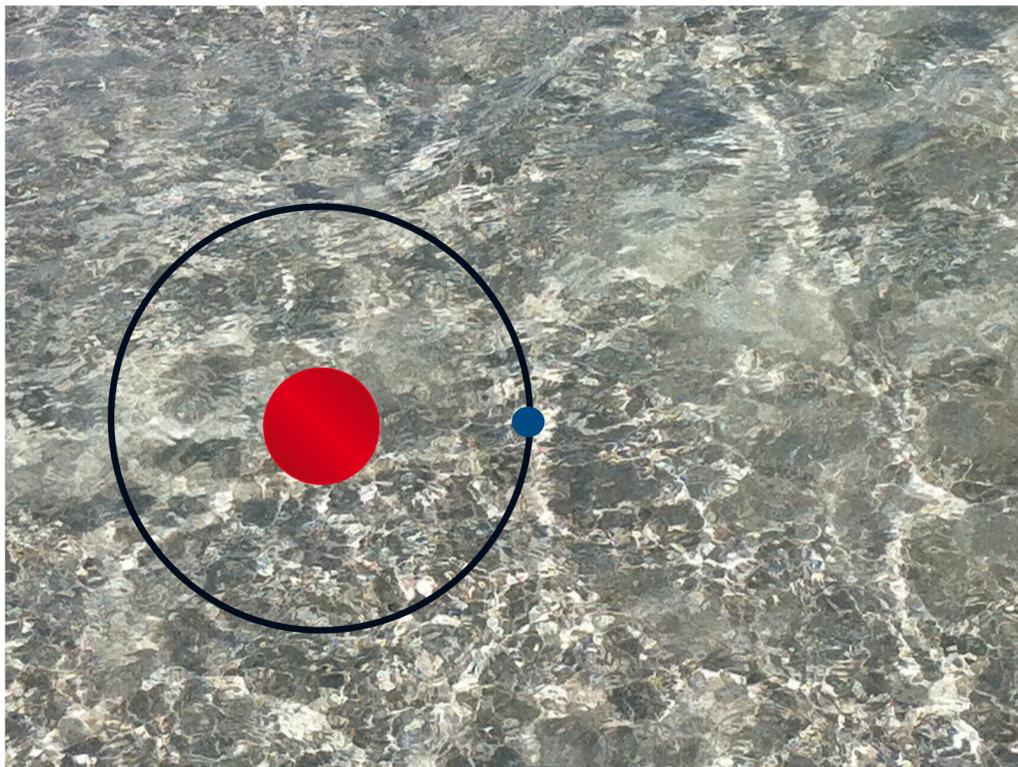


## Misure di concentrazione di Idrogeno in ambiente chiuso



**INAIL**

# **Misure di concentrazione di Idrogeno in ambiente chiuso**

**Pubblicazione realizzata da**

**INAIL**

Dipartimento innovazioni tecnologiche  
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici

**Autori**

Fabio Pera  
Antonella Pireddu

**Con la collaborazione di**

Francesca Ceruti  
Daniela Gaetana Cogliani  
Carlo Ratti

**per informazioni**

**INAIL**

Dipartimento innovazioni tecnologiche  
e sicurezza degli impianti, prodotti e insediamenti antropici  
dit@inail.it  
[www.inail.it](http://www.inail.it)

© 2015 INAIL

La pubblicazione viene distribuita gratuitamente e ne è quindi vietata la vendita nonché la riproduzione con qualsiasi mezzo. È consentita solo la citazione con l'indicazione della fonte.

ISBN 978-88-7484-461-6

Tipolitografia INAIL - Milano, settembre 2015

## INDICE

Introduzione .....	5
1. Obiettivi e metodi .....	7
2. Caratteristiche fisiche dell'idrogeno .....	8
3. Basi scientifiche di riferimento .....	9
4. Definizione del test di prova .....	10
4.1 Descrizione della prova .....	10
4.2 Attrezzatura di prova .....	10
I rivelatori di gas all'interno e fuori della cappa .....	11
Sistema di acquisizione dati .....	12
Box alimentatore e condizionatore per trasduttori con uscita in corrente .....	13
Sonde anemometriche .....	14
Bombola di idrogeno ed accessori .....	14
Cappa metallica .....	14
4.3 Stima della distanza pericolosa .....	15
Valutazioni di sicurezza .....	16
4.4 Allestimento della prova .....	17
5. Descrizione delle prove e risultati .....	19
Prove da n. 1 a n. 6 (Distanza cappa sorgente: 3 m) .....	19
Prova 7 (Distanza cappa sorgente: 1,6 m) .....	26
Prove 8, 9, 10, 11 (Distanza cappa sorgente: 1,2 m) .....	28
Prove 12, 13 (misure all'interno della cappa) .....	33
6. Conclusioni .....	40
Criteri per la sicurezza dei luoghi di lavoro .....	41
7. Bibliografia .....	43
8. Normativa e legislazione di riferimento .....	44
Allegato I Massimo, minimo, mediana, moda, media e deviazione (prove 4-14) .....	45
Allegato II A Concentrazione di idrogeno dopo 10 e 20 secondi .....	48
Allegato II B Tempi per il raggiungimento di concentrazioni comprese tra il 10-92 % LEL} .....	49



## Introduzione

L'idrogeno è un gas ampiamente utilizzato per diverse applicazioni ed è presente in ambito industriale sia come prodotto finale che come sottoprodotto di processi tecnologici. È altamente infiammabile e, miscelato in aria in condizioni atmosferiche, può formare atmosfere potenzialmente esplosive quando la concentrazione entra nel campo compreso fra il limite inferiore (LEL) e superiore (UEL) di esplosività, in presenza di sorgenti di accensione che forniscono l'innescio. L'elevato coefficiente di diffusione e la bassissima densità ne determinano sia la tendenza a risalire velocemente verso l'alto, sia la ridotta persistenza attorno al punto di emissione, una volta che il flusso o la perdita siano stati arrestati.

A seconda delle diverse condizioni in cui avviene l'emissione, il gas può accumularsi più o meno rapidamente all'interno di ambienti ristretti, di involucri (es. vano per l'alloggio della batteria in un carrello elevatore), sotto le coperture degli edifici oppure in prossimità di strutture od ostacoli che si comportano come trappole e ne favoriscono il ristagno e la raccolta, mentre all'aperto esso tende facilmente a disperdersi.

L'INAIL ha condotto una serie di prove con sensori, simulando un'emissione subsonica di idrogeno in ambiente chiuso anche in presenza di una copertura di raccolta (cappa), per valutare il comportamento del gas, la distribuzione delle concentrazioni pericolose ed i tempi di persistenza della miscela in aria, una volta interrotta l'erogazione.-

Questo documento contiene la descrizione ed i risultati dei test effettuati che confermano sia quanto emerso da attività di altri laboratori, sia alcune ipotesi formulate preliminarmente e forniscono indicazioni interessanti per la classificazione delle zone e per la prevenzione e la protezione dall'esplosione.

In un momento in cui domina la tendenza a descrivere i fenomeni con modelli matematici che simulano il comportamento con determinati vincoli, questa esperienza si propone di esaminare la diffusione dell'idrogeno tramite l'impiego di sensori comunemente impiegati nell'industria, evidenziando particolari ed interessanti aspetti legati alla situazione reale.

Il documento è diretto a chi effettua la valutazione delle zone pericolose in presenza di atmosfere esplosive, ai responsabili del Servizio di Prevenzione e Protezione, ai soggetti incaricati di attività di ispezione e verifica ed anche a datori di lavoro di piccole e medie imprese che, nelle parti più descrittive e nelle conclusioni, possono trovare spunti di riflessione e soluzioni utili per la sicurezza dell'ambiente di lavoro.



## 1. Obiettivi e metodi

L'idrogeno miscelato in aria in condizioni atmosferiche normali (1bar, 20°C, 21% di ossigeno) può creare atmosfere potenzialmente esplosive. Negli ambienti in cui esiste questa possibilità, riveste particolare importanza il processo di individuazione e classificazione delle zone pericolose. Le scelte fatte ed i risultati ottenuti condizionano sia le attrezzature di lavoro che l'organizzazione e la gestione delle attività all'interno delle aziende.

Lo scopo di questa attività di ricerca è quello di caratterizzare il comportamento dell'idrogeno in aria e verificare le condizioni che ne favoriscono l'accumulo in concentrazioni pericolose. In particolare la ricerca si propone di valutare, in ambienti chiusi ed in presenza di strutture dove la miscela aria-idrogeno può rimanere intrappolata, i seguenti aspetti:

- le modalità di diffusione del gas e la direzione del suo moto;
- le modalità di interessamento del campo vicino e lontano dalla sorgente di emissione da parte della distribuzione di concentrazione;
- la tendenza o meno a raggiungere valori di concentrazione stazionaria in condizioni di emissione;
- la forma geometrica della zona interessata dalla concentrazione di idrogeno in aria e la sua estensione;
- i tempi necessari al raggiungimento di valori prefissati di concentrazione (che in genere agiscono da trigger per sistemi diagnosi, monitoraggio o interblocco);
- i tempi di persistenza dell'atmosfera esplosiva al cessare dell'emissione e le modalità di riduzione progressiva della concentrazione;
- la tendenza all'accumulo di miscela esplosiva in prossimità di coperture, strutture concave (rispetto al moto del gas), l'influenza della distanza dal punto di emissione e della portata. È importante valutare anche le modalità di accumulo, il tipo di stratificazione (laminare o turbolenta), l'influenza della zona di interfaccia con il resto dell'ambiente;
- la capacità dei sensori di rilevare una situazione di pericolo in funzione del loro numero e della loro disposizione. A tal proposito la metodologia adottata si presta particolarmente bene allo scopo.

Si sottolinea come l'obiettivo principale del presente studio sia comunque l'esame delle condizioni di accumulo all'interno di una cappa.

Per raggiungere tali obiettivi è stata implementata una procedura di prova, finalizzata ad osservare i fenomeni di distribuzione della miscela aria-idrogeno nell'intorno della sorgente ed i profili di concentrazione, con la possibilità di spostare i sensori in differenti configurazioni spaziali. Viceversa, le situazioni in condizioni di accumulo del gas, in una struttura catturante, sono state studiate utilizzando una cappa chiusa superiormente, vincolata ad un'altezza che poteva essere facilmente variata rispetto alla sorgente di emissione.

La procedura di prova è stata strutturata ed articolata in modo da rispettare la sicurezza, valutando l'ampiezza delle zone pericolose interessate da atmosfera potenzialmente esplosiva ed il livello di protezione in esse realizzato per le apparecchiature presenti. La strumentazione di prova consente di disporre dei dati di concentrazione in tempo reale (pur con i ritardi dovuti ai sensori) e di registrarli su supporto magnetico per l'analisi.

## 2. Caratteristiche fisiche dell'idrogeno

L'idrogeno è un gas molto leggero che diffonde rapidamente (coefficiente di diffusione 0,148 m<sup>2</sup>/h secondo numerose valutazioni in letteratura tecnica, ma che dipende molto dalle condizioni di determinazione) e che quindi tende a salire verso l'alto molto velocemente. Queste caratteristiche rendono il gas più o meno pericoloso a seconda delle diverse condizioni in cui avviene l'emissione. All'aperto il rischio si riduce, perché il gas tende velocemente a disperdersi, mentre al chiuso potrebbe accumularsi in alto, sotto la copertura, in ambienti ristretti e confinati.

L'intervallo di esplosibilità varia dal 4% (LEL<sub>vol</sub>) al 75 % (UEL<sub>vol</sub>) e la temperatura di accensione è pari a 500°C. L'idrogeno è caratterizzato da un'energia minima di accensione (M.I.E.) molto bassa, pari a 17 μJ, che rende questo gas svantaggioso dal punto di vista della sicurezza, rispetto ad altri gas usati come combustibili (metano), per i quali si hanno in media valori circa 10 volte più grandi. Tale valore di energia corrisponde alle condizioni stechiometriche della reazione di esplosione, che si verificano per una concentrazione in aria dell'idrogeno del 30% in volume; alla stessa concentrazione, per la quale il metano ha l'energia di accensione minima di 280 μJ, cioè 9,5% in volume, l'idrogeno ha un'energia d'innesco superiore a 100 μJ.

In tabella 1 sono riassunte alcune caratteristiche chimiche e fisiche dell'idrogeno di maggior interesse per questa trattazione.

Formula	H <sub>2</sub>
Peso molecolare	2,016 g/mole
Densità S.T.P.	0.089 kgm <sup>-3</sup>
Densità relativa all'aria del gas	0,07
Coefficiente di diffusione	0.148 m <sup>2</sup> /h *
Coefficiente di dilatazione o espansione adiabatica	$\gamma (C_p/C_v) = 1,41$
Calore specifico (a temp. Ambiente)	9800 J/kg °K
LEL % vol	4,00
UEL % vol	75,00
M.I.E.	17 μJ
Colore della fiamma	incolore

\*Parametro di valore variabile in letteratura in funzione delle condizioni di determinazione

**Tabella 1.** Caratteristiche chimiche e fisiche dell'idrogeno

### 3. Basi scientifiche di riferimento

Sono state condotte recentemente numerose ricerche sul comportamento dell'Idrogeno in ambito nazionale ed internazionale basate sulle equazioni di continuità per il gas in regime stazionario.

Esse riguardano il fenomeno della diffusione del gas, l'influenza della ventilazione e la conformazione dell'ambiente sulla distribuzione della concentrazione pericolosa. Si ricorda in particolare lo studio [Ha-14], nel quale si esamina l'influenza della conformazione geometrica di un angolo al vertice di una copertura sull'emissione e sulla dispersione dell'idrogeno. Altri lavori, come [SC-014], considerano l'influenza della ventilazione sul rimescolamento della miscela aria-gas e sulla pericolosità di suoi eventuali accumuli.

Il presente studio prevede una fase di esame del comportamento del gas in ambiente libero, a seguito di un'emissione, e la sua dispersione e miscelazione con l'aria, ma è focalizzato soprattutto sull'analisi di quanto avviene in presenza di un ostacolo cavo e chiuso superiormente, come una cappa, posizionata a distanza variabile dalla sorgente, attraverso la rilevazione dei profili di concentrazione per diverse portate in regime subsonico.

Il gas in pressione, in funzione delle sue caratteristiche fisiche e della differenza di pressione fra il serbatoio e l'ambiente esterno, può dar luogo ad emissione sonica o subsonica: per l'idrogeno si ha un'emissione sonica quando la pressione a monte è circa 1,9 volte più grande della pressione a valle. Nelle condizioni di prova in esame consideriamo un'emissione di tipo subsonico a seguito della quale il gas diffonde nell'ambiente. Il flusso molecolare, in queste condizioni è particolarmente influenzato dalla legge di Fick che, se per semplicità consideriamo un sistema monodimensionale, si esprime con la formula seguente:

$$dm/dt = - D \cdot A \cdot dC/dx$$

Il coefficiente D è noto come coefficiente di diffusione. Esso dipende in generale dalle sostanze che partecipano al processo e dalla temperatura in cui si trova l'ambiente interessato dall'emissione di gas. La diffusione, causata dall'agitazione molecolare, determina uno spostamento di massa (dm) di gas nel tempo (dt) direttamente proporzionale alla sezione A interessata dal flusso e al gradiente dC/dx di concentrazione molecolare (C) in direzione x.

Le prove si sono svolte presso il laboratorio Tecnologico per le strutture di Monte Porzio Catone, in un ambiente chiuso, ma di volumetria molto grande, così da rendere trascurabile il rapporto con il volume di idrogeno immesso in una singola prova. La ventilazione presente nell'ambiente è quella dovuta alle infiltrazioni d'aria.

## 4. Definizione del test di prova

### 4.1 Descrizione della prova

I test prevedono la misura delle concentrazioni di gas idrogeno in aria generate da portate di emissione variabili in un intervallo compreso tra  $10^{-7}$  kg/s e  $10^{-5}$  kg/s corrispondente, considerando una densità del gas pari a  $0,089 \text{ kg/m}^3$  in condizioni atmosferiche, a  $0,07 \text{ l/min} \div 7 \text{ l/min}$ , provenienti da una bombola contenente  $\text{H}_2$  ed impostate tramite valvola e flussimetro. Considerando che il diametro interno del tubo di emissione è pari a  $0,0145 \text{ m}$ , si calcolano i valori riportati in tab. 2 per la velocità dell'idrogeno in uscita dalla sorgente di emissione.

Portata $\text{H}_2$ [Kg/s]	Portata $\text{H}_2$ [l/min]	Velocità [m/s]
1,00E-07	0,07	0,01
1,00E-06	0,7	0,06
1,00E-05	7	0,62

**Tabella 2.** Velocità dell'idrogeno in uscita dalla sorgente di emissione

Tali valori corrispondono ad un regime di efflusso subsonico.

Le concentrazioni sono state misurate mediante rivelatori collocati in posizioni variabili lungo il percorso ascensionale del gas e collegati ad un sistema di acquisizione dati, sia durante l'emissione sia dopo la stessa, per controllare in tal modo la persistenza della miscela aria idrogeno.

Al di sopra della sorgente di emissione è stata posizionata una cappa chiusa, con sensori di gas all'interno, per controllare la concentrazione in accumulo; anche in questo caso le misure sono proseguite al cessare dell'emissione, per testare la tendenza del gas a disperdersi o a restare intrappolato all'interno della cappa.

La struttura è stata predisposta in modo da variare l'altezza della cappa rispetto alla sorgente, per valutare quanto la quota influisca sull'accumulo di idrogeno.

La velocità dell'aria è stata misurata con l'ausilio di anemometri, a filo caldo ed a ventolino. L'anemometro a filo caldo è particolarmente idoneo ad ambienti chiusi mentre quello a ventolino si utilizza in ambienti aperti.

La struttura di sostegno della cappa e dei sensori è stata realizzata con un sistema di tubi e giunti collegato a terra per renderla equipotenziale.

### 4.2 Attrezzatura di prova

L'attrezzatura prevista per effettuare la prova comprende:

- rivelatori di gas idrogeno di tipo *pellistor*;
- sistema di acquisizione dati ad alta velocità;
- box alimentatore/condizionatore per trasduttori con uscita in corrente;
- anemometro a filo caldo;
- anemometro a ventolino;

- bombola di idrogeno da 14 litri con una pressione di 200 ata dotata di valvola di riduzione alta-bassa pressione, a doppio stadio ed equipaggiata di valvola antiritorno di fiamma;
- flussimetro per regolare la portata di efflusso desiderata;
- cappa metallica.

### I rivelatori di gas all'interno e fuori della cappa



Figura 1. Rivelatori di gas

I sensori di concentrazione utilizzati per questa ricerca (fig. 1) sono del tipo “Pellistor” e resistenti ai vapori di gas che tendono a contaminare il filamento sensibile. Nel caso del gas idrogeno, il campo di misura varia tra 0-100% del LEL, pertanto la concentrazione massima che si può misurare con questo tipo di sensori è pari al 4% in volume.

Questi sensori sono dotati di un filamento di platino e sfruttano il principio di funzionamento dell'elettro-catalisi. Il filamento di platino viene riscaldato fino ad una temperatura di 550 °C da una corrente che lo percorre. Il calore provoca la combustione della miscela aria-gas (idrogeno) che, a contatto con il filamento, aumenta a sua volta di temperatura. A causa dell'aumento di temperatura la resistenza elettrica del filamento si dilata ed il segnale elettrico varia proporzionalmente alla dilatazione del filamento e quindi con la concentrazione della miscela aria-gas.

Questo tipo di sensori è dotato di un ponte di *Wheatstone* per compensare cause di disturbo del segnale quali ad esempio le variazioni di umidità e di temperatura dell'ambiente.

Alcune sostanze presenti nell'aria come silicani, composti solforici e alogeni alterano il funzionamento del sensore, il quale è sensibile negativamente alla loro presenza in quanto ne provoca il cosiddetto “avvelenamento”.

Altre cause di deterioramento si verificano quando il sensore viene messo in contatto con concentrazioni di sostanze superiori al campo di misura oppure quando lo stesso viene percorso da una corrente troppo elevata che ne determina un danno dovuto a shock meccanico.

I sensori utilizzati nelle prove sono forniti di una scheda elettronica con un microprocessore dotato delle seguenti funzioni:

- autodiagnosi, affinché il sistema funzioni correttamente;
- inseguitore di zero, per compensare eventuali derive;
- filtro digitale, per correggere le instabilità;
- watch-dog che controlla il microprocessore (CPU), rilevando anomalie nel processo e correggendole mediante un reset del sistema.

Il rivelatore ha un'uscita proporzionale in corrente da 4-20 mA per la concentrazione che va da 0 al 100% del LEL e deve essere montato in posizione verticale con il sensore rivolto verso il basso.

Il sensore è certificato EEx d IIC ed è quindi in costruzione "d" a prova di esplosione, realizzato in categoria 2 ed idoneo per essere installato nelle zone 1 (e quindi anche in zone 2) dove è ammessa la presenza di atmosfera esplosiva, occasionalmente durante il normale funzionamento, per un periodo di breve durata.

I sensori sono stati installati seguendo le istruzioni del costruttore, utilizzando pressa-cavi Ex e cavi schermati con guaina.

### Sistema di acquisizione dati



Figura 2. Sistema acquisizione dati

Il sistema di rilevazione (fig. 2) consiste in un acquisitore/registratore dati ad elevate prestazioni il quale combina le caratteristiche di rilevazione e display in tempo reale di un recorder oscillografico.

È dotato di 8 canali che vengono direttamente immagazzinati in memoria. Sono disponibili le funzioni di trigger e *pre-trigger* per registrare l'intervallo del fenomeno che effettivamente interessa.

Una volta acquisiti, i dati possono essere stampati, visionati su display ed analizzati mediante le funzioni disponibili su tastiera o trasferiti via Ethernet ad un computer per la successiva elaborazione. Il sistema è ottimizzato per registrare lunghi intervalli di tempo ad elevate velocità su di un hard disk dedicato, separato dal disco rigido principale, grazie al quale è possibile garantire l'integrità dei dati. Il *range* del segnale di input va da 50 mV a 1000 V e permette, con semplici connettori, di collegare direttamente lo strumento a qualsiasi tipo di segnale. È possibile adattare gli ingressi alla maggior parte dei trasduttori utilizzati nei test mediante estensimetri, accelerometri, termocoppie, sonde shunt da 4-20 mA; tutti i canali possono essere calibrati per pendenza ed offset e le unità di misura possono essere facilmente scelte dall'utente a seconda della necessità.

I dati possono essere velocemente esaminati utilizzando uno *jog-shuttle* (manopola), che muove un cursore per lavorare sulla forma d'onda registrata, evidenziare i particolari con lo zoom servendosi anche delle funzioni di calcolo.

Il sistema di acquisizione dati è dotato anche di specifiche funzioni per la ricerca e l'individuazione dei dati o del range dei dati d'interesse e la possibilità di calcolare i parametri caratteristici, anche di tipo statistico, relativi alle forme d'onda registrate come massimi, minimi, distanze picco-picco, RMS, media. Le principali caratteristiche dello strumento possono essere così di seguito riassunte:

Numero di canali	8
Velocità di registrazione dei dati	100 kS/s
Risoluzione digitale	16 bit
Accuratezza analogica	0,05%
Larghezza di banda	20 kHz
Range del segnale	50 mV fino a 1000 V
Isolamento	500 V picco
Accoppiamento	AC, DC, GND, DC-RMS, AC-RMS, T/C
Offset	1 x range
Impedenza d'ingresso	1 M $\Omega$
Massima Memoria	Minimo 4GB

#### **Box alimentatore e condizionatore per trasduttori con uscita in corrente**

È stato previsto un box condizionatore perché si è preferito trasformare il segnale in corrente, in uscita dai trasduttori, in un segnale in tensione più facilmente gestibile. Tale sistema comprende:

- 8 canali di alimentazione per i sensori
- Terminazione con resistenza da 250  $\Omega$
- Alimentazione sensore 15 VDC
- Alimentazione ingresso 220 VAC

### Sonde anemometriche

Per misurare la velocità dell'aria, prima di effettuare la prova, sono state previste due sonde anemometriche delle quali una a filo caldo, idonea per *misure all'interno* o dove esiste una direzione preferenziale di flusso ed una a ventolino, più adatta per *misure all'esterno* dove l'aria può arrivare da punti differenti ed essere soggetta a fenomeni di turbolenza.

sonda anemometrica a filo caldo	sonda anemometrica a ventolino
Range di misura: 0 – 30 m/s	Range di misura: 0,2 – 20 m/s
Accuratezza: 3% (25 °C)	Accuratezza: 5% ( $\pm 1^\circ\text{C temp.}$ )
Soglia: 0,1 m/s	Tempo di risposta: 2 s
Risoluzione: 0,01 m/s	Soglia: 0,2 m/s
Compensazione in temperatura: Si	Risoluzione: 0,01 m/s
Elemento sensibile:	Diametro ventolino: 0,11 m
Termistore caldo	Elemento sensibile:
Ingressi utilizzati: analogico	Gruppo optoelettronico
Temperatura esercizio: -5 +65 °C	Canali utilizzati: impulsivo
	Limiti ambientali: -10 +80 °C

**Tabella 3.** Sonde anemometriche a confronto

Il sistema viene completato da un acquisitore che consente di alimentare ed utilizzare ambedue gli strumenti, visualizzando le misure in corso e registrandone i valori. E' in grado di riconoscere automaticamente i sensori connessi e visualizzare sia valori istantanei che quelli statistici e può essere impostato per velocità e durata delle acquisizioni.

### Bombola di idrogeno ed accessori

L'idrogeno utilizzato nelle prove è contenuto in una bombola avente capacità pari a 14 litri dove il gas è compresso fino a 200 ata (pari a circa 200 atm). Questo quantitativo di gas, in peso pari a circa 230 g, a temperatura ambiente corrisponde a circa 2,8 m<sup>3</sup> di gas puro (qualità 6.0).

Alla bombola è associato un riduttore di pressione a doppio stadio per idrogeno che suddivide in due parti il salto di pressione fra il valore all'interno del recipiente e quello di emissione. Il secondo stadio permette di ridurre la pressione di efflusso da 4,5 bar a 0. Il recipiente è dotato di una valvola anti-ritorno di fiamma e di un flussimetro in grado di impostare portate costanti all'interno di un *range* variabile per i nostri scopi da 10<sup>-5</sup> kg/s a 10<sup>-7</sup> kg/s. La precisione è compresa tra il 2% ed il 5% del fondo scala. La bombola è bloccabile su un carrello che durante le sperimentazioni ha svolto funzione di supporto per la stessa.

### Cappa metallica

La cappa metallica è stata realizzata in lamiera leggera di acciaio zincato di spessore pari a 2 mm con rinforzi ed irrigidimenti. Durante le prove essa è stata posizionata sopra la sorgente di emissione a distanze variabili secondo le diverse configurazioni di prova (fig. 3). Per fissare la cappa all'altezza stabilita, nella sua parte posteriore sono presenti due coppie di collari che ne permettono il bloccaggio alla struttura di supporto a tubi e giunti.

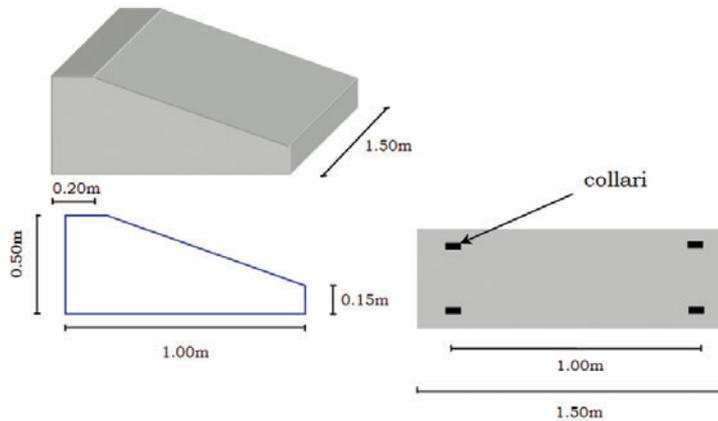


Figura 3. Dimensioni e forma della cappa impiegata nei test

L'area in pianta è pari a 1,5 m x 1,0 m ed è proporzionata alle dimensioni della zona pericolosa. In tal modo, è in grado di intrappolare il gas idrogeno che fuoriesce e che tende a salire rapidamente verso l'alto.

#### 4.3 Stima della distanza pericolosa

Ai fini del posizionamento dei sensori ed allo stesso tempo per avere una valutazione di massima delle distanze pericolose e delle condizioni di sicurezza, si è proceduto ad una stima di esse, nelle condizioni di emissione di idrogeno previste per le prove. A tal scopo sono stati utilizzati le formule ed il metodo indicato nella guida CEI 31-35 "Classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili".

Le portate, come già indicato (tab. 14), variano entro un *range* compreso tra  $10^{-7}$  kg/s e  $10^{-5}$  kg/s, corrispondenti a 0,07 l/min ÷ 7 l/min.

Considerati i valori relativamente bassi di velocità di emissione (tab. 2) si ritiene che il regime di flusso del gas sia da considerare subsonico e che di conseguenza per il calcolo della distanza pericolosa si possano applicare le formule ad esso relative. In ogni caso con un approccio di calcolo sonico si otterrebbero distanze inferiori. Di conseguenza, essendo lo scopo funzionale ad una stima per il posizionamento dei sensori, la procedura adottata in tal caso è adeguata alle esigenze. In regime subsonico, la distanza pericolosa  $d_z$  si può calcolare con la formula seguente:

$$d_z = k_z * \left( \frac{42300 \cdot f_{se} \cdot Q_g}{M \cdot k_{dz} \cdot LEL_V \cdot w_a} \right)^{0,55} \quad \text{dove:}$$

$Q_g$ : portata in gas [kg/s]

$f_{se}$ : fattore di efficacia della ventilazione (si sceglie pari ad 1 in quanto sono assenti ostacoli)

$w_a$ : velocità dell'aria

$k_z$ : coefficiente correttivo per il campo lontano

$$\text{al chiuso } k_z = e^{\frac{k_1 \cdot X_m \%}{M \cdot LEL_V}}$$

$k_1$ : 13 per l'idrogeno;

$k_{dz}$ : 0,5 (coefficiente di sicurezza applicato al LEL)

$M$ : peso molecolare = 2

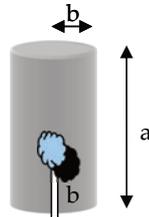
$$X_m\% : \text{concentrazione media} \frac{Q_g}{\rho_g \cdot Q_a} \cdot 100$$

$Q_a$  è la portata effettiva di ventilazione; nel caso in esame l'ambiente in cui sono stati svolti i test è molto vasto e caratterizzato da un'altezza pari a 12 m nel punto più alto (la copertura non è piana, ha una cuspid e approssimativamente si può considerare un valore medio di 10 m) e da dimensioni in pianta pari 9 m x 20 m circa. Al momento della prova le porte e le finestrate sono state chiuse per evitare il disturbo di possibili correnti, ma non sono completamente a tenuta cosicché la portata  $Q_a$  di ventilazione dovuta alle infiltrazioni è stata valutata essere pari a 0,3 m<sup>3</sup>/s. Si fa notare che la velocità dell'aria misurata durante le prove ha fatto registrare un valore massimo di 0,11 m/s. I valori di  $d_z$  calcolati per le differenti portate sono riportati nella tabella 4 seguente.

Portata H <sub>2</sub> [Kg/s]	X <sub>m</sub> [%]	k <sub>z</sub>	d <sub>z</sub> [m]	a [m]
1,00E-07	0,0004	1,00	0,08	0,1
1,00E-06	0,0037	1,01	0,28	0,3
1,00E-05	0,0375	1,06	0,98	1,0

**Tabella 4.** Calcolo dei valori di distanza di sicurezza  $d_z$  per diverse portate

La forma geometrica più idonea a descrivere la zona pericolosa in tale regime di efflusso si ritiene che sia il cilindro. L'altezza del cilindro può essere identificata con il valore "a" ottenuto per arrotondamento di  $d_z$ . In prima approssimazione, l'estensione in orizzontale è stata assunta pari ad "a" x 0,5 e rappresenta il raggio "b" del cilindro stesso (fig.4).



**Figura 4.** Estensione in orizzontale della zona pericolosa

Queste considerazioni, come già detto, sono propedeutiche al posizionamento iniziale dei sensori, che nel corso delle prove è variato in base ai risultati, e permettono di fare alcune valutazioni in merito alla sicurezza delle operazioni.

#### Valutazioni di sicurezza

La zona in cui si potrebbe presentare atmosfera potenzialmente esplosiva (concentrazione superiore al LEL) è costituita da:

- Un cilindro al di sopra del punto di emissione di H = "a" e raggio pari a "0,5 a";
- Il volume all'interno della cappa in quanto zona di accumulo.

In queste zone le sorgenti di accensione possibili sono:

- le cariche elettrostatiche;
- un malfunzionamento all'interno dei sensori;
- l'entrata in cavo nei sensori.

Le misure di protezione adottate sono:

- il collegamento equipotenziale delle strutture metalliche;
- l'elevata protezione dei sensori (cat. 2) idonea per la durata delle atmosfere potenzialmente esplosive;
- l'utilizzo di pressa-cavi Ex e di cavi adeguati;
- il monitoraggio in tempo reale della concentrazione con possibilità di *shut down* del sistema;
- i ridotti volumi di gas coinvolti.

Tali condizioni portano a considerare il livello di rischio molto basso, potendosi ritenere l'accensione delle sorgenti assai improbabile.

#### 4.4 Allestimento della prova

La sorgente di emissione SE costituisce l'origine del sistema di riferimento in base al quale sono stati posizionati la cappa ed i sensori, utilizzando come supporto per entrambi una struttura a tubi e giunti, la cui geometria è facilmente modificabile.

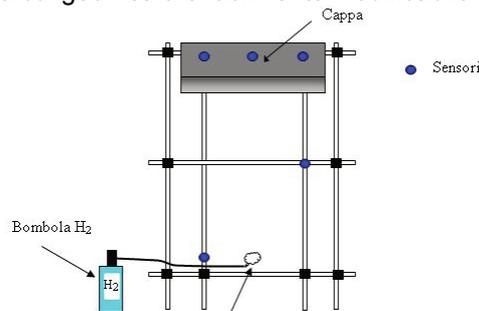


Figura 5. Layout di prova: schema di principio

I sensori, con l'elemento sensibile rivolto verso il basso, sono stati disposti sia all'interno della cappa che in prossimità della sorgente, secondo lo schema di principio di fig. 5, comunque entro i confini della zona pericolosa creata dall'idrogeno, lungo il suo percorso ascendente.

La durata delle rilevazioni è risultata variabile, a seconda delle esigenze create dalla situazione specifica.

Dalla posizione della cappa rispetto alla sorgente deriva un maggiore o minore accumulo di gas, di conseguenza la sua altezza  $H$  (si considera quella della superficie superiore) è variabile durante le prove, a partire dal valore iniziale, fissato pari a 3 volte la dimensione "a" (1 m), relativa alla portata di emissione più grande.

Sono state svolte 13 prove, con 6 o 7 sensori per prova; ogni configurazione è univocamente descritta dai seguenti parametri:

- $Q$  (l/min) portata di emissione del gas dalla sorgente;
- $R$  (m) distanza orizzontale (raggio) del sensore rispetto alla verticale per la sorgente di emissione SE;
- $H$  (m) altezza del sensore rispetto alla sorgente di emissione SE.

La tabella seguente indica le configurazioni considerate.

Prova n. id	R, H (m) Sen 1	R, H (m) Sen 2	R, H (m) Sen 3	R, H (m) Sen 4	R, H (m) Sen 5	R, H (m) Sen 6	R, H (m) Sen 7	Q(l/min)
								Portate di emissione
1 (id 18)	0.50;2.80	0; 2.80	0.50;2.80	0.20;2.00	0.20;1.50	0.20;1.00	0.20;0.50	0,07- 0,7- 7
2 (id 19)	0.50;2.80	0;2.80	0.50;2.80	0.10;2.00	0.10;1.50	0.10;1.00	0.10;0.50	1-2-4-6
3 (id 20)	0.50;2.80	0;2.80	0.50;2.80	0.10;2.00	0;1.50	0.10;1.00	0;0.50	1-2-4-6
4 (id 25)	0.50;2.80	0;2.80	0.50;2.80	0.167;0.25	0.167;0.25	0;0.25	-	6
5 (id 44)	0.50;2.80	0;2.80	0.50;2.80	0.17;0.25	0.17;0.25	0;0.25	-	0,5
6 (id 46)	0.50;2.80	0;2.80	0.50;2.80	0.17;0.40	0.17;0.40	0;0.40	-	0,5
7 (id 47)	0.50;1.40	0;1.40	0.50;1.40	0.17;0.40	0.17;0.40	0;0.40	-	0,5
8 (id 50)	0.50;1.00	0;1.00	0.50;1.00	0.17;0.40	0.17;0.40	0;0.40	-	0,5
9 (id 51)	0.50;1.00	0;1.00	0.50;1.00	0.17;0.40	0.17;0.40	0;0.40	-	2
10 (id 53)	0.50;1.00	0;1.00	0.50;1.00	0.17;0.40	0.17;0.40	0;0.40	-	4
11 (id 54)	0.50;1.00	0;1.00	0.50;1.00	0.17;0.50	0.17;0.50	0;0.50	-	6
12 (id 62)	0.50;1.00	0;1.00	0.50;1.00	0.25;1.20	0.25;1.20	0;0.80	-	3
13 (id 63)	0.50;1.00	0;1.00	0.50;1.00	0.25;1.20	0.25;1.20	0;0.80	-	5

**Tabella 5.** Disposizione dei sensori nelle diverse prove

In parecchi casi, durante le prove, i parametri sono stati variati per trovare la configurazione ottimale per raggiungere gli obiettivi previsti. Prima dell'esecuzione di ciascuna prova sono state misurate sia la temperatura che la velocità dell'aria con la strumentazione precedentemente descritta.

## 5. Descrizione delle prove e risultati

Il sistema di acquisizione dati ha registrato la concentrazione di idrogeno, rilevata da ciascun sensore, con la frequenza di un valore al secondo, in modo da individuare prontamente valori troppo vicini al LEL ed interrompere la prova.

In questo documento le prove riportate sono numerate da 1 a 13, mentre fra parentesi è riportato l'identificativo assegnato ad ogni test dal sistema di acquisizione dati.

Nella descrizione di ogni singola prova, che viene fatta di seguito, è riportato, in forma grafica, il layout dei sensori e della cappa rispetto alla sorgente.

Nei casi di specifico interesse, l'andamento della concentrazione nel tempo è riportato in grafico.

Una tabella indica per ogni prova, se del caso, i seguenti parametri statistici relativi alla concentrazione misurata da ogni sensore:

- *il valore massimo e minimo;*
- *la mediana, la media e la moda;*
- *la deviazione standard.*

Per ogni prova, se del caso, sono state realizzate due tabelle contenenti:

- le concentrazioni rilevate dai sensori per ogni prova dopo 10s, 20s, ed in alcune occasioni dopo 30 secondi di osservazione, al fine di individuare i casi in cui il gas veniva rapidamente segnalato;
- i tempi necessari per il raggiungimento di valori di concentrazione di idrogeno pari alle seguenti percentuali del LEL: 10%, 20%, 30%, 60%, 70%, 80%, 87% e 92%.

Tali tabelle sono state rispettivamente riunite in Allegato IIA ed Allegato IIB per dare una visione di insieme dell'andamento delle prove e del comportamento del gas.

### **Prove da n. 1 a n. 6** (Distanza cappa sorgente: 3 m)

Queste prove sono state condotte con la cappa ad una distanza di 3 m dalla sorgente di emissione, misurata dalla copertura superiore, come indicato negli schemi dei vari layout. I sensori all'interno della cappa si trovano 0,20 m al di sotto della sua superficie superiore, mentre per quelli esterni si è adottata una configurazione variabile, da prova a prova, lungo il percorso verticale ascendente del gas per studiarne il comportamento e la distribuzione della concentrazione. La loro posizione è stata modificata anche in orizzontale per identificare la zona interessata dalla diffusione. Le portate sono state variate in valore e durata in funzione dei risultati per valutarne l'effetto.

Le prove sono state effettuate con una temperatura di 15°C e velocità dell'aria pari a 0,11 m/s. Le diverse configurazioni di prova, dalla prima alla sesta, sono indicate con le rispettive portate nelle figure seguenti (da fig. 6 a fig. 11).

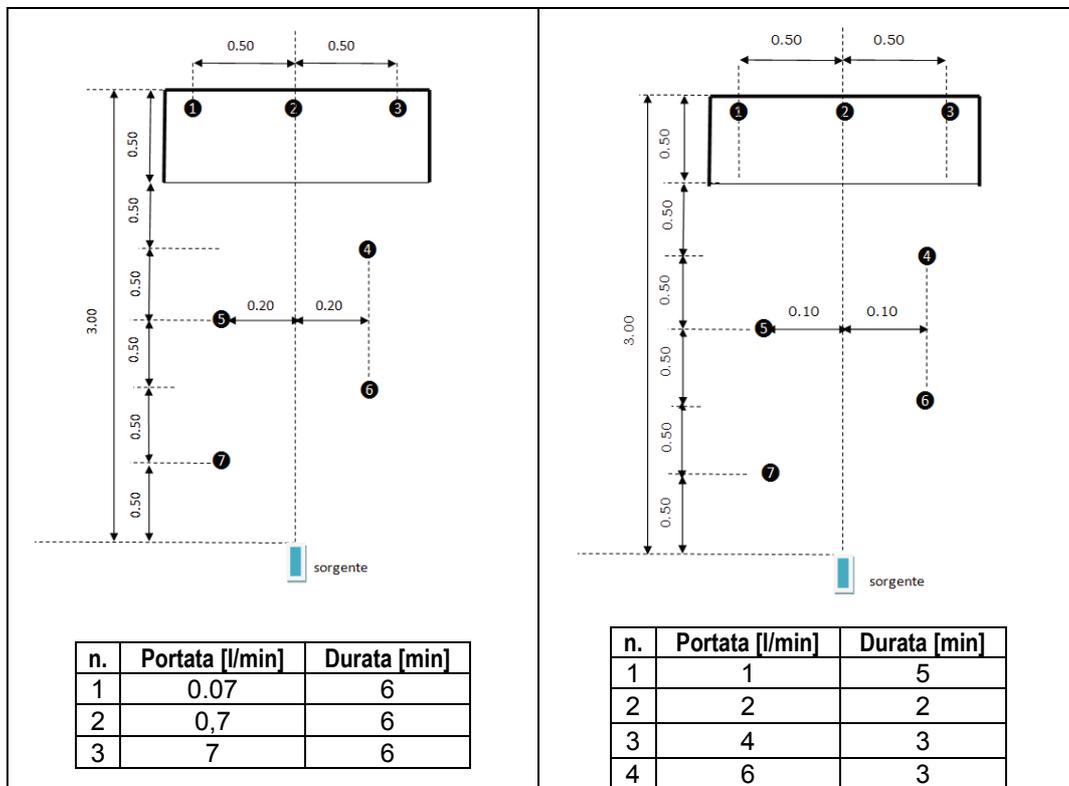


Figura 6. Prova 1

Figura 7. Prova 2

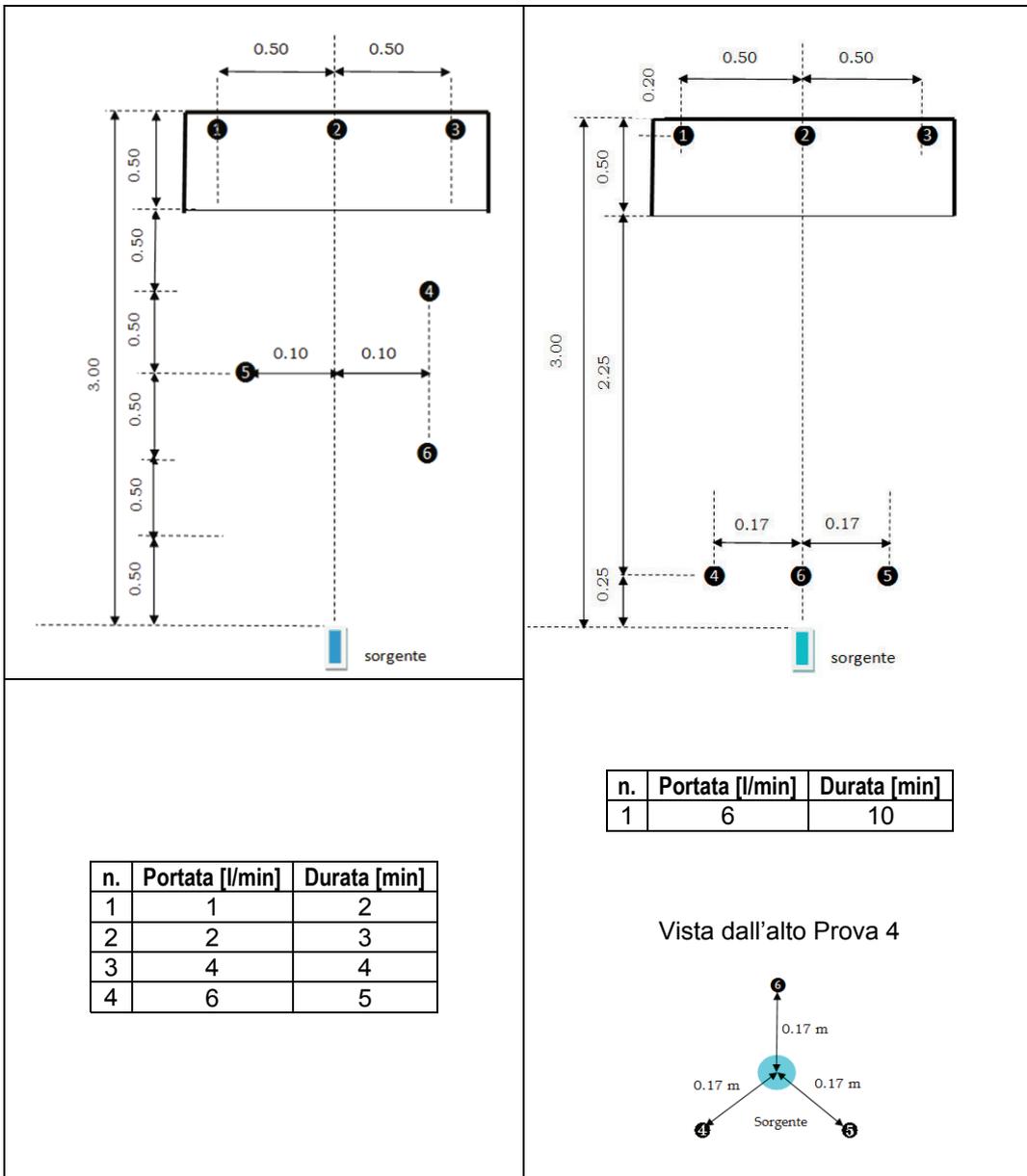


Figura 8. Prova 3

Figura 9. Prova 4

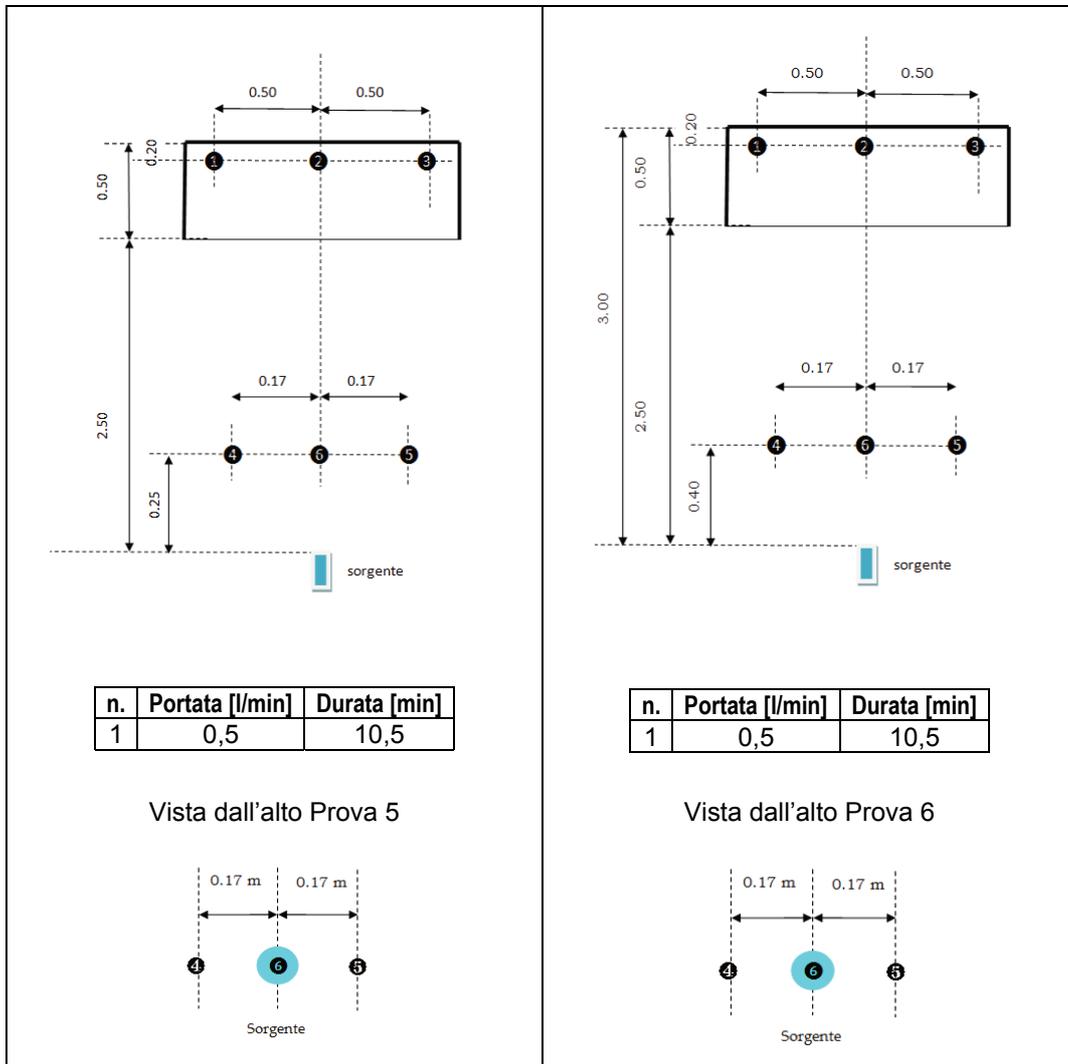


Figura 10. Prova 5

Figura 11. Prova 6

L'esame dell'andamento delle concentrazioni nelle diverse configurazioni ha fatto rilevare quanto segue:

- all'interno della cappa posta a 3m dalla sorgente si registrano valori di concentrazioni apprezzabili (0,1 %) solo per portate intorno ai 6 l/m. In alcune circostanze (fig. 13) sono stati registrati solo dei picchi, in altre valori costanti (fig. 12).

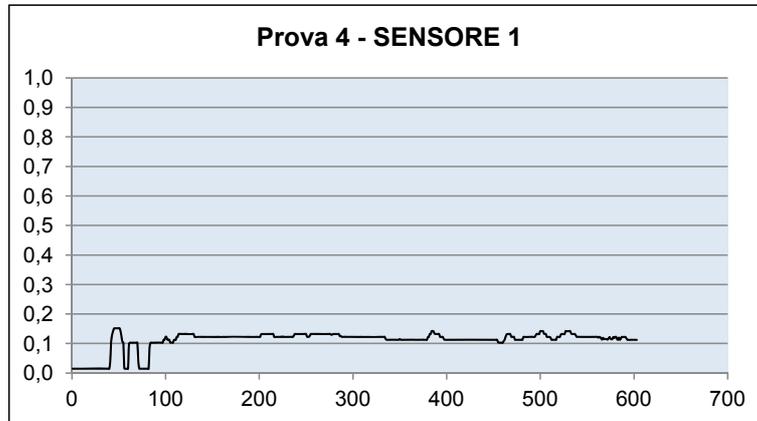


Figura 12

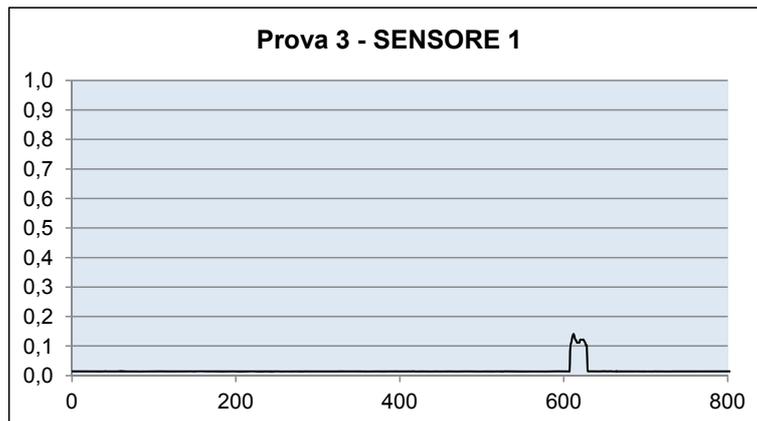


Figura 13

La misurazione del sensore 1, nella prova 3, posizionato nella cappa, dimostra che parte dell'idrogeno è rimasto intrappolato in essa. Si ricorda che i sensori nella cappa si trovano a 0,20 m al di sotto della superficie superiore. È possibile quindi una stratificazione della miscela aria-idrogeno, immediatamente sotto la copertura, che a causa di moti convettivi o turbolenti può interessare anche le zone sottostanti a 0,20 m, che viene rilevata sotto forma di picchi. Viceversa, se l'accumulo è maggiore oppure i moti convettivi locali o la turbolenza favoriscono il miscelamento, si verifica una distribuzione costante della concentrazione. Tale concentrazione è comunque bassa e pari al 2,5 % del LEL e l'accumulo nella cappa sembra trascurabile, almeno a distanze maggiori di 0,20 m dalla sua superficie superiore;

- tra la sorgente di emissione e la cappa ci si trova invece in ambiente libero, lungo il percorso ascensionale del gas. In tale zona le rilevazioni dimostrano che la miscela si dispone secondo una geometria a tubo, di piccola sezione, fluttuante ed oscillante intorno alla verticale, con concentrazione elevata solo entro brevi distanze dalla sorgente stessa.

Ad esempio, nella prova 5 i valori rilevati dal sensore 6 (fig. 14) confermano che la concentrazione maggiore (3,1%) si trova sulla verticale passante per la sorgente a distanze prossime (0,25 m) ad essa. Il sensore 4 (fig. 15) posto alla stessa altezza a 0,10 m dalla verticale, ha registrato valori molto più bassi (0,5 %), facendo osservare che il gas resta sulla verticale e che in senso orizzontale si disperde rapidamente.

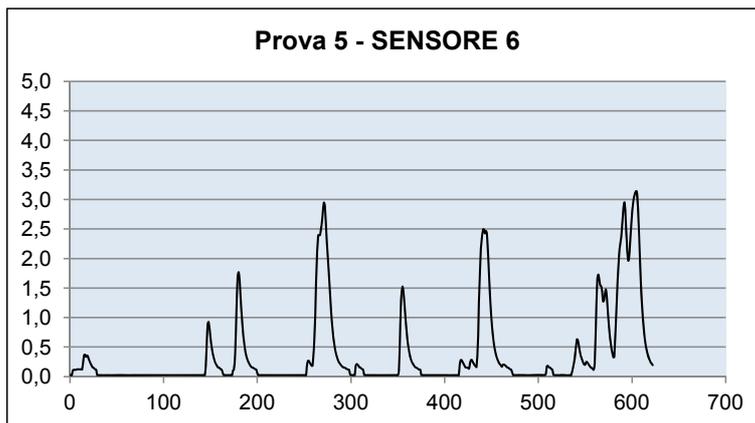


Figura 14

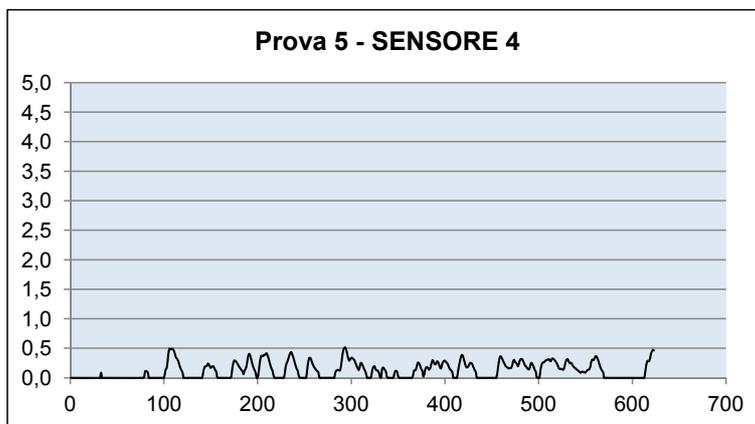


Figura 15

Aumentando la distanza verticale dalla sorgente, la concentrazione diminuisce rapidamente fino a diventare trascurabile ad 1 m da essa. Infatti nella prova 3, i picchi misurati dal sensore 6 (0,1-0,3 %, fig. 16), distante in verticale 1 m dalla sorgente, e le concentrazioni nulle nei sensori 4 e 5 sembrano indicare che l'idrogeno, nel raggio di pochi centimetri dalla verticale, a 1 m di altezza rispetto alla sorgente, tenda a rarefarsi. A distanze inferiori ad 1 m, la concentrazione resta alta, come dimostrato dalla prova 6 effettuata con i sensori 4, 5 e 6, ad una quota di 0,4 m dalla sorgente: per il sensore 6, sulla verticale sono stati rilevati picchi fino al 2,9 % (fig. 17), mentre sui sensori laterali 4 (fig. 18) e 5 (fig. 19) valori rispettivamente fino allo 0,8 % ed allo 0,6 %.

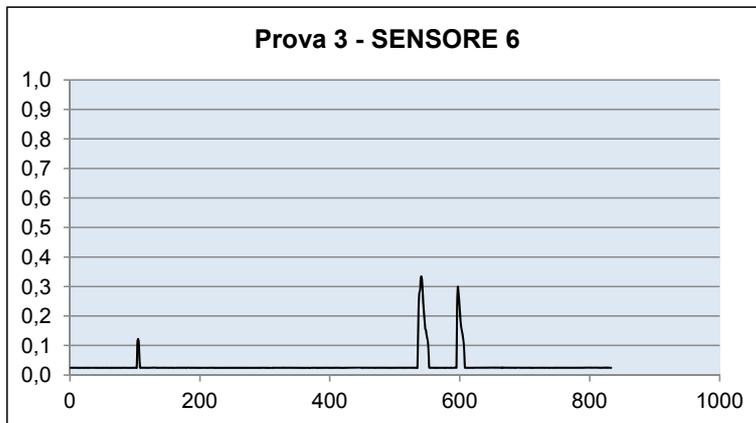


Figura 16

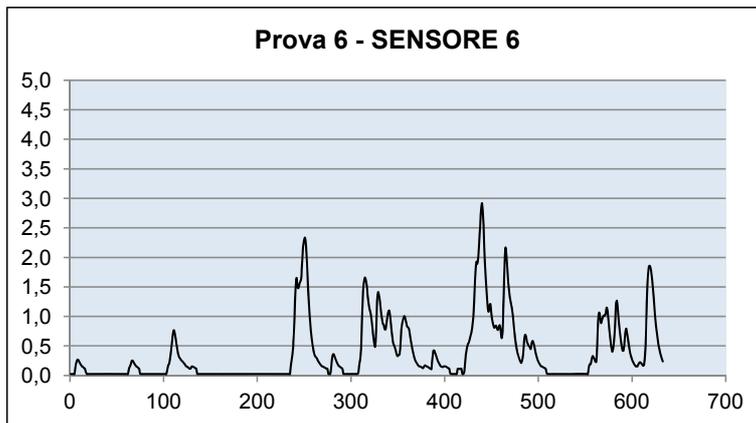


Figura 17

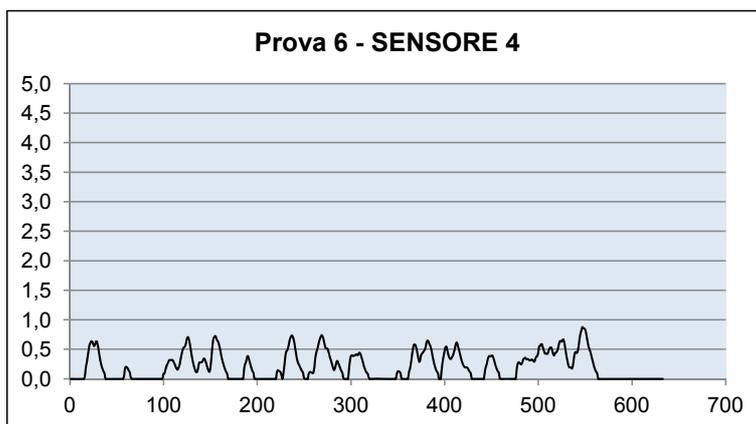


Figura 18

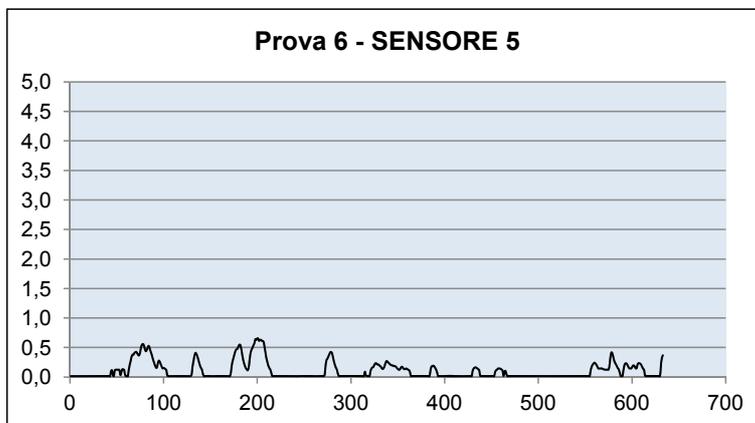


Figura 19

La caratteristica oscillante intorno alla verticale della colonna di miscela aria-idrogeno è dedotta sia dall'andamento dei grafici, dove non si riscontrano valori costanti, ma picchi localizzati, sia dalle concentrazioni che spesso risultano non "centrate" sulla verticale ma spostate su di un lato.

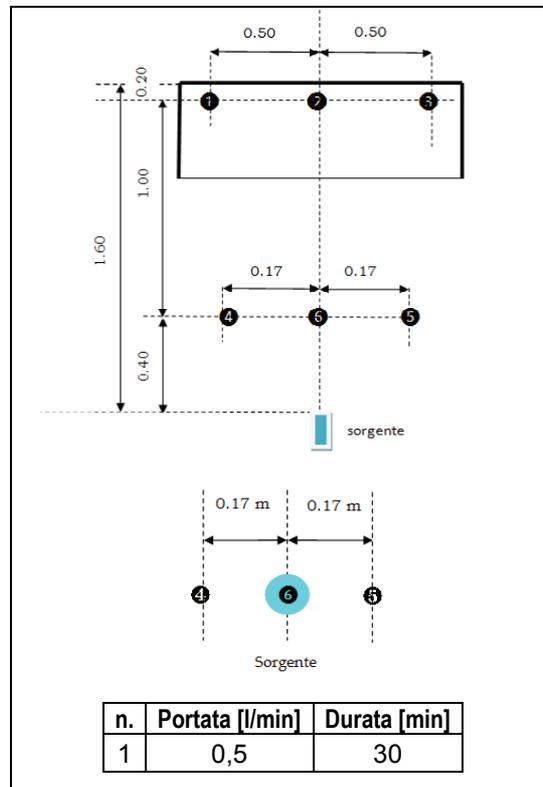
I valori statistici di concentrazione delle prove 4, 5, e 6 (di maggiore interesse), dai quali è possibile avere una visione d'insieme dei valori rilevati e che confermano quanto finora considerato, sono riportati in Allegato I.

I tempi impiegati per raggiungere determinati livelli di concentrazione, ad esempio il 10%, 20% o 30% del LEL, sono importanti sia per valutare il livello di pericolosità dell'accumulo di una concentrazione di miscela potenzialmente esplosiva, sia per definire l'intervento di eventuali sistemi di protezione (arresto, shut down, isolamento dell'alimentazione,...). Tali dati permettono anche di valutare come i sensori sono stati interessati nel tempo dalla concentrazione di idrogeno. Nel caso delle prove descritte, quando i sensori hanno rilevato una concentrazione significativa, come quelle indicate, i tempi sono stati particolarmente brevi: ad esempio nella prova n. 6 il sensore 6, sulla verticale della sorgente, raggiunge una concentrazione del 10% del LEL in 107 s e del 20% del LEL in 239s. Nelle tabelle in Allegato IIA sono riportate le concentrazioni dopo 10s e 20 s e nelle tabelle IIB i tempi per il raggiungimento di concentrazioni comprese tra il 10% e il 92% del LEL. Bisogna peraltro osservare che hanno molta importanza la situazione locale, le condizioni di ventilazione puntuali e la posizione del sensore. È possibile che un sensore raggiunga molto prima un determinato livello di concentrazione di un altro che poi, nel tempo, misurerà invece un livello superiore. Di conseguenza, non è stato possibile definire un preciso comportamento, tranne rilevare una sensibile rapidità nel raggiungere un livello di concentrazione significativo.

#### **Prova 7** (Distanza cappa sorgente: 1,6 m)

Considerati i risultati delle prove precedenti, nelle quali l'accumulo nella cappa si è rivelato trascurabile (concentrazione max. 0,1%), la stessa è stata abbassata ad una distanza di 1,6 m dalla sorgente per verificare l'influenza di una vicinanza maggiore al punto di emissione di idrogeno. I sensori 1, 2, 3 nella cappa si trovano sempre nella medesima posizione. I sensori fuori della cappa 4, 5, 6 sono sulla stessa linea orizzontale ad una quota verticale di 0,40 m sopra la sorgente, come nella prova 6. Le prove sono state

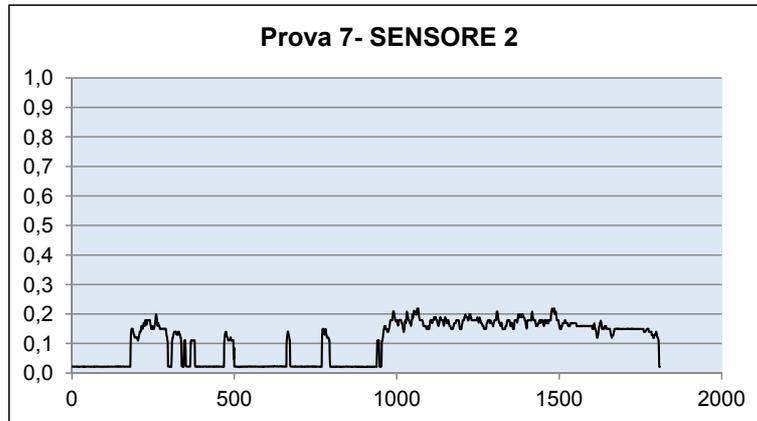
effettuate con temperatura di 15°C e velocità dell'aria pari a 0,11 m/s. In fig. 20 è riportata la posizione in pianta dei sensori, il layout di prova e le indicazioni di portata.



**Figura 20.** Configurazione di prova 7 (id 47)

Per i sensori fuori della cappa si confermano i risultati della prova precedente (livelli di concentrazione e forma delle curve, distribuzione della miscela) con una durata dell'erogazione superiore (30 min), ottenendo l'ulteriore positiva informazione della ripetibilità della prova stessa.

Abbassando l'altezza della cappa rispetto alla sorgente (che risulta così quasi dimezzata), si è formata all'interno della stessa, dopo circa 16 minuti, una concentrazione costante dello 0,2%, che tende a diminuire dopo circa 25 minuti (fig. 21). Disponendo la cappa a 1,60 m, l'idrogeno comincia a rimanere chiaramente intrappolato anche se non si rilevano valori elevati. Non si riscontra un accumulo sempre crescente, ma una tendenza alla diminuzione: è possibile che l'idrogeno si diluisca o si disperda a causa di turbolenze o moti convettivi. Nonostante questa tendenza, i livelli raggiunti hanno le caratteristiche di uno stato sufficientemente stazionario dopo i 30 m di erogazione.



**Figura 21.** Concentrazione prova 7, sensore 2

Per quanto riguarda i tempi necessari a raggiungere determinati livelli di concentrazione, non si riscontra nulla di particolare, si conferma quanto rilevato in precedenza (rapidità del fronte di salita) e si rimanda alle tabelle in Allegato IIA e IIB.

**Prove 8, 9, 10, 11** (Distanza cappa sorgente: 1,2 m)

Queste prove sono state effettuate con la cappa ulteriormente ribassata, ad una distanza di 1,20 m dalla sorgente per trovare il valore più critico per l'accumulo di idrogeno. I sensori 1, 2, 3 nella cappa si trovano sempre nella medesima posizione. I sensori fuori della cappa 4, 5, 6 sono sulla stessa linea orizzontale ad una quota verticale di 0,40 m sopra la sorgente, tranne nella prova 11 in cui si trovano a 0,50 m (fig. 25). Le prove sono state effettuate con una temperatura di 15°C e velocità dell'aria pari a 0,11 m/s. Le configurazioni di prova insieme alla distribuzione delle portate sono indicate nelle figure seguenti (da fig. 22 a fig. 25).

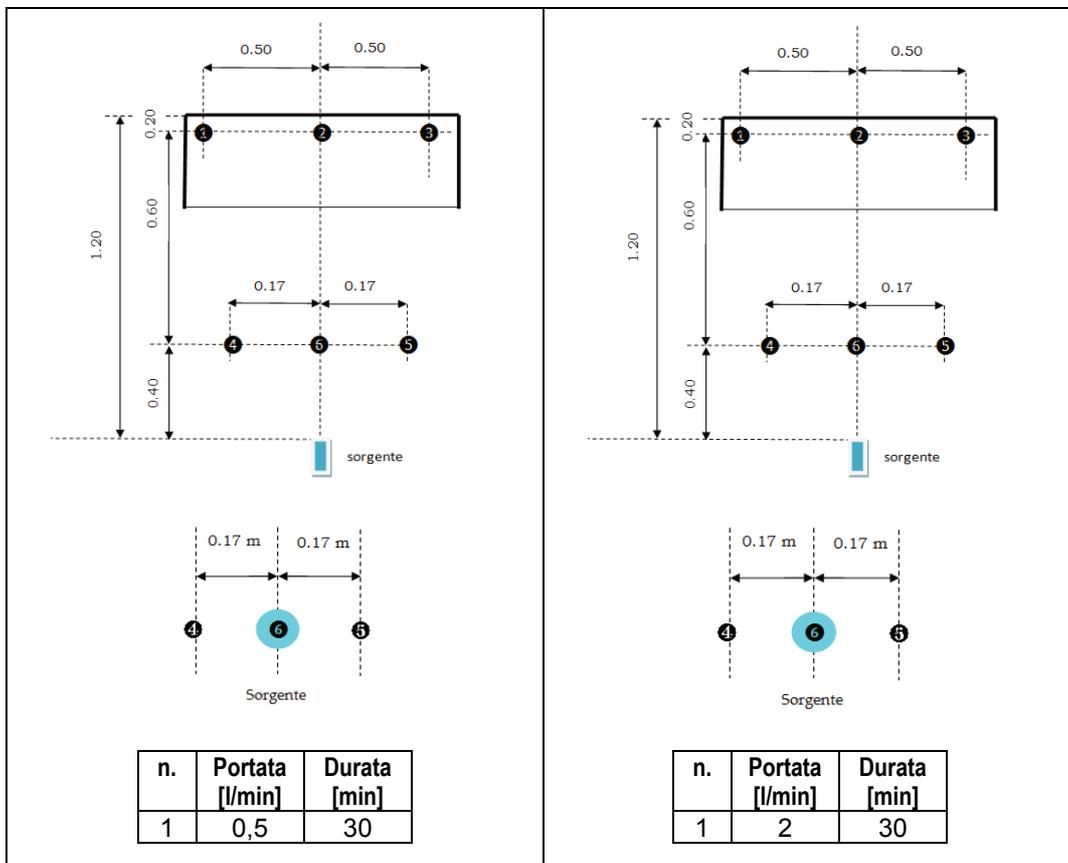
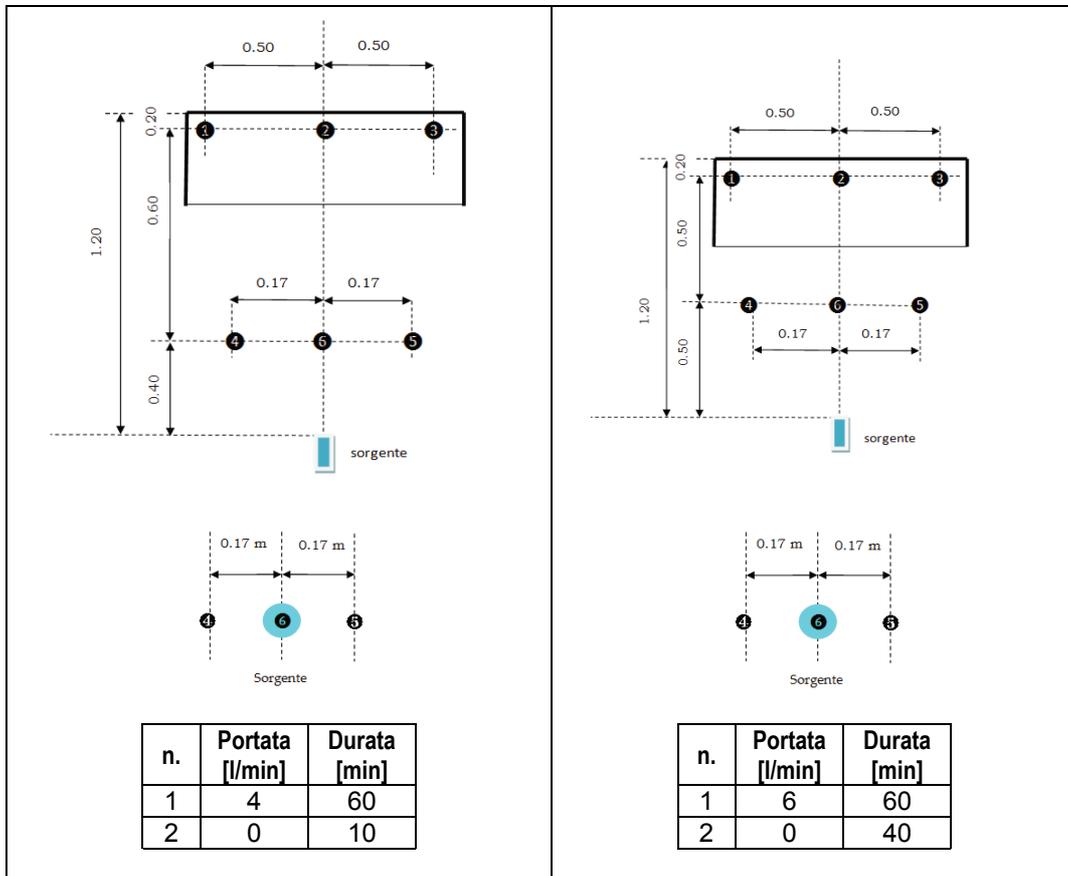


Figura 22. Prova 8

Figura 23. Prova 9



Le prove sono state effettuate a portate crescenti per valutarne l'influenza sull'accumulo nella cappa. Nelle prove n. 10 e n. 11 sono stati registrati i valori di concentrazione al cessare dell'emissione per determinare il tempo di persistenza della miscela aria-idrogeno e verificare l'esistenza di uno specifico comportamento nella dispersione.

L'esame dell'andamento delle concentrazioni nelle diverse configurazioni ha fatto rilevare quanto segue:

- in ambiente libero, lungo il percorso ascensionale del gas, si sono riscontrati risultati che in generale confermano il comportamento rilevato nelle prove precedenti. In particolare si sono evidenziate fluttuazioni nella distribuzione della miscela: a parità di portata non si sono registrati nel sensore 6, posto sulla verticale per la sorgente, i valori elevati di picco del 3% propri delle prove n. 6 e n.7, a dimostrazione sia dell'influenza delle condizioni ambientali locali, sia delle oscillazioni della colonna ascendente di gas. Infatti, se si confrontano fra loro i dati riportati in Allegato I, si nota chiaramente come i valori più alti di concentrazione si siano misurati sul sensore 4, periferico rispetto alla sorgente, segnale che il flusso di idrogeno in salita si è spostato dalla verticale;
- la maggiore vicinanza della cappa alla sorgente (1,2 m) ha fatto rilevare, sui sensori collocati al suo interno, valori di concentrazione e quindi di accumulo sensibilmente più

elevati. Sembra quindi che l'intrappolamento di idrogeno in concentrazioni importanti avvenga, per portate da 2 l/m fino a 6 l/m, solo con emissioni vicine alla cappa a distanze dell'ordine del metro, mentre con valori superiori l'accumulo del gas all'interno è basso. La tabella seguente mette in relazione il valore massimo registrato con la portata e l'altezza della cappa rispetto alla sorgente.

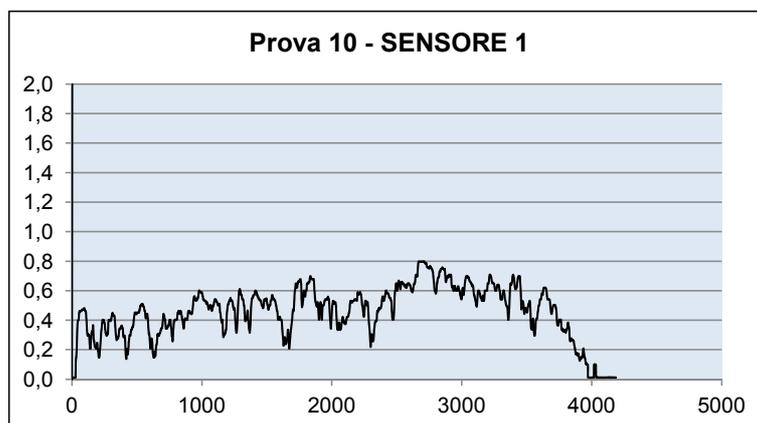
Prova	Portata [l/m]	Conc. Max [%]	H cappa [m]
4	6	0,2	3
5	0,5	0	3
6	0,5	0	3
7	0,5	0,2	1,6
8	0,5	0,6	1,2
9	2	0,4	1,2
10	4	0,8	1,2
11	6	1,6	1,2

**Tabella 6.** Relazione portata, concentrazione, altezza cappa

I sensori all'interno della cappa (n.1, n. 2 e n. 3) hanno fornito risultati simili fra loro ed ognuno può essere preso come rappresentativo degli altri.

Le prove n. 10 e n. 11 hanno avuto una durata di emissione di 60 m durante la quale hanno raggiunto un livello di concentrazione sufficientemente stazionario, come si può constatare dai grafici in fig. 26 ed in fig. 27. Nelle stesse figure è anche riportato il decadimento della concentrazione una volta cessata l'emissione.

In particolare l'andamento della curva in fig. 26 sembra indicare presenza di turbolenza o moti convettivi nella cappa.



**Figura 26.** Concentrazione prova 10, sensore 1

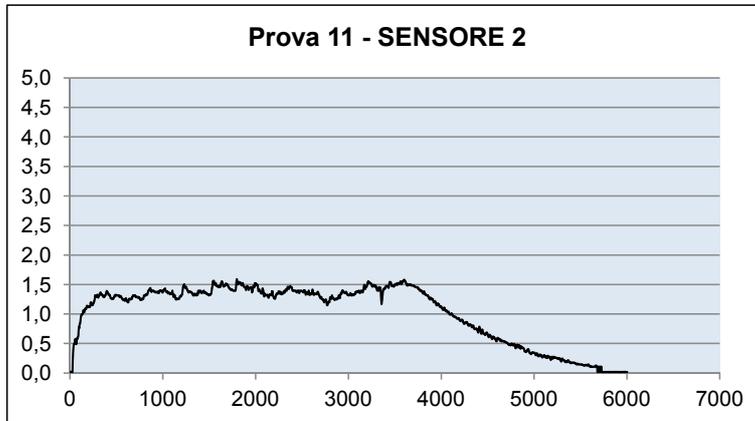


Figura 27. Concentrazione prova 11, sensore 2

Per la concentrazione all'interno della cappa è particolarmente interessante la rapidità del fronte di salita all'inizio della prova che conferma quanto già osservato in precedenza: ad esempio per raggiungere il 10% del LEL, al sensore 1 sono stati sufficienti 40s nella prova n. 10 e 25 nella prova 11. Per maggiori informazioni si rimanda all'Allegato II.

Una volta cessata l'emissione, la concentrazione decade con legge chiaramente esponenziale, in 10 minuti nella prova 10 ed in 40 minuti nella prova 11, come visibile nelle figure seguenti.

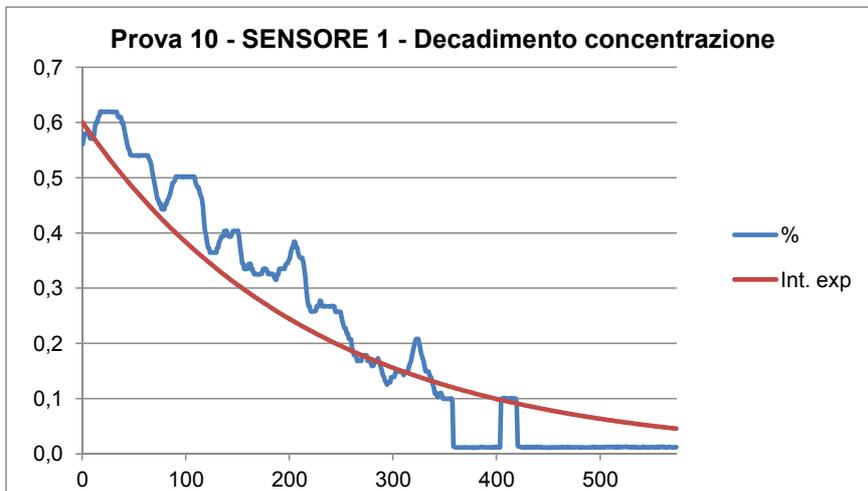


Figura 28. Interpolazione esponenziale

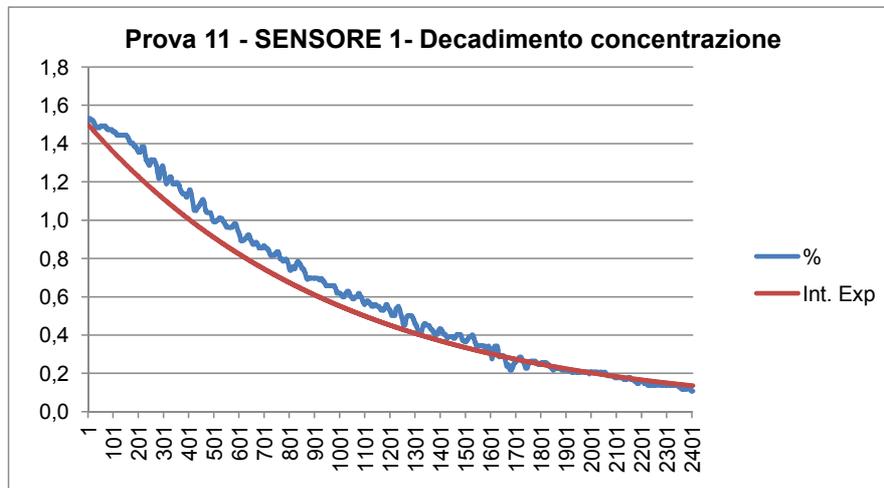


Figura 29. Interpolazione esponenziale Prova 11

Le curve di interpolazione sono rispettivamente per la prova 10 e la prova 11:

- $y = 0,6 \cdot \exp(-0,005 \cdot t)$ ;
- $y = 1,5 \cdot \exp(-0,001 \cdot t)$ .

Le curve esponenziali interpolano in maniera soddisfacente il decadimento della concentrazione, dimostrando che esso avviene con una costante di tempo dipendente presumibilmente ed in gran parte dalla quantità di gas intrappolato.

#### Prove 12, 13 (misure all'interno della cappa)

Queste prove sono state effettuate per analizzare quanto avviene all'interno della cappa. In particolare si sono volute verificare le ipotesi formulate sulla base dei risultati delle prove precedenti, cioè che l'idrogeno, molto leggero, si addensa nella parte più alta della cappa, immediatamente sotto la superficie superiore. A tale scopo, su di essa sono stati praticati due fori attraverso i quali è stata fatta passare solo la parte sensibile dei sensori 4 e 5, mentre il corpo restava all'esterno. Un sistema di guarnizioni manteneva la tenuta dei fori di passaggio evitando che il gas potesse fuoriuscire. I sensori 1, 2 e 3 sono rimasti nella stessa posizione delle prove precedenti. Il sensore 6 è stato posto sulla verticale per la sorgente di emissione, ad una distanza da essa di 0,80 m in modo da risultare 0,10 m all'interno della cappa, molto vicino alla base. La distanza della cappa dalla sorgente è quella delle prove immediatamente precedenti, pari ad 1,2 m. Le configurazioni di prova e portata sono di seguito indicate.

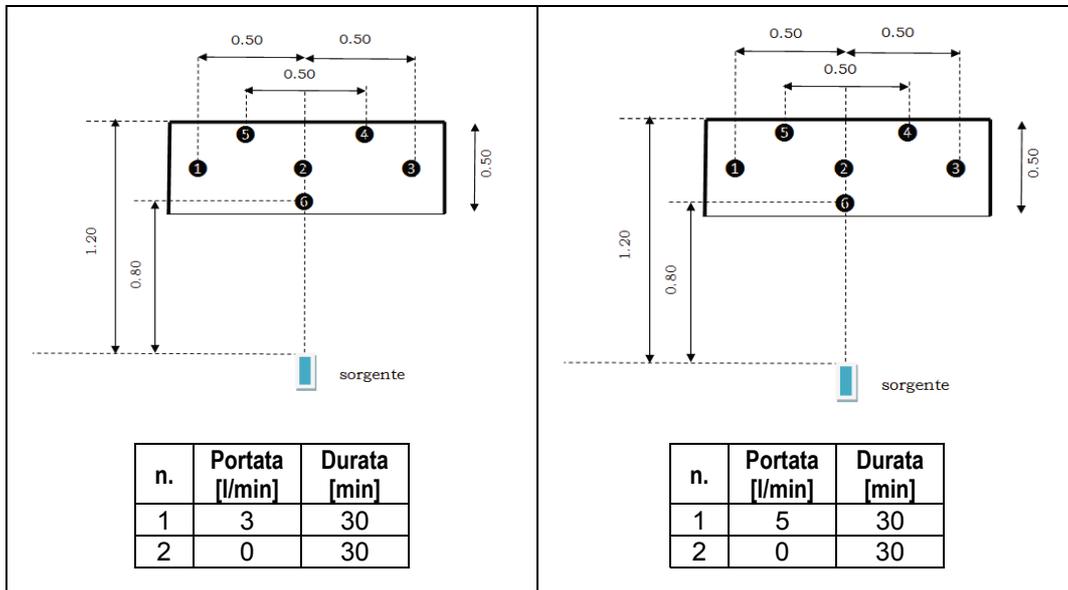


Figura 30. Prova 12

Figura 31. Prova 13

Le prove hanno avuto stessa durata e sono state effettuate a portate crescenti per valutarne l'influenza sull'accumulo nella cappa. Anche in questo caso sono stati registrati i valori di concentrazione al cessare dell'emissione per determinare il tempo di persistenza della miscela aria-idrogeno e verificare l'esistenza di uno specifico comportamento/regola nella dispersione.

In generale, tutti i sensori alla stessa altezza hanno mostrato andamenti simili, per cui uno di essi può essere preso come identificativo degli altri (ripetibilità dei valori di concentrazione a quote uguali nella cappa).

I sensori posti immediatamente sotto la superficie superiore della cappa (n. 4 e n. 5) hanno confermato l'ipotesi di un accumulo in uno strato agitato da turbolenze e moti convettivi, a concentrazione più alta rispetto agli altri. Le figure seguenti infatti (sensore n. 4) mostrano un andamento "frastagliato" delle curve di concentrazione con diversi picchi pronunciati che raggiungono valori massimi importanti (2,7 % nella prova n. 12 e 3,7 % nella prova n. 13).

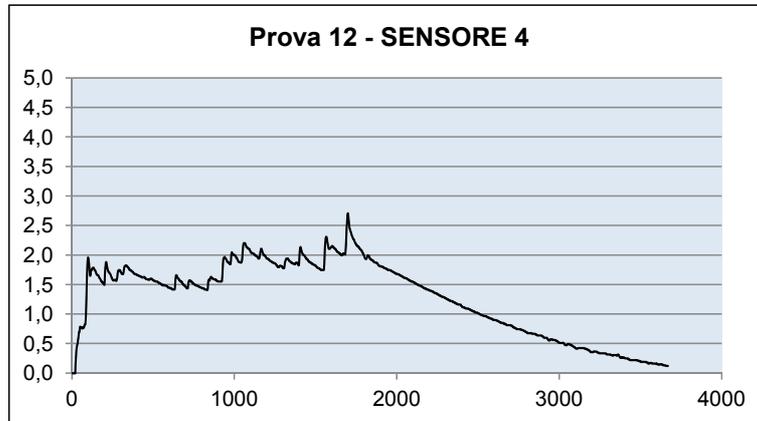


Figura 32. Concentrazione prova 12, sensore 4

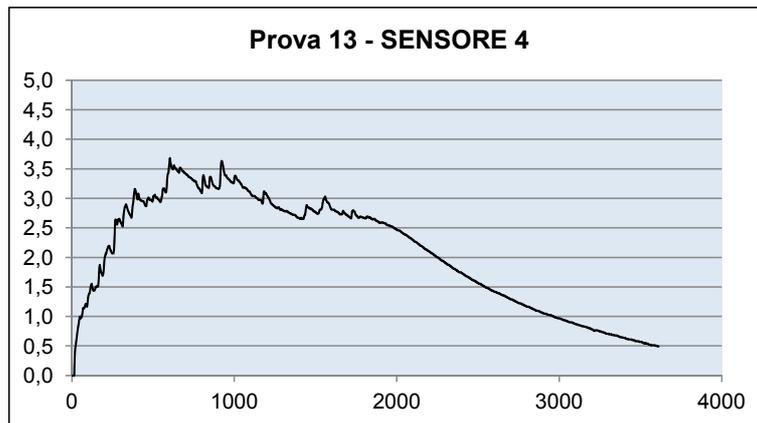


Figura 33. Concentrazione prova 13, sensore 4

A distanza di 0,2 m dalla superficie superiore (cioè nella posizione classica dei sensori n. 1, n. 2 e n. 3) la condizione della miscela aria-idrogeno è quasi stabile, segnale della presenza di condizioni dello strato di tipo laminare e di assenza di moti turbolenti. Le figure seguenti infatti (sensore n. 1) mostrano un andamento continuo senza i picchi accentuati della zona "alta".

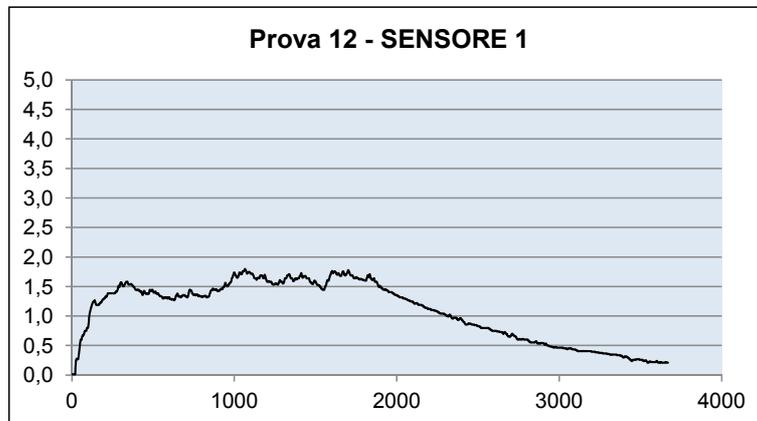


Figura 34. Concentrazione prova 12, sensore 1

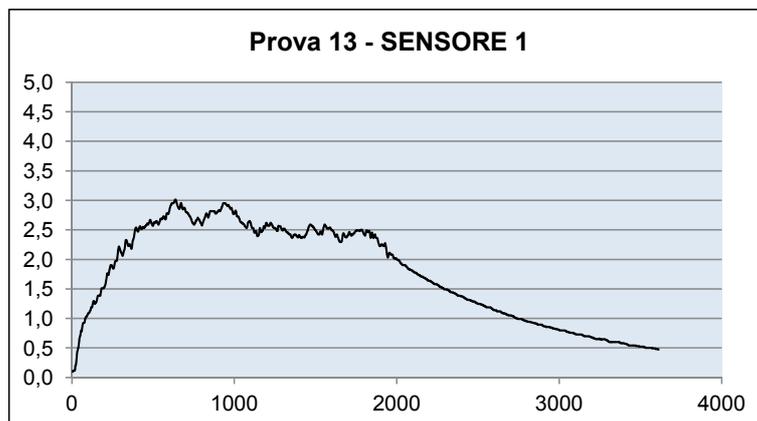


Figura 35. Concentrazione prova 13 sensore 1

In prossimità della parte più bassa della cappa, monitorata dal sensore n. 6, corrispondente alla zona di "confine" con l'ambiente libero del locale, la curva di concentrazione torna ad essere caratterizzata da frequenti picchi, di basso valore ed altezza, indice di una turbolenza indotta proprio dalla vicinanza con la zona esterna.

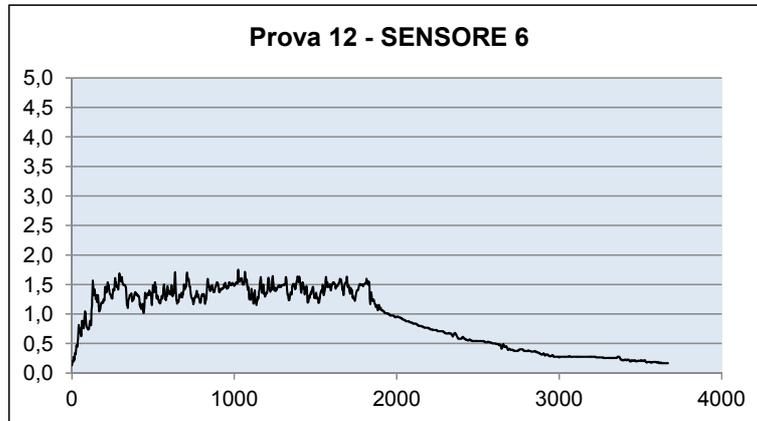


Figura 36. Concentrazione prova 12 sensore 6

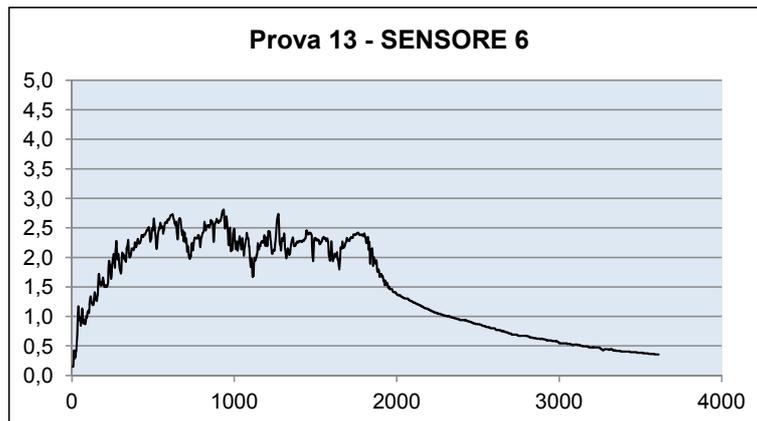
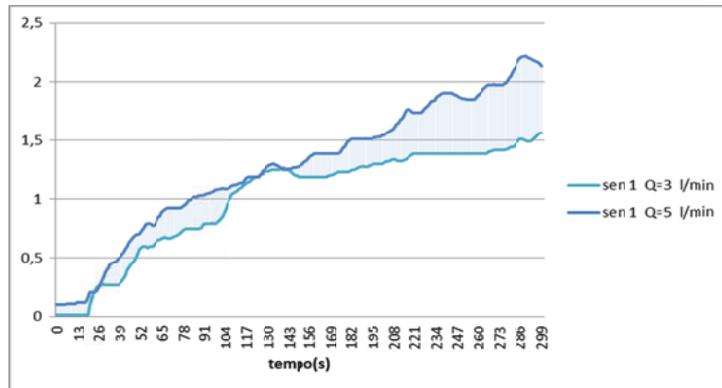


Figura 37. Concentrazione prova 13 sensore 6

Se si confrontano (si veda ALL. I) i valori massimi di concentrazione raggiunti in queste configurazioni con quelli rilevati nelle prove precedenti (es. n. 10 e n. 11), per i sensori posti alla stessa altezza e per portate omologhe, si nota che i primi sono superiori in valore: tale effetto potrebbe essere dovuto a condizioni termiche e di ventilazione locali difficilmente registrabili che dimostrano un'influenza importante sulla distribuzione dell'idrogeno. A parte il comportamento o la fenomenologia, che resta la stessa, possono dunque riscontrarsi, fra prove effettuate nelle medesime condizioni "generali", differenze di valori dovute a condizioni "puntuali".

L'analisi del fronte di salita, o transitorio iniziale, delle curve di concentrazione è caratterizzato da una crescita rapida dei valori, con forte pendenza, come già rilevato per le prove precedenti (si veda l'All. II B). Ad esempio per il sensore n. 1 si hanno gli andamenti indicati nella figura seguente.



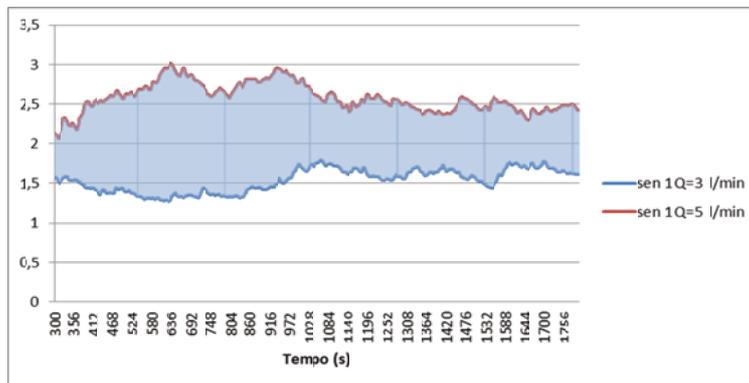
**Figura 38.** Sensore 1 - Profili di concentrazione nei primi 300 secondi dell'emissione al variare della portata

Si raggiungono valori pari al 30% del LEL in tempi dell'ordine del minuto e valori inferiori ancor più brevemente, come indicato nella tabella seguente.

n. Prova	Sensore	10% LEL	20% LEL	30% LEL
12	1	45	99	125
13	1	31	62	137

**Tabella 7.** Tempi per il raggiungimento del 10%, 20% e 30% del LEL

Dopo la fase di transitorio iniziale durata circa 300 s si individua una fase stazionaria, di regime, a concentrazione pressoché costante fino alla interruzione dell'emissione (1800 s dall'inizio dell'erogazione), come visibile nella figura seguente.

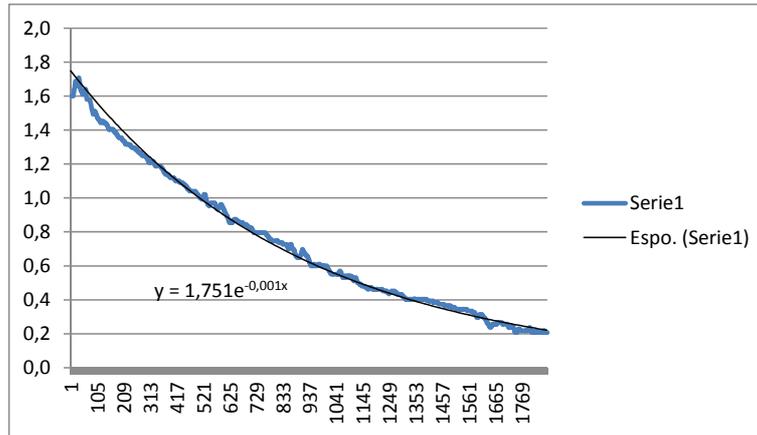


**Figura 39.** Sensore 1 - Fase di regime

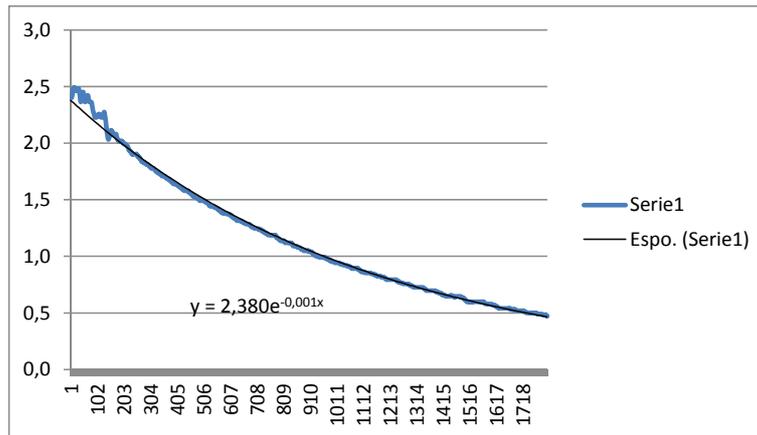
Il livello di regime varia con la portata, aumentando con essa.

Al termine dell'erogazione, come per le prove n. 10 e n. 11, è stato effettuato un monitoraggio della dispersione della miscela per valutare i tempi di permanenza della stessa e le modalità del suo decadimento.

Una volta cessata l'emissione, la concentrazione decade con legge chiaramente esponenziale, come dimostrato dalle figure seguenti.



**Figura 40.** Sensore 1 - PROVA 12 - Decadimento concentrazione



**Figura 41.** Sensore 1 - PROVA 13 - Decadimento concentrazione

Le curve di interpolazione sono rispettivamente per la prova 12 e la prova 13:

- $y = 1,7 \cdot \exp(-0,001 \cdot t)$ ;
- $y = 2,4 \cdot \exp(-0,001 \cdot t)$ .

Tali curve, come si può vedere nelle figure precedenti, interpolano con notevole efficacia il decadimento della concentrazione con la stessa costante di tempo.

## 6. Conclusioni

Le prove effettuate hanno permesso di analizzare il fenomeno della diffusione dell'idrogeno per portate variabili da 0,07 l/m fino a 6/7 l/m in ambiente chiuso, anche se molto vasto, nonché di valutare le modalità di accumulo in parti di strutture che ne favoriscono la raccolta ed il ristagno, simulate da una cappa posta a diversi livelli dalla sorgente.

L'esame dei risultati può essere fatto separatamente per quanto riguarda i fenomeni all'interno della cappa e fuori di questa.

Per quanto riguarda il comportamento dell'idrogeno in ambiente libero a seguito di un'emissione si è rilevato quanto segue:

- in qualsiasi condizione di portata selezionata, il gas tende a salire velocemente ed a distribuirsi intorno alla verticale passante per il punto di emissione, creando un flusso di raggio massimo pari a 0,2 m (presenza di miscela limitata al campo vicino ed assente nel campo lontano). La zona interessata da una concentrazione significativa di gas può essere quindi rappresentata con un cilindro avente raggio 0,2 m ed altezza 1 m. Infatti oltre questa altezza (1,5 m) tutti i sensori, sopra la sorgente e periferici, rilevano concentrazioni prossime allo zero, mentre quelli ad 1 m dalla sorgente registrano concentrazioni minime, comunque apprezzabili, con valori dell'ordine dello 0,3% per portate di 6 l/m.

È interessante notare come queste dimensioni della zona interessata dalla miscela aria- idrogeno, valutate nelle condizioni di portata massima, ben si adattano a quelle ottenute applicando il metodo proposto dalla norma CEI 31-35, che restituiva un cilindro di altezza "a" pari ad 1 m e raggio "b" pari a 0,5 m. Occorre sempre ricordare che, comunque, questi valori calcolati risentono dell'applicazione di coefficienti stabiliti, da chi effettua la valutazione, in base alla propria esperienza.

A distanze verticali invece inferiori a 0,5 m dalla sorgente e nel raggio di 0,2 m da essa, si rilevano concentrazioni significative. Infatti, in tutte le prove con portate comprese tra 0,5 e 6 l/min e sensori collocati ad una altezza variabile da 0,25 a 0,50 m dalla sorgente e ad un raggio massimo orizzontale di 0,17 m, si sono registrate concentrazioni apprezzabili e crescenti al crescere delle portate.

Un fenomeno interessante, peraltro rilevato anche in altre attività di ricerca, è la natura oscillatoria intorno alla verticale della colonna di gas. Infatti vi sono sensori periferici che a parità di altezza, in alcune prove, misurano una concentrazione superiore rispetto a quella del sensore centrale. Questo potrebbe essere legato sia alla direzione preferenziale del vettore velocità delle molecole di idrogeno in uscita dalla sorgente, sia a condizioni puntuali di temperatura e di movimento d'aria.

Non si sono mai rilevati valori di concentrazione stazionaria in condizione di emissione, ma singoli picchi più o meno larghi o livelli di concentrazione di durata ridotta, ed in ogni caso tempi di salita rapidi. Una volta cessata l'emissione, tutti i valori di concentrazione si azzerano istantaneamente.

È stato inoltre notato come piccole variazioni delle condizioni ambientali e di ventilazione (apertura di una porta o finestra anche lontano dalla zona di emissione e misura), cambiano significativamente i risultati di concentrazione registrati.

Il comportamento dell'idrogeno in relazione a possibili zone di intrappolamento, simulate in questi test dalla cappa posta al di sopra della sorgente, a diverse distanze verticali da essa, ha fatto notare quanto segue:

- la posizione della cappa e la portata di emissione hanno notevole influenza sull'accumulo e la concentrazione all'interno. Infatti nella cappa posta a 3 m dalla

sorgente le concentrazioni risultano trascurabili, si registrano valori nulli tranne nel caso di portata pari a 6 l/m, con la quale si raggiunge il valore dello 0,1 %. Abbassando la cappa ad 1.6 m, l'idrogeno comincia a rimanere sensibilmente intrappolato anche se non si rileva un accumulo crescente ma una tendenza alla diminuzione: forse il gas si diluisce o si disperde a causa di turbolenze o moti convettivi. I sensori (0,20 m dalla superficie superiore), dopo circa 16 min di emissione, hanno rilevato la formazione di una concentrazione costante pari allo 0,2% che, come anzidetto, tende a diminuire dopo circa 25 minuti (v. prova n.7). Alla distanza minima provata con la cappa ad 1,20 m dalla sorgente si sono riscontrate concentrazioni significative molto prossime al LEL. Tali concentrazioni aumentano all'aumentare della portata;

- all'interno della cappa la miscela aria-idrogeno a concentrazione maggiore si trova sotto la copertura ed è distribuita in uno strato di natura turbolenta agitato da forti moti convettivi. Nella zona immediatamente sottostante, il gas mostra una condizione fluidodinamica di tipo laminare mentre nelle vicinanze della parte più bassa, a 0,10 m dal margine inferiore della cappa (sensore 6 prove dalla n. 12 alla n. 13, la concentrazione diminuisce e, come nella parte alta, si nota un regime turbolento, probabilmente dovuto al moto dell'aria dell'ambiente circostante;
- in ogni prova tutti i sensori nella cappa posti alla stessa altezza hanno mostrato dati confrontabili e quindi ripetibili;
- all'interno della cappa durante l'erogazione si distinguono due fasi: un transitorio iniziale di rapida crescita della concentrazione (ad esempio nella prova n. 13 il sensore 1 raggiunge il 10 % della concentrazione in 31 s) ed una fase di regime stazionaria dove questa raggiunge valori pressoché stabili;
- quando l'emissione viene interrotta, in tutta la cappa si stabilisce un processo di decadimento esponenziale della concentrazione ed i tempi di riduzione dipendono sia dal livello di concentrazione raggiunta che dalla costante di tempo. È interessante notare come i valori di tale costante di tempo per portate di 3-5-6 l/s siano uguali ( $0,001 \text{ s}^{-1}$ ), mentre quella relativa alla portata di 4 l/s è 5 volte superiore ( $0,005 \text{ s}^{-1}$ ).

#### **Criteria per la sicurezza dei luoghi di lavoro**

Le prove effettuate hanno permesso di fare alcune considerazioni relative alla sicurezza nei luoghi di lavoro dove possono essere presenti emissioni di idrogeno e dove questo può accumularsi.

Il metodo della norma CEI 31-35 restituisce valori e forme delle zone, contenenti miscela aria-idrogeno, abbastanza compatibili con i risultati delle prove e sicuramente a favore della sicurezza.

La tendenza dell'idrogeno a distribuirsi in geometrie cilindriche di piccolo raggio, quasi tubolari, restringe l'ampiezza delle zone pericolose e limita quindi il campo interessato dal fenomeno, alla zona immediatamente circostante l'emissione. Anche le altezze raggiunte non sono eccessive, massimo 1 m circa, segno della forte tendenza alla diffusione ed alla dispersione, favorita dalle piccole dimensioni della molecola e dalla bassa densità del gas. Ovviamente le dimensioni dell'ambiente, le sue condizioni di ventilazione e temperatura hanno un ruolo decisivo e primario nei confronti di quanto detto, per cui bisogna sempre tener presente le condizioni in cui le prove descritte sono state effettuate: ambiente chiuso ma vasto, ventilazione dovuta alle infiltrazioni, emissione subsonica, velocità dell'aria 0,11 m/s e temperatura ambiente di 15°C.

Un altro aspetto importante è la natura oscillante intorno alla verticale di queste forme geometriche in cui si può considerare distribuita la miscela. Questo comportamento suggerisce di prestare particolare attenzione nel posizionamento e nella scelta del numero di eventuali sensori, predisposti per rivelare (con un segnale di trigger) l'incipiente formarsi di un'atmosfera esplosiva e segnalare la situazione di pericolo all'unità di controllo, che comanda le conseguenti reazioni per raggiungere una condizione sicura. Inoltre occorre tener presente la rapidità del fronte di salita della concentrazione e tarare i sensori per valori bassi (10%LEL).

Le prove hanno anche messo in risalto l'efficacia della ventilazione se pur minima e l'effetto positivo di correnti d'aria nella dispersione del gas.

Si è anche evidenziato, in ambiente libero, come l'immediata interruzione dell'emissione provochi la scomparsa della concentrazione e come quindi un intervento tempestivo possa evitare situazioni pericolose.

Per quanto riguarda i problemi creati da eventuali zone di accumulo, come sottotetti o concavità, le prove hanno messo in evidenza come il pericolo possa essere efficacemente ridotto con la distanza. Come già detto, le condizioni dell'ambiente dominano il fenomeno per cui una piccola stanza od un involucro restano sempre situazioni pericolose dove è indispensabile la ventilazione.

Le prove, specialmente la n. 12 e n. 13, hanno evidenziato la pericolosità di strutture concave immediatamente prossime alla sorgente di emissione, dove il gas si accumula drasticamente.

Infine, la misurazione dei tempi di persistenza ha mostrato la natura esponenziale del decadimento della concentrazione, molto rapido negli istanti immediatamente successivi alla interruzione dell'emissione e più lento dopo, secondo costanti di tempo molto simili nella maggior parte dei casi considerati.

## 7. Bibliografia

[Sw-003] Michael R Swain, Patrick Filoso, Eric S. Grilliot and Matthew N. Swain - Hydrogen leakage into simple geometric enclosure. 1/2003 USA

[Ag-005] Vladimir M. Agranat, Andrei V. Tchouvelev, Zhong Cheng A.V. CFD modeling of gas release and dispersion: prediction of flammable gas clouds Mississauga, Ontario, I5w 1r2, Canada

[An-006] Angers B., Hourry A., Bénard P., Tessier P. and Perrin J., Simulations of hydrogen releases from high pressure storage systems, WHEC 16, 13-16 June, 2006 Lyon France.

[Br-007] BRHS Biennial Report on Hydrogen Safety. Chapter 3 Accidental phenomena and consequences – HySafe June 2007

[Gr-013] Grune J., Sempert K., Haberstroh H., Kuznetsov M., Jordan T. Experimental investigation of Hydrogen-air deflagrations and detonations in semi-confined flat layer, (2013) Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Elsevier. 26, 317-323

[Ha-014] Hajji, Y., Bouteraa, M., Cafsi, A.E., Belghith, A., Bournot, P., Kallel, F. Dispersion and behavior of hydrogen during a leak in a prismatic cavity (2014) International Journal of Hydrogen Energy, 39 (11), pp. 6111-6119.

[Sc-014] Schiavetti, M., Marangon, A., Carcassi, M. Experimental study of vented hydrogen deflagration with ignition inside and outside the vented volume (2014) International Journal of Hydrogen Energy, 39 (35), pp. 20455-20461.

## **8. Normativa e legislazione di riferimento**

UNI EN 1127-1 Atmosfere esplosive - Prevenzione e protezione contro l'esplosione. Parte 1: concetti base e metodologia

CEI EN 60079-10-1 Costruzioni elettriche per atmosfere esplosive per la presenza di gas. Classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione

CEI 31-35 - Guida all'applicazione della norma CEI EN 60079-10-1. Classificazione dei luoghi con pericolo di esplosione per la presenza di gas, vapori o nebbie infiammabili

DPR 126/98 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

D.lgs. 233/03 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

Regolamento CE N. 1272/2008 del parlamento europeo e del consiglio del 16 dicembre 2008 relativo alla classificazione, all'etichettatura e all'imballaggio delle sostanze e delle miscele. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea del 31.12.2008

Direttiva 2014/34/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 26 febbraio 2014 concernente l'armonizzazione delle legislazioni degli Stati membri relative agli apparecchi e sistemi di protezione destinati a essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva. 29.3.2014 Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea

**Allegato I Massimo, minimo, mediana, moda, media e deviazione (prove 4-13)**

<b>Prova 4 Id 25</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
sen 2	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
sen 3	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
sen 4	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
sen 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 6	1,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
sen 7	1,7	0,6	1,7	1,7	1,7	0,2

<b>Prova 5 Id 44</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 4	0,5	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
sen 5	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1
sen 6	3,1	0,0	0,0	0,0	0,4	0,7

<b>Prova 6 Id 46</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 4	0,9	0,0	0,1	0,0	0,2	0,2
sen 5	0,7	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
sen 6	2,9	0,0	0,2	0,0	0,4	0,5

<b>Prova 7 Id 47</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
sen 2	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
sen 3	0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
sen 4	0,9	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
sen 5	0,6	0,7	0,0	0,0	0,0	0,1
sen 6	3,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,7

<b>Prova 8 Id 50</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
sen 2	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
sen 3	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
sen 4	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
sen 5	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 6	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0

<b>Prova 9 Id 51</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	0,4	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
sen 2	0,3	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
sen 3	0,3	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
sen 4	1,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3
sen 5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
sen 6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0

<b>Prova 10 Id 53</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	0,8	0,0	0,5	0,5	0,5	0,2
sen 2	0,8	0,0	0,5	0,7	0,5	0,2
sen 3	0,8	0,0	0,5	0,5	0,5	0,2
sen 4	2,9	0,0	0,5	0,0	0,7	0,7
sen 5	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
sen 6	0,8	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0

<b>Prova 11 Id 54</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	1,6	0,0	1,3	1,3	1,3	0,2
sen 2	1,6	0,0	1,4	1,4	1,3	0,2
sen 3	1,5	0,0	1,3	1,3	1,3	0,2
sen 4	3,4	0,0	2,1	0,0	1,8	1,0
sen 5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2
sen 6	1,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1

<b>Prova 12 Id 62</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	1,8	0,0	1,3	1,4	1,1	0,5
sen 2	1,8	0,0	1,3	1,4	1,0	0,5
sen 3	1,8	0,0	1,3	1,3	1,1	0,5
sen 4	2,7	0,0	1,5	1,6	1,3	0,6
sen 5	2,6	0,0	1,4	0,3	1,2	0,6
sen 6	1,8	0,1	1,0	0,3	0,9	0,5

---

<b>Prova 13 Id 63</b>	<b>Massimo</b>	<b>Minimo</b>	<b>Mediana</b>	<b>Moda</b>	<b>Media</b>	<b>Deviazione</b>
sen 1	3,0	0,1	1,9	0,6	1,8	0,8
sen 2	3,2	0,0	1,9	2,4	1,8	0,9
sen 3	3,0	0,0	1,9	2,4	1,8	0,8
sen 4	3,7	0,0	2,4	2,8	2,1	0,9
sen 5	3,5	0,0	2,2	2,6	2,0	0,9
sen 6	2,8	0,1	1,5	0,7	1,5	0,8

**Allegato II A Concentrazione di idrogeno dopo 10 e 20 secondi**

<b>10 s</b>	<b>sen 1</b>	<b>sen2</b>	<b>sen3</b>	<b>sen4</b>	<b>sen 5</b>	<b>sen 6</b>	<b>sen7</b>
Prova 4 (25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,7
Prova 5 (44)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-
Prova 6 (46)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	-
Prova 7 (47)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Prova 8 (50)	0,5	0,5	0,5	0,2	0,0	0,1	-
Prova 9 (51)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	-
Prova 10 (53)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	-
Prova 11 (54)	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,1	-
Prova 12 (62)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-
Prova 13 (63)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-

<b>20 s</b>	<b>sen 1</b>	<b>sen2</b>	<b>sen3</b>	<b>sen4</b>	<b>sen 5</b>	<b>sen 6</b>	<b>sen7</b>
Prova 4 (25)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	1,7
Prova 5 (44)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-
Prova 6 (46)	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	-
Prova 7 (47)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Prova 8 (50)	0,5	0,6	0,5	0,0	0,0	0,1	-
Prova 9 (51)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	-
Prova 10 (53)	0,0	0,2	0,0	0,1	0,2	0,5	-
Prova 11 (54)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-
Prova 12 (62)	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,3	-
Prova 13 (63)	0,2	0,2	0,0	0,5	0,6	0,3	-

**Allegato II B Tempi per il raggiungimento di concentrazioni comprese tra il 10% e il 92 % LEL**

<b>10% LEL (0,4)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 1	0	0	0	0	0	0	48	25	45	31
sen 2	0	0	0	0	0	0	54	36	45	33
sen 3	0	0	0	0	0	0	325	50	48	34
sen 4	0	0	19	266	345	23	28	10	28	19
sen 5	0	0	68	48	660	0	15	674	28	18
sen 6	20	146	107	171	0	16	11	71	26	11
sen 7	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-

<b>20% LEL (0,8)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 1	0	0	0	0	0	0	2686	92	99	62
sen 2	0	0	0	0	0	0	2686	102	105	66
sen 3	0	0	0	0	0	0	2686	104	103	68
sen 4	0	0	545	342	0	0	30	62	76	37
sen 5	0	0	0	0	0	0	2993	1973	43	40
sen 6	0	147	239	224	0	0	15	73	42	35
sen 7	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-

<b>30%LEL (1,2)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 1	0	0	0	0	0	0	0	0	125	125
sen 2	0	0	0	0	0	0	0	0	137	114
sen 3	0	0	0	0	0	0	0	0	128	125
sen 4	0	0	0	0	0	0	0	0	89	84
sen 5	0	0	0	0	0	0	0	0	84	133
sen 6	0	0	0	0	0	0	0	0	124	124
sen 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

<b>60%LEL(2,4)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	452
sen 7	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-

<b>70%LEL(2,8)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sen 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	933
sen 7	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-

<b>80%LEL(3,2)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	584

<b>87%LEL(3,497)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	933

<b>92%LEL(3,68)</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>Portate l/min</b>	<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
sen 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	603



