

r_enti.ro.Giunta - Prot. 20/09/2024.1031452.E Copia conforme dell'originale sottoscritto digitalmente da Carpino Paolo



Committente
TRED CARPI
Via Remesina Esterna, 27/A – 41012 Fossoli (MO)

Tecnico Progettista
Paolo Carpino

FSE-RT-X-1-03-30523

PROGETTO: Valutazione rischio incendio per depositi di batterie agli ioni di litio

TRED CARPI S.r.l.

Via Remesina Esterna 27/A – 41012 Fossoli (MO)

VALUTAZIONE RISCHIO INCENDIO PER I DEPOSITI DI
BATTERIE AGLI IONI DI LITIO NEL BATTERY CENTER

D.M. 03/08/2015 e ss.mm.ii

Rev. 0	Report Valutazione Rischio Incendio	D.M.	A.L.	P.C.	18/09/2024
Rev.00	Descrizione	Red.	Contr.	Appr.	Data

INDICE

1	SOMMARIO TECNICO	3
1.1	INFORMAZIONI GENERALI.....	3
1.2	FINALITÀ DEL DOCUMENTO	3
1.3	NORME E STANDARD DI RIFERIMENTO	3
1.4	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	4
2	VALUTAZIONE DEL RISCHIO D'INCENDIO PER IL BATTERY CENTER	4
2.1	DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ E DELL'AREA OGGETTO DI INTERESSE	4
2.2	DESCRIZIONE DEL CICLO DI LAVORAZIONE DEL SITO	5
2.3	FOCUS SUL BATTERY CENTER	7
3	OCCUPANTI	9
4	BENI ESPOSTI	9
5	VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE	9
5.1	CHIMICA DELLE BATTERIE	9
5.2	MECCANISMI DI FALLIMENTO	10
5.3	THERMAL RUNAWAY	12
5.4	VALUTAZIONE DEL RISCHIO INCENDIO.....	17
	S1 - PROCESSO DI SCARICA	18
	S2 – MOVIMENTAZIONE E URTI	19
6	IDENTIFICAZIONE DELLE MISURE PREVENTIVE	20
7	INSUSSISTENZA DEL RISCHIO ESPLOSIONE	21
8	SINTESI.....	22
	APPENDICE: CALCOLO DEL LFL	23
A.	FORMAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE	23
B.	CALCOLO DEL LFL PER IL DEPOSITO DI BATTERIE SCARICHE	24
C.	CALCOLO DEL LFL PER IL DEPOSITO DI BATTERIE ESAUSTE.....	27

Sulla base delle leggi concernenti i diritti di autore, è vietata la copia o riproduzione anche parziale di questo elaborato senza preventiva autorizzazione.

Il presente documento è stato compilato sulla base delle informazioni e dei dati in entrata forniti dal cliente disponibili al momento della redazione: sono sottoscritti per accettazione i risultati e le misure adottate, applicabili esclusivamente alla progettazione in oggetto e validi a condizione di non apportare modifiche non condivise con CEA Estintori.

1 SOMMARIO TECNICO

1.1 INFORMAZIONI GENERALI

COMMITTENTE	TRED CARPI S.r.l. Via Remesina Esterna, 27/A 41012 Fossoli (MO)
UBICAZIONE DELL'ATTIVITÀ	Via Remesina Esterna, 27/A 41012 Fossoli (MO)
TIPO D'INTERVENTO	Valutazione rischio incendio per i depositi di batterie di litio sviluppata secondo D.M. 03/08/2015 e ss.mm.ii

1.2 FINALITÀ DEL DOCUMENTO

Con la presente relazione si va a rispondere alla richiesta di integrazioni, trasmesse mediante il “Provvedimento Autorizzato Unico di VIA comprensivo del Provvedimento di VIA relativo al progetto *“revamping dell’installazione esistente e nuova sezione di recupero vetro”* localizzato a Fossoli nel Comune di Carpi (MO), proposto da TRED CARPI Srl”, emesso dall’Arpae di Modena, di cui alla pratica n. 23857/2023.

La presente relazione in particolare va a rispondere alle seguenti richieste integrative dei Vigili del fuoco di Modena, relativamente alla valutazione rischio incendio per i depositi di batterie agli ioni di litio.

La presente analisi costituisce pertanto una fase di valutazione del rischio incendio, relativamente alla presenza di batterie agli ioni di litio all’interno del Battery Center.

Essendo, infatti, la peculiare tecnologia di questi veicoli di tipo innovativo e non prettamente annoverata nell’ambito del panorama normativo italiano rappresentato dal Codice di Prevenzione Incendi – DM 03.08.2015 e s.m.i., si rende necessaria un’analisi per l’individuazione delle modalità, dei pericoli e delle tipologie di protezione più adeguate per i tipi di pericoli riscontrabili per tali tecnologie.

La valutazione del rischio è stata condotta secondo un processo di *studi e ricerca bibliografica* che ha analizzato i meccanismi alla base di questa tecnologia ed i potenziali fenomeni connessi di incendio in relazione alle specifiche condizioni di stoccaggio e trattamento dell’attività TRED Carpi, e costituisce un aggiornamento rispetto alle condizioni operative, le volumetrie degli ambienti e le modalità di stoccaggio.

1.3 NORME E STANDARD DI RIFERIMENTO

L’analisi condotta ha preso a riferimento le principali norme e standard per l’ambito d’interesse, facendo riferimento in particolare a:

- D.M. 03.08.2015 e s.m.i.– *Codice di Prevenzione Incendi*;
- NFPA 1 – *Fire Code Handbook*;
- NFPA 68 – *Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*;
- NFPA 69 – *Standard on Explosion Prevention Systems*.
- *Fire, Explosion and Risk Assessment Topic Guidance*” – HSE – *Health and Safety Executive*.

1.4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Le principali fonti di letteratura utilizzate come riferimento sono le seguenti:

- H. Shen, H. Wang, M. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Li, X. Yang, X. Feng, M. Ouyang (2023) “Thermal Runaway Characteristics and Gas Composition Analysis of Lithium-Ion Batteries with Different LFP and NCM Cathode Materials under Inert Atmosphere”;
- P. Sun, R. Bishop, H. Niu, X. Huang (2020) “A Review of Battery Fires in Electric Vehicles”, Hong Kong Polytechnic University;
- E. Barcaro, J. Hassoun (2020) “La sicurezza delle batterie Li-ione”, Università di Ferrara;
- A.R. Baird, E. J. Archibald, K. C. Marr, O. A. Ezekoye (2019) “Explosion Hazards from Lithium-Ion Battery Vent Gas”, Sandia Laboratories;
- M. Mazzaro, C. Di Bari (2020) “Rischi connessi con lo stoccaggio di sistemi di accumulo Li-Ion”, ENEA, CNVVF;
- D. Sturk, L. Rosell, P. Blomqvist, A. Ahlberg Tidblad (2019) “Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber”, MDPI;
- C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White, R. T. Long (2011) “Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment – Final Report”, FPRF.

2 VALUTAZIONE DEL RISCHIO D’INCENDIO PER IL BATTERY CENTER

G.2.6.1 Valutazione del rischio d’incendio per l’attività

1. Il progettista impiega uno dei metodi di regola dell’arte per la valutazione del rischio d’incendio, in relazione alla complessità dell’attività trattata.

2. In ogni caso la valutazione del rischio d’incendio deve ricomprendere almeno i seguenti argomenti:

a. individuazione dei pericoli d’incendio;

b. descrizione del contesto e dell’ambiente nei quali i pericoli sono inseriti;

2.1 DESCRIZIONE DELL’ATTIVITA’ E DELL’AREA OGGETTO DI INTERESSE

L’area in oggetto fa parte del sito in cui vengono svolte operazioni di recupero di rifiuti urbani e speciali, pericolosi e non pericolosi, costituiti principalmente da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), di proprietà della ditta Tred Carpi Srl.

In particolare, le aree in oggetto sono quelle in cui sono presenti depositi di batterie agli ioni di litio, rispetto alle quali è richiesta una valutazione del rischio.

Nel complesso industriale in oggetto, l’unica area in cui sono presenti le batterie agli ioni di litio è il Fabbricato 9, denominato **Battery Center**, ed evidenziato in **giallo** in Figura 1.

Per quanto concerne le altre aree dell’attività, nel Fabbricato 2 (in **azzurro** in Figura 1) sono stoccati e macinati, nelle linee R2 e R4, elettrodomestici e elettronica mista, per le quali è prevista la rimozione delle batterie presenti prima di essere stoccate all’interno dell’area.

Di seguito si riportano uno stralcio del ciclo di lavorazione dell’attività con focus sul Battery Center, nel quale sono stoccate le batterie agli ioni di litio.

- faranno eccezione i mezzi destinati al carico/scarico presso i fabbricati 3 e 4 che accederanno ad essi direttamente dall'area di sosta, senza dover percorrere l'intero anello
- Al termine delle operazioni, i mezzi peseranno nuovamente e torneranno nell'area di sosta;
- Dopo aver espletato le formalità documentali (ad esempio: compilazione dei FIR), i mezzi lasciano l'attività uscendo dal passo carraio a nord.

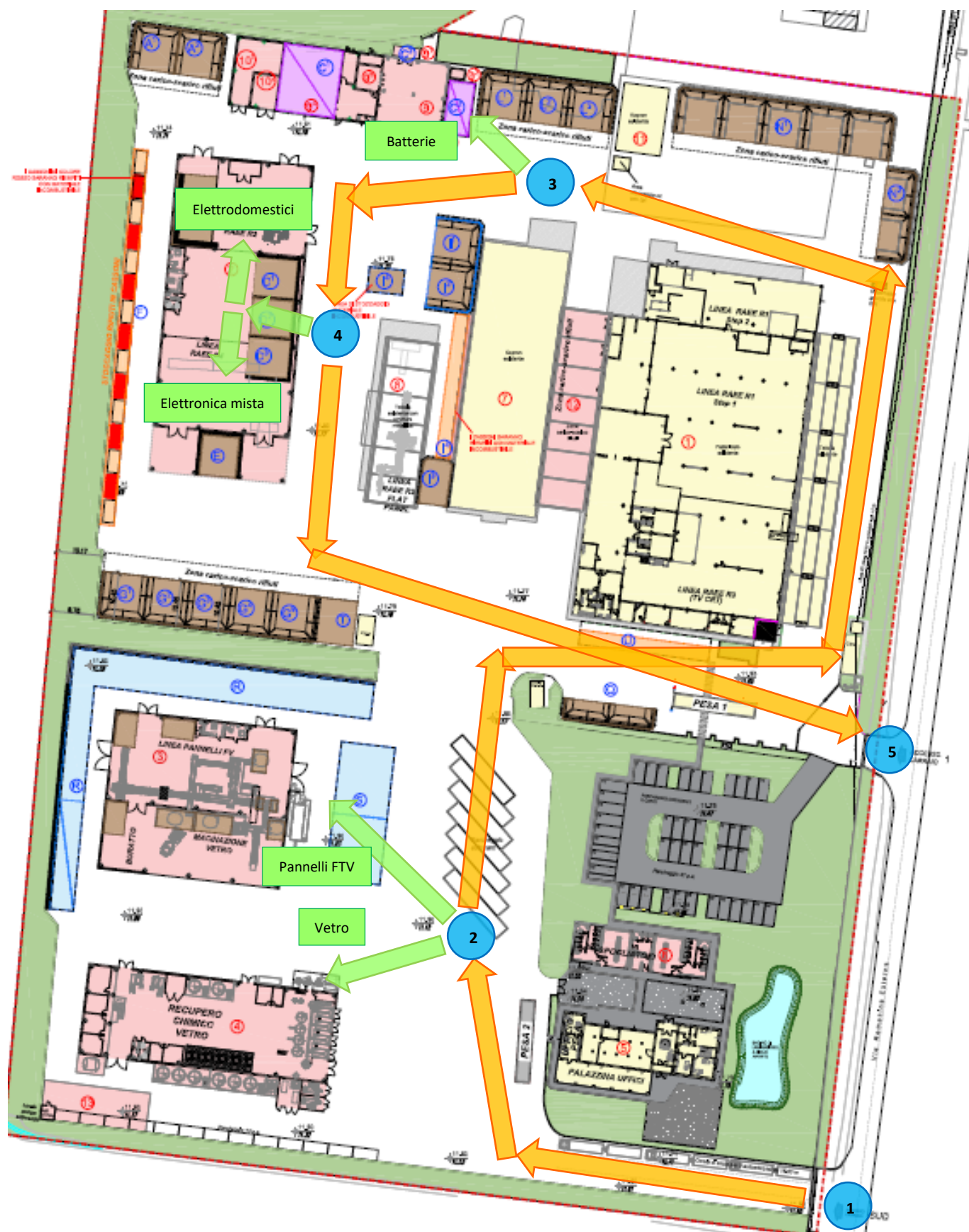


Figura 2 – Planimetria del sito di Tred Carpi, con individuazione delle fasi del ciclo di lavorazione

2.3 FOCUS SUL BATTERY CENTER

L'area denominata Battery Center rappresenta una porzione del Fabbricato 9-10, dove vengono scaricate e smaltite

varie tipologie di batterie, tra cui quelle agli ioni di litio. L'area risulta organizzata in (Figura 3, Figura 4):

- Un deposito di batterie in ingresso, di superficie 60 mq e altezza 5m, nel quale sono stoccate fino a **5 ton** di batterie esauste (area 9³);
- Una tettoia metallica di dimensioni 15,24m x 14,28m (area 9);
- Un locale di scarico pacchi al litio, di superficie 15,24m x 8,50m (area 9⁵);
- Un deposito di batterie scariche, di superficie 15,24m x 12,80m, e altezza media pari a 5.05m, nel quale sono stoccate fino a **5 ton** di batterie scariche (area 9⁴);
- Un container di scarico moduli al litio, di superficie 2,45m x 6m e altezza 2.7m (area 9¹);
- Una vasca d'acqua profonda 1,50m, in prossimità del deposito di batterie in ingresso (area 9²).

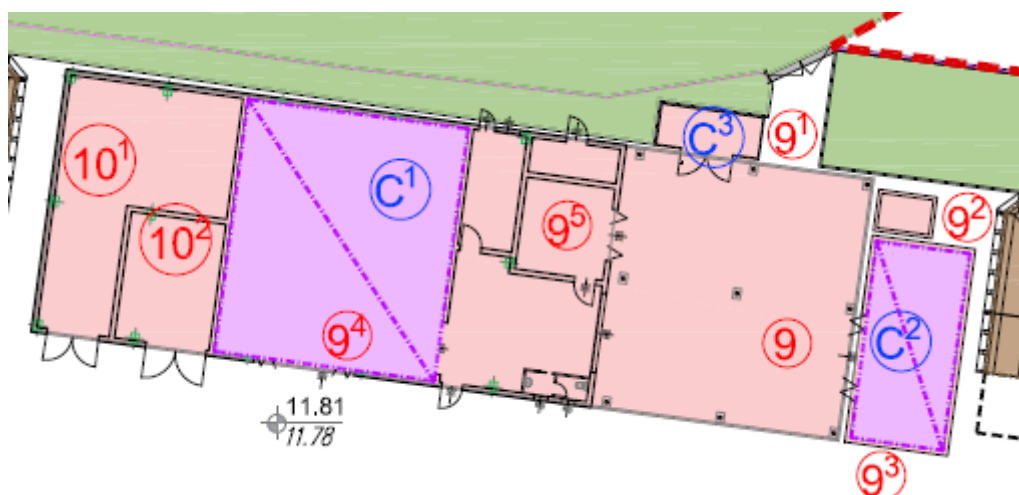


Figura 3 – Individuazione aree del Fabbricato 9-10. In **viola**, le aree in cui sono stoccate batterie.

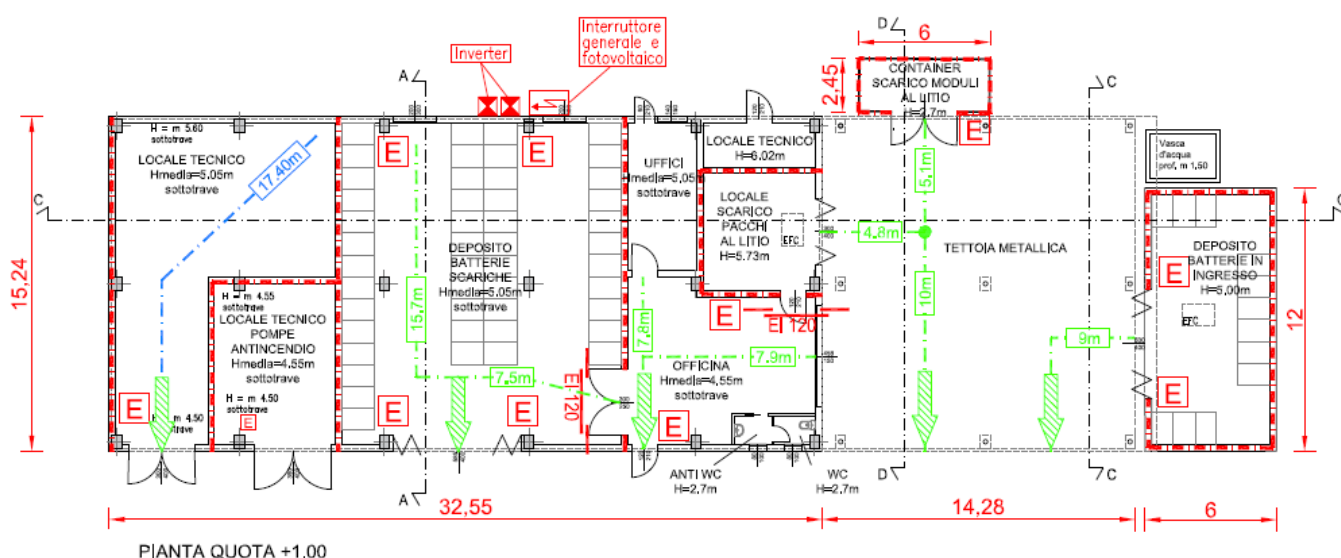


Figura 4 – Planimetria del Fabbricato 9 (Battery Center) – 10 (Locali tecnici)

All'interno delle aree del Battery Center, è installato un impianto di spegnimento a diluvio ad acqua nel deposito di batterie esauste in ingresso, nel locale scarico batterie e nel deposito batterie scariche. L'area risulta inoltre protetta con IRAI e termocamere (che dialogano con l'IRAI).

In prossimità dell'area adibita a Battery Center, si eseguono le seguenti operazioni:

- Si effettua un controllo visivo dello stato delle batterie (controllo dei danni subiti, controllo della temperatura con termocamera) prima di entrare all'interno dell'area di stoccaggio in entrata;
- Le batterie che superano il controllo vengono stoccate provvisoriamente all'interno del deposito di stoccaggio in entrata;
- Le singole batterie vengono trasportate all'interno del workshop, dove vengono effettuate le lavorazioni, dopodiché vengono inviate al sottomarino/forno dove avviene la scarica ad un livello di carica pari a circa il 30%;
- Le batterie vengono spostate e stoccate nel deposito batterie scariche.

3 OCCUPANTI

c. determinazione di quantità e tipologia degli occupanti esposti al rischio d'incendio;

All'interno del Battery Center è prevista la presenza stabile di n.2 lavoratori durante l'orario lavorativo. Non si prevede presenza di visitatori.

4 BENI ESPOSTI

d. individuazione dei beni esposti al rischio d'incendio;

All'interno del battery center vengono trattate diverse tipologie di batterie, con tecnologie e dimensioni differenti. Potranno essere infatti presenti singole celle, moduli e pacchi batterie utilizzati per alimentare mezzi di movimentazione (es. carrelli elevatori, transpallet), veicoli sostenibili (es. monopattini elettrici) e autoveicoli a motore endotermico e elettrici.

5 VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE

e. valutazione qualitativa o quantitativa delle conseguenze dell'incendio su occupanti, beni ed ambiente;

5.1 CHIMICA DELLE BATTERIE

Gli accumulatori, denominati in generale anche batterie, sono apparati elettrochimici in grado di accumulare carica elettrica e di restituirla in fase di scarica.

Le batterie o accumulatori sono costituite da un insieme di *celle elementari* elettricamente collegate l'una all'altra in serie o in parallelo per raggiungere il valore desiderato di tensione (Volt) e corrente (Ah). La cella è l'elemento costruttivo elementare della batteria capace di convertire l'energia chimica in elettrica. Una cella comprende infatti due piastre definite elettrodi (catodo ed anodo) immerse in un liquido elettrolita responsabile delle reazioni elettrochimiche di ossidoriduzione.

Esistono diversi modi di sfruttare la reazione chimica della cella elettrolitica: ad ognuno di questa corrisponde una diversa prestazione.

Le principali chimiche presenti sul mercato riguardano:

- Piombo acido (Pb-acido);
- Nichel Cadmio (Ni- Cd);
- Nichel Idruri Metallici (Ni-MH)

Le celle al **Litio** hanno una maggiore densità di energia rispetto alle tecnologie precedenti per tale ragione hanno trovato applicazione nell'ambito dei veicoli ibridi ed elettrici.

Batterie agli ioni di litio

Ai fini di una migliore comprensione dei pericoli d'incendio che questa nuova tecnologia può comportare, sulla base dei principali studi e fonti di letteratura consultati (*P. Sun, R. Bishop, H. Niu, X. Huang (2020) "A Review of Battery Fires in Electric Vehicles"; Hong Kong Polytechnic University, E. Barcaro, J. Hassoun (2020) "La sicurezza delle batterie Li-ione", Università di Ferrara; H. Shen, H. Wang, M. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Li, X. Yang, X. Feng, M. Ouyang (2023) "Thermal Runaway Characteristics and Gas Composition Analysis of Lithium-Ion Batteries with Different LFP and NCM Cathode Materials under Inert Atmosphere"*) verranno di seguito dettagliate le principali caratteristiche **delle batterie agli ioni di litio**.

La composizione delle sostanze contenute all'interno della batteria rappresenta la chimica degli elementi della cella. Nello specifico il catodo delle batterie al litio può presentare differenti composizioni chimiche, che vengono di seguito riportate:

- **Litio – Cobalto (LCO):** uno dei tipi più diffusi per la costruzione del catodo. Presenta alcuni problemi di surriscaldamento, come pure di instabilità nel caso di perforazione del contenitore;
- **Litio – Ferro – Fosfato (LFP):** possiede una stabilità termica superiore rispetto alle batterie LCO. Queste batterie hanno energia più bassa delle LCO, ma potenza superiore;
- **Litio – Ossido di Manganese (LMO):** offre un'alta tensione di cella e stabilità termica, ma energia minore;
- **Litio – Nichel – Cobalto – Manganese (NMC):** rappresenta un buon compromesso rispetto agli altri tipi di tecnologie;
- **Litio – Nichel – Cobalto – Alluminio (NCA):** caratteristiche simili alle NMC, con l'aggiunta di alluminio che conferisce maggiore stabilità chimica.

Le casistiche incidentali indicano che i principali **trigger** (inneschi) per le batterie agli ioni di Litio (LiB) derivano da *eccessiva carica, surriscaldamento, schiacciamento, impatto meccanico e cortocircuiti (interni ed esterni)*. Tramite queste tipologie di inneschi, le batterie possono incorrere in **categorie di incidenti** che generano rapidi aumenti di temperatura e sfiato (*venting*).

5.2 MECCANISMI DI FALLIMENTO

I **meccanismi di fallimento** per questo tipo di batterie possono essere divisi nelle seguenti macro classi:

- **Abuso termico:** Prevede la generazione di calore all'interno delle batterie in risposta a test/eventi. Ad esempio, il cortocircuito surriscalda la cella per effetto Joule a seguito del passaggio di alte correnti, fino all'innesco di reazioni chimiche interne al di sopra della temperatura di auto-riscaldamento. Il calore all'interno della cella può essere anche causato da altre reazioni chimiche ossidative, ad esempio a seguito di carica eccessiva, che sono in grado portare ad una fuga termica.
- **Danno fisico:** danni fisici quali foratura, schiacciamento, vibrazione o scossa possono comportare un cortocircuito all'interno di celle o pacchi batteria, e causare un flusso improvviso di corrente. Inoltre, elettroliti o altri materiali infiammabili fuoriusciti a seguito della compromissione accidentale del contenimento possono potenzialmente produrre incendi secondari.
- **Problematiche in fase di carica/scarica:** cariche eccessivamente lunghe o scariche troppo profonde possono verificarsi in caso di malfunzionamento dell'elettronica di controllo della stazione di ricarica oppure in caso di grave squilibrio tra le celle nel pacco batteria. La risposta di celle e pacchi batteria durante una carica eccessiva dipende da vari parametri come la corrente, la massima tensione applicata, l'ambiente termico e i materiali utilizzati, ed è una funzione complessa dei numerosi meccanismi di guasto. La risposta termica delle LiB in seguito a carica eccessiva è in gran parte determinata dalla chimica del catodo.
- **Cortocircuiti:** il corto circuito esterno è il tipo più comune di condizione di abuso della batteria. Può essere causato da diversi fattori, tra cui un oggetto estraneo, guasto del separatore, cattivo design della cella (ad

esempio mancanza di sufficiente separazione o isolamento degli elettrodi nella cella), cattivi processi di fabbricazione (sbavature sul bordo del collettore di corrente), o pressione esterna sulle pareti della cella. I cortocircuiti interni possono anche svilupparsi a causa di altre condizioni di abuso che portano alla generazione di gas nella cella e allo spostamento degli elettrodi che possono entrare in contatto tra loro.

Le principali **categorie di incidenti** che possono rappresentare condizioni di pericolo e meccanismi di fallimento capaci di generare, in relazione alle condizioni gestionali e di stoccaggio del Battery Center, rapidi aumenti di temperatura e sfiato (*venting*), possono verificarsi nel caso di movimentazione delle batterie e urti accidentali (*danno fisico*) e nella fase di scarica forzata delle batterie per la sola area di lavorazione/workshop (*Problematiche in fase di carica/scarica*). Dato che le operazioni di lavorazione sulle batterie vengono effettuate nel Battery Center dove non sono presenti fonti di calore, non si ravvisano condizioni incidentali da abuso termico.

Nell'iter procedurale attuale, si va ad effettuare un controllo visivo dello stato delle batterie (controllo dei danni subiti, controllo della temperatura con termocamera) all'esterno del Battery Center, prima di entrare all'interno del deposito batterie in ingresso, in modo da prevenire le conseguenze da danno fisico. Le batterie vengono poi stoccate all'interno del magazzino di stoccaggio in entrata, su scaffalature, da cui poi verranno trasportate all'interno dell'area di lavorazione, dove verranno scaricate fino al valore di sicurezza di massimo 30% di carica.

La fase di scarica risulta in ogni caso un'operazione importante per la mitigazione del rischio. Infatti, lo stato di carica della batteria (SOC) è direttamente proporzionale all'intensità di un eventuale incendio ed al rilascio di infiammabili. È importante per le batterie di nuova produzione una prima carica che determini la creazione di un'interfaccia passivante sull'anodo (*SEI – Solid Electrolyte Interphase*) per stabilizzare la cella. Per lo stoccaggio di celle e batterie a fine vita invece risulta importante mantenere il livello di carica più basso possibile, in modo da minimizzare le conseguenze di eventuali rilasci di infiammabili.

Per uno stato di carica – SOC pari al 100%, è in genere possibile riscontrare alti picchi di rilascio energetico. Per livelli di carica inferiori, i cortocircuiti interni e i rilasci termici sono sostanzialmente ridotti.

Di conseguenza, il *thermal runaway* scaturito da una batteria con carica al 100% può risultare più gravoso rispetto ad altre condizioni a causa dell'energia eccessiva contenuta all'interno della batteria agli ioni di litio, e l'eccessiva destabilizzazione del catodo e il deposito degli ioni di litio sulla superficie dell'anodo.

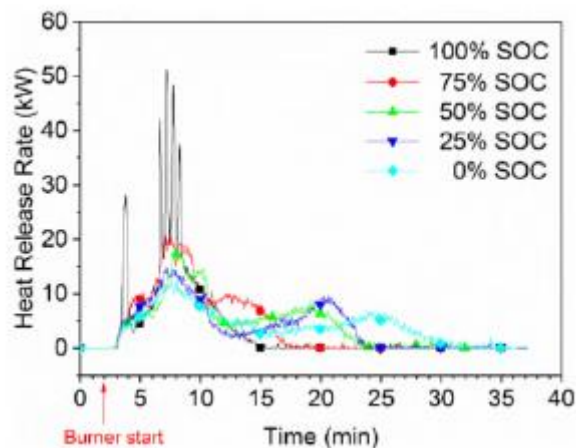


Figura 5 – Heat Release Rate (HRR) di pacchi di 5 celle EiG 7 Ah, usando un bruciatore esterno a propano, con carica delle celle SOC da 0% a 100 %.

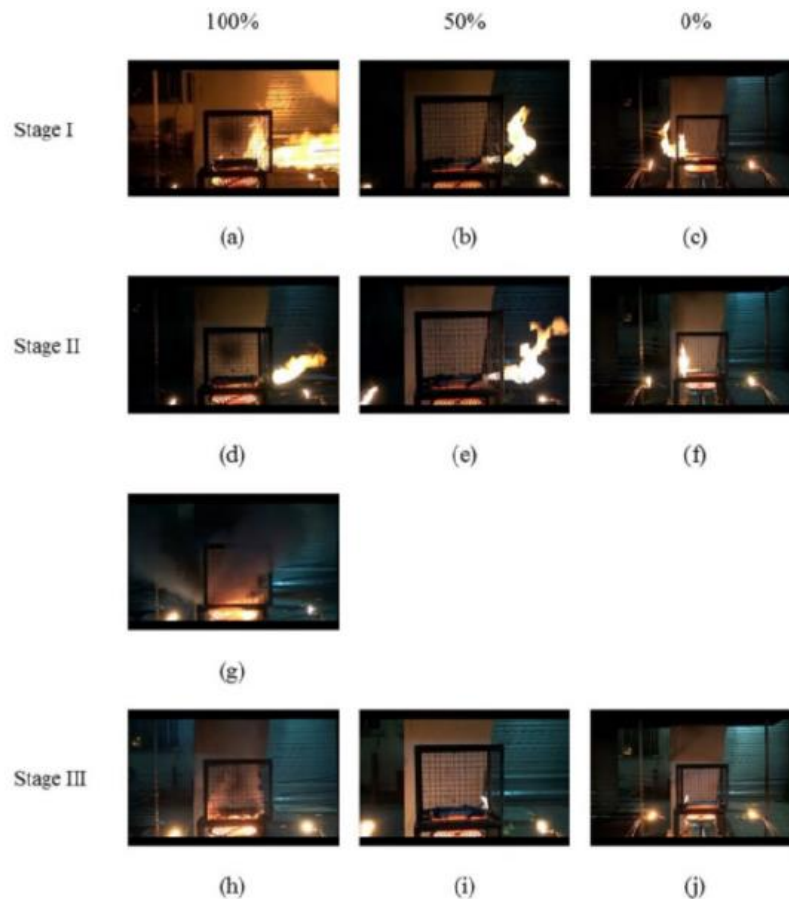


Figura 6 – comportamenti di combustione differenti per celle a differenti stati di carica (SOC 0%, 50% e 100%)

Il livello di carica risulta fondamentale anche in caso di danno accidentale di tipo meccanico. Come riportato dallo studio *C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White, R. T. Long, "Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment – Final Report", FPRF, 2011*, esiste il potenziale rischio di danneggiamento meccanico dovuto alla movimentazione delle batterie. Caduta, schiacciamenti, perforazioni possono portare a fuoriuscita di elettrolita, corto-circuiti, e potenzialmente ad un *thermal runaway*. Lo stoccaggio a SOC ridotti diminuisce la possibilità che un danneggiamento di natura meccanica porti a rilasci termici e di gas. Anche il monitoraggio e controllo della temperatura ambientale permette di ridurre le possibilità di danno legato al surriscaldamento.

Per quanto si attiene alle operazioni di carica/scarica all'interno del Battery Center dell'attività in oggetto, vengono effettuate all'interno del locale scarico pacchi al litio e all'interno della quale non vengono effettuate altre lavorazioni se non quella di scarica, che avviene fino ad un valore di carica di massimo il 30%, che rappresenta la più attestata condizione di sicurezza delle batterie, nonché il livello di carica delle stesse durante il loro trasporto. La fase di scarica viene effettuata per ciascuna tipologia di batteria presente e avviene anche per mezzo di metodi tradizionali. Essendo il processo di scarica la fase più delicata della lavorazione, sarà adeguatamente monitorata con controllo termico.

In caso si ravvisassero aumenti di temperatura e sfiati, ovvero condizioni di *thermal runaway* della batteria, è presente una vasca d'acqua all'interno della quale immergere le batterie, per impedirne fenomeni di combustione, propagazione dell'incendio (effetto domino) e produzione di fumi tossici e calore.

All'interno del fabbricato sono anche presenti termocamere per il monitoraggio della temperatura e un impianto a diluvio ad acqua.

5.3 THERMAL RUNAWAY

Tra le principali cause scatenanti dei guasti relativi alle batterie al litio vi è l'eccessivo aumento di temperatura. In particolare, se la velocità di dispersione del calore della cella è inferiore a quella della sua generazione, si può

raggiungere un cosiddetto “punto di non ritorno”, che innesci il processo di *runaway*, ossia alla decomposizione di una o più sostanze presenti nella cella, innescando reazioni chimiche che aumentano ulteriormente la temperatura.

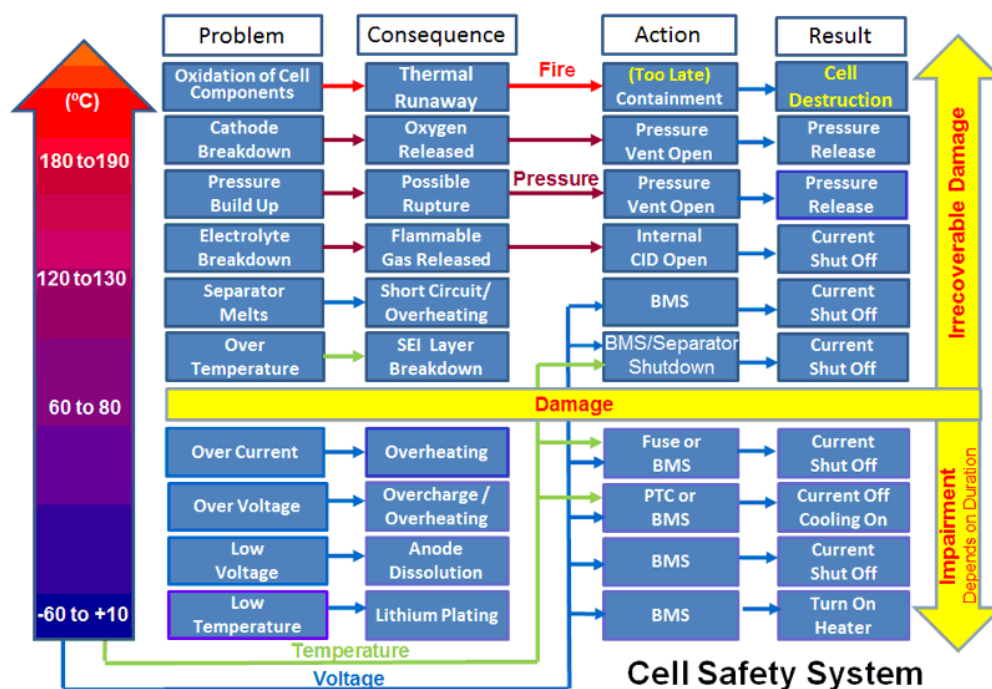


Figura 7 – Risultati delle principali condizioni di abuso per le celle agli ioni di litio

In un evento di fuga termica una serie di reazioni esotermiche aumenta la temperatura della cella con conseguente generazione di gas. Questi gas si accumulano originariamente all'interno della cella e successivamente, per via delle basse pressioni alle quali sono progettate per resistere, possono portare alla rottura della cellula e al rilascio dei gas. Secondo diversi studi la miscela di gas rilasciata è condizionata da diversi fattori quali la *chimica della cella* ed il *livello di carica della batteria*.

Da una serie di studi¹ emerge che le sostanze chimiche catodiche più tipicamente analizzate sono il litio-cobalto ossido (LCO), ossido di litio-manganese-cobalto (NMC), litio-ferro-fosfato (LFP) e ossido di litio-nichel-cobalto di alluminio (NCA), litio ferro fosfato (LFP) e litio nichel-manganese-cobalto (NMC), biossido/litio manganese oxide (LMO).

Explosion Hazards from Lithium-Ion Battery Vent Gas

Di seguito viene riportato l'analisi condotta all'interno dello studio “*Explosion Hazards from Lithium-Ion Battery Vent Gas*” di A.R. Baird, E. J. Archibald, K. C. Marr, O. A. Ezekoye, Sandia Laboratories, 2019).

Questo studio raggruppa una serie di dati provenienti da diverse fonti, al fine di calcolare in maniera analitica e tramite modelli le caratteristiche principali dei gas rilasciati, e rapportarle ad altri parametri quali la chimica delle batterie, lo stato di carica e altri parametri al fine di poter caratterizzare il potenziale rischio.

¹ “Explosion Hazards from Lithium-Ion Battery Vent Gas” di A.R. Baird, E. J. Archibald, K. C. Marr, O. A. Ezekoye, Sandia Laboratories, 2019

“Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber”, D. Sturk, L. Rosell, P. Blomqvist, A. Ahlberg Tidblad, MDPI, 2019

La sintesi dei dati provenienti dallo studio è riportata di seguito:

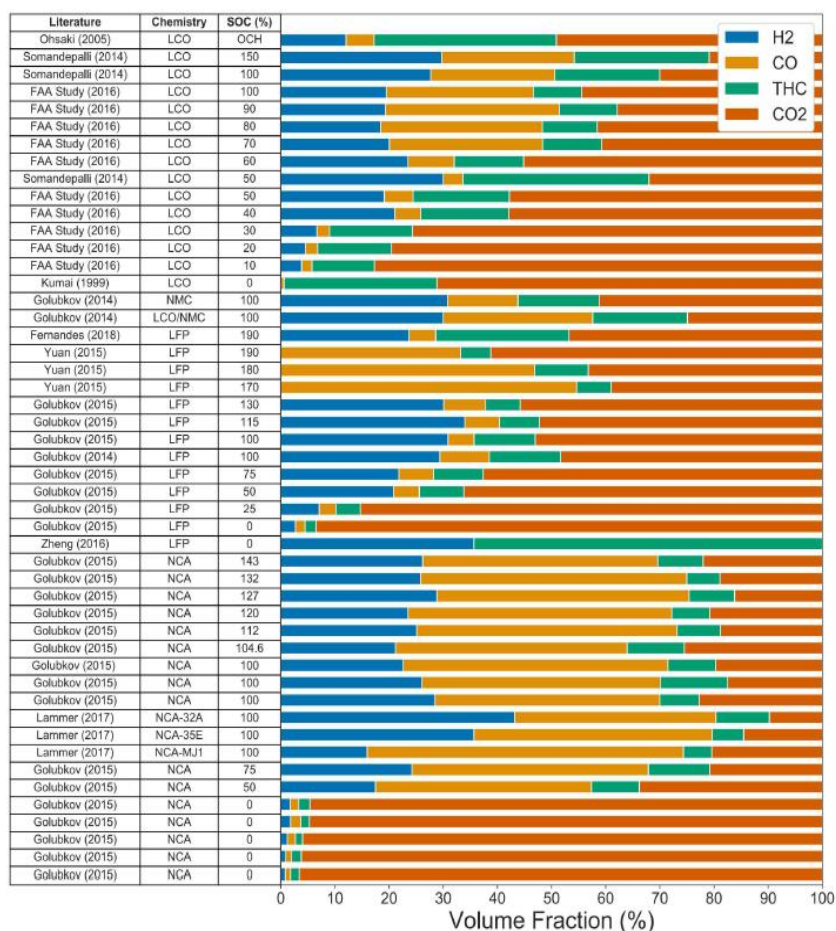
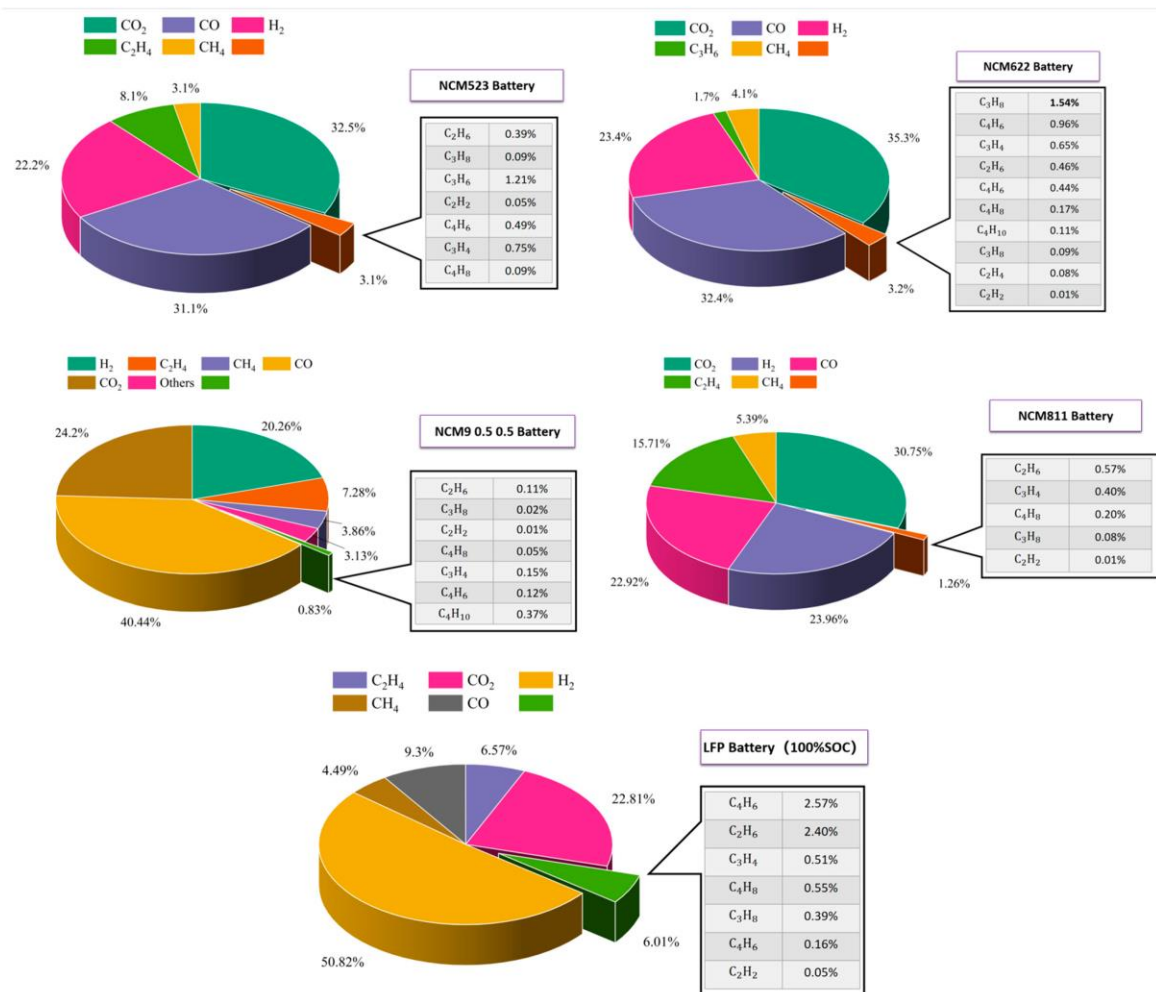


Tabella 1 – Composizione delle specie per frazione di volume.

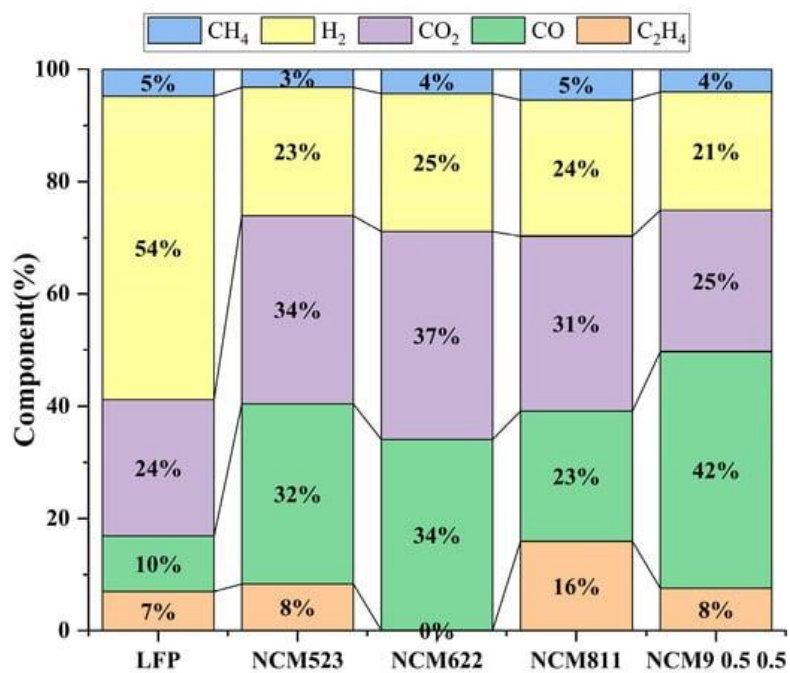
Come si può notare dalla **Tabella 1**, lo studio riporta un elevato numero di dati provenienti da celle con catodi dalle diverse composizioni chimiche, e differenti stati di carica. Le principali tipologie di batterie riportate nello studio sono LCO (Litio – Cobalto), LFP (Litio – Ferro – Fosfato) e NCA (Nichel – Cobalto – Alluminio). Le principali specie che formano il volume rilasciato sono idrogeno, monossido di carbonio, idrocarburi e anidride carbonica.

Dall'analisi dei dati è possibile anche riscontrare il legame specie ventilate – SOC: per ciascuna specie con l'aumentare dello stato di carica, infatti, aumenta anche la frazione di idrogeno e monossido di carbonio, mentre diminuisce il CO₂. Rilasci contenuti di sostanze infiammabili in termini di frazione volumetrica si verificano in casi di livelli di carica bassi o nulli.

Tali risultati sono anche in accordo con quanto rilevato dallo studio di H. Shen, H. Wang, M. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Li, X. Yang, X. Feng, M. Ouyang (2023) *“Thermal Runaway Characteristics and Gas Composition Analysis of Lithium-Ion Batteries with Different LFP and NCM Cathode Materials under Inert Atmosphere”*, i cui risultati sono riportati in Figura 8.



(a)



(b)

Figura 8 – Composizione delle miscele di gas prodotte in fase di *thermal runaway* dalle batterie agli ioni di litio di tipo LFP e NCM

Da una trasposizione dei dati al caso oggetto di analisi, ossia il Battery Center dell'attività Tred Carpi, le batterie verranno scaricate ad un livello di carica inferiore al 30%, in un'operazione di scarica controllata. Pertanto, la condizione che si delineerebbe comporterebbe la presenza di minime quantità di H₂ e CO, massimizzando invece il l'anidride carbonica, che è un gas inerte e non infiammabile che aiuta a ridurre il livello di rischio della miscela di gas.

Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber

Lo studio "Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber", D. Sturk, L. Rosell, P. Blomqvist, A. Ahlberg Tidblad, MDPI, 2019 di seguito riportato ha analizzato i quantitativi e la composizione dei gas emessi da cella LFP (Litio – Ferro - Fosfato) e batterie NMC (Nichel – Manganese – Cobalto) / LMO (Litio – Ossido di Manganese).

Una delle prime sostanziali differenze tra le diverse chimiche dei catodi è il quantitativo di gas emesso a causa del *thermal runaway*. Le celle LFP hanno emesso un volume totale di 50 l, contro i 1500 l di quelle NMC/LMO.

Test Number	Cell Type	Total Gas Volume	Normalized Gas Volume
1	LFP	50 L ¹	42 L/kg
2	NMC/LMO	1500 L	780 L/kg

¹ Calculated value from measured amounts of volatile organic compounds (VOCs), carbon dioxide (CO₂), and hydrogen fluoride (HF).

Tabella 2 – Volumi di gas prodotti da pacchi batteria composti da 5 celle quando riscaldati fino a raggiungere il *thermal runaway* in un ambiente privo di ossigeno

Anche il rate di emissione per le sostanze componenti il mix di gas presenta delle differenze, dovute al maggior quantitativo di sostanze emesse. Le specie considerate nei seguenti grafici sono l'anidride carbonica, l'acido fluoridrico (HF) e gli idrocarburi.

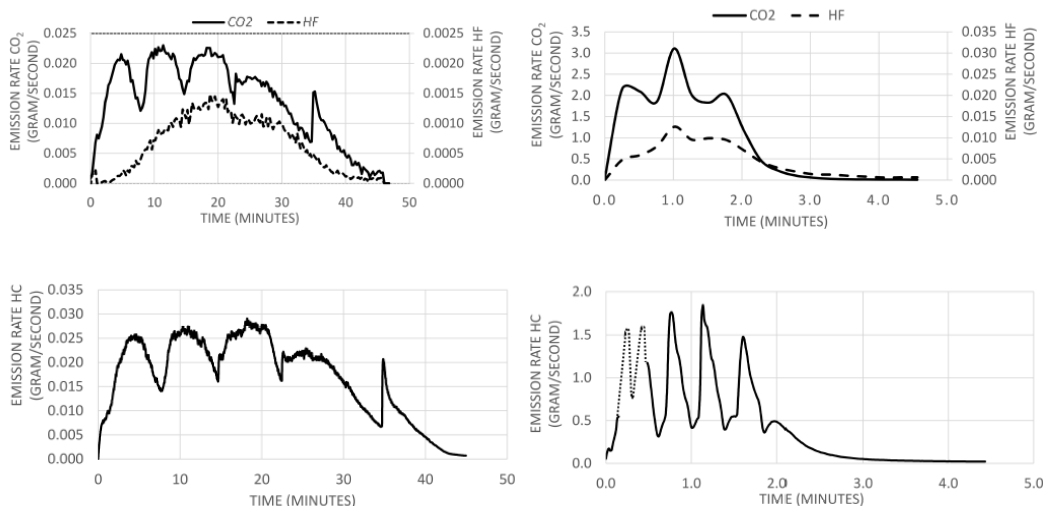


Figura 9 – rate di produzione di CO₂, HF e Idrocarburi per le celle LFP (sinistra) e NMC/LMO (destra)

Lo studio riporta successivamente i quantitativi calcolati di HF prodotto per le due tipologie di celle, che risulta paragonabile per entrambe le tecnologie. Tuttavia, considerando che il volume di gas emesso dalle celle LFP è molto inferiore rispetto a quello per le celle MNC/LMO, la concentrazione di HF per il primo risulta molto maggiore.

Cell Type	Wash Bottles ¹	FTIR	Normalized Amounts: Wash Bottles		Normalized Amounts: FTIR	
LFP	4.2 g	1.8 g	3.6 g/kg	36 g/kWh	1.5 g/kg	16 g/kWh
NMC/LMO	6.5 g	1.7 g	3.4 g/kg	23 g/kWh	0.9 g/kg	6.0 g/kWh

¹ Calculated from the total fluoride ion concentration in the solution.

Tabella 3 – quantitativo totale di HF misurato per le due tecnologie di celle usando due metodi differenti: wash bottles e FTIR

Lo studio dimostra come la tecnologia del catodo comporti reazioni differenti per le batterie al litio. Le celle NMC/LMO sono molto più reattive di quelle LFP, come riscontrabile dal periodo di venting molto più rapido (circa 2 minuti) per le prime rispetto alle seconde (45 min). Anche le temperature riscontrate sono superiori per le celle NMC/LMO.

5.4 VALUTAZIONE DEL RISCHIO INCENDIO

Di seguito viene riportata la valutazione del rischio incendio per le batterie stoccate all'interno del Battery Center dell'attività Tred Carpi. Attraverso una valutazione deterministica del rischio è possibile rappresentare in maniera compiuta le caratteristiche e le varie condizioni dell'attività e individuare la strategia di controllo dell'incendio più appropriata.

Attraverso la descrizione e quantificazione probabilistica degli eventi incidentali, la cui sintesi è espressa mediante una *matrice di rischio*, si riescono a tenere in considerazione gli esiti derivanti da tutte le possibili condizioni incidentali.

Per le aree dedicate allo stoccaggio e alla scarica delle batterie, verranno dettagliate le seguenti informazioni:

- Potenziali pericoli e rischi d'incendio dovuti alla specifica attività svolta nell'area di stoccaggio;
- Individuazione dei beni e soggetti esposti al rischio;
- Individuazione dei pericoli basandosi sul tipo di materiale e processo;
- Valutazione qualitativa e quantitativa (*fire risk matrix*);
- Determinazione del rischio;
- Misure preventive per la mitigazione del rischio;

Questo processo di valutazione risulta essere particolarmente conservativo, in quanto associa la probabilità di un innesco al malfunzionamento di un componente/sistema. In altre parole, qualsiasi malfunzionamento viene conservativamente considerato come pericoloso e potenzialmente capace di scatenare un incendio.

Come riportato precedentemente, le principali **categorie di incidenti** che possono rappresentare condizioni di pericolo risultano essere la movimentazione delle batterie (*danno fisico*) e la fase di scarica forzata delle batterie (*Problematiche in fase di carica/scarica*).

Il principale componente infiammabile delle batterie è l'elettrolita. Seppur tutte le celle cariche contengano energia elettrica immagazzinata, anche le celle completamente scariche contengono un quantitativo di energia chimica che potrebbe essere potenzialmente rilasciata dalla combustione dell'elettrolita.

Sulla base delle precedenti considerazioni sono state individuate per ciascuno scenario di rischio n.2 matrici: la prima si riferisce alla salvaguardia degli occupanti, mentre la seconda alla protezione dei beni.

Il metodo della matrice di rischio (*fire risk matrix*) permette di combinare le probabilità di accadimento di un dato innesco con la gravità delle conseguenze; questo processo permette di definire il rischio e di analizzare il caso peggiore che potrebbe più probabilmente accadere.

La presenza di un rischio incendio è legata all'esistenza di una potenziale fonte di innesco per i gas rilasciati in atmosfera. Nello specifico caso in analisi questa fonte di innesco può essere rappresentata dalla batteria stessa, che per effetto di un malfunzionamento o danneggiamento può aumentare la sua temperatura e rappresentare un potenziale innesco.

S1 - PROCESSO DI SCARICA

RISCHIO	POTENZIALE INNESCO	PROBABILITA' DI ACCADIMENTO	DANNO ALLE PERSONE	DANNO AI BENI	DANNO AMBIENTALE
Malfunzionamento della batteria durante la fase di scarica	<p>1) Malfunzionamento in fase di scarica controllata della batteria;</p> <p>2) Corto circuito interno batterie;</p>	<p>OCCASIONALE (3.453/FPMH* malfunzionamento batterie)</p> <p><i>Fonte: Tang, Q.; Shu, X.; Zhu, G.; Wang, J.; Yang, H. "Reliability Study of BEV Powertrain System and Its Components—A Case Study".</i></p> <p>* Failure Per Million Hour</p>	<p>CRITICO</p> <p>Possibile rischio per il personale presente nelle immediate vicinanze del principio d'incendio.</p>	<p>MARGINALE</p> <p>Danno localizzato nell'intorno dell'incendio. Operazione effettuata in edificio dedicato</p>	<p>NON SIGNIFICATIVO</p> <p>Possibile rilascio di sostanze tossiche in quantità modesta</p>

MATRICE DEL RISCHIO – OCCUPANTI

RISCHIO	CONSEGUENZE			
PROBABILITA'	TRASCURABILE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
FREQUENTE				
PROBABILE				
OCCASIONALE			S1	
REMOTO				



RISCHIO BASSO




RISCHIO MEDIO





RISCHIO ALTO

MATRICE DEL RISCHIO – BENI

RISCHIO	CONSEGUENZE			
PROBABILITA'	TRASCURABILE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
FREQUENTE				
PROBABILE				
OCCASIONALE		S1		
REMOTO				


 RISCHIO BASSO


 RISCHIO MEDIO



 RISCHIO ALTO


S2 – MOVIMENTAZIONE E URTI


RISCHIO	POTENZIALE INNESCO	PROBABILITA' DI ACCADIMENTO	DANNO ALLE PERSONE	DANNO AI BENI	DANNO AMBIENTALE
Movimentazione e della batteria, rischio caduta	1) Schiacciamento o perforamento della batteria dovuto alle operazioni di trasporto; 2) Corto circuito interno batterie;	OCCASIONALE Possibile urto da movimentazione o caduta per errore umano	CRITICO Possibile rischio per il personale presente nelle immediate vicinanze del principio d'incendio. Impatto localizzato.	CRITICO Danno localizzato nell'intorno dell'incendio. Possibile effetto a catena e innesco delle batterie adiacenti	NON SIGNIFICATIVO Possibile rilascio di sostanze tossiche in quantità modesta

MATRICE DEL RISCHIO – OCCUPANTI

RISCHIO	CONSEGUENZE			
PROBABILITA'	TRASCURABILE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
FREQUENTE				
PROBABILE				
OCCASIONALE			S2	
REMOTO				



 RISCHIO BASSO


 RISCHIO MEDIO



 RISCHIO ALTO

MATRICE DEL RISCHIO – BENI


RISCHIO	CONSEGUENZE			
PROBABILITA'	TRASCURABILE	MARGINALE	CRITICO	CATASTROFICO
FREQUENTE				
PROBABILE				
OCCASIONALE			S2	
REMOTO				



RISCHIO BASSO



RISCHIO MEDIO



RISCHIO ALTO

6 IDENTIFICAZIONE DELLE MISURE PREVENTIVE

f. individuazione delle misure preventive che possano rimuovere o ridurre i pericoli che determinano rischi significativi.

Le misure preventive che si reputano necessarie per i suddetti rischi sono le seguenti:

S1 – PROCESSO DI SCARICA

Misure Preventive

SOLUZIONI GESTIONALI
<ol style="list-style-type: none"> 1) Durante il processo di scarica di una batteria, si deve monitorare la temperatura prima, durante e dopo il processo di scarica. Qualora si ravvisassero surriscaldamenti e fenomeni di <i>thermal runaway</i>, si richiede la tempestiva immersione in acqua della stessa per almeno 48h. 2) Il personale dovrà inoltre essere formato all'utilizzo dei sistemi e delle procedure antincendio.

S2 – MOVIMENTAZIONE E URTI

Misure Preventive

SOLUZIONI GESTIONALI
<ol style="list-style-type: none"> 1. Deve essere effettuato un controllo visivo dello stato delle batterie (controllo dei danni subiti, controllo della temperatura con termocamera) prima che vengano trasferite all'interno del Battery Center; 2. In caso di caduta di una batteria, qualunque sia il suo livello di carica e anche in assenza di urti visibili, come procedura gestionale si richiede la tempestiva immersione in acqua della stessa per almeno 48 h; 3. Il personale dovrà inoltre essere formato all'utilizzo dei sistemi e delle procedure antincendio.

Si precisa che, per le aree adibite a deposito batterie e locale scarico pacchi al litio, è installato, quale misura mitigativa, un impianto di spegnimento a diluvio ad acqua. Sono inoltre presenti IRAI e termocamere (che dialogano con l'IRAI), realizzato in modo tale da rilevare precocemente un incendio e diffondere l'allarme al personale reperibile.

3. Qualora siano disponibili pertinenti regole tecniche verticali, la valutazione del rischio d'incendio da parte del progettista è limitata agli aspetti peculiari della specifica attività trattata.

4. Negli ambiti delle attività in cui sono presenti sostanze infiammabili allo stato di gas, vapori, nebbie o polveri combustibili, la valutazione del rischio d'incendio deve includere anche la valutazione del rischio per atmosfere esplosive (capitolo V.2).

7 INSUSSISTENZA DEL RISCHIO ESPLOSIONE

La grande diffusione di batterie agli ioni di litio ha portato allo sviluppo di numerosi studi sul tema del rischio incendio ed esplosione per questo tipo di tecnologia.

Come già riportato in precedenza, il malfunzionamento di batterie al litio può risultare da una grande varietà di fonti, inclusi difetti di fabbricazione, abuso termico o elettrico, e/o danneggiamento meccanico. In alcune circostanze questi meccanismi di fallimento possono portare ad una reazione esotermica, sottoponendo la cella al *thermal runaway*. La creazione di gas all'interno della batteria può portare alla rottura della stessa e al rilascio dei gas all'esterno.

Considerato che all'interno del Battery Center non vengono svolte operazioni se non quella di scarica della batteria, non sono presenti macchinari che generino potenziali cortocircuiti, non sono presenti fonti di calore e le batterie sono scollegate dalla corrente (pertanto non si verificano fenomeni di elettrolisi), non si ravvisa, all'interno della suddetta area, un potenziale rischio di esplosione.

Quale ulteriore verifica di tale condizione, si riporta un approfondimento nel paragrafo

APPENDICE: CALCOLO DEL LFL.

8 SINTESI

La presente analisi ha costituito una fase di valutazione del rischio incendio per l'area denominata Battery Center dell'attività Tred Carpi, sita in via Remesina Esterna 27/A a Carpi (MO), relativamente allo stoccaggio di batterie, tra cui batterie agli ioni di litio.

All'interno del Battery Center le batterie sono stoccate in magazzini dove non vengono effettuate altre lavorazioni, non sono presenti fonti di calore e le batterie non sono collegate alla corrente. Le uniche operazioni effettuate sono quelle di scarica delle stesse fino ad un valore di carica di massimo 30%, che rappresenta la più attestata condizione di sicurezza delle batterie.

L'analisi relativa all'individuazione dei pericoli e rischi d'incendio ha portato ad una valutazione del rischio incendio di tipo medio, che può essere gestito con le misure gestionali proposte, ossia:

- Durante il processo di scarica di una batteria, si deve monitorare la temperatura prima, durante e dopo il processo di scarica. Qualora si ravvisassero surriscaldamenti e fenomeni di *thermal runaway*, si richiede la tempestiva immersione in acqua della stessa per almeno 48h;
- Deve essere effettuato un controllo visivo dello stato delle batterie (controllo dei danni subiti, controllo della temperatura con termocamera) prima che vengano trasferite all'interno del Battery Center;
- In caso di caduta di una batteria, qualunque sia il suo livello di carica e anche in assenza di urti visibili, come procedura gestionale si richiede la tempestiva immersione in acqua della stessa per almeno 48 h;
- Il personale dovrà inoltre essere formato all'utilizzo dei sistemi e delle procedure antincendio.

Si precisa inoltre che, quale ulteriore misura di protezione, nei depositi di batterie e nel locale di scarica, è installato un impianto di spegnimento a diluvio ad acqua. Sono inoltre presenti IRAI e termocamere (che dialogano con l'IRAI).

Per la tipologia di batterie e condizioni di stoccaggio non si configura un rischio esplosione. Quale ulteriore dimostrazione, è stato proposto un calcolo del limite inferiore di infiammabilità (LEL) utilizzando il principio di Le Châtelier per la potenziale miscela che possa essere generata nella remota ipotesi di un potenziale e contestuale *thermal runaway* di un numero di batterie agli ioni di litio di veicoli elettrici, pari alla metà di quelli che possono essere contemporaneamente presenti all'interno di ciascun deposito, dimostrando che la concentrazione di gas infiammabili nell'ambiente è ben inferiore sia al valore del limite inferiore di infiammabilità (LEL) della miscela, che al 25% di tale valore (come da NFPA1).

Bologna, 18/09/2024

IL TECNICO

Ing. Paolo Carpino

APPENDICE: CALCOLO DEL LFL

A. FORMAZIONE ATMOSFERE ESPLOSIVE

Riguardo alle varie tipologie di batterie agli ioni di litio che possono essere presenti, le condizioni più rappresentative del rischio sono rappresentate da pacchi batterie che, se assemblate, sono capaci di fornire, oltre che elevate capacità di amperaggio (Ah), elevate condizioni di carica.

Il numero di veicoli a propulsione elettrica prodotti annualmente è in continuo aumento, a seguito di una maggiore ottimizzazione dei veicoli, incentivi per l'acquisto e limitazioni sulla produzione di emissioni nocive. I veicoli a propulsione elettrica comprendono i veicoli ibridi (HEV), quelli plug-in hybrid (PHEV) e i veicoli puramente elettrici (EV). La transizione dai veicoli tradizionali con motore endotermico (ICE) verso veicoli elettrici implica una serie di nuovi scenari di rischio in tutti gli ambiti relativi all'ambiente *automotive*. Anche relativamente alla fase di fine vita della batteria si delineano una serie di nuove sfide in termini di valutazione del rischio incendi ed esplosione.

Per poter inquadrare meglio lo stato dell'arte del panorama dei veicoli elettrici è stata effettuata una ricerca sulle caratteristiche di alcuni tra i più diffusi modelli di veicoli elettrici ed ibridi attualmente in commercio. Questa istantanea del mercato automobilistico permette di valutare quelle che saranno le caratteristiche delle batterie che verranno trattate all'interno del Battery Center di Tred Carpi.

Produttore	Modello	Tipologia	Capacità (KWh)	Capacità (Ah)	Voltaggio (V)	Fonte
Tesla	Model S	EV	100	-	407	www.tesla.com
	Model 3	EV	50-75	-	360	
Nissan	Leaf	EV	40-62	-	350	www.nissan.it
Fiat	500e	EV	23.8-42	-	364	www.fiat.it
Smart	ForTwo	EV	17.6	-	-	www.smart.mercedes-benz.com
Hyundai	Kona	EV	64	-	356	www.hyundai.com
	IONIQ	PHEV	1.6	-	240	
Audi	e-tron	EV	95	-	396	www.audi.it
	e-tron GT	EV	93	-	800	
Mercedes	EQA	EV	66.5	-	367	www.mercedes-benz.it
	EQC	EV	80	-	405	
Porsche	Taycan	EV	79.2-93.4	-	800	www.porsche.com

Tabella 4 – Caratteristiche delle batterie dei principali produttori di veicoli elettrici (dati gennaio 2022)

Come si può riscontrare dalla Tabella 4, l'analisi dei dati dei principali produttori di auto evidenzia come l'attuale segmentazione del mercato prevede una tecnologia basata su voltaggi medi in funzione delle tipologie di auto pari a 400 V:

- BEV: 800 V;
- EV: 400 V;
- HEV: 48 V.

Normalmente, il rischio d'incendio e d'esplosione viene quantificato attraverso la valutazione sia delle probabilità che delle conseguenze dell'evento. Pur essendo la probabilità di esplosione molto bassa, le conseguenze potrebbero essere gravi. Norme e standard internazionali, come l'NFPA 69, riportano varie strategie di mitigazione del rischio, come ad esempio valvole di sfiato, sistemi di soppressione, irrigidimento dei contenitori e aumento delle distanze di rispetto. Queste strategie richiedono la caratterizzazione di tre proprietà chiave dei gas: il limite inferiore di

infiammabilità (LFL – *lower flammability limit*), la velocità laminare di fiamma e la massima sovrappressione adiabatica.

Limite inferiore di infiammabilità

Uno dei primi parametri da valutare per la valutazione del rischio incendio ed esplosione è il limite inferiore di infiammabilità.

Il limite inferiore di infiammabilità (LFL) è la concentrazione in percentuale di un dato gas o di un mix di gas oltre il quale lo stesso può essere innescato ad una data temperatura e pressione. Il range di infiammabilità è delimitato superiormente dal limite superiore di infiammabilità (UFL): oltre quella concentrazione, infatti, l'aria è troppo ricca di quello specifico gas perché si possa innescare.

A seconda del codice o della normativa consultata vengono stabiliti livelli diversi per l'LFL. Lo standard NFPA 1, per esempio, al capitolo 52 valuta necessaria l'installazione di adeguata ventilazione nel caso di concentrazione di gas superiore al 25% del LFL per quella specie o mix (che equivale ad esempio al 1% per la miscela idrogeno-aria).

Di seguito vengono riportate le considerazioni riguardo alle proprietà chiave dei gas rapportate all'interno degli studi del paragrafo 5-VALUTAZIONE DELLE CONSEGUENZE.

In particolare, si vuole di seguito ricalcolare il LFL per la mix di sostanze potenzialmente emesse per effetto venting all'interno del Battery Center. Per quanto riguarda il quantitativo di sostanze potenzialmente emesse dalla tipologia di batterie agli ioni di litio, si farà riferimento alla Tabella 1. In termini di quantitativi di gas emesso, verrà considerato il volume che comporta la massima concentrazione di gas, come da Tabella 2.

All'interno del volume delle aree di stoccaggio sono presenti batterie di varia natura, tra cui quelle al litio, di cui una parte possono essere anche batterie da veicoli elettrici. Al fine di svolgere un calcolo più conservativo, si considererà il venting contemporaneo della metà delle batterie presenti, considerandole come batterie al litio da veicoli elettrici.

Queste caratteristiche, seppure di probabilità remota, permettono di delineare il *worst case* per il Battery Center dell'attività Tred Carpi, oggetto di analisi.

Lo studio “*Analysis of Li-Ion Battery Gases Vented in an Inert Atmosphere Thermal Test Chamber*”, D. Sturk, L. Rosell, P. Blomqvist, A. Ahlberg Tidblad, MDPI, 2019 riporta come emissione di gas per effetto venting un quantitativo pari a 50 l per un modulo di batteria composto da 5 celle con tecnologia LFP (quindi 10 l per cella). Questo modulo presenta una capacità totale di 7 Ah, ossia 1,4 Ah/cella.

Prendendo come riferimento il valore più alto di capacità energetica dai dati riportati in Tabella 4, verrà presa a riferimento una batteria da 100 kWh a 407 V. La capacità della batteria in Ah può essere calcolata come riportato di seguito:

$$\frac{100.000 \text{ Wh}}{407 \text{ V}} = 245 \text{ Ah}$$

Di conseguenza, si può ipotizzare che tale batteria sia composta da un totale di 175 celle (245 Ah / 1,4 Ah/Cella).

È possibile quindi ipotizzare che in caso di fallimento di tutte le celle della batteria si avrebbe l'emissione di 1,75 m³ di gas (1750 l).

Nel deposito di batterie esauste e nel deposito di batterie scariche saranno stoccate fino a 5 ton di batterie. Nell'ipotesi di considerarle tutte come batterie elettriche da autotrazione e considerando un peso medio per una batteria da veicolo elettrico di 300 kg, si stima la presenza contemporanea di circa 17 batterie per deposito.

Considerando, per conservatività, il fallimento contemporaneo della metà di esse (8 batterie), si ottiene il venting simultaneo di 1400 celle (pari a 14.000 l).

B. CALCOLO DEL LFL PER IL DEPOSITO DI BATTERIE SCARICHE

Il volume d'aria presente all'interno del Deposito batterie scariche è di circa 900.000 l, per un totale tra volume di gas emesso ed aria già presente nell'ambiente di circa 914.000 l. Tralasciando momentaneamente le implicazioni della sovrappressione, viene di seguito preso a riferimento il limite inferiore di infiammabilità del mix di gas generatosi.

Come condizione di cautela verrà considerato il quantitativo di sostanze potenzialmente emesse dalla tipologia

di batterie Li-Ion caratterizzata dalla più alta emissione di sostanze infiammabili con SOC pari al 30% rispetto alla Tabella 1, ossia per le batterie **LCO** (FAA Study – 2016).

I valori di composizione del mix di gas emessi per le batterie **LCO** con SOC al 30% sono i seguenti:

- H₂= 6,64 %;
- CO= 2,34 %;
- THC (Idrocarburi)= 15,26 %;
- CO₂ (Inerte)= 75,76 %;

Specie	Concentrazione (%) Vent gas (su 73.500 l)	Concentrazione (%) Ambiente (su 973.500 l)
H ₂	6,64 %	0,10 %
CO	2,34 %	0,04 %
THC (Idrocarburi)	15,26%	0,23 %
CO ₂ (Inerte)	75,76 %	1,16 %
Aria	-	98,47%

La percentuale di componenti infiammabili (H₂, CO, Idrocarburi) all'interno della miscela in ambiente è dunque pari al 0,37%.

Quando il combustibile non è un composto singolo ma una miscela di più solventi, per determinare il limite di infiammabilità si può ricorrere a calcoli che si basano su criteri di additività, partendo dai limiti dei singoli composti. Una regola molto usata è quella di *Le Châtelier*, nota come legge delle miscele. L'equazione è la seguente:

$$L_i = \frac{100}{\frac{c_1}{L_1} + \frac{c_2}{L_2} + \dots + \frac{c_n}{L_n}}$$

Dove L_i è il limite inferiore di infiammabilità della miscela in aria;

c_1, c_2, \dots, c_n è la percentuale di ciascun combustibile nella miscela, senza aria né gas inerti;

l_1, l_2, \dots, L_n sono i limiti inferiori di infiammabilità dei singoli componenti.

Di seguito vengono riportati i limiti di infiammabilità per alcuni gas e vapori (a temperatura e pressione ambiente e con aria come comburente).

	Li, % vol	Ls, % vol		Li, % vol	Ls, % vol
Idrocarburi			Idrocarburi		
Metano	5	15	Etilene	2,7	37
Etano	3	12,4	Propilene	2,4	11
Propano	2,1	9,5	Acetilene	2,5	100
Butano	1,8	8,4	Benzene	1,3	7,9
Pentano	1,4	7,8	Toluene	1,2	7,1
Esano	1,2	7,4	Xilene	1,1	6,4
Eptano	1,0	6,7	Stirene	1,1	6,1
Alcoli			Eteri		
A. metilico	6,7	36	E. metilico	3,4	18
A. etilico	3,3	19	E. etilico	1,9	48
A. propilico	2,2	14	E. vinilico	1,7	27
A. butilico	1,7	12	Ossido etilene	3,0	100
			Ossido propilene	2,8	37
Aldeidi			Chetoni		
Acetaldeide	4,0	60	Acetone	2,6	31
Acroleina	2,8	31	Metiletil chetone	1,9	10
Acidi/Anidridi			Esteri		
A. acetico	5,4		Acetato metile	3,2	16
An. acetica	2,7	10	Acetato etile	2,2	11
An. ftalica	1,2	9,2	Acetato vinile	2,6	13,4
Ammine			Inorganici		
Metilammina	4,2	21	Ammoniaca	15	28
Dimetilammina	2,8	14,4	Idrazina	4,7	100
Trimetilammina	2,0	12	Idrogeno	4,0	75
Etilammina	3,5	14	Ossido di carbonio	12,5	74
Dietilammina	1,6	10	Solfuro di carbonio	4,0	44

Tabella 5 – Limiti di infiammabilità per alcuni gas e vapori

Dalla tabella precedente si ricavano i seguenti valori per i limiti di infiammabilità inferiori delle singole specie:

- $H_2 = 4\%$;
- $CO = 12,5\%$;
- THC (Idrocarburi) = $1,98\%$ (media dei valori riportati nella Tabella 5);

Di conseguenza il Limite inferiore di infiammabilità della miscela emessa dalle batterie **LCO** è il seguente:

$$L_i = \frac{100}{\frac{0,10}{4} + \frac{0,04}{12,5} + \frac{0,23}{1,98}} = 683 > 100\%$$

Il valore ottenuto, superiore al 100%, indica che con queste concentrazioni di infiammabili la miscela non presenta mai un intervallo di infiammabilità. Anche considerando il valore massimo ammissibile pari al 100% e applicando il coefficiente di riduzione della NFPA1 pari al 25%, si ottiene un valore di LFL pari al 25%.

La concentrazione di infiammabili all'interno dell'ambiente è pari a 0,37%, pertanto la concentrazione di infiammabili non risulta abbastanza da determinare il rischio esplosione per il deposito di batterie scariche.

C. CALCOLO DEL LFL PER IL DEPOSITO DI BATTERIE ESAUSTE

Il volume d'aria presente all'interno del Deposito batterie esauste è di circa 300.000 l, per un totale tra volume di gas emesso ed aria già presente nell'ambiente di circa 314.000 l. Tralasciando momentaneamente le implicazioni della sovrappressione, viene di seguito preso a riferimento il limite inferiore di infiammabilità del mix di gas generatosi.

Come condizione di cautela verrà considerato il quantitativo di sostanze potenzialmente emesse dalla tipologia di batterie Li-Ion caratterizzata dalla più alta emissione di sostanze di idrogeno con SOC pari al 100% rispetto alla Tabella 1 e Figura 8, ossia per le batterie **LFP**.

I valori di composizione del mix di gas emessi sono i seguenti:

- H₂= 54 %;
- CO= 10 %;
- THC (Idrocarburi)= 12 %;
- CO₂ (Inerte)= 24 %;

Specie	Concentrazione (%) Vent gas (su 29.750 l)	Concentrazione (%) Ambiente (su 329.750 l)
H ₂	54 %	2,41 %
CO	10 %	0,45 %
THC (Idrocarburi)	12%	0,54 %
CO ₂ (Inerte)	24 %	1,07 %
Aria	-	95,53%

La percentuale di componenti infiammabili (H₂, CO, Idrocarburi) all'interno della miscela in ambiente è dunque pari al 3,40%.

Utilizzando il principio di Le *Châtelier* si ottiene:

$$L_i = \frac{100}{\frac{2,41}{4} + \frac{0,45}{12,5} + \frac{0,54}{1,98}} = 110 > 100\%$$

Il valore ottenuto, superiore al 100%, indica che con queste concentrazioni di infiammabili la miscela non presenta mai un intervallo di infiammabilità. Applicando il coefficiente di riduzione della NFPA1 pari al 25%, si ottiene un valore di LFL pari al 27,5% (considerando il valore analitico di 110) o pari al 25% (prendendo a riferimento il valore massimo di 100%). La concentrazione di infiammabili all'interno dell'ambiente è pari a 3,40%, pertanto la concentrazione di infiammabili non risulta abbastanza da determinare il rischio esplosione per il deposito di batterie scariche.