



European Train the Trainer Programme for Responders

Lezione 5

Sicurezza dell'idrogeno liquido

Livello I

Vigile del Fuoco

Le informazioni contenute in questa lezione sono rivolte al livello **Vigile del Fuoco** e successivi.

La lezione è disponibile anche ai livelli II e 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 PRESLHY 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

Per varie applicazioni dell'idrogeno in cui la riduzione del volume è essenziale, si ha la necessità di utilizzare idrogeno liquido (LH₂). Tuttavia, esistono anche altre situazioni in cui lo stato liquido rappresenta una soluzione ottimale ed economica per lo stoccaggio e la distribuzione di grandi quantità di idrogeno a seconda delle esigenze dell'utente finale. Inoltre, l'LH₂ ha il vantaggio di un'estrema purezza che lo rende appropriato in molte applicazioni industriali. Il principale svantaggio è l'enorme apporto energetico necessario per liquefare il gas idrogeno, che ha un impatto significativo sull'economia e la gestione dell'LH₂.

I pericoli associati alla presenza e all'operazione di sistemi contenenti LH₂ sono oggetto di valutazione di sicurezza e dei rischi. Parte essenziale dello studio delle sequenze incidentali è la simulazione dei fenomeni fisici che si verificano in relazione al rilascio accidentale di LH₂ nell'ambiente mediante modelli di calcolo. La propagazione e la vaporizzazione dei rilasci criogenici su un terreno liquido o solido, nonché la sua potenziale combustione, sono in principio ben compresi. Inoltre, i modelli numerici sono stati sviluppati e convalidati con dati sperimentali. Ci sono, tuttavia, questioni ancora aperte che richiedono ulteriori ricerche per ampliare l'ancora scarsa base di dati sperimentali.

Questa lezione si basa su “Deliverable 6.1 – Manuale sulla sicurezza dell'idrogeno: Capitolo sulla sicurezza dell'LH₂ (*Handbook of hydrogen safety: Chapter on LH₂ safety*)” del progetto Pre-normative REsearch for Safe use of Liquid Hydrogen (PRESLHY). Le ricerche sperimentali e teoriche sulle caratteristiche dell'idrogeno liquido, le sue proprietà intrinseche, nonché le lezioni apprese dagli incidenti hanno portato a una serie di codici, norme, regolamenti e linee guida, per raggiungere oggi un elevato livello di sicurezza. Questo vale sia per la produzione di LH₂ che per i metodi di stoccaggio e trasporto/distribuzione di LH₂ mobile o stazionario e per la sua applicazione sia nella ricerca che nell'industria.

Keywords

Idrogeno liquido, rilascio criogenico, rilascio accidentale, tecnologie dell'idrogeno liquido

Indice

Sommario	3
Keywords.....	3
1. Target audience.....	5
1.1 Descrizione del ruolo: Vigile del Fuoco	5
1.2 Livello di competenza: Vigile del Fuoco	5
1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Vigile del Fuoco	5
2. Introduzione ed obiettivi	5
3. Proprietà dell'idrogeno liquido.....	6
3.1 Proprietà fisiche.....	6
3.2 Proprietà chimiche.....	7
4. Pericoli dell'idrogeno liquido	7
4.1 Problemi fisiologici con l'idrogeno criogenico.....	8
4.2 Accensione immediata di un rilascio ad alta pressione di LH ₂	9
5. Tecnologie dell'idrogeno liquido	9
5.1 Processo di produzione dell'idrogeno liquido ed infrastruttura	9
5.2 Stoccaggio e trasporto dell'idrogeno liquido	10
5.2.1 Stoccaggio e trasporto dell'idrogeno liquido	10
5.2.2 Criostato per applicazioni stazionarie	12
5.3 Stazioni di rifornimento con idrogeno liquido	12
5.3.1 Bus	16
6. Pericoli e rischi associati all'idrogeno liquido per i soccorritori	16
Bibliografia.....	16

Lezione 5: Idrogeno Liquido

1. Target audience

Le informazioni contenute in questa lezione sono indirizzate al Livello 1: Vigile del Fuoco. Le lezioni sono anche disponibili per i livelli II, III e IV: Capo Squadra, Funzionario di Guardia e Specialista.

La descrizione del ruolo, livello di competenza e aspettative di apprendimento per il Vigile del Fuoco sono descritte di seguito.

1.1 Descrizione del ruolo: Vigile del Fuoco

Un vigile del fuoco si occupa e dovrebbe essere in grado di eseguire operazioni in sicurezza con dispositivi di protezione individuale (PPE), compresi respiratori (BA), utilizzando le attrezzature fornite, come veicoli, scale, manichette, estintori, strumenti di comunicazione e di soccorso, in qualsiasi condizione climatica in aree e situazioni di emergenza che ci si può realisticamente aspettare.

1.2 Livello di competenza: Vigile del Fuoco

Formazione nell'uso sicuro e corretto di PPE, BA e altre attrezzature che si prevede saranno utilizzate durante le operazioni di primo intervento. I soccorritori devono essere supportati da conoscenze e pratiche adeguate. I comportamenti che proteggeranno loro e gli altri colleghi dovrebbero essere descritti dalle procedure operative standard (SOP). È richiesta la capacità pratica di valutare dinamicamente il rischio per la propria sicurezza e degli altri.

1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Vigile del Fuoco

EQF 2 Conoscenza concreta di base del campo di lavoro o di studio. Abilità cognitive e pratiche di base necessarie per l'utilizzo di informazioni rilevanti al fine di svolgere compiti e risolvere problemi di routine utilizzando regole e strumenti semplici. Lavorare o studiare sotto supervisione con una certa autonomia.

2. Introduzione ed obiettivi

L'uso dell'idrogeno liquido (LH₂) nelle applicazioni pratiche è di grande interesse a causa della maggiore densità di energia dell'LH₂ rispetto a quella dell'idrogeno gassoso compresso (cGH₂). L'LH₂ è tipicamente usato come forma concentrata di stoccaggio dell'idrogeno. Come per qualsiasi gas, lo stoccaggio allo stato liquido richiede meno spazio rispetto allo stato di gas. La densità dell'LH₂ è di soli 70,8 kg/m³ a pressione standard e temperatura di ebollizione (1 atm, 20,3 K). L'LH₂ richiede un'apposita tecnologia di stoccaggio criogenico, quali speciali contenitori isolati termicamente, e richiede una gestione speciale comune a tutti i combustibili criogenici, che comportano potenziali rischi per la produzione, il trasporto e l'uso dell'LH₂.

Lo scopo di questa lezione è fornire ai soccorritori una conoscenza appropriata sulle proprietà ed il comportamento dell'LH₂, ed i suoi potenziali rischi.

Alla fine di questa lezione, i soccorritori saranno in grado di:

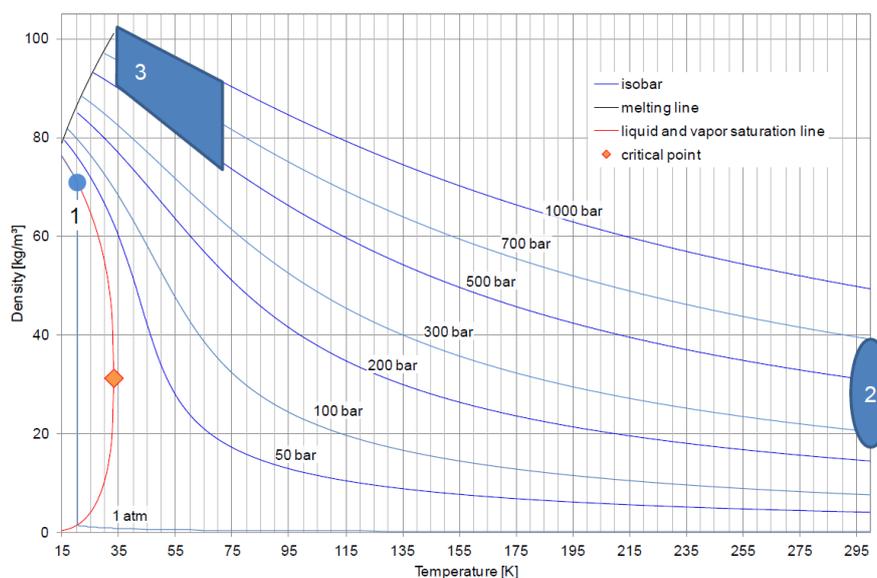
Lezione 5: Idrogeno Liquido

- Comprendere le proprietà fisico-chimiche dell'LH₂;
- Conoscere i pericoli dell'idrogeno criogenico;
- Riconoscere il rilascio e la combustione di idrogeno criogenico ed i conseguenti rischi termici e di sovrappressione;
- Conoscere le tecnologie di produzione, stoccaggio e trasporto di LH₂.
- Identificare il rischio e il pericolo di LH₂ pertinente ai soccorritori.

3. Proprietà dell'idrogeno liquido

3.1 Proprietà fisiche

L'idrogeno liquido (LH₂) è lo stato liquido dell'elemento idrogeno. Per esistere come liquido, l'idrogeno deve essere raffreddato al di sotto del suo punto critico di 33 K. Tuttavia, per essere completamente liquido a pressione atmosferica, l'idrogeno deve essere raffreddato a 20,28 K (-252,87°C) [1]. Il punto triplo dell'idrogeno è a 13,81 K [1] e 7,042 kPa [2]. L'idrogeno liquido ha anche un'energia specifica molto più alta della benzina, del gas naturale o del diesel. L'idrogeno liquido viene generalmente utilizzato come forma concentrata di stoccaggio dell'idrogeno. Come per qualsiasi gas, conservarlo come liquido richiede meno spazio rispetto a conservarlo come gas a temperatura e pressione normali. Tuttavia, la densità dell'idrogeno liquido è molto bassa rispetto ad altri combustibili comuni. Una volta liquefatto, può essere mantenuto liquido in contenitori pressurizzati e coibentati termicamente. La densità dell'idrogeno liquido è di soli 70,99 g/L (a 20 K), una densità relativa di appena 0,07 (Figura 1). La densità energetica dell'idrogeno è molto alta; 1 kg di idrogeno contiene circa 2,5 volte più energia di 1 kg di gas naturale. Sebbene l'energia specifica sia più del doppio di quella di altri combustibili, ciò gli conferisce una densità di energia volumetrica notevolmente bassa, molte volte inferiore. Le principali proprietà di LH₂ sono riassunte nella Tabella 1.



1 - liquido a ~20 K; 2 – gas pressurizzato a ~300 K; 3 – gas criogenico compresso.

Lezione 5: Idrogeno Liquido

Figura 1. Densità (*density*) dell'idrogeno a bassa temperatura (*temperature*) in funzione della pressione [3]. Nota - *isobar*: isobara; *melting line*: curva di fusione; *liquid and vapour saturation line*: curva di saturazione del liquido e del vapore; *critical point*: punto critico.

3.2 Proprietà chimiche

L'idrogeno è in grado di reagire chimicamente con la maggior parte degli altri elementi. In una miscela con l'ossigeno, l'idrogeno è altamente infiammabile in un'ampia gamma di concentrazioni. Brucia in una fiamma molto calda non luminosa liberando energia chimica sotto forma di calore (calore lordo di combustione: 286 kJ/mol). Una miscela stechiometrica idrogeno-aria contiene il 29,5% vol di idrogeno. L'intervallo di infiammabilità è di 4-75 vol% di concentrazione in aria, fino a 95% vol in ossigeno, e si allarga con l'aumentare della temperatura. Il limite inferiore di infiammabilità (LFL), cioè la concentrazione minima di combustibile che supporta la combustione, è solitamente il limite più importante per i rilasci di bassa entità, poiché verrà raggiunto per primo in una perdita continua. Ancora più importante, la nube con una concentrazione di idrogeno > 4% può coprire distanze più lunghe e un'area più ampia dalla sorgente del rilascio.

Una debole scintilla o la scarica elettrostatica di un corpo umano, che è nell'ordine di 10 mJ, sarebbe sufficiente per l'innesco della miscela; questo, tuttavia, non è diverso dagli altri gas combustibili. L'energia di accensione minima diminuisce ulteriormente all'aumentare della temperatura, della pressione o del contenuto di ossigeno. Recentemente sono state fornite misurazioni a temperature criogeniche [6].

4. Pericoli dell'idrogeno liquido

L'idrogeno liquido richiede una tecnologia di stoccaggio criogenico quali speciali contenitori isolati termicamente e richiede una gestione particolare comune a tutti i combustibili criogenici. Questa è simile, ma più complessa dell'ossigeno liquido. Anche con contenitori termicamente isolati è difficile mantenere una temperatura così bassa e l'idrogeno fuoriuscirà gradualmente. L'LH₂ condivide anche molti degli stessi problemi di sicurezza di altre forme di idrogeno, oltre ad essere abbastanza freddo da liquefare o addirittura solidificare l'ossigeno atmosferico che può essere un rischio di esplosione.

Al fine di definire i diversi scenari di pericolo e le relative conseguenze, viene considerato solo lo stoccaggio di LH₂. La [Tabella 1](#) riassume questi eventi, con le cause iniziali e le potenziali conseguenze finali.

Lezione 5: Idrogeno Liquido

Tabella 1. Descrizione dei possibili scenari e pericoli.

Scenario	Principali condizioni	Conseguenze
1 – Esplosione del serbatoio alla pressione operativa (P_w) (incendio / impatto frammenti)	100% gas H_2 - 10 bar – contenitore tipo I	Sovrappressione e proiezione di frammenti
2 – Evento accidentale con il serbatoio di LH_2 (caso di incendio) a $2P_w$	Esplosione del serbatoio di LH_2 Flash-fire	“BLEVE” con effetti termici
3 – Danneggiamento del serbatoio (apertura o perforazione)	10 bar, rapida propagazione di LH_2 sul suolo ed evaporazione	Evaporazione della pozza e formazione di una nube criogenica con effetti di sovrappressione nel caso di innesco della miscela infiammabile
4 - Perdita dalle tubazioni tra il serbatoio e la pompa	10 bar, liquido * rilascio pressurizzato bifase * e/o pozza di H_2 liquido, formazione di una nube infiammabile	Getto di idrogeno liquido e potenziale <i>rain-out</i> con formazione di una pozza di LH_2 sul suolo; effetti di sovrappressione nel caso di innesco della miscela infiammabile
5 – Perdita dalle tubazioni tra la pompa ed il vaporizzatore atmosferico	1000 bar, liquido * rilascio pressurizzato bifase con le caratteristiche di un getto di gas ad elevata pressione	Comportamento simile al getto di gas ad elevata pressione e sovrappressione nel caso di innesco
6 - Esplosione del serbatoio di LH_2 alla pressione di rottura (P_R)	100% gas - 10 bar, tipo I	Sovrappressione e proiezione di frammenti

Nota: BLEVE – *boiling liquid expanding vapour explosion*.

Riguardo agli scenari precedentemente riassunti, si può evidenziare che alcuni di essi sono specifici dell'idrogeno liquido, altri dello stato gassoso e sono già scenari descritti o simili.

4.1 Problemi fisiologici con l'idrogeno criogenico

L'idrogeno è classificato come non tossico e non acido, non cancerogeno, ma è un asfissiante senza un valore limite di soglia (TLV) o valore LD50 (dose letale 50%) stabilito [7].

La vaporizzazione dell'idrogeno liquido rilasciato incide sulla composizione dell'ambiente in prossimità del rilascio, in particolare nelle aree (parzialmente) confinate, comportando il rischio di asfissia. L'enorme rapporto di espansione liquido/ambiente combinato con la condensazione di O_2 dell'aria nell'ambiente e la combustione di miscele H_2 -aria infiammabili porta ad una significativa diluizione dell'atmosfera locale. Una frazione di volume di ossigeno inferiore al 19,5% è considerata dalla NASA pericolosa per l'uomo; meno dell'8% sarà letale in pochi minuti (Tabella 2). I livelli di allarme sono generalmente fissati al 19% di ossigeno.

Lezione 5: Idrogeno Liquido

Tabella 2. Impatto sull'uomo di ambienti con contenuto di ossigeno decrescente.

Contenuto di ossigeno nell'aria (%)	Sintomi
~21 – 19	Nessuno
~19 – 15	Riduzione dei tempi di reazione, no effetti visibili
~15 – 12	Respiro pesante, battito cardiaco accelerato, compromesso livello di attenzione e coordinazione
~12 – 10	Vertigini, compromessa capacità di intendere, bassa coordinazione muscolare, fatica, labbra bluastre
~10 – 8	Nausea, vomito, inabilità a muoversi, perdita di coscienza seguita dal decesso
~8 – 6	Danni cerebrali dopo 4–8 min, decesso entro 8 min
< 6	Coma dopo 40 s, insufficienza respiratoria, decesso

Il contatto diretto della pelle con l'idrogeno liquido o con superfici a temperatura molto bassa provoca "ustioni" criogeniche simili alle ustioni termiche. Il tessuto vivente si congelerà tranne che per brevissimi periodi di contatto in cui la differenza di temperatura tra la sostanza criogenica e la pelle è ancora elevata (regime di ebollizione del film) e il trasferimento di calore è ridotto. Il congelamento della pelle su una superficie fredda può causare gravi danni al momento della rimozione. L'esposizione prolungata della pelle all'idrogeno freddo può provocare geloni. Un sintomo è il dolore locale di breve durata. I tessuti congelati sono indolori e appaiono cerosi, con un colore biancastro pallido o giallastro. Il disgelo del tessuto congelato può causare dolore intenso, e può anche verificarsi uno shock. L'inalazione prolungata di vapore o gas freddo può causare gravi danni ai polmoni. Gli occhi in particolare sono sensibili al freddo. Un'esposizione più lunga al freddo in seguito ad un grande rilascio di LH₂ abbassa la temperatura corporea con conseguente ipotermia, disfunzione degli organi e insufficienza respiratoria [5].

Non ci sono rischi ambientali significativi associati al rilascio accidentale di idrogeno liquido a causa del suo carattere non tossico.

4.2 Accensione immediata di un rilascio ad alta pressione di LH₂

L'accensione immediata di un rilascio ad alta pressione di LH₂ è ritenuta simile a un rilascio ad alta pressione di idrogeno gassoso, con effetti di sovrappressione dovuti all'accensione.

5. Tecnologie dell'idrogeno liquido

5.1 Processo di produzione dell'idrogeno liquido ed infrastruttura

Una delle sfide principali nella costruzione di un'economia dell'idrogeno è la creazione di una efficiente infrastruttura di produzione e fornitura. La distribuzione su larga scala favorisce la fase liquida relativamente densa, ma la liquefazione soffre ancora di basse efficienze

Lezione 5: Idrogeno Liquido

energetiche. Storicamente, l'LH₂ è stato utilizzato principalmente come carburante per razzi spaziali, dove la bassa efficienza nella produzione non aveva importanza. Negli USA è stato avviato un importante programma di ricerca sulla liquefazione dell'idrogeno nell'ambito di programmi spaziali che hanno portato alla progettazione e costruzione di impianti di liquefazione su larga scala.

5.2 Stoccaggio e trasporto dell'idrogeno liquido

5.2.1 Stoccaggio e trasporto dell'idrogeno liquido

I sistemi di stoccaggio di idrogeno liquido esistono già da tempo, tuttavia fino ad ora non si ha un'ampia presenza di questi sistemi negli spazi pubblici. I serbatoi di stoccaggio per l'LH₂ possono contenere più idrogeno rispetto a quelli per il GH₂: la capacità volumetrica dell'LH₂ è 0,070 kg/L rispetto a 0,030 kg/L per serbatoi GH₂ a 70 MPa. Tuttavia, per la liquefazione è necessaria una quantità significativa di energia (circa il 30% dell'energia contenuta nell'idrogeno). L'idrogeno può essere liquefatto per un trasporto o stoccaggio semplificato. Tutti i principali fornitori di gas industriali dispongono di autocisterne criogeniche per la consegna. L'LH₂ è utilizzato nelle stazioni di rifornimento di idrogeno e nelle applicazioni aerospaziali.

Le componenti principali di un serbatoio LH₂ a bordo di veicoli sono mostrate in [Figura 2](#). Questi includono:

- Contenitore di stoccaggio dell'LH₂ (*hydrogen storage container*),
- Dispositivi di arresto del flusso (*shut-off devices*),
- Un sistema di evaporazione (*boil-off system*),
- Dispositivi di depressurizzazione (*pressure relief devices*). Questi possono essere ad attivazione termica (TPRD),
- Le tubazioni di interconnessione (se presenti) e i raccordi tra i suddetti componenti.

Lezione 5: Idrogeno Liquido

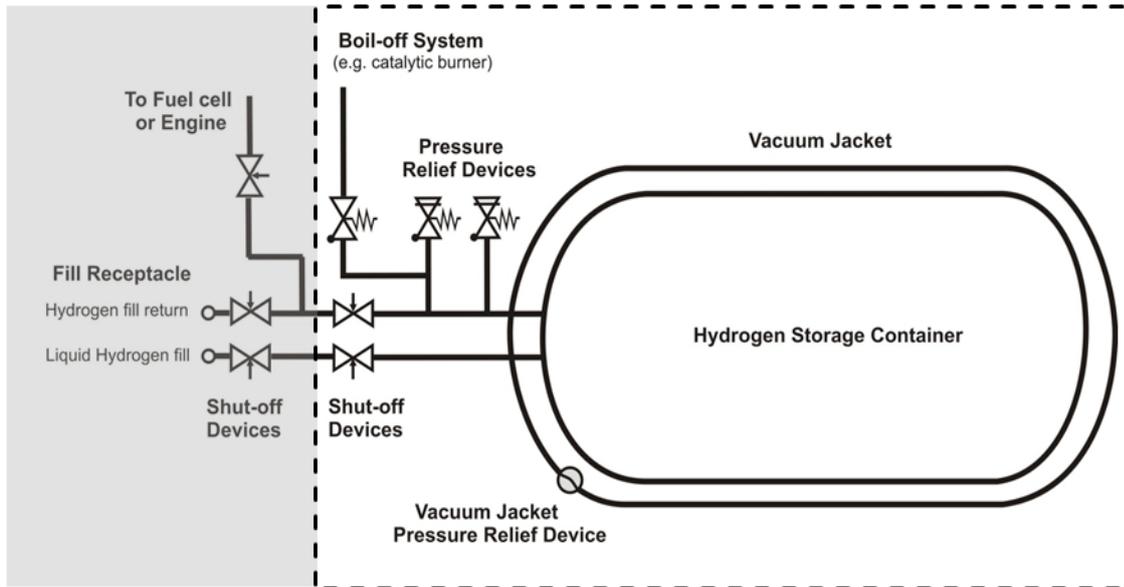


Figure 2. Rappresentazione schematica di un sistema di stoccaggio di LH₂ da [8]. Nota – *fuel cell*: cella a combustibile; *engine*: motore; *fill receptacle*: contenitore per il riempimento; *vacuum jacket*: strato di vacuum.

Questi serbatoi possono essere posizionati in verticale o orizzontale. Lo stoccaggio stazionario criogenico ha un volume dai 10 m³ ai 300 m³ con una pressione interna di circa 12 bar.



Figura 3. Serbatoi di idrogeno liquido verticali od orizzontali (Fonte Air Liquide).

Nella maggior parte dei casi i sistemi di stoccaggio di LH₂ sono posizionati all’ esterno ed in superficie. Tuttavia, esistono alcuni casi di stoccaggio sotterraneo di LH₂, interrato o a volta come illustrato in Figura 4.

Interrato	A volta
-----------	---------

Lezione 5: Idrogeno Liquido

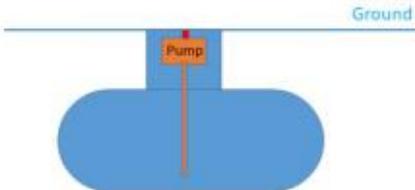
Buried	Vault (~indoor space)
	
<ul style="list-style-type: none"> • All valves, fittings, safeties... + pump in an enclosure on top of tank • Everything accessible at ground level • Necessitates easy access to LH₂ for the pump: fully immersed or feed-in low P pump 	<ul style="list-style-type: none"> • All valves, fittings, safeties... + pump in a room next to Dewar • Confined space: risk of leak, H₂ accumulation, anoxia.. • « traditional » pump designs...
<ul style="list-style-type: none"> • Valvole, giunzioni,... e pompa in uno spazio al di sopra del recipiente • Accessibilità completa al livello del suolo • Necessita di un semplice accesso all'LH₂ per la pompa: completamente immersa o alimentata a bassa pressione 	<ul style="list-style-type: none"> • Valvole, giunzioni,... e pompa in un locale vicino al recipiente • Spazio confinato: rischio di perdite, accumulo di H₂, anossia... • Design della pompa "tradizionale"...

Figura 4. Due possibili design per lo stoccaggio di LH₂ sotterraneo.

5.2.2 Criostato per applicazioni stazionarie

I recipienti criogenici sono stati comunemente utilizzati da più di 70 anni per lo stoccaggio e il trasporto di idrogeno liquido.

5.3 Stazioni di rifornimento con idrogeno liquido

In sostanza, come mostrato dalla [Figura 5](#), una stazione di rifornimento basata su LH₂ è composta da:

- un serbatoio di LH₂ (circa 20 m³ - 1000 kg-H₂) con pressione massima di esercizio di 10,3 bar (*low pressure storage*),
- una linea di processo coibentata dal fondo del serbatoio alla pompa LH₂ (*HP cryo-pump*) che trasporta l'LH₂ dal serbatoio di stoccaggio ad un vaporizzatore (VAP); questo dispositivo permette di pompare LH₂ fino a 1000 bar,
- un riscaldatore (*VAP exchanger*: olio caldo, elettrico per riscaldare l'idrogeno a 1000 bar),
- Separatore "*buffer*" gassoso a 1000 bar (pochi m³); i *buffer* sono generalmente gruppi di contenitori di tipo I o II (cioè cilindri metallici o tubi metallici lunghi).

Lezione 5: Idrogeno Liquido

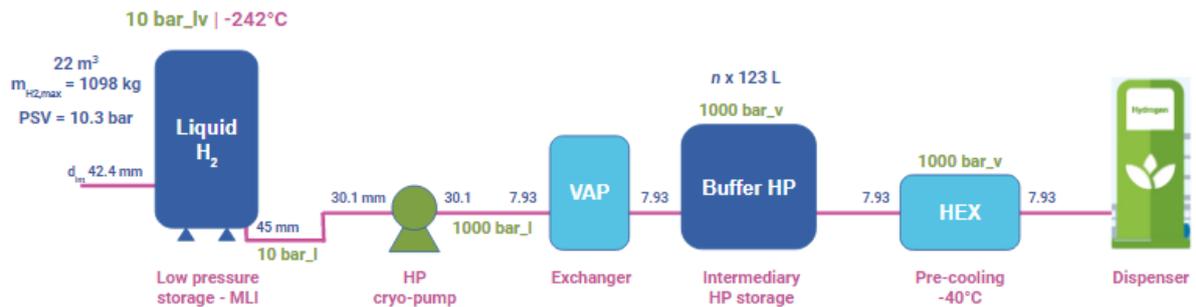


Figura 5. Schema semplificato di una stazione di rifornimento con stoccaggio di idrogeno liquido. Nota - *Intermediary HP storage*: contenimento intermedio; *pre-cooling*: pre-raffreddamento; *dispenser*: erogatore.

Tutte le altre parti (es. dispenser, tubo di rifornimento, ecc.) della stazione di rifornimento sono simili alla classica stazione di rifornimento con idrogeno gas compresso (vedi confronto in Figura 6).

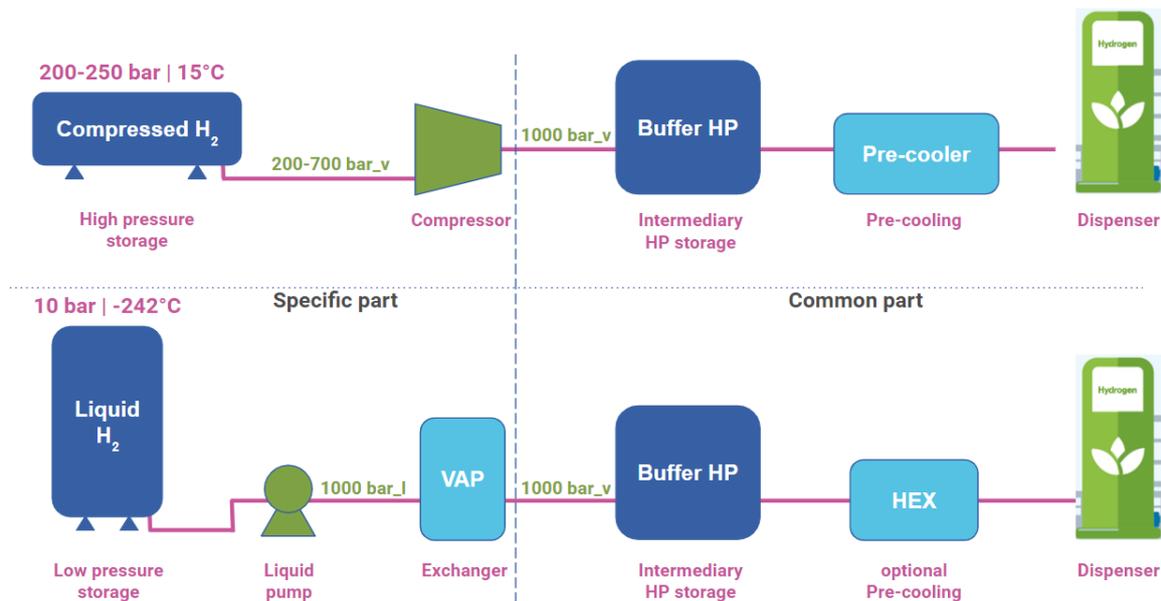


Figura 6. Confronto tra stazioni di rifornimento con stoccaggio di idrogeno gassoso (in alto) e liquido (in basso).

L'LH₂ nelle stazioni viene rifornito da autocisterne di LH₂. Queste generalmente hanno un serbatoio orizzontale da 40 m³ funzionante tra 1 e 12 bar (inventario: 4 t-H₂). Il collegamento tra il serbatoio di stoccaggio e l'autocisterna avviene tramite una linea di trasferimento flessibile. Il trasferimento viene eseguito senza pompa. Sul rimorchio è presente un piccolo vaporizzatore per produrre un innalzamento di pressione nel serbatoio dell'autocisterna e consentire il trasferimento dell'idrogeno liquido nello stoccaggio verticale fisso.

Figura 7 mostra la stazione di rifornimento Linde installata a Oakland (USA).

Lezione 5: Idrogeno Liquido

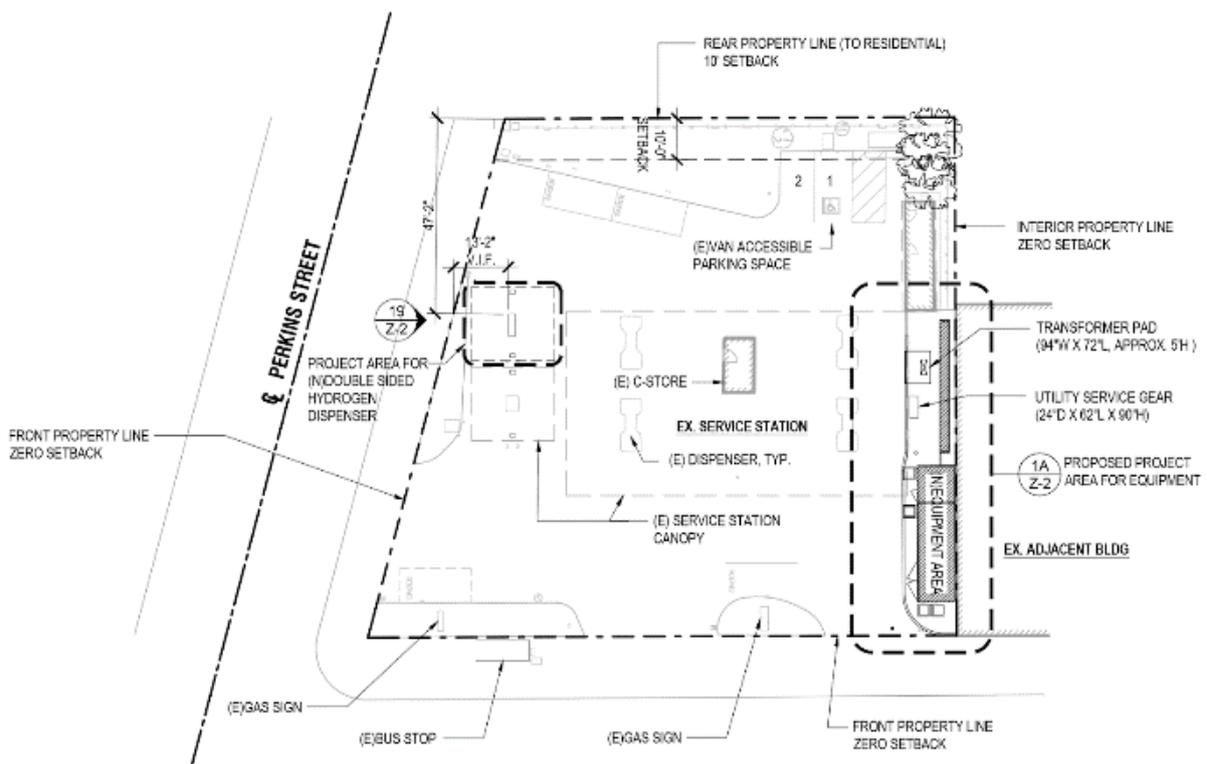


Figura 7. Stazione di rifornimento di Linde con LH₂ ad Oakland. (Fonte: Linde)

In Francia è richiesta una distanza di sicurezza di 20 m tra il demanio pubblico e il serbatoio di idrogeno liquido. Le caratteristiche di sicurezza delle stazioni di rifornimento con LH₂ sono quasi le stesse di una stazione di rifornimento di gas (vedi [Tabella 3](#)).

Tabella 3. Caratteristiche e dispositivi di sicurezza per le stazioni con idrogeno gas/liquido.

Cosa	Dove	Perché
Tubi e raccordi certificati e convalidati	Linea di processo e dispenser	Prevenire rilasci accidentali
Sostituzione periodica del tubo flessibile	Dispenser	Prevenire rilasci accidentali

Lezione 5: Idrogeno Liquido

Rilevazione di H ₂	Nel container Nel dispenser	Attivare l'allarme e le valvole di arresto se necessario in caso di rilasci accidentali
Rilevazioni di fiamme (UV/IR)	Nel container Esterno, vicino al dispenser	Attivare l'allarme e le valvole di arresto se necessario in caso di rilasci accidentali
Valvola automatica di arresto	Diverse posizionate tra il serbatoio di H ₂ e il dispenser	Limitare l'inventario di H ₂ nel caso di rilascio accidentale
Monitoraggio della pressione del processo	Generale	Rilevare una caduta di pressione anomala a causa di perdite o rotture delle tubazioni
Spazi confinati ventilati naturalmente	Container Dispenser	Evitare il raggiungimento dei limiti di infiammabilità per le miscele H ₂ -aria nel caso di rilascio accidentale
Ventilazione forzata	Container per alcuni modelli	Evitare il raggiungimento dei limiti di infiammabilità per le miscele H ₂ -aria nel caso di rilascio accidentale se la ventilazione naturale non è possibile o sufficiente
Apparecchiature certificate ATEX	Spazi confinati dove possono avvenire perdite	Evitare sorgenti di innesco
Flessibile con messa a terra	Dispenser	Prevenire scintille causate dall'elettricità statica durante il rifornimento
Prova di tenuta automatica prima del rifornimento	Generale	Prevenire rilasci accidentali
Riduttori del flusso	Generale	Limitare il flusso di massa nel caso di rilascio accidentale o rottura del tubo
Tempo di chiusura automatico	Generale	Chiudere le valvole di alimentazione H ₂ in caso di rottura del tubo o perdita
Dispositivo di distacco del flessibile	Dispenser	Evitare perdite significative chiudendo l'alimentazione del flessibile in caso di mancato scollegamento dal veicolo
Protezione dall'urto (paletti dissuasori)	Dispenser	Proteggere l'erogatore da urti di veicoli ed evitare perdite catastrofiche
Stop di emergenza	Pochi metri dal dispenser	Chiudere le valvole di alimentazione H ₂ in caso di emergenza
Lastra di cemento conduttiva (messa a terra)	Dispenser	Prevenire scintille causate dall'elettricità statica durante il rifornimento

5.3.1 Bus

La maggior parte degli autobus impiega l'idrogeno come gas compresso. Ci sono, tuttavia, alcuni esempi in cui l'idrogeno è immagazzinato in forma liquida.

6. Pericoli e rischi associati all'idrogeno liquido per i soccorritori

Di seguito sono descritti i rischi per la salute associati al rilascio di idrogeno liquefatto.

- Il contatto con l'idrogeno liquido o i suoi schizzi sulla pelle o negli occhi può causare gravi ustioni da freddo dovute a *congelamento o ipotermia*.
- Le *ustioni criogeniche* possono anche derivare dal contatto di parti non protette del corpo umano con fluidi o superfici fredde.
- L'inalazione di vapori di idrogeno criogenico può causare *disturbi respiratori* e può provocare *asfissia*.
- Il contatto fisico diretto con l'LH₂, vapori freddi o apparecchiature fredde può causare gravi danni ai tessuti. Il contatto momentaneo con una piccola quantità di liquido potrebbe non rappresentare un grande pericolo di ustione perché potrebbe formarsi una pellicola protettiva di idrogeno gassoso in evaporazione. Il pericolo di congelamento si verifica quando vengono versate grandi quantità e l'esposizione è estesa nel tempo.
- Il personale non dovrebbe toccare le parti metalliche fredde e dovrebbe indossare *indumenti protettivi*. Devono anche proteggere l'area interessata con una copertura allentata.
- *Problemi cardiaci* sono possibili quando la temperatura corporea interna scende a 27°C o meno, e il decesso può avvenire quando la temperatura corporea interna scende al di sotto di 15°C.
- L'*asfissia* è possibile se l'idrogeno liquefatto viene rilasciato e vaporizzato in spazi interni.

Bibliografia

1. Rossini FD. A report on the international practical temperature scale of 1968. Commission I.2: Thermodynamics and thermochemistry. International union of pure and applied chemistry. P.557-P.570.
2. Cengel, Yunus A. and Turner, Robert H. (2004). Fundamentals of thermal-fluid sciences, McGraw-Hill, p.78.
3. Klier J., et al, A new cryogenic high-pressure H₂ test area: First results. Proc 12th IIR Int Conf, Dresden (2012).

Lezione 5: Idrogeno Liquido

4. Edeskuty F.J., Stewart W.F., Safety in the handling of cryogenic fluids. The International Cryogenics Monograph Series, Plenum Press, New York (1996).
5. Bonhoeffer, K.F., Harteck, P. Experimente über Para- und Orthowasserstoff. Naturwissenschaften 17, 182 (1929).
6. Proust C., INERIS research performed within PRESLHY. Presentation at the 13th Int Symp Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (ISHPMIE), Braunschweig (2020).
7. NASA. Report of the Presidential Commission on the Space Shuttle Challenger accident (1986). (1997). Available at <http://science.ksc.nasa.gov/shuttle/missions/51-l/docs/rogers-commission/table-of-contents.html> [access 04.04.2021]
8. GTR, Proposal for a Global Technical Regulation (GTR) on hydrogen fuelled vehicles, 2013. ECE/TRANS/WP.29/GRSP/2013/41. United Nations. Economic Commission for Europe. Inland Transport Committee. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, 160th Session, Geneva, 25-28 June 2013.