

**PROGRAMMA DI RICERCA, UNIVERSITÀ DI PISA / MINISTERO DELL'AMBIENTE,
RIGUARDANTE LE STAZIONI DI RIFORNIMENTO IDROGENO**

Grasso, N. 1, Carcassi, M. 1, Fardelli, A. 2 e Trotta N.V. 2

**1 Università degli Studi di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione,
via Diotallevi n. 2, Pisa, 56126, Italia**

n.grasso@ing.unipi.it; carcassi@ing.unipi.it

**2 CNR - Istituto sull'Inquinamento Atmosferico - Area della Ricerca ROMA1, via Salaria Km 29,300
C.P. 10, Monterotondo (Roma), 00016, Italia**

fardelli.antonio@minambiente.it; trotta.nicoletta@minambiente.it

SOMMARIO

La presente memoria illustra l'attività e i principali risultati conseguiti con il programma di ricerca riguardante le "stazioni di rifornimento idrogeno" svolto dall'Università di Pisa - Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione nell'ambito di una Convenzione siglata con il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (gennaio 2003 - giugno 2005). Il programma è stato articolato secondo tre Azioni principali (aspetti di sicurezza, normativa e attività sperimentali) mirate ad approfondire le problematiche legate a questo tipo di impianti. Il lavoro svolto ha prodotto una serie di banche dati e di documenti tecnici che costituiscono lo stato dell'arte sull'argomento e senza dubbio uno strumento fondamentale per un Ministero che voglia essere attivo nel settore.

1.0 INTRODUZIONE

Il programma di ricerca riguardante le "stazioni di rifornimento idrogeno" è stato svolto nel quadro di una Convenzione siglata alla fine del 2002 tra il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio (Direzioni Inquinamento Atmosferico e Rischi Industriali e Valutazione di Impatto Ambientale) e l'Università di Pisa (Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione).

L'oggetto del programma era allora un argomento nuovo e di particolare interesse, in considerazione delle iniziative che a quel tempo si stavano sviluppando anche in Italia con i progetti di Torino e Milano, dove si prevedeva di realizzare concretamente tali stazioni e dove il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio era coinvolto come partner finanziatore. Si ponevano infatti specifici problemi di sicurezza connessi con le peculiarità del nuovo combustibile utilizzato, che, come prodotto, cominciava ad uscire dal campo industriale per affacciarsi in quello civile; inoltre, era necessario chiarire gli aspetti autorizzativi e normativi connessi con la realizzazione di una stazione di rifornimento e la circolazione di un veicolo alimentato ad idrogeno; non ultimo, occorreva approfondire alcuni comportamenti non ancora ben chiari connessi con le proprietà chimico-fisiche dell'idrogeno.

Il programma di ricerca è stato quindi indirizzato all'analisi sia tecnica che normativa delle problematiche ingegneristiche e di sicurezza relative alle stazioni di rifornimento sopraindicate. In particolare, è stato deciso di inquadrare le problematiche relative a questi impianti attraverso tre Azioni specifiche:

- Azione #1: Stato dell'arte delle stazioni di rifornimento di idrogeno
- Azione #2: La normativa tecnica e legislativa relativa alle stazioni di rifornimento di idrogeno
- Azione #3: Azioni sperimentali in ausilio al processo autorizzativo relativo alle stazioni di rifornimento di idrogeno.

La Convenzione ha avuto una durata di due anni e mezzo e si è conclusa nel giugno 2005.

Di seguito si riporta una descrizione degli obiettivi di ciascuna Azione, dell'attività svolta, dei principali risultati ottenuti e delle conclusioni che si sono raggiunte.

2.0 AZIONI SVOLTE E RISULTATI OTTENUTI

2.1 Azione #1, Stato dell'arte delle stazioni di rifornimento di idrogeno

L'Azione #1 ha avuto come obiettivo quello di fornire uno stato dell'arte delle stazioni di rifornimento di idrogeno, in quanto considerato uno strumento fondamentale per impostare un programma di controllo e sviluppo sulla tematica. Nell'ambito di questa Azione si sono individuate e classificate le stazioni di rifornimento di idrogeno presenti e in costruzione nel mondo, insieme a tutte le informazioni tecniche utili che è stato possibile raccogliere (*layout*, tipo di approvvigionamento, componenti e loro caratteristiche, pressioni di esercizio, modalità di erogazione, ecc.). Queste informazioni sono state inserite in una apposita banca dati, che è stata inoltre integrata anche con lo stato dell'arte delle iniziative presenti e previste sia nel campo della mobilità (autoveicoli, autobus, ecc.) sia in quello delle altre applicazioni stazionarie connesse con il vettore idrogeno (tipicamente sistemi integrati di impiego di idrogeno e celle a combustibile) sia in quello degli idrogenodotti. L'attività svolta e le conclusioni raggiunte sono state riassunte nell'apposito documento finale di sintesi previsto per questa Azione, incentrato sulle problematiche di sicurezza delle varie soluzioni impiantistiche adottate e sulle misure per la riduzione dei rischi.

L'analisi critica delle diverse tipologie di stazione di rifornimento di idrogeno ha messo in evidenza due "impianti tipo" che al momento sono i più diffusi e che tendenzialmente sono quelli verso i quali le politiche nazionali dei vari paesi tendono per la futura introduzione dell'idrogeno nel mercato della mobilità:

1. stazione di rifornimento di idrogeno gassoso compresso con produzione in sito oppure con fornitura esterna (condotta, carro bombolaio, pacchi bombole)
2. stazione di rifornimento di idrogeno liquido fornito dall'esterno mediante autocisterna.

Allo stato attuale, nel mondo esistono e sono in funzione 38 stazioni di rifornimento di idrogeno e circa 20 stazioni sono di prossima apertura (con questo termine si intende che la loro apertura è programmata per la fine del 2004); alcune di queste sono dotate di doppia colonnina di distribuzione e consentono il rifornimento sia di veicoli ad idrogeno compresso che di veicoli ad idrogeno liquido. La netta maggioranza delle stazioni di rifornimento è senza dubbio ad idrogeno compresso e l'incidenza percentuale di questa tipologia di impianto è prevista in aumento per la fine del 2004.

Quella seguente è una rassegna dei principali aspetti di sicurezza e delle soluzioni per la riduzione dei rischi che sono emersi dalla ricerca svolta nel caso della stazione di rifornimento di idrogeno, sia esso in fase gassosa che in fase liquida. È chiaro comunque che accanto alle misure indicate, che rappresentano delle salvaguardie mirate alla mitigazione delle conseguenze, è sempre necessario condurre anche delle idonee azioni finalizzate alla riduzione della frequenza di accadimento degli eventi incidentali, secondo una filosofia volta alla prevenzione degli incidenti: ciò significa per esempio effettuare uno studio accurato e dettagliato dei sistemi, al fine di dotarli di opportuni dispositivi di protezione e/o sicurezza, e certamente di prevedere e predisporre una adeguata informazione/formazione del personale addetto all'attività.

Per quanto riguarda una stazione di rifornimento di idrogeno per autotrazione, i requisiti generali di sicurezza da mettere in pratica allo scopo di prevenire eventi incidentali sono connessi con:

1) Ubicazione e *layout* di impianto

Per la riduzione del rischio derivante da ubicazione e *layout* di impianto, le stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto devono:

- essere ubicate in aree aperte, prive di impedimenti aerei
- non essere localizzate in prossimità di centri urbani densamente abitati, di linee ferroviarie o di strade ad alto traffico
- essere completamente recintate con rete metallica su cordolo di calcestruzzo ad esclusione dell'unità di rifornimento (o colonnina di erogazione) in quanto elemento aperto al pubblico

- garantire sempre la massima accessibilità ai mezzi e alle squadre di soccorso per favorire l'operatività e quindi una maggiore efficacia in caso di intervento urgente
- garantire un idoneo grado di isolamento e separazione reciproca dei componenti pericolosi di impianto (impiego di distanze di sicurezza).

2) Rischio derivante da sovrappressioni e/o sovratemperature

Per la riduzione del rischio derivante da sovrappressioni e/o sovratemperature, l'intero impianto di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto deve essere dotato di:

- componenti certificati contro il rischio derivante dalla pressione: componenti che soddisfano le prescrizioni della Direttiva PED sulle attrezzature a pressione (D.Lgs 93/2000 [1])
- un sistema di arresto di emergenza dell'impianto: sistemi automatici asserviti ad ogni componente e pulsanti per lo spegnimento manuale di emergenza, posti in zone facilmente accessibili e che provvedano all'emissione di appositi segnali di allarme (acustici e visivi)
- valvole di intercettazione dei vari componenti: ogni sistema della stazione deve essere dotato di valvole di intercettazione, sia automatiche che manuali, per l'isolamento del componente
- valvole di sicurezza per il rilascio della sovrappressione su ogni sistema di contenimento idrogeno; tali valvole hanno il compito di scaricare l'idrogeno in luogo sicuro
- un sistema di arresto automatico del rifornimento per alta pressione che intervenga quando nel serbatoio del veicolo viene raggiunta una determinata pressione, indipendentemente dal valore della temperatura; si deve anche prevedere un sistema per il recupero dell'idrogeno.

3) Rischio derivante da incendio e/o esplosione

Per la riduzione del rischio derivante da incendio e/o esplosione, l'intero impianto di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto deve essere:

- privo di sorgenti di ignizione quali fiamme libere, scintille derivanti da circuiti elettrici e da scariche di tipo elettrostatico, corpi caldi o incandescenti, ecc.
- dotato di impianto di messa a terra di tutti componenti e parti metalliche, nonché delle masse estranee; i sistemi ed i componenti dell'impianto che impiegano idrogeno devono essere messi a terra tutti insieme, attraverso collegamenti equipotenziali; in particolare, durante il rifornimento deve essere messo a terra anche il veicolo, insieme a tutte le apparecchiature che sono operative
- dotato di sistemi di protezione da scariche atmosferiche e da scariche elettrostatiche; anche gli indumenti degli operatori devono essere adeguati da questo punto di vista
- dotato di una linea di inertizzazione per tutti i sistemi/circuiti idrogeno; per l'idrogeno gassoso si impiega azoto mentre per l'idrogeno liquefatto si deve ricorrere all'elio
- dotato di sistemi e componenti certificati ad uso idrogeno: sistemi e componenti che soddisfano le prescrizioni della Direttiva ATEX in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva (D.P.R. 126/98 [2]); le apparecchiature ed i sistemi elettrici devono essere adeguati per l'installazione nei luoghi pericolosi che sono stati determinati mediante classificazione delle aree svolta secondo le vigenti normative (CEI EN 60079-10 [3]).

4) Rischio derivante da errori umani

Questo risulta essere un fattore certamente di difficile valutazione, ma che può essere almeno in parte ridotto mediante la formazione ed informazione del personale addetto (D.Lgs 626/94 [4]) e mediante

l'affissione di idonea cartellonistica (D.Lgs 493/96 [5]), ben visibile in ogni area di accesso alla stazione di rifornimento e contenente informazioni circa:

- divieto di fumare e/o di utilizzare fiamme libere
- posizione dei sistemi di gestione degli incendi ed in generale delle emergenze (estintori, idranti, ecc.) con le relative procedure operative
- posizione dei pulsanti manuali per l'arresto di emergenza dell'impianto
- posizione delle valvole manuali di intercettazione del flusso di idrogeno ai vari componenti
- indicazione delle vie di fuga con il relativo percorso
- indicazione, in prossimità della colonnina di rifornimento, dell'obbligo di spegnimento e messa a terra del veicolo, nonché l'affissione della dettagliata procedura di rifornimento.

2.2 Azione #2, La normativa tecnica e legislativa relativa alle stazioni di rifornimento di idrogeno

L'Azione #2 ha avuto come obiettivo quello di fornire una panoramica della normativa tecnica e legislativa, sia generica che particolare, di pertinenza delle stazioni di rifornimento, comprensiva delle attività in via di sviluppo in campo nazionale ed internazionale. Nell'ambito di questa Azione è stata inoltre fornita una panoramica degli approcci, sia a livello comunitario che mondiale, delle norme tecniche di riferimento per quanto riguarda i vettori e le relative procedure di omologazione.

Come avvenuto per l'Azione #1, le suddette informazioni sono state inserite in una apposita banca dati e l'attività svolta e le conclusioni raggiunte sono state riassunte nel documento finale di sintesi previsto per questa Azione, all'interno del quale, per i documenti ritenuti più rilevanti, è stata svolta un'analisi critica e, quando possibile, comparativa, puntualizzando sia le carenze attuali che gli elementi di analogia e di differenza riscontrati.

Alla luce del lavoro svolto si possono fare le seguenti conclusioni:

- 1) La situazione attuale sulle normative per stazioni di rifornimento di idrogeno e più in generale per le applicazioni dell'idrogeno come vettore energetico si presenta tuttora in forte sviluppo sia a livello nazionale che europeo e mondiale.
- 2) In Italia non è ancora stata pubblicata una normativa specificamente dedicata alla progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione; occorre in primo luogo autorizzare l'impiego dell'idrogeno come possibile carburante per autotrazione erogabile e commerciabile e stabilire le caratteristiche che deve possedere per essere utilizzato come tale. Al momento la Regione Piemonte è l'unica che ha indicato esplicitamente l'idrogeno tra i carburanti per autotrazione nella propria Legge Regionale sulla rete carburanti [6].
- 3) Ciononostante sembrano comunque già essere presenti tutti gli "ingredienti" per poter realizzare una stazione in Italia:
 - la procedura autorizzativa da seguire è nota ed è valida per l'installazione di qualsiasi impianto per la distribuzione di carburante per autotrazione; a tale procedura si dovrà necessariamente fare riferimento anche per la realizzazione di una stazione di rifornimento di idrogeno, che, in quanto impianto di distribuzione carburanti, deve essere autorizzato ed approvato in base alla legislazione nazionale esistente in materia, dal momento che una armonizzazione a livello internazionale non appare strettamente necessaria come per i veicoli e i relativi componenti (se si esclude l'importante eccezione dell'interfaccia di rifornimento e le relative procedure di gestione)

- allo stato normativo attuale l'approvazione del progetto di una stazione di rifornimento è principalmente a discrezione del competente Comando Provinciale dei Vigili del Fuoco, sulla base delle valutazioni dei rischi connessi e della descrizione delle misure di prevenzione e protezione antincendio che si vogliono attuare per ridurli. A questo proposito si ricorda che è stato approvato dal Ministero dell'Interno uno schema di regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio di una stazione di rifornimento di idrogeno gassoso [7]; il testo ha ricevuto i pareri positivi di altri Ministeri competenti (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Ministero delle Attività Produttive) e ha espletato la procedura di informazione in sede comunitaria ai sensi della direttiva 98/34/CE [8] senza che la Comunità Europea formulasse alcuna osservazione né parere circostanziato; di conseguenza dovrebbe essere quanto prima emanato in forma di Decreto Ministeriale. Si noti che, anche se questo documento non è stato ancora pubblicato e quindi a livello ufficiale permane la preesistente assenza di specifiche disposizioni in materia, i Comandi Provinciali dispongono adesso di una linea guida per esprimere i loro pareri sugli eventuali progetti di stazioni di rifornimento di idrogeno che saranno loro sottoposti. Il documento consentirà uniformità di giudizio e di valutazione e quindi la costruzione sul territorio nazionale di stazioni rispondenti a identiche strategie di sicurezza.
- i documenti internazionali analizzati mostrano un buon accordo con il predetto schema nelle prescrizioni per una corretta costruzione degli edifici di alloggiamento dei sistemi idrogeno; restano ancora evidenti differenze per quanto riguarda la separazione dei sistemi della stazione mediante distanze di sicurezza, che nel caso italiano risultano ben superiori rispetto ai documenti internazionali
- le direttive europee (attraverso i Requisiti Essenziali di Sicurezza in esse indicati) dettano i criteri per la realizzazione di:
 - macchine [9]
 - attrezzature a pressione (PED [1], TPED [10])
 - apparecchi per atmosfere potenzialmente esplosive (ATEX [2]), ecc.
- è presente una regolamentazione di sicurezza sui luoghi di lavoro con pericolo di esplosione (ATEX II [11])

Per quanto riguarda in particolare lo schema di regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio di una stazione di rifornimento di idrogeno gassoso si possono indicare le caratteristiche salienti:

- Il testo segue lo schema standard di regola tecnica di prevenzione incendi, mutuandone puntualmente i contenuti in via analogica dal D.M. 24/05/02 [12], che disciplina gli impianti di distribuzione stradale di gas naturale per autotrazione, opportunamente adattato alla specificità del rifornimento di idrogeno. È stata fatta questa scelta per sfruttare la consolidata ed affidabile struttura che caratterizza il testo e ne rende i contenuti più facilmente accessibili da parte degli addetti ai lavori. Inoltre, l'approccio prescrittivo che distingue lo schema suddetto è stato giudicato particolarmente appropriato in relazione alla necessità di uniformare le caratteristiche di sicurezza dei primi impianti di distribuzione che sarebbero stati costruiti seguendo le disposizioni del testo.
- Le tipologie di impianto previste sono quattro:
 - impianti alimentati da condotta (già contemplato per il gas naturale nel D.M. 24/05/02)
 - impianti alimentati da carro bombolaio (già contemplato per il gas naturale nel D.M. 24/05/02)
 - impianti alimentati con idrogeno prodotto in sito
 - piccoli impianti alimentati con idrogeno prodotto in sito mediante elettrolisi od altri sistemi, di capacità inferiore a 50 Nm³/h

- La stazione non è solo “deposito” ma anche “impianto di produzione”: l’elemento nuovo è proprio l’impianto di produzione in sito dell’idrogeno che, se previsto, dovrà essere oggetto di specifica valutazione di rischio, da svolgere coerentemente con le modalità seguite quando una particolare attività soggetta a controllo di prevenzione incendi non è regolata da alcuna regola tecnica [13]. Infatti, le modalità tecniche adottabili per la realizzazione dell’impianto di produzione in sito, variegata ed in continua evoluzione, e le difficoltà di tradurle in forma deterministica hanno reso preferibile per questi sistemi una strategia di sicurezza fondata sulla metodologia dell’analisi di rischio tralasciando, in questo unico caso, l’approccio prescrittivo che invece caratterizza l’intero documento
- È consentita una pressione massima all’erogatore di 350 bar, per allineare le caratteristiche e gli standard di rifornimento a quelli ormai consolidati a livello internazionale
- I cosiddetti elementi pericolosi dell’impianto (impianto per la produzione in sito di idrogeno, cabina di riduzione e di misura, locale compressori, locale contenente recipienti di accumulo, apparecchi di distribuzione, box per i carri bombolai) devono essere continuamente sorvegliati mediante l’installazione di un impianto di rilevazione d’idrogeno ed un impianto di rilevazione di fiamma collegati con il sistema di emergenza della stazione
- Le distanze di sicurezza prescritte dagli elementi pericolosi dell’impianto sono identiche, per valori di pressione fino a 200 bar, a quelle richieste nel caso del gas naturale all’interno del D.M. 24/05/02; questa scelta è stata fatta sia perché quei valori sono risultati coerenti con le aree di danno desunte da rapporti di sicurezza validati e relativi ad attività a rischio di incidente rilevante con presenza di stoccaggio di idrogeno a tali pressioni di accumulo sia per la continua sorveglianza richiesta mediante i sistemi sopraindicati. Per valori di pressione superiori e fino a 350 bar, data l’incertezza derivante dalla mancanza di esperienza operativa e di analogia documentazione per tali campi di pressione, è stato ritenuto opportuno incrementare del 50% le distanze suddette piuttosto che ricorrere ad altre misure di protezione passiva, come le pareti tagliafiamma, che avrebbero ulteriormente appesantito un *layout* di impianto di per sé già pesante. Ciò non esclude comunque una futura revisione delle suddette distanze alla luce delle esperienze di esercizio
- È consentita la costruzione di impianti di distribuzione di idrogeno installati nell’ambito di stazioni di distribuzione stradale di altri carburanti (impianti misti).

2.3 Azione #3, Azioni sperimentali in ausilio al processo autorizzativo relativo alle stazioni di rifornimento di idrogeno.

Questa Azione è stata motivata dal fatto che la pericolosità delle stazioni di rifornimento di idrogeno è legata anche agli ipotetici incidenti identificati dall’analisi di sicurezza delle stazioni stesse. L’Azione ha avuto due principali obiettivi:

- 1) la progettazione esecutiva, comprensiva delle valutazioni economiche anche relative alla logistica di esecuzione in un sito da determinare, di una specifica apparecchiatura sperimentale finalizzata a verificare se la combustione dell’idrogeno rilasciato in ambiente aperto da un sistema di stoccaggio di caratteristiche analoghe a quelle impiegate in una stazione di rifornimento (1000 litri a 200-300 bar) è capace di innescare il meccanismo della UVCE (*Unconfined Vapor Cloud Explosion*) o soltanto il fenomeno del *Flash Fire*
- 2) la realizzazione di una campagna sperimentale da effettuare con l’apparecchiatura già esistente presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione (*Chambre View Explosion*), tesa ad identificare l’influenza della distribuzione dell’idrogeno, in caso di fuoriuscita dello stesso in un ambiente confinato, sul transitorio di pressione susseguente alla sua ignizione; ciò ha consentito sia di creare dati scientifici su tale transitorio, attualmente non disponibili per le scale proposte, sia di verificare le formule/normogrammi di calcolo che i progettisti usano per il dimensionamento delle aperture da prevedere nei locali dove l’idrogeno potrebbe accumularsi

1° Obiettivo

Per quanto riguarda il primo obiettivo, l'attività ha prodotto il progetto esecutivo dell'apparecchiatura sperimentale denominata HydRA (*Hydrogen Release Accident*) per il rilascio di idrogeno in campo aperto, comprensivo di relazione tecnica descrittiva, procedure operative, analisi di sicurezza, calcoli di dimensionamento, computo metrico estimativo, elaborati grafici (P&I, complessivo dell'apparecchiatura, esecutivo delle opere civili), matrice sperimentale e note relative alla strumentazione necessaria.

L'apparecchiatura è capace di realizzare una fuoriuscita di circa 25 kg di gas idrogeno in tempi abbastanza ristretti (circa 1 min) onde realizzare una nube non confinata di gas da assoggettare ad ignizione; pertanto consente uno studio della fenomenologia in scala ridotta. L'idrogeno utilizzato per la prova è stoccato in pacchi bombole, così da limitarne la quantità nel sito delle esperienze rispetto ad un carro bombolaio e minimizzare le problematiche connesse alla gestione di grandi quantitativi di gas infiammabile (distanze di sicurezza, pareti di confinamento, trasporto, ecc.). La quantità di idrogeno necessaria a condurre una esperienza viene immagazzinata in un apposito serbatoio di accumulo di volume pari a 10 m³ (pressione di esercizio di 36 bar, pressione di progetto di 40 bar) dotato di una tubazione di efflusso di diametro opportuno a consentire il rilascio previsto a progetto e di peso tale da garantire una maggiore stabilità propria contro le vibrazioni indotte dall'efflusso. La scelta della taglia del serbatoio rappresenta un compromesso fra avere a disposizione un componente di piccole dimensioni (minori problematiche di aree di installazione, minori costi) e, nel contempo, consentire una pressione di esercizio non eccessivamente alta, così da minimizzare le problematiche connesse al rilascio (vibrazioni e velocità di efflusso). Il serbatoio e tutti i componenti dell'impianto saranno costruiti in accordo alla Direttiva PED [1] e alla Direttiva ATEX [2] e per la loro collocazione è prevista la realizzazione di un locale nel rispetto delle norme antincendio. Per ragioni di sicurezza, il punto di rilascio ed innesco dell'esperienza è posizionato ad una distanza di 40 m dalla zona del serbatoio e dei pacchi bombole e di almeno 75 m dalla postazione di comando. La postazione sarà protetta da un muro verticale alto 3 m e largo non meno di 2.5 m, con armatura e spessore tali da resistere ad una sovrappressione di 0.2 bar; in tal modo, anche in caso di deflagrazione accidentale di idrogeno presso lo stoccaggio, è garantita la sicurezza degli operatori.

L'analisi dei rischi ha evidenziato che i pericoli connessi all'esercizio dell'apparecchiatura HydRA sono essenzialmente tre:

- scoppio delle bombole o del serbatoio di accumulo per cedimento strutturale
- possibili rilasci accidentali dal deposito bombole o dal serbatoio di stoccaggio o dalle tubazioni di connessione, con conseguente innesco e deflagrazione di una miscela idrogeno-aria
- generazione di un'onda di pressione a seguito della deflagrazione sperimentale.

Il computo metrico estimativo prevede per l'apparecchiatura una spesa a totale lavori di € 195.055,00 (fornitura energia elettrica esclusa).

2° Obiettivo

L'apparecchiatura CVE (*Chambre View Explosion*) [14] è stata concepita per avere la possibilità di analizzare (anche visivamente) il fenomeno dell'esplosione ventata di gas combustibili (idrogeno, gas naturale); lo studio di tale fenomeno è da sempre complicato dalla diversa tipologia che esso assume in funzione sia di parametri che influenzano l'intensità del picco di pressione sia di meccanismi che accelerano la fiamma. L'apparecchiatura CVE ha il compito di simulare un locale che nella forma somigli il più possibile ad un ambiente reale, domestico o industriale; possiede pertanto dimensioni tali da poter essere ragionevolmente paragonata ad un locale di stoccaggio di gas combustibile all'interno del quale è possibile avere una perdita con conseguente accumulo di gas. L'apparecchiatura CVE ha un volume di circa 25 m³ ed è costituita da una struttura di forma cubica, realizzata mediante telaio metallico; a questo, tramite viti, sono stati collegati dei moduli rettangolari provvisti di cornici che permettono il montaggio di pannelli sia

metallici che di vetro, pareti con aperture per il *vent* necessario all'esecuzione della prova (parete di "test"⁽¹⁾) e pareti per un ulteriore *vent* (*vent* di sicurezza). Ogni parete dell'apparecchiatura è quindi costituita da pannelli collegati alla struttura ed aventi ciascuno una propria funzionalità. L'apparecchiatura CVE permette di testare gli effetti dell'area di *vent* sulla crescita della pressione durante deflagrazioni di miscele idrogeno-aria o gas naturale-aria, sia in condizioni uniformi che in condizioni non uniformi, e di apprezzarne la differenza, in termini di tempistica e sovrappressione massima. Le prove di deflagrazione sono state effettuate ponendo teli di polietilene trasparente oppure nylon a copertura del *vent* sulla parete di "test". Ciò ha consentito di realizzare un'apertura del *vent* sulla parete di "test" a sovrappressioni bassissime, quindi a favore della sicurezza.

Con l'apparecchiatura CVE sono state svolte le seguenti campagne sperimentali:

- serie #SD: esplosioni di miscele di idrogeno-aria, che sono state eseguite sia in condizioni di omogeneità che di disomogeneità di concentrazione interna all'apparecchiatura e variando la posizione dell'ignizione, il numero di ignitori coinvolti, la concentrazione interna di idrogeno e l'area di *vent*
- serie #CR: esplosioni di miscele di idrogeno-aria, svolte al fine di indagare l'andamento e la magnitudine della pressione all'esterno di un locale in cui avvenga una deflagrazione; da queste prove si è desunto che la deflagrazione all'interno della CVE provoca, piuttosto che un'onda di pressione che si propaga in maniera sferica, un flusso diretto di gas combusto o parzialmente incombusto attraverso il *vent*, i cui effetti sono limitati all'area direttamente ad esso antistante e influenzano in maniera trascurabile le zone ad esso immediatamente limitrofe
- serie #VAT: prove svolte sia in condizioni di omogeneità che di non omogeneità e finalizzate ad indagare il comportamento del massimo picco di pressione interna raggiungibile alla concentrazione programmata al variare dell'area di *vent* sulla parete di "test"; queste prove sono state programmate, in base ai dati delle precedenti campagne, alla massima concentrazione compatibile con la possibilità di far variare l'area di *vent* in tutto il range permesso dall'apparecchiatura senza rischi per quest'ultima.

Dall'analisi delle prove si osserva che una deflagrazione all'interno dell'apparecchiatura CVE è caratterizzata da:

- un primo picco di pressione legato all'apertura del *vent* di sicurezza sulla parete di "test" (maggiore è la resistenza del materiale di copertura del *vent* e maggiore è questo picco, a parità di area di *vent*)
- alcuni picchi secondari legati alla combustione della miscela incombusta che non è stata liberata dall'apertura del *vent*.

Nel corso delle campagne di prove è stato svolto confronto con la norma statunitense NFPA 68, *Venting of deflagrations* [15], che rappresenta lo standard e lo stato dell'arte sulla protezione dalle deflagrazioni delle strutture tramite il *venting*. La norma ipotizza deflagrazioni stechiometriche omogenee in ambienti privi di turbolenza iniziale o di strutture che possano indurre turbolenza; inoltre non si occupa esclusivamente dell'idrogeno, ma di vari gas e polveri potenzialmente deflagranti. Quindi, il tentativo di dimensionare i sistemi di *venting* per proteggere le strutture da deflagrazioni a concentrazione stechiometrica omogenea d'idrogeno risulta eccessivamente cautelativo e poco realistico. In base a tali osservazioni e a considerazioni tecniche di sicurezza dell'apparecchiatura le prove disomogenee sono state effettuate ad una concentrazione del 12%vol. di idrogeno equivalente omogeneo. Ferma restando l'opportunità di massimizzare le aree di *vent* compatibilmente con i vincoli tecnico-economici fino ed oltre le dimensioni previste dalla norma NFPA 68 (ritenute conservative), dai dati relativi alle prove sperimentali al 12%vol. di idrogeno equivalente omogeneo in condizioni di omogeneità e non omogeneità si può dedurre che:

- 1) a parità di quantità di idrogeno presente la condizione più severa è quella di non omogeneità

⁽¹⁾ Il *vent* sulla parete di "test" ha il compito di asportare dalla CVE l'energia cinetica e termica sviluppata dalla combustione della miscela gas-aria e l'energia chimica della miscela ancora incombusta all'apertura del *vent*.

- 2) con volumi fino a 25 m³ e pressioni di rottura del *vent* comprese fra 10 e 60 mbar, un'area di *vent* maggiore di 1.5 m² è sufficiente a garantire il non superamento di una pressione pari a tre volte la pressione di rottura
- 3) nelle prove effettuate, al crescere della pressione di rottura del *vent*, la pressione di picco cresce, ma il rapporto fra queste due pressioni decresce, con la pressione di picco che è sempre più prossima a quella di rottura.

Per quanto riguarda le pressioni esterne, per le quali i dati reperibili in letteratura sono decisamente scarsi, nel corso dell'apposita campagna (serie #CR) si sono potute verificare le relazioni che permettono di valutare il valore del picco di pressione in funzione della distanza sull'asse del *vent*, osservando un ottimo accordo con i dati rilevati. Al di fuori dell'asse non è stato possibile fare altrettanto poiché nelle prove effettuate si verificava un immediato abbattimento della pressione.

In conclusione, si riportano le cause alle quali si possono ricondurre le incertezze che hanno caratterizzato le prove di deflagrazioni ventate eseguite con l'apparecchiatura CVE:

1. le condizioni preesistenti all'ignizione:
 - la distribuzione della concentrazione dell'idrogeno all'interno dell'apparecchiatura CVE (omogeneità/disomogeneità)
 - la misura della distribuzione di concentrazione (comunque migliorabile mediante una strumentazione più idonea)
 - l'influenza della temperatura sul livello di omogeneizzazione della miscela all'interno dell'apparecchiatura
2. le condizioni che nascono nel corso della combustione:
 - la turbolenza che si ha alla rottura del *vent* di sicurezza sulle pareti di "test"
 - il valore della pressione di rottura del *vent* (comunque migliorabile) e il punto di rottura
 - l'andamento variabile della pressione in funzione dell'area di *vent* (picchi più o meno marcati)
3. le incongruenze emerse dal confronto tra i risultati delle prove omogenee e quelli previsti dal codice DEVENT [16] messo a punto presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa e finalizzato a stimare quantitativamente il picco di pressione che si raggiunge durante una deflagrazione ventata ed il suo andamento qualitativo; le suddette incongruenze sono legate sia alla posizione dell'ignizione (centrale e non laterale) che alla geometria (sferica e non cubica)
4. sono state svolte poche prove non omogenee per poterne dimostrare la ripetibilità (è quindi necessario svolgere più prove).

3.0 CONCLUSIONI

Con la presente memoria è stato offerto un resoconto delle attività e dei risultati ottenuti con il programma di ricerca riguardante "le stazioni di rifornimento idrogeno", svolto dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa grazie ad un finanziamento del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.

Alla luce dell'attività svolta si può concludere che per la penetrazione dell'idrogeno nel campo della mobilità il rifornimento è senza dubbio una tecnologia che deve essere necessariamente sviluppata.

L'impiego di idrogeno compresso sembra la strada maggiormente percorribile in uno scenario a breve termine; tuttavia, nella costruzione degli scenari più plausibili rimangono certamente alcuni dubbi su quale sia la migliore tecnologia per la produzione dell'idrogeno. È chiaro che, qualora le stazioni di rifornimento siano dotate di unità di produzione in sito, questa deve essere caratterizzata da una sufficiente capacità produttiva, tale almeno da sostenere le esigenze delle prime flotte di veicoli alimentati ad idrogeno.

Comunque, indipendentemente dalla filosofia che verrà seguita per promuovere la penetrazione dell'idrogeno nel mercato della mobilità, risulta evidente come, con lo stato attuale di sviluppo tecnologico e normativo, le stazioni di rifornimento possano essere già realizzate in Italia ed anche con buone efficienze di stoccaggio e distribuzione (un po' meno di produzione). Affinché questi impianti possano divenire una tecnologia commerciale e con valore aggiunto in termini di inquinamento ambientale, oltre a dover superare i problemi di costo e di efficienza dei vari componenti, è necessario che l'idrogeno sia prodotto da fonti pulite fin dall'origine oppure che al processo produttivo sia abbinato un'efficiente tecnica di segregazione dell'anidride carbonica.

RIFERIMENTI

(I contenuti della presente memoria fanno riferimento alla documentazione prodotta nel corso del programma di ricerca e reperibile presso il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio; di seguito sono riportati i restanti riferimenti)

1. Decreto Legislativo 25 febbraio 2000, n. 93, *Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 91 del 18/04/2000, Supplemento Ordinario n. 62/L.
2. Decreto del Presidente della Repubblica 23 marzo 1998, n. 126, *Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 101 del 04/05/1998.
3. Norma tecnica CEI EN 60079-10, *Costruzioni elettriche per atmosfere esplosive per la presenza di gas - Parte 10: Classificazione dei luoghi pericolosi*, classificazione 31-30, edizione seconda, fascicolo 7177, 01/2004.
4. Decreto Legislativo 19 settembre 1994, n. 626, *Attuazione delle direttive 89/391/CEE, 89/654/CEE, 89/655/CEE, 89/656/CEE, 90/269/CEE, 90/270/CEE, 90/394/CEE, 90/679/CEE, 93/88/CEE, 95/63/CE, 97/42/CE, 98/24/CE, 99/38/CE e 99/92/CE riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori durante il lavoro*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 265 del 12/11/1994, Supplemento Ordinario n. 141.
5. Decreto Legislativo 14 agosto 1996, n. 493, *Attuazione della direttiva 92/58/CEE concernente le prescrizioni minime per la segnaletica di sicurezza e/o di salute sul luogo di lavoro*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 223 del 23/09/1996, Supplemento Ordinario.
6. Legge Regionale 31 maggio 2004, n. 14, *Norme di indirizzo programmatico regionale per la razionalizzazione e l'ammodernamento della rete distributiva dei carburanti*. Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte n. 22 del 04/06/2004, Supplemento Ordinario n. 3.
7. Schema di regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione di idrogeno per autotrazione. Documento approvato dal Comitato Centrale Tecnico Scientifico per la prevenzione incendi (C.C.T.S.) del Ministero dell'Interno. Verbale della Riunione del 15/06/2004.
8. Direttiva 98/34/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 22 giugno 1998 che prevede una procedura d'informazione nel settore delle norme e delle regolamentazioni tecniche. Gazzetta Ufficiale delle Comunità Europee L 204 del 21/07/1998.
9. Decreto del Presidente della Repubblica 24 luglio 1996 n. 459, *Regolamento per l'attuazione delle Direttive 89/392/CEE, 91/368/CEE, 93/44/CEE e 93/68/CEE concernenti il riavvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle macchine*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 209 del 06/09/1996, Supplemento Ordinario.

10. Decreto Legislativo 2 febbraio 2002, n. 23, *Attuazione della direttiva 1999/36/CE, 2001/2/CE e della decisione 2001/107/CE in materia di attrezzature a pressione trasportabili*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 57 del 08/03/2002. Supplemento Ordinario n. 40.
11. Decreto Legislativo 12 giugno 2003, n. 233, *Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 197 del 26/08/2003.
12. Decreto Ministeriale 24 maggio 2002, *Norme di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione stradale di gas naturale per autotrazione*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 131 del 06/06/2002.
13. Decreto Ministeriale 4 maggio 1998, *Disposizioni relative alle modalità di presentazione ed al contenuto delle domande per l'avvio dei procedimenti di prevenzione incendi, nonché all'uniformità dei connessi servizi resi dai Comandi provinciali dei vigili del fuoco*. Gazzetta Ufficiale Serie Generale n. 104 del 07/05/1998.
14. M. Carcassi, G. M. Cerchiara, A. Marangon, *Studi sperimentali sulle esplosioni ventate di gas in ambienti reali*, Atti XXI Congresso Nazionale UIT sulla Trasmissione del Calore, Udine, 23-25 giugno 2003, pp. 471-476.
15. NFPA 68, *Venting of deflagrations*, National Fire Protection Association, Inc., Quincy, MA, 1998.
16. M. Carcassi, F. Fineschi, *“Devent, Un codice per la valutazione dei transitori generati da deflagrazioni lente in ambienti parzialmente confinati”*, DCMN, Università di Pisa, RL 415, casa editrice ETS, 1989.