

Applicazioni e sicurezza dell'idrogeno

Modulo 1: Introduzione alle tecnologie dell'idrogeno e proprietà rilevanti per la sicurezza
Modulo 2: Scenari di incidente e conseguenze: dispersione, jet fires ed esplosioni

Il materiale presentato è basato sulle lezioni di proprietà del Consorzio HyResponder



Parte 1

Introduzione alle tecnologie dell'idrogeno e proprietà rilevanti per la sicurezza



Introduzione

Idrogeno atomico e molecolare

l'isotopo più abbondante (oltre il 99,98%) è il protio ${}^1_1\text{H}$

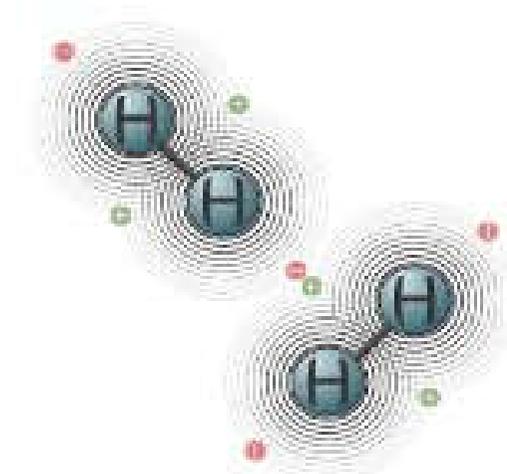
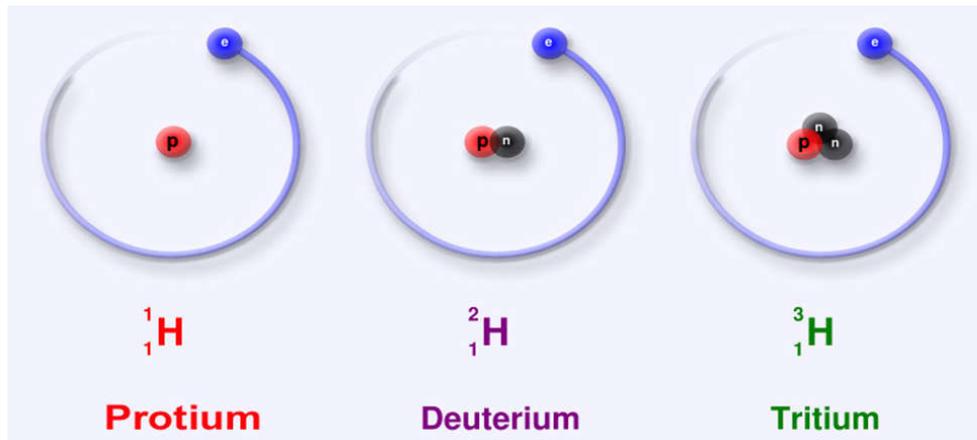
un atomo di idrogeno è costituito da un protone e un elettrone

l'idrogeno è l'elemento più leggero conosciuto

non è presente nella forma pura in natura

in condizioni normali l'idrogeno è un gas formato da molecole composte da due atomi di idrogeno

il gas più leggero, circa 14 volte più leggero dell'aria



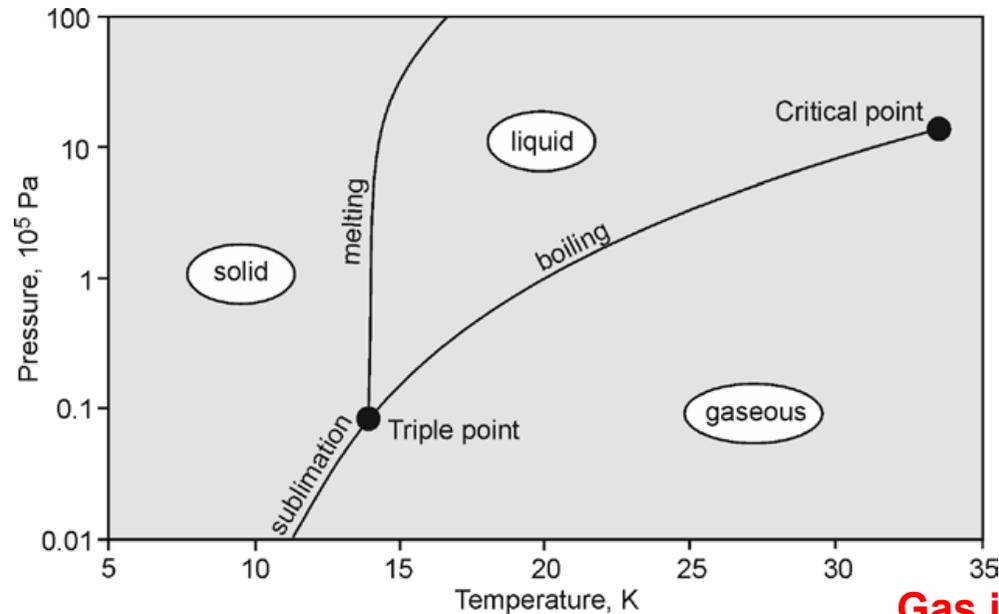
Introduzione

Diagramma di fase dell'idrogeno

Idrogeno "slush"

Transizione di idrogeno solido e liquido al punto triplo.

Punto di fusione: $-259.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Punto triplo: le 3 fasi coesistono,
 20.3 K (-259°C) e $P=7.2\text{ kPa}$.

Temperatura zero assoluto 0 K ($-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Idrogeno liquido

- Liquido incolore, inodore e non corrosivo
- Ustioni criogeniche possibili anche per un breve contatto!

Punto critico: $T= 33.2\text{ K}$ ($-240\text{ }^{\circ}\text{C}$) e $P=1.3\text{ MPa}$. La più alta temperatura alla quale il gas idrogeno può essere liquefatto.

Punto di ebollizione normale (NBP): $T=20.3\text{ K}$. Densità= 70.78 kg/m^3 . 14 volte meno denso dell'acqua.

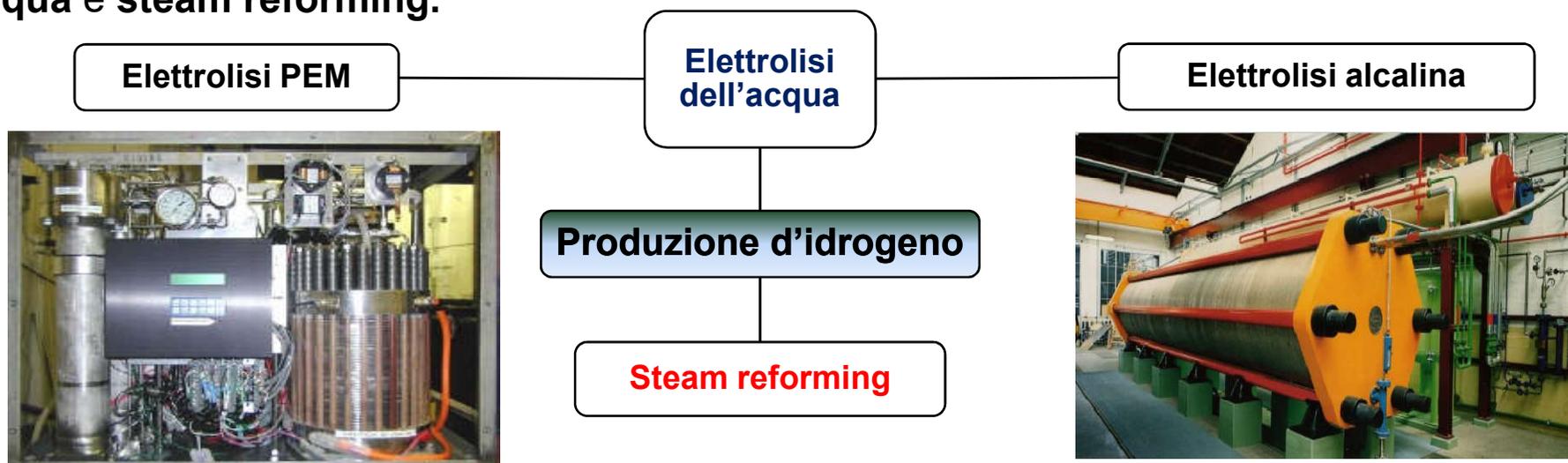
Gas idrogeno

- Gas incolore, inodore e insapore.
- Il gas idrogeno è **non-tossico** e **non-corrosivo** ma può causare **asfissia**.

Tecnologie dell'idrogeno

Produzione dell'idrogeno

l'idrogeno **deve essere prodotto** dai composti in cui è contenuto, es. acqua, metano, metanolo, ammoniaca, ecc. Le **due principali tecnologie** sono disponibili sul mercato per la produzione industriale di idrogeno: **elettrolisi dell'acqua** e **steam reforming**.



Elettrolizzatore PEM



Elettrolizzatore alcalino IHT tipo S-556, 760 Nm³/h e 3 bar



Air Liquide steam reformer

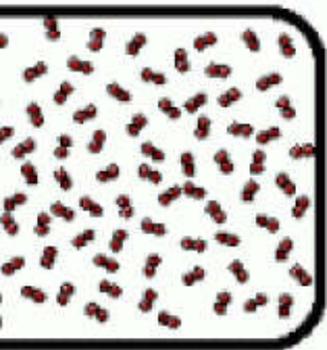
Fonte: HyResponse Deliverable D2.1-Description of selected FCH systems and infrastructure relevant safety features and concepts (2014).

Tecnologie dell'idrogeno

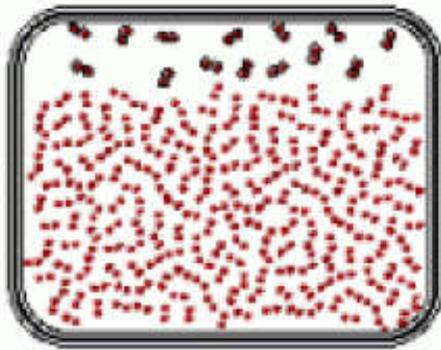
Stoccaggio dell'idrogeno (1/2)

l'idrogeno può essere stoccato come gas, liquido criogenico o gas crio-compresso

serbatoi:



Gas compresso



Liquido criogenico

Alta: pressione, p.

Unità: MPa o Pa, bar.

1 bar = 10⁵ Pa; 1MPa = 10⁶ Pa

Alta pressione
p = 20, 35, 70 MPa



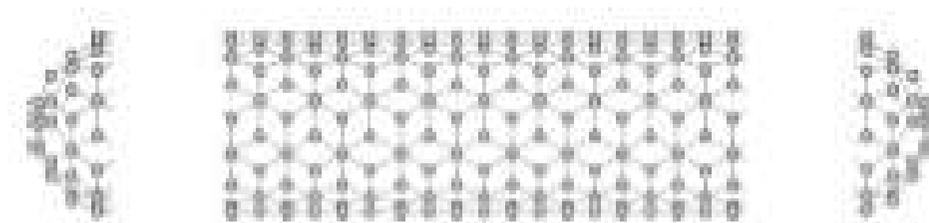
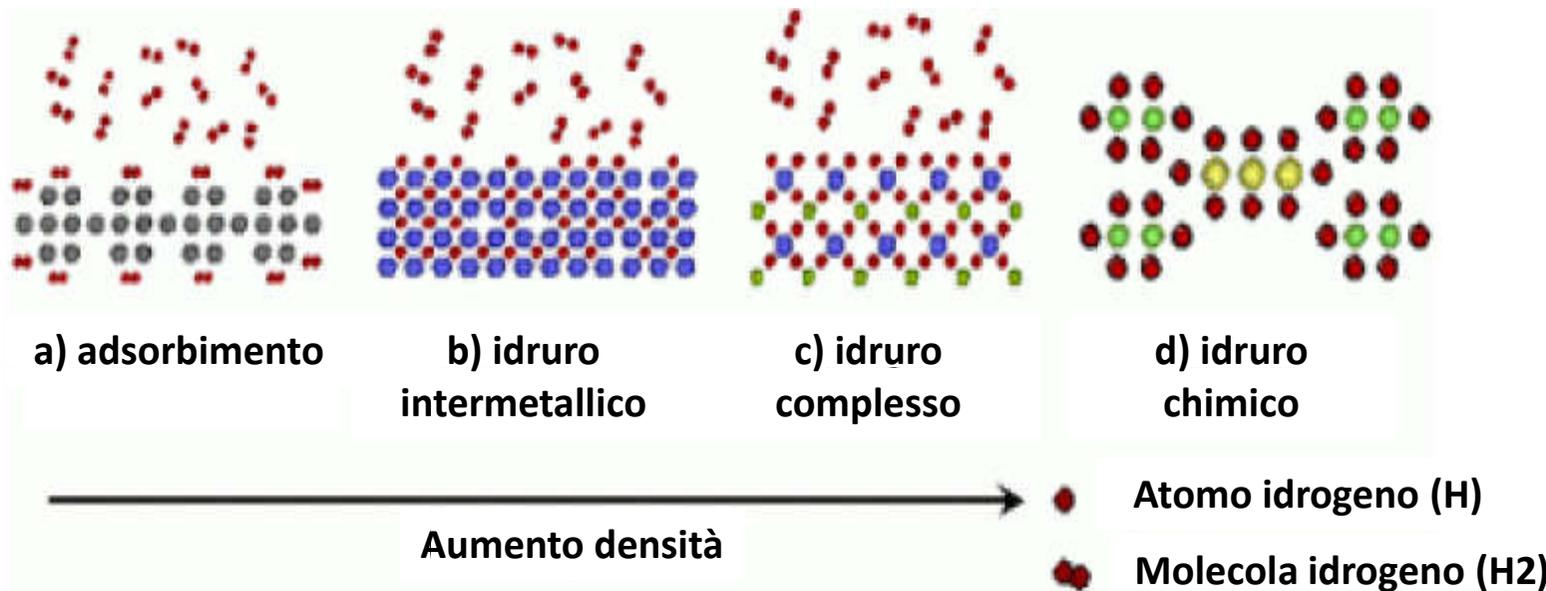
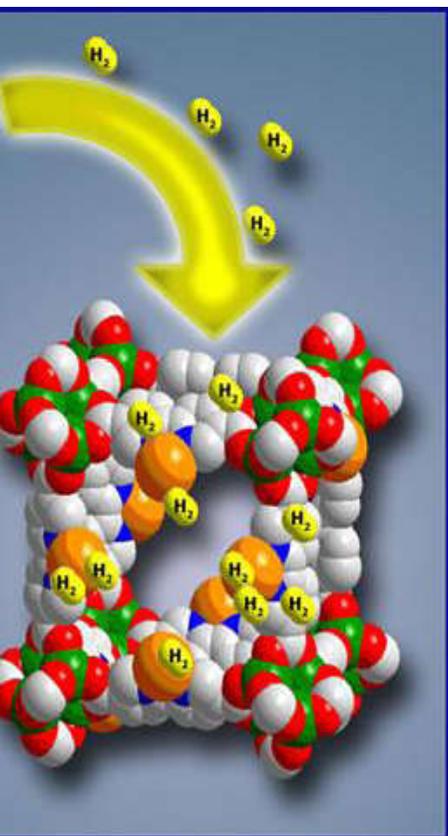
Bassa temperatura
T <20 K (-253°C)



Tecnologie dell'idrogeno

Stoccaggio dell'idrogeno (2/2)

materiali solidi:



Fonte: Tim Mays, H2FC Technical School , 2014

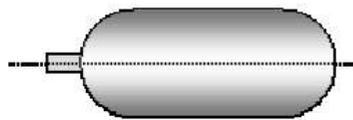
Tecnologie dell'idrogeno

Serbatoi per l'idrogeno gassoso compresso (cGH2)

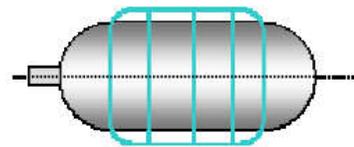
Tipo I

- Serbatoi senza saldatura in acciaio o alluminio.
- Molto pesanti, con pareti spesse.
- Pressione < 25 MPa.
- Utilizzati nei veicoli GNC.
- Opzione di stoccaggio relativamente economica per alcune applicazioni stazionarie

I serbatoi di tipo I che di tipo II non sono adatti per applicazioni automobilistiche a causa dei pesi elevati e delle grandi dimensioni



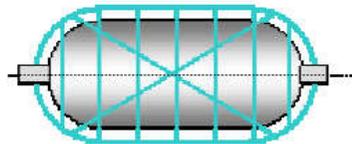
Tipo I



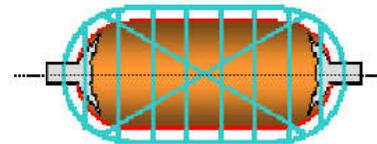
Tipo II

Tipo III

- Rivestimenti in alluminio senza saldatura o saldati.
- Completamente avvolti con composito di resina fibrosa.
- I materiali sono meno soggetti all'infragilimento da idrogeno.



Tipo III



Tipo IV

Tipo II

- Serbatoi metallici senza saldatura avvolti in resina fibrosa.
- Molto pesanti, pressione fino a 45-80 MPa.
- Uso: buffers ad alta pressione nelle stazioni di rifornimento.
- Costo competitivo a causa del basso numero di fibre utilizzate.

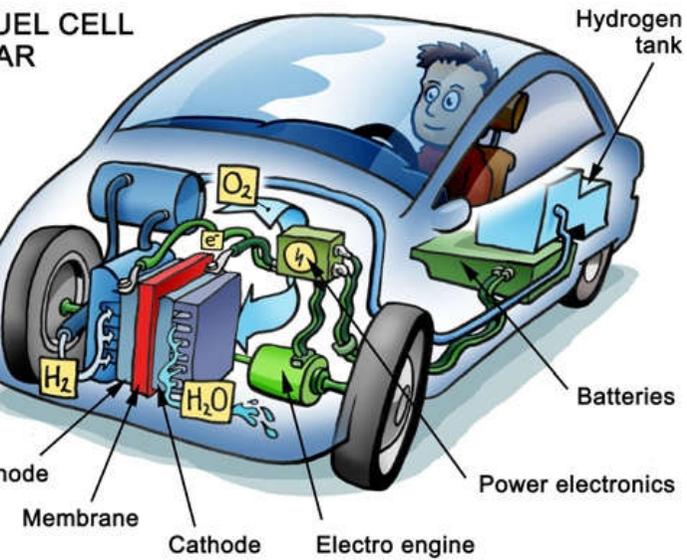
Tipo IV

- Rivestimenti non metallici con uno strato esterno portante composito in fibra/resina.
- Estremità metalliche per l'installazione di valvole di intercettazione e TPRD.
- Resistenza per NWP=70 MPa.
- Contro: soggetti a permeazione.

Pressione di esercizio nominale (Nominal Working Pressure, NWP) è la pressione che caratterizza il funzionamento tipico di un sistema. Per il cGH2 il NWP è la pressione di un serbatoio pieno a 15 °C

Tecnologie dell'idrogeno

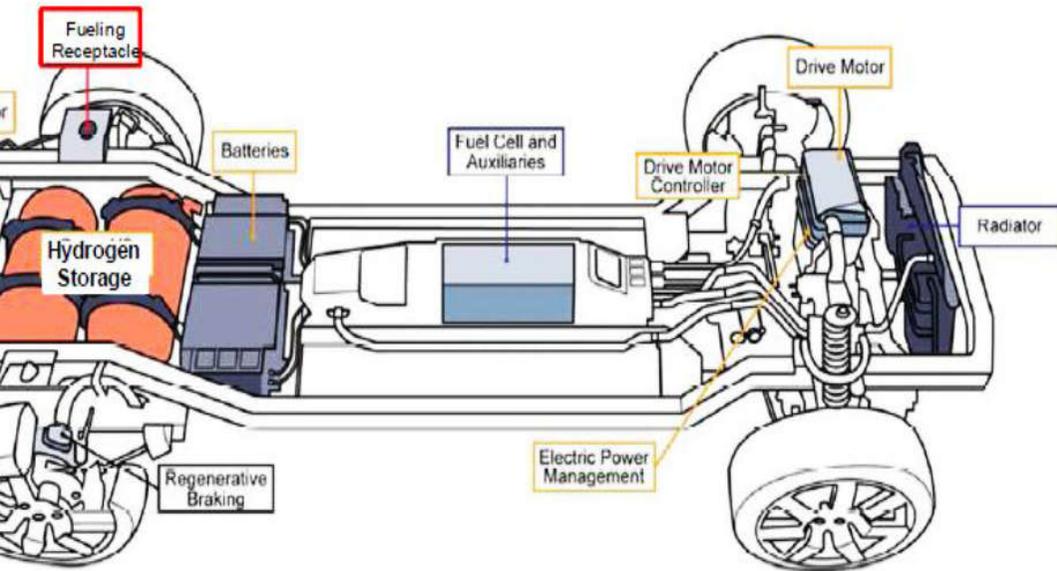
Veicoli con celle a combustibile (FC) a cGH₂



Fonte: 1. Intelligent Energy, 2. Tim Mays, H2FC Technical School, 2014

Tecnologie dell'idrogeno

Veicoli FC



- I serbatoi più adatti per lo stoccaggio di idrogeno a bordo di veicoli sono il **Tipo III** e il **Tipo IV**.
- Pressione NWP tipicamente 35 MPa or 70 MPa.
- Massima pressione di rifornimento: 125% del NWP rispettivamente 43.8 MPa o 87.5 MPa.
- Inventario di idrogeno fino a 6 kg per un'autonomia guida di 400-500 km.



o: Come funziona un'auto FC? (Toyota Mirai)

<https://www.youtube.com/watch?v=LSxPkyZOU7E>

<https://www.youtube.com/watch?v=tqi60XX9vP8>

TR, Proposal for a global technical regulation (gtr) on hydrogen fuelled vehicles, 2013

Tecnologie dell'idrogeno

Bus FC

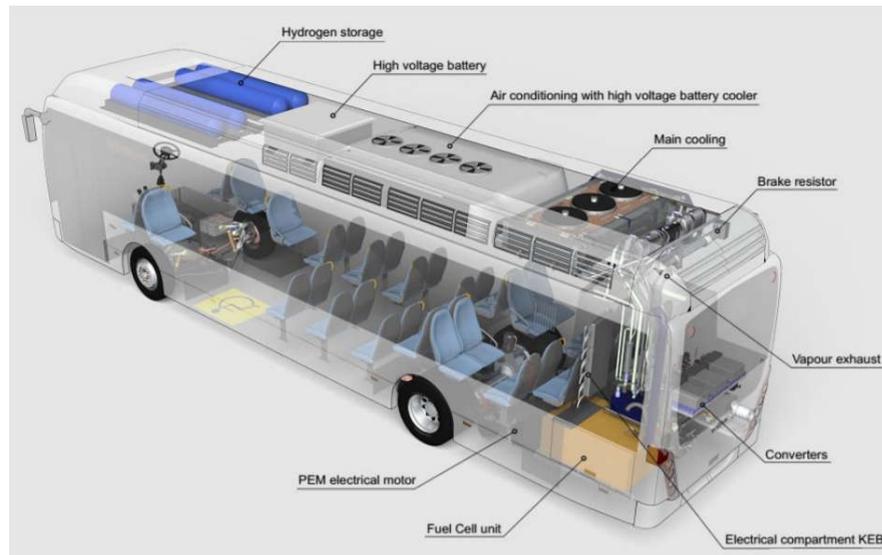
li autobus alimentati a idrogeno presentano diversi serbatoi sul tetto, analogamente agli autobus a metano, gruppo di celle a combustibile si trova solitamente nel vano motore posteriore.

pressione NWP tipicamente **35 MPa**.

bordo di un autobus FC possono essere immagazzinati fino a 50 kg di idrogeno.



[Wright Pulsar 2](#) H2 bus a Londra



Layout dei principali componenti di un bus FC



Fonte: California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org>

Tecnologie dell'idrogeno

Dispositivi di depressurizzazione

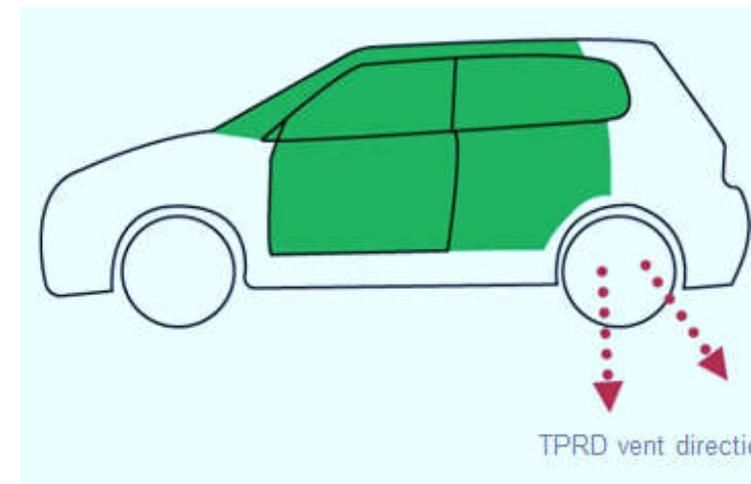
In caso di incendio, il dispositivo di depressurizzazione ad attivazione termica (*Thermally Activated Pressure Relief Device, TPRD*) fornisce un rilascio controllato dell'idrogeno gassoso GH_2 da un serbatoio ad alta pressione prima che le sue pareti siano indebolite dalle alte temperature, portando ad una rottura catastrofica.

Le TPRD **scaricano rapidamente l'intero contenuto del serbatoio**. Non si richiudono e non consentono la pressurizzazione del serbatoio. Serbatoi e TPRD oggetto di incendio devono essere rimossi e distrutti.

TPRD sono progettati secondo codici e standard. Regolamento UE n. 406/2010 della Commissione europea. Serbatoi H_2 a bordo devono essere dotati di TPRD. Non deve essere possibile isolare il PRD dal serbatoio.

Disposizioni GTR – il rilascio di H_2 dal PRD non deve essere diretto:

- verso terminali e interruttori elettrici esposti, fonti di innesco;
- dentro o verso il vano passeggeri o bagagli del veicolo;
- dentro o verso qualsiasi passaruota del veicolo;
- in avanti, orizzontalmente dal retro o dai lati del veicolo.



Tecnologie dell'idrogeno

Applicazioni FC stazionarie



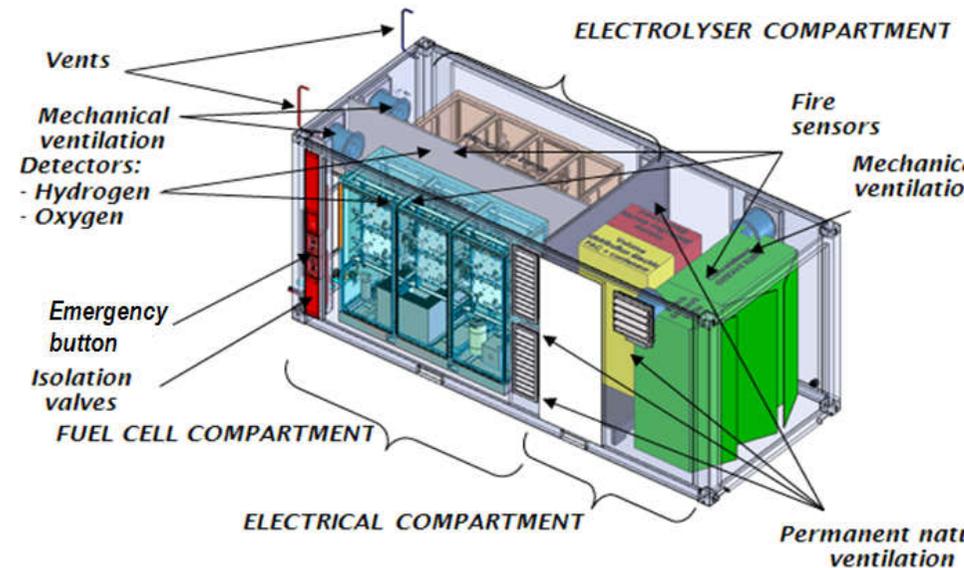
Alimentazione di back-up FC nel data center IP Energy



Alimentazione di back-up (telecoms market)



FC per sistema di cogenerazione di calore ed energia (CHP)



Tecnologie dell'idrogeno

Serbatoi di idrogeno liquido

La capacità volumetrica per LH₂ è **0.070 kg/L** contrariamente ai **0.030 kg/L** per i serbatoi GH₂ a 70 MPa.

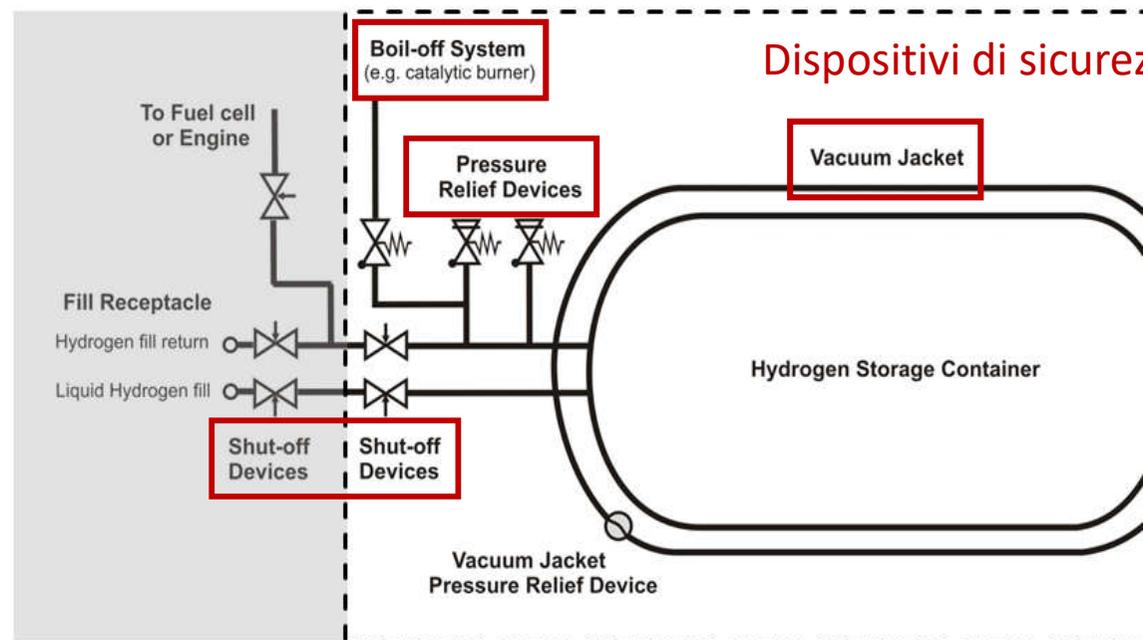
Lo stoccaggio di LH₂ avviene a basse temperature (criogeniche) e pressioni intorno a 0.6 MPa.

I costi dei materiali adatti all'LH₂ sono significativamente più alti che per il GH₂.

Circa il 30% dell'energia dell'idrogeno è richiesta dalla liquefazione.

Il serbatoio LH₂ è un Dewar in leghe di acciaio, doppia-parete, isolata con vacuum.

Fenomeno di **boil-off**: evaporazione di LH₂ dovuto allo scambio di calore con l'esterno.



Tecnologie dell'idrogeno

Perché usare l'idrogeno liquido?

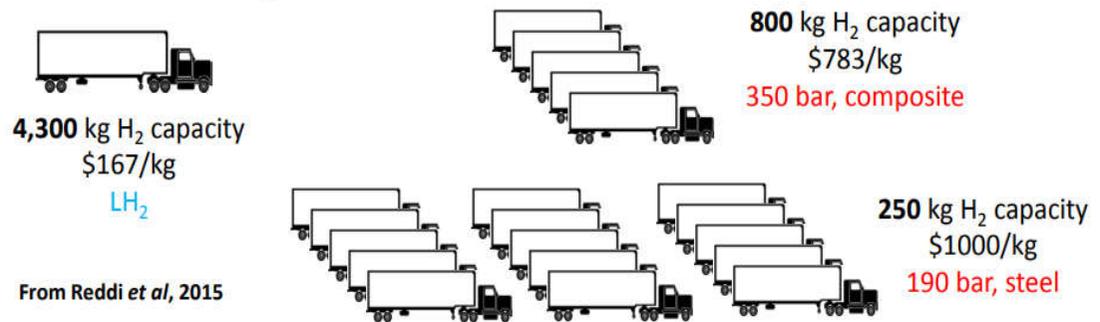
- Migliorare la logistica e aumentare il volume di trasporto
- Footprint minore (x2) per stazioni di rifornimento e trasporto



• Serbatoio LH₂ con volume 3800 m³ in Florida:
 • Double-wall vacuum con isolamento in perlite più
 • Grande al mondo: 3218 m³ of LH₂, diametro esterno
 • 34 m. Pressione operativa 0.62 MPa.



Installation at DLR, Cologne, Germany



From Reddi et al, 2015

Tecnologie dell'idrogeno

Idrogeno liquido per la mobilità - applicazioni

Massive on-board storage
Liquid on-board storage

FCEV

500 to 2000 kg.d⁻¹



Heavy duty

500 to 3000 kg.d⁻¹



Maritime

500 to 3000 kg.d⁻¹



Train

500 to 3000 kg.d⁻¹



Aeronautic

500 to 10000 kg.d⁻¹



Tecnologie dell'idrogeno

Trasporto dell'idrogeno su strada – HGVs

Trailer con idrogeno gassoso



- Sui trailer, ossia i rimorchi, vengono installate bombole cilindriche singolarmente o in gruppi, o lunghi tubi cilindrici.
- Pressione di stoccaggio nel range 20 - 30 MPa.
- Inventario di H₂ da 180 a 540 kg.

Due tipologie di trailer CGH₂ adoperati da AirLiquide in Europa: (a) trailer tubolari, trasporto da 2,000 a 3,000 Nm³ di cGH₂ e (b) trailer cilindri compositi, trasporto di 6,200 Nm³ di cGH₂.

Trailer LH₂ possono trasportare fino a 5000 kg a pressioni fino a 1.2 MPa.

Boil-off di H₂ si può verificare durante il trasporto (circa 0.5%/d) e la consegna (fino al 5%).

Serbatoi LH₂ sui trailers hanno super isolamenti a vacuo.

Trailer con idrogeno liquido



Trailer su strada di Air Liquide per il trasporto di LH₂ all'utente.

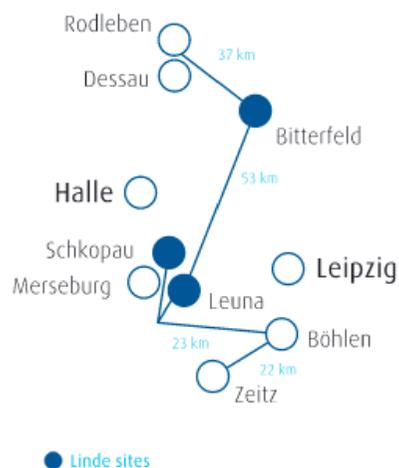
Tecnologie dell'idrogeno

Trasporto dell'idrogeno tramite condotti – Pipelines

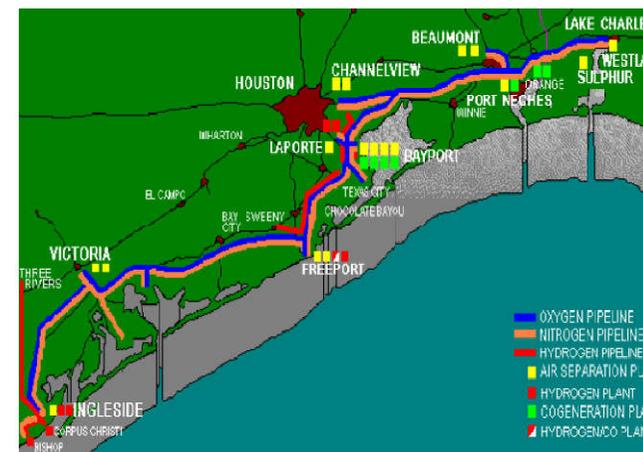
Gasdotti di idrogeno



Gasdotto H₂ di Air Liquide in Benelux, Francia e Germania, 240 km



Gasdotto H₂ di Linde in Germania, 100 km



Gasdotto H₂ di Air Liquide nella costa del Golfo (USA)

rete di gasdotti H₂ è estimate intorno ai 1,600 km in Europa e 1,100 km in Nord America

ggiori compagnie: Air Liquide, Air Products e Linde

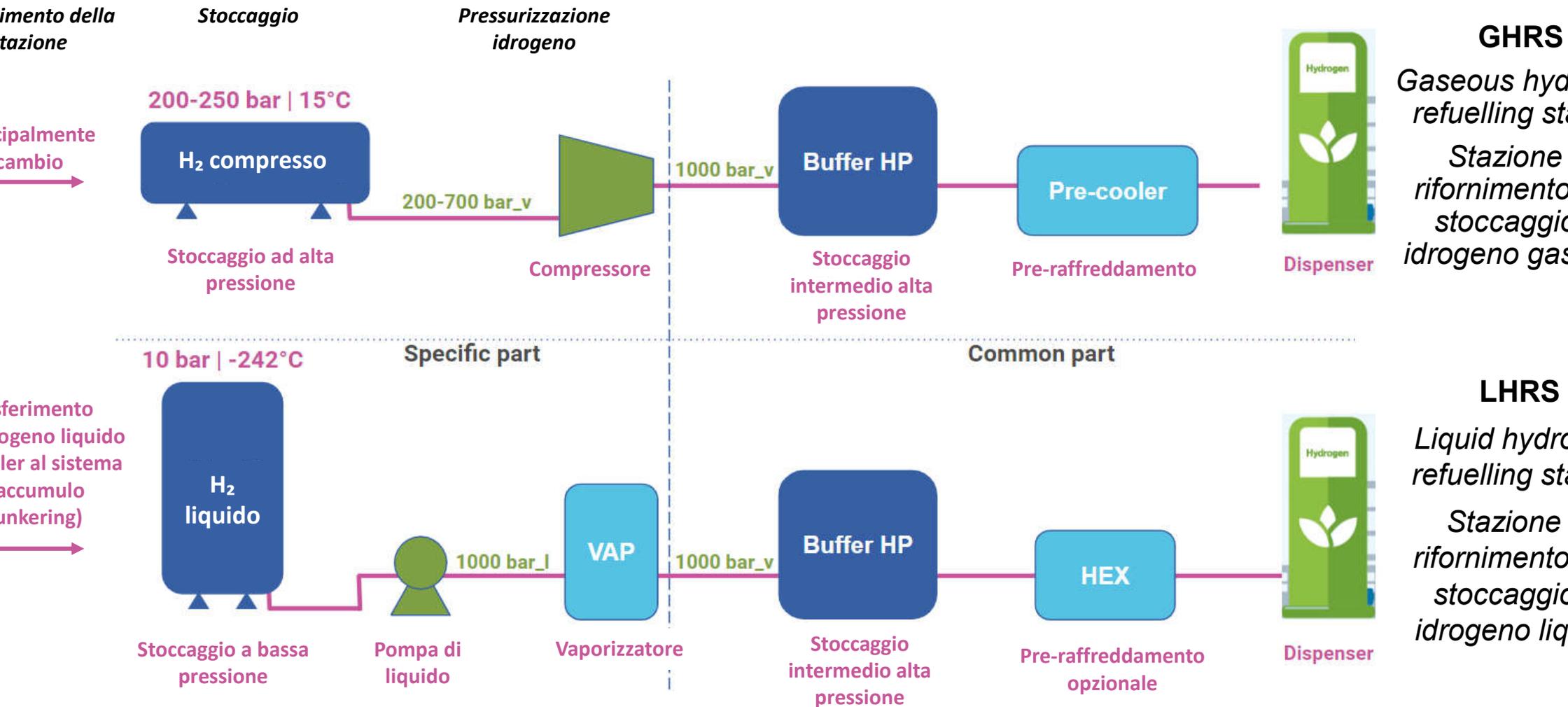
essioni operative: range 4-7 MPa

metro dei condotti: 10-300 mm

condotti sono in acciaio, studi in corso per l'uso di materiali polimerici e polimeri rinforzati con fibre

Tecnologie dell'idrogeno

Stazioni di rifornimento: GHRS vs LHRS



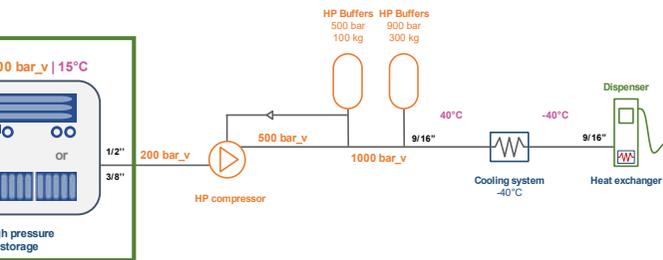
amento della stazione

principalmente cambio

ferimento idrogeno liquido per al sistema accumulo (banking)

Tecnologie dell'idrogeno

GHRH – stoccaggio di idrogeno gassoso (1/2)



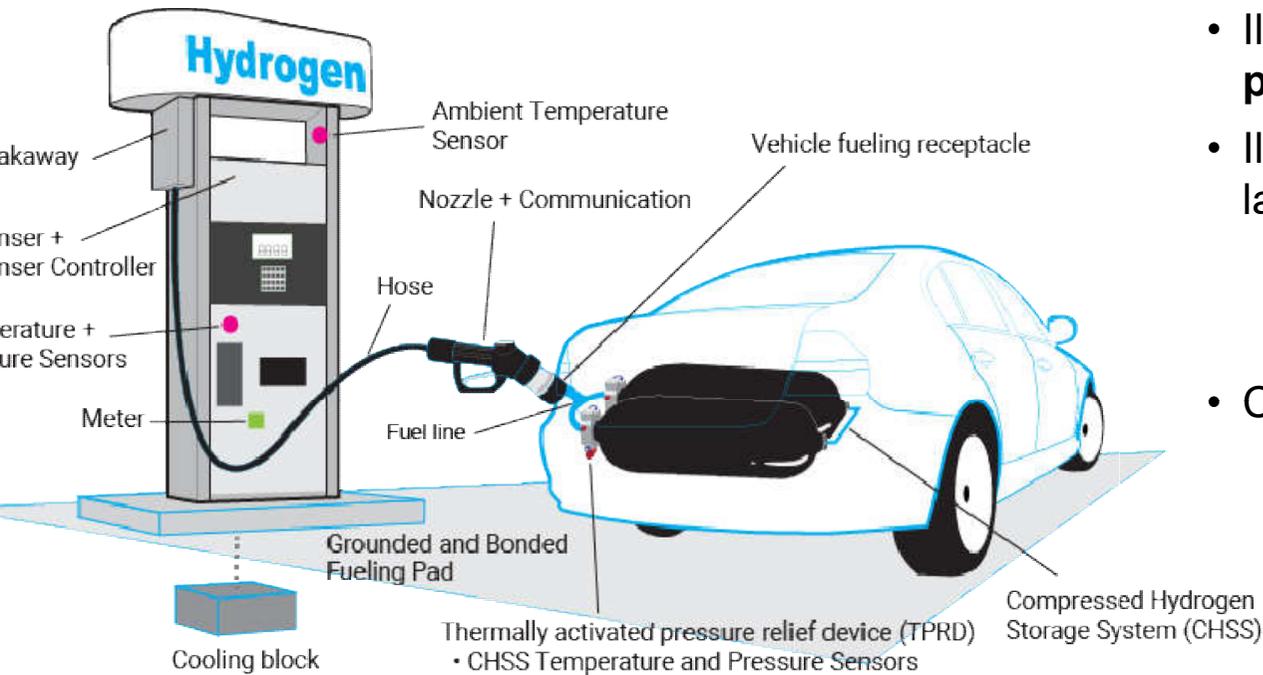
**200 bar H₂ tube trailer
300-500 kg H₂**



**500 bar H₂ tipo IV trailer
fino a 1000 kg H₂**

Tecnologie dell'idrogeno

GHRH – Dispenser di idrogeno (2/2)



Schema del sistema dispenser

tempi di dispositivi di sicurezza: sensori H₂ nel dispenser; ventilazione naturale o meccanica del dispenser; rilevamento di fiamme vicino al dispenser; pulsanti shut-off d'emergenza; telecamere

- Il sistema di processo HRS è fisicamente separato dal piazzale dell'erogatore
- Il dispenser permette una connessione facile e veloce tra la stazione ed il veicolo per il rifornimento:
 - 350 bar per veicoli FCEV ibridi, bus e autocarri
 - 700 bar per veicoli FCEV
- Caratteristiche:
 - Il **rifornimento è automatico** e richiede la minima manipolazione dall'utente
 - Il connettore al veicolo deve seguire il SAE J2601
 - Una connessione **breakaway** assicura l'interruzione meccanica del rifornimento nel caso di allontanamento del veicolo senza rimuovere la p
 - **Ugello infrarossi** (SAE J2799) nella linea 700 bar per monitorare il processo. Massime portate:
 - 60 g.s-1 o 120 g.s-1 per il rifornimento di a

Proprietà rilevanti per la sicurezza



Proprietà rilevanti per la sicurezza

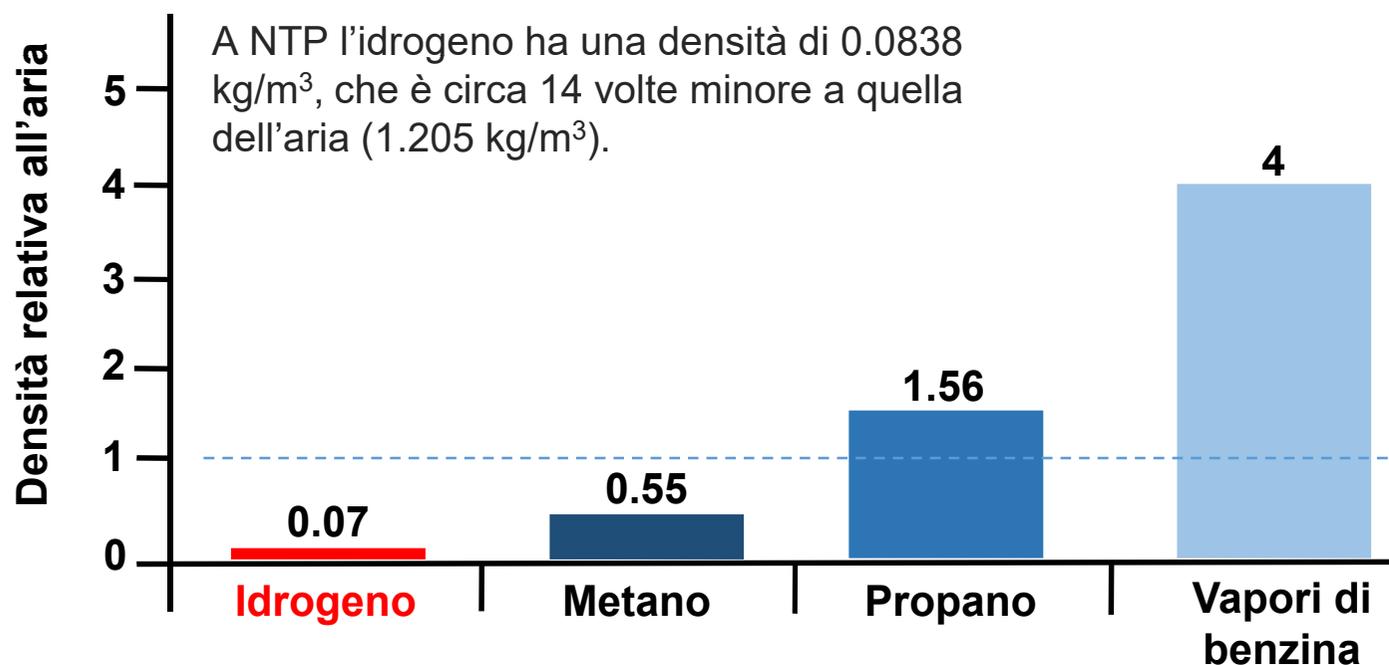
Il galleggiamento come vantaggio per la sicurezza

La bassa densità del gas fa sì che sia il **più galleggiabile** in confronto ad altre sostanze.

Questo è il suo **maggiore vantaggio per la sicurezza** in caso di rilascio in ambienti aperti o parzialmente confinati senza accumulo di idrogeno. L'idrogeno **tende ad andare verso l'alto e a disperdersi rapidamente** nell'aria fino a concentrazioni sicure, cioè **al di sotto del limite inferiore di infiammabilità** (LFL, 4% in aria).

In molte applicazioni pratiche, gli idrocarburi essendo più pesanti possono porre rischi di incendi ed esplosioni maggiori dell'idrogeno!

Gli idrocarburi possono formare nubi combustibili molto estese come nei casi delle esplosioni disastrose di [Flixborough in 1974](#) e [Buncefield in 2005](#) (UK).

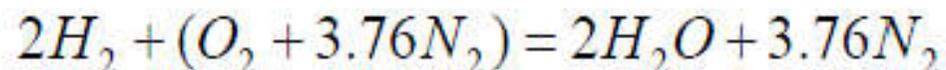


Proprietà rilevanti per la sicurezza

Combustione dell'idrogeno

L'idrogeno è un gas infiammabile.

La reazione $H_2 - O_2$ per formare acqua a temperatura ambiente è molto lenta. Se la reazione è accelerata da un catalizzatore o da una scintilla, procede ad un ritmo elevato e con una violenza "esplosiva":

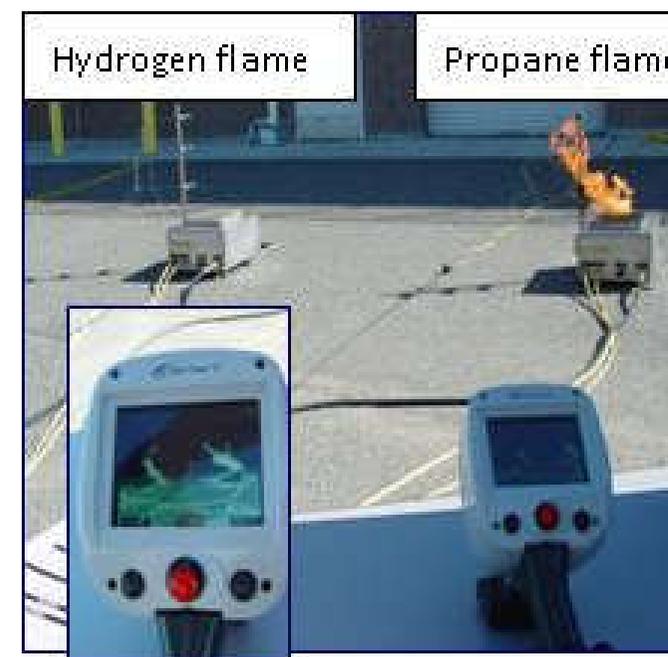


Potere calorifico	Idrogeno	Metano	Propano	Benzina
Inferiore (STP), kJ/g	141.86	55.53	50.36	47.5
Superiore (STP), kJ/g	119.93	50.02	45.6	44.5

La miscela stechiometrica: consumo completo di combustibile e ossidante (combustione completa) per formare i prodotti di combustione
 - miscela H_2 -aria: **29.59 vol. % di H_2** ; miscela H_2 - O_2 : **66.66 vol. % di H_2** .

L'indice limite di ossigeno $LOI_{H_2} = 5$ (NASA, 1997).

L'idrogeno puro brucia con fiamme di un azzurro molto pallido ed è invisibile durante il giorno.



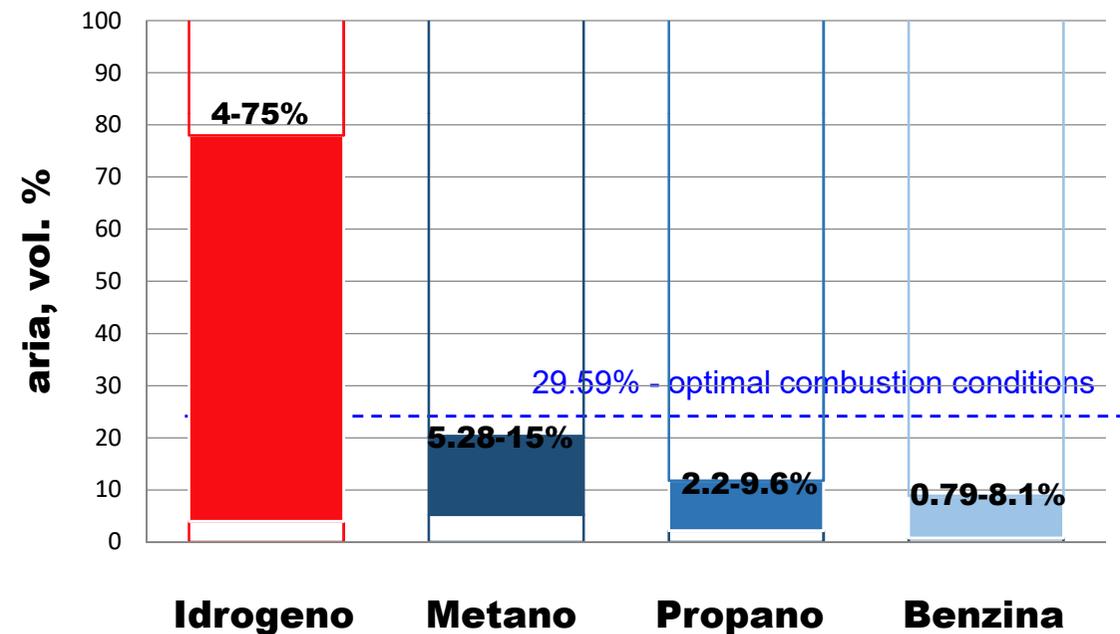
Fonte:
H2BestPractic

IS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence "Safety of hydrogen as an energy carrier" (NoE HySafe). Available from: www.hysafe.org
 College of the Desert (2001). Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Module 1: Hydrogen Properties. Energy Technology Training Center, College of the Desert. [Link](#).

Proprietà rilevanti per la sicurezza

LFL e UFL in aria: idrogeno vs. altri combustibili

L'intervallo di infiammabilità è l'intervallo di concentrazioni tra i limiti di infiammabilità inferiore (LFL) e superiore (UFL). L'LFL è la concentrazione più bassa e l'UFL è la concentrazione più alta di una sostanza combustibile in un ossidante gassoso che propagherà una fiamma in presenza di un innesco.



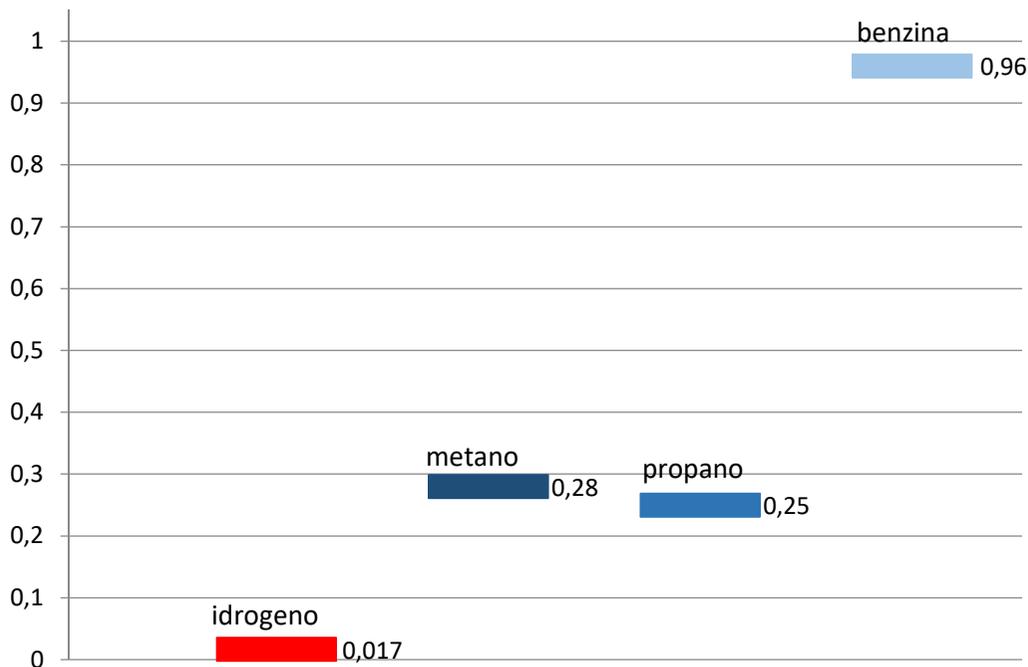
- L'intervallo di infiammabilità dell'idrogeno è significativamente più ampio rispetto ad altri idrocarburi: da **4** a **75 vol. %** a NTP.
- **L'intervallo di infiammabilità si espande** linearmente all'aumentare della temperatura.
- I limiti di infiammabilità dell'idrogeno dipendono dalla direzione di propagazione della fiamma.

Fonte: Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II.
 Ward, HF and Jones, GW (1952). Limits of flammability of gases and vapors, Bulletin 503, Bureau of
 Standards, p. 155.

Proprietà rilevanti per la sicurezza

Energia minima di accensione

Energia minima di accensione (Minimum Ignition Energy - MIE) dei gas e vapori infiammabili è il valore minimo di energia elettrica che innesca la miscela alla composizione più infiammabile. Una debole scintilla causata da una carica di elettricità statica da un corpo umano può essere sufficiente per innescare uno qualsiasi dei combustibili di seguito.



- Il MIE della miscela idrogeno-aria varia con la sua composizione, temperatura e pressione.
- Nell'intervallo d'infiammabilità H₂-aria l'energia di accensione varia di quasi tre ordini di grandezza.
- Le sorgenti di accensione in grado di formare shock, es. scariche elettriche ad alta energia ed esplosivi, possono avviare direttamente la detonazione.

Fonte: Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II.

Proprietà rilevanti per la sicurezza

Confronto dell'idrogeno con altri combustibili

	Idrogeno	Gas naturale	Propano	Benzina
Range di infiammabilità in aria (LFL – UFL), vol. %	4.1 - 75	5.3 - 15	2.2-9.6	0.8 - 8.1
Range di detonabilità in aria (LDL – UDL), vol. %	11 - 59	5.7 - 14	2.2-9.5	1.4 - 3.3
Temperatura di auto-ignizione (°C) temperatura minima richiesta per avviare la reazione di combustione della miscela in assenza di una sorgente d'innesco esterna	510	537	470	230
Temperatura di flashpoint (°C) temperatura più bassa alla quale il combustibile produce abbastanza vapori sulla sua superficie per formare una miscela infiammabile con l'aria	-253	-188	-96	-(11-45)
Temperatura di fiamma (°C)	2,130	1,961	1,980	1,977

Proprietà rilevanti per la sicurezza

Emissività ed estinzione delle fiamme di idrogeno

La massima temperatura di fiamma dell'idrogeno è ~ 2130 °C, ma irradia molto poco calore. I vicini del fuoco potrebbe non sentire la presenza della fiamma fin quando non si ha il contatto diretto.

La benzina produce carbonio durante la combustione, quindi il calore irradiato può essere percepito ad elevate distanze.

Per via della CO₂ rilasciata, l'etanolo irraggia due volte il calore prodotto dallo stesso volume di benzina.

La radiazione termica emessa dalla fiamme di idrogeno è molto bassa: emissività <0.1 (ADL, 1960); emissività <0.3 (Sandia National Laboratory).

Le fiamme di idrogeno reali possono essere visibili a seguito dell'ingresso di particolati.

Le fiamme d'idrogeno sono **difficili da estinguere**. La combustione premiscelata H₂-aria può essere aggravata da forti getti d'acqua a causa della turbolenza indotta e della capacità della miscela di bruciare intorno alle goccioline di acqua.

Hydrogen properties relevant to safety

Idrogeno vs combustibili convenzionali

	Idrogeno	Gas Naturale	Benzina
Colore	No	No	Si
Tossicità	Nessuna	In parte	Alta
Odore	Inodore	Mercaptani*	Si
Galleggiabilità rispetto all'aria	14 volte più leggero	2 volte più leggero	3,75 volte più pesante
Energia per unità di massa	2,8 volte più della benzina	1,2 volte più della benzina	43 MJ/kg
Energia per unità di volume	4 volte meno della benzina	1,5 volte meno della benzina	120 MJ/gallone

Fonte: California Fuel Cell Partnership

* - non sempre

Compatibilità dell'idrogeno con i materiali

Interazione dell'idrogeno con i materiali

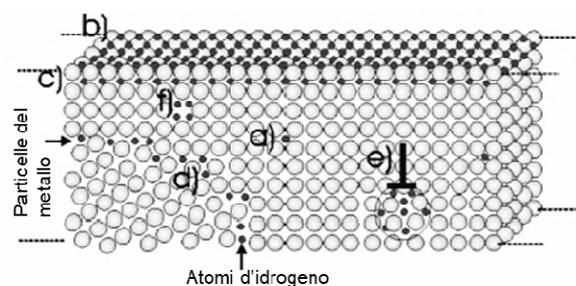
L'idrogeno ha atomi di dimensione molto piccola ed una bassa viscosità. L'idrogeno può quindi essere assorbito facilmente da differenti materiali e può portare alla degradazione delle proprietà meccaniche del materiale, che può risultare in **fughe d'idrogeno** e **cedimenti strutturali**. **La corretta selezione dei materiali per i serbatoi di stoccaggio e i componenti del sistema è un'essenziale misura di sicurezza.**

Materiali metallici

- Corrosione
- Infragilimento da idrogeno (HE)
- Infragilimento a basse temperature ('a freddo')
- Reazioni violenti (es. ignizione)

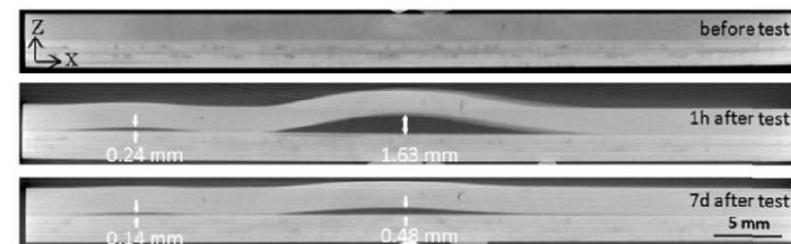


: Google free images



Materiali polimerici

- Rigonfiamento (swelling)
- Formazione di bolle (blistering)
- Resistenza al fuoco dei serbatoi di tipo III di circa 6 - 12 min (in genere).
- Permeazione dell'idrogeno



Fonte: J. Pepin et al., Intern. J. Hydrogen Energy (2018)

Proprietà rilevanti per la sicurezza

Rischi per la salute: GH_2

Idrogeno è un **gas inodore, incolore e insapore**. Non è rilevabile dai sensi umani. L'uso di odoranti (ad esempio mercaptani) nei serbatoi di stoccaggio non è possibile in quanto possono avvelenare le celle a combustibile.

Idrogeno non è una sostanza cancerogena.

Non ci sono prove di effetti avversi sulla pelle o sugli occhi esposti ad atmosfere di idrogeno. Tuttavia, i getti di idrogeno ad alta pressione **possono tagliare la pelle** (Hammer, 1989).

Idrogeno non può essere ingerito. Tuttavia, l'idrogeno inalato può provocare la formazione di una miscela infiammabile all'interno dei polmoni dell'essere umano.

Idrogeno è classificato come un **semplice asfissiante**; non ha un valore limite di soglia (TLV) (NASA, 1997). Si raccomanda di controllare la concentrazione di ossigeno prima di entrare nell'area dell'incidente. I vigili del fuoco dovrebbero indossare dispositivi di auto-respirazione. La concentrazione di idrogeno può essere misurata con appositi dispositivi (Molkov, 2012).

Hammer, W (1989). Occupational Safety Management and Engineering, 4th edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1989, ISBN 0-13-629379-4, chapter 19.

(1997). Safety standard for hydrogen and hydrogen systems. Guidelines for hydrogen system design, materials selection, operations, storage, and transportation. Technical report NSS

Proprietà rilevanti per la sicurezza

Rischi per la salute: LH₂

La temperatura di ebollizione normale (NBP) è **20.3 K**. Il volume aumenta notevolmente quando l'idrogeno viene riscaldato da NBP a NTP (rapporto volumetrico LH₂ a GH₂ =1:848) tanto da poter causare un aumento di pressione di 177 MPa in un contenitore con volume fissato (ISO/TR 15916:2004).

Alta densità del vapore saturo a basse temperature può far sì che la nube di idrogeno a seguito di un rilascio di LH₂ **fluisca orizzontalmente o verso il basso**. La condensazione dell'umidità rende la nube visibile e più densa. Il rilascio di LH₂ può portare ad atmosfere arricchite in ossigeno. Nel caso di reazione con ossigeno solido può anche avere una detonazione.

Il contatto con l'idrogeno liquido o i suoi schizzi sulla pelle o negli occhi può causare **gravi ustioni da freeze** **provocate a congelamento o ipotermia**. Le ustioni criogeniche possono anche derivare dal contatto di parti protette del corpo umano con fluidi o superfici fredde. Indossare **indumenti protettivi**.

l'inalazione di vapori di idrogeno criogenico può causare **disturbi respiratori** e può provocare **asfissia**.

Problemi cardiaci sono possibili quando la temperatura corporea interna scende a **27°C** o meno, e il **decedere** può avvenire quando la temperatura corporea interna scende al di sotto di **15°C** (NASA, 1997).

Proprietà rilevanti per la sicurezza Rilasci di LH₂

[Video di un rilascio di LH₂](#)

[Effetto del vento su un rilascio di LH₂](#)



NASA
National Aeronautics and
Space Administration
LANGLEY
RESEARCH CENTER



NASA
National Aeronautics and
Space Administration
LANGLEY
RESEARCH CENTER

<https://www.youtube.com/watch?v=nZ7Aga7tt2A&list=PLhoM9ggM3Rf-Npmdq0S3WrCSpx0U4SL&index=10>

https://www.youtube.com/watch?v=pD_OrWVJaW4&list=PLIphoM9ggM3Rf-Npmdq0S3WrCSpx0U4SL&index=10

Identificare un'applicazione H₂

Etichettatura dei serbatoi di idrogeno

regolamento UE n. 406/2010 consiglia di utilizzare rombi verdi in cornici bianche con le parole "GAS" o "LIQUID H₂" scritte in lettere bianche.



cGH ₂	23	LH ₂	223
	1049		1966

UN 1049 HYDROGEN, COMPRESSED



EC N° : 215-605-7

: US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders.

Identificare un'applicazione H₂

Identificazione dei pericoli: attività al CTIF

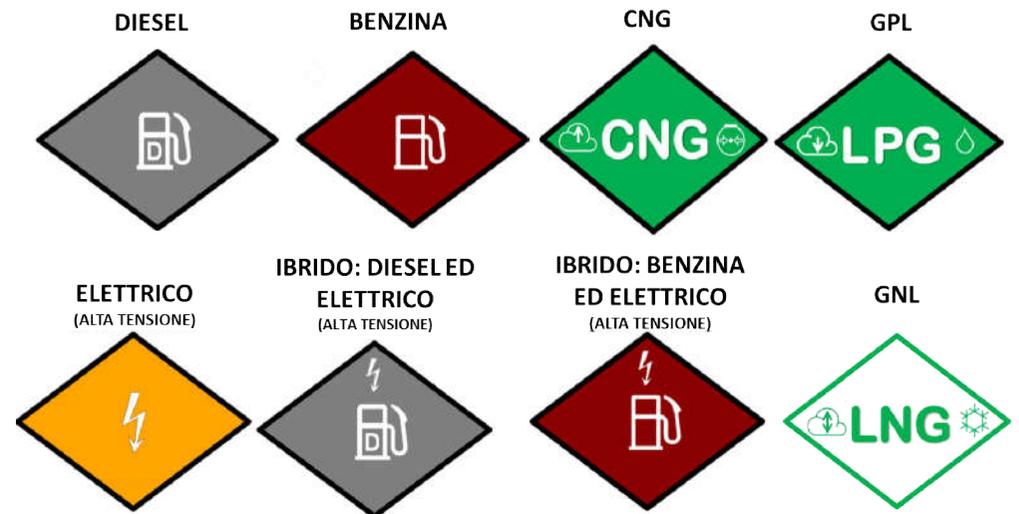
SIMBOLI

- 1) PRIMA FONTE DI ENERGIA: CNG LNG LPG
- 2) SECONDA FONTE DI ENERGIA:
- 3) DENSITÀ RELATIVA ALL'ARIA:
- 4) STATO DI AGGREGAZIONE:

Colori utilizzati:

GRIGIO	DIESEL
ROSSO	BENZINA
VERDE	GAS
BLU	IDROGENO
ARANCIONE	ALTA TENSIONE

FC: IDROGENO ED ELETTRICO (ALTA TENSIONE)



Fonte: Esbroeck, T and Vollmacher, K (2015). ISO propulsion energy identification. Commission for Extrication and New Technologies. Unpublished.

L'idrogeno non è più o meno pericoloso di qualsiasi altro combustibile convenzionale.

L'idrogeno ha un insieme unico di caratteristiche che differiscono da altri combustibili non

La sicurezza dell'idrogeno dipende da come viene gestito professionalmente nella fase di design e successive.

Le applicazioni dell'idrogeno si stanno ampliando verso ambiti pubblici e non più solo industriali. Ciò implica una nuova cultura della sicurezza, strategie di sicurezza innovative e soluzioni ingegneristiche rivoluzionarie.

Lo scopo è di ottenere un livello di sicurezza all'interfaccia del consumatore con l'idrogeno che debba essere simile o superiore a quello presente con l'utilizzo di combustibili fossili.

Responder

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 programma di ricerca ed innovazione della Francia, Austria, Belgio, Spagna, Germania, Italia, Repubblica Ceca, Svizzera, Norvegia. The project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 875089. It also receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the research and innovation programmes of France, Austria, Belgium, Spain, Germany, Italy, Czechia, Switzerland, Norway.



FUEL CELLS AND HYDROGEN
JOINT UNDERTAKING



European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders

Applicazioni e sicurezza dell'idrogeno

Modulo 1: Introduzione alle tecnologie dell'idrogeno e proprietà rilevanti per la sicurezza
Modulo 2: Scenari di incidente e conseguenze: dispersione, jet fires ed esplosioni

Il materiale presentato è basato sulle lezioni di proprietà del Consorzio HyResponder



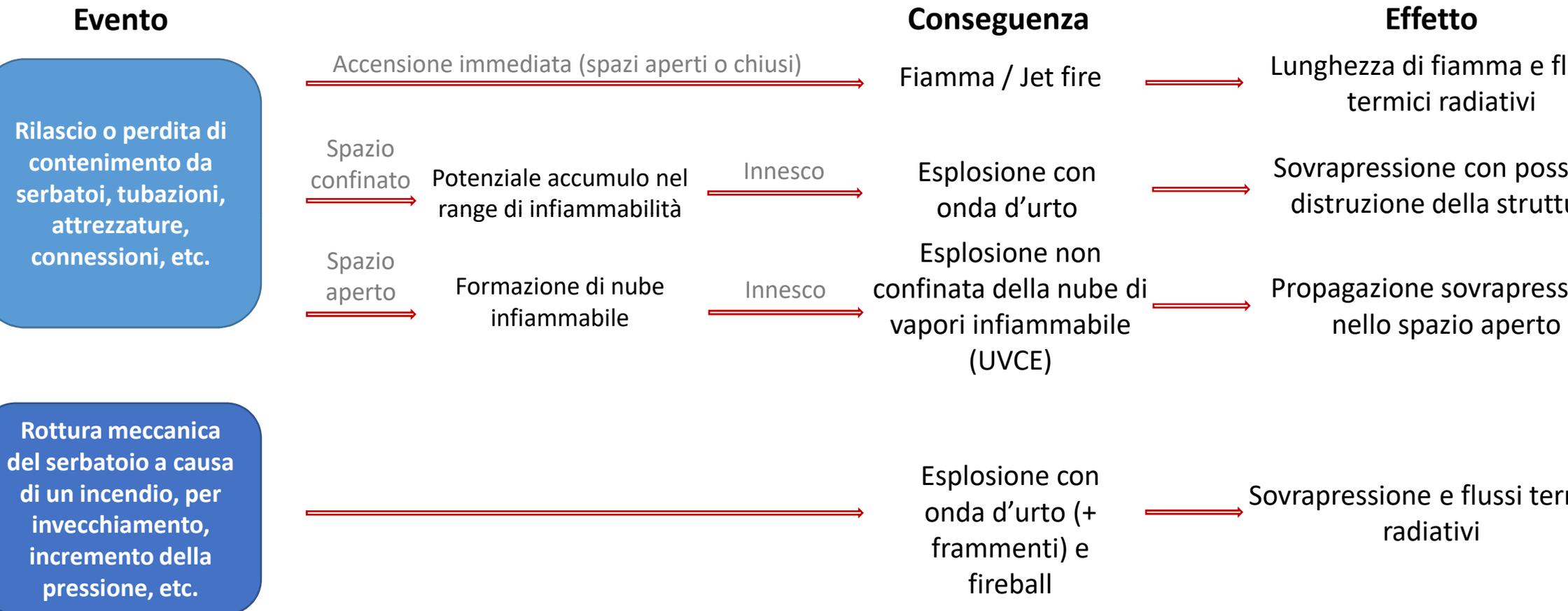
Parte 2

Scenari di incidente e conseguenze: dispersione, jet fires ed esplosioni



Scenari di incidente e conseguenze

Eventi temuti con gas idrogeno compresso



Scenari di incidente e conseguenze

Eventi temuti con idrogeno liquido

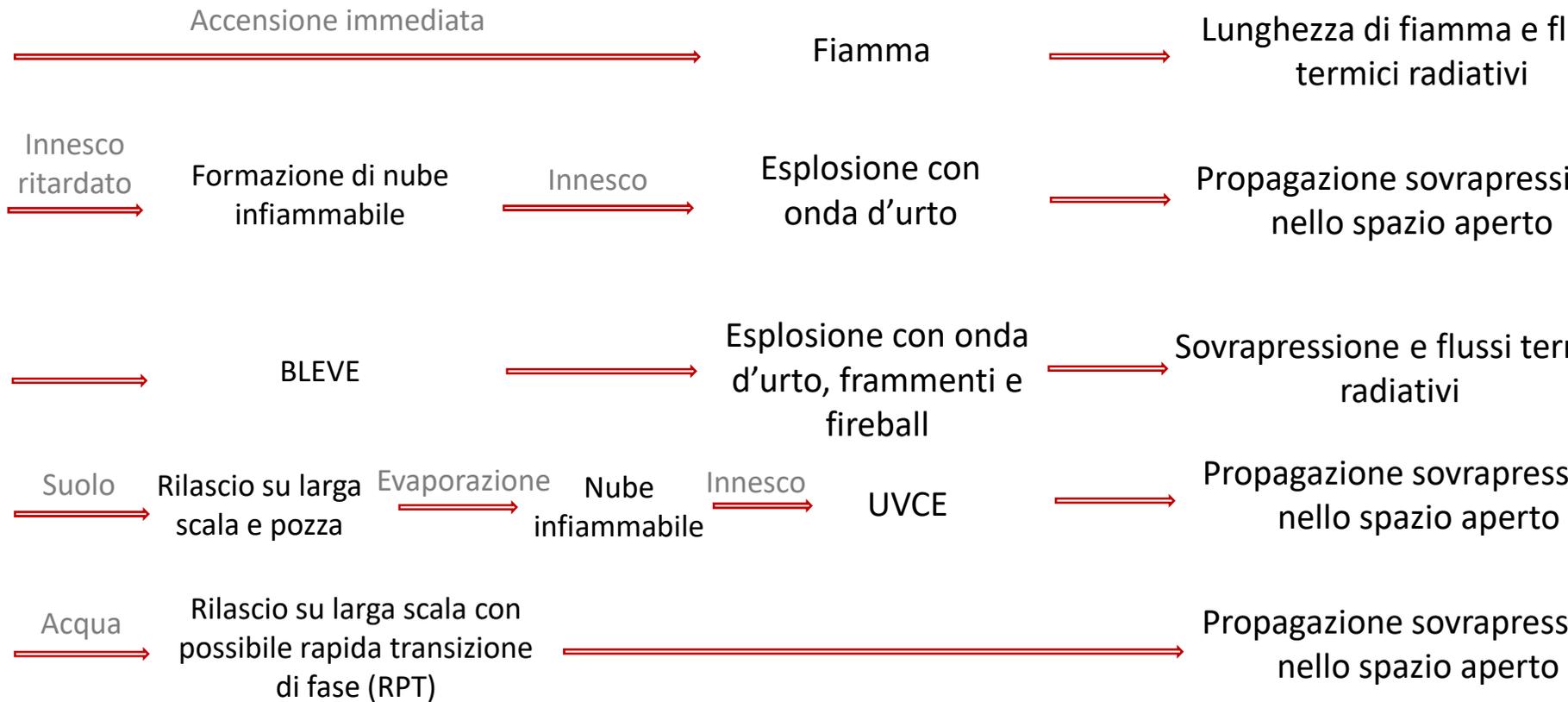
Evento

Conseguenza

Effetto

Rilascio criogenico ad alta pressione a seguito di perdita di contenimento da serbatoi, tubazioni, attrezzature, connessioni, etc.

Rottura meccanica del serbatoio a causa di incendio, per invecchiamento, aumento della pressione, etc.



Scenari di incidente e conseguenze

Cos'è la distanza di sicurezza?

Come per definizione in ISO TC197, la **distanza di sicurezza** (*hazard distance*) è la distanza tra la sorgente di un pericolo e il valore di un determinato effetto fisico (normalmente termico o pressione), calcolato tramite modelli o normative, che potrebbe portare ad una condizione di danno (variabile da “nessun danno” a “danno massimo”) per persone, apparecchiature e ambiente.

seguenti fattori influiscono sulla distanza di sicurezza:

- Natura del pericolo
- Condizioni operative e design del sistema
- Tipo di target/oggetto (uomo, strutture, apparecchiature)
- Ambiente tra il target e la sorgente del pericolo

In tal maniera, il **danno potenziale** per le persone o strutture può essere stimato e confrontato con i **criteri di danno** proposti.



Scenari di incidente e conseguenze

Introduzione ad e-Laboratory (1/2)

URL: <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>
Username: HyResponderTrainer
Password: safetyfirst

The screenshot shows the e-Laboratory website. At the top, there is a dark header with the 'e-laboratory' logo on the left and a 'Login' button on the right. Below the header, the main content area is divided into two columns. The left column is a sidebar with a 'BY CATEGORY' section, listing various tool categories such as 'Select All', 'Hazard distances', 'Shutdown', 'Investigation techniques', and 'Hydrogen properties'. The right column contains the main content, starting with a 'Welcome to e-Laboratory' heading, followed by a paragraph explaining that tools are sorted by categories. Below this is a 'Disclaimer' section with two paragraphs of text regarding the general nature of the information and the university's liability.

Scenari di incidente e conseguenze

Introduzione ad e-Laboratory (2/2)

SORT BY CATEGORY

- Select All
- hazard distances
- blowdown
- mitigation techniques
- hydrogen properties

Jet parameters model

Similarity law for concentration decay in hydrogen expanded and under-expanded jets and unignited jet hazard distances

Effect of buoyancy on decrease of hazard distance for unignited releases

Flame length correlation and three hazard distances for jet fires

Calculation of fireball diameter for rupture in a fire of a stand-alone and an under-vehicle hydrogen storage tanks

Blast wave from high-pressure tank rupture without and with combustion

Adiabatic and isothermal model of blowdown of storage tank dynamics

Pressure peaking phenomenon for unignited releases

Pressure peaking phenomenon for ignited releases

Mitigation of uniform mixture deflagration by venting technique

Mitigation of localised non-uniform mixture deflagration by venting

Upper limit of hydrogen inventory in closed space

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

Forced ventilation system parameters

The Abel-Noble EOS to calculate CGH₂ mass in a volume at particular pressure and density

Evento: rilasci di idrogeno

Caratteristiche

veicoli con cella a combustibile (FC) sono dotati a bordo di serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno pressurizzati fino a 70 MPa; un'infrastruttura di rifornimento opera a pressioni fino a 100 MPa.

A causa delle piccole dimensioni della sua molecola, l'idrogeno è soggetto a perdite/fughe, es. permeazioni.

I rilasci/perdite di idrogeno possono avere origine da valvole, connessioni, rottura dei condotti, etc. I rilasci possono verificarsi sia in ambienti interni che esterni.

Un rilascio di idrogeno attraverso un TPRD o dalla rottura di un tubo risulterà in un getto di gas ad alta pressione. Tipici ratei di rilascio:

- Rilascio da TPRD (diametro 5.08 mm) da serbatoio a 35 MPa: **390 g/s**.
- Rilascio da tubo danneggiato (150 kW FC): circa **3 g/s**.
- Rilascio da condotti (pipeline) industriali (diametro 30 cm) a $P=2.5$ MPa: **100 kg/s**.

I rilasci possono essere non innescati (cioè non reattivi) o innescati (cioè reattivi).

Un rilascio di idrogeno da un serbatoio ad alta pressione produce un getto altamente sotto-espanso.

Rilasci e dispersione

Nube infiammabile

Combustione è generalmente la preoccupazione primaria quando si considerano i criteri di danno. In caso di rilascio di idrogeno potrebbe verificarsi un **getto infiammabile**. In caso di innesco, le persone, strutture, attrezzature e ambiente possono essere coinvolti in un incendio.

È quindi importante **determinare il punto più lontano dalla perdita, in cui un getto può essere innescato**, definito generalmente dalla concentrazione di idrogeno di 4 vol. %, ovvero dal limite inferiore di infiammabilità (LFL).

Nonostante questa scelta del contenuto di idrogeno sia oggetto di dibattito, il contatto diretto con la fiamma o il rifiuto di accensione e flash fire si verificherà se una persona si trova entro la nube di idrogeno 4 vol. %.

La dimensione della nube infiammabile, ovvero la distanza al LFL di 4 vol. %, aumenta proporzionalmente al quadrato del diametro della perdita.

Le concentrazioni di interesse: 2 vol. % - 50% di LFL (allarme); 1 vol. % - shut-down dei sistemi.



Rilasci e dispersione

Legge di similarità – e-Laboratory

URL: <https://elab.hysafer.ulster.ac>

Login: HyResponderTrainer

Password: safetyfirst

Similarity law for concentration decay in hydrogen expanded and under-expanded jets and unignited jet hazard distances

Similarity law for concentration decay in hydrogen expanded and under-expanded jets and unignited jet hazard distances

Pressure in reservoir: 300000 Pa

Temperature in reservoir: 303 K

Orifice diameter: 0.005 m

Ambient pressure: 101325 Pa

Ambient temperature: 293 K

Name	Symbol	Value	Unit
H2 pressure in reservoir	p_1	3.5e+7	Pa
H2 temperature in reservoir	T_1	293	K
Orifice diameter	d_3	0.005	m
Ambient pressure	p_4	1.01325e+5	Pa
Ambient temperature	T_{atm}	293	K
Axial distance from nozzle to 4% by vol. H2	$X_{4\%,H_2}$	32.6212	m
Axial distance from nozzle to 8% by vol. H2	$X_{8\%,H_2}$	15.6793	m
Axial distance from nozzle to 11% by vol. H2	$X_{11\%,H_2}$	11.0593	m
Axial distance from nozzle to 16% by vol. H2	$X_{16\%,H_2}$	7.20885	m
Axial distance from nozzle to 29.5% by vol. H2	$X_{29.5\%,H_2}$	3.33269	m
Axial distance from nozzle to ?% by vol. H2	$X_{\%,H_2}$	5.50167	m

Buttons: Export to CSV, Change inputs, Dataset name, Save

Effetto della galleggiabilità sulle distanze di sicurezza

Effect of buoyancy on decrease of hazard distance for unignited releases

For horizontal release the distance and concentration at which release becomes buoyant and hazard distance to 4% v/v along the jet central line

For vertical downward release the distance and concentration at which flow start to go up due to buoyancy

È difficile definire l'esatta sorgente di innesco dell'idrogeno a causa della bassa energia di accensione minima (MIE) dell'idrogeno - **0.017 mJ**. **La maggior parte delle sorgenti di innesco hanno un'energia superiore a 0 mJ.**

Sorgenti elettriche:

Scariche elettriche

Scariche atmosferiche

Cortocircuiti elettrici o altre apparecchiature elettriche, particelle cariche, ecc.

Sorgenti termiche:

Superfici calde

Fiamme libere e getti caldi

Gas esausti

Cariche esplosive, ecc.

Sorgenti meccaniche:

- Scintille meccaniche (da rapide chiusure di valvole)
- Scintille da attrito e/o urto
- Frattura del metallo
- Vibrazione meccanica e ripetuta flessione, ecc.

Altre sorgenti:

- Radiazione ionizzante (radioattività)
- Radiazione elettromagnetica
- Raggi laser o flash
- Compressione adiabatica (aumento di pressione)
- Accensione per diffusione, ecc.

Jet fires

Jet fires: fiamme a getto (es. $P=20.5$ MPa $d=9.5$ mm)

Jet fire di idrogeno durante il giorno



Jet fire con telecamera infrarossi



<https://www.youtube.com/watch?v=txNANqq7rJ4&list=PLlphoM9ggM3Rf-Npmdq0S3WrCSpx0U4SL&index=14>

<https://www.youtube.com/watch?v=myOTYcPCw0I&list=PLlphoM9ggM3Rf-Npmdq0S3WrCSpx0U4SL&index=12>

Jet fires

Confronto jet fires di idrogeno vs combustibili comuni

La inalazione di prodotti della combustione originati da combustibili convenzionali è una delle principali cause di morte in un incendio fortuito e una conseguenza primaria di un incendio. È considerato meno grave nel caso dell'idrogeno perché **l'unico prodotto della combustione è il vapore acqueo (non tossico, non velenoso)**. Tuttavia, gli incendi secondari possono produrre fumo o altri prodotti di combustione che presentano un rischio per la salute.

Jet fires: lunghezza di fiamma



Equivalent Ø: 3,1 mm
Length flame: 5,5 m



Equivalent Ø: 3,1 mm
CNG length flame: 8 m



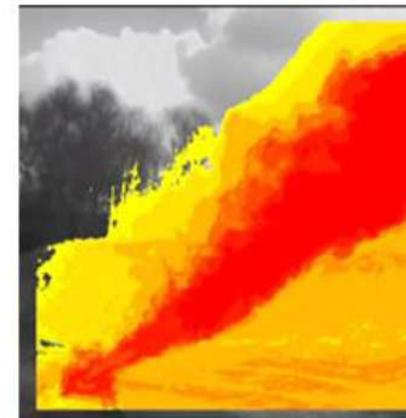
LPG length flame



H2 @ 200 bar



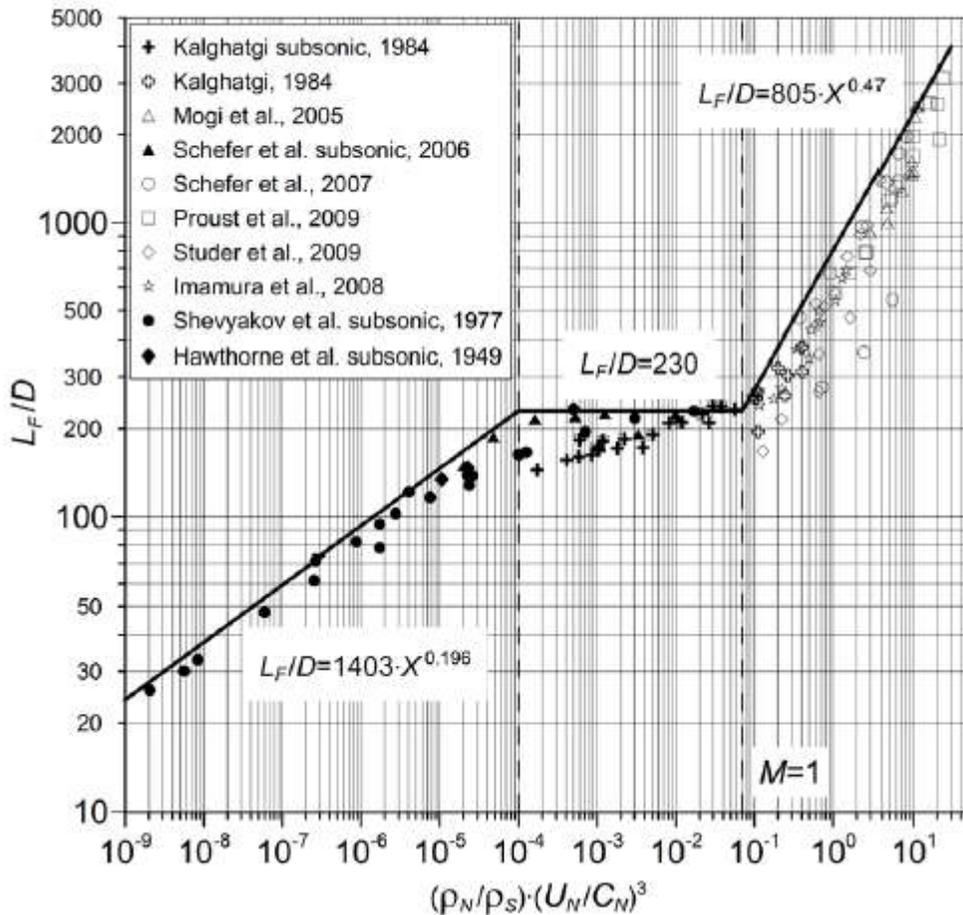
CNG @ 200 bar



LPG @ 10 bar (liquid phase)

Jet fires

Lunghezza di fiamma: correlazione



- La correlazione rapporta **lunghezza di fiamma adimensionale L_F/d** ad una funzione esponenziale di:
 - ρ_N : densità dell'idrogeno all'ugello reale
 - ρ_S : densità dell'ambiente circostante
 - U_N : velocità dell'idrogeno all'ugello reale
 - C_N : velocità del suono all'ugello reale.
- **Range di validità:** $P=0.1-90$ MPa, $d=0.4-51.7$ mm

Pressione stoccaggio (bar)	Diametro foro di rilascio (mm)	Lunghezza di fiamma (m)
700	1.0	3.3
700	3.0	9.9

Jet fires

Temperatura lungo l'asse del *jet fire*

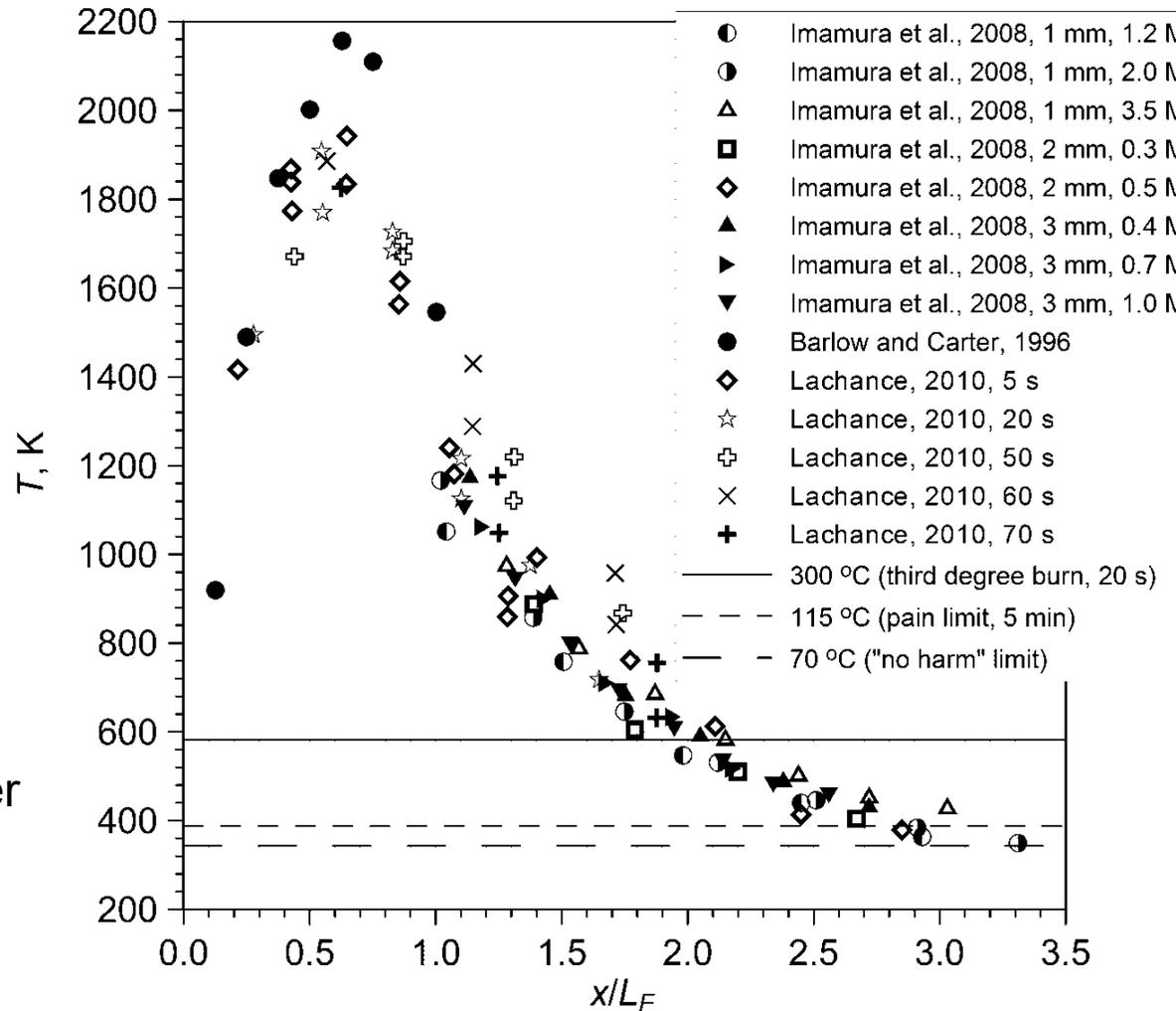
Rilascio dominato dal momento

Il contatto diretto con l'idrogeno in combustione o i gas caldi post-fiamma risultanti dalla combustione provoca gravi ustioni termiche.

Jet fires - tre distanze di sicurezza per effetto della temperatura sull'uomo:

- $x = 3.5L_F$ per "nessun danno" (70 °C)
- $x = 3L_F$ per "soglia del dolore" (115 °C, 5 min)
- $x = 2L_F$ per "ustioni di terzo grado" (309°C, 20 s)

Analisi conservativa: le tre distanze di sicurezza per jet fire sono più lunghe o uguali alla distanza calcolata per l'LFL (rilascio non reattivo).



Jet fires

Effetti del flusso di calore radiativo sull'uomo

Una fiamma a idrogeno irradia molto **meno calore** rispetto agli idrocarburi ed è praticamente **invisibile** di giorno. Ciò significa che le persone che si trovano vicino a una fiamma a idrogeno potrebbero non percepire la sua presenza fino a quando non sono in contatto con essa.

Senza un'adeguata attrezzatura di rilevamento, i primi segnali di una piccola fiamma potrebbero essere il **rumore "sibilante"** del gas che fuoriesce attraverso un orifizio e la comparsa di **"increspature di calore"**.

Tuttavia i flussi di calore convettivo e radiativo devono essere valutati adeguatamente in prossimità del jet fire.

Intensità del flusso radiativo, kW/m ²		Effetti sull'uomo
1.5		Sicuro per il pubblico ed il personale
3		Tollerabile per situazioni di emergenza non frequenti per 30 s
5		Tollerabile per il personale coinvolto in operazioni di emergenza
12.5-15		Ustioni di primo grado dopo 10 secondi, 1% letalità in 1 min
25		Danni significativi in 10 s, 100% letalità in 1 min
35-37.5		1% letalità in 10 s

WG and Schefer, RW (2007). International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 32, pp. 136-151.

ISO 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.

Jet fires

Lunghezza di fiamma e distanze di sicurezza - e-Laborat

Length correlation and three hazard distances for jet fires

Length correlation and three hazard distances for jet fires

URL: <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk>

Login: HyResponderTrainer

Password: safetyfirst

Pressure in reservoir
 Pa

Temperature in reservoir
 K

Orifice diameter
 m

Ambient pressure
 Pa

Ambient temperature
 K

Name	Symbol	Value
H2 pressure in reservoir	p_1	2e+7
H2 temperature in reservoir	T_1	293
Orifice diameter	d_3	0.003
Ambient pressure	p_A	1.01325e+5
Ambient temperature	T_{atm}	293
Flame length	L_F	6.259
No harm (70°C) separation distance	X_{70}	21.9065
Pain limit (5 mins, 115°C) separation distance	X_{115}	18.777
Third degree burns (20 sec, 309°C) separation distance	X_{309}	12.518

Jet fires

Effetto dell'attaccamento al suolo

Senza attaccamento al suolo



Con attaccamento al suolo



<https://www.youtube.com/watch?v=aGEEFgShQhQ&list=PLlphoM9ggM3Rf-omdq0S3WrCSpx0U4SL&index=10>

<https://www.youtube.com/watch?v=Tyj95QEINcc&list=PLlphoM9ggM3Rf-omdq0S3WrCSpx0U4SL&index=16>

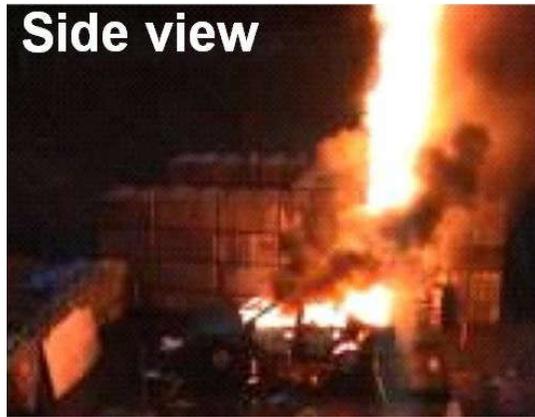
Esempio: jet fire a 20.5 MPa e diametro 1.5 mm: lunghezza di fiamma da 3 m a 5.5 m (x1.8 volte)

Jet fires

Rilascio da TPRD di un veicolo (1/2)

TPRD rivolto verso l'alto

Veicolo con due serbatoi (34 L a 35 MPa) con TPRD di diametro 5 mm.
Attivazione TPRD dopo 14 min 36 sec (Watanabe et al., 2007).



Accettabile una lunghezza di fiamma di 10-15 m?
Distanza "Nessun danno" è 25-40 m.

TPRD rivolta verso il basso

Incendio partito dal posacenere.
Attivazione TPRD in 16 min 16 sec.
Durata blow-down < 5 min nessuna rottura catastrofica, ma...



Il dimensionamento attuale dei TPRD non permette l'evacuazione e l'intervento di soccorso.

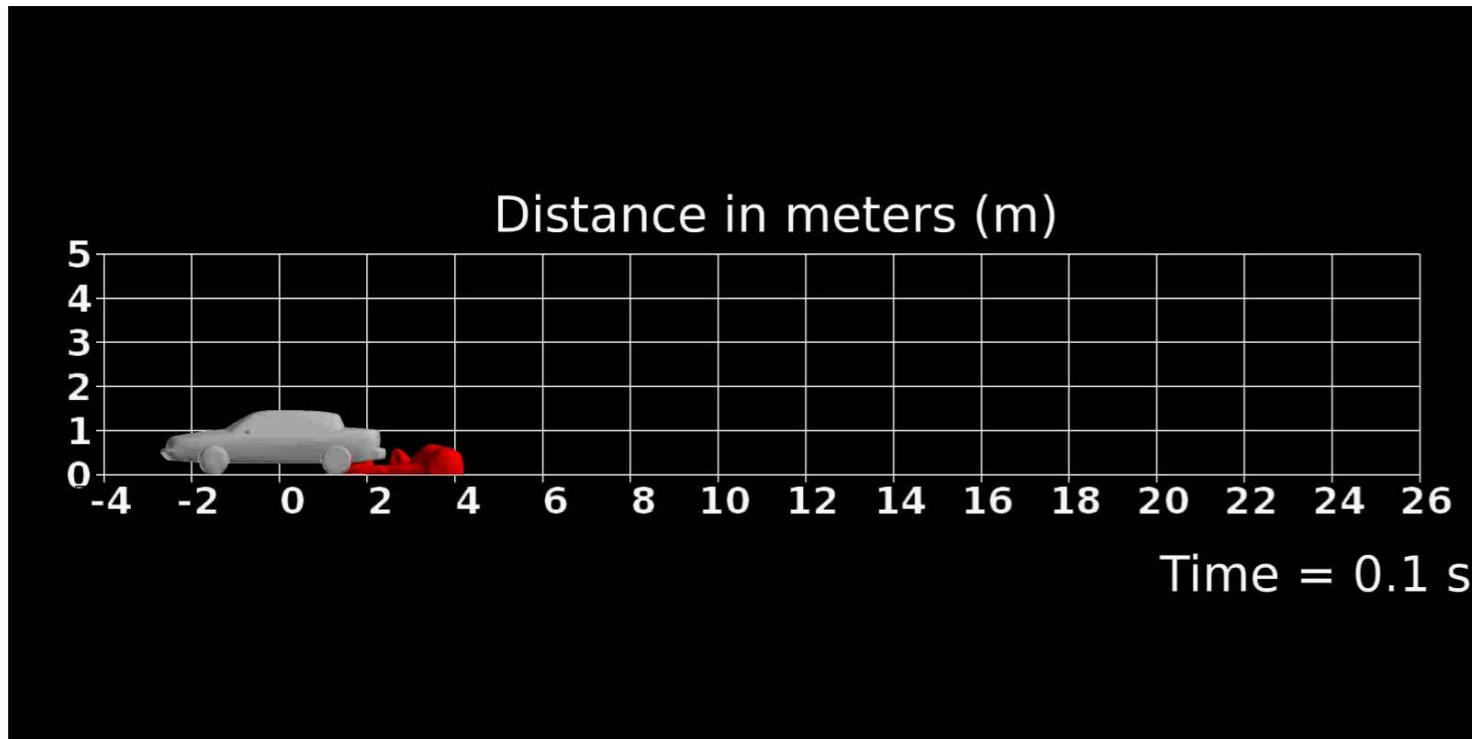
Veicolo in uno spazio chiuso → effetto "domino"?

Jet fires

Rilascio da TPRD di un veicolo (2/2)

Rilascio a 45° (evacuazione e soccorso possibili)

La distanza di sicurezza «nessun danno» diminuisce da 38 m (correlazione) a 23 m (CFD)



https://www.youtube.com/watch?v=0Lf_zBhgjCg&list=PLlphoM9ggM3Rf-Npmdq0S3WrCSpx0U4SL&index=22

Jet fires

Livello sonoro

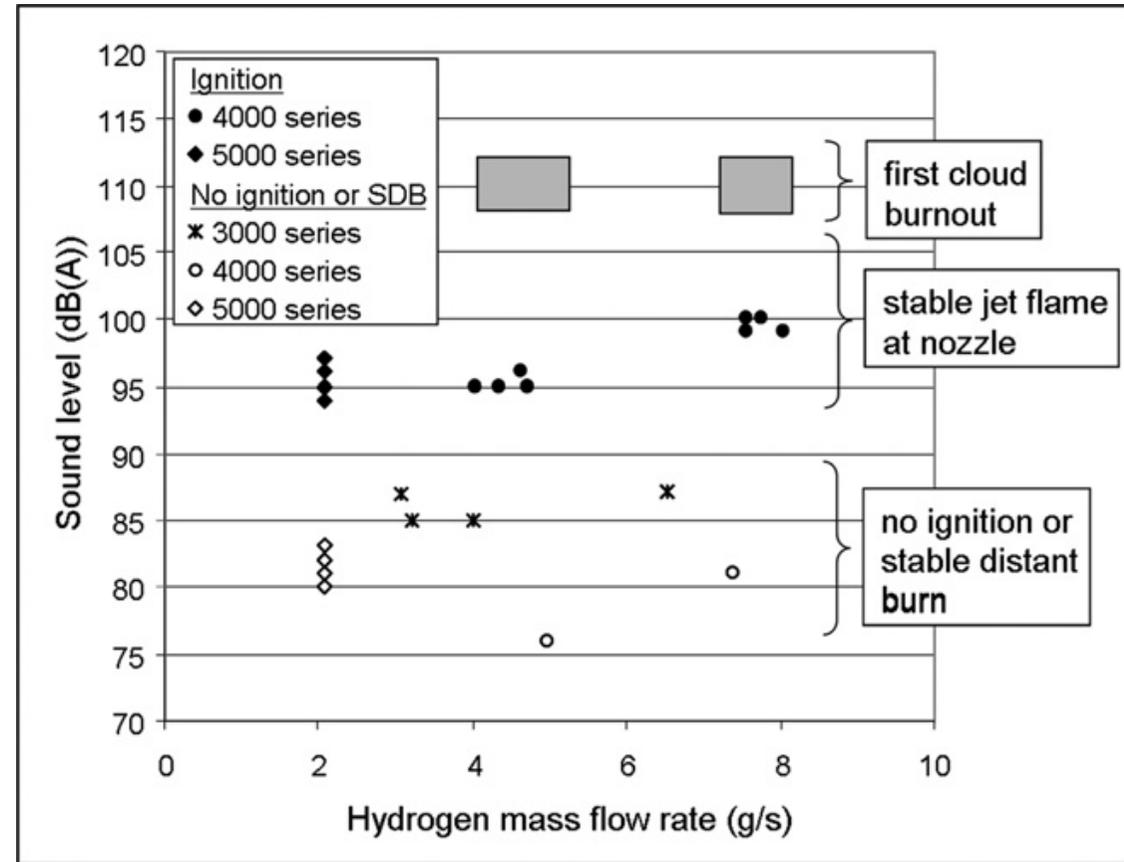
I jet fires generano un livello sonoro di circa 10 dB(A) più alto di quelli non-reattivi.

I livelli sonori misurati ≤ 112 dB(A) sono considerati pericolosi solo nel caso di esposizione prolungata o permanente.

Il danno all'udito da onde sonore di breve durata diventa possibile per livelli superiori a **120 dB(A)**.

L'improvvisa perdita dell'udito può verificarsi per livelli superiori a 140 dB.

Il livello sonoro misurato è alto abbastanza da permettere l'identificazione e posizione della fiamma.



Esperimenti con idrogeno criogenico (34-65 K).

Fonte: Friedrich, A. et al (2012) International Journal of Hydrogen Energy. Vol.31, pp.17589-1759

Jet fires

Prevenzione e mitigazione

Prevenzione del getto

Il getto dovrebbe essere diretto in maniera da non raggiungere persone o apparecchiature. Ad es. le flange (o componenti con potenziali perdite) dovrebbero essere posizionate in maniera tale da non causare effetti domino.

Protezioni e barriere

Riduzione del flusso termico ai potenziali target nelle vicinanze del jet fire. Le protezioni per le fiamme sono finalizzate a ridurre il flusso di calore radiante evitando il contatto diretto tra la fiamma e i sistemi o apparecchiature. La scelta dei materiali per le protezioni o barriere è fondamentale.

Riduzione della lunghezza di fiamma

Ad es. utilizzando design innovativi di PRDs con diametro minore e l'utilizzo di ugelli planari.

Jet fires

Effetto delle barriere nel caso di ignizione ritardata

Barriera 90°: 9.5 mm, 800 ms (**42 kPa**;
getto libero 16 kPa)



<https://www.youtube.com/watch?v=bCldzljqkQ&list=PLlphoM9ggM3Rf-omdq0S3WrCSpx0U4SL&index=3>

Barriera 60°: 9.5 mm, 800 ms (**57 kPa**;
getto libero 16 kPa)



<https://www.youtube.com/watch?v=8SeqGHPtkzc&list=PLlphoM9ggM3Rf-omdq0S3WrCSpx0U4SL&index=4>

Jet fires

Estinzione dei jet fires

raccomandazioni «US National Hydrogen and Fuel Cell Emergency Response Training», 2014

gli vigili del fuoco dovrebbero:

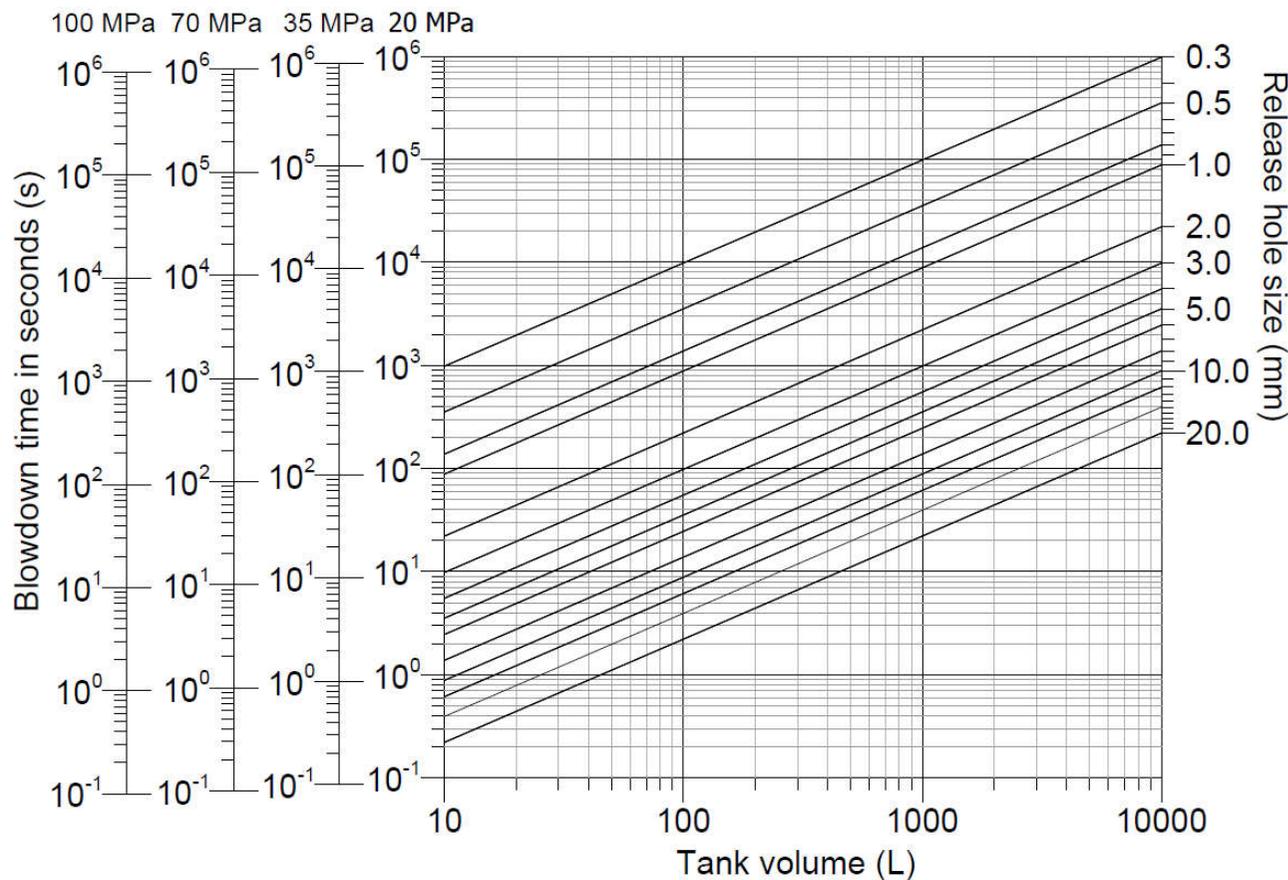
Rimanere in ascolto per l'eventuale rilascio del gas e controllare la presenza di increspature termiche che segnalerebbero la presenza di un jet fire.

Se è coinvolto un solo veicolo FC, avvicinarsi da un angolo a 45° come per le normali procedure, in discesa e controvento.

Se è presente un jet fire di idrogeno:

- Permettere all'idrogeno di bruciare in sicurezza e proteggere le esposizioni adiacenti; poi avvicinarsi e estinguere l'incendio.
- Se è presente anche un incendio di idrocarburi, attaccare le fiamme con un getto d'acqua a distanza ma evitare di direzionare il getto d'acqua verso il dispositivo di depressurizzazione. Controllare l'espansione dell'incendio e raffreddare ciò che è esposto alle fiamme.
- Se possibile, direzionare l'idrogeno rilasciato che non brucia via dalle sorgenti di innesco; disperdere con nebulizzatori se necessario.
- Usare la schiuma su perdite di benzina o diesel vicino al veicolo FC.

Nomogramma per il calcolo della durata di blowdown



Esempio serbatoio P=70 MPa e V=81

➤ d = 2 mm → durata = 260 s

➤ d = 5 mm → durata = 28 s

Esempio serbatoio P=70 MPa e V=15

➤ d = 2 mm → durata = 502 s

➤ d = 5 mm → durata = 54 s

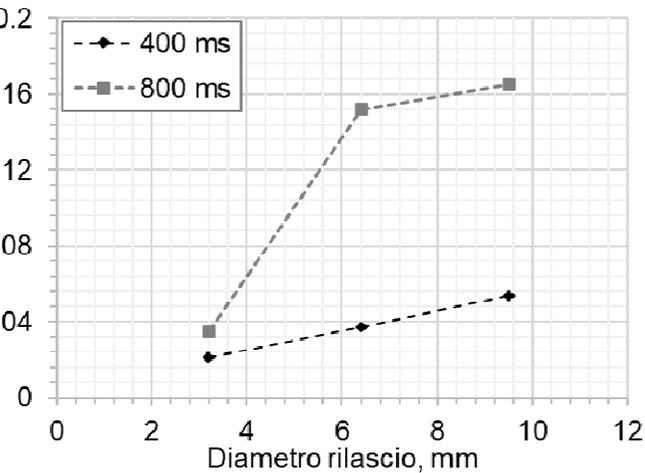
Modello disponibile su e-Laboratory

Jet fires

Ignizione ritardata di un rilascio di idrogeno pressurizzato

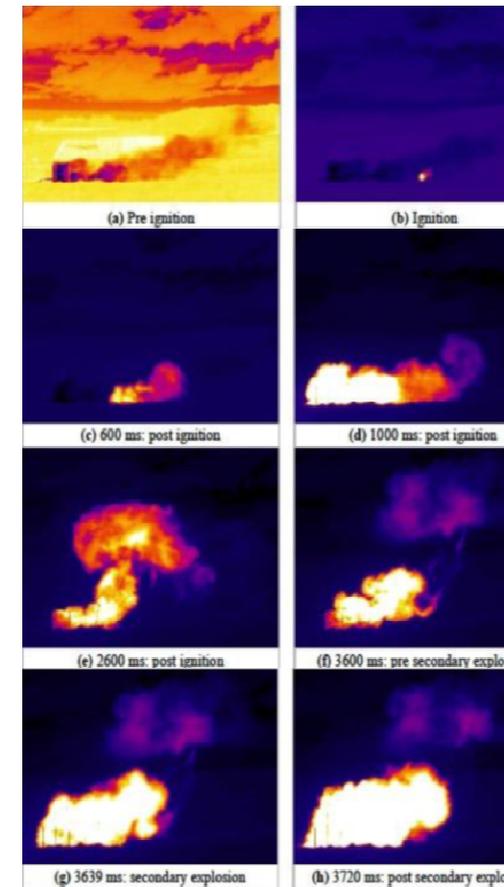
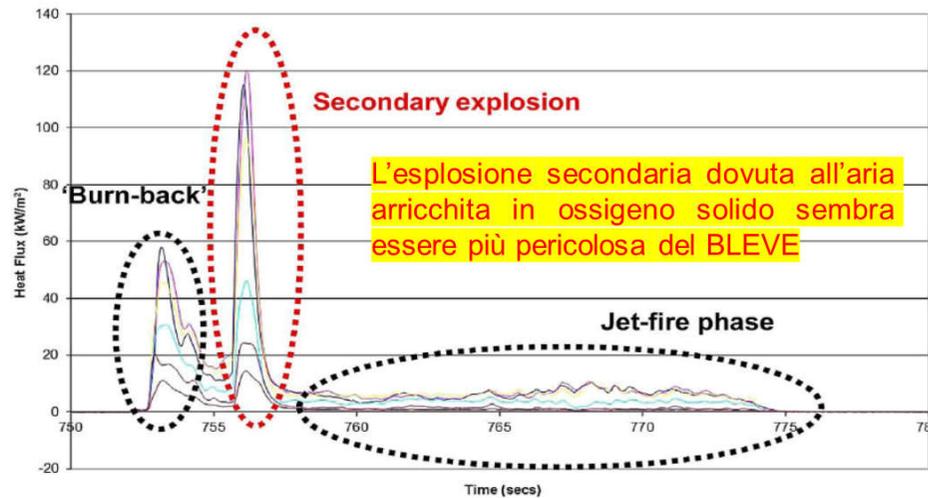
L'ignizione ritardata di un rilascio pressurizzato di idrogeno o di una nube infiammabile può risultare in una sovrappressione capace di danneggiare persone o strutture.

HSE Test cGH₂ a 20.5 MPa.
Sovrapressione per d=1.5 mm:
non misurabile.



HSE Test LH₂ pressurizzato.

- Nube infiammabile più estesa.
- Possibilità di rain-out.
- Arricchimento in O₂: possibilità di esplosione secondaria dopo la prima deflagrazione.

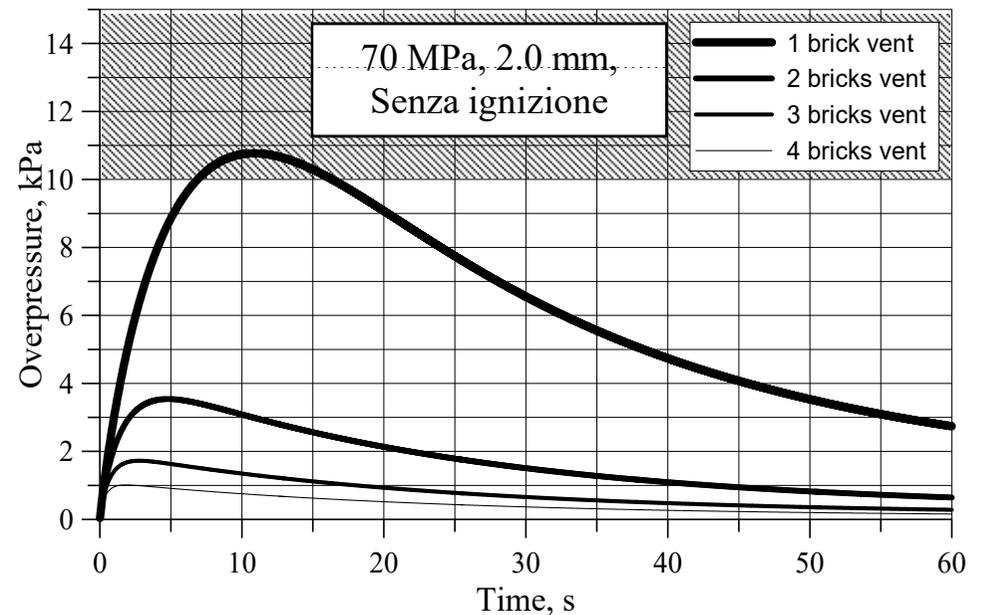
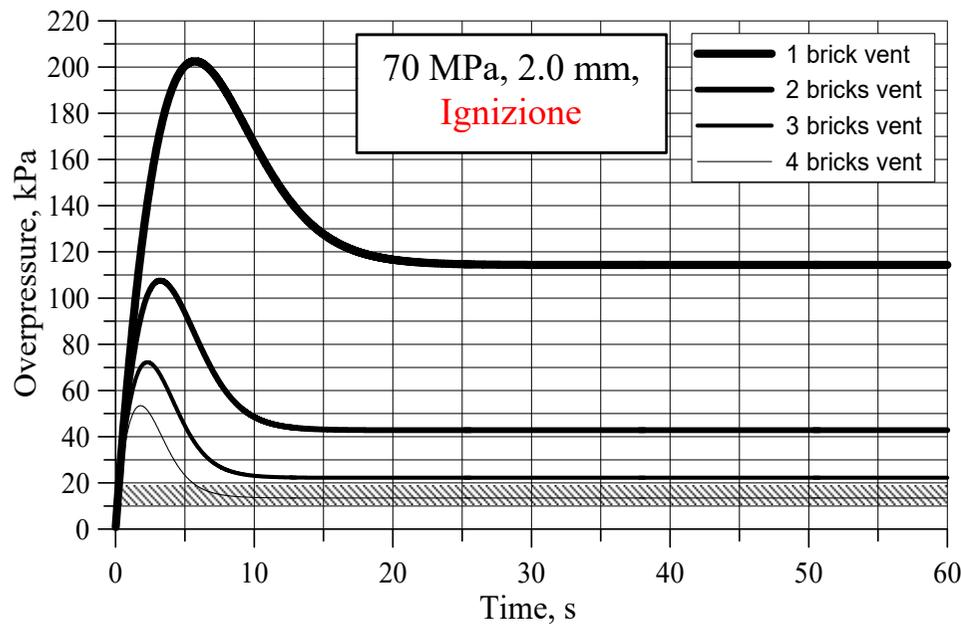


Spazi confinati

Pressure peaking phenomenon – PPP

Definizione: picco transitorio di pressione all'interno di uno spazio chiuso durante il rilascio di idrogeno, che può risultare in una sovrappressione eccedente il limite di resistenza strutturale.

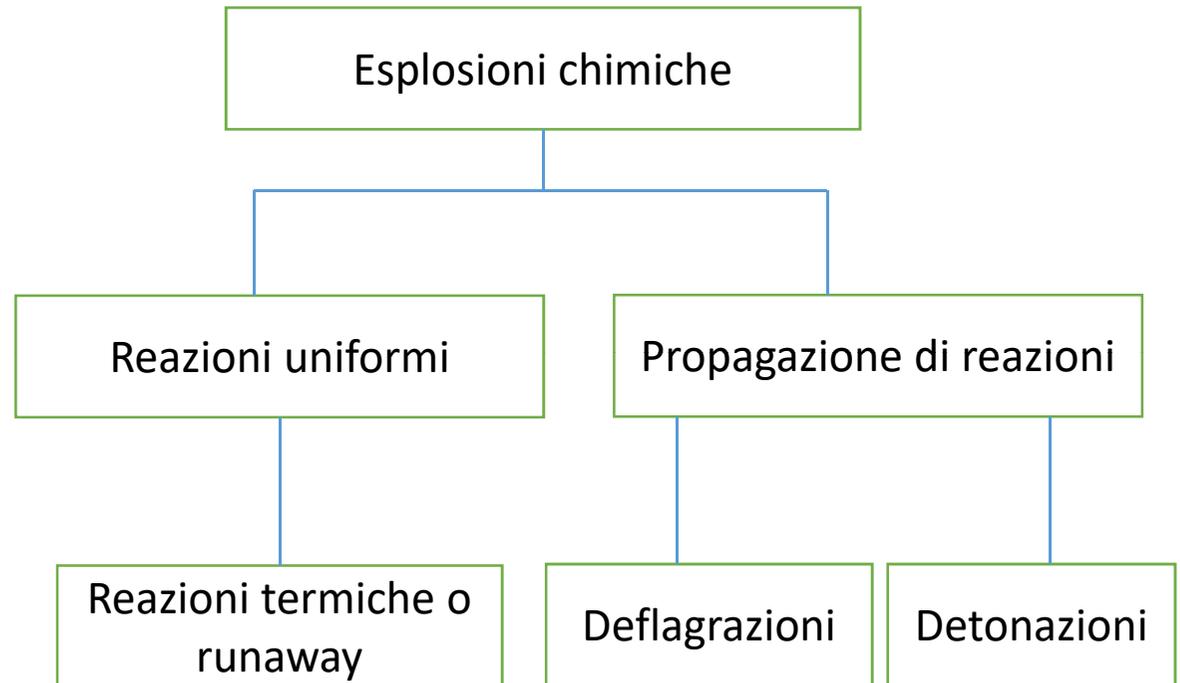
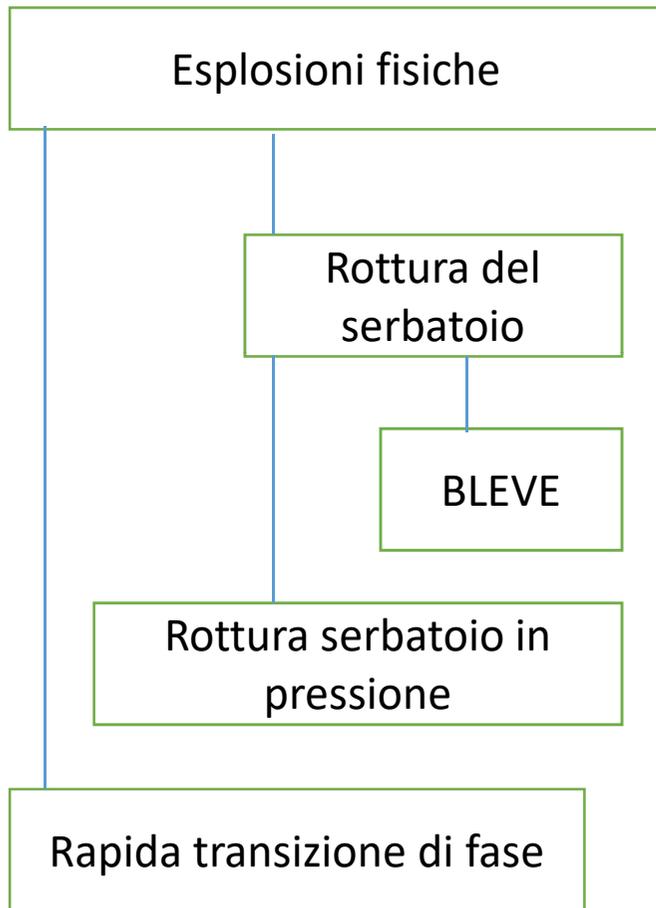
Dinamica di sovrappressione per un rilascio di idrogeno in un garage: diametro TPRD 2 mm, pressione di stoccaggio 70 MPa (rateo di rilascio 107 g/s) con e senza ignizione:



Soluzione: riduzione diametro TPRD (aumento resistenza all'incendio del serbatoio).

Esplosioni

Classificazione delle esplosioni (Crowl, 2003)



Due fattori determinano il livello di danno:

- Livello di sovrappressione
- Impulso dell'onda d'urto

Esplosioni

Deflagrazioni e detonazioni

Deflagrazione è il fenomeno in cui la zona di combustione si propaga a velocità inferiore a quella del suono (sub-sonica) in una miscela di combustibili.

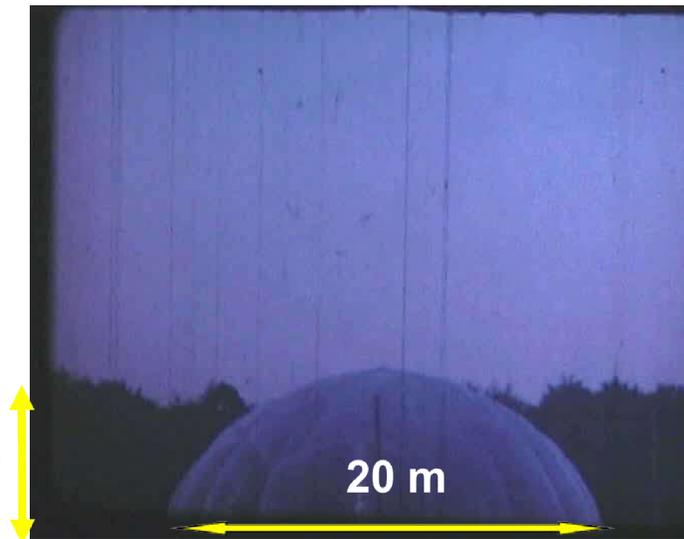
Le deflagrazioni in spazi aperti ed in assenza di ostacoli possono generare sovrapressioni di circa 10 kPa.

Le deflagrazioni in spazi confinati possono portare a sovrapressioni molto più elevate (≈ 800 kPa). Mitigazione: **venting**.

Detonazione è il fenomeno in cui la zona di combustione si propaga a velocità superiore a quella del suono (supersonica) in una miscela di combustibili. Le sovrapressioni prodotte sono molto più elevate: **1,000-1,500 kPa**.

La detonazione si propaga con velocità 2-3 ordini di grandezza superiore alla deflagrazione e risulta in pressioni al fronte di detonazione 15-20 volte più alte della pressione iniziale.

Il venting come tecnica di mitigazione non è applicabile alle detonazioni.



Esplosioni

Effetti delle onde d'urto sull'uomo

Danni all'apparato uditivo, polmoni ed altri organi interni.

Lesioni dovuti alla proiezione di frammenti (es. schegge di vetro).

Collasso di strutture sulle persone con conseguenti lesioni gravi o decesso.

Traslazione del corpo di un individuo.

Nota: l'entità del danno dipende dalla sovrappressione, l'impulso applicato su una persona o un oggetto, il luogo in cui si trovano e i dispositivi personali (di protezione) indossati.

Criteri di danno (soglie selezionate)	Sovrapressione, kPa
Soglia di esposizione temporanea (Baker, 1983): soglia "nessun danno" per le distanze di sicurezza (perimetro di evacuazione)	1.35
1% probabilità di rottura del timpano (Mannan, 2005): soglia "lesioni" per le distanze di sicurezza	16.5
1% probabilità di letalità per emorragia polmonare (Mannan, 2005): soglia di "letalità" per le distanze di sicurezza	100

Esplosioni

Rottura catastrofica di un serbatoio H₂ in un incendio

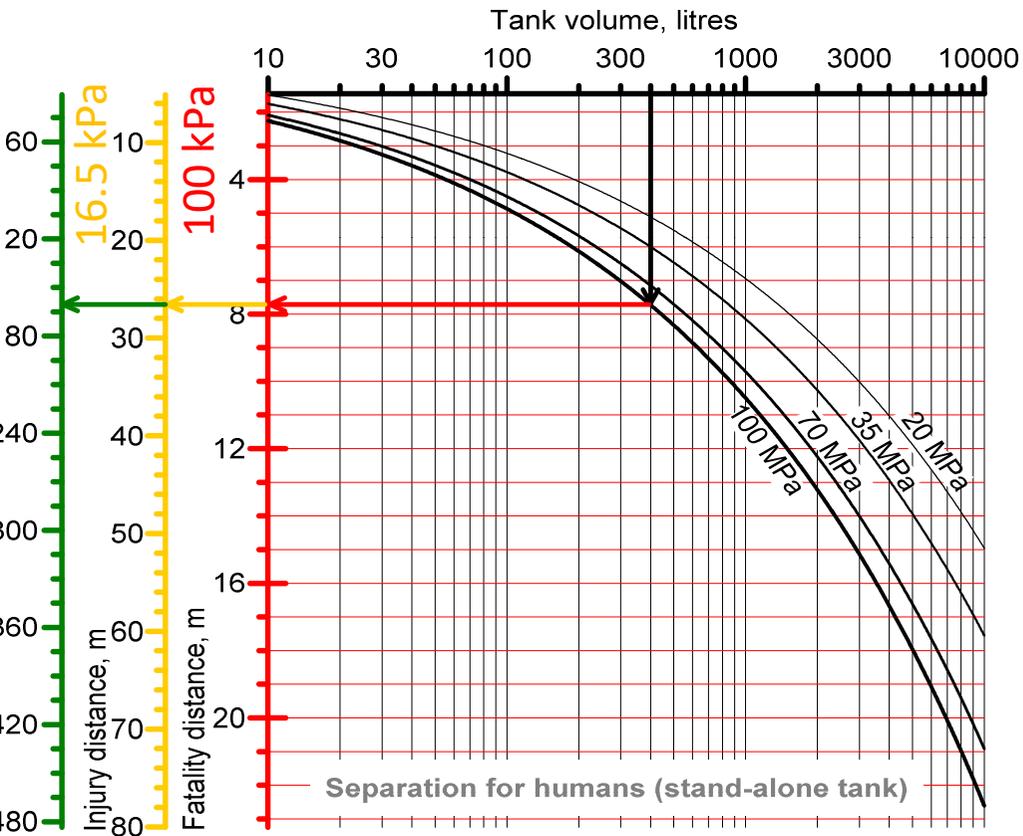
Tipo IV (stand-alone). La massima sovrappressione misurata varia da **300 kPa a 1.9 m**, a **41 kPa a 6.5 m**. La *fireball* ha un **diametro di 7.7 m** ed il lift-off avviene in 1 s.

Tipo III (installazione su SUV). La massima sovrappressione misurata varia da **140 kPa a 1.2 m**, a **12 kPa a 15 m**. La *fireball* ha un **diametro di 24 m**. Il picco di flusso termico misurato a **15.2 m** è nel range **210-300 kW/m²**. (NOTA: circa 35 kW/m² portano all'1% di letalità in 10 secondi).

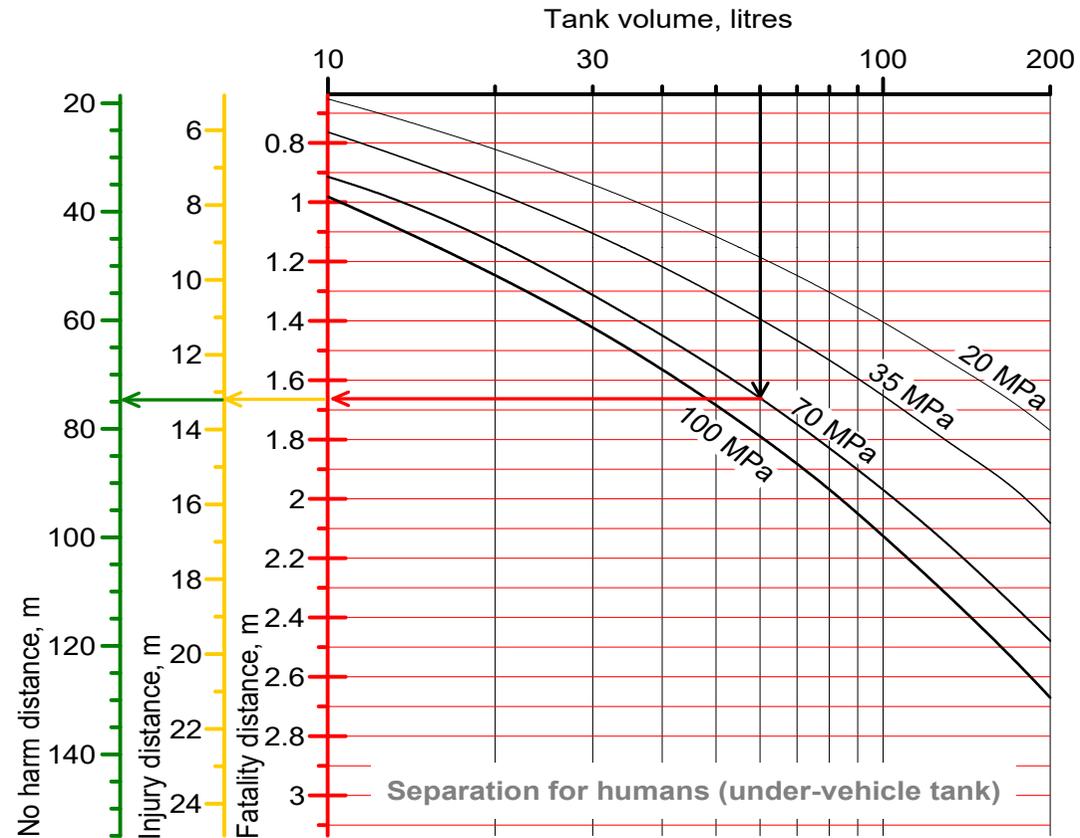
83 kPa – lesioni gravi o letalità a circa 5 m.



Danno all'uomo da rottura di un serbatoio stand-alone in un incendio



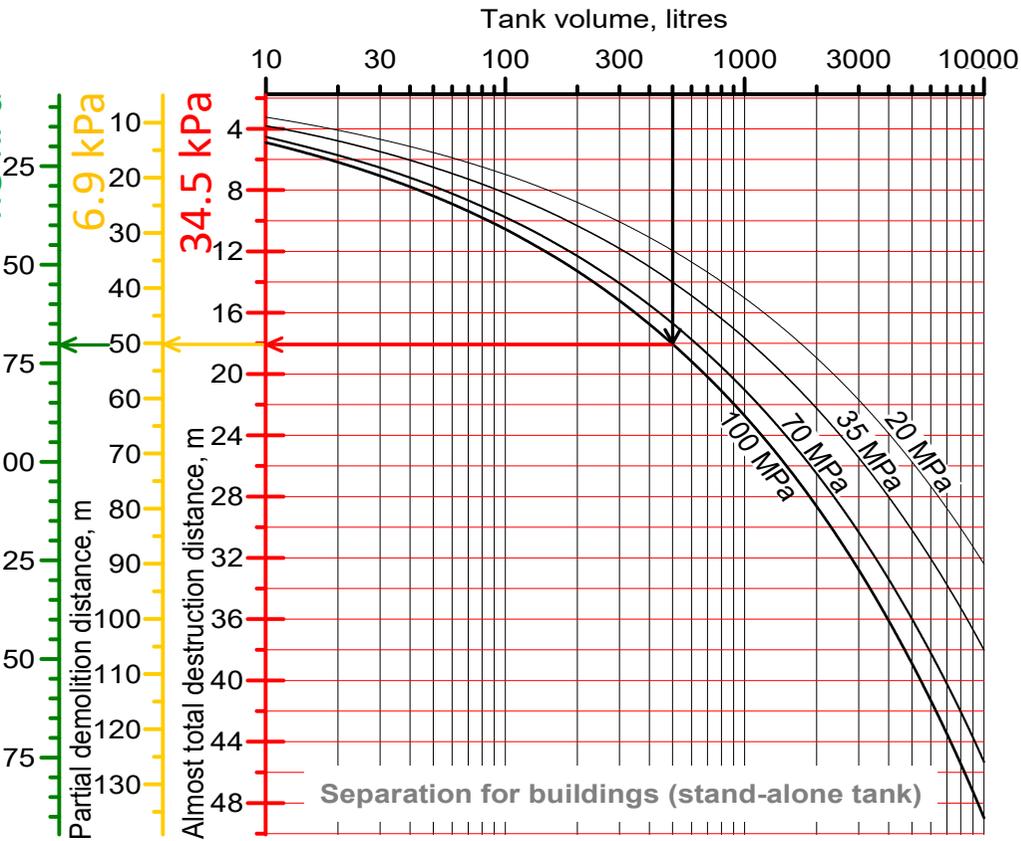
Danno all'uomo da rottura di un serbatoio installato su veicolo in un incendio



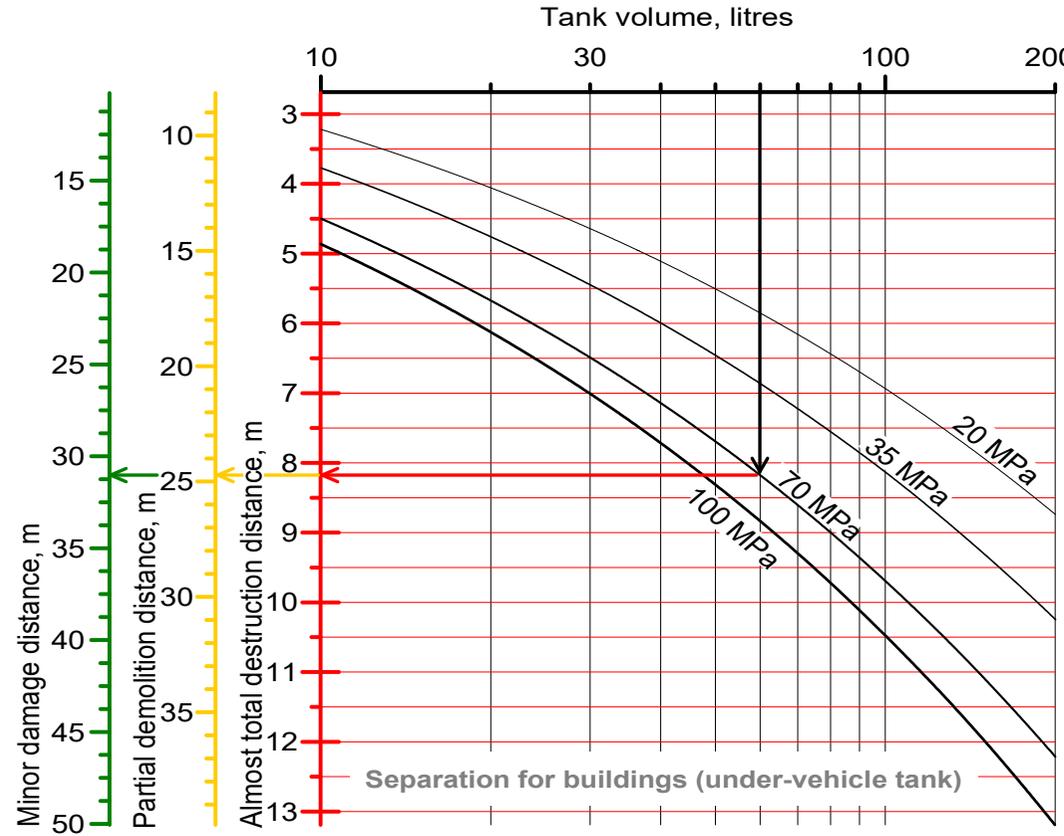
Esplosioni

Onda d'urto: calcolo distanze di sicurezza per le strutture

Danno alle strutture da rottura di un serbatoio stand-alone in un incendio



Danno alle strutture da rottura di un serbatoio installato su veicolo in un incendio



Esplosioni

BLEVE e fenomeno RPT

Un'esplosione di vapore in espansione del liquido bollente (boiling liquid expanding vapor explosion, BLEVE) è un evento associato alla rottura catastrofica di un recipiente pressurizzato contenente un liquido che viene immagazzinato a una temperatura superiore a quella di saturazione a pressione atmosferica.

Un rilascio involontario di idrogeno liquido sull'acqua può portare a un'improvvisa e violenta vaporizzazione dell'idrogeno liquido, nota come rapida transizione di fase (Rapid Phase Transition, RPT).



BLEVE di LH₂



RPT dell'LH₂

- In caso di BLEVE, parte del liquido si trasforma in vapore generando un'onda d'urto, l'innescamento dell'idrogeno produce una grande fireball che può determinare le distanze di sicurezza.
- In caso di RPT, si ha un aumento della velocità di vaporizzazione dell'LH₂. L'accensione potrebbe comportare gravi conseguenze.
- Sprinkling dell'acqua su LH₂ non genera la RPT.

Esplosioni

Misure generali di prevenzione e mitigazione

Prevenzione

Misure passive:

- Assenza di sorgenti di innesco
- Evitare gli spazi confinati se possibile
- Ventilazione naturale

Misure attive:

- Ventilazione forzata
- Rilevamento ed isolamento

Mitigazione

Misure passive:

- Venting della deflagrazione
- Distanze di sicurezza
- Barriere

Misure attive:

- Intervento d'emergenza
- Rilevamento
- Power shut-down

Incidenti con idrogeno

Incidenti con idrogeno: informazioni

Database di eventi:

Hydrogen lessons learnt from incidents to near-misses:

<http://h2tools.org/lessons/>

Hydrogen Incidents and Accidents Database HIAD database:

<https://odin.jrc.ec.europa.eu/engineering-databases.jsp>

Incidenti con rilasci di idrogeno e le cause di accensione sono analizzati da Astbury, GR and Hawksworth, SJ ([2007](#))

Strumenti ed App:

H₂ Safety best practices is useful: <http://h2bestpractices.org/>

Incidenti con idrogeno

Stazioni di rifornimento

Innesco causato da elettricità statica (no H₂)



<https://www.youtube.com/watch?v=T6VKxmUPb3g>

Emeryville fuelling station

- Rilascio di 300 kg di H₂ da un guasto al PRD; con successivo innesco all'uscita. Combustione per 2.5 ore fino allo stop del flusso da parte dei tecnici.
- Evacuazione delle strutture vicine e chiusura delle strade adiacenti.
- Cause:
 - Uso di materiali non compatibili nel PRD.
 - Scorretto assemblaggio e processo di produzione.
- Prevenzione: quality assurance/quality control e safety reviews.

Esplosioni ad una stazione di rifornimento vicino Rochester airport (US).

Incidenti con idrogeno Nagoya, Giappone

1953

Esplosione di serbatoi di idrogeno in un impianto chimico

16 decessi

230 feriti gravi

15 tonnellate di idrogeno

[://www.youtube.com/watch?v=eGAFBi6KyMw](https://www.youtube.com/watch?v=eGAFBi6KyMw)



<https://www.britishpathe.com/video/hydrogen-explosion-in-nagoya>

Incidenti con idrogeno

Polysar Ltd, Sarnia, Canada

10 Aprile 1984

Grande complesso petrolchimico

Rilascio di circa 30 kg di idrogeno gassoso
nell'hangar di un compressore dalla rottura di una
valvola operante a 4800 kPa

Esplorazione ed incendio

1 fatalità e 2 feriti

Estesi maggiori danni strutturali nelle vicinanze

Rottura di vetri e minori danni strutturali fino a 1 km



Fonte: J. H. S. Lee. Explosion hazard of hydrogen-air mixtures. McGill University, Montreal, Canada

Incidenti con idrogeno

Impianto Muskingum River 585-MW



- Gennaio 2007, Ohio, US
- 1 decesso; 10 feriti
- Danni significativi all'edificio
- Causa: guasto prematuro del disco di rottura
TPRD

Link:

<http://www.powermag.com/lessons-learned-from-hydrogen-explosion/>

Source: American Electric Power (AEP)

Incidenti con idrogeno

Incidenti recenti con applicazioni H₂



AP g-Trailer, Diamond Bar (US) 20 Novembre 2018



Serbatoio di un elettrolizzatore, Daejeon (Korea) 23 Maggio 2019



AP impianto rifornimento autocarro, Santa Clara (US) 1 Giugno 2019



NEL g-HRS, Sandvika (Norway) 10 Giugno 2019



g-Trailer, Changhua City (Taiwan) 30 Settembre 2020



Linde I-Trailer, Las Cruces (US) 1 Aprile 2021

Dispositivi di protezione individuale (1/2)

È necessario indossare una **protezione per gli occhi** (ad es. indossare una visiera completa quando si collegano e scollegano linee o componenti, o occhiali protettivi durante la manipolazione di **liquidi criogenici**).

Indossare **guanti adeguatamente isolati** quando si maneggia qualsiasi cosa che venga a contatto con L₂ freddo. I guanti dovrebbero adattarsi liberamente, rimuoversi facilmente e non avere polsini larghi.

Pantaloni lunghi, preferibilmente senza risvolti, devono essere indossati con le gambe del pantalone tenute all'esterno di stivali o scarpe da lavoro.

Indossare **scarpe chiuse** (non dovrebbero essere indossate scarpe aperte o porose).

Indossare **indumenti di cotone normale, cotone ignifugo o materiale antistatico**. Evitare di indossare indumenti in nylon o altri materiali sintetici, seta o lana perché questi materiali possono produrre cariche elettriche statiche che possono incendiare miscele infiammabili. Il materiale sintetico (indumenti) può sciogliersi a contatto con l'idrogeno, penetrare nella pelle causando maggiori danni da ustione. Tutti gli indumenti spruzzati o schizzati con idrogeno devono essere rimossi fino a quando non sono completamente privi di gas idrogeno.

Dispositivi di protezione individuale (2/2)

Devono essere evitati guanti lunghi, indumenti stretti o indumenti che trattengono o intrappolano (ad esempio, borse) liquidi vicino al corpo.

È necessario indossare **protezioni per l'udito** se l'impianto o il sistema a idrogeno coinvolge apparecchiature che creano rumori forti.

È necessario indossare **elmetti** se l'impianto o il sistema a idrogeno comporta il pericolo di caduta di oggetti. Quando si lavora in uno spazio ristretto che può avere un'atmosfera carente di ossigeno, indossare un **dispositivo di respirazione autonomo**.

Apparecchiature portatili di **rilevamento dell'idrogeno** e degli **incendi** dovrebbero essere utilizzate per rilevare fughe di idrogeno o incendi.

Vigili del fuoco dovrebbero utilizzare termocamere e tubi flessibili, o monitori antincendio.

Il personale dovrebbe assicurare la messa a terra prima di toccare o utilizzare uno strumento su un sistema a idrogeno se si ha il sospetto della presenza d'idrogeno nell'area.

Responder

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, Repubblica Ceca, Svizzera, Norvegia.

The project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 875089. It receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and United Kingdom, France, Germany, Spain, Italy, Czechia, Switzerland, Norway.



FUEL CELLS AND HYDROGEN
JOINT UNDERTAKING



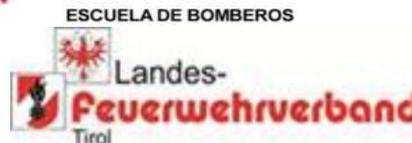
University



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center



International
Fire
Academy



Institute of
Networked Energy Systems



SAP
UNIVERSITY



European Hydrogen Train the Trainer Programme for Responders