



European Train the Trainer Programme for Responders

Lezione 9

Distanze di sicurezza da fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

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 I-III.

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

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



Dichiarazione di limitazione di responsabilità

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

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

Disclaimer

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

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

Ringraziamenti

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

Acknowledgements

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

Sommario

Questa lezione è focalizzata sui rilasci di idrogeno innescati. La lezione introduce la terminologia rilevante e la classificazione dei diversi tipi di incendi da idrogeno.

Keywords

Idrogeno, fiamme, incendi, lunghezza di fiamma

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. Terminologia rilevante	6
4. Tipi di incendi e fiamme di idrogeno.....	9
5. Flussi termici radiativi da <i>jet fires</i> e <i>fireballs</i>	9
5.1 Flusso termico radiativo da <i>jet fire</i>	9
5.2 Jet fires: idrogeno e altri combustibili comuni.....	10
6. Incendi di veicoli FC.....	11
Ringraziamenti.....	12
Bibliografia.....	12

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

Spesso, il termine "sicurezza" viene indicato come una barriera "non tecnica" alle tecnologie FCH emergenti. Tuttavia, ci sono diverse sfide ingegneristiche da affrontare prima di lanciare queste tecnologie sul mercato. Una di queste è la riduzione della lunghezza della fiamma del getto di idrogeno dallo stoccaggio a bordo del veicolo FC dal valore attuale di 10-15 m per consentire l'evacuazione e il salvataggio dei passeggeri e la loro salvaguardia da parte dei soccorritori. Un altro importante problema irrisolto è quello di aumentare il grado di resistenza al fuoco dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno a bordo da 1-7 minuti (valore attuale per i *vessel* di tipo IV) in maniera tale da consentire un tempo più lungo per lo spurgo dei serbatoi. Ciò impedirebbe gravi danni alle strutture civili come i garage durante il rilascio accidentale di idrogeno. Inoltre, escluderebbe anche la possibilità di formazione di grandi nubi di idrogeno e aria all'interno dei tunnel, che possono portare a conseguenze letali per l'intera lunghezza del tunnel in caso di incendio. Una maggiore resistenza al fuoco dei serbatoi di stoccaggio

Lezione 9: Fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

dell'idrogeno consentirebbe l'evacuazione sicura dei civili dal luogo dell'incidente, garantendo la sicurezza della vita dei passeggeri e dei soccorritori [1].

Senza dubbio, i vigili del fuoco dovranno affrontare incidenti che coinvolgono fiamme da idrogeno perché è uno scenario tipico di molti incidenti. La conoscenza della possibile lunghezza della fiamma dell'idrogeno e delle relative distanze di separazione sono di fondamentale importanza per i soccorritori. Ci sarà anche una radiazione termica dall'incendio, che può causare danni alle persone e alle strutture, edifici, attrezzature, ecc., a delle distanze oltre la lunghezza della fiamma. Nella presente lezione verranno discussi diversi fattori che influenzano l'estensione di un “*jet fire*”, cioè la fiamma da un getto di idrogeno, e il flusso di calore radiativo associato, inclusa la pressione di stoccaggio dell'idrogeno e la dimensione della perdita. In questa lezione vengono presi in considerazione anche i metodi di rilevamento degli incendi da idrogeno, le tecniche di mitigazione ed estinzione degli incendi da idrogeno.

Alla fine della lezione il soccorritore/ allievo sarà in grado di:

- Distinguere tra diversi tipi di incendi da idrogeno: dalle microfiamme ai *jet fires* e *fireballs*,
- Valutare le lunghezze di fiamma dell'idrogeno con l'ausilio di nomogrammi, correlazioni dimensionali e adimensionali,
- Valutare la posizione media dell'estremità finale del *jet fires*, ossia la fiamma a getto,
- Prevedere le distanze di separazione deterministiche per la tutela di persone e strutture,
- Spiegare l'effetto di diversi fattori sulla lunghezza della fiamma del *jet fire*: dimensione e forma dell'ugello di rilascio, “attaccamento” del getto, galleggiabilità, barriere o muri,
- Confrontare le lunghezze delle fiamme e i flussi di calore dei *jet fires* di idrogeno e altri combustibili comuni (GNC e GPL),
- Spiegare gli effetti da sovrappressione derivanti da *jet fires* di idrogeno,
- Identificare i principali metodi di rilevazione degli incendi da idrogeno,
- Riconoscere le tecniche di mitigazione per gli incendi da idrogeno,
- Implementare le pratiche di estinzione degli incendi da idrogeno,
- Comprendere le principali sfide di sicurezza legate allo stato attuale delle tecnologie FCH.

3. Terminologia rilevante

Al fine di comprendere appieno gli incendi da idrogeno e altri fenomeni correlati (come microfiamme, spegnimento, *lift-off*, *blow-off* and *blow-out*, radiazione termica, visibilità della fiamma, lunghezza e velocità della fiamma, ecc.) sarà utile apprendere alcune definizioni elencate di seguito. Si prega di prestare attenzione ai numeri adimensionali, che saranno usati frequentemente nella presente e nelle prossime lezioni.

Altezza di lift-off è la distanza/altezza fra l'uscita dell'ugello e la base della fiamma “sollevata” [2].

Lezione 9: Fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

Blow-down è il processo di riduzione della pressione all'interno del vessel di stoccaggio durante il rilascio non stazionario [1].

Blow-off è l'estinzione della fiamma ad alta velocità in assenza di *lift-off* [2].

Blow-out è l'estinzione della fiamma ad alta velocità in presenza di *lift-off* [2].

Blow-out limit è il limite di velocità del combustibile alla quale si verifica il *blow-out* di una fiamma in presenza di *lift-off* [2].

Deflagrazione è il processo derivante da un'ignizione debole in una miscela combustibile che propaga a velocità subsonica nella miscela incombusta [3].

Detonazione è il processo in cui l'onda di combustione propaga a velocità supersonica nella miscela incombusta [3].

Diametro effettivo in un getto "sotto-espanso" è il diametro del getto nella posizione in cui si ha l'espansione a 1 bar [4].

Distanza di spegnimento (Quenching gap) è la distanza tra due elettrodi piatti a piastre parallele alla quale viene soppressa l'accensione di miscele combustibili aria-carburante. La distanza di spegnimento è la dimensione dello spazio di passaggio necessaria per impedire la propagazione di una fiamma aperta attraverso una miscela combustibile-aria infiammabile che riempie il passaggio [1].

Drop-back è il riattaccamento all'ugello di rilascio di una fiamma sollevata a seguito di una diminuzione della velocità di *lift-off* [2].

Fiamma non premiscelata (spesso chiamata *fiamma a diffusione*) è la fiamma in cui l'ossidante ed il combustibile non sono miscelati prima di raggiungere il fronte di fiamma. Durante la combustione l'ossidante si combina con il combustibile per diffusione. La velocità di fiamma è limitata dal rateo di diffusione.

Fiamma premiscelata (Premixed flame) è la fiamma in cui l'ossidante è stato miscelato con il combustibile prima del raggiungimento del fronte di fiamma. La combustione di ossidante e combustibile premiscelati forma un sottile fronte di fiamma in quanto i reagenti sono già disponibili.

Flashpoint - Punto di infiammabilità minimo valore di temperatura per cui può esistere una miscela infiammabile vapori – aria sulla superficie del liquido [1].

Getto espanso è un getto la cui pressione all'orifizio di rilascio è uguale a quella atmosferica [1].

Getto sotto-espanso (under-expanded jet) è un getto la cui pressione all'orifizio di rilascio è superiore a quella atmosferica [1].

"*Hazard distance*" è una distanza tra la sorgente del rischio/pericolo al punto in cui si registra un determinato valore di effetto fisico termico o di pressione (calcolato da modellazione fisica

Lezione 9: Fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

o numerica, o dettato da un regolamento) che può portare a una condizione di danno (variabile da "nessun danno" a "massimo danno") a persone, apparecchiature o ambiente.

“*Hazard distance*” (o distanza di separazione) è la distanza minima che separa “target specifici (es. persone, strutture, attrezzatura) dalle conseguenze di potenziali incidenti associati alle operazioni con idrogeno e la sua infrastruttura” [6].

Lift-off della fiamma è la condizione in cui la fiamma ed il bruciatore si separano.

Lunghezza di fiamma visibile è la distanza fra il foro di rilascio e l’estremità finale della fiamma [2]. Immagini digitali da videocamere normali, infrarosse (IR) e ultraviolette (UV) sono spesso usate per misurare la lunghezza di fiamma e queste misurazioni possono variare in base alle differenti immagini [8].

Maximum Allowable Working Pressure (MAWP) è la massima pressione alla quale può essere soggetta una componente o porzione di sistema in pressione nell’intero range di temperatura di funzionamento [5].

Numero di Froude (Fr , Froude number) è il numero adimensionale ottenuto dal rapporto fra le forze inerziali e quelle gravitazionali [1].

Numero di Mach (M) è il numero adimensionale uguale al rapporto tra la velocità locale del flusso e la velocità di propagazione del suono all’interno del fluido stesso [1].

Numero di Reynolds (Re) è il numero adimensionale dato dal rapporto tra le forze inerziali a quelle viscosive [1].

Rateo di resistenza al fuoco (Fire-resistance rating) è una misura del tempo per cui un sistema passivo di protezione dal fuoco può resistere in un test standard di resistenza al fuoco [1].

Sovrapressione (Overpressure) è la pressione dell’onda d’urto al di sopra di quella atmosferica, o la pressione all’interno di una struttura di contenimento che eccede la massima pressione operativa permessa della struttura [5].

Temperatura e Pressione normale (NTP): condizioni di temperatura di 293.15 K e pressione di 101.325 kPa [1].

Velocità di fiamma è la velocità della fiamma rispetto ad un osservatore fisso [3].

Velocità di fiamma laminare è la velocità di propagazione della fiamma relativa alla velocità dei gas incombusti dinanzi ad essa, in determinate condizioni di composizione, temperatura e pressione della miscela incombusta [1].

Velocità di lift-off è la velocità del flusso di combustibile che porta al distanziamento tra la fiamma e l’ugello [2].

4. Tipi di incendi e fiamme di idrogeno

L'idrogeno può bruciare in diverse modalità di combustione, tra cui *flash fire*, *jet fire*, deflagrazione, detonazione, ecc. Gli incendi di idrogeno possono variare da microfiamme con una portata in massa di 10^{-9} kg/s a fiamme ad alta portata (centinaia di kg/s). I rilasci di idrogeno possono bruciare come diffusione laminare o fiamme turbolente non premiscelate a seconda del numero di Reynolds (Re) al foro di uscita della perdita. Le fiamme possono essere controllate dalla galleggiabilità e dalla quantità di moto. La maggior parte dei rilasci pericolosi di idrogeno avverrà in un regime dominato dalla quantità di moto. I *jet fires*, cioè le fiamme a getto, possono essere, a seconda delle condizioni di uscita del rilascio, subsonici (numero di Mach $M < 1$), sonici e supersonici altamente sotto-espansi (*under-expanded jet fires*). Negli scenari in cui è possibile un guasto del serbatoio di stoccaggio con l'immediato rilascio di idrogeno nell'atmosfera circostante si possono formare *fireball*, cioè delle “*sfere di fuoco*” di grandi dimensioni (decine di metri). La presenza di ostacoli, superfici e confinamenti influisce notevolmente sui *jet fires*. Un caso particolare sono gli incendi che coinvolgono idrogeno liquefatto (LH₂) della quale si ha una conoscenza limitata. Particolari lacune si riscontrano sulla conoscenza dell'effetto della condensazione e la solidificazione dell'ossigeno (dall'atmosfera) in caso di perdita/versamento di LH₂ che a determinate condizioni possono portare a miscele esplosive.

5. Flussi termici radiativi da *jet fires* e *fireballs*

5.1 Flusso termico radiativo da *jet fire*

In un'atmosfera pulita l'idrogeno brucia con una fiamma invisibile. Ha una temperatura adiabatica di fiamma per una miscela stechiometrica in aria di 2403 K, leggermente superiore rispetto ad altri combustibili. Questa temperatura può causare gravi lesioni sul luogo di un incidente, specialmente in un ambiente di laboratorio pulito dove la fiamma dell'idrogeno è praticamente invisibile. Tuttavia, la combustione dell'idrogeno e le correnti calde causano cambiamenti nell'ambiente circostante che possono essere utilizzati per rilevare la fiamma. Sebbene la fiamma dell'idrogeno non luminosa renda difficile il rilevamento visivo, vi è un forte effetto del calore e della turbolenza sull'atmosfera circostante e l'innalzamento dei prodotti di combustione caldi. Questi cambiamenti sono chiamati la *firma del fuoco* (*the signature of the fire*).

La sezione seguente si basa sul lavoro svolto presso l'Ulster nel centro HySAFER [7]. Prima di discutere il flusso di calore radiativo, vale la pena notare che una fiamma a idrogeno emette una radiazione infrarossa minima e praticamente nessuna radiazione visibile. A causa dell'assenza di bande di radiazione di CO₂ e del forte assorbimento da parte del vapore acqueo ambientale, il rapporto tra la lunghezza di fiamma visibile e infrarosso è 0,88 e il rapporto tra la lunghezza della fiamma ultravioletta e infrarossa è 0,78 [9]. Tuttavia, i flussi di calore

Lezione 9: Fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

convettivo e radiativo rimangono ancora importanti e devono essere valutati per la protezione della vita, del patrimonio e dell'ambiente.

L'effetto del flusso di calore radiativo su persone, ambiente e strutture è discusso in dettaglio nella Lezione 6 - Criteri di danno per persone e patrimonio.

5.2 Jet fires: idrogeno e altri combustibili comuni

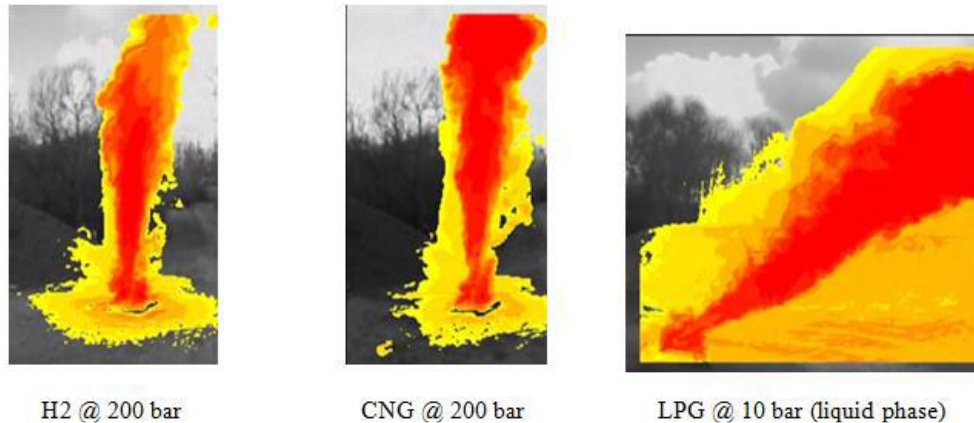


Figura 1. Immagini infrarosse di *jet fires* e la radiazione termica prodotta dalla combustione di idrogeno (200 bar), CNG (200 bar) ed LPG (10 bar – fase liquida).

Come si evince dalla [Figura 1](#), a causa della combustione incompleta, CNG e GPL producono CO₂, CO, fuliggine e altri prodotti, che hanno un effetto maggiore sulla radiazione rispetto all'idrogeno. Questo fenomeno spiega perché la combustione dell'idrogeno sia caratterizzata da effetti termici inferiori rispetto ad altri comuni combustibili, anche se la temperatura supera quella di una fiamma a metano. La [Figura 1](#) mostra il confronto della radiazione termica prodotta da idrogeno (200 bar), CNG (200 bar) e GPL (10 bar) - la firma termica del *jet fire* d'idrogeno è leggermente inferiore a quella del CNG ed entrambe sono significativamente inferiori alla radiazione termica di una fiamma GPL.

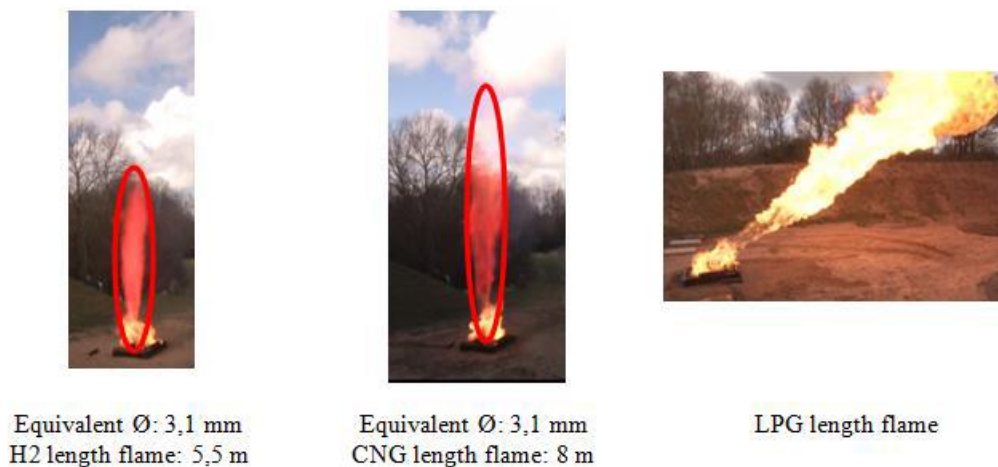


Figura 2. Confronto delle lunghezze di fiamma (*length flame*) per *jet fires* d'idrogeno (diametro foro di rilascio 3.1 mm), CNG (diametro foro di rilascio 3.1 mm), e LPG.

Lezione 9: Fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

Le lunghezze di fiamma calcolate in funzione del diametro TPRD in alcuni casi tipici sono mostrate nella Tabella 1. Lo strumento – Correlazione della lunghezza di fiamma e tre *hazard distances* per *jet fires* – in e-Laboratory (<https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>) è stato implementato per ottenere i risultati.

Tabella 1. Lunghezza di fiamma calcolata e diametro TPRD in casi tipici.

Pressione stoccaggio (bar)	Diametro foro di rilascio (mm)	Temperatura stoccaggio (°C)	Lunghezza di fiamma (m)
350	1.0	20	2.6
700	1.0	20	3.3
350	1.0	50	2.5
700	1.0	50	3.2
350	3.0	20	7.8
700	3.0	20	9.9
350	3.0	50	7.5
700	3.0	50	9.6
350	1.0	100	3.1
700	3.0	100	9.2

6. Incendi di veicoli FC

I veicoli a celle a combustibile (FCV) sono una delle principali applicazioni in rapido sviluppo delle tecnologie FCH. Simile a un'auto elettrica a batteria, un'auto a celle a combustibile non ha il motore a combustione interna. Le celle a combustibile convertono l'energia immagazzinata in forma chimica direttamente in energia elettrica che alimenta le auto. In tutto il mondo sono presenti diverse migliaia di FCV e piccole flotte di auto a celle a combustibile vengono utilizzate soprattutto da aziende e agenzie governative, ma anche da privati. Questi includono modelli seriali rilasciati da Hyundai (cella a combustibile iX35 e NEXO) e modelli Toyota Mirai I e II. Più di mille auto circolano in Germania con un centinaio di stazioni di rifornimento in funzione. Inoltre, alcune auto dei vigili del fuoco sono già veicoli a celle a combustibile.

Secondo le statistiche sugli incendi in Gran Bretagna [10], nel Regno Unito sono stati registrati 28.800 incendi di veicoli stradali nel periodo 2011-2012. Per fare un confronto, nello stesso periodo negli Stati Uniti si sono verificati 172.500 incendi di automobili. Sono stati colpiti diversi tipi di veicoli: automobili, automezzi pesanti, veicoli commerciali leggeri, veicoli per il trasporto pubblico, ecc. La maggior parte degli incendi (65%) si è verificata nelle automobili,

Lezione 9: Fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

il 10% nei furgoni, il 4% negli autocarri e il 2% negli autobus o minibus [10]. Le cause degli incendi possono essere accidentali, intenzionali o sconosciute. La maggior parte degli incendi deliberati (43%) ha coinvolto veicoli stradali: 13.900 incendi. Il numero di vittime di incendi di veicoli stradali nel 2011-12 è stato di 37 [10].

Durante il periodo dal 2000 al 2006, sono stati documentate 20 rotture catastrofiche di serbatoi di metano, 11 dei quali sono stati attribuiti a incendi di veicoli [11]. Di questi 11 incidenti, le prove e testimonianze suggeriscono che nella maggior parte dei casi il PRD non si è attivato (in caso di incendio localizzato). "I test hanno dimostrato che tutti i serbatoi di carburante (sia CNG che idrogeno) indipendentemente dalla pressione di esercizio sono altamente suscettibili ad un rapido degrado a causa di incendi localizzati" [11]. Ciò significa che una rottura catastrofica non può essere esclusa dalla valutazione di rischio [10].



Figura 3. *Jet fire* d'idrogeno ed incendio di benzina: 3 s (sinistra) e 60 s (destra) dopo l'iniziazione dell'incendio del veicolo [13].

I pericoli e i relativi rischi per gli FCV dovrebbero essere provati e interpretati in modo professionale, con la piena comprensione delle conseguenze da parte di tutte le parti interessate, a partire dai progettisti del sistema FC, i regolatori fino agli utenti finali. Il primo confronto della "gravità" di perdite e accensioni di idrogeno e benzina è stato eseguito da Swain [13]. La Figura 3 mostra le istantanee della fiamma a getto di idrogeno e dell'incendio della benzina a 3 s (a sinistra) e 60 s (a destra) dopo l'inizio di un incendio in un'auto. Va notato che queste prime immagini NON riflettono il più recente design con direzione inclinata della TPRD e diametro inferiore.

Ringraziamenti

Si ringrazia il progetto HyResponse in quanto il materiale presentato in questo documento è basato sulle lezioni sviluppate in HyResponse.

Bibliografia

1. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.

Lezione 9: Fiamme di idrogeno ed estinzione degli incendi

2. Cheng, TS, Chiou, CR (1998). Experimental investigation of the characteristics of turbulent hydrogen jet flames. *Combustion Science and Technology*. Col. 136, p. 81-84.
3. Dorofeev, SB (2009). Evaluation of hydrogen explosion hazards: phenomenology and potential flame acceleration and DDT. 4th European Summer School on Hydrogen Safety.
4. Birch, AD, Brown, MG, Dodson, MG, Swaffield, F (1984). The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas. *Combustion Science and Technology*. Vol. 36, p. 249-261.
5. NFPA®52. Vehicular Natural Gas Fuel Systems Code, 2019 Edition.
6. LaChance, J, Tchouvelev, A and Engebo, A (2011). Development of uniform harm criteria for use in quantitative risk analysis of the hydrogen infrastructure. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36 p. 2381-2388.
7. Saffers, JB (2010). Principles of hydrogen safety engineering. PhD thesis. University of Ulster.
8. Schefer, RW, Houf, WG, Bourne, B and Colton, J (2006). Spatial and radiative properties of an open-flame hydrogen plume. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 31, pp. 1332-1340.
9. Houf, WG and Schefer, RW (2007). Predicting radiative heat fluxes and flammability envelopes from unintended releases of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 32, pp. 136-151.
10. Case for safety. Relative frequency of failure modes. Available from: http://h2safe.net/case_safety.html [accessed on 25.11.20].
11. Fire statistics, Great Britain, 2011-2012. Department of Communities and Local Government.
12. Gambone, LR and Wong, JY (2007). Fire protection strategy for compressed hydrogen-powered vehicles. 2nd International Conference on Hydrogen Safety, San Sebastian, Spain, 11-13 September, 2007.
13. Swain, MR (2001). Fuel leak simulation. Proceedings of the 2001 DOE Hydrogen Program Review. Available from: <https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/30535be.pdf> [Accessed 25.11.20].