



European Train the Trainer Programme for Responders

Lezione 11
Spazi confinati
Livello IV
Specialista

Le informazioni contenute in questa lezione sono rivolte al livello **Specialista**.

La lezione è disponibile solo per il livello IV

La lezione fa parte del materiale didattico per i livelli I – IV : Vigile del Fuoco, Capo Squadra, Funzionario di Guardia e Specialista. L'introduzione della lezione riporta le competenze e aspettative di apprendimento

Nota: il materiale è proprietà del Consorzio HyResponder e dovrebbe essere riconosciuto conformemente; gli output del progetto HyResponse sono stati utilizzati come materiale di riferimento



Dichiarazione di limitazione di responsabilità

Nonostante l'attenzione prestata durante la preparazione di questo documento, si applica la seguente dichiarazione di limitazione delle responsabilità: le informazioni in questo documento vengono fornite così come sono e non viene fornita alcuna garanzia che le informazioni siano adatte ad uno scopo particolare. L'utente utilizza le informazioni a suo esclusivo rischio e responsabilità.

Il documento riflette solo le opinioni degli autori. La FCH JU e l'Unione Europea non sono responsabili per qualsiasi uso che possa essere fatto delle informazioni ivi contenute.

Disclaimer

Despite the care that was taken while preparing this document the following disclaimer applies: the information in this document is provided as is and no guarantee or warranty is given that the information is fit for any particular purpose. The user thereof employs the information at his/her sole risk and liability.

The document reflects only the authors' views. The FCH JU and the European Union are not liable for any use that may be made of the information contained therein.

Ringraziamenti

Il progetto è stato finanziato dal Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) con il grant agreement N. 875089. Il JU riceve supporto dal programma di ricerca ed innovazione European Union's Horizon 2020 ed il Regno Unito, Francia, Austria, Belgio, Spagna, Germania, Italia, Repubblica Ceca, Svizzera, Norvegia.

Acknowledgements

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (now Clean Hydrogen Partnership) under Grant Agreement No 875089. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.

Sommario

Questa lezione fornisce ai soccorritori una panoramica dell'uso delle tecnologie FC e dell'idrogeno in spazi confinati, ad esempio all'interno di ambienti chiusi, nei parcheggi coperti e nelle gallerie. Si sottolinea che le informazioni trattate nelle lezioni precedenti sono tutte applicabili ed in questa lezione sono trattate solo le ulteriori ricerche recenti. Questa lezione mette in evidenza i rischi specifici relativi ai sistemi FCH situati in spazi interni, tra cui l'effetto della ventilazione passiva e forzata, incendi a idrogeno ventilati e sotto-ventilati, inclusi due regimi di autoestinzione e fiamma esterna. Questa lezione discute anche il *pressure peaking phenomenon* (fenomeno del picco di pressione), che è specifico per l'idrogeno.

Keywords

Spazio confinato, ventilazione, pressure peaking phenomenon, parcheggi, tunnel, incendio ventilato, incendio sotto-ventilato, auto-estinzione di fiamma, fiamma esterna.

Indice

Sommario	3
Keywords	3
1. Target audience	5
1.1 Descrizione del ruolo: Specialista	5
1.2 Livello di competenza: Specialista	5
1.3 Prerequisiti di apprendimento: Specialista	5
2. Introduzione ed obiettivi	6
3. Pericoli e rischi associati all'utilizzo dell'idrogeno in spazi confinati	6
4. Perdite per permeazione	11
5. Rilasci di idrogeno in spazi interni e dispersione	11
6. Ventilazione naturale e forzata	13
7. Pressure peaking phenomenon	16
8. Parcheggi coperti	21
9. Tunnels	24
9.1 Effetto della velocità di ventilazione sulla dispersione nei tunnel	25
9.2 Transizione da deflagrazione a detonazione (DDT) nei tunnel	26
10. Regimi di incendi di idrogeno in ambienti interni	28
10.1 Fiamme e incendi ventilati	28
10.2 Fiamme e incendi sotto-ventilati	31
10.3 Autoestinzione della fiamma	32
10.4 Fiamma esterna	36
11. Utilizzo di e-Laboratory	39
11.1 Ventilazione passiva in un container con un'apertura: concentrazione uniforme di idrogeno ³⁹	
11.2 <i>Pressure peaking phenomenon</i> per rilasci non innescati	43
11.3 <i>Pressure peaking phenomenon</i> per il rilascio innescato	50
Ringraziamenti	56
Bibliografia	57

1. Target audience

Le informazioni contenute in questa lezione sono indirizzate al livello Specialista. La descrizione del ruolo, livello di competenza e aspettative di apprendimento per lo Specialista sono descritte di seguito.

1.1 Descrizione del ruolo: Specialista

Gli Specialisti assistono i Funzionari di Guardia con consigli e dirigendo e supervisionando le operazioni tecniche che comportano l'uso di conoscenze, abilità o attrezzature relative ad un rischio specifico o attività di intervento. Gli incidenti tipici coinvolgono materiali pericolosi, veicoli per il trasporto, eventi climatici, guasti strutturali e di altri edifici, e logistica di risposta alle emergenze.

1.2 Livello di competenza: Specialista

Una base scientifica, ingegneristica ed empirica nell'area disciplinare con competenze ampliate dall'esperienza per applicare tali informazioni e conoscenze in modo adeguato e utile per consentire al Funzionario di Guardia e ai Vigili di Fuoco sotto la direzione dello Specialista di rispondere in modo efficace e sicuro alle situazioni di emergenza.

1.3 Prerequisiti di apprendimento: Specialista

EQF 5 Conoscenza completa, specializzata, fattuale e teorica nel campo di lavoro o di studio e consapevolezza dei limiti di tale conoscenza. Una gamma completa di abilità cognitive e pratiche necessarie per sviluppare soluzioni creative a problemi teorici. Esercitare la gestione e la supervisione in contesti di attività lavorative o di studio in cui vi sia un cambiamento imprevedibile; rivedere e sviluppare le prestazioni proprie e degli altri.

2. Introduzione ed obiettivi

L'uso delle tecnologie FCH in spazi confinati è associato alla maggiore probabilità di accumulo di idrogeno. Grazie alla crescita di queste tecnologie, è possibile trovare installazioni FCH non solo all'aperto ma anche in ambienti interni. Gli esempi includono: carrelli elevatori FC all'interno di magazzini; veicoli FC situati in parcheggi coperti, tunnel e garage; elettrolizzatori e celle a combustibile per uso domestico, ecc. In caso di incidente che coinvolga installazioni FCH in ambienti interni, sono possibili i seguenti sviluppi: gli occupanti potrebbero non essere in grado di lasciare un edificio/una struttura; il soccorritori potrebbero non essere in grado di svolgere le proprie funzioni senza mettere a rischio la propria vita; la demolizione parziale o totale mette in pericolo la vita sia dei soccorritori che del pubblico in generale. Pertanto, il tema dell'uso sicuro dell'idrogeno e delle celle a combustibile in spazi ristretti è di grande importanza per i Vigili del Fuoco. Mentre per un rilascio di idrogeno all'aperto la galleggiabilità è una risorsa di sicurezza naturale che fornisce il suo rapido rilascio/dispersione, per i rilasci all'interno questo potrebbe non essere il caso. Il rilascio rapido di idrogeno in ambienti interni può portare ad un aumento di pressione o al suo accumulo e quindi a conseguenze più gravi.

UU è stato uno dei partner del progetto Hyindoor “Pre-normative research on safe indoor use of fuel cells and hydrogen systems” (www.hyindoor.eu) con finanziamenti Europei. I principali risultati di questo progetto hanno portato a una più profonda comprensione dei fenomeni associati ai rilasci da installazioni di idrogeno negli ambienti interni e alla guida all'uso dell'idrogeno in ambienti confinati e nei tunnel [1, 14].

Alla fine di questa lezione i vigili del fuoco/allievi saranno in grado di:

- Identificare i principali rischi dell'uso dell'idrogeno in ambienti chiusi,
- Distinguere tra ventilazione passiva e forzata,
- Descrivere i principali regimi sugli incendi di idrogeno in ambienti interni,
- Comprendere l'effetto dello sfiato della deflagrazione,
- Spiegare il *pressure peaking phenomenon*,
- Utilizzare i nomogrammi per valutare la possibilità del *pressure peaking phenomenon* (PPP).

3. Pericoli e rischi associati all'utilizzo dell'idrogeno in spazi confinati

Una vasta serie di scenari possono coinvolgere le applicazioni FCH situate in spazi confinati (vedi Deliverable D1.1 di HyResponder [2]). I volumi totali degli spazi chiusi possono variare, da un piccolo garage a un container per una cella a combustibile stazionaria (FC), fino a un magazzino di grandi dimensioni. Anche i ratei di rilascio dell'idrogeno possono variare, da un rilascio di piccola portata in massa da una linea di alimentazione a un FC fino a un rilascio su

Lezione 11: Spazi confinati

larga scala da un sistema di stoccaggio ad alta pressione, ad esempio un rilascio da TPRD di un'auto FC parcheggiata in un garage residenziale. In caso di incidenti che si verificano su sistemi FCH situati in ambienti interni (*indoor*), le priorità per i vigili del fuoco sono: mettere in sicurezza la vita umana, proteggere la proprietà e l'ambiente. I criteri di danno per l'uomo e i criteri di danno per le strutture sono discussi in dettaglio nella relativa lezione.

I pericoli relativi a un incidente su installazioni FCH indoor includono:

- Deplezione di ossigeno e conseguente asfissia,
- Effetti dell'alta temperatura e del flusso di calore delle fiamme da getto di gas (*jet fires*),
- Ustioni criogeniche dovute alla fuoriuscita di idrogeno liquido,
- Effetti di sovrappressione,
- Lesioni e perdita della vita,
- Collasso strutturale,
- Effetti "Domino",
- Danni all'ambiente.

Coloro che progettano/approvano/possiedono l'installazione FCH in ambienti chiusi dovrebbero considerare attentamente la riduzione dei "danni alle strutture, infrastrutture ed attrezzature, e ridurre al minimo le interruzioni dell'attività, preservare l'immagine aziendale e ridurre le perdite finanziarie dirette e indirette" [3, 4]. "Bisogna prestare attenzione alla prevenzione dell'intensificarsi degli effetti di oggetti, eventi e layout sui danni e al valore e all'importanza della proprietà all'interno e intorno a una struttura" [3].

In caso di rilascio, grande o piccolo che sia, ci sono una serie di potenziali fenomeni che possono verificarsi. Questi possono includere:

- Rilascio di idrogeno non innescato. Se ciò accade all'interno, i fattori da considerare includono: valutazione della dimensione della nube infiammabile; determinazione del livello di potenziale sovrappressione (senza accensione); valutare la relazione tra la velocità di ventilazione e il rilascio.
- Rilascio innescato. Se il rilascio viene innescato con la formazione di un *jet fire*, dovrebbero essere considerati i seguenti fattori: il trasferimento di calore all'ambiente circostante; sostenibilità di un incendio (cioè se c'è una quantità sufficiente di ossigeno per sostenerlo o se si spegnerà); relazione tra la ventilazione e il comportamento al fuoco; possibilità di riaccensione della miscela infiammabile.
- Esplosione: in questo caso dovrebbero essere poste le seguenti domande: se un rilascio non innescato si accumula e successivamente si innesca provocando una deflagrazione o una detonazione quali sono le conseguenze? Qual è la relazione tra lo sfiato e la sovrappressione di deflagrazione?

Lezione 11: Spazi confinati

L'idrogeno ha un'elevata propensione alle perdite e questo può diventare un problema in un ambiente interno. Ovviamente, l'accumulo di idrogeno negli spazi confinati/chiusi può portare alla formazione di una miscela infiammabile con l'aria (o l'ossigeno). Ci sono anche altri problemi associati a rilasci accidentali come il *pressure peaking phenomenon* (PPP) e l'effetto dell'esaurimento dell'ossigeno. Una ventilazione adeguata può mitigare questi effetti. Se viene innescata una perdita di idrogeno, la fiamma (jet fire o "pennacchio") si diffonderà e crescerà all'interno di uno spazio chiuso. Oltre alla fiamma e ai pericoli ad essa associati come la temperatura e il flusso di calore, si formeranno prodotti gassosi di combustione calda che possono anche rappresentare un pericolo. Quando questi prodotti gassosi si muovono verso l'alto, può formarsi uno strato caldo di gas sotto il soffitto dello spazio chiuso. La modalità di crescita dell'incendio dipenderà dal tipo di combustione, dall'interazione con l'ambiente circostante e dall'accesso all'ossigeno [5]. A seconda delle dimensioni e della posizione della perdita, la fiamma stessa può incidere sugli elementi costruttivi del compartimento.

I fenomeni relativi alla sicurezza e le potenziali conseguenze associati a incidenti in ambienti interni che coinvolgono i sistemi FCH sono riassunti nel diagramma mostrato nella Figura 1.

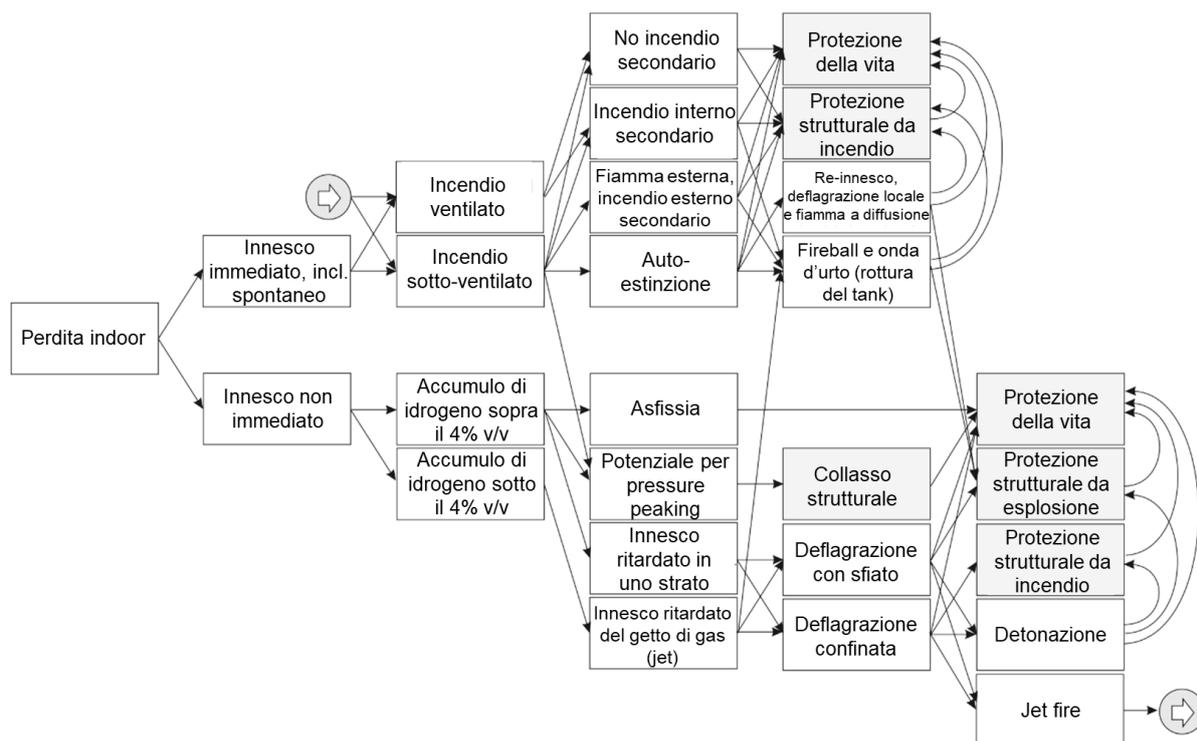


Figura 1. Fenomeni e conseguenze legati alla sicurezza. Le caselle bianche corrispondono a fenomeni di idrogeno; caselle grigie – alle conseguenze [4].

Come mostrato in Figura 1, a seguito di una perdita di idrogeno in spazi ristretti, sono possibili due opzioni: nessun innesco immediato (ramo inferiore del diagramma) ed innesco immediato compresa l'accensione spontanea (ramo superiore del diagramma). L'innesco di una perdita di idrogeno può essere causata dalla presenza di una fiamma libera, una superficie calda, una scintilla elettrica o meccanica e altri fattori, nonché il fenomeno specifico dell'idrogeno di

Lezione 11: Spazi confinati

accensione spontanea (all'interno di tubazioni piene d'aria), detto meccanismo di diffusione [6].

Se la perdita si innesca immediatamente, può svilupparsi un incendio successivo in due modalità: ventilato e sotto-ventilato. L'incendio ventilato è caratterizzato da un tasso di rilascio di idrogeno relativamente basso e dalla combustione completa dell'idrogeno all'interno dell'ambiente. I pericoli associati all'incendio ventilato includono:

- effetto diretto della fiamma e della corrente calda dei prodotti della combustione,
- irraggiamento dallo strato caldo formatosi sotto il soffitto,
- superfici solide calde come tetti, cedimenti strutturali di elementi costruttivi portanti per contatto diretto con la fiamma, ecc.

Un aumento della portata di rilascio dell'idrogeno può comportare il passaggio ad un *incendio sotto-ventilato*, quando l'ossigeno viene consumato a una velocità maggiore di quella che può essere reintegrata attraverso la ventilazione. Questo a sua volta può portare a due sotto-regimi: una *fiamma esterna* che si verifica nelle prese d'aria (senza combustione all'interno dell'ambiente chiuso) e la completa *autoestinzione* dell'incendio all'interno dell'ambiente. Azioni aggiuntive sono richieste da parte dei soccorritori dopo l'autoestinzione dell'incendio, come ad es. in un container FC, per garantire che l'idrogeno non si accumuli oltre il limite di pericolo nel container che ospita l'FC.

Entrambi i tipi di incendio possono provocare l'accensione di materiali infiammabili all'interno dell'involucro, generando un *incendio interno secondario*. Pertanto, l'incendio continuerà a persistere anche dopo che il rilascio di idrogeno è stato interrotto, ad es. chiudendo le valvole di sicurezza, e sono possibili ulteriori rischi, come il rilascio di fumi tossici. L'incendio sotto-ventilato è caratterizzato da un tasso di rilascio di idrogeno relativamente alto. Pertanto, esiste un potenziale per il PPP, che mette in pericolo l'integrità strutturale della costruzione [6, 7]. Vale la pena notare che sia i rilasci non innescati che quelli innescati possono generare pericolose sovrappressioni a causa del PPP. Tuttavia, il calcolo della sovrappressione dovuta al PPP è diverso per il rilascio non innescato e il *jet fire*. L'incendio sotto-ventilato può anche portare a una fiamma esterna, cioè un *incendio esterno secondario*.

Se entrambi i tipi di incendio e gli incendi secondari non vengono estinti e continuano a bruciare, ciò può potenzialmente portare a una rottura catastrofica dei serbatoi di stoccaggio situati all'interno, con conseguente rilascio rapido di energia seguito dall'accensione di grandi quantità di idrogeno, producendo una *fireball* e *onda d'urto*. Le fiamme esterne e gli incendi esterni secondari possono anche causare la rottura dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno posizionati all'esterno. Pertanto, dovrebbero essere prese misure per prevenire che ciò accada, ad es. posizionando i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno esterni a una determinata distanza dalle prese d'aria della struttura.

Lezione 11: Spazi confinati

L'incendio autoestinguente sotto-ventilato può riaccendersi quando una nuova fornitura di aria entra nell'ambiente chiuso. Può potenzialmente portare ad una *deflagrazione localizzata* e ad una fiamma a diffusione nelle zone contenenti idrogeno al di sopra del limite inferiore di infiammabilità (LFL), cioè 4 vol. %. Tutti i tipi di incendio presentano rischi per la *sicurezza della vita* (danno termico diretto dalla fiamma, danno termico da radiazione, sovrappressione dovuta al PPP e tossicità dei prodotti di combustione prodotti da incendi secondari) e rischi per la *sicurezza strutturale* (indebolimento dell'integrità strutturale ed eventuale collasso della struttura a causa di incendi prolungati) [4].

Se una perdita di idrogeno non si innescasse immediatamente dopo il rilascio, comporterebbe un graduale accumulo di idrogeno all'interno dell'ambiente chiuso. Un rilascio con una portata elevata che supera la capacità di ventilazione può produrre una concentrazione di idrogeno al di sopra del LFL, che crea la possibilità di un *innesco ritardato in uno strato* di miscela infiammabile e la sua deflagrazione. Inoltre, un rilascio ad alta portata può provocare asfissia e PPP. Sebbene l'idrogeno non sia velenoso/tossico, non supporta il metabolismo. Analogamente a qualsiasi altro gas (ad eccezione dell'ossigeno) esiste un rischio di asfissia principalmente in aree confinate a causa della mancanza di ossigeno [8]. Un rilascio di idrogeno con una portata inferiore, che non porta all'accumulo di idrogeno sopra il 4 vol. % in uno strato, può ancora provocare un *innesco ritardato nel getto di gas turbolento*. Entrambi i tipi di innesco ritardato possono provocare la deflagrazione della miscela idrogeno-aria con sovrappressione, che potenzialmente può distruggere la struttura. La mitigazione delle esplosioni mediante sfiati/sfoghi della deflagrazione è una tecnica molto diffusa. Quando la struttura è dotata di sfiati, che forniscono un rilascio dalla sovrappressione di deflagrazione, può verificarsi una *deflagrazione con sfiato (vented deflagration)*. Una *deflagrazione confinata* differisce dalla deflagrazione con sfiato per l'assenza di aperture significative che conducono all'ambiente esterno, impedendo così lo scarico della pressione dall'interno della struttura. Il picco di pressione in un recipiente chiuso per una miscela stechiometrica idrogeno-aria, inizialmente a NTP, può raggiungere fino a 815 kPa [9], il che distruggerebbe qualsiasi struttura civile (generalmente in grado di sopportare sovrappressioni di circa 10-20 kPa).

In alcuni casi, la deflagrazione può portare a una transizione alla *detonazione*. A causa della maggiore velocità di propagazione della fiamma e dei livelli più elevati di sovrappressione, le detonazioni presentano rischi maggiori rispetto alle deflagrazioni. Sia la deflagrazione che la detonazione rappresentano un pericolo per la *sicurezza e protezione della vita* a causa della pressione e degli effetti termici. Presentano anche un rischio di danno strutturale a seguito dell'esplosione, che negli scenari peggiori possono portare al crollo della struttura. Infine, entrambi gli eventi di innesco ritardato discussi in precedenza possono essere associati alle fiamme a getto (jet fires), compreso l'effetto di impatto della fiamma sulle pareti e/o sul soffitto della struttura. Il jet fire può bruciare sia in regime ventilato che sotto-ventilato, e i successivi fenomeni e conseguenze sulla sicurezza seguirebbero lo schema indicato nel ramo superiore

Lezione 11: Spazi confinati

del diagramma (Figura 1) corrispondente all'innescio immediato come illustrato dalla freccia (⊙) nei pittogrammi a cerchio.

4. Perdite per permeazione

La permeazione dell'idrogeno attraverso i serbatoi di stoccaggio non è prevista come un problema per i vigili del fuoco. Tuttavia, per completezza, i fenomeni sono descritti nella Lezione 3 – Stoccaggio dell'idrogeno, Lezione 4 – Compatibilità dell'idrogeno con differenti materiali e Lezione 7 – Rilasci di idrogeno all'aperto e la loro mitigazione.

5. Rilasci di idrogeno in spazi interni e dispersione

Le applicazioni energetiche dell'idrogeno richiedono spesso che i sistemi vengano utilizzati all'interno, ad es. carrelli industriali per la movimentazione di materiali in un magazzino, celle a combustibile situate in una stanza o idrogeno immagazzinato e distribuito da una cabina. Potrebbe anche essere necessario o desiderabile posizionare alcuni componenti ed apparecchiature del sistema a idrogeno all'interno di container interni o esterni per motivi di sicurezza, per isolarli dall'utente finale e dal pubblico.

L'uso dell'idrogeno in ambienti confinati richiede valutazioni dettagliate dei pericoli e dei rischi associati, comprese le potenziali funzioni di prevenzione e mitigazione dei rischi. Il rilascio di idrogeno può potenzialmente portare all'accumulo di idrogeno e alla formazione di una miscela idrogeno-aria infiammabile e jet fires.

Le lacune della conoscenza dei seguenti quattro argomenti principali sono state colmate attraverso il progetto HyIndoor (<https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>).

- Rilascio di idrogeno all'interno di uno spazio confinato o semi-confinato;
- Deflagrazione interna idrogeno-aria;
- Jet fire e incendio sotto-ventilato;
- Rilevamento di idrogeno per spazi confinati.

La conoscenza generata è stata tradotta in linee guida di sicurezza all'avanguardia, inclusi strumenti ingegneristici specifici a supporto della loro implementazione. Sono state formulate raccomandazioni in merito alle evoluzioni necessarie nel quadro normativo, codici e standard a livello europeo e internazionale per supportare l'introduzione sicura di celle a combustibile e idrogeno nel mercato.

Esistono tre obiettivi di sicurezza generici per qualsiasi sistema di sicurezza, compreso l'uso di sistemi a idrogeno in ambienti interni: sicurezza della vita, protezione della proprietà e protezione dell'ambiente. Attenzione primaria dovrebbe essere data alla sicurezza della vita, ad es. lavoratori del sito, clienti e pubblico in generale. Gli obiettivi di sicurezza della vita includono, ma non sono limitati a [3]:

Lezione 11: Spazi confinati

- Gli occupanti sono in grado di lasciare l'edificio/struttura in un tempo ragionevole, o le conseguenze per gli occupanti sono ragionevolmente basse;
- I vigili del fuoco sono in grado di operare in ragionevole sicurezza;
- Il crollo o i detriti non mettono in pericolo i presenti, i vigili del fuoco e altre persone che potrebbero trovarsi nelle vicinanze della struttura.

Le regole generali di sicurezza, le strategie e le raccomandazioni per la progettazione e l'utilizzo dell'infrastruttura dell'idrogeno includono:

- Considerare se è davvero necessario alloggiare il sistema a idrogeno all'interno di una stanza/struttura, o se potrebbe essere ricollocato all'aperto dove una perdita accidentale avrebbe meno probabilità di portare all'accumulo di idrogeno in concentrazioni infiammabili grazie a una migliore ventilazione;
- Riduzione del diametro della tubazione di alimentazione dell'idrogeno e della pressione operativa al minimo necessario per soddisfare i requisiti tecnologici per la portata in massa. Se la riduzione del diametro del tubo è impossibile o indesiderabile, utilizzo di limitatori di flusso;
- Minimizzazione della pressione di esercizio dell'idrogeno ove possibile;
- Posizionamento dell'infrastruttura ad idrogeno in modo da garantire il decadimento dei rilasci a getto prima dell'impatto sugli ostacoli vicini al fine di prevenire la formazione di strati con concentrazione di idrogeno infiammabile;
- Identificazione e, ove possibile, riduzione del numero e separazione delle potenziali fonti di innesco;
- Utilizzo di serbatoi di stoccaggio con elevata resistenza al fuoco per garantire un tempo almeno sufficiente per l'evacuazione delle persone;
- Minimizzazione dell'inventario dell'idrogeno per prevenire la formazione di miscele infiammabili in ambienti chiusi anche dopo il completo rilascio e dispersione dell'idrogeno o limitarlo al di sotto della quantità che produrrà danni strutturali in apparecchiature ed edifici a bassa resistenza in caso di deflagrazione;
- Valutazione delle distanze di separazione deterministiche prima della valutazione quantitativa del rischio (QRA). Le distanze di separazione deterministiche possono essere calcolate per rilasci non innescati e per jet fire ventilati utilizzando nomogrammi pubblicati e convalidati;
- Considerare l'uso preferenziale di prese d'aria laterali rispetto a quelle sul tetto al fine di migliorare la ventilazione passiva e le prese d'aria verticali rispetto a quelle orizzontali della stessa area;

Lezione 11: Spazi confinati

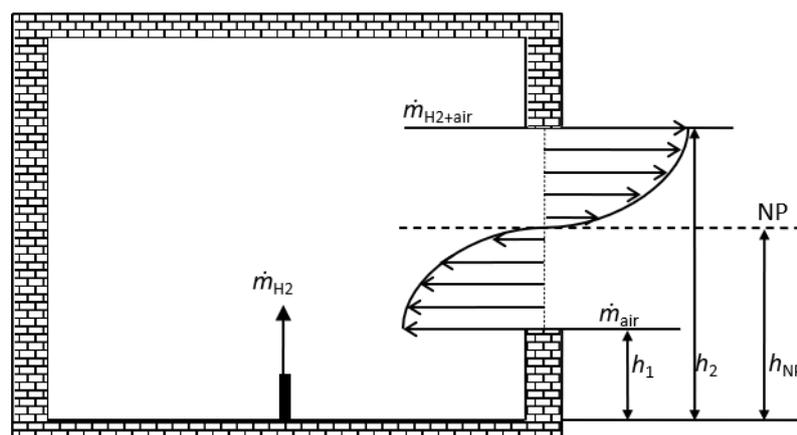
- Considerare l'uso preferenziale di più prese d'aria rispetto ad una singola della stessa area con dislivello della posizione delle prese d'aria il più ampio possibile e su tutti i lati dell'edificio per migliorare la ventilazione assistita dal vento indipendentemente dalla sua direzione;
- Considerare il più possibile l'esclusione di tubi e condotti di sfiato.

Le linee guida e le strategie di mitigazione dell'applicazione dell'idrogeno in ambienti interni possono essere trovate nel report del progetto HyIndoor (<https://hal-cea.archives-ouvertes.fr/cea-02429488>).

6. Ventilazione naturale e forzata

La ventilazione può essere *naturale/passiva* o *forzata/meccanica/attiva*. La ventilazione naturale è un'opzione preferibile in quanto è economica e affidabile, non dipende da una fonte di alimentazione ed è sempre operativa. La ventilazione naturale è garantita da prese d'aria permanenti. La posizione di queste prese d'aria è importante e dovrebbe garantire il massimo flusso d'aria e dispersione del gas infiammabile. Con l'idrogeno si consiglia una combinazione di prese d'aria superiori e inferiori. Se possibile, si dovrebbe permettere alla ventilazione naturale di fornire tutta la ventilazione necessaria e l'aria di ricambio.

Il piano neutro (NP) è un piano orizzontale in cui la pressione all'interno è uguale alla pressione all'esterno dell'ambiente chiuso. Sotto il NP l'aria entra nell'ambiente interno e sopra il NP la miscela idrogeno-aria più leggera esce dal compartimento. Per la ventilazione naturale, il NP è a metà altezza di ventilazione (Figura 2a). Nel caso di ventilazione passiva del container con rilascio di gas più leggero dell'aria, l'NP si trova alla metà o al di sotto della metà dell'altezza dell'apertura per condizioni stazionarie come mostrato nella Figura 2b.



(a)

Lezione 11: Spazi confinati

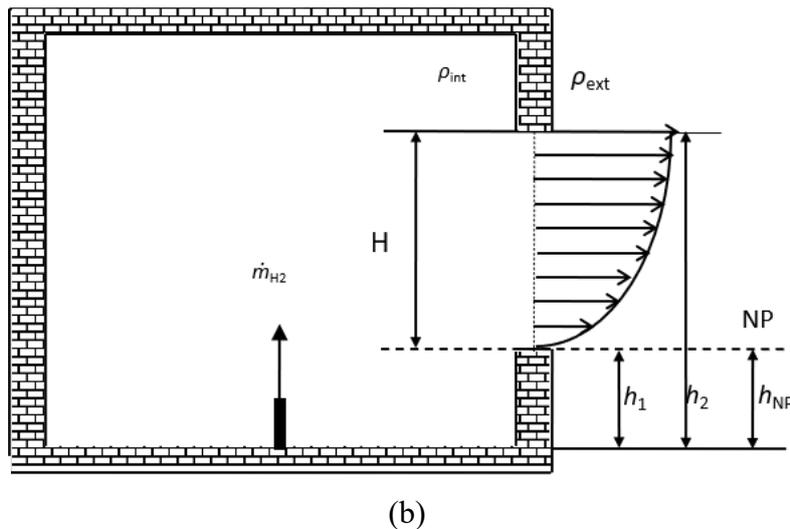


Figura 2. Velocità del flusso attraverso l'apertura per ventilazione naturale (a) e passiva (b).

Le equazioni della ventilazione naturale per la ventilazione dell'aria sono derivate dall'assunzione dell'uguaglianza del flusso in entrata e in uscita dal container. Nel caso della ventilazione passiva, il NP per gas più leggeri dell'aria può essere posizionato inferiormente alla metà dell'altezza di ventilazione.

Il livello massimo di concentrazione di idrogeno nel container con una singola apertura nell'ipotesi di perdita sostenuta può essere valutato utilizzando la seguente equazione [10]:

$$X = f(X) \cdot \left[\frac{Q_0}{C_D A (g' H)^{1/2}} \right]^{2/3} \quad (1)$$

dove X è la frazione di volume dell'idrogeno, Q_0 è la velocità di rilascio (m^3/s), C_D è il coefficiente di scarico, A è l'area dell'apertura (m^2), H è l'altezza dell'apertura (m), g' è la gravità ridotta (m/s^2), $g' = g(\rho_{air} - \rho_{H_2})/\rho_{air}$, ρ_{air} e ρ_{H_2} sono rispettivamente la densità dell'aria e dell'idrogeno (kg/m^3) e $f(X)$ è una funzione uguale a:

$$f(X) = \left(\frac{9}{8} \right)^{1/3} \cdot \left\{ \left[1 - X \left(1 - \frac{\rho_{H_2}}{\rho_{air}} \right) \right]^{1/3} + (1 - X)^{2/3} \right\} \quad (2)$$

La derivazione dell'equazione (1) presuppone:

- Una portata di rilascio costante,
- Uniformità della miscela di gas in tutto lo spazio confinato, ovvero la concentrazione di idrogeno non è una funzione della posizione all'interno del container.

Un confronto con gli esperimenti ha mostrato, tuttavia, che l'equazione (1) può essere utilizzata per stimare la concentrazione massima di idrogeno nel caso di idrogeno stratificato [10], ovvero può essere considerata conservativa. Sulla base delle equazioni (1) e (2) è stato sviluppato un nomogramma ingegneristico per il calcolo delle dimensioni (altezza e larghezza) di un'apertura per la ventilazione nel caso di una miscela uniforme nel container con una singola apertura [10]

Lezione 11: Spazi confinati

(Figura 3). Si noti che sebbene in pratica la miscela idrogeno-aria possa formare strati anche nell'ambiente con un'apertura, le equazioni e il nomogramma in Figura 3 forniscono risultati prossimi ai valori di concentrazione massima, ovvero il nomogramma è conservativo e può essere applicato a miscele non uniformi. Il nomogramma può essere utilizzato per calcolare la concentrazione massima di idrogeno in condizioni stazionarie in base all'altezza e alla larghezza di un'apertura e alla velocità di rilascio. Il nomogramma è valido sia per miscele uniformi che non uniformi in un ambiente chiuso con un'apertura. La procedura per il calcolo della concentrazione di idrogeno (freccie rosse) è la seguente:

1. Selezionare la portata in massa della perdita di idrogeno (*mass flow rate of hydrogen*) in corrispondenza dell'asse verticale del pannello inferiore del nomogramma e proiettarla orizzontalmente fino all'intersezione con una delle linee diagonali corrispondenti alle diverse altezze dell'apertura (*vent height*). Il nomogramma in Figura 3 presenta 15 di queste linee, che includono tutte le possibili altezze dell'apertura da 0,5 mm a 10 m.
2. Dal punto di intersezione, tracciare una linea verticale fino a quando non interseca una delle linee diagonali nel pannello in alto a destra del nomogramma, corrispondenti a diverse larghezze dell'apertura (*vent width*). Ci sono 15 di queste linee nel nomogramma in Figura 3, che coprono larghezze nell'intervallo tra 0,5 mm e 10 m.
3. Dal punto di intersezione, tracciare una linea orizzontale a sinistra fino all'intersezione con la curva (*function curve*) nel pannello in alto a sinistra del nomogramma.
4. Tracciare una linea verticale dal punto di intersezione all'asse orizzontale del pannello in alto a sinistra. Il valore sull'asse orizzontale corrisponde alla concentrazione di idrogeno in vol. % (*hydrogen concentration, % by volume*).

Il nomogramma in Figura 3 può essere utilizzato anche per la valutazione opposta, cioè per il calcolo della dimensione dell'apertura necessaria per garantire che per il dato tasso di rilascio di idrogeno la concentrazione non superi un valore specificato (freccie blu in Figura 3). In questo caso il processo di calcolo viene eseguito in ordine inverso, partendo dal valore di concentrazione desiderato sull'asse orizzontale del pannello a sinistra e tracciando una linea verticale fino all'intersezione con la curva della funzione, vedi esempio con miscela 2 vol.% in Figura 3 – freccie blu. Da questo punto di intersezione si può tracciare una linea orizzontale verso il pannello in alto a destra, che passa attraverso le curve della larghezza dell'apertura. Successivamente, si dovrebbe selezionare la portata in massa del rilascio (ad es. 0,2 g/s) nel pannello in basso a destra del nomogramma, tracciando una linea orizzontale verso destra, passando per le curve dell'altezza dell'apertura. È ora possibile determinare le dimensioni dell'apertura necessarie per lo spazio chiuso in modo da fornire la concentrazione di idrogeno desiderata per un rilascio di idrogeno specificato. Nell'esempio mostrato in Figura 3, per mantenere la concentrazione di idrogeno al di sotto di 2 vol. % con la data portata di rilascio 0,2 g/s, il container dovrebbe essere dotato di un'apertura di 1 m in altezza e 1 m in larghezza.

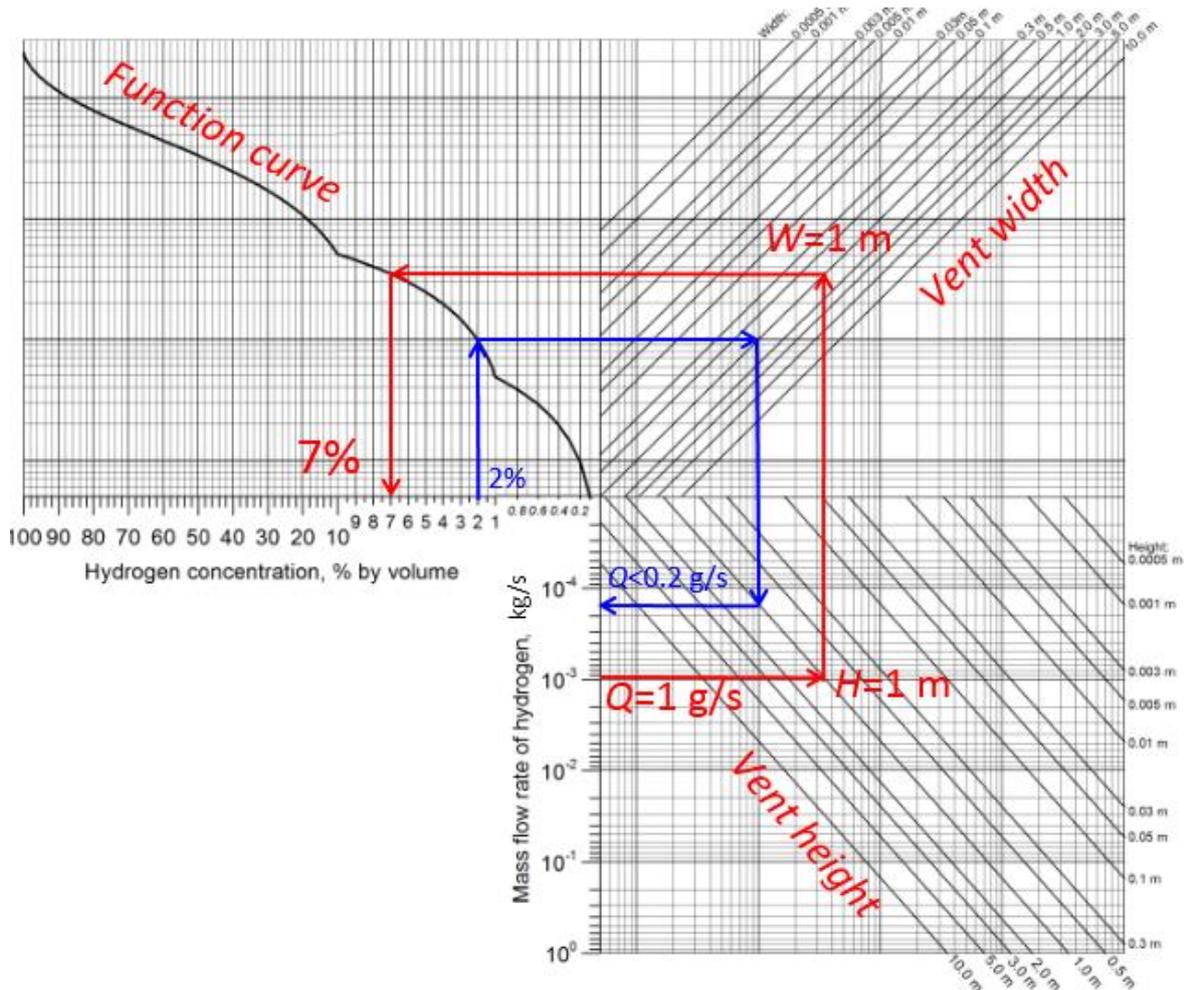


Figura 3. Un nomogramma ingegneristico per il calcolo del valore massimo della concentrazione di idrogeno in regime stazionario in un ambiente con un'apertura (coefficiente di scarica $C=0,6$).

7. Pressure peaking phenomenon

Il *pressure peaking phenomenon* è il fenomeno osservato per i gas molto leggeri (più leggeri dell'aria), che può provocare una sovrappressione che supera il limite di resistenza strutturale di un ambiente chiuso o di un edificio in caso di rateo di rilascio di idrogeno sufficientemente elevato ed in grado di provocare la rimozione completa dell'aria dall'ambiente interno, cioè raggiungendo la concentrazione di 100 vol. %.

È noto che nei veicoli FC l'idrogeno è comunemente immagazzinato come gas compresso in serbatoi dotati di dispositivi di limitazione della pressione attivati termicamente (TPRD) come da regolamento della Commissione UE n. 406/2010 [17]. Il PRD è montato sul serbatoio del carburante e inizia a rilasciare idrogeno quando viene raggiunta la temperatura di circa 110 °C, ad es. in presenza di incendio. Il TPRD può fornire un rapido rilascio di idrogeno, se viene utilizzato un grande diametro per il rilascio, riducendo così al minimo la possibilità di esplosione del serbatoio durante un'esposizione troppo lunga al fuoco. Le portate dai TPRD di

Lezione 11: Spazi confinati

massa elevate sono probabilmente "accettabili" all'esterno. Tuttavia, i rischi derivanti da un rilascio rapido in ambienti chiusi sono diversi.

Consideriamo lo scenario ipotetico di un rilascio da un tipico serbatoio di stoccaggio di idrogeno a 35 MPa a bordo di un veicolo, attraverso un orifizio di 5,08 mm di diametro [18]. Si ipotizzi che il rilascio avvenga verticalmente verso l'alto e al centro, a 0,5 m dal pavimento, di un piccolo garage di dimensioni $L \times W \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$ m [19] e volume di 30,4 m³ con un'unica apertura per la ventilazione equivalente ad un tipico mattone $L \times H = 25 \times 5$ cm situata a filo con il soffitto. Viene adottato un approccio conservativo, ovvero viene applicata una portata massica costante di 0,39 kg/s (ignorando una caduta di pressione nel serbatoio di stoccaggio) dopo l'apertura del TPRD. Pertanto, viene considerato lo scenario peggiore, ovvero un'elevata portata di massa in un piccolo garage con ventilazione minima.

L'applicazione di modelli matematici per il rilascio subsonico in regime stazionario (quando l'idrogeno occupa completamente lo spazio al chiuso) fornisce un valore di sovrappressione nel garage nell'intervallo tra 15 (risultante dall'equazione di Bernoulli con velocità zero nel serbatoio) e 17,9 kPa (dall'equazione per il flusso subsonico al rilascio) per un coefficiente di scarico C in entrambi i casi assunto come il valore comunemente consigliato $C=0,6$ [20]. Tuttavia, queste stime non tengono conto dello stato iniziale di iniezione di un gas più leggero (idrogeno) in un gas più pesante (aria). Il carico di pressione transitorio previsto nel garage con ventilazione è riportato nella Figura 4.

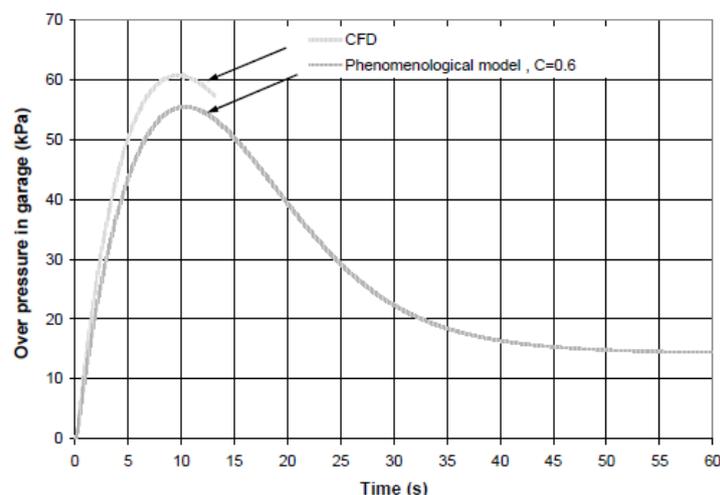


Figura 4. Sovrappressione stimata nel garage in funzione del tempo, confronto tra CFD e modello fenomenologico [18].

La Figura 4 illustra come la sovrappressione all'interno dello spazio chiuso risultante dall'iniezione di idrogeno raggiunga un livello in grado di demolire il garage [9] in soli 3 s per lo scenario selezionato. Come risulta dalla Figura 4, se il garage non viene prima distrutto, la pressione all'interno del garage, per questo particolare scenario, raggiunge un livello massimo superiore a 60 kPa. La pressione, quindi, diminuisce e tende verso un valore di regime notevolmente inferiore, e pari a quello previsto dalle semplici stime di regime stazionario.

Lezione 11: Spazi confinati

Ancora una volta si prega di notare che questo rappresenta lo scenario peggiore con una portata di massa costante. Pertanto, la considerazione di una portata massica costante per 60 s nella Figura 4 è puramente a scopo illustrativo per mostrare l'intervallo di tempo prima del raggiungimento delle condizioni di regime quando praticamente tutto il garage è occupato da 100 vol. % idrogeno. Da notare inoltre come la pressione massima si raggiunga in meno di 10 s: entro questo tempo verrebbe demolita l'intera autorimessa, senza nemmeno considerare le conseguenze dell'accensione della miscela infiammabile.

Va notato che il livello di sovrappressione raggiunto all'interno del garage aumenta con la diminuzione della massa molecolare del gas iniettato nel garage, cioè gas più leggeri come l'idrogeno determinano una pressione significativamente maggiore di uno più pesante, ad es. propano. Questo dovrebbe essere preso in considerazione quando si progettano TPRD per l'uso con l'idrogeno, vale a dire non si deve presumere che la stessa tecnologia utilizzata per es. per il CNG si comporti allo stesso modo per l'idrogeno.

La Figura 5 mostra i valori di sovrappressione in funzione del tempo per una serie di gas con la stessa portata in massa (0,39 kg/s) nello stesso tipo di garage (volume 30,4 m³, apertura per ventilazione 0,0125 m²). Coefficiente di scarica $C=0,6$. Le masse molecolari di idrogeno, elio, metano e propano sono rispettivamente 0,002, 0,004, 0,016 e 0,044 kg/mol. È chiaro che il picco di sovrappressione diminuisce con l'aumentare della massa molecolare del gas. Maggiore è la massa molecolare del gas, più la pressione massima è vicina ai valori di stato stazionario previsti con metodi semplici. La portata volumetrica uscente dallo spazio chiuso è inversamente proporzionale alla radice quadrata della densità del gas che fuoriesce dall'interno. Pertanto, all'inizio del processo, quando la densità della miscela idrogeno-aria è molto alta e vicina alla densità dell'aria, il flusso volumetrico costante di idrogeno puro è essenzialmente superiore al flusso volumetrico della miscela idrogeno-aria più pesante e questo spiega perché la sovrappressione per un gas in ingresso più leggero cresce ad un livello più alto rispetto a quella per un gas in ingresso più pesante e la dinamica della pressione ha un picco caratteristico solo per l'idrogeno.

Lezione 11: Spazi confinati

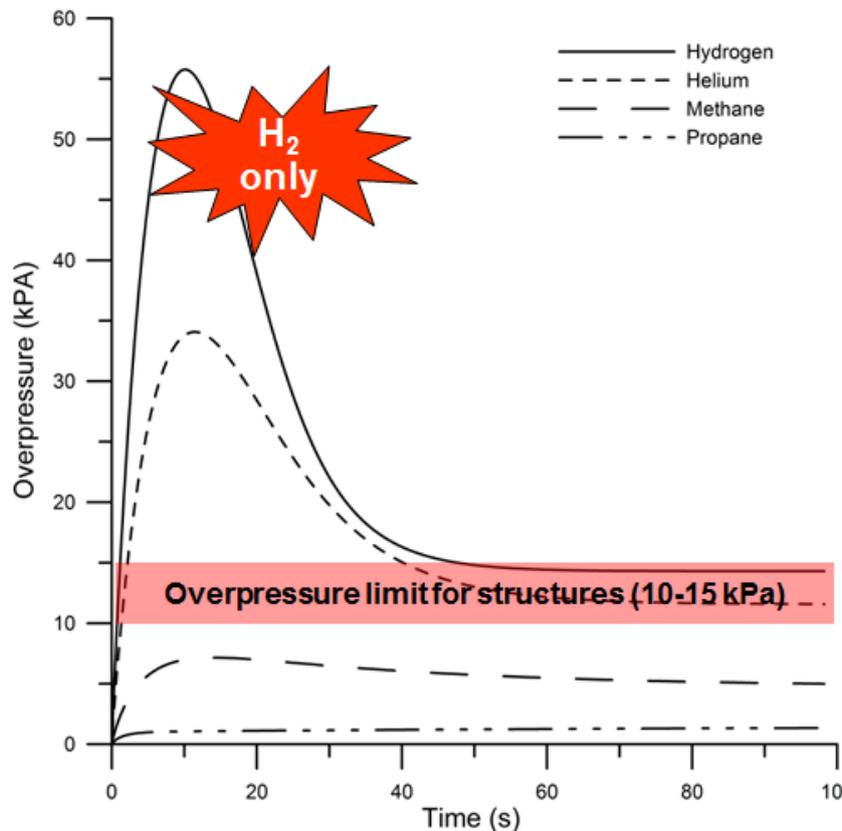


Figura 5. Valori di sovrappressione in funzione del tempo previsti per l'idrogeno, elio, metano e propano rilasciati in un garage con portata in massa di 0,39 kg/s [18].

Il pressure peaking phenomenon si verifica solo quando la velocità di rilascio dell'idrogeno è sufficientemente elevata da rimuovere completamente l'aria dallo spazio chiuso in caso di perdita prolungata. Pertanto, prima di stimare la sovrappressione prodotta dal PPP, è necessario confermare se la portata di rilascio è sufficiente per riempire l'ambiente interno con il 100% di idrogeno nel caso di perdita. Il nomogramma ingegneristico in Figura 6 può essere utilizzato per questa verifica [10]. Il nomogramma permette di calcolare le dimensioni massime dell'apertura di ventilazione che per un dato rilascio costante risulteranno in un volume di 100 vol. % di concentrazione di idrogeno nell'ambiente chiuso. Per trovare le dimensioni massime dell'apertura, selezionare la portata massica di rilascio dell'idrogeno sull'asse verticale (*mass flow rate*) e tracciare una linea orizzontale fino alla sua intersezione con una delle linee diagonali corrispondenti alla larghezza (*width*) dell'apertura. Tracciare una linea verticale dal punto di intersezione all'asse orizzontale per trovare l'altezza dell'apertura richiesta (*height*). In alternativa, il nomogramma in Figura 6 può essere utilizzato per trovare la portata di rilascio minima per una dimensione dell'apertura nota quando è necessario il calcolo del PPP. In tal caso i passaggi precedenti sono invertiti. Se la portata di rilascio rilevata tramite questo nomogramma è inferiore a quella effettiva, o le dimensioni effettive dell'apertura sono inferiori a quelle rilevate utilizzando il nomogramma in Figura 6, la concentrazione di idrogeno 100 vol. % verrà raggiunta e potrebbe verificarsi il PPP. In tal caso dovrebbe essere utilizzato il nomogramma per PPP (Figura 7).

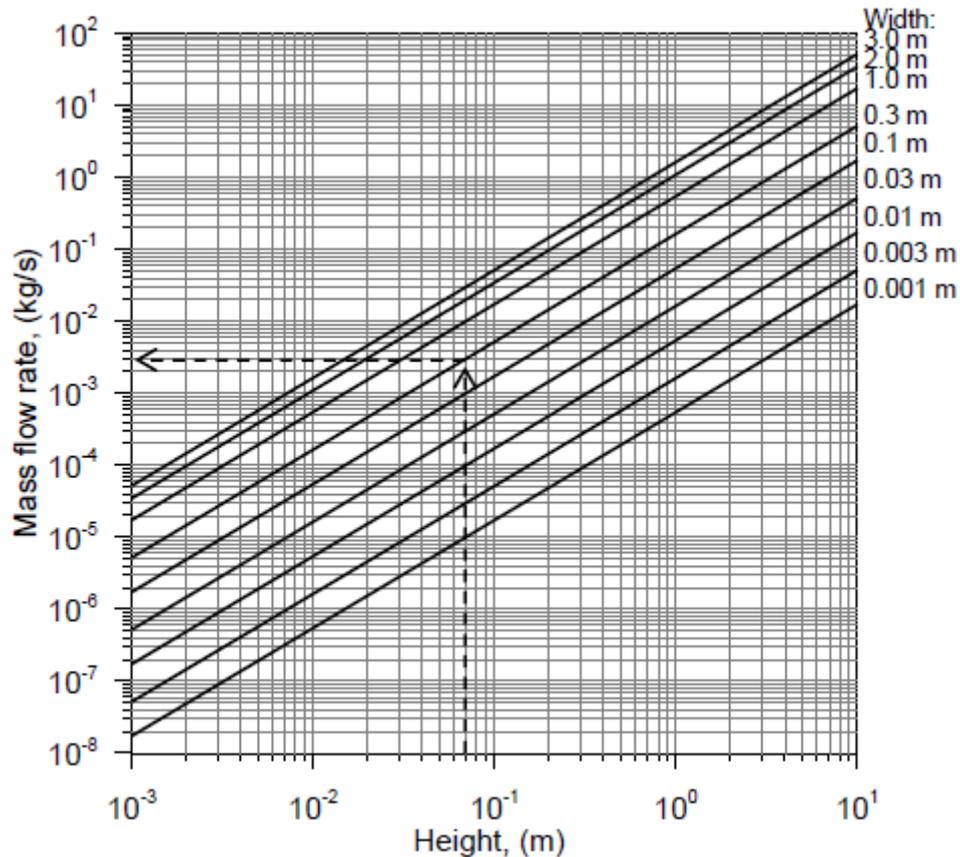


Figura 6. Il nomogramma per la valutazione grafica della portata in massa della perdita di idrogeno in un ambiente chiuso con un'apertura che porta al 100 vol. % di concentrazione di idrogeno [10].

La Figura 7 mostra un nomogramma per la valutazione del PPP, che consente il calcolo del picco massimo di sovrappressione prodotto dal rilascio di idrogeno ad alta velocità con portata massica e diametro della perdita noti. Per utilizzare il nomogramma in Figura 7, seguire la seguente procedura:

- Iniziare con l'asse verticale sul pannello inferiore del grafico e selezionare la pressione di stoccaggio (*storage pressure*), spostarsi orizzontalmente fino al diametro della perdita.
- Muoversi verticalmente verso l'alto per calcolare la portata massica della perdita (*mass flow rate of leak*). Nel pannello superiore continuare verticalmente verso l'alto dalla portata massica fino al punto di intersezione con la linea per l'area dell'apertura.
- Muoversi orizzontalmente a sinistra fino all'intersezione con l'asse verticale. Il punto di intersezione fornisce la massima sovrappressione nell'ambiente interno (*overpressure*).

In alternativa, il nomogramma in Figura 7 può essere utilizzato per determinare l'area dell'apertura necessaria per mantenere la sovrappressione al di sotto del limite specificato. In questo caso, seguire i primi due passaggi e quindi tracciare una linea orizzontale dal valore di sovrappressione desiderato che si trova sull'asse verticale del pannello superiore del grafico. La

Lezione 11: Spazi confinati

più vicina alla curva di intersezione nel pannello superiore corrisponderà all'area dell'apertura richiesta (se l'intersezione cade tra due curve, utilizzare quella più a destra per ottenere un valore conservativo).

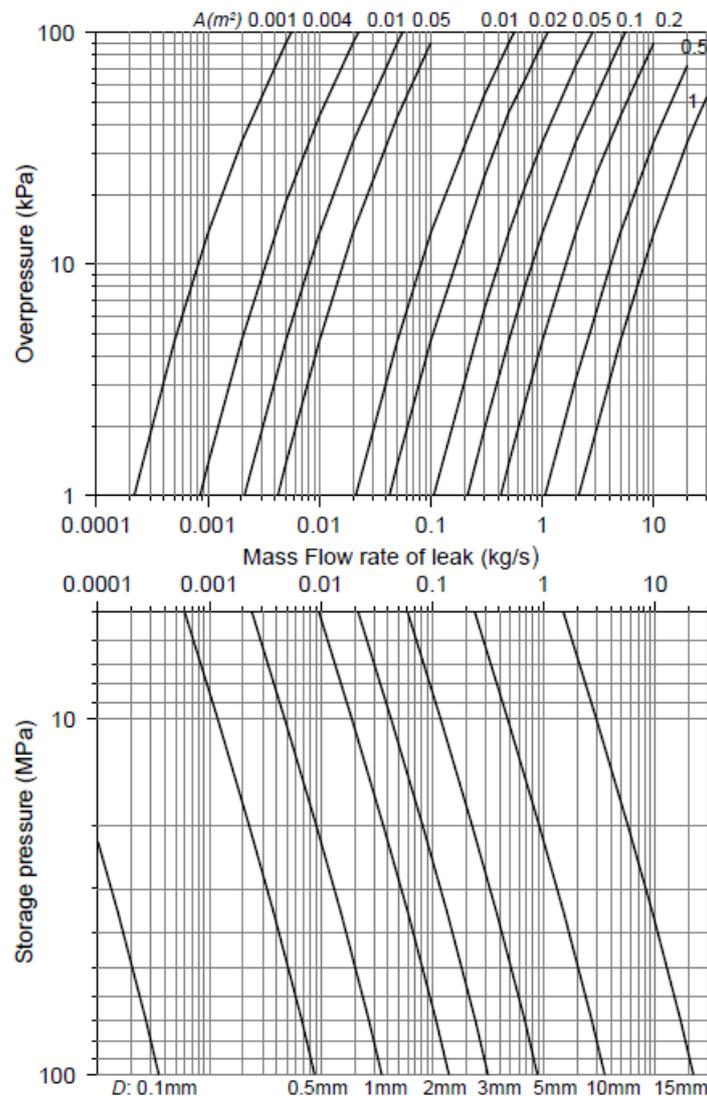


Figura 7. Nomogramma del pressure peaking per vari tassi di rilascio [4].

8. Parcheggi coperti

I parcheggi, sotterranei, scoperti o coperti, sono essenziali per il crescente numero di veicoli alimentati a idrogeno in uso in tutto il mondo. Diventa importante considerare scenari pratici e problemi che possono sorgere con l'uso quotidiano di tali veicoli. Comprendendo i pericoli derivanti dal posizionamento di veicoli alimentati a idrogeno in ambienti confinati, è possibile adottare misure per ridurre i pericoli e i rischi associati mediante una progettazione intrinsecamente più sicura. Nella maggior parte delle autovetture, l'idrogeno è comunemente immagazzinato come gas compresso nei serbatoi. Le pressioni di stoccaggio tipiche sono nell'intervallo da 350 a 700 bar. L'inventario di idrogeno varia con le dimensioni del veicolo e, secondo il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti, è necessario uno stoccaggio di idrogeno

Lezione 11: Spazi confinati

a bordo di circa 5-13 kg per consentire un'autonomia superiore a 300 miglia per l'intera piattaforma di veicoli automobilistici leggeri che utilizzano sistemi di alimentazione a celle a combustibile [26].

I sistemi di stoccaggio dell'idrogeno a bordo sono generalmente dotati di dispositivi di limitazione della pressione (TPRD), che forniscono un rapido rilascio di idrogeno per ridurre al minimo la possibilità di rotture catastrofiche del serbatoio durante l'esposizione al fuoco. In caso di rilascio accidentale di idrogeno, sono probabilmente accettabili portate di massa elevate dai TPRD all'aperto, dove la galleggiabilità dell'idrogeno è un vantaggio nell'aiutare la dispersione al di sotto del LFL. Tuttavia, un rapido rilascio in ambienti chiusi potrebbe favorire l'accumulo e la formazione di miscele idrogeno-aria infiammabili. Dal punto di vista della sicurezza, sorgono una serie di pericoli a seguito di un rilascio ad alta portata di massa. Il *pressure peaking phenomenon* in uno scenario con tipica TPRD (diametro di 5,08 mm) e piccolo condotto di ventilazione è stato scoperto e spiegato [27]. È stato riscontrato che per una portata di rilascio di idrogeno costante di 0,39 kg/s in un garage di 30,4 m³ con una singola apertura delle dimensioni di un mattone, la sovrappressione potrebbe raggiungere rapidamente un livello di 10-20 kPa in 2 s, che è in grado di causare grave danneggiamento e possibile collasso strutturale, a seconda della natura della struttura e della durata dell'impulso. Pertanto, in caso di rilascio di idrogeno, l'elevata portata volumetrica di idrogeno provoca sovrappressioni significative anche in assenza di combustione. È stato dimostrato che la pressione all'interno del garage raggiunge il livello massimo superiore a 50 kPa per 350 bar di stoccaggio e 100 kPa per 700 bar. Questa pressione massima poi diminuisce e tende verso un valore di stato stazionario con ordine di grandezza inferiore, e uguale a quello previsto dalle semplici stime di stato stazionario [27].

L'analisi di cui sopra indica che il diametro TPRD "tipico" di 5,08 mm potrebbe non essere "sicuro" per gli ambienti confinati/chiusi, ad es. parcheggio coperto con ventilazione limitata. Pertanto, la dinamica della pressione all'interno di ambienti interni come i garage è stata studiata all'Ulster per selezionare il diametro TPRD ottimale sulla base della teoria dei getti sotto-espansi e del modello di *blowdown* [28]. È stato condotto uno studio per analizzare la relazione tra diametro TPRD, ricambi d'aria all'ora (ACH) e volume di rilasci in ambienti confinati con una singola apertura per la ventilazione da serbatoi di stoccaggio a bordo di 1, 5 e 13 kg a 350 e 700 bar. Il diametro "sicuro" è stato determinato come quel diametro TPRD che non provocherebbe una sovrappressione superiore a 20 kPa in un garage in caso di perdita. L'aumento di pressione dinamico, che è unico per un rilascio di idrogeno all'interno di un ambiente ventilato, dovrebbe essere tenuto in considerazione quando si eseguono studi d'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno per uso interno. Lo studio della dinamica della pressione per 5 kg di idrogeno stoccato in un serbatoio da 350 bar in un garage di 30 m³ con ACH di 0,18 ha indicato che la diminuzione del diametro TPRD da 5 a 0,55 mm potrebbe efficacemente evitare il *pressure peaking phenomenon* nel garage. Era chiaro che le attuali disposizioni dei TPRD, mancando di una lunga resistenza al fuoco dello stoccaggio a bordo,

Lezione 11: Spazi confinati

generano prestazioni inaccettabili dei sistemi in ambienti chiusi nel caso di attivazione della TPRD anche senza ignizione del rilascio. Pertanto, la "riprogettazione" semplificata dei TPRD per proteggere la struttura del garage dal collasso pone requisiti difficilmente realizzabili per una resistenza al fuoco fino a diverse ore. Sono necessarie ulteriori ricerche per sviluppare strategie di sicurezza e soluzioni ingegneristiche per affrontare il problema della resistenza al fuoco dei serbatoi di stoccaggio a bordo e requisiti per le prestazioni TPRD.

Recentemente, i rilasci di idrogeno non innescati dallo stoccaggio a bordo del veicolo in un parcheggio coperto ventilato naturalmente sono stati studiati da UU [29]. Questo nuovo studio presenta risultati rilevanti per i produttori di veicoli, le organizzazioni di sviluppo degli standard (SDO) e il campo delle costruzioni in generale. Il modello numerico sviluppato è stato convalidato contro i dati sperimentali del KIT (Germania) sul rilascio a getto di elio e gli esperimenti sono stati riprodotti con un errore ingegneristico accettabile. Sono state effettuate simulazioni per un parcheggio con dimensioni di $30 \times 28,6 \times 2,6 \text{ m}^3$ con parametri di ventilazione secondo il British Standard BS 7346-7:2013. Sono stati considerati undici casi di rilascio da un serbatoio a 700 bar di cui quattro rilasci verso l'alto da un tubo di 0,5 mm sopra il pavimento, uno verso l'alto con diametro maggiore e sei rilasci verso il basso. Come previsto, un rilascio di portata massica costante ha prodotto una più larga nube infiammabile all'interno del parcheggio rispetto a un rilascio in *blowdown* attraverso lo stesso diametro TPRD. Il diametro minore di 0,5 mm ha prodotto una nube infiammabile notevolmente più piccola di quella prodotta da diametri maggiori di TPRD, ad es. 2 e 3,34 mm. Per i diametri TPRD "tipici" in ambienti confinati, il picco di pressione non è preoccupante quando la ventilazione è sufficiente.

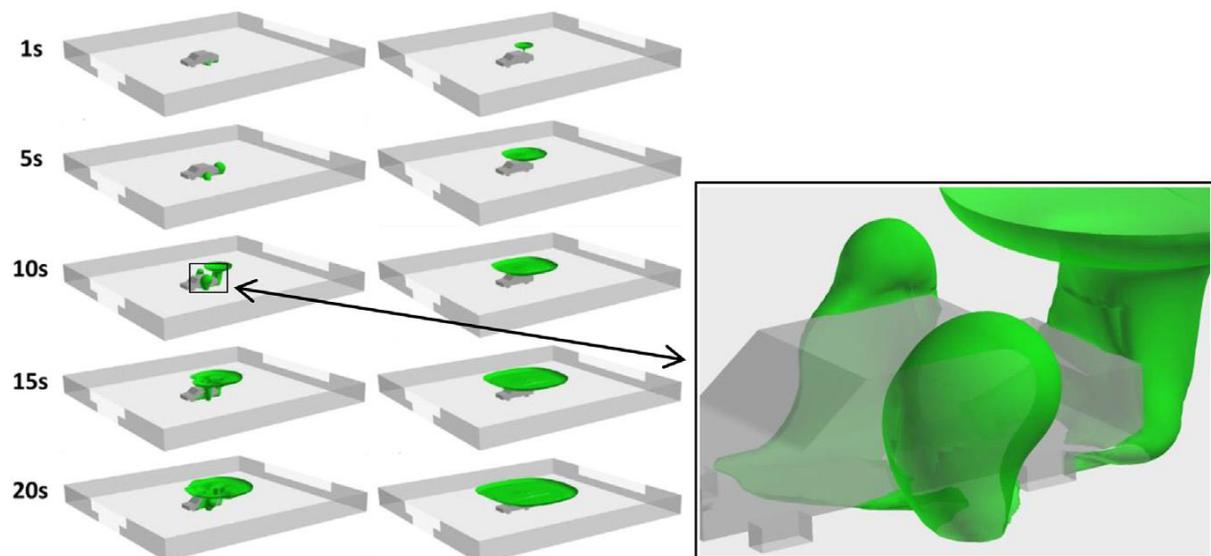


Figura 8. Iso-superficie che mostra l'1% di frazione molare di idrogeno per il rilascio da 700 bar attraverso un diametro TPRD di 0,5 mm direzionato verso il basso (a sinistra) e verso l'alto (a destra) [29].

Lezione 11: Spazi confinati

Una delle novità di questo lavoro è stato il confronto tra i rilasci direzionati verso il basso e rilasci direzionati verso l'alto dallo stoccaggio di 700 bar attraverso un TPRD di 0,5 mm. Come mostrato nella Figura 8, è stato riscontrato che il rilascio verso il basso ha provocato una nube infiammabile più grande nelle vicinanze dell'auto. Tuttavia, la concentrazione media di idrogeno all'interno della nube infiammabile era inferiore a quella del caso di rilascio verso l'alto. Al contrario, il rilascio verso l'alto ha portato a una grande nube infiammabile sotto il soffitto, ma non intorno all'auto. Sia i rilasci verso il basso che verso l'alto da 700 bar attraverso un diametro di 0,5 mm in un parcheggio coperto possono essere considerati una scelta più sicura, se abbinati a un design appropriato del serbatoio, producendo un potenziale infiammabile limitato che si disperde rapidamente. In particolare, sono stati confrontati tre diversi angoli di rilascio verso il basso (0°, 30° e 45°) per comprendere gli effetti dell'orientamento del rilascio dell'idrogeno. Come mostrato nella Figura 9, il rilascio diretto verso il basso ha prodotto una nube di idrogeno infiammabile attorno all'auto, anche se brevemente, ma ciò potrebbe presentare difficoltà per i vigili del fuoco nel raggiungere gli occupanti del veicolo in caso di ignizione della nube. I rilasci verso il basso ad angoli di 30° e 45° verso la parte posteriore dell'auto hanno spinto il gas infiammabile lontano dal perimetro dell'auto, rendendolo più sicuro per la fuga. Questi fattori dovrebbero essere considerati nella progettazione dei TPRD per lo stoccaggio a bordo dei veicoli a idrogeno.

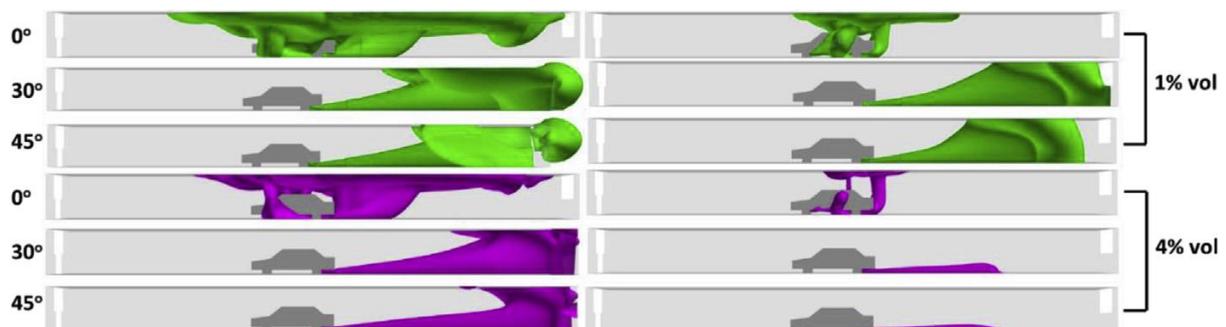


Figura 9. Grafici dell'iso-superficie dell'1% e del 4% vol. di frazione molare di idrogeno per un diametro TPRD di 2 mm (a sinistra) rispetto a un diametro di 0,5 mm (a destra) per diverse direzioni di rilascio a 20 s di tempo di rilascio.

Un'altra analisi della pericolosità e dei rischi associati all'uso dei veicoli FCH nei sistemi di trasporto sotterraneo può essere trovata nel progetto HyTunnel-CS (<https://hytunnel.net/>), in particolare in Deliverable D3.1 – Detailed research programme on hydrogen fires in confined structures ([disponibile a questo link](#)).

9. Tunnels

L'uso di veicoli FCH o il trasporto di idrogeno gassoso compresso (CGH₂) e idrogeno liquido criogenico (LH₂) in gallerie e simili spazi confinati crea nuove sfide per la sicurezza della vita, la protezione delle infrastrutture e dell'ambiente a un livello di rischio accettabile. Diversi studi hanno dimostrato che il confinamento o la congestione possono favorire conseguenze più gravi

Lezione 11: Spazi confinati

rispetto agli incidenti in atmosfera aperta. Un'analisi critica dei pericoli e dei rischi associati all'uso dei veicoli FCH nei sistemi di trasporto sotterranei è stata eseguita nel Report Deliverable 1.2 del progetto HyTunnel-CS disponibile a questo [link](#).

Conoscenze fondamentali rilevanti sul rilascio di idrogeno, incendio ed esplosione sono state fornite in precedenza, ad es. ventilazione (Sezione 5 in questa lezione), pressure peaking phenomenon (Sezione 6 in questa lezione), rilascio a getto di idrogeno (Lezione 9 – Distanze di sicurezza da fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi) ed esplosione di idrogeno (Lezione 10 – Affrontare le esplosioni di idrogeno). Ci sono altre caratteristiche uniche per gli scenari associati ai tunnel che dovrebbero essere discusse separatamente.

9.1 Effetto della velocità di ventilazione sulla dispersione nei tunnel

La ventilazione passiva è solitamente presente in un tunnel a causa dell'effetto pistone avviato dai veicoli in movimento o dalle condizioni meteorologiche, ad es. differenza di pressione attraverso i portali. È molto probabile che esista anche una ventilazione attiva, soprattutto nelle lunghe gallerie, per rimuovere gli inquinanti delle emissioni dei veicoli o il fumo in caso di incendio.

La ventilazione influenza fortemente la dispersione dei gas pericolosi. L'esatta posizione dei veicoli e la geometria del tunnel possono essere importanti perché influiscono sul campo di flusso generato. La ventilazione può avere effetti sia positivi che negativi sulla dispersione dell'idrogeno.

Gli aspetti positivi sono:

- Diluizione delle concentrazioni di idrogeno riducendo al minimo le dimensioni della nube infiammabile;
- Trasporto in sicurezza di una quantità illimitata di idrogeno fuori dal tunnel attraverso i suoi portali e condotti se la concentrazione di idrogeno è inferiore a LFL.

Gli aspetti negativi sono:

- Una nube infiammabile potrebbe estendersi ad una maggiore distanza dal rilascio;
- La ventilazione può indurre turbolenza che può aumentare la velocità di combustione e quindi sovrapressioni in caso di accensione.

Nella ventilazione longitudinale, è richiesta una velocità minima dell'aria per rimuovere il gas e il fumo pericolosi. L'idrogeno si comporta in modo simile al fumo di un incendio a causa della sua elevata galleggiabilità. Per gli incendi in galleria, è stata studiata la velocità critica in funzione della velocità di rilascio del calore e il valore della velocità di ventilazione di 3,5 m/s sembra essere sufficiente per la maggior parte degli incendi in galleria per prevenire l'effetto "back-layer", compresi i grandi incendi di più di 100 MW (report disponibile a questo [link](#)).

La ventilazione in un tunnel ha generalmente un effetto benefico sulla diluizione della nube d'idrogeno e sulla rimozione sicura dell'idrogeno, facendo scendere la concentrazione di idrogeno al di sotto del 4% vol (LFL). Tuttavia, in determinate condizioni la ventilazione può

Lezione 11: Spazi confinati

trasportare ed estendere ulteriormente la nube infiammabile, portando al movimento della nube infiammabile verso altri veicoli o lungo condotti di ventilazione. Di conseguenza, devono essere condotti ulteriori studi sperimentali per studiare la velocità di ventilazione ottimale in questo scenario e creare le basi per raccomandazioni universali più generali sull'efficacia della ventilazione nelle gallerie. Inoltre, l'effetto di una pendenza del tunnel sul flusso e sulla dispersione dell'idrogeno deve essere incluso nelle ricerche future. La pendenza massima consentita dalla Direttiva Europea 2004/54/CE è del 5% per le gallerie longitudinali di nuova realizzazione. Inoltre, la Direttiva stabilisce che per pendenze superiori al 3% sono necessarie misure aggiuntive per aumentare il livello di sicurezza.

9.2 Transizione da deflagrazione a detonazione (DDT) nei tunnel

Il fenomeno DDT è stato discusso in dettaglio nella Lezione 10, in cui i criteri DDT sono stati sviluppati principalmente per la geometria chiusa con concentrazione uniforme di idrogeno nell'ossidante (aria o ossigeno). Tuttavia, a causa di una perdita di idrogeno o di un rilascio accidentale di idrogeno dal serbatoio ad alta pressione in un tunnel, una miscela non uniforme di idrogeno-aria, ad es. stratificata, può essere formata preferenzialmente nella parte del soffitto di una struttura a tunnel.

Sono stati effettuati numerosi esperimenti e simulazioni numeriche rispetto alla combustione e alla detonazione in uno strato stratificato semi-confinato di miscela idrogeno-aria tipico per lo scenario di un incidente in una galleria. Esperimenti sulla combustione dell'idrogeno in un sottile strato semi-confinato sono stati condotti all'interno di un recipiente di sicurezza con un volume di 100 m^3 [22]. Il recipiente di forma cilindrica ha un diametro interno di 3,5 m e una lunghezza di 12 m. Uno spessore di parete di 80 mm consente di eseguire esperimenti di detonazione direttamente all'interno del volume. Una scatola rettangolare con dimensioni di $9 \times 3 \times 0,6 \text{ m}^3$ è stata installata all'interno del cilindro, come mostrato in Figura 10. Per quanto riguarda la geometria e le dimensioni, questo layout è molto adatto per simulare sperimentalmente l'incidente da idrogeno in un tunnel.

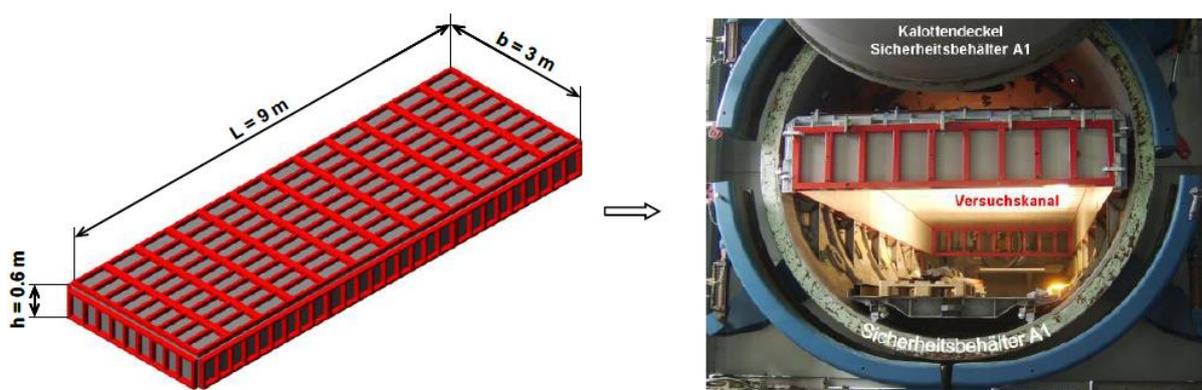


Figura 10. Dimensioni principali della struttura a strato per creare un ambiente semi-confinato (sinistra) e fotografia della sua installazione all'interno della struttura cilindrica di sicurezza (destra) [22].

Lezione 11: Spazi confinati

I dati sperimentali sulla pressione caratteristica e le velocità di fiamma per composizioni uniformi hanno indicato che la soglia tra i regimi di fiamma lenta e veloce nei canali semi-aperti è la velocità sonica nel reagente, mentre nei canali chiusi è la velocità sonica dei prodotti [23]. La maggiore concentrazione di idrogeno o la miscela più reattiva devono essere tali da raggiungere la velocità del suono quando viene utilizzato lo strato più sottile (spessore h). Il rapporto di espansione è un indicatore critico del potenziale di accelerazione della fiamma [23, 24]. La Figura 11 riassume i dati sperimentali del rapporto di espansione σ in funzione dell'area di sfiato adimensionale (definita come il rapporto tra lo spessore dello strato h e la distanza tra gli ostacoli per lo strato semi-confinato s). È stata derivata una correlazione lineare tra il rapporto di espansione critico σ^* per la propagazione rapida della fiamma in uno strato piano e lo spessore reciproco dello strato $1/h$ o la distanza tra gli ostacoli s . Per le miscele uniformi la detonazione avviene a diverse concentrazioni di idrogeno a seconda dello spessore dello strato, ad es. 27% per $h = 0,15$ m, 23% per $h = 0,3$ m e 21% per $h = 0,6$ m. I risultati hanno suggerito che lo strato più sottile ha bisogno di una miscela più reattiva per ottenere una detonazione rispetto allo strato più spesso. Poiché le perdite di energia e la reattività della miscela sono reciprocamente correlate con lo spessore dello strato h e la larghezza della cella di detonazione λ , ci si può aspettare che il rapporto adimensionale dello spessore dello strato sulla larghezza della cella di detonazione sia una costante per le condizioni critiche di detonazione.

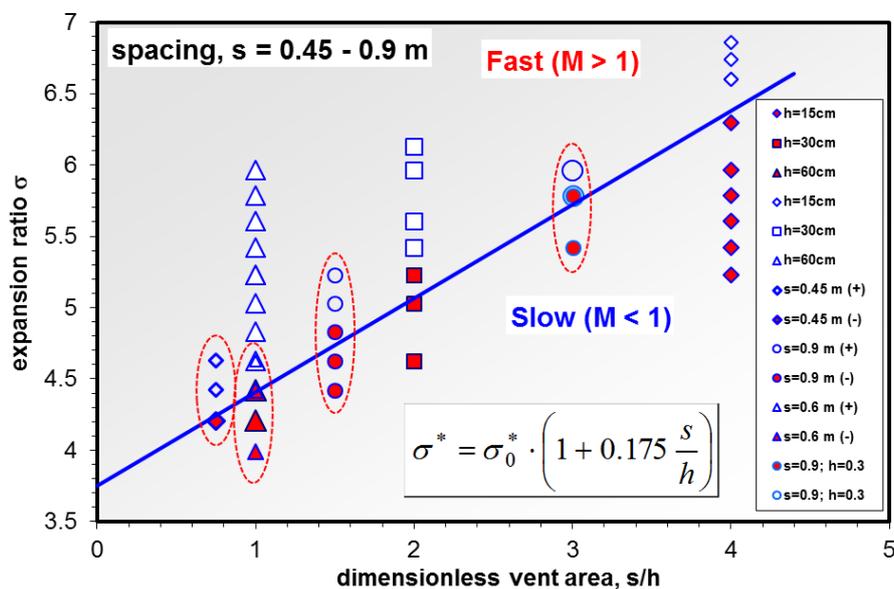


Figura 11. Condizioni critiche per un'efficace accelerazione della fiamma in funzione del rapporto di espansione (*expansion ratio*) rispetto all'area di sfiato adimensionale (*dimensionless vent area*): fiamma sonica e detonazioni (simboli vuoti), fiamma subsonica (simboli pieni) [22].

La Figura 12 conferma che lo spessore dello strato adimensionale per le condizioni critiche per l'inizio della detonazione è quasi lo stesso, $h/\lambda = 13-14$, per tre spessori dello strato analizzati

Lezione 11: Spazi confinati

da 15 a 60 mm [22]. Questo valore concorda bene con i precedenti esperimenti eseguiti su una struttura su piccola scala $h/\lambda = 7-15$ [23].

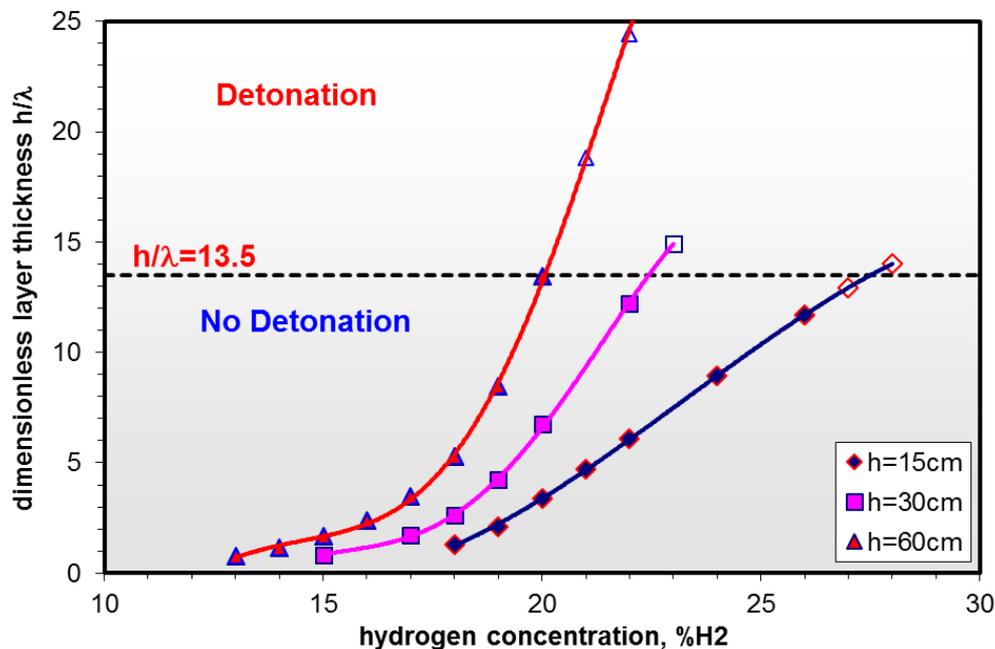


Figura 12. Condizioni critiche per il DDT nella relazione tra spessore dello strato adimensionale (*dimensionless layer thickness*) e concentrazione di idrogeno (*hydrogen concentration*): detonazione (simboli vuoti); nessuna detonazione (simboli pieni) [22].

10. Regimi di incendi di idrogeno in ambienti interni

Il tema degli incendi da idrogeno è stato discusso in precedenza nella relativa lezione. Nel caso di incendi da idrogeno in ambienti interni, se il fuoco è sufficientemente breve e se non impatta su un muro o qualsiasi altra superficie, il nomogramma presentato nella lezione precedente è applicabile per stimare la lunghezza della fiamma. L'argomentazione nella "Lezione 10 - Affrontare le esplosioni di idrogeno" sugli effetti di muri e barriere è rilevante anche per i jet fire che colpiscono direttamente gli ostacoli all'interno dell'ambiente chiuso. Frequentemente si verifica un rilascio di idrogeno in prossimità o lungo una parete o una superficie, che può aumentare la lunghezza del jet fire o della nube non innescata, riducendo l'*entrainment*, cioè il trascinamento dell'aria all'interno del getto. Pertanto, le distanze di sicurezza possono aumentare. Questo è importante quando si considera la posizione delle apparecchiature e dello stoccaggio dell'idrogeno (in particolare la posizione dei TPRD su qualsiasi deposito) rispetto alle pareti e al suolo. Il comportamento al fuoco dipende anche dalle condizioni di rilascio e dalla geometria dell'ambiente e della ventilazione. Gli incendi in ambiente interno possono essere ben ventilati e poco ventilati.

10.1 Fiamme e incendi ventilati

Se l'ambiente interno è dotato di ventilazione, l'ossigeno necessario per sostenere la combustione dell'idrogeno entrerà attraverso le prese d'aria. Quando la ventilazione all'interno

Lezione 11: Spazi confinati

è sufficiente, la fiamma sarà controllata dal combustibile e può essere considerata ben ventilata [11].

La regola generale per un incendio in ambienti chiusi con un condotto di ventilazione superiore è la seguente: l'aumento della portata di rilascio dell'idrogeno modifica il regime dell'incendio da:

- incendio ben ventilato (per piccole portate), a
- incendio sotto-ventilato con fiamma esterna (per portate moderate), a
- incendio sotto-ventilato con autoestinzione della combustione (per portate maggiori), e ancora a
- incendio sotto-ventilato con fiamma esterna (per portate molto elevate).

È stato effettuato uno studio numerico con l'uso di un modello contemporaneo per comprendere i fenomeni fisici relativi alle fiamme d'idrogeno in ambienti interni. Il modello CFD utilizzato è stato descritto in [12, 13]. Sono state eseguite sette simulazioni numeriche su un container tipico per applicazioni FC con le dimensioni $L \times W \times H = 1 \times 1 \times 1$ m e con un singolo condotto di ventilazione posizionato centralmente nella parte superiore di una parete (Tabella 1). Il rilascio è diretto verticalmente verso l'alto. Il tubo di rilascio dell'idrogeno ha una lunghezza di 10 cm e diametro interno di 5,08 mm; questo è situato al centro del pavimento dell'armadio, a 10 cm dal pavimento. Lo spessore delle pareti in alluminio della custodia è di 2 cm. Ulteriori dettagli sul modello di calcolo possono essere trovati in [13].

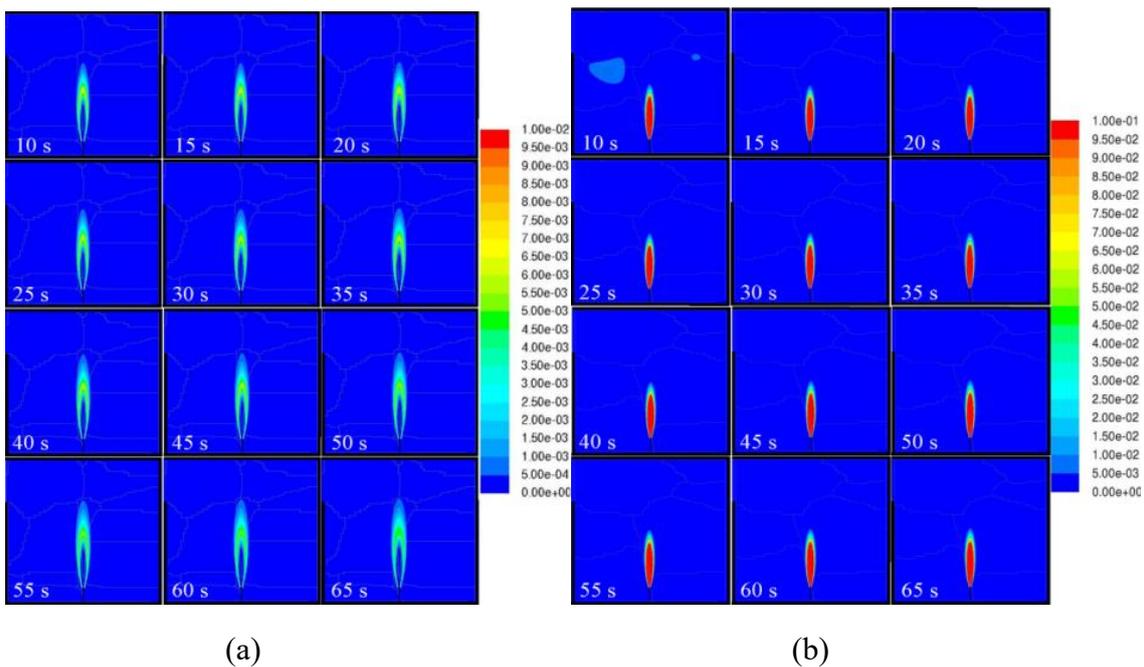
Tabella 1. Dettagli delle simulazioni numeriche [13].

N.	Presa d'aria, HxW	Velocità, m/s	Portata, g/s	Risultato
1	Orizzontale 3x30 cm	600 m/s	1.0857	Autoestinzione
2	Orizzontale 3x30 cm	300 m/s	0.5486	Autoestinzione
3	Orizzontale 3x30 cm	150 m/s	0.2714	Fiamma esterna
4	Verticale 30x3 cm	600 m/s	1.0857	Fiamma esterna
5	Verticale 30x3 cm	60 m/s	0.1086	Ben ventilato
6	Verticale 13.9x3 cm	600 m/s	1.0857	Autoestinzione
7	Verticale 13.9x3 cm	300 m/s	0.5486	Fiamma esterna

La Figura 13 mostra la dinamica di un jet fire ben ventilato nel test numerico N. 5, con la velocità di rilascio più bassa, 60 m/s. La presa d'aria verticale si trova sulla parete sinistra. Alla fine dell'esperimento numerico, l'incendio era in condizioni quasi stazionarie. La zona di reazione, che è associata alla presenza di radicali idrossilici OH, aumenta leggermente nel periodo di tempo da 10 s a 65 s (Figura 13a). Non c'è praticamente idrogeno che esce dal container (Figura 13b). La frazione molare di idrogeno nello sfiato è trascurabile dell'ordine di 2×10^{-4} . Ciò indica che l'incendio è ben ventilato nelle condizioni della simulazione N. 5.

Lezione 11: Spazi confinati

La Figura 13c mostra un esaurimento molto lento dello strato iniziale di ossigeno nella parte inferiore del container che può essere spiegato dal fatto che un apporto di ossigeno dall'esterno attraverso la parte inferiore della presa d'aria sostiene la fiamma (si vede chiaramente l'ingresso di aria nelle immagini). La distribuzione della temperatura (Figura 13d) conferma la presenza di uno strato nella parte inferiore del container dove viene mantenuta la temperatura iniziale. In un ambiente simile a una stanza ciò creerebbe condizioni favorevoli per l'evacuazione degli occupanti. Vale la pena notare che in questo modello non viene preso in considerazione l'irraggiamento dalla fiamma che potrebbe minare l'accettabilità del design in base ai criteri di danno del flusso di radiazione termica. La temperatura scende da 2300 K nella fiamma a circa 750-1000 K nella corrente calda sotto il soffitto. Questa temperatura è probabilmente insufficiente per innescare un eventuale materiale combustibile soprattutto in presenza di vapore acqueo (la frazione molare di H₂O sotto il soffitto è nell'intervallo 0,11-0,13 a 65 s). Tuttavia, alcuni componenti all'interno del container FC potrebbero essere distrutti. L'unica differenza nell'esperimento numerico N. 4 è un aumento di dieci volte della portata di rilascio dell'idrogeno. Si osserva un incendio ben ventilato per una velocità di rilascio dell'idrogeno di 60 m/s, e un incendio sotto-ventilato con passaggio a una fiamma esterna per una velocità di rilascio di 600 m/s.



Lezione 11: Spazi confinati

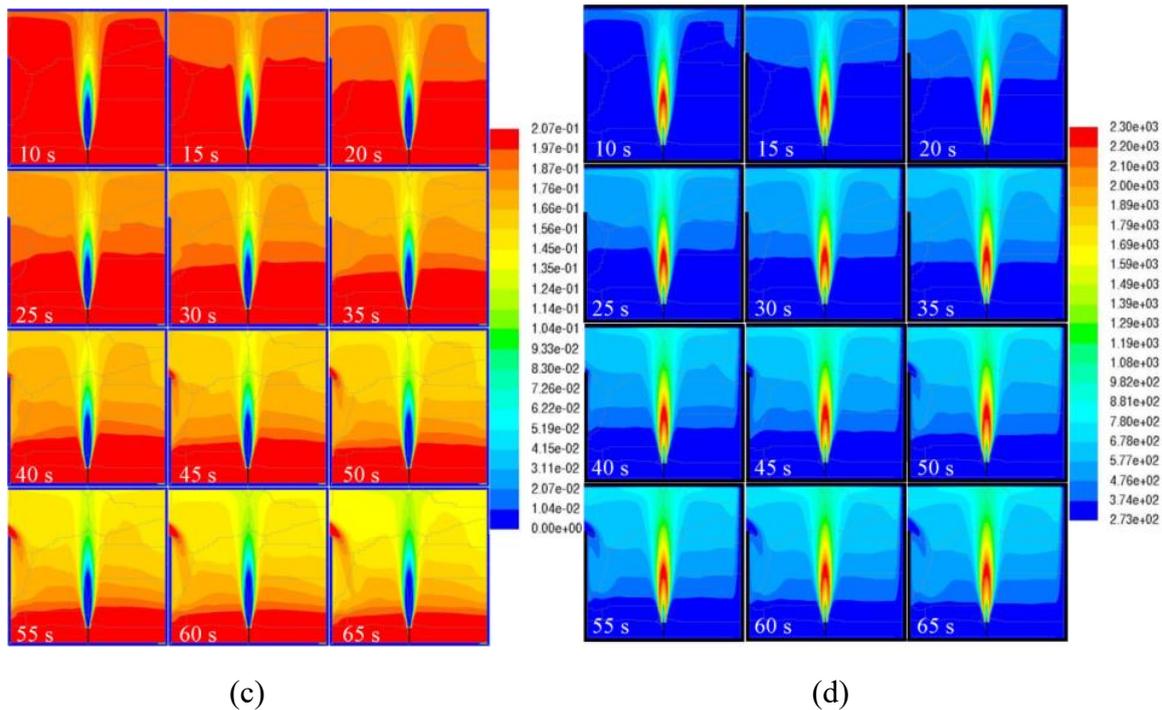


Figura 13. Sezione 2D lungo la linea centrale del container, simulazione N. 5 (incendio ben ventilato) [13]: (a) frazione molare dei radicali OH, (b) frazione molare H₂, (c) frazione molare O₂ e (d) temperatura.

10.2 Fiamme e incendi sotto-ventilati

In caso di ventilazione insufficiente la fiamma sarà controllata dalla ventilazione e potrebbe essere considerata *sotto-ventilata*. Nel caso in cui la fiamma sia poco ventilata tutto l'idrogeno non verrà consumato in prossimità della perdita e brucerà solo dove è disponibile ossigeno, quindi ci saranno sia prodotti caldi e potenzialmente idrogeno, o una fiamma esterna alla presa d'aria [14].

Lo sviluppo di uno strato caldo al soffitto dipende dalle dimensioni e dalla posizione delle prese d'aria (se presenti) rispetto alle dimensioni della perdita. In caso di ventilazione insufficiente rispetto alla perdita di idrogeno, lo strato caldo crescerà verso il basso attraverso il container. Questo presenta rischi sia termici che di asfissia.

Man mano che la fiamma diventa sempre meno ventilata, il livello di ossigeno nell'ambiente diminuisce fino al momento in cui l'ossigeno e quindi la combustione sono presenti nelle vicinanze della presa d'aria producendo una fiamma esterna. Potrebbe esserci poca o nessuna combustione nel resto del container dove si accumulerà l'idrogeno. In questo caso, se la perdita è stata successivamente arrestata (intercettata) o ridotta durante la de-pressurizzazione del serbatoio, la fiamma esterna potrebbe tornare a bruciare nel container con la formazione potenziale di un'atmosfera infiammabile premiscelata, portando a un'esplosione [14].

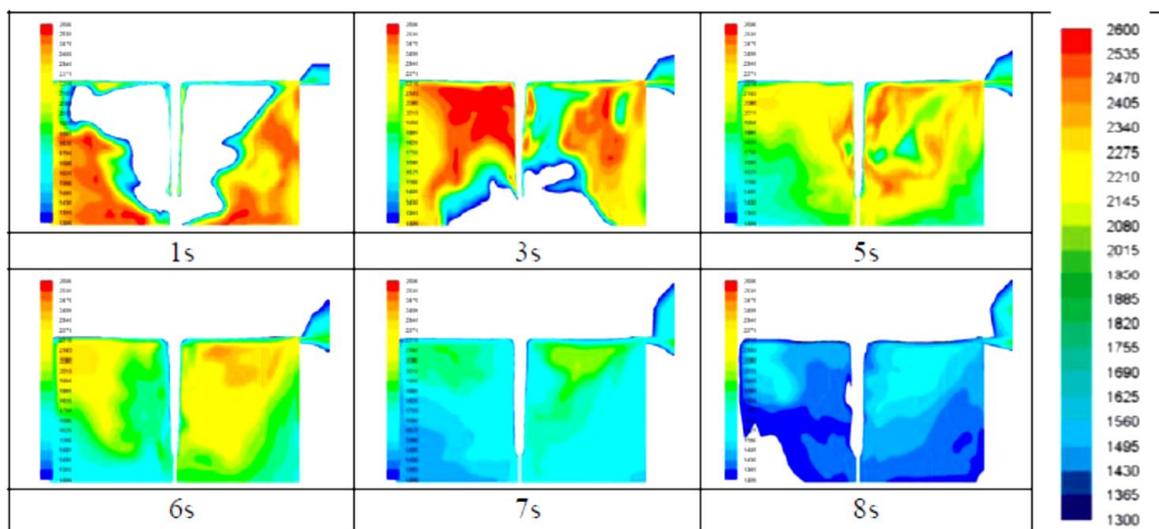
Lezione 11: Spazi confinati

Se il container è sprovvisto di ventilazione, non sarà possibile per l'ossigeno entrare nel container, quindi la fiamma esaurirà l'ossigeno nel container fino a quando non si consuma il combustibile o l'ossigeno e la fiamma si spegne [14].

Il prodotto della combustione dell'idrogeno è l'acqua, quindi è possibile, in caso di minima ventilazione e di piccola fiamma, che il vapore acqueo prodotto dalla combustione dell'idrogeno combinato con l'esaurimento dell'ossigeno possa portare ad un'autoestinzione della fiamma. Se si dovesse verificare l'autoestinzione e la perdita di idrogeno non venisse fermata al momento dell'estinzione, si svilupperebbe uno scenario in cui il container sarebbe riempito di idrogeno incombusto. Se la perdita fosse stata successivamente chiusa, ci sarebbe un'atmosfera infiammabile premiscelata nel container. La presenza di superfici calde o una sorgente di innesco simile potrebbe portare a una riaccensione e potenziale esplosione. Nel caso limite di sotto-ventilazione, una fiamma esterna esiste alla presa d'aria. In caso di autoestinzione non esiste la fiamma, né interna né esterna. I dettagli degli esperimenti numerici (Tabella 1) sul jet fire di idrogeno sotto-ventilato e sulla dinamica di autoestinzione in un container sono estratti da [13] e descritti di seguito.

10.3 Autoestinzione della fiamma

Consideriamo lo scenario con un jet fire da un TPRD in un piccolo garage con dimensioni $L \times W \times H = 4,5 \times 2,6 \times 2,6$ m e volume $30,4 \text{ m}^3$. Un'unica presa d'aria con area equivalente a quella di un tipico mattone $L \times H = 25 \times 5$ cm è posizionata a filo del soffitto ed esclude la possibilità di effetti da sovrappressione. L'idrogeno viene rilasciato attraverso un diametro di 5,08 mm con portata di 390 g/s. La combustione dell'idrogeno rilasciato all'interno del garage consuma ossigeno nell'aria e produce acqua. Un'autoestinzione dell'idrogeno nel garage potrebbe essere prevista. In effetti, le simulazioni numeriche di questo scenario hanno dimostrato una diminuzione della temperatura all'interno dell'ambiente come mostrato nella Figura 14 e delle regioni dell'idrossile (OH) associate alle zone di reazione già dopo 3 s.



Lezione 11: Spazi confinati

Figura 14. Contorni della temperatura che vanno da 1300 a 2600 °C corrispondenti alla fiamma visibile (vista 2D attraverso il centro del garage) [15].

L'autoestinzione di una fiamma a idrogeno nel garage con una presa d'aria orizzontale situata nella parte superiore di una parete è stata segnalata per la prima volta in [12]. L'analisi dell'esperimento numerico, in particolare della concentrazione di idrossile (OH), ha aiutato a comprendere il processo di autoestinzione. L'uso di parametri mediati in tutto il volume del locale durante l'incendio sotto-ventilato può dare un'indicazione del momento in cui la combustione si riduce, tuttavia, può sottostimare significativamente il momento in cui la fiamma è completamente spenta. Gli esperimenti numerici hanno dimostrato un modello complesso di flusso attraverso la presa d'aria in entrambe le direzioni durante la fiamma sotto-ventilata. L'autoestinzione completa è stata osservata quando l'intera area della presa d'aria è stata occupata per un periodo finito dall'ingresso di aria nel locale. Si presumeva che la ragione di questa osservazione fosse il raffreddamento dei prodotti di combustione caldi mediante il rilascio prolungato di idrogeno e, in una certa misura, il trasferimento di calore alle pareti del locale. Il lavoro [13] amplia gli esperimenti numerici iniziali e mira alla comprensione degli incendi di idrogeno in ambienti interni con una presa d'aria orizzontale o verticale situata nella parte superiore di una parete e un rilascio prolungato di idrogeno di portata e temperatura costanti.

L'autoestinzione delle fiamme da idrogeno in ambienti chiusi è stata simulata anche nell'esperimento numerico N. 1 con presa d'aria orizzontale (Tabella 1) [12]. Consideriamo la dinamica di autoestinzione osservata nella simulazione N. 2 (velocità di rilascio di 300 m/s) e confrontiamola con la simulazione N. 1 (velocità di rilascio di 600 m/s). La Figura 15 mostra la dinamica della frazione molare OH per la simulazione N. 2 in 3D (Figura 15a) e 2D (Figura 15b). Il contorno della reazione (iso-superficie della frazione molare OH di 1×10^{-4}) mostra la regione di combustione e si sposta fuori dal container in circa 30 s. Questa zona di reazione all'esterno del container si separa dalla zona di reazione all'interno a 45 s ed esiste fino a circa 56 s. La dimensione di questa piccola zona di reazione esterna non supera le due altezze della presa d'aria. All'incirca allo stesso tempo di 56-57 s c'è ingresso d'aria nel container che supporta una debole reazione appena sotto la presa d'aria. Questa zona di reazione interna cessa praticamente a circa 120 s. Contrariamente all'esperimento N. 4 con la fiamma esterna, nella simulazione N. 2 con l'autoestinzione, la combustione nel getto cessa prima sul lato sinistro, che è più vicino alla presa d'aria, a 55-56 s. Questo può essere spiegato ed è coerente con la presenza di una quantità leggermente maggiore di ossigeno in questo momento sul lato inferiore destro del rilascio (Figura 15a).

Lezione 11: Spazi confinati

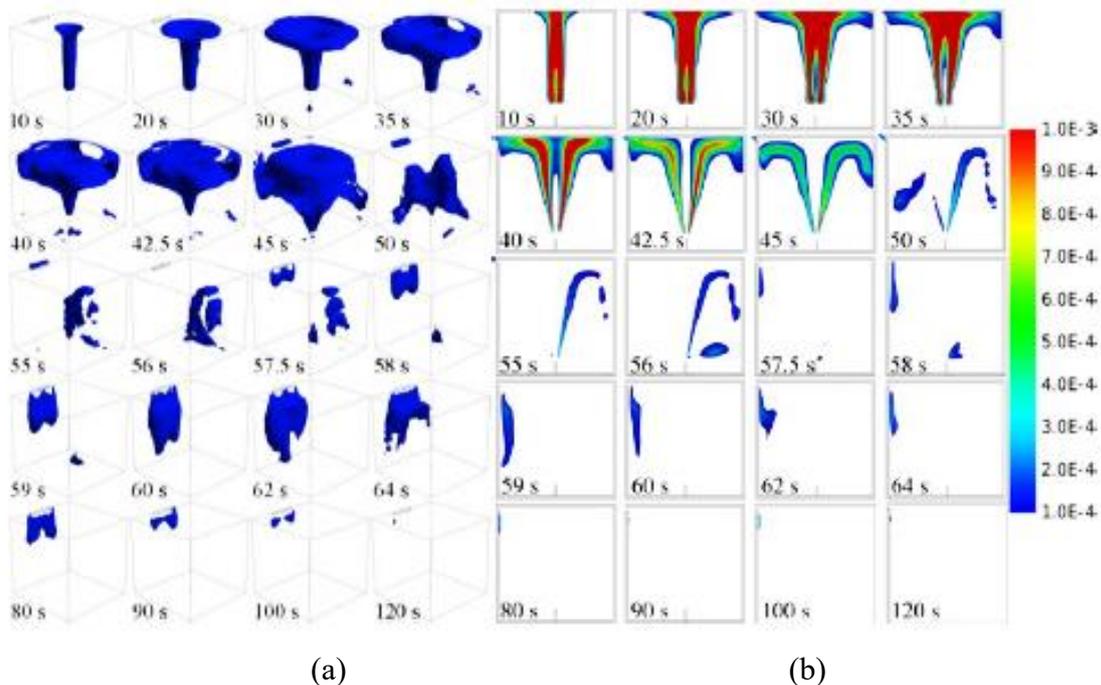


Figura 15. Frazione molare di idrossile OH in un container di $1 \times 1 \times 1$ m, simulazione N. 2 (autoestinzione del jet fire di idrogeno) [13]: (a) Vista 3D della iso-superficie di $\text{OH} \times 10^{-4}$, (b) Sezione 2D lungo la linea centrale del container.

La piccola dimensione della zona di reazione al di fuori del container nel periodo 30-56 s può essere spiegata dall'analisi delle concentrazioni presentate in Figura 16. Infatti, durante questo periodo la concentrazione di idrogeno nel flusso fuori dal container non supera circa 7-10 vol. %, la concentrazione dell'acqua aumenta da circa 15 a oltre 34 vol. %, e la concentrazione di ossigeno scende da circa 10 vol. % a 0 vol. %. Il diagramma di infiammabilità mostra che questa miscela con l'aria è proprio al confine della regione infiammabile [16]. Nella simulazione N. 2 questa miscela reagisce con l'aria in condizioni in cui la temperatura della miscela è piuttosto elevata e scende a circa 800 K solo alla fine di questo periodo.

Come risulta dalla Figura 16, il flusso in uscita dal container termina dopo 50 s e c'è solo l'afflusso nel container (vedere le istantanee corrispondenti a 57,5 s fino a 120 s). Pertanto, in accordo con la simulazione N. 1, affinché avvenga l'autoestinzione, è necessario che vi sia un periodo di tempo prolungato in cui, dopo la fase iniziale di combustione interna seguita dal raffreddamento dei prodotti caldi da parte dell'idrogeno "freddo", si ha un ingresso di aria attraverso l'intera area dell'apertura di ventilazione.

Lezione 11: Spazi confinati

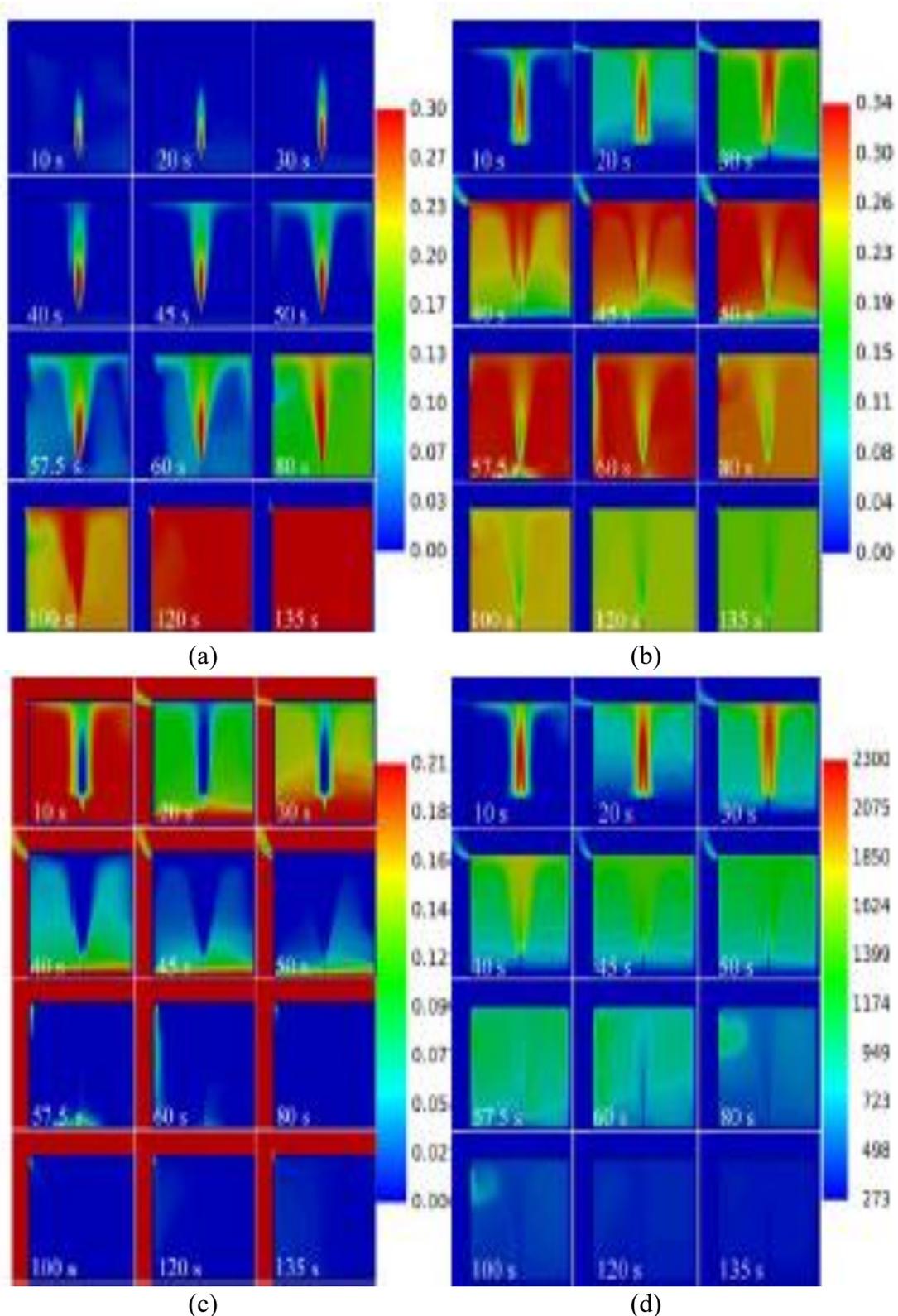


Figura 16. Sezione 2D lungo la linea centrale del container nella Simulazione N. 2 (autoestinzione del jet fire di idrogeno) [13]: (a) frazione molare di H_2 , (b) frazione molare di H_2O , (c) frazione molare di O_2 e (d) temperatura

La Figura 16 (a) mostra che, dopo 2 minuti dal rilascio, l'ambiente viene riempito con idrogeno con frazione molare superiore al livello stechiometrico $> 0,30$. Similarmente alla simulazione

Lezione 11: Spazi confinati

N. 4 con la presa d'aria verticale il getto è leggermente inclinato verso la parete con la presa. La frazione molare massima dell'acqua si osserva a 50-60 s. Si ha una forte "stratificazione" di ossigeno a 40-50 s, con concentrazione praticamente nulla alla sommità e concentrazione di ossigeno praticamente iniziale di 20,7 vol. % in basso. La temperatura scende a circa 100 gradi sopra la temperatura iniziale dopo 2 minuti di rilascio innescato. Questo risultato può essere utilizzato come indicazione del tempo di resistenza al fuoco dei componenti all'interno del container della cella a combustibile.

La precedente conclusione che l'autoestinzione si osserva sempre quando c'è un periodo di tempo in cui c'è aspirazione d'aria nel container attraverso l'intera area di ventilazione è confermata nella simulazione N. 6 (Tabella 1) con presa d'aria verticale con area minore. Ad ulteriore supporto di questa osservazione, nella simulazione N. 7 (fiamma esterna) non si è avuto tale fenomeno.

10.4 Fiamma esterna

La Figura 17 mostra i risultati della simulazione N. 4 per il rilascio con velocità di 600 m/s, quando si verifica una transizione da jet fire all'interno nel container ad una modalità di fiamma esterna. La massima frazione molare degli ossidrili nella fiamma a 10 s è uguale a 0,01, caratteristica per la combustione in condizioni atmosferiche normali. Successivamente, la questa si riduce insieme al restringimento della zona in cui è presente la frazione molare più alta di OH. Si pensa che ciò sia dovuto alla diluizione del jet fire con i prodotti della combustione trascinati. La frazione molare massima di OH non supera 7.5×10^{-3} a 20 s.

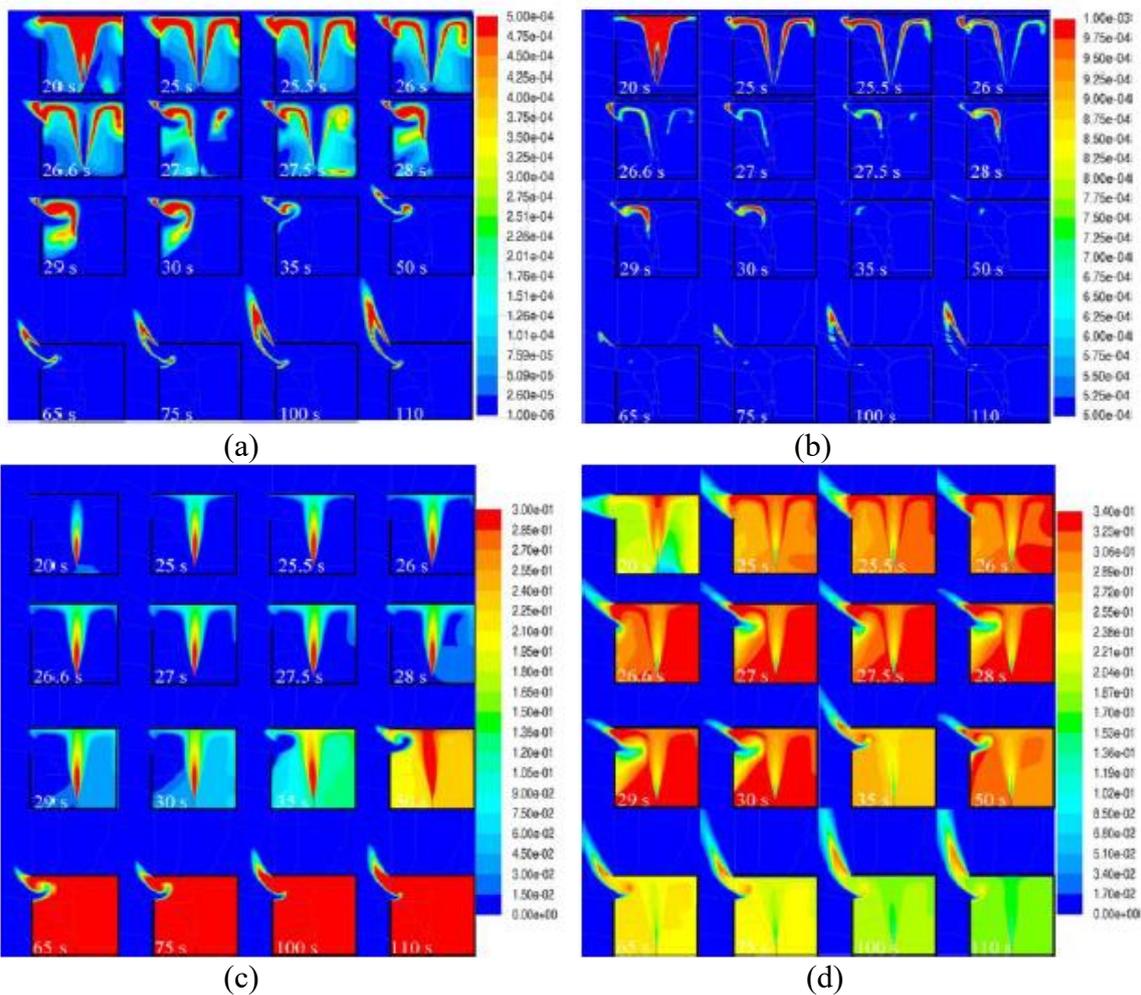
La Figura 17a mostra l'evoluzione della zona di reazione durante la transizione dalla combustione interna alla fiamma esterna mediante visualizzazione della frazione molare OH nell'intervallo da 1×10^{-6} a 5×10^{-4} , mentre un'immagine in Figura 17b corrisponde all'intervallo 5×10^{-4} - 1×10^{-3} . Non c'è nessuna o pochissima reazione all'esterno del container fino a 20 s. Mentre la velocità di combustione all'interno del container diminuisce dopo 20 s, la zona di reazione inizia a uscire dal container attraverso la presa d'aria con la fiamma esterna visibile sopra il container dopo 50 s. Le Figure 17a e 17b mostrano chiaramente che la reazione cessa prima dal lato del jet fire opposto alla presa d'aria che si trova alla sommità della parete sinistra. La Figura 17b dimostra che esiste una zona di reazione continua su entrambi i lati della presa. Questa zona collega la reazione interna nell'area in cui l'aria fresca sta entrando nel container con la fiamma esterna della miscela di idrogeno e prodotti della combustione che fuoriesce nell'aria atmosferica. Questi due flussi opposti attraverso l'apertura per la ventilazione creano un vortice reattivo nelle sue vicinanze all'interno del container e stabilizza il bordo inferiore della fiamma. Il bordo superiore della fiamma esterna è fissato al bordo superiore dell'apertura.

L'evoluzione della frazione molare di idrogeno nel container è mostrata nella Figura 17c. La fiamma è in regime ben ventilato fino a circa 20 s quando non c'è più idrogeno che esce dal container a causa della sua completa combustione all'interno. L'accumulo di idrogeno è leggermente maggiore sul lato del getto opposto alla parete con la presa d'aria. C'è una certa

Lezione 11: Spazi confinati

inclinazione del getto verso l'apertura (vedi l'istantanea a 50 s). La frazione molare dell'idrogeno è superiore a 0,30 praticamente in tutto il container al tempo di 65 s con esclusione della piccola regione vicina alla presa dove entra l'aria. La frazione molare dell'idrogeno a 110 s è tra 0,48 a 0,50 rispettivamente a livello del pavimento e del soffitto.

La quantità massima di vapore acqueo si osserva a 27-30 s (Figura 17d), in maniera simile alla simulazione N. 1 con apertura orizzontale della stessa area riportata in [12]. Successivamente, la frazione molare dell'acqua diminuisce monotonamente nel tempo a causa del trascinamento dell'acqua nel getto di idrogeno continuo e fuoriesce dal container (come parte della miscela infiammabile).



Lezione 11: Spazi confinati

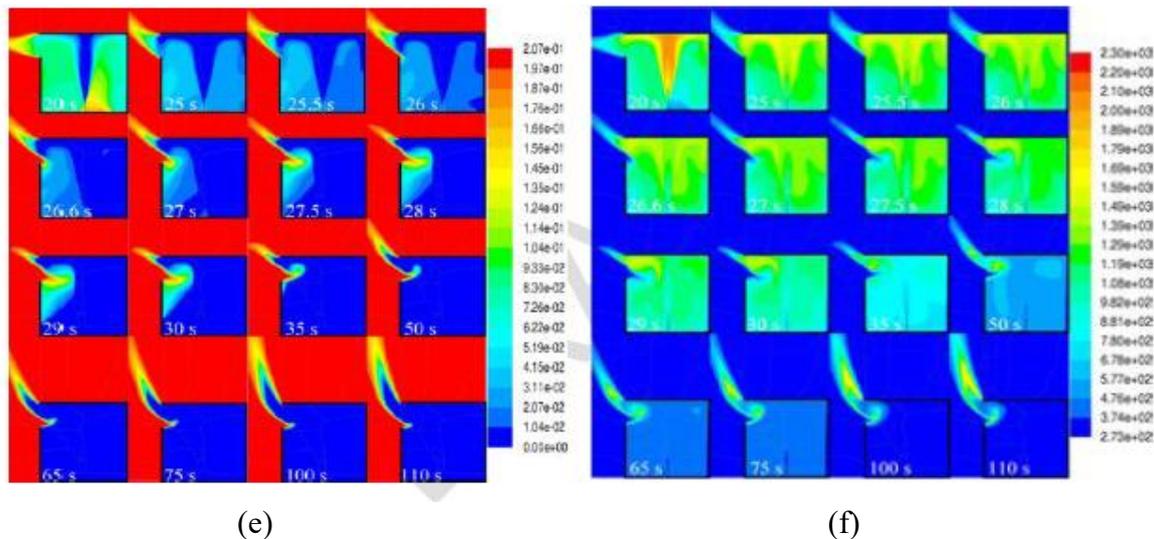


Figura 17. Sezione 2D lungo la linea centrale del container, simulazione N. 4 (jet fire di idrogeno con fiamma esterna) [13]: (a) frazione molare di OH, range 1×10^{-6} – 5×10^{-4} , (b) frazione molare di OH, range 5×10^{-4} – 1×10^{-3} , (c) frazione molare di H₂, (d) frazione molare di H₂O, (e) frazione molare di O₂, e (f) temperatura.

Ad un punto critico per la "sopravvivenza" della fiamma a circa 50 s, quando inizia la transizione alla fiamma esterna, la frazione molare di idrogeno in uscita aumenta a circa 0,2 e quella dell'acqua (diluente) scende a 0,2-0,3. Questa composizione della miscela è considerata nell'intervallo di infiammabilità secondo il diagramma di infiammabilità per la miscela idrogeno-aria-diluente a pressione e temperatura atmosferiche, se si trascura l'effetto della temperatura. Pertanto, la disponibilità di miscela infiammabile che fuoriesce dal locale e la presenza di reazione (sorgente di innesco) forniscono le condizioni per il passaggio della combustione all'esterno del locale.

La Figura 17e mostra che la frazione molare di ossigeno all'interno del container diminuisce gradualmente ed è praticamente uguale a zero a 35 s, escludendo una piccola zona vicino all'apertura. Successivamente, l'aria che entra nel container a una certa profondità brucia e viene immediatamente trascinato nel flusso di idrogeno e dei prodotti della combustione che fuoriescono dal container attraverso la parte superiore dell'apertura. La dinamica della temperatura all'interno e all'esterno del container è mostrata nella Figura 17f. L'istantanea corrispondente a 50 s dimostra un ruolo importante del vortice reagente, che si forma all'interfaccia tra la miscela in uscita e l'aria in entrata nel container, sulla sostenibilità della fiamma e sulla transizione del jet fire sotto-ventilato alla modalità di fiamma esterna.

Per l'apertura orizzontale con uguale area l'instaurarsi della fiamma esterna ad una velocità dell'idrogeno inferiore, 150 m/s, è stato osservato nella simulazione N. 3. La stessa velocità di rilascio della simulazione N. 4 (apertura verticale), cioè 600 m/s, per l'apertura orizzontale ha determinato l'autoestinzione della fiamma (simulazione N. 1). L'autoestinzione è stata osservata anche alla velocità di 300 m/s (simulazione N. 2). Pertanto, un limite di velocità che

Lezione 11: Spazi confinati

separa la modalità di fiamma esterna e la modalità di autoestinzione è compresa tra 150 m/s e 300 m/s per la data geometria del container.

La fiamma esterna si osserva nella simulazione N. 7 con apertura verticale di area minima e per velocità di rilascio di 300 m/s. L'aumento della velocità di rilascio a 600 m/s (simulazione N. 6) ha determinato l'autoestinzione. Si noti che una caratteristica del fenomeno di autoestinzione è l'esistenza di un periodo in cui l'aria viene aspirata nel container attraverso l'intera area dell'apertura (non solo una parte).

11. Utilizzo di e-Laboratory

11.1 Ventilazione passiva in un container con un'apertura: concentrazione uniforme di idrogeno

Questo strumento è costituito da tre opzioni per consentire il calcolo dei tre parametri seguenti:

1. Concentrazione uniforme di idrogeno allo stato stazionario per una data velocità di rilascio e la dimensione dell'apertura;
2. Parametri dell'apertura per ottenere la concentrazione desiderata per un dato rilascio;
3. La portata di rilascio per ottenere la concentrazione desiderata per determinate dimensioni dell'apertura.

I modelli teorici possono essere trovati nella Sezione 5 di questa lezione. Per implementare lo strumento, come mostrato in Figura 18, il primo passo è selezionare il modello, che viene utilizzato per il problema specifico.



Figura 18. Selezione del modello adeguato al problema specifico.

Problema 1: Concentrazione uniforme di idrogeno allo stato stazionario per una data velocità di rilascio e la dimensione dell'apertura.

I parametri di input sono mostrati nella Tabella 2 e la schermata dell'impostazione dello strumento è mostrata nella Figura 19.

Tabella 2. Parametri di input per il problema 1.

Parametro	Simbolo	Unità	Limiti (min-max)	Defaults
Portata in massa di idrogeno	\dot{m}_{H_2}	kg/s	0.0001-1	0.001

Lezione 11: Spazi confinati

Pressione ambiente	p_2	Pa	33700-107900	101325
Temperatura ambiente	T_2	K	240-350	293
Altezza della presa d'aria	H	m	0.001-10	2
Larghezza della presa d'aria	W	m	0.001-10	1
Coefficiente di scarico	C_D	-	0.4-1	0.6

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Ambient pressure

p_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.00001 kg/s

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Figura 19. Impostazione dello strumento per il problema 1.

Il parametro di output è la frazione volumetrica dell'idrogeno. Un esempio del parametro in uscita è mostrato in Figura 20, che indica che, per il dato valore dei parametri di ingresso in Figura 19, la frazione di volume di idrogeno calcolata è 0,048377 nel container.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Steady-state hydrogen uniform concentration for the given release rate and vent size

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Figura 20. Output dello strumento per il problema 1.

Lezione 11: Spazi confinati

Problema 2: Parametri dell'apertura per ottenere la concentrazione desiderata.

Questo strumento consente all'utente di calcolare i parametri dell'apertura, ad es. la larghezza o l'altezza, per l'eventuale rilascio al fine di non superare il livello richiesto di concentrazione di idrogeno, ad es. 25% dal limite inferiore di infiammabilità del 4% (LFL).

I parametri di input sono riportati in Tabella 3 e la schermata di impostazione dello strumento è mostrata in Figura 21. Vale la pena notare che, in questo caso, o l'altezza dell'apertura, H , o la sua larghezza, W , deve essere inserita digitando un valore per H o W e lasciando non compilato il parametro non necessario (H o W). Ad esempio, se H viene utilizzato come parametro di input, W non deve essere compilato durante l'impostazione e viceversa.

Tabella 3. Parametri di input per il problema 2.

Parametro	Simbolo	Unità	Limiti (min-max)	Defaults
Portata in massa di idrogeno	\dot{m}_{H_2}	kg/s	0.0001-1	0.001
Pressione ambiente	p_2	Pa	33700-107900	101325
Temperatura ambiente	T_2	K	240-350	293
Scelta dell'altezza o larghezza	H/W	m	0.001-10	2
Coefficiente di scarico	C_D	-	0.4-1	0.6
Frazione molare di idrogeno desiderata	X	-	0-1	0.04

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Ambient pressure

P_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.00001 kg/s

Volume fraction of hydrogen

X 0.04837701757210591

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W m

Calculate Reset

Figura 21. Impostazione dello strumento per il problema 2.

Lezione 11: Spazi confinati

Il parametro in uscita è l'altezza o la larghezza dell'apertura per una data portata in massa. Un esempio è mostrato in Figura 22, il che indica che, per il dato valore dei parametri in ingresso in Figura 21, la larghezza richiesta è 0,2 m quando l'altezza inserita è 0,2 m.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Parameters of the vent to get desired concentration

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Figura 22. Output dello strumento per il problema 2.

Problema 3: Portata di rilascio per ottenere la concentrazione desiderata per determinate dimensioni dell'apertura.

Questo strumento consente di calcolare la portata in massa che potrebbe essere consentita affinché i particolari parametri dell'apertura per la ventilazione rispettino il livello richiesto di concentrazione di idrogeno ad es. 25% dal limite inferiore di infiammabilità del 4% (LFL).

I parametri di input sono mostrati nella Tabella 4 e la schermata dell'impostazione dello strumento è mostrata nella Figura 23.

Tabella 4. Parametri di input per il problema 3.

Parametro	Simbolo	Unità	Limiti (min-max)	Defaults
Pressione ambiente	p_2	Pa	33700-107900	101325
Temperatura ambiente	T_2	K	240-350	293
Altezza della presa d'aria	H	M	0.001-10	2
Larghezza della presa d'aria	W	m	0.001-10	1
Coefficiente di scarico	C_D	-	0.4-1	0.6
Frazione molare di idrogeno desiderata	X	-	0-1	0.04

Lezione 11: Spazi confinati

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Ambient pressure

P_{atm} 101325 Pa

Ambient temperature

T_{atm} 293 K

Volume fraction of hydrogen

X 0.04837701757210591

Discharge coefficient

C_D 0.6

Vent height

H 0.2 m

Vent width

W 0.2 m

Calculate Reset

Figura 23. Impostazioni dello strumento per il problema 3.

Il parametro in output è la portata in massa di idrogeno. Un esempio è mostrato in Figura 24, che indica che, per il dato valore dei parametri di ingresso in Figura 23, la portata massica di idrogeno richiesta è $1e-5 \text{ kg s}^{-1}$.

Passive ventilation in an enclosure with one vent: uniform hydrogen concentration

» Calculation of the release rate to get desired concentration for the given vent sizes

Name	Symbol	Value	Unit
Ambient pressure	P_{atm}	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	1e-5	kg/s
Volume fraction of hydrogen	X	0.048377	
Discharge coefficient	C_D	0.6	
Vent height	H	0.2	m
Vent width	W	0.2	m

Export to CSV Change inputs Dataset name Save

Figura 24. Output dello strumento per il problema 3.

11.2 Pressure peaking phenomenon per rilasci non innescati

Questo strumento è costituito da due opzioni per consentire la risoluzione dei seguenti problemi:

1. *Pressure peaking phenomenon* con portata in massa costante
2. *Pressure peaking phenomenon* con rilascio transitorio durante la depressurizzazione del serbatoio (*tank blowdown*)

La teoria del *pressure peaking phenomenon* (PPP) è stata discussa in dettaglio nella sezione 6 di questa lezione. Per implementare lo strumento, come mostrato in Figura 25, il primo passo è selezionare il modello, che viene utilizzato per il problema specifico. La descrizione del

Lezione 11: Spazi confinati

modello dovrebbe apparire premendo il pulsante appropriato nella schermata iniziale dello strumento.



Figura 25. Selezione del modello adeguato al problema PPP specifico.

Problema 1: *Pressure peaking phenomenon* con portata in massa costante.

I parametri in input sono mostrati in Tabella 5 e la schermata dell'impostazione dello strumento è mostrata in Figura 26.

Tabella 5. Parametri in input per il problema PPP 1 (caso non innescato).

Parametro	Simbolo	Unità	Limiti (min-max)	Defaults
Pressione ambiente	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatura dello spazio chiuso	T_{encl}	K		293.15
Volume dello spazio chiuso	V_{encl}	m ³		30.42
Altezza dell'apertura	H_{vent}	m		0.05
Larghezza dell'apertura	W_{vent}	m		0.25
Portata in massa d'idrogeno	\dot{m}_{H_2}	kg/s		0.39
Coefficiente di scarico	C_D	-		0.6
Time step per l'integrazione	Δt	s		1
Numero di time steps per l'integrazione	n_{last}	-	500-100000	1000

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

Atmospheric pressure

P_{atm} 101325 Pa

Enclosure temperature

T_{encl} 293.15 K

Enclosure volume

V_{encl} 30.42 m³

Vent height

H_{vent} 0.05 m

Vent width

W_{vent} 0.25 m

Hydrogen mass flow rate

\dot{m}_{H_2} 0.39 kg/s

Coefficient of discharge

C_D 0.6

Time step for integration

Δt 1 s

Number of time steps for integration

n_{maz} 1000

Calculate Reset

Figura 26. Parametri di input per il problema PPP 1 (caso non innescato).

Al termine del calcolo, è necessario tracciare il grafico per la pressione p_{g_encl} (asse Y) rispetto al tempo t (asse X). L'asse della pressione dovrebbe avere il titolo dell'asse rispetto alle unità di pressione scelte all'inizio, ad es. bar/Pa/kPa, ecc. Un esempio è mostrato in Figura 27.

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Constant mass flow rate

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	0.39	kg/s
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Time step for integration	Δt	1	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gencl}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figura 27. Output dello strumento per il problema PPP 1 (caso non innescato).

Il grafico della pressione in funzione del tempo è mostrato in Figura 28.

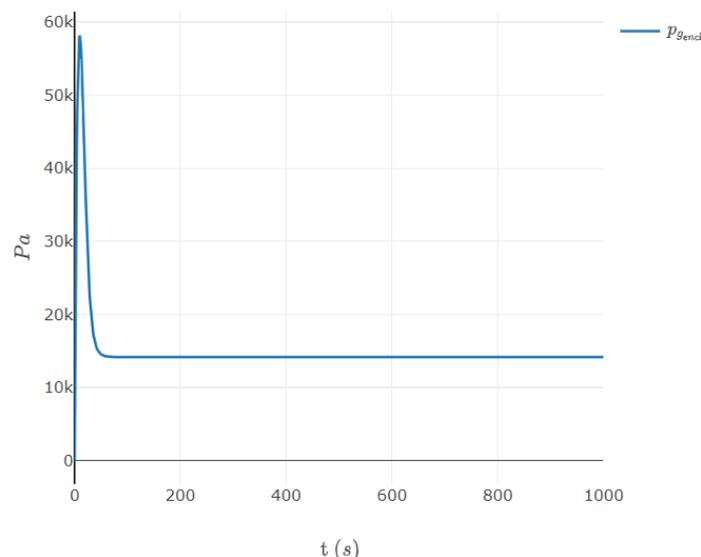


Figura 28. Grafico della pressione in funzione del tempo per il problema PPP 1 (caso non innescato).

Problema 2: *Pressure peaking phenomenon* con rilascio transitorio durante la depressurizzazione del serbatoio.

I parametri di input sono mostrati in Tabella 6 e la schermata di impostazione dello strumento è mostrato in Figura 29.

Lezione 11: Spazi confinati

Tabella 6. Parametri di input per il problema PPP 2 (caso non innescato).

Parametro	Simbolo	Unità	Limiti (min-max)	Defaults
Pressione ambiente	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatura dello spazio chiuso	T_{encl}	K		
Volume dello spazio chiuso	V_{encl}	m ³		
Altezza dell'apertura	H_{vent}	m		
Larghezza dell'apertura	W_{vent}	m		
Portata in massa d'idrogeno	C_D	-		0.6
Coefficiente di scarico	p_{res}^0	Pa		
Temperatura iniziale nel serbatoio di idrogeno	T_{res}	K		
Volume del serbatoio	V_{res}	m ³		
Diametro del rilascio	d_3	m		
Stima iniziale del tempo d'integrazione	t_{j0}	s		
Numero di time steps per l'integrazione	i_{last}	-		

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Coefficient of discharge

H2 pressure in reservoir

 Pa

H2 temperature in reservoir

 K

Reservoir volume

 m³

Orifice diameter

 m

Initial guess for integration time

 s

Number of time steps for integration

Figura 29. Parametri di input per il problema PPP 2 (caso non innescato).

Una volta terminato il calcolo, viene tracciato il grafico per la pressione p_{g_encl} (asse Y) in funzione del tempo t (asse X). L'asse della pressione dovrebbe avere il titolo dell'asse con le unità di pressione scelte all'inizio, ad es. bar/Pa/kPa ecc. Un esempio è mostrato in Figura 30.

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

» Tank blowdown

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
H2 pressure in reservoir	p_{res}	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	T_{res}	114.878	K
Reservoir volume	V_{res}	0.196	m ³
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Initial guess for integration time	t_{f_0}	10	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
H2 mass in reservoir	m_{H_2}	view	kg
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	view	kg/s
Density in notional nozzle	ρ_4	view	kg/m ³
Velocity in notional nozzle	V_4	view	m/s
Notional nozzle diameter	d_4	view	m
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gend}	view	Pa

[Plot](#) [Export to CSV](#) [Change inputs](#) [Save](#)

Figura 30. Output dello strumento per il problema PPP 2 (caso non innescato).

Il grafico della pressione in funzione del tempo è mostrato in Figura 31.

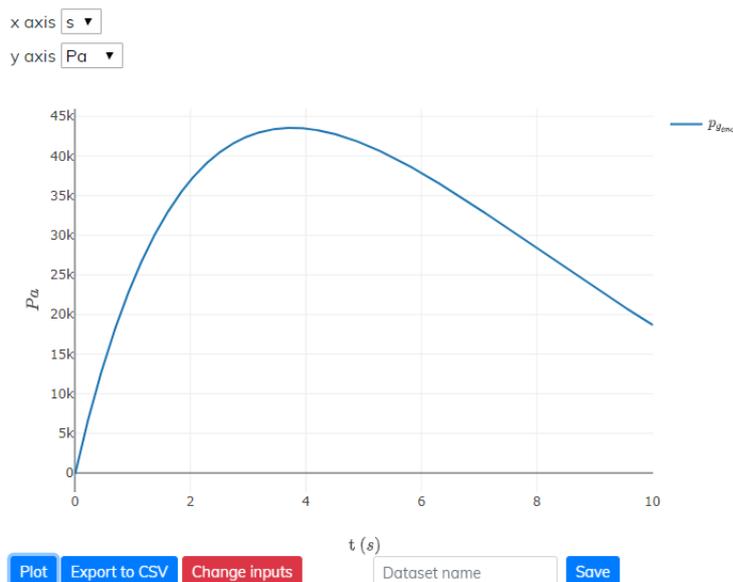


Figura 31. Grafico della pressione in funzione del tempo per il problema PPP 2 (caso non innescato).

Lezione 11: Spazi confinati

11.3 *Pressure peaking phenomenon* per il rilascio innescato

Simile al *pressure peaking phenomenon* (PPP) per il rilascio non innescato, anche lo strumento per calcolare il PPP in caso di rilascio innescato consiste di due opzioni, per due diversi problemi.

Prima di tutto, gli utenti devono scegliere lo strumento intitolato *Pressure peaking phenomenon for ignited release* dall'elenco degli strumenti di e-Laboratory. Quindi selezionare “*Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)*” per risolvere il problema 1 o “*Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)*” per risolvere il problema 2, come mostrato nella Figura 32.

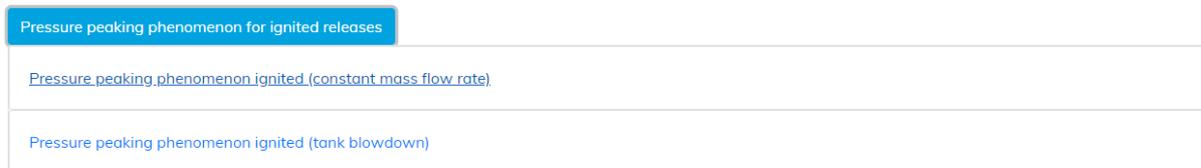


Figura 32. Selezione dello strumento adeguato al problema specifico.

Problema 1: *Pressure peaking phenomenon* con portata di massa costante.

I parametri di input sono elencati nella Tabella 7 e la schermata dell'impostazione dello strumento è mostrata nella Figura 33. La differenza dei parametri di input del caso di rilascio innescato è un parametro aggiuntivo, C_I .

Tabella 7. Parametri di input per il problema PPP 1 (caso innescato).

Parametro	Simbolo	Unità	Limiti (min-max)	Defaults
Pressione ambiente	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatura dello spazio chiuso	T_{encl}	K		293.15
Volume dello spazio chiuso	V_{encl}	m ³		30.42
Altezza dell'apertura	H_{vent}	m		0.05
Larghezza dell'apertura	W_{vent}	m		0.25
Portata in massa d'idrogeno	\dot{m}_{H_2}	kg/s		0.39
Coefficiente di scarico	C_D	-		0.6
Time step per l'integrazione	Δt	s		1
Numero di time steps per l'integrazione	n_{last}	-		1000
Coefficiente per il rilascio innescato	C_I	-		1

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Hydrogen mass flow rate

 kg/s

Coefficient of discharge

Sought factor

Time step for integration

 s

Number of time steps for integration

Figura 33. Parametri di input per il problema PPP 1 (caso innescato).

La schermata dei parametri in uscita e un esempio del grafico della pressione in funzione del tempo sono mostrati rispettivamente nella Figura 34 e nella Figura 35.

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (constant mass flow rate)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	0.017	kg/s
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Sought factor	α_c	22	
Time step for integration	Δt	1	s
Number of time steps for integration	n_{max}	1000	
Time	t	view	s
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	$p_{g_{encl}}$	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figura 34. Output dello strumento per il problema PPP 1 (caso innescato).

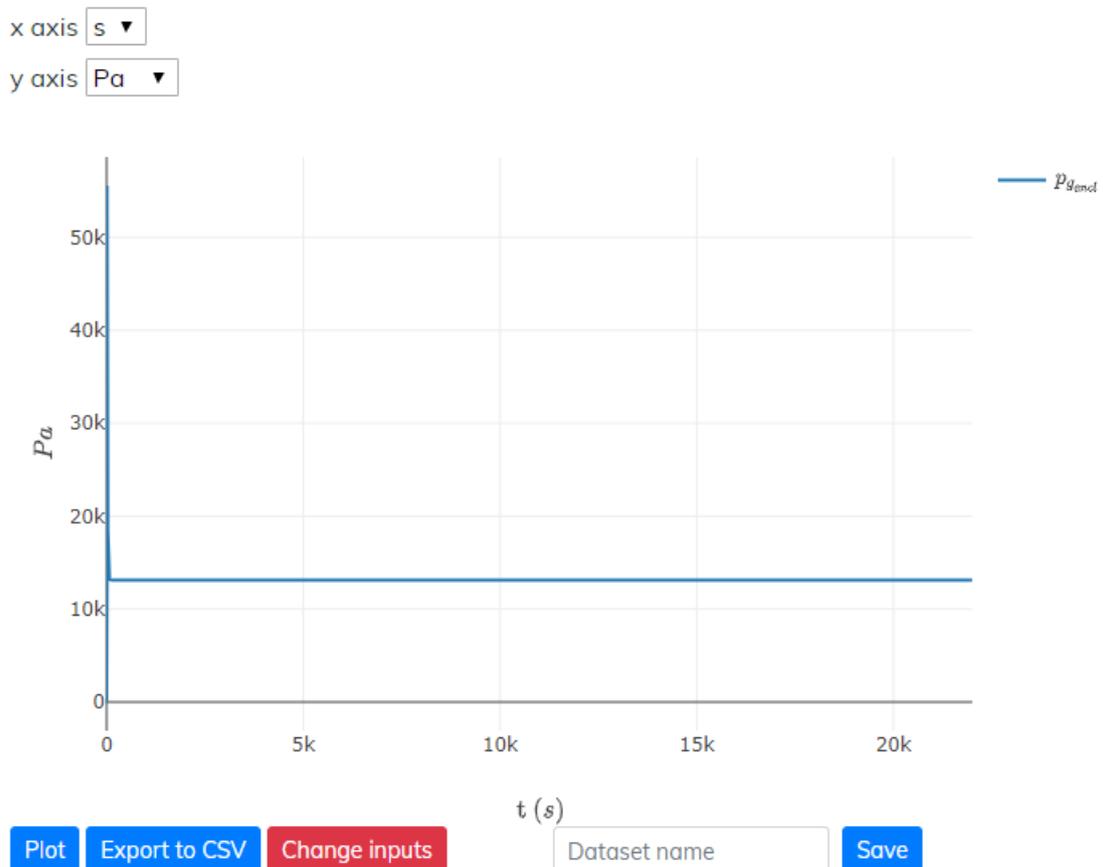


Figura 35. Grafico della pressione in funzione del tempo per il problema PPP 1 (caso innescato).

Lezione 11: Spazi confinati

Problema 2: Pressure peaking phenomenon con depressurizzazione del serbatoio.

I parametri in input sono elencati in Tabella 8 e la schermata delle impostazioni dello strumento è mostrata in Figura 36.

Tabella 8. Parametri in input al problema PPP 2 (caso innescato).

Parametro	Simbolo	Unità	Limiti (min-max)	Defaults
Pressione atmosferica	p_{atm}	Pa	101325 – 90,000,000	101325
Temperatura dello spazio chiuso	T_{encl}	K		
Volume dello spazio chiuso	V_{encl}	m ³		
Altezza dell'apertura	H_{vent}	m		
Larghezza dell'apertura	W_{vent}	m		
Coefficiente di scarico	C_D	-		0.6
Pressione iniziale dell'idrogeno nel serbatoio	p_{res}^0	Pa		
Temperatura iniziale dell'idrogeno nel serbatoio	T_{res}	K		
Volume del serbatoio	V_{res}	m ³		
Diametro del rilascio	d_3	m		
Stima iniziale del tempo d'integrazione	t_{j0}	s		
Numero di time steps per l'integrazione	i_{last}	-		
Coefficiente per i rilasci innescati	C_I	-		1

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Atmospheric pressure

 Pa

Enclosure temperature

 K

Enclosure volume

 m³

Vent height

 m

Vent width

 m

Coefficient of discharge

Sought factor

H2 pressure in reservoir

 Pa

H2 temperature in reservoir

 K

Reservoir volume

 m³

Orifice diameter

 m

Initial guess for integration time

 s

Number of time steps for integration

Figura 36. Parametri di input per il problema PPP 2 (caso innescato).

La schermata dei parametri in output ed un esempio del grafico della pressione in funzione del tempo sono rispettivamente mostrati in Figura 37 e Figura 38.

Lezione 11: Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

» Pressure peaking phenomenon ignited (tank blowdown)

Name	Symbol	Value	Unit
Atmospheric pressure	p_{atm}	1.01325e+5	Pa
Enclosure temperature	T_{encl}	293.15	K
Enclosure volume	V_{encl}	30.42	m ³
Vent height	H_{vent}	0.05	m
Vent width	W_{vent}	0.25	m
Coefficient of discharge	C_D	0.6	
Sought factor	α_c	22	
H2 pressure in reservoir	p_{res}	8.45344e+5	Pa
H2 temperature in reservoir	T_{res}	114.878	K
Reservoir volume	V_{res}	0.196	m ³
Orifice diameter	d_3	0.0095	m
Initial guess for integration time	t_{f_0}	10	s
Number of time steps for integration	n_{maz}	1000	
Time	t	view	s
H2 mass in reservoir	m_{H_2}	view	kg
Hydrogen mass flow rate	\dot{m}_{H_2}	view	kg/s
Density in notional nozzle	ρ_4	view	kg/m ³
Velocity in notional nozzle	V_4	view	m/s
Notional nozzle diameter	d_4	view	m
Mass of gases in enclosure	m_{encl}	view	kg
Vent mass flow rate	\dot{m}_{vent}	view	kg/s
Overpressure	p_{gencl}	view	Pa

[Plot](#)
[Export to CSV](#)
[Change inputs](#)

[Save](#)

Figura 37. Output dello strumento per il problema PPP 2 (caso innescato).

Lezione 11: Spazi confinati

x axis

y axis

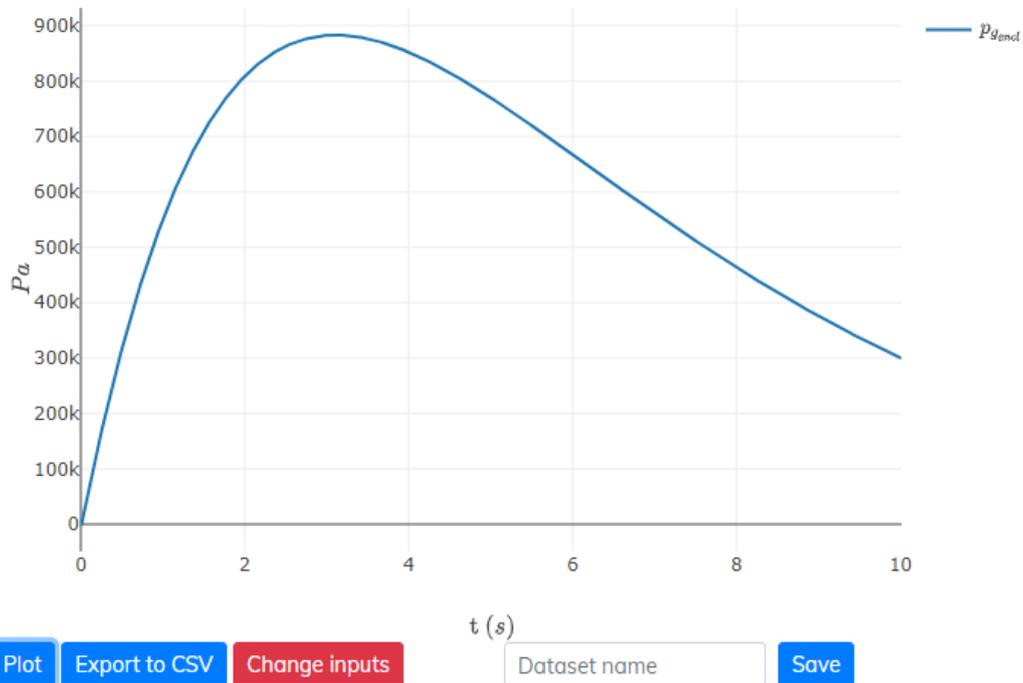


Figura 38. Grafico della pressione in funzione del tempo per il problema PPP 2 (caso innescato).

Ringraziamenti

Il progetto HyResponse è riconosciuto in quanto il materiale presentato in questa lezione è basato sulle lezioni originali del progetto HyResponse.

Bibliografia

1. HyIndoor project. Available from <https://hydrogeneurope.eu/project/hyindoor>. [accessed 07.12.20]
2. HyResponder Deliverable D1.1 – Report on hydrogen safety aspects of technologies, systems and infrastructures (2020). Deliverable will be publically available from: <https://hyresponder.eu/deliverables/> when approved
3. Saffers, J-B and Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39, pp. 6268-6285.
4. HyIndoor Deliverable D5.1 – Widely accepted guidelines on FC indoor installation and use (2015). Available from: http://www.hyindoor.eu/wp-content/uploads/2014/06/HyIndoor-Guidelines_D5.1_Final-version3a.pdf [accessed 07.12.20].
5. Karlsson, B and Quintiere, J (2000). Enclosure fire dynamics. CRC Press.
6. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
7. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
8. ISO/TR 15916 (2004). Basic considerations for the safety of hydrogen systems. International Organization for Standardization. ISO Technical Committee 197 Hydrogen Technologies. International Organization for Standardization, Geneva.
9. Baker, WE, Cox, PA, Westine, PS, Kulesz, JJ and Strehlow, RA (1983). Explosion hazards and evaluation. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co, The Netherlands.
10. Molkov, V, Shentsov, V and Quintiere, J (2014). Passive ventilation of a sustained gaseous release in an enclosure with one vent. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 39 (15), pp. 8158– 8168
11. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D , Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: Numerical experiments International Journal of Hydrogen Energy Volume 39, Issue 20, 3 July 2014, Pages 10788-10801
12. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Dynamics of Hydrogen Flame Self-Extinction in a Vented Enclosure. Proceedings of the 7th International Seminar on Fire and Explosion Hazards”, 5-10 May 2013, Providence, RI, USA.
13. Molkov, V, Shentsov, V, Brennan, S, and Makarov, D (2013). Hydrogen non-premixed combustion in enclosure with one vent and sustained release: numerical experiments. Proceedings of ICHS 2013, 9-11 September 2013, Brussels, Belgium.

Lezione 11: Spazi confinati

14. HyTunnel Deliverable D3.1 – Detailed research programme for hydrogen fires in confined structures (2019). Available from: https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2019/12/HyTunnel-CS_D3.1_Detailed-research-programme-on-hydrogen-fires-in-confined-structures.pdf [accessed 07.12.20].
15. Molkov, V, Bragin, M, Brennan, S, Makarov, D, and Saffers, J-B (2010). Hydrogen Safety Engineering: Overview of Recent Progress and Unresolved Issues. International Symposium of Combustion and Fire Dynamics, October 2010, Santander, Spain.
16. Trevino, C and Mauss, F (1992). Chapter 10 “Structure and Extinction of Non-Diluted Hydrogen-Air Diffusion Flames”, In: Peters, N., Rogg, B., Reduced Kinetic Mechanisms for Applications in Combustion Systems. Lecture Notes in Physics, Volume m15. Springer-Verlag, 1992.
17. EU No 406/2010, Commission Regulation of 26 April 2010 implementing Regulation (EC) No 79/2009 of the European Parliament and of the Council on type-approval of hydrogen-powered motor vehicles. Official Journal of the European Union. Vol. 53, 18 May 2010. Available from: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:122:FULL:EN:PDF> [accessed on 07.12.20].
18. Brennan, S, Makarov, D and Molkov, V (2010). Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent. Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards, Leeds, April 2010.
19. SAE J2579 (2009). Technical information report for fuel systems in fuel cell and other hydrogen vehicles, SAE International, Detroit, Michigan, USA, January, 2009.
20. Emmons, DD (1995). Vent flows, SFPE Handbook, ed. P. J. Di Nenno, (2nd Edition). Society of Fire Protection Engineers, Boston, MA, USA.
21. Brennan, S and Molkov, V (2013). Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 38, pp. 8159-8166.
22. Kuznetsov, M., Grune, J., Friedrich, A., Sempert, K., Breitung, W., Jordan, T. (2011) Hydrogen-air deflagrations and detonations in a semi-confined flat layer. In: Fire and Explosion Hazards, Proceedings of the Sixth International Seminar (Edited by D. Bradley, G. Makhviladze and V. Molkov), 125-136.
23. Alekseev, V.I., Kuznetsov, M.S., Yankin, Yu., G., Dorofeev, S.B. (2001) Experimental study of flame acceleration and DDT under conditions of transverse venting. J. Loss Prev. Proc. Ind., 14/6: 591-596.
24. Dorofeev, S.B., Kuznetsov, M.S., Alekseev, V.I., Efimenko, A.A., Breitung, W. (2001) Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures. J. Loss Prev. Proc. Ind., 14 (6): 583-589.

Lezione 11: Spazi confinati

25. Friedrich, A., Grune, J., Jordan, T., Kotchourko, A., Kotchourko, N., Kuznetsov, M., Sempert, K., Stern, G. (2007) Experimental study of hydrogen-air deflagrations in flat layer. In: Proc. 2nd ICHS International Conference on Hydrogen Safety. September 11 - 13, 2007 San Sebastian – SPAIN, paper 1.3.106, 1-12.
26. United States, Department of Energy.
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/current_technology.html.
27. Brennan S, Makarov D and Molkov V. “Dynamics of flammable hydrogen-air mixture formation in an enclosure with a single vent”. In: Proceedings of the 6th International seminar on fire and explosion hazards. England: Research Publishing; July 2011. ISBN 978-981-08-7724-8.
28. S. Brennan, V. Molkov. Safety assessment of unignited hydrogen discharge from onboard storage in garages with low levels of natural ventilation. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38: 8159-8166.
29. H. Hussein, S. Brennan, V. Molkov. Dispersion of hydrogen release in a naturally ventilated covered car park. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45: 23882-23897.