione della penalità pn1, determinata in base alla relazione tra temperatura di esercizio, Flash Point, Fire Point, e temperatura di autoaccensione. Si ha anche una modifica di F3, che in realtà diminuisce all'aumento della Temperatura, sia direttamente, che indirettamente, attraverso la tensione di vapore, come si nota dall'espressione 2.10. Essendo comunque la temperatura poco elevata, tale cambiamento è influente ai fini della valutazione. L'aumento della temperatura comporta un aumento di circa il 10% dell'indice, ma non permette una variazione della fascia di rischio. In F&EI non si ha nessuna variazione di penalità diretta con la temperatura, ma solo una valutazione in relazione alla temperatura di Flash Point, già precedentemente considerata prima della variazione, in quanto il liquido è infiammabile. Infine, The Mond Index, tiene conto dell'aumento della temperatura, ma sempre in relazione alla Temperatura di Flash Point e alla temperatura di Autoaccensione. Infatti l'aumento della temperatura fino a 370°C (la

temperatura di Autoaccensione della sostanza) causa l'attribuzione di una penalità aggiuntiva di 35.

Per il caso studio Darkem, con il metodo SW&HI, la temperatura influisce sul parametro F3, anche se in termini irrilevanti essendo la sostanza solida. Invece si ha un aumento di pn1 fino a 1.55, considerando un Flash Point > 93°C (Nf= 1). Tutto ciò, comunque, porta a una variazione trascurabile dell'indice finale. In F&EI, trattandosi di sostanza solida, la valutazione dipende molto dalla granulometria e non dalla temperatura. Per lo stesso motivo, nell'indice della Mond, la penalità attribuita (25) con l'aumento della temperatura è minore rispetto alla presenza di sostanze liquide. Si può ulteriormente considerare come la resistenza dei serbatoi delle sostanze stoccate (sacchi di plastica), diminuisca di almeno il 25% con l'aumento della temperatura, portando ad una minima penalità pari a 10.

In ultimo, per il caso Thyssen-krupp, con l'aumento della temperatura, il valore di F3 può diminuire, anche se la riduzione è anche qui trascurabile. Il valore di pn1, calcolato con la temperatura aumentata, cresce notevolmente (1.95), in quanto la temperatura di esercizio aumentata è maggiore di 0,75* Temperatura di Autoaccensione. In The Mond Index, la temperatura aumentata comporta l'attribuzione di una penalità aggiuntiva (25), in quanto il valore è superiore alla temperatura di Flash Point della sostanza.

In conclusione, si può affermare come l'indice di Rischio e Pericolo che risente maggiormente dell'aumento della temperatura, sia il The Mond Index. SW&HI presenta un aumento indiretto dell'indice, cioè non dovuto all'aumento della sola temperatura, ma bensì della relazione di questa con le caratteristiche di pericolosità della sostanza. Il F&EI non è assolutamente sensibile a tali variazioni, lasciando invariato il valore dell'indice. In generale comunque, per tutti i metodi, si nota una bassa sensibilità degli stessi a piccole variazioni della temperatura. Le variazioni percentuali ottenute, attenendosi alle indicazioni prima descritte sono riportate in Tabella 9.5.

Tabella 9.5: Variazione % degli indici di rischio all'aumento della Temperatura di esercizio

	<i>Aumento % di Temperatura</i>	<i>SW&HI</i>	<i>F&EI</i>	<i>MOND EXP</i>	<i>MOND GEN</i>
<i>Carmagnani</i>	400 %	10,8 %	0 %	0 %	8 %
<i>Darkem</i>	400 %	0 %	0 %	2,4 %	18,8 %
<i>Thyssen-krupp</i>	400 %	14,3 %	0 %	3,2 %	27,9 %

10. Conclusioni

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di fornire le basi necessarie per lo sviluppo di nuove metodologie per la valutazione del rischio, attraverso le applicazioni di metodi esistenti a diverse realtà (esistenti e casi studio di incidenti) che possano considerare un ampio range di settori industriali, non solamente riferito a impianti definiti sotto la denominazione di Aziende a Rischio di incidente Rilevante (Seveso II).

Le valutazioni condotte hanno permesso di definire i limiti principali dei metodi utilizzati, sia nel compiere un tipo di analisi post evento incidentale, e sia nella valutazione di un'unità di processo chimico. In fase operativa, l'insieme delle informazioni raccolte sulle carenze dei quattro metodi utilizzati ha permesso di sviluppare delle nuove proposte di modifica degli iter di calcolo, che sono state applicate come modifiche ad uno dei metodi.

Ramses 4 si è dimostrato un metodo indicizzato di analisi del rischio non di facile applicazione alle diverse realtà industriali. Il suo utilizzo comporta un alto grado di soggettività, restituendo dei risultati non perfettamente coincidenti con la realtà dei fatti. La sua applicazione viene limitata dalla limitata capacità di considerare certe tipologie di sostanze e dalla non perfetta valutazione dei termini di credito che permettono un abbassamento dell'indice stesso, con la totale mancanza di elementi essenziali ai fini della valutazione del rischio (si veda l'assenza di valutazione delle condizioni operative di Temperatura o Pressione e di alcune tipologie di sostanze, o l'incapacità di valutare la presenza di più sostanze nella stessa unità). Tra i metodi proposti è l'unico che si basa sulla classificazione CLP delle sostanze, invece che sulla classificazione definita dallo standard NFPA 704.

L'utilizzo di SW&HI ha evidenziato la difficile applicazione del metodo ad unità in cui si processano o si stoccano sostanze solide. SW&HI ha restituito degli indici finali con Classi di Rischio Alto-Estremi, per i casi studio di incidenti, e Classi Lievi-Basse per il reparto di processo. Tale differenza rispecchia fedelmente lo stato dei fatti, e rappresenta la naturale conseguenza della dettagliata valutazione che si è potuta intraprendere dei termini di credito relativi ai sistemi di protezione e prevenzione intrapresi dalle Aziende tutte. Le penalità attribuite per problematiche sociali e eventi naturali rappresentano un'innovazione rispetto altri metodi di Risk Assessment, avvicinandosi a quanto richiesto per lo sviluppo di un Rapporto di Sicurezza aziendale.

Le integrazioni che sono state proposte per SW&HI, nel presente lavoro, stabiliscono un buon punto di partenza per l'analisi di sostanze con caratteristiche "speciali" pericolose e permettono di includere considerazioni inerenti la formazione di potenziali atmosfere esplosive di polveri.

Il F&HI della Dow è probabilmente la base, dal punto di vista temporale, dei diversi metodi di Risk Assessment sviluppati nel corso degli anni. L'applicazione del metodo agli incidenti avvenuti ha restituito degli indici di rischio molto bassi rispetto l'entità degli eventi occorsi, evidenziando un approccio poco conservativo. Caso emblematico è il valore ottenuto nel caso studio Thyssen-krupp, indicante una condizione di rischio Lieve, il più basso possibile della scala di rischio proposta dal metodo.

Questo probabilmente deriva dalla definizione del MF della sostanza n-nonadecano che, essendo molto basso, modifica direttamente l'indice finale. La scarsa influenza delle variazioni delle condizioni di esercizio sulla definizione della classificazione della sostanza costituisce un errore di sottostima delle potenzialità di pericolo della stessa. Ciò si riscontra anche nella definizione dell'Area di esposizione ottenuta, in questo caso molto inferiore rispetto quella stimata numericamente nelle Perizie Tecniche [16]. L'utilizzo di un MF, determinato con le direttive definite dal metodo Mond, restituisce invece un'Area di esposizione molto più simile rispetto a quella stimata.

The Mond Index rappresenta probabilmente il metodo più completo tra quelli proposti. La valutazione delle sostanze presenti ha definito degli indici di rischio generali, che rappresentano coerentemente la gravità degli eventi accaduti. Gli indici, in Darkem e Thyssen-krupp, sono di un ordine di grandezza superiore rispetto a quanto riscontrato in Carmagnani.

Si nota come il valore maggiore dell'indice di esplosione del metodo Mond sia riferito al caso Darkem, ed effettivamente corrisponde al reale scenario (esplosione dell'intero capannone), il quale poteva essere evitato, forse, con una semplice analisi del rischio che avrebbe fatto emergere tutte le problematiche presenti.

Nella valutazione del livello di rischio relativo all'intero reparto, invece, trascurando quanto ottenuto con Ramses 4 (molto conservativo), il metodo della Mond ha presentato, in proporzione, i valori di indice più elevati delle unità tra i metodi proposti. Le aree di esposizione definite per ogni unità, si limitano quasi completamente all'interno dei confini del reparto CP1, ad esclusione dell'unità R-160, R-170, di quella di Idrogenazione e della stazione confezionamento polveri. Se per quest'ultima, il basso utilizzo annuo può rappresentare un fattore di mitigazione della classe di rischio, la valutazione delle unità R-160, R-170 ha esaltato problematiche inerenti la gestione del problema polveri e un carente livello di pulizia.

La definizione del Normalised Risk Index (NRI) ha permesso un primo confronto tra i tre casi studio e il reparto di processo CP1 di ACME S.p.A., individuando una differenza elevata di classi di rischio riscontrate. Se, nei tre casi studio, questa si attesta generalmente nella soglia Alto-Estremo, il reparto di processo CP1 delinea un livello di rischio che rientra in un livello Basso. Questo valore deve rappresentare solo una stima della classe di rischio dell'unità nell'istante della valutazione e, se necessario, indurre l'azienda ad attuare le corrette politiche affinché si possa ottenere un abbassamento della soglia, fino ad un livello di rischio ritenuto accettabile, focalizzando l'attenzione su quelle unità che presentano un indice molto superiore rispetto a quello medio.

Il lavoro svolto e i risultati ottenuti possono essere fonte di ispirazioni per prospettive future di sviluppo di metodi per la valutazione del rischio in ambito industriale, avendo evidenziato le principali caratteristiche, ma anche le criticità e le eventuali modifiche degli stessi, di alcuni tra i metodi maggiormente usati al livello globale a questo scopo.

Bibliografia

- [1] Presidente della Repubblica, *D.lgs. 9 aprile 2008, n. 81. TESTO UNICO SULLA SALUTE E SICUREZZA SUL LAVORO*, 2008.
- [2] Presidente della Repubblica, *D.lgs. 26 giugno 2015, n. 105 Attuazione della direttiva 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose*. 2015.
- [3] DOW Chemical Company, *Fire & explosion index DOW (F&EI)*, 6Th EDITION, AIChE, 1987.
- [4] (ICI) Imperial Chemical Industries, *The Mond Index*, Second Edition. 1985.
- [5] F. I. Khan, T. Husain, and S. A. Abbasi, "Safety Weighted Hazard Index (SWeHI): A New, User-friendly Tool for Swift yet Comprehensive Hazard Identification and Safety Evaluation in Chemical Process Industries," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. **79**, no. 2, pp. 65–80, 2001.
- [6] S. Colombo, E. Galatola, C. Archinti, S. T. Salvagio, and V. D. Cacciatori, *La Metodologia RAMSES 4 per la valutazione dei rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori che possono essere esposti al rischio di atmosfere esplosive aggiornata al Testo Unico della Sicurezza (D.Lgs. 81/08)*, 2014.
- [7] D.P.C.M., *31 Marzo 1989, rischi rilevanti connessi a determinate attività industriali, Allegato II, analisi preliminare per l'individuazione delle aree critiche.*, vol. 53, no. 5. 1989, pp. 2171–2174, 1989.
- [8] C. Piccinini, R. Galvagni, C. Ciarambino, I. Ciarambino, *L'analisi dei rischi*, Associazione Italiana di Ingegneria Chimica (AIDIC), 2011.
- [9] PARLAMENTO EUROPEO E CONSIGLIO DELL'UNIONE EUROPEA, *REGOLAMENTO (CE) N. 1272/2008, relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele che modifica e abroga le direttive 67/548/CEE e 1999/45/CE e che reca modifica al regolamento (CE) n. 1907/2006*, 2008, pp. 18–36, 2008.
- [10] National Fire Protection Association, *NFPA 704, Identification of the Hazards Materials for Emergency Response*, 2017.
- [11] (CEI) Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI 11-27, Lavori su impianti elettrici, IV edizione*. 2014.
- [12] F. I. Khan and S. A. Abbasi, "Multivariate hazard identification and ranking system," *Process Saf. Prog.*, vol. **17**, no. 3, pp. 157–170, 1998.
- [13] L. Marmo, "Consulenza tecnica sulle cause dell'incendio avvenuto presso la Carmagnani Piemonte S.p.A.", Torino, 2015, pp. 38–43.
- [14] L. Marmo, "Consulenza tecnica sulle cause e dinamica dell'incendio verificatori presso la Darkem di Scarmagno", Torino, 2017.

- [15] L. Marmo and U. Allamano, “*Consulenza tecnica sul funzionamento della Linea 5, il suo stato di manutenzione, il tipo e l’adeguatezza delle misure antincendio, nonché l’organizzazione aziendale in merito alla prevenzione incendi nello stabilimento Thyssen-Krupp di Torino*” 2009.
- [16] L. Fiorentini, “*Consulenza tecnica sulla dinamica e relative simulazioni dell’incendio occorso il 6/12/2007 presso lo Stabilimento Thyssen-Krupp di Torino*”, p. 65, Torino, 2010.
- [17] M. R. Marshall, “Calculation of gas explosion relief requirements: The use of empirical equations,” no. 49, pp. 21–28.
- [18] L. O. Cisneros, W. J. Rogers, and M. S. Mannan, “Comparison of the thermal decomposition behavior for members of the hydroxylamine family,” *Thermochim. Acta*, vol. **414**, no. 2, pp. 177–183, 2004.
- [19] L. Fiorentini and N. Piccinini, “*Consulenza tecnica sulle cause e dinamica dell’incendio avvenuto il 6/12/2007 nello stabilimento Thyssen-krupp di Torino*”, 2008, p. 19.
- [20] F. P. Lees, “*Loss prevention in the process industries*”, vol. **2**, p. 17/175.
- [21] A. Cavaliere, “Lezione 9: Deflagrazione,” DICMaPI Università degli Studi di Napoli, Federico II, Napoli, 2017.
- [22] (CEI) Comitato Elettrotecnico Italiano, *CEI 31-88, Luoghi ATEX Polveri*. Italy, 2016.