



## IL DECOMMISSIONING DEI SITI CIVILI E INDUSTRIALI

IL RISCHIO LEGATO ALLE ATMOSFERE TOSSICHE, ESPLOSIVE E INERTI

INGEGNERIA CIVILE - AMBIENTALE  
A.A. 2017 - 2018

**eRWorx.**



I primi agenti di pericolo di cui ci dobbiamo occupare sono quelli, cosiddetti, di origine atmosferica.

Ce ne dobbiamo preoccupare soprattutto quando nel sito siano presenti **ambienti confinati** o scarsamente ventilati; gas o vapori pericolosi possono essere presenti in serbatoi, vasche, silos, tubazioni, cunicoli, pozzetti e ambienti simili



Per gas e vapori genericamente definiti  
PERICOLOSI intendiamo quelli che hanno le  
seguenti proprietà:

1. Asfissianti
2. Azione tossico-cinetica nei confronti  
dell'uomo (tossici o nocivi)
3. Infiammabili/esplosivi
4. Inquinanti per l'ambiente



La loro presenza va indagata sia nel caso in cui gli ambienti confinati si trovino da lungo tempo in uno stato imperturbato, che quando si provochino deliberatamente o accidentalmente azioni di disturbo, anche apparentemente insignificanti, rispetto allo stato originario.



A seguito di azioni apparentemente di poco conto possono infatti innescarsi vaporizzazioni di liquidi, reazioni di ossidoriduzione, reazioni piroforiche, reazioni di dissociazione, fermentazioni che a loro volta possono generare atmosfere asfissianti, tossiche o esplosive.



Una **atmosfera ideale per la respirazione** è, in sintesi, caratterizzata dalle seguenti condizioni:

- tenore di ossigeno prossimo a quello presente normalmente nell'aria (20,9% in volume);
- assenza di agenti chimici tossici in misura superiore ai valori limite di soglia ammessi dalle leggi e dagli standard internazionali in riferimento ai TLV-TWA (Threshold Limit Value – Time Weighed Average) o, per esposizioni di breve durata, ai TLV-STEL (Threshold Limit Value –Short Term Exposure Limit) o a parametri analoghi



- assenza di gas e vapori infiammabili o esplosivi (tipicamente viene ammesso un valore inferiore al 10% del limite inferiore di infiammabilità anche detto LEL (da Lower Explosivity Limit));
- assenza di polveri combustibili capaci di disperdersi in aria nel campo di esplosività;
- assenza di sostanze piroforiche o chimicamente instabili;
- assenza di radiazioni ionizzanti, radioattività e NIR (EMF, laser, ottiche, ecc.);
- assenza di agenti patogeni.



Se ci trovassimo in un ambiente di lavoro ordinario le buone pratiche di igiene industriale imporrebbero anche che fossero rispettate le seguenti condizioni ambientali.

- assenza di polveri, nebbie, fumi, vapori che impediscano la visibilità;
- temperatura ambiente compresa tra i 16°C ed i 24°C e assenza di sorgenti termiche radianti;
- umidità nell'ambiente compresa tra il 50 ed il 70%;
- assenza di correnti d'aria fastidiose ( $< 0,3$  m/sec);
- assenza di odori sgradevoli;
- illuminazione commisurata all'attività da svolgersi (30 ÷ 300 lux) ed assenza di abbagliamenti;
- assenza di rumorosità ( $< 80$  dB (A)) e vibrazioni;
- possibilità di assumere una posizione ergonomicamente corretta.



La **sottossigenazione** di una atmosfera può facilmente essere provocata da fenomeni di ossidazione (quale l'arrugginimento del ferro), di fermentazione (tipicamente di derrate alimentari o di altri materiali organici) o dalla presenza di gas inerti (a seguito di antecedenti operazioni di inertizzazione o di migrazioni di gas estinguenti, frigoriferi o di processo).



La **tossicità o la esplosività** di una atmosfera, possono derivare dalla presenza di gas di vario genere presenti nel sito, dalla vaporizzazione di un liquido o dalla sublimazione di una sostanza solida presente all'interno di un ambiente confinato o scarsamente ventilato.



## L'aria che respiriamo.

COMPOSIZIONE DELL'ARIA SECCA		
Nome	Formula	Proporzione o frazione molecolare[ppm]
Azoto	N <sub>2</sub>	78,08 %
Ossigeno	O <sub>2</sub>	20,95 %
Argon	Ar	0,934 %
Diossido di carbonio	CO <sub>2</sub>	388 ppm (agosto 2010)
Neon	Ne	18,18 ppm
Elio	He	5,24 ppm
Monossido di azoto	NO	5 ppm
Kripton	Kr	1,14 ppm
Metano	CH <sub>4</sub>	1 / 2 ppm
Idrogeno	H <sub>2</sub>	0,5 ppm
Ossido di diazoto	N <sub>2</sub> O	0,5 ppm
Xeno	Xe	0,087 ppm
Diossido di azoto	NO <sub>2</sub>	0,02 ppm
Ozono	O <sub>3</sub>	da 0 a 0,01 ppm



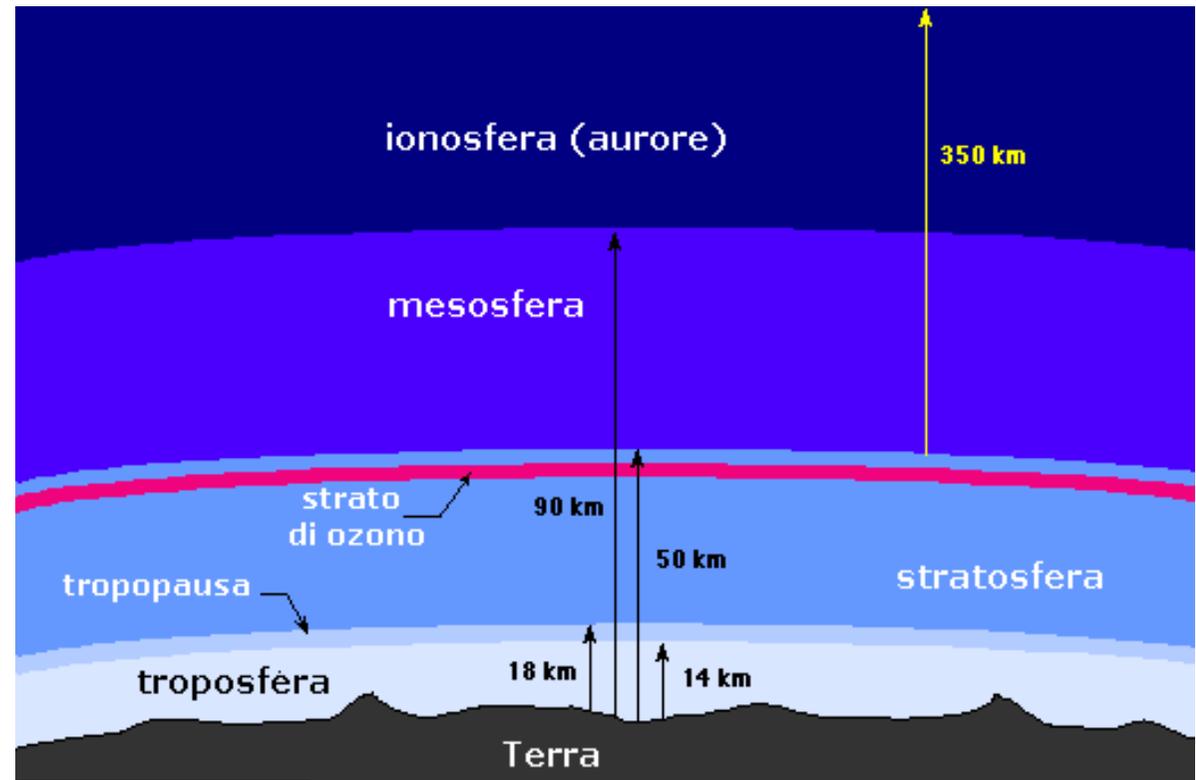
## RISCHIO ASFISSIA (IPOSSIA)

Quali sono gli effetti fisiologici sull'uomo derivanti da una concentrazione di ossigeno modificata rispetto al valore standard?

O <sub>2</sub> (%vol)	Effetti e sintomi
22.5	Nessuno (massima concentrazione di sicurezza)
21	Nessuno (concentrazione media nell'aria)
19.5	Nessuno (minima concentrazione di sicurezza)
15 - 19	Primi segnali di ipossia. Riduzione della capacità di lavoro. Può provocare scompensi a soggetti con problemi coronarici, polmonari o circolari.
12 - 14	La frequenza respiratoria aumenta, le pulsazioni aumentano, indebolimento della capacità muscolare, della percezione e di giudizio.
10 - 12	Ulteriore aumento della frequenza e intensità respiratoria, labbra leggermente blu.
8 - 10	Problemi mentali, svenimento, incoscienza, faccia cinerea, labbra blu, nausea, vomito, difficoltà di movimenti.
6 - 8	6 minuti – 50% probabilità di morte 8 minuti – 100% probabilità di morte
4 - 6	Coma in 40 secondi, convulsioni, blocco respirazione, morte.



L'effetto sul nostro organismo generato dalla carenza di ossigeno in atmosfera è esattamente identico a quello che viene provocato da un aumento di quota (ipobarismo). Aumentando l'altitudine, la % di  $O_2$  nell'aria resta invariata (così come, in generale, la sua composizione), ma diminuisce la sua pressione parziale esattamente come se vi fosse un calo della % in volume.



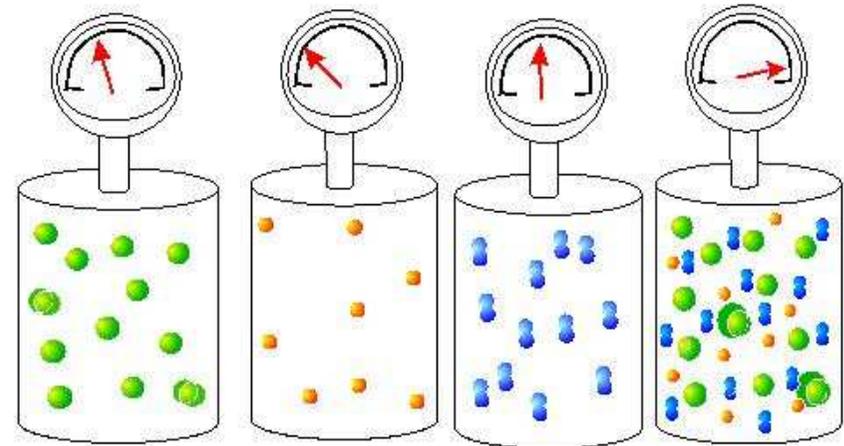
In fisica e in chimica, la **legge delle pressioni parziali di DALTON** è la legge che afferma che:

**La pressione totale esercitata da una miscela ideale di gas ideali ( $PV = RT$ ) è uguale alla somma delle pressioni parziali che sarebbero esercitate dai singoli gas se fossero presenti da soli in un eguale volume.**

### LEGGE DI DALTON (O DELLE PRESSIONI PARZIALI)

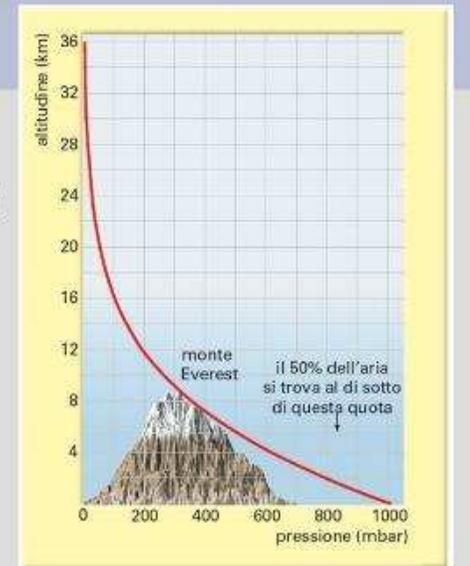
In una miscela di gas, la pressione e' la somma delle pressioni parziali.

- le molecole di ciascun gas si comportano indipendentemente



Altezza m s.l.m.	Pressione mmHg	Temperatura °C	Altezza m s.l.m.	Pressione mmHg	Temperatura °C
0	760	+15	11000	189,51	-56,5
1000	669,85	+8,5	12000	167,03	-56,5
2000	590,40	+2,0	13000	147,22	-56,5
3000	520,37	-4,5	14000	129,75	-56,5
4000	458,64	-11,0	15000	114,36	-56,5
5000	404,24	-17,5	16000	100,80	-56,5
6000	356,30	-24,0	17000	88,84	-56,5
7000	314,03	-30,5	18000	78,30	-56,5
8000	276,78	-37,0	19000	69,02	-56,5
9000	243,95	-43,5	20000	60,83	-56,5
10000	215,01	-50,0			

- L'atmosfera diventa sempre più rarefatta man mano che ci si allontana dalla Terra
- La **densità** e la **pressione atmosferica** diminuiscono salendo di quota



## LA PRESSIONE PARZIALE DELL'ARIA SUBISCE DELLE VARIAZIONI ANCHE PER FATTORI ESTRANEI ALLA QUOTA:

- VARIAZIONE REGOLARE COSIDDETTA "DIURNA" (qlc mm Hg);
- VARIAZIONE IRREGOLARE CONSEGUENTE ALLE VARIAZIONI METEO ( $\pm 30$  alle ns. latitudini);
- VARIAZIONE IRREGOLARE DOVUTE ALL'UMIDITA' E ALLA TEMPERATURA ( $\pm 5$  mm Hg);

DI CONSEGUENZA ANCHE LA  $P_{pO_2}$  NE RISENTE (sebbene in maniera limitata).



In estrema sintesi la Legge di Dalton afferma che in una atmosfera di aria standard la  $P_{pO_2}$  è pari al 21% della pressione totale. Poiché la  $P_{atm}$  diminuisce salendo di quota, diminuisce di conseguenza proporzionalmente alla  $P_{pO_2}$ . La diminuzione della pressione barometrica e della  $P_{pO_2}$  alle diverse altitudini s.l.m. può essere così riassunta:

QUOTA (m)	PB (mmHg)	$P_{pO_2}$ (mmHg)
0	760	159
1000	674	141
2000	596	124
3000	526	100
4000	462	96
5000	405	84



L'effetto sull'organismo umano provocato da una diminuzione della  $P_{pO_2}$  derivante da una diminuzione della pressione barometrica dell'aria è del tutto simile all'effetto provocato da una diminuzione della % di  $O_2$  riferita ad una miscela a 760 mmHg di pressione.



La similitudine tra gli effetti di una diminuzione della pressione barometrica e gli effetti di una sottossigenazione è rappresentata dalla seguente tabella.

	Bassa quota	Media quota	Alta quota	Altissima quota
<b>Altitudine (m)</b>	<b>0 ÷ 1800</b>	<b>1800 ÷ 3000</b>	<b>3000 ÷ 5500</b>	<b>5500 ÷ 9000</b>
<b>Pressione atmosferica (mmHg)</b>	<b>760 ÷ 611</b>	<b>611 ÷ 525</b>	<b>525 ÷ 379</b>	<b>379 ÷ 231</b>
<b>% O<sub>2</sub> equivalente a 0 m slm</b>	<b>20,9 ÷ 16,9</b>	<b>16,9 ÷ 14,5</b>	<b>14,5 ÷ 10,5</b>	<b>10,5 ÷ 6,3</b>



L'equivalenza tra la  $PpO_2$  di un'atmosfera con 20,9% di ossigeno ad una data quota e il tenore di ossigeno "equivalente" in una atmosfera standard (0 m slm) si ricava dalla semplice equazione:

$$\% O_2 \text{ in aria} = PB/760 \times 20,9$$



# LA RESPIRAZIONE ESTERNA E CELLULARE

In fisiologia, per **respirazione** si intende sia il processo biochimico del metabolismo energetico - detto respirazione cellulare - sia lo scambio biologico dei gas con l'ambiente - detto respirazione esterna (o ventilazione polmonare).

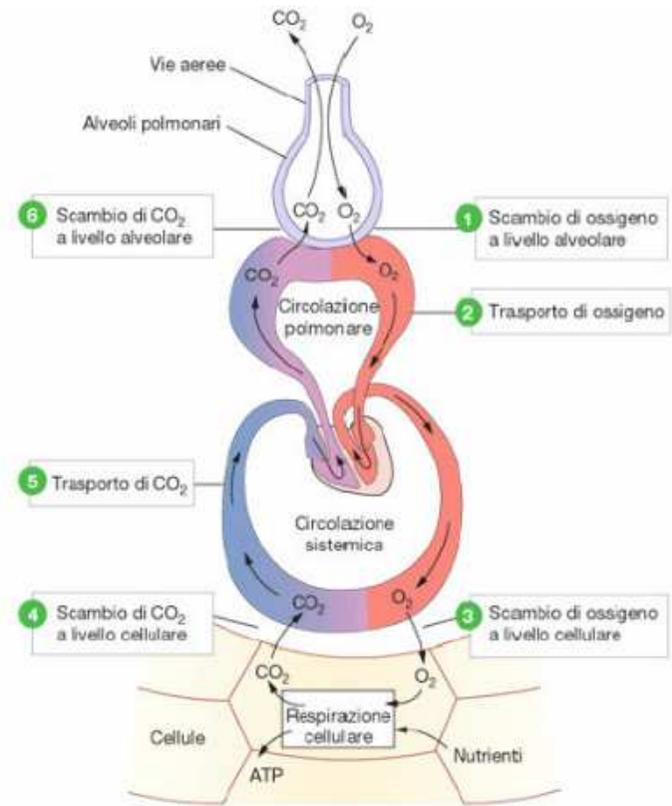
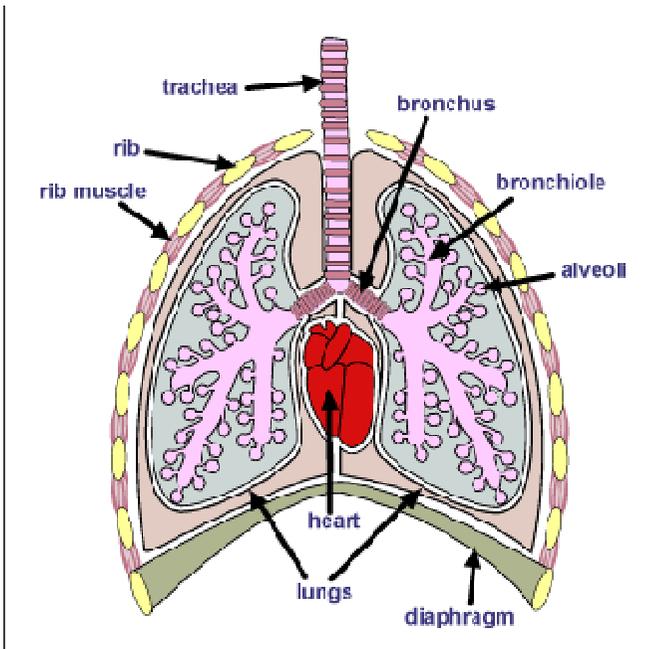


L'apparato preposto alla respirazione esterna è costituito da un sistema complesso che dalla bocca e dal naso giunge ai polmoni; la respirazione esterna ha la funzione di scambiare gas fra organismo e ambiente esterno ed in particolare assorbire ossigeno dall'ambiente e riemettendo CO<sub>2</sub>.



Nel ciclo respiratorio degli esseri umani l'aria passa, a seguito dell'atto inspiratorio, attraverso il naso, la laringe, la trachea ed i bronchi principali. Da quest'ultimi si dipartono poi i bronchi di primo ordine che si suddividono in rami sempre più minuti, gli ultimi dei quali, i bronchioli terminali, portano l'aria al tessuto polmonare che è un tessuto elastico che si contrae su sé stesso.





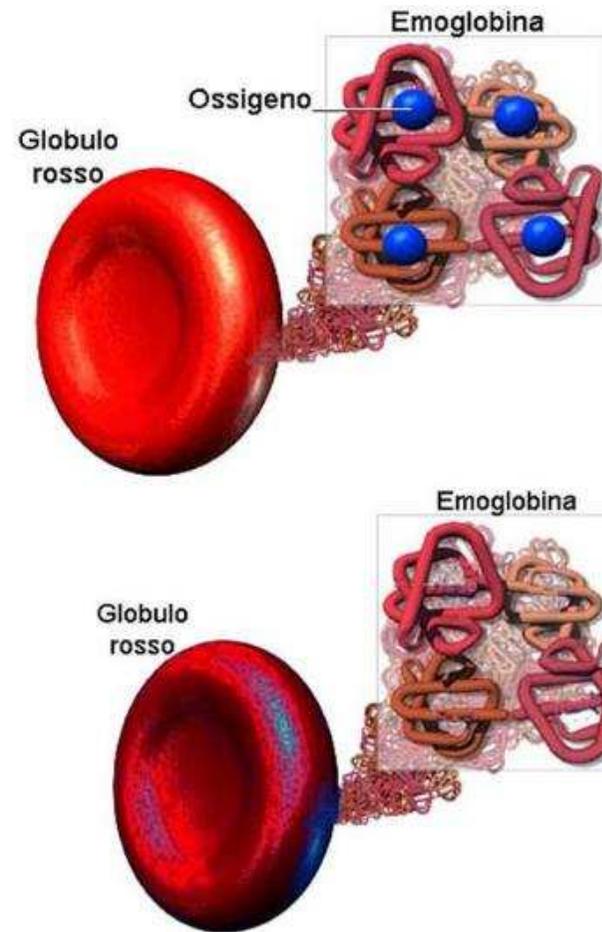
Il tessuto polmonare costituisce, schematicamente, l'interfaccia tra aria e sangue; l'ossigeno contenuto nell'aria, che dall'ambiente esterno raggiunge con l'atto inspiratorio gli alveoli, attraversando questa interfaccia si riversa nel sangue. Il contrario avviene per l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) che dal sangue, attraversando la stessa interfaccia, si riversa negli alveoli da cui verrà espulsa all'esterno con l'atto espiratorio.



Un adeguato apporto di ossigeno ai tessuti è indispensabile per garantire la corretta funzionalità dell'organismo; essa dipende sostanzialmente dalla quantità di ossigeno inspirata, dall'assenza di patologie del sistema respiratorio (trachea, bronchi, bronchioli, alveoli, polmoni), dall'assenza di patologie all'apparato cardio-vascolare, dal livello di **emoglobina (Hb)** nel sangue, dalla capacità dell'ossigeno di legarsi all'emoglobina e da altri fattori.



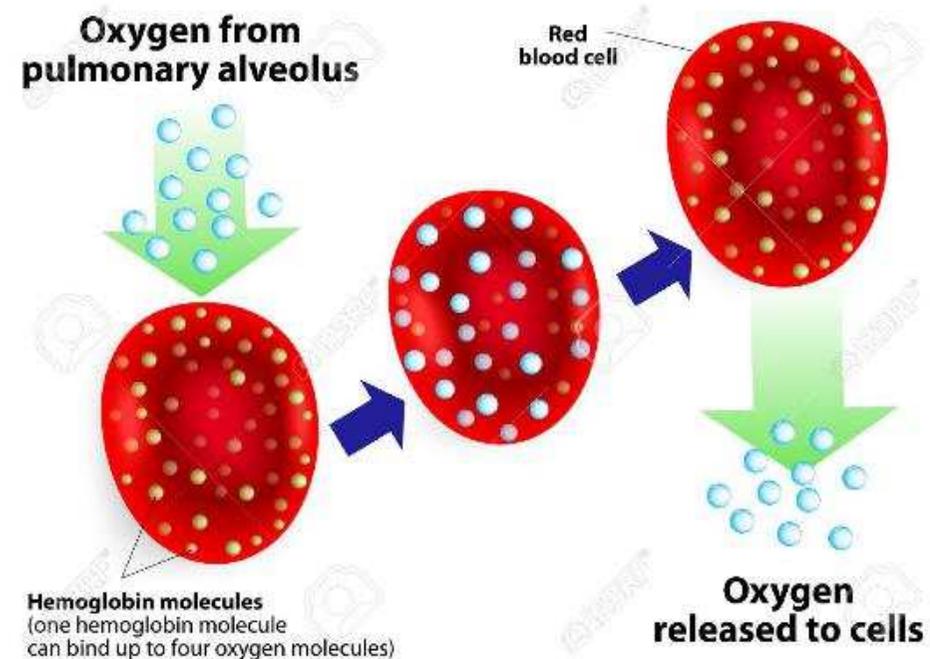
L'emoglobina è quella proteina presente nel sangue (all'interno dei globuli rossi) preposta al trasporto dell'ossigeno - immesso nell'organismo umano attraverso la respirazione esterna - fino ai tessuti che necessitano di tale apporto.



La funzione di questa particolare molecola è giustificata dal fatto che la limitata solubilità dell'ossigeno nella componente acquosa del sangue non consentirebbe da sola il trasporto di una sufficiente quantità di ossigeno fino ai vari tessuti periferici.



Grazie alla presenza dell'emoglobina si può invece contare su un legame dell'ossigeno di tipo chimico che ne consente il trasporto in quantità notevolmente superiori; la cattura dell'ossigeno da parte dell'emoglobina avviene negli alveoli e, con un meccanismo inverso, l'ossigeno viene, una volta trasportato a destinazione tramite il sangue, rilasciato ai vari tessuti del corpo umano.



Una volta che l'ossigeno si è legato **all'emoglobina (Hb)** si ha la formazione di **ossi-emoglobina (Hb-O<sub>2</sub>)**; essa si trasforma in **deossi-emoglobina** una volta che questa rilascia ai tessuti l'ossigeno e in **carbodiossi-emoglobina (Hb-CO<sub>2</sub>)** una volta che la molecola ha captato l'anidride carbonica prodotta dai processi di metabolismo ossidativo cellulare.

Questa molecola, infine, rilascia l'anidride carbonica all'interno dei polmoni, consentendone l'espulsione dal corpo umano, chiudendo così il ciclo del trasporto.



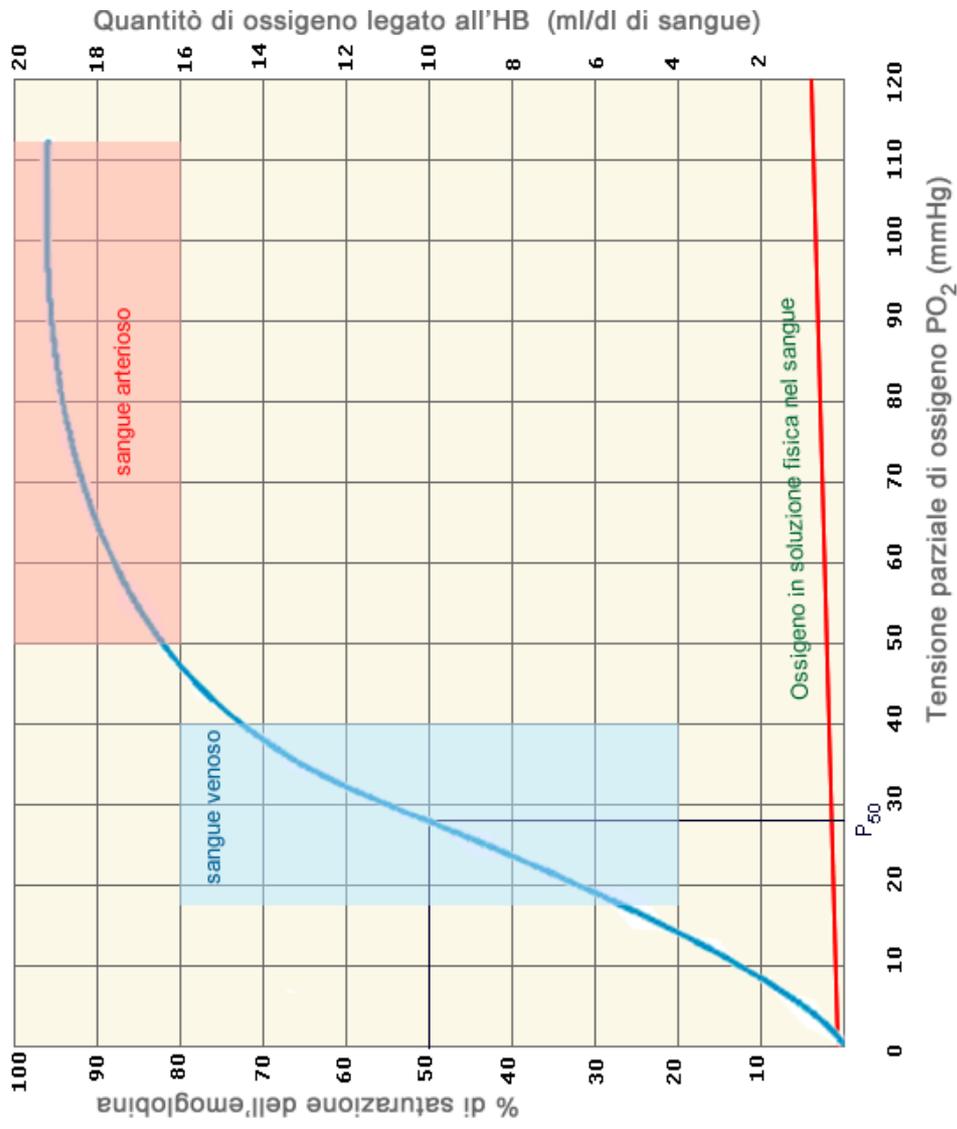
Ogni molecola di emoglobina contiene 4 atomi di ferro e può legare reversibilmente altrettante molecole di ossigeno. E' la presenza del  $\text{Fe}_{2+}$  che fa assumere all'emoglobina un colore rossastro, che aumenta quando il ferro si combina con l'ossigeno e diminuisce quando si lega all'anidride carbonica. Ogni globulo rosso contiene 300.000.000 molecole, per cui ogni globulo rosso può trasportare 1,2 miliardi di atomi d'ossigeno per volta (cioè  $2,1168 \times 10^{19}$  molecole d'ossigeno in totale).



La quantità dell'ossigeno che si lega all'Hb cresce in rapporto alla  $PpO_2$  seguendo una curva, dal caratteristico andamento sigmoide, detta “curva di saturazione dell'emoglobina”.

Si può notare come all'aumentare della  $PpO_2$  aumenti la saturazione dell'emoglobina, in particolare nella porzione centrale (più ripida) della curva dove, a piccole variazioni in aumento o in diminuzione della pressione di ossigeno corrispondono grandi variazioni della saturazione.





REGIONE PLATEAU Garantisce saturazione Hb >90% per riduzioni della pO<sub>2</sub> alveolare fino a 60mmHg

REGIONE MASSIMA Permette una maggiore cessione di O<sub>2</sub> ai tessuti con piccole PENDENZA variazioni di pO<sub>2</sub>

Una saturazione fino al 90% è ritenuta ottimale e garantisce in un soggetto sano una perfetta ossigenazione tissutale. Il 25% della cessione dell'ossigeno è destinato al mantenimento delle funzioni basali mentre la restante quantità è disponibile per supportare dispendi metabolici di varia natura (lavorativa, sportiva, ecc.). Come è possibile evincere dal diagramma caratteristico, il 90% della saturazione è garantito fino ad una  $PpO_2$  alveolare pari a circa 60 mmHg.



Gli iniziali sintomi dell'ipossia caratterizzati da respiro affannoso e aumento del ritmo cardiaco si manifestano generalmente quando la saturazione dell'emoglobina scende al di sotto del 90%. In un intervallo compreso tra 80% e 90% di saturazione, un organismo sano tende infatti a compensare la carenza di ossigeno nel sangue adattando il ritmo della ventilazione sia in termini di profondità che di frequenza degli atti respiratori.

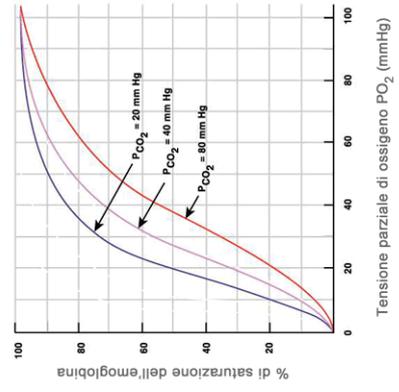
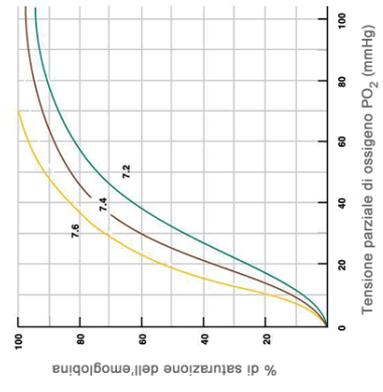
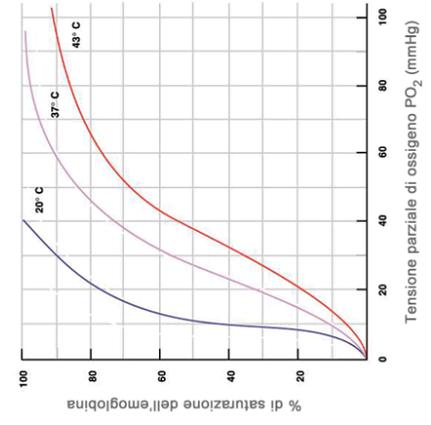
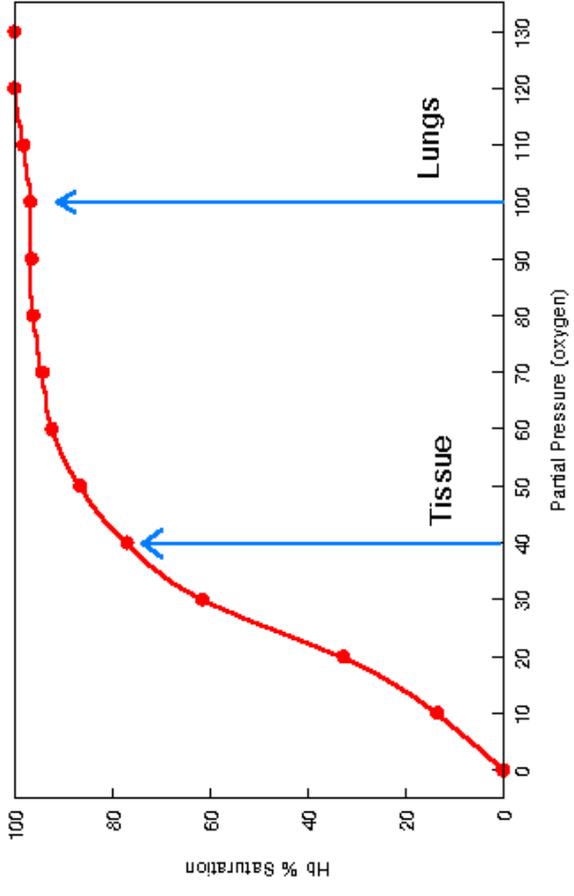


Il livello di saturazione dell'emoglobina da parte dell'ossigeno dipende dunque direttamente dal valore della pressione parziale dell'ossigeno atmosferico che come abbiamo visto nel capitolo precedente dipende dalla quota, da fattori meteorologici e dal tenore di ossigeno; il valore di pressione sul quale l'organismo può fare affidamento per lo scambio polmonare dell'ossigeno, non è però quello riferito all'atmosfera esterna, ma un valore ridotto da alcuni fattori.



Questa diminuzione della  $P_{pO_2}$  a livello degli alveoli è stimabile in circa 60 mmHg ed è dovuta per circa 10 mmHg all'umidità dell'aria e per circa 50 mmHg principalmente allo scambio gassoso con la  $CO_2$ ; naturalmente questi valori differiscono leggermente da individuo ad individuo.





Secondo le teorie oggi più diffuse basate sulle osservazioni in quota, il livello di guardia nella pressione parziale dell'ossigeno alveolare può essere fissato in un valore di circa 60 mmHg.

E' quindi importante fare in modo che l'effetto di una sottossigenazione oppure di un'atmosfera ipobarica, o dei due effetti combinati tra loro, non faccia scendere la PpO<sub>2</sub> ambientale sotto i 120 mmHg.

Quando la PpO<sub>2</sub> alveolare raggiunge il valore di circa 60 mmHg, si attiva una stimolazione ipossica dei recettori, sufficiente a far crescere la ventilazione facendo aumentare la profondità e il ritmo degli atti respiratori.



Una saturazione dell'emoglobina del 90% viene spesso indicata come valore limite di sicurezza da un punto di vista fisiologico. Come già detto tale valore corrisponde ad una PpO<sub>2</sub> alveolare pari a circa 60 mmHg o circa 120 mmHg di PpO<sub>2</sub> atmosferica (anche equivalente ad un tenore del 15,8% di ossigeno in aria), ovvero pari alla pressione che si ha a poco più di 2000 metri di quota.

Risulta così giustificato il limite di sicurezza della PpO<sub>2</sub> fissato, ad esempio da ACGIH e NIOSH, a 132 mmHg.



Altri studi di fisiologia fissano limiti di sicurezza meno restrittivi indicando nella quota di 3000 metri, equivalente ad una PpO<sub>2</sub> pari a circa 110 mmHg (o ad un contenuto di ossigeno in atmosfera in condizioni normobariche a livello del mare pari al 14,3%), una soglia raggiungibile senza incorrere in sintomatologie o pericoli di sorta.



Tra le principali cause che possono portare ad una **SOTTOSSIGENAZIONE** all'interno di un ambiente confinato vi sono le seguenti:

**A. le reazioni di ossidazione:**



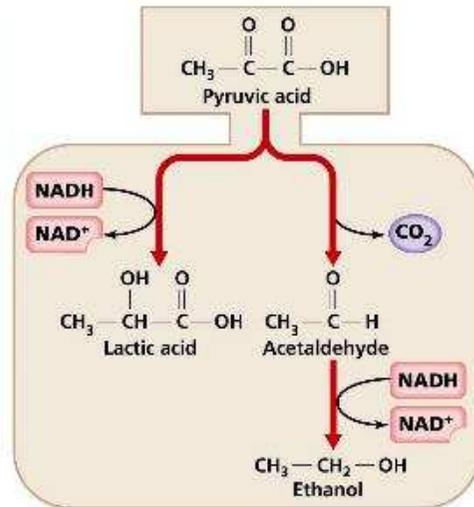
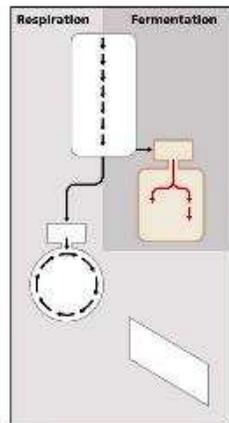
ad es. durante la tipica reazione di arrugginimento del ferro all'aria nella quale il ferro si combina con l'ossigeno; in caso di ambiente confinato, caratterizzato da scarsa o assente ventilazione, l'ossigeno viene così sottratto all'atmosfera interna.



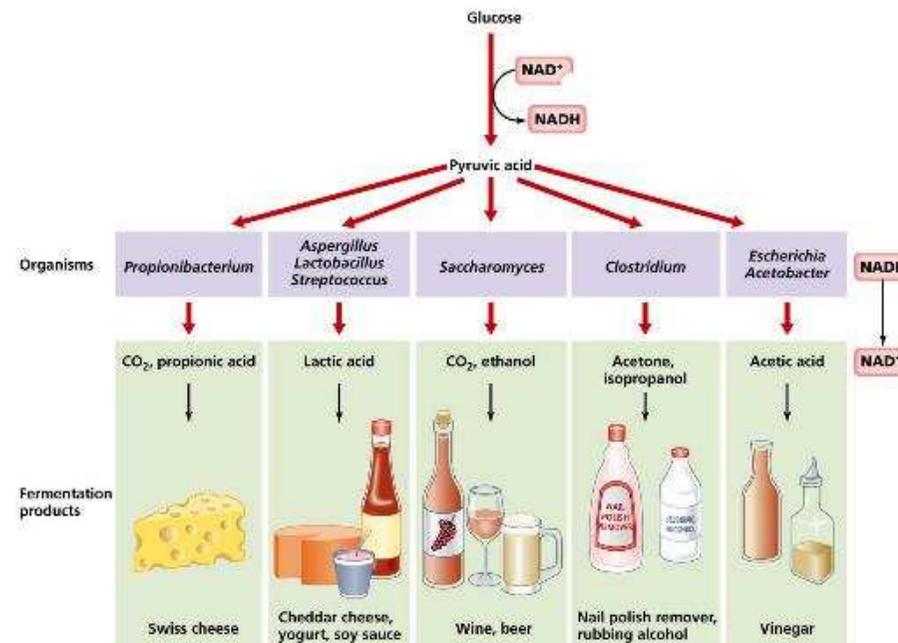
## B. le reazioni di fermentazione:



durante i processi di fermentazione i microrganismi digeriscono la sostanza organica (ad es. grano, altri cereali, ecc.) consumando ossigeno e producendo anidride carbonica.



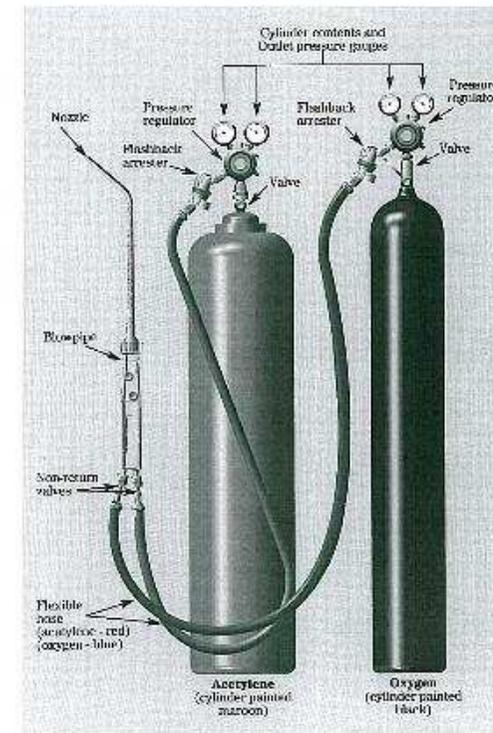
Copyright © 2010 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings



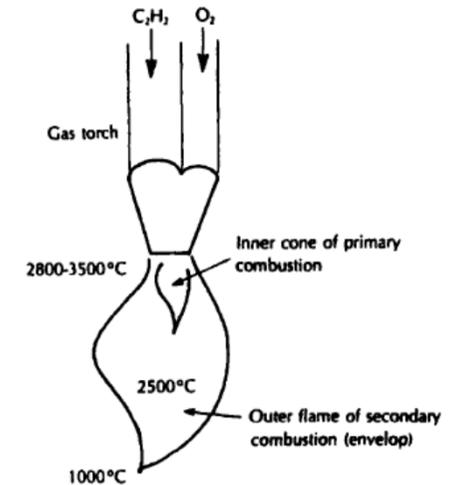
C. il consumo di ossigeno contenuto nell'aria attraverso processi che comportano l'utilizzo di fiamme libere (saldatura, taglio, preriscaldamento, ecc.) nei quali l'ossigeno presente in ambiente costituisce il comburente primario (nel caso ad esempio del GPL) o secondario (quando il comburente primario è contenuto in bombole come ad es. nel caso della fiamma ossiacetilenica);



Una reazione analoga avviene in tutte le cosiddette combustioni ossigas.



Un brevissimo approfondimento merita, in termini di potenziale modificazione dell'atmosfera interna ad un ambiente confinato, l'attività di saldatura e taglio mediante impianto ossiacetilenico; in particolare la fiamma ossiacetilenica presenta i seguenti aspetti e caratteristiche: essa è costituita da una parte più interna (detta dardo) a diretto contatto con l'ugello di erogazione dei gas (la cui temperatura può superare anche i 2500 °C) ed una parte più esterna, più grande e più fredda (nell'ordine dei 1000°C) detta pennacchio; in quest'ultima zona può essere presente a seconda dei casi un eccesso di ossigeno oppure un eccesso di gas combustibile oltre a prodotti di combustione (CO<sub>2</sub>, vapore acqueo, ecc.).



La fiamma ossiacetilenica è classificata normalmente in tre differenti tipi.

Neutra (ottenibile con un regolazione al 50/50 del rapporto tra gas combustibile e comburente)

Riducente (caratterizzata da un eccesso di gas combustibile)

Ossidante (caratterizzata da un eccesso di gas comburente)



*Fiamma neutra*



*Fiamma riducente (eccesso di acetilene)*



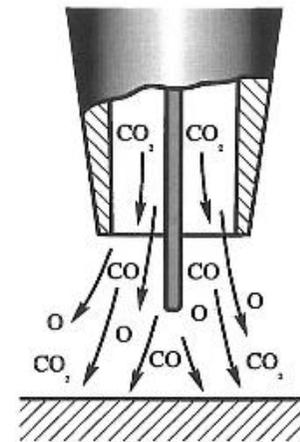
*Fiamma ossidante (eccesso di ossigeno)*

Non necessariamente si tratta nel secondo e nel terzo caso di difetti di combustione indesiderati; a volte, a seconda delle necessità operative, può essere l'operatore a modificare il bilanciamento tra i due gas.

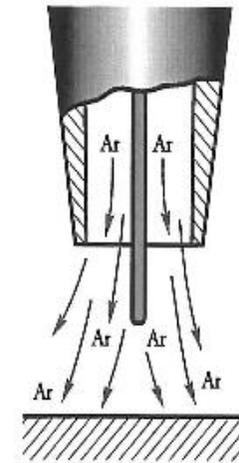
**ATTENZIONE!!** In caso di fiamma riducente può avvenire una combustione dell'acetilene in eccesso nella zona esterna al dardo (ovvero all'interno del pennacchio) che grazie alla alta temperatura brucia utilizzando l'ossigeno atmosferico e quindi sottraendo ossigeno all'ambiente.



D. i processi che portano alla **SOSTITUZIONE** dell'ossigeno con gas non tossici ma **ASFISSIANTI**: ad esempio i processi di inertizzazione, ovvero la sostituzione dell'aria ricca di gas infiammabili all'interno di cisterne o serbatoi (contenenti liquidi infiammabili) con gas nobili (ad es. Ar) o, in generale, inerti (ad es.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ); i processi di saldatura sotto protezione di gas inerte, attivo o inattivo (MIG, MAG, TIG); la realizzazione di montaggi meccanici per interferenza; il dry ice blasting.



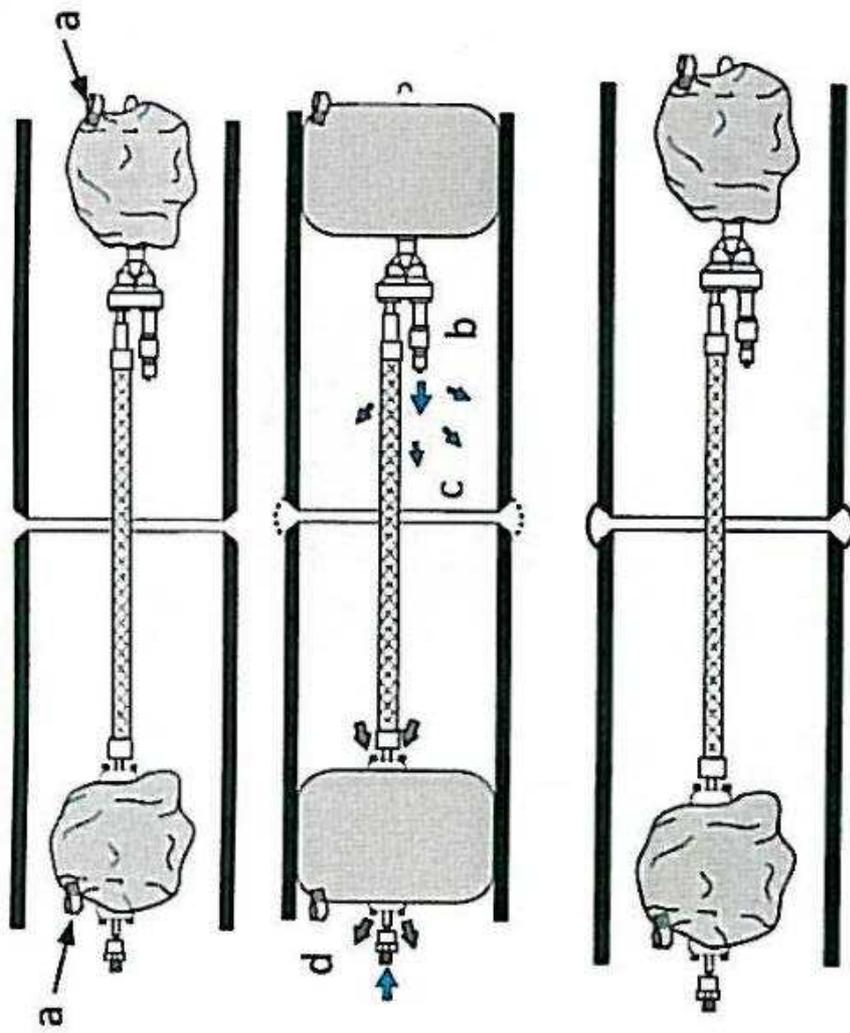
*CO2 shielding gas*



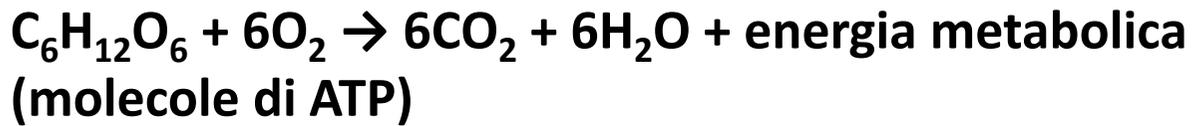
*Argon shielding gas*







## **E. le reazioni cellulari:**



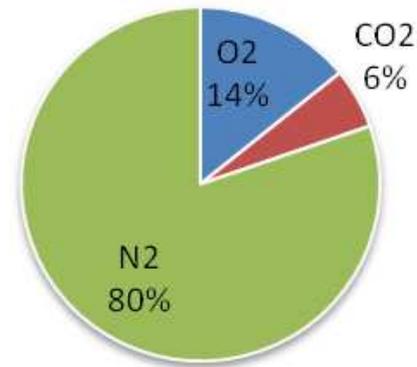
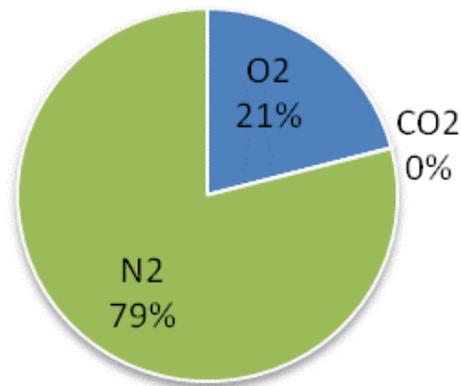
**La respirazione cellulare è il meccanismo attraverso il quale la cellula in presenza di ossigeno è in grado di ricavare energia per i processi vitali (metabolismo basale) e lavorativi.**

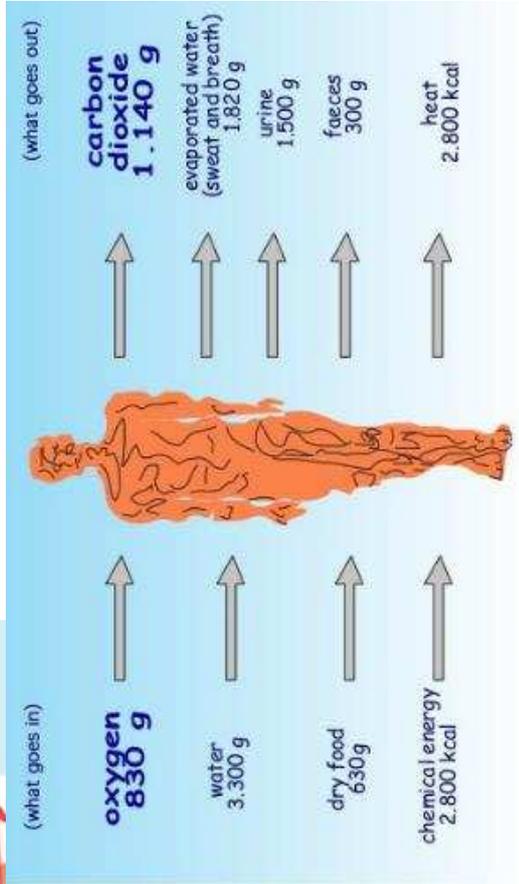
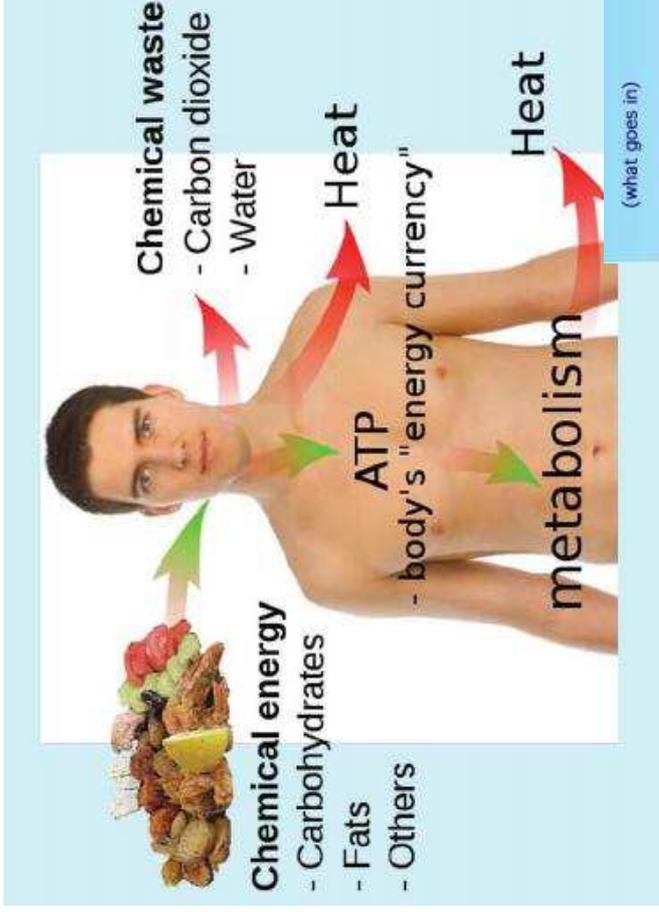
**La respirazione cellulare è suddivisibile in parecchi passaggi in cui i prodotti di una reazione di ossidazione vengono poi utilizzati come base per una reazione successiva.**

**Una delle più importanti reazioni metaboliche è rappresentata dalla trasformazione del glucosio.**



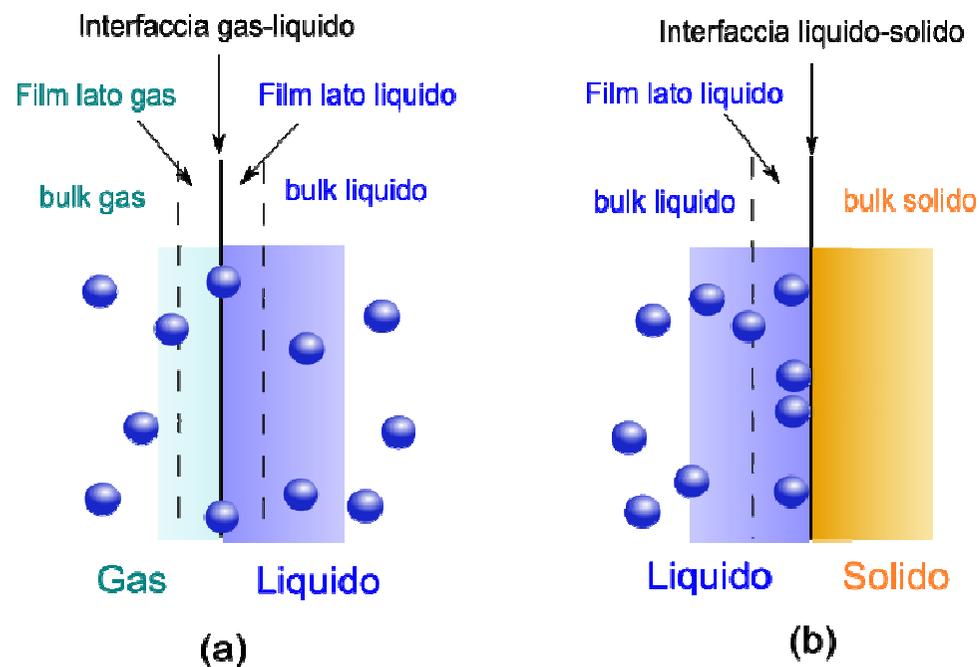
Durante il processo di respirazione esterna si immette aria contenente il 21% di  $O_2$  (in condizioni standard) e si ri-emette in ambiente aria contenente il 16% di  $O_2$  .





## F. Adsorbimento/assorbimento

In taluni casi di ingresso in ambienti confinati caratterizzati da presenza di terreno contaminato con idrocarburi o con altre sostanze organiche, sono stati segnalati casi di asfissia causati da forte adsorbimento e/o assorbimento.



## Anche una atmosfera arricchita di ossigeno (SOVRAOSSIGENAZIONE) può comportare gravi rischi per gli operatori, infatti:

- aumentando il livello di ossigeno in atmosfera, aumentano il campo di infiammabilità e la velocità di propagazione della fiamma di un materiale combustibile;
- aumentando il livello di ossigeno in atmosfera, l'energia minima di innesco diminuisce drasticamente così come la temperatura di autoaccensione;
- con il 24 % di O<sub>2</sub> in aria, materiali quali tessuti per vestiario possono addirittura subire una combustione spontanea; i grassi vegetali e gli idrocarburi, se investiti da ossigeno nascente (cioè non legato in una molecola e quindi altamente reattivo) possono auto infiammarsi facilmente.

La NFPA classifica come ambienti sovraossigenati quelli in cui l'ossigeno supera la soglia del 23,5% in volume.



Nel settore industriale, l'ossigeno puro è utilizzato in più processi, quali ad esempio:

- nel settore chimico e petrolchimico, è utilizzato per ossidare parzialmente diversi composti organici, idrocarburi liquidi, gassosi e carbone, per ottenere intermedi destinati alla chimica fine;
- nel settore siderurgico è utilizzato nella produzione dell'acciaio, come ad esempio nel processo al convertitore *Linz-Donawitz*;
- nel settore minerario è impiegato per la raffinazione del rame, dell'oro e di altri metalli;
- negli impianti di trattamento e potabilizzazione dell'acqua per produrre l'ozono o per effettuare direttamente pre-trattamenti;
- nell'industria dei semiconduttori per produrre microchips;
- nell'industria cartaria per la sfibratura e sbiancatura della polpa di legno;
- nella carpenteria meccanica viene utilizzato, come già visto, nei processi di ossitaglio.

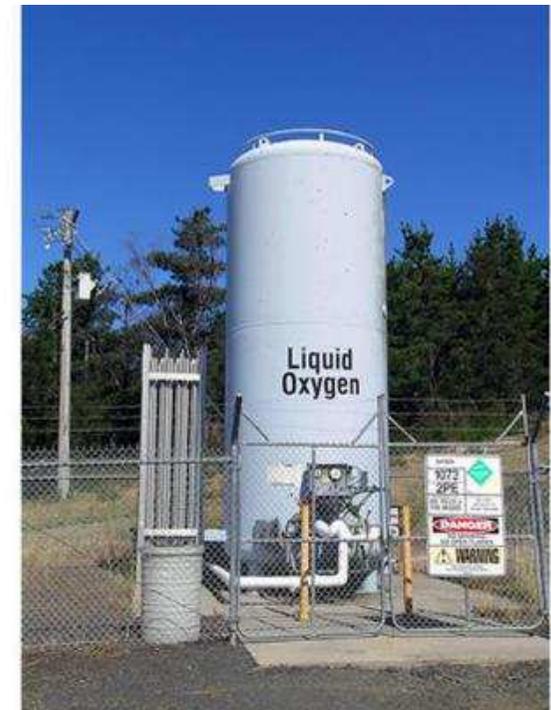


Un elevato rischio per la presenza di atmosfere sovraossigenate si ha anche negli impianti di produzione dell'ossigeno (generalmente ottenuto per distillazione dell'aria), a bordo dei mezzi di trasporto o nei siti di stoccaggio dell'ossigeno liquefatto o compresso.

L'ossigeno può infatti essere trasportato e stoccato sia in forma gassosa che sotto forma di liquido criogenico.

Si osservi che l'evaporazione di un litro di ossigeno allo stato liquido porta alla formazione di circa **820 litri** di ossigeno gassoso alla temperatura di 20°C.

In un vano di 10 m<sup>3</sup> la dispersione di un litro di ossigeno liquido comporterebbe un incremento del gas fino al 29% in volume.



**Tra le principali cause che possono portare ad un aumento della percentuale di  $O_2$  in un ambiente confinato vi sono pur in assenza di residui di Ossigeno proveniente da stoccaggi:**

- Fuoriuscita di ossigeno da manichette, rubinetterie e in generale apparecchiature difettose degli impianti ossigas;
- Processi ossigas effettuati con fiamma OSSIDANTE.
- Fuoriuscita di ossigeno dagli impianti di produzione (distillazione dell'aria) e stoccaggio (in pressione o criogenico) o da impianti di processo in cui è impiegato come ossidante.

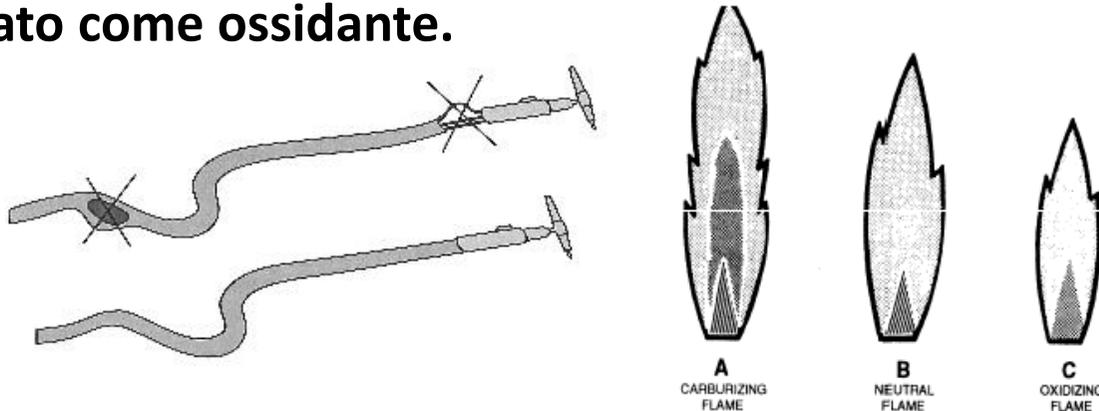


Figure 4-17. MAPP-gas flames.



**Per evitare sovraossigenazioni accidentali occorre adottare alcuni importanti accorgimenti.**

- **Proteggere meccanicamente manichette e rubinetterie al fine di scongiurare danni;**
- **Ispezionare frequentemente le attrezzature di lavoro alla ricerca di eventuali perdite o danneggiamenti;**
- **Chiudere sempre i rubinetti delle bombole dei gas quando l'impianto non viene utilizzato (anche per pause di pochi minuti);**
- **Non rimuovere la polvere con ossigeno in pressione, ma solo con aria compressa;**
- **All'accensione degli impianti ossigas aprire prima il rubinetto del combustibile e solo successivamente quello dell'ossigeno.**



# IL RISCHIO DI INCENDIO ED ESPLOSIONE



La combustione è un processo ossidativo che trasforma energia potenziale chimica in energia termica e, spesso, luminosa. La combustione differisce quindi fortemente da altri processi ossidativi quale, ad esempio, l'arrugginimento del ferro nel quale l'ossidazione (lentissima) avviene senza un tangibile sviluppo di calore.



In un normale processo di combustione il combustibile (generalmente costituito da molecole formate da atomi di carbonio e idrogeno) e il comburente (generalmente costituito dall'ossigeno contenuto nell'aria) sono miscelati tra loro in modo controllato; qualora si perda il controllo dei due elementi, la reazione prende il nome di “incendio”. Un incendio può infatti venire definito come una “combustione non desiderata e non controllata in un ambiente non preposto a contenerla”.



I prodotti della combustione possono essere costituiti, oltre che da energia termica (calore) e da radiazioni luminose (fiamme), anche da particolato (fumo), gas e vapori. Tra i gas e i vapori, i più diffusi sono CO<sub>2</sub> e vapore acqueo, ma possono essere presenti infiniti altri prodotti di combustione, spesso caratterizzati da elevata tossicità per l'uomo (CO, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, HCN, HCl, NO<sub>2</sub>, ecc.). Sono proprio questi ultimi a costituire, tipicamente, il principale pericolo in caso di incendio e possono rimanere intrappolati all'interno di uno ambiente confinato per un tempo indefinito.

-  **Gas di combustione**
-  **Fiamme vive**
-  **Calore**
-  **Fumi tossici**



Con il termine “combustione” s’intende generalmente una reazione relativamente lenta, mentre con il termine “esplosione” si intende una reazione esotermica molto più rapida caratterizzata da un contestuale aumento del volume del gas (se avviene in campo aperto) o della pressione (se avviene in un ambiente confinato).



Se la velocità dell'esplosione cresce, ma rimane al di sotto della velocità del suono (la velocità subsonica è nell'ordine di qualche centinaia di m/sec) si parla di "deflagrazione", se oltrepassa la velocità sonica (con velocità nell'ordine del migliaio di m/sec) si parla di "detonazione". Man mano che la velocità di reazione aumenta gli effetti distruttivi associati risultano maggiori.



La teoria della combustione e, di conseguenza la teoria dell'incendio, prende in considerazione molteplici fattori di influenza; di grande importanza è lo stato in cui il combustibile (gas, liquido o solido) viene a contatto con il comburente (gassoso).



L'unico stato fisico della materia pronto a partecipare a una combustione è quello di "gas", condizione che indica una sostanza che esiste in forma aeriforme a pressione e temperatura ambiente.

Per tutte le sostanze che esistono alle medesime condizioni standard in forma liquida o solida la combustione può avvenire solo a determinate condizioni.

Liquidi e solidi non sono infatti infiammabili, se prima non avviene una trasformazione del loro stato fisico: i liquidi devono evaporare oppure essere disponibili sotto forma di aerosol, mentre i solidi devono frazionarsi finemente fino a raggiungere uno stato polveroso, oppure sublimare o liquefarsi e poi evaporare.



La presenza del vapore è possibile nel caso di sostanze volatili, cioè sostanze (liquide o solide) che a temperature relativamente basse sono in grado di produrre vapori partendo dalla loro superficie di contatto con l'atmosfera e con la quale risultano essere in equilibrio. In questi casi la combustione può avvenire una volta generatosi il vapore nello spazio, non importa se aperto o confinato, al di sopra della superficie del liquido o del solido.



Si definisce punto o temperatura d'infiammabilità o *flash point*, la temperatura alla quale un liquido o un solido è in grado di generare una sufficiente quantità di vapori tali da poter essere innescati da una determinata sorgente di energia.

Al di sotto di un certo livello di vaporizzazione e quindi di temperatura, nessuna quantità di energia e nessun rapporto combustibile-comburente, è in grado di garantire l'innescò e sostenere la combustione.



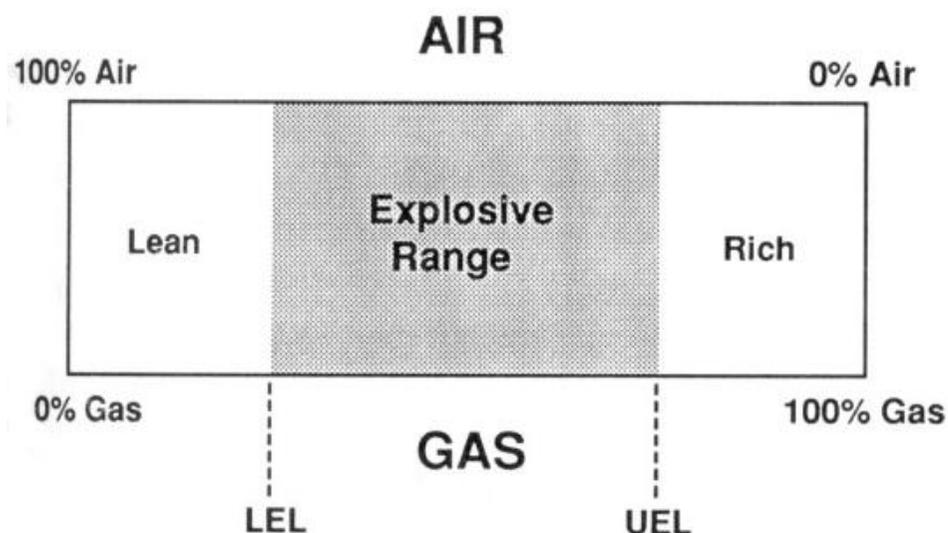
La temperatura minima di autoaccensione o di autoignizione (anche indicata come MIT – *Minimum Ignition Temperature*) di un combustibile viene definita come la minima temperatura (riferita generalmente alla pressione atmosferica ed a un tenore pari al 21% di ossigeno in aria) alla quale un combustibile in presenza di aria può dar luogo spontaneamente, senza sorgenti di innesco esterne, ad una reazione di combustione. Una sovraossigenazione dell'atmosfera provoca un abbassamento della temperatura di autoaccensione



## Intervallo e limiti di esplosività (LEL – UEL)

I **limiti di esplosività** di un gas o dei vapori di un liquido (o di un solido) sono i limiti che definiscono l'intervallo di concentrazione entro il quale, se la miscela aria-vapore o gas infiammabile viene opportunamente innescata, si verifica l'accensione della miscela.

Il limite di esplosività viene considerato in un range che va da un minimo ad un massimo di percentuale di combustibile in aria, **Lower Explosive Limit (LEL)** e **Upper Explosive Limit (UEL)**, anche noti come **LFL** e **UFL**.



La percentuale di O<sub>2</sub> in atmosfera influenza il campo di infiammabilità, provocando uno spostamento del valore del UEL mentre il valore del LEL rimane pressoché invariato.

La percentuale di ossigeno in aria influenza inoltre l'energia necessaria all'ignizione (MIE) nonché la temperatura minima di ignizione.



Carenza di ossigeno e pressioni più basse di quella atmosferica tendono oltretutto ad innalzare l'energia minima di ignizione anche a restringere il campo di infiammabilità; con la riduzione del tenore di ossigeno e della pressione, il limite di infiammabilità superiore (UEL) tende ad avvicinarsi al limite inferiore (LEL) fino a coincidere.



Non tutti i gas, vapori e polveri sono combustibili in aria; alcuni si legano con altre sostanze comburenti, altri sono del tutto inerti a qualsiasi processo di combustione.



Una reazione di combustione può, in definitiva, avere luogo solamente quando sono compresenti tre fattori: un combustibile, generalmente allo stato gassoso o di vapore, un comburente, ad esempio l'aria, e una fonte di innesco. Questa sussistenza di fattori è tipicamente schematizzata dal “triangolo del fuoco”.



## Più l'energia di ignizione (accensione) è bassa e più è alto il pericolo di esplosione/incendio.

La percentuale di ossigeno in aria influenza sia l'energia che la temperatura minima di autoaccensione; infatti, osservando la tabella che segue, si può notare come in una atmosfera composta da aria (21 % circa di O<sub>2</sub>), siano richieste una temperatura ed una energia di ignizione minime più elevate rispetto ad una atmosfera di ossigeno puro.

Combustibile	Minima temperatura di ignizione (MIT)		Minima energia di ignizione (MIE)	
	Aria	Ossigeno	Aria	Ossigeno
	°C	°C	(mJ)	(mJ)
Acetilene	305	296	0,017	0,0002
Acetone	465	-	1,15	0,00024
Butano	288	278	0,25	0,009
Ciclopropano	500	454	0,18	0,001
Esano	225	218	0,288	0,006
Idrogeno	520	400	0,017	0,0012
Benzina	440	316	-	-
Kerosene	227	216	-	-
Ottano	220	208	-	-
Alcool propilico	440	328	-	-



Anche le nebbie (o aerosol) che possono trovare origine dalla ricondensazione della fase vapore oppure dalla nebulizzazione meccanica caratteristica di moltissimi processi industriali pur trovandosi a temperatura bassa (minore di quella di flash point) possono essere esplosive.



La facilità di accensione è probabilmente da imputarsi al fatto che le dimensioni delle più piccole gocce si avvicinano sensibilmente a quelle del vapore. Secondo diversi studiosi la ragione della elevata propensione all'innesco degli aerosol anche a bassissima temperatura risiede nel fatto che le ridotte dimensioni delle singole particelle incrementano considerevolmente la superficie di contatto tra combustibile e comburente; la capacità evaporativa e di ossidazione di ciascuna particella risulta così assai elevata indipendentemente dalla temperatura ambiente; è sufficiente una modesta sorgente di calore per innescare la reazione.



Secondo una diffusa teoria la facilità di accensione deriva dal fatto che quantitativi di energia anche relativamente modesti sono in grado di far evaporare localmente le singole goccioline anche quando la temperatura ambiente si trova molto al di sotto della temperatura di vaporizzazione (flash point) della sostanza; una volta innescatasi la miscela costituita dal combustibile vaporizzatosi a partire dalla superficie di ciascuna singola gocciolina ed il comburente la combustione procede fino a coinvolgere l'intera goccia

Questo fenomeno non va trascurato in quanto molte esplosioni in ambienti confinati sono avvenute proprio a causa della presenza di aerosol.



Qualsiasi sia la dinamica dell'innescò, parlare di temperatura di infiammabilità nel caso di nebbie non ha grande significato, poiché queste possono provocare esplosioni anche a temperature inferiori a quella di infiammabilità cioè in condizioni ancora lontane da quelle di vaporizzazione della massa liquida.



## Caratteristiche di alcune sostanze infiammabili comunemente presenti nell'industria.

LIQUIDI E GAS INFIAMMABILI	PESO VAPORI (ARIA = 1)	TEMP. INFIAMMABILITÀ	TEMP. ACCENSIONE	CAMPO INFIAMMABILITÀ IN ARIA (% IN VOLUME)
<u>ACETILENE</u>	<u>0,90</u>	GAS	300°C	1,5 _____ 82,0
<u>ACETONE</u>	<u>2,00</u>	<u>18°C</u>	538°C	2,5 _____ 12,8
<u>ALCOOL ETILICO</u>	<u>1,11</u>	<u>11°C</u>	455°C	5,5 _____ 26,5
<u>AMMONIACA</u>	<u>0,60</u>	GAS	630°C	15,0 _____ 28,5
<u>BENZINA</u>	> <u>2,50</u>	<u>-35°C</u>	250°C	0,7 _____ 8,0
<u>GASOLIO</u>	<u>3,50</u>	<u>80°C</u>	330°C	5,5 _____ 23,0
<u>GPL</u>	<u>2,05</u>	GAS	365°C	2,0 _____ 9,0
<u>KEROSENE</u>	<u>3,00</u>	<u>38°C</u>	350°C	1,0 _____ 6,0
<u>IDROGENO</u>	<u>0,07</u>	GAS	560°C	4,0 _____ 75,0
<u>METANO</u>	<u>0,55</u>	GAS	537°C	5,0 _____ 15,0
<u>OLIO LUBRIFICANTE</u>	> <u>3,50</u>	> <u>125°C</u>	350°C	1,0 _____ 6,0
<u>OSSIDO DI CARBONIO</u>	<u>1,00</u>	GAS	551°C	12,5 _____ 74,0
<u>PROPANO</u>	<u>1,56</u>	GAS	466°C	2,1 _____ 9,5
<u>TOLUOLO</u>	<u>3,18</u>	<u>4,4°C</u>	552°C	1,4 _____ 6,7



# ESPLOSIONE DELLE POLVERI

Le miscele polvere-aria possiedono molte similitudini di comportamento con quelle gas-aria, e soprattutto con quelle aerosol-aria, ma differiscono da queste ultime per due motivi sostanziali:

- le polveri non sono molecole, ma particelle più o meno fini di un dato materiale;
- sono soggette alla forza di gravità e quindi, più o meno rapidamente, alla sedimentazione.



Nel caso delle polveri risultano numerosi i fattori di influenza che possono contribuire alla loro minore o maggiore esplosibilità: diametro e forma delle particelle solide, distribuzione spaziale, presenza di contaminanti inerti, umidità atmosferica, turbolenza e tenore di ossigeno sono solo alcuni dei tanti.

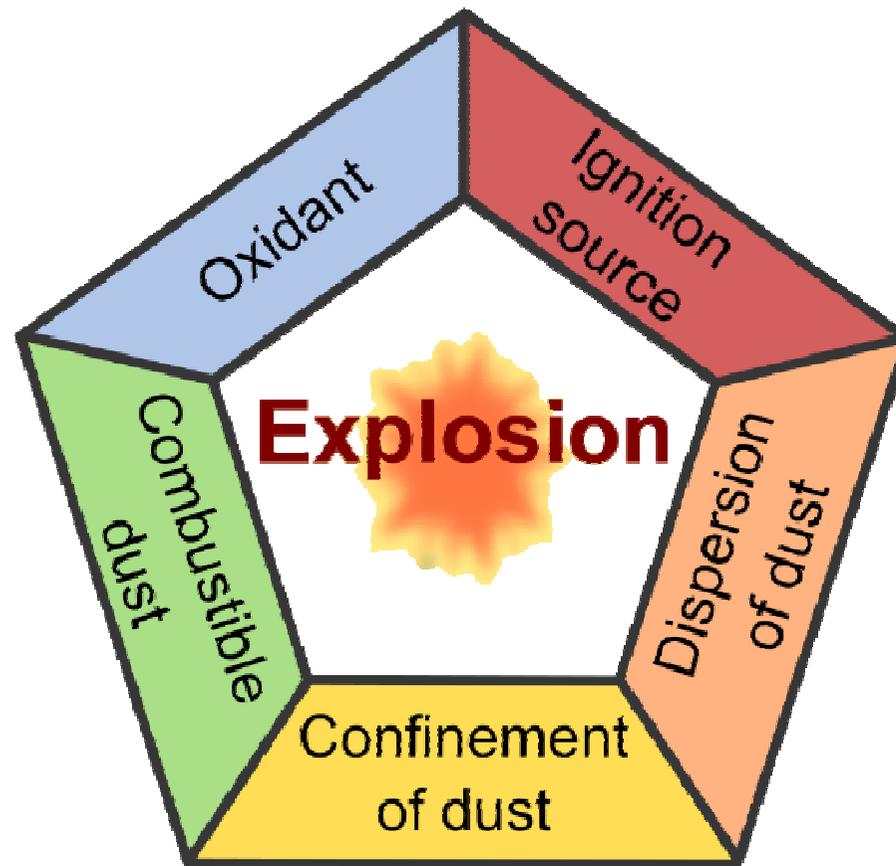
Tutti questi fattori influenzano fortemente il valore della “minima concentrazione di esplosività” o MEC (Minimum Explosive Concentration) in aria, indice omologo di quello che il LEL rappresenta per gas e vapori; resta aperto il dibattito sull’applicabilità del concetto di “concentrazione massima”, che per gas e vapori è rappresentata dal valore UEL.



Ai fini dell'innesco di una esplosione la polvere deve trovarsi in una condizione di dispersione in ambiente ideale poiché solo in questa circostanza le particelle di polvere posseggono una superficie di contatto con l'aria sufficientemente estesa; non si deve però sottovalutare la presenza di una coltre di polvere depositata per gravità su pareti, pavimenti e impianti, perché correnti d'aria, getti di aria compressa o altre cause potrebbero generare turbolenze in grado di dare origine a nubi esplodibili con estrema facilità.



Le particolarità delle polveri ha fatto sì che alcuni ricercatori proponessero un “modello” in grado di descrivere tutte le condizioni necessarie all’innesco in modo più rigoroso rispetto al classico triangolo del fuoco utilizzato per l’incendio.



In relazione alla modalità di dispersione in ambiente se le polveri possiedono caratteristiche combustibili possono, a seconda dei casi, originarsi differenti situazioni di pericolo:

- un incendio covante (*smoldering*), cioè una lenta combustione per ossidazione o per decomposizione della polvere;
- un incendio diffuso qualora l'incendio covante si sviluppi in ambiente;
- una esplosione a causa della formazione di una nube avente caratteristiche ideali;
- una o più esplosioni secondarie (o deflagrazioni) anche a distanze elevate rispetto alla zona in cui è avvenuta l'esplosione primaria.



Frequentemente in letteratura vengono indicate come esplosive le polveri la cui granulometria media risulta inferiore a 500  $\mu\text{m}$  (420  $\mu\text{m}$  secondo lo standard NFPA 651).

Alcune fonti, fra cui anche OSHA, preferiscono non fornire valori limite rispetto alla granulometria indicando semplicemente (ed empiricamente) come esplodibili con elevata probabilità le nubi di polvere caratterizzate da una densità tale da ostruire la visuale oltre il metro e mezzo di distanza.



Si consideri, solo per fare un esempio, che particelle elementari di sostanze quali polvere di legno, zucchero, farina, polvere di carbone, cellulosa, polvere di PVC, polvere di alluminio hanno dimensioni variabili tra i 20 e i 100  $\mu\text{m}$ .



A differenza di quanto avviene per le miscele gassose, le esplosioni delle polveri possono avvenire esclusivamente in presenza di turbolenze che generino una nube in cui si raggiunga, almeno temporaneamente, una sospensione in aria sufficientemente omogenea («ideale»).

In ogni caso la miscela polvere + aria, al contrario di quanto avviene per le miscele gas/vapore + aria tende a modificarsi in continuazione a causa della rapida precipitazione delle particelle più grandi dovuta alla forza di gravità.



Le concentrazioni limite di esplosività in aria per le polveri sono variabili, a seconda della tipologia, tra 25 e 500 g/m<sup>3</sup>.

In particolare per quanto riguarda le polveri di cereali il range è compreso tra 25 e 55 g/m<sup>3</sup>.



Alcuni studi condotti negli USA, affermano che in una nube di polvere, la cui concentrazione uniformemente diffusa sia pari a  $0,020 \text{ oz/ft}^3$ , equivalenti a  $20 \text{ g/m}^3$ , la visibilità risulta ridotta a meno di un metro.

Empiricamente questo si traduce nell'impossibilità di distinguere alla distanza di un metro una lampadina a incandescenza da 100 W accesa o di vedere la propria mano estendendo un braccio.

Questo, per quanto empirico e apparentemente fantasioso, può essere considerato un limite di sicurezza sufficientemente rappresentativo della proprietà di esplosibilità di una polvere.



L'accensione in aria standard delle polveri richiede energie di ignizione che generalmente sono tra le 20 e le 50 volte più elevate di quanto richiesto per l'accensione di gas e vapori (con valori compresi tra 10 e 40 mJ contro valori compresi tra 0,2 e 10 mJ per gas/vapori).

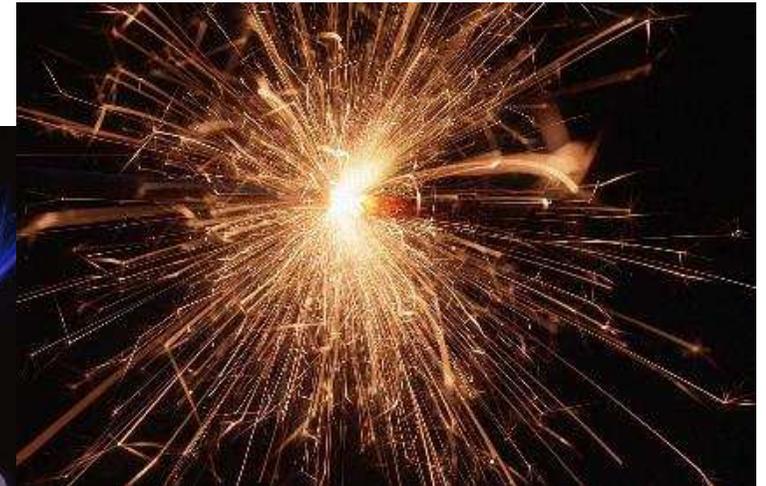
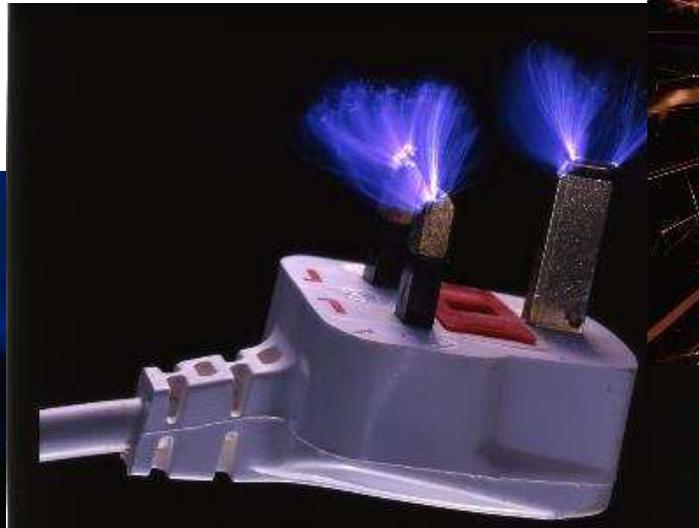
La maggior parte delle polveri è caratterizzata da una temperatura di autoaccensione (*Minimum Ignition Temperature* o MIT) compresa tra i 300 ed i 600 °C.

Per le rinfuse di origine vegetale le temperature minime di accensione (MIT) variano, secondo diversi studi, da un minimo di 350 °C per lo zucchero a 480 °C per il grano.



## LE PRINCIPALI SORGENTI DI INNESCO DI UN INCENDIO O DI UNA ESPLOSIONE

Una classificazione diffusa in Europa è quella proposta dalla norma EN 1127-1 che le suddivide in 12 categorie principali; di seguito vengono riportate indicando anche alcune delle cause che le originano:



- superfici calde (forni, apparecchiature e condotte contenenti fluidi surriscaldati, camini e collettori di gas di scarico, essiccatori, scambiatori, superfici di attrito, cuscinetti volventi, ecc.);
- fiamme libere e gas caldi (saldatura, taglio alla fiamma, preriscaldamento, incollaggio, ecc.);
- scintille di origine meccanica (urti, abrasioni, attriti tra parti in traslazione o rotazione reciproca, ecc.);
- apparati elettrici (manovre di apertura di contatti, connessioni allentate, archi elettrici di saldatura, ecc.);
- correnti vaganti e correnti indotte contro la corrosione catodica (correnti di ritorno di saldatura, cortocircuiti, dispersioni verso terra, scariche induttive, ecc.);
- elettricità statica (movimento di fluidi in condotta, movimento di materiali granulari, strisciamento di superfici, vento, contatto tra materiali conduttori ed isolanti, ecc.);

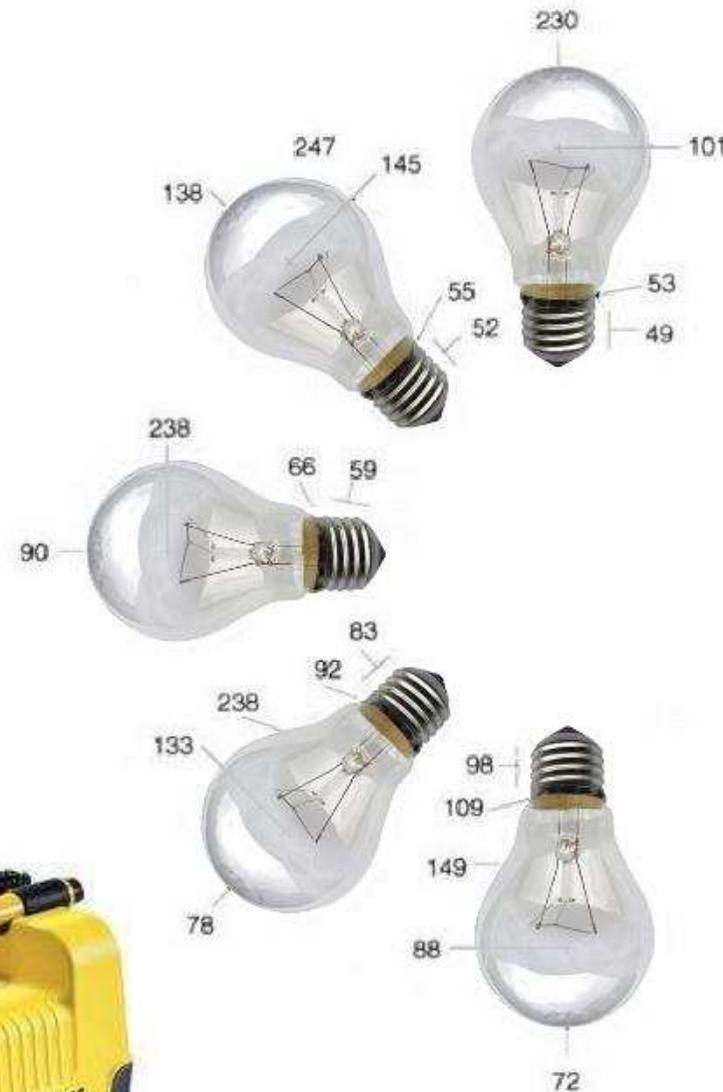


- fulminazione atmosferica (scariche cerauniche dirette, scintille generate da scarica, sovratensioni accidentali, ecc.);
- onde elettromagnetiche [a loro volta suddivise a seconda della lunghezza d'onda] (telefoni cellulari, radio, apparecchiature elettroniche, laser, ecc.);
- radiazioni ionizzanti (macchine radiogene, isotopi radioattivi);
- ultrasuoni (trasduttori, ecc.);
- compressioni adiabatiche e onde d'urto (manovre su dispositivi di intercettazione/regolazione gas, espansione gas, ecc.);
- reazioni chimiche esotermiche (decomposizioni, ossidazioni violente, sostanze piroforiche, polimerizzazioni, reazioni alla termite, ecc.).

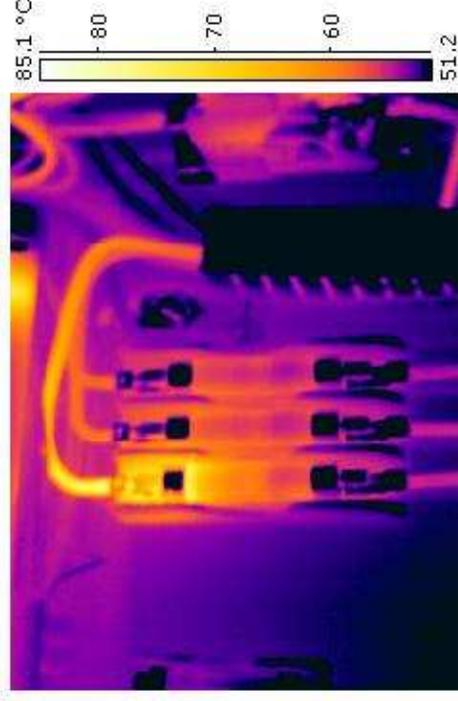
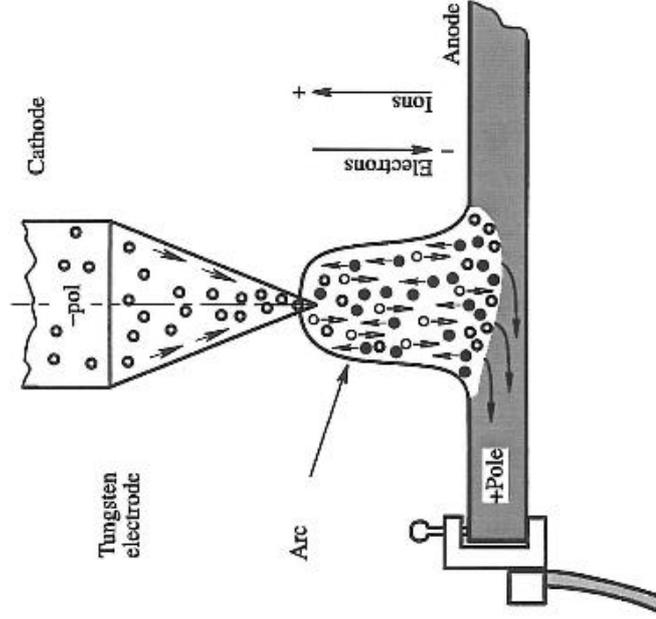


È importante fare attenzione alla temp. di ignizione della sostanza contenuta all'interno di un ambiente confinato.

Una lampadina da 100 watt, a seconda di come viene orientata, può avere diverse temperature superficiali ed in certi casi la temperatura superficiale risulta maggiore della temperatura minima di ignizione di alcune comuni sostanze infiammabili.

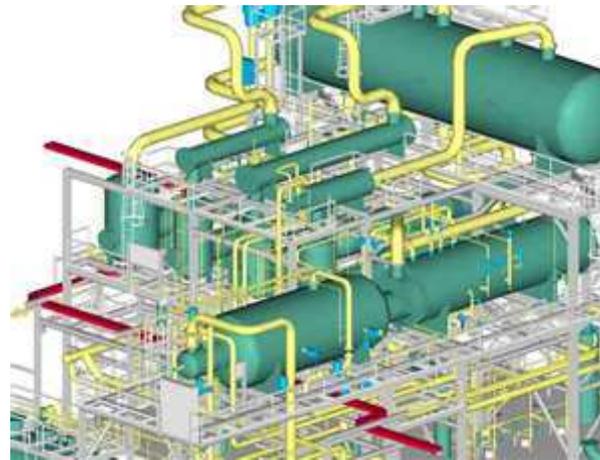
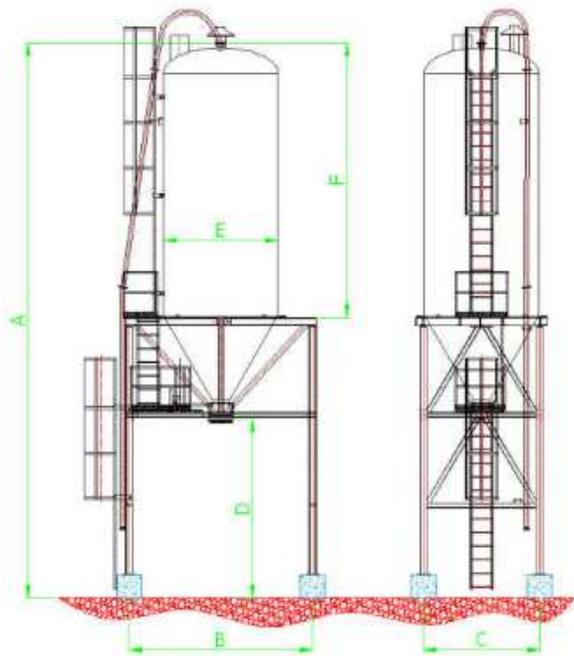


COLORE DELLA FIAMMA		TEMPERATURE (°C)
Rosso nascente		525
Rosso scuro		700
Rosso ciliegia		900
Giallo scuro		1100
Giallo chiaro		1200
Bianco		1300
Bianco abbagliante		1500

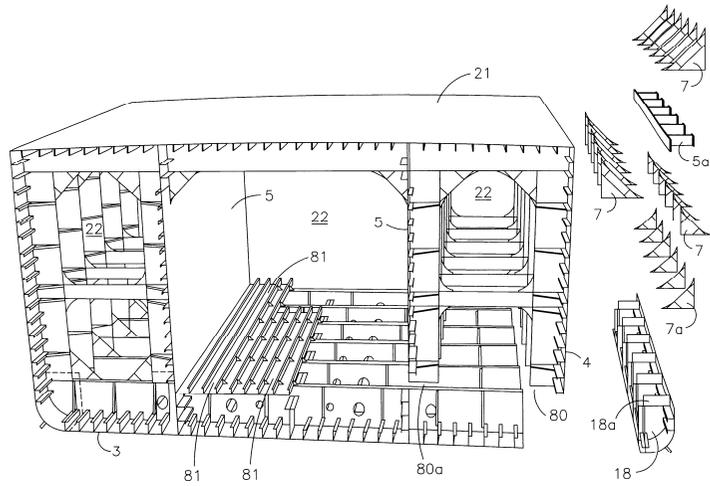


## IN QUALI DOCUMENTI E' POSSIBILE REPERIRE INFORMAZIONI UTILI PER «INTERPRETARE» UN IMPIANTO INDUSTRIALE?

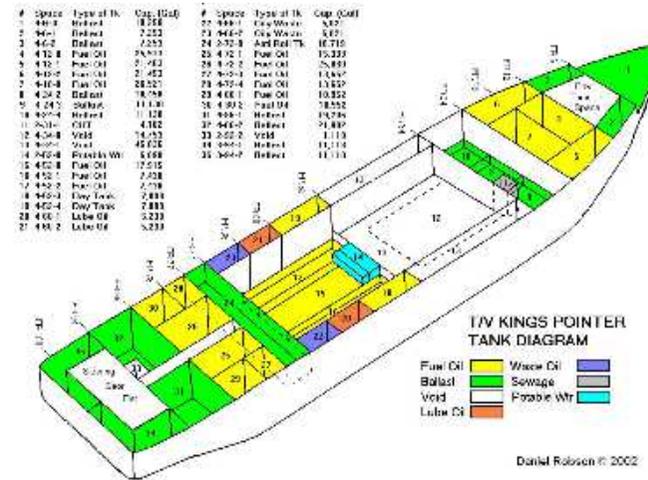
Disegni e relazioni tecniche di progetto bi-tridimensionali...



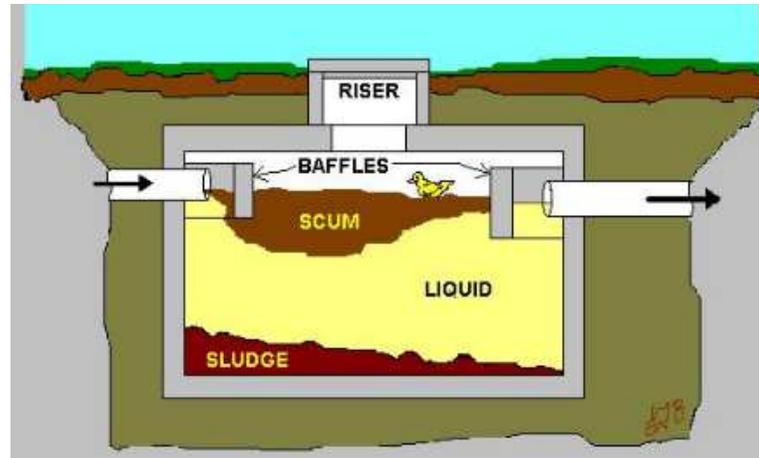
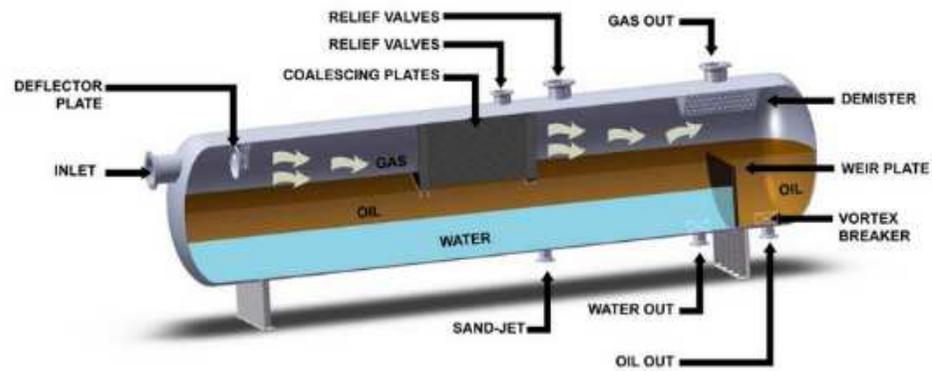
## Disegni di costruzione...



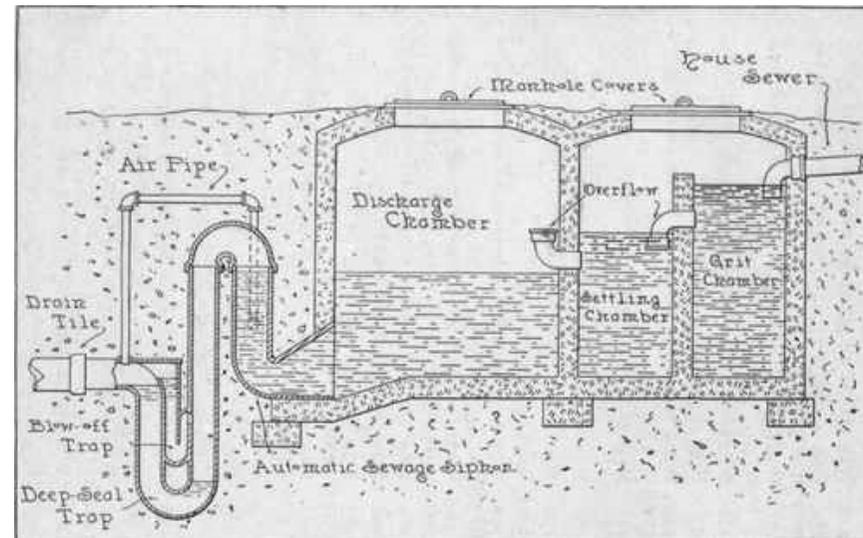
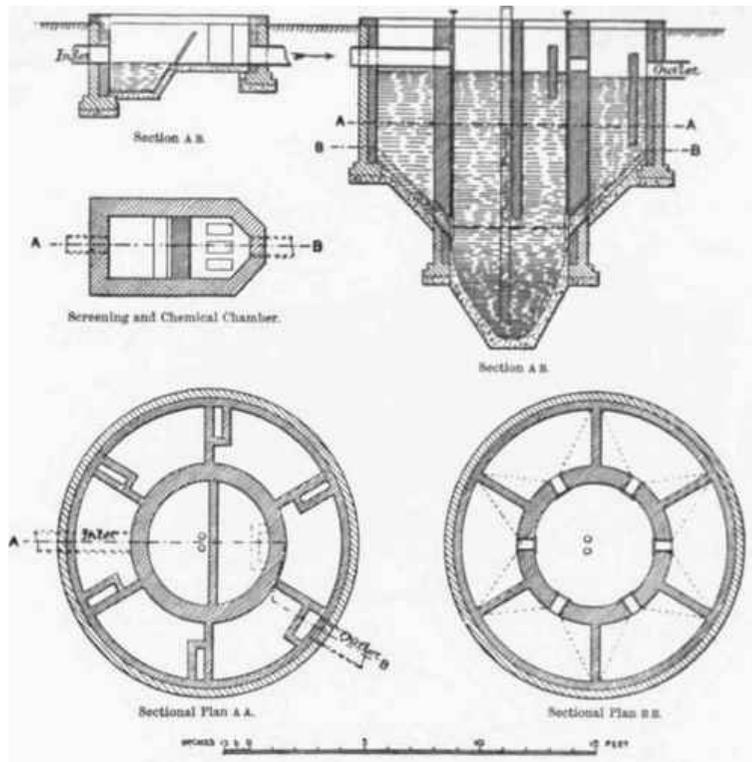
## Diagrammi di carico o di ballastaggio...



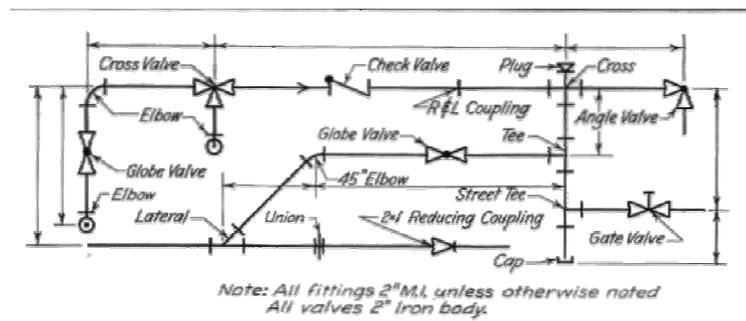
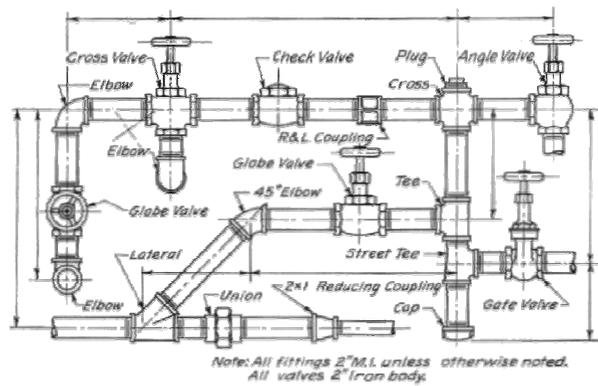
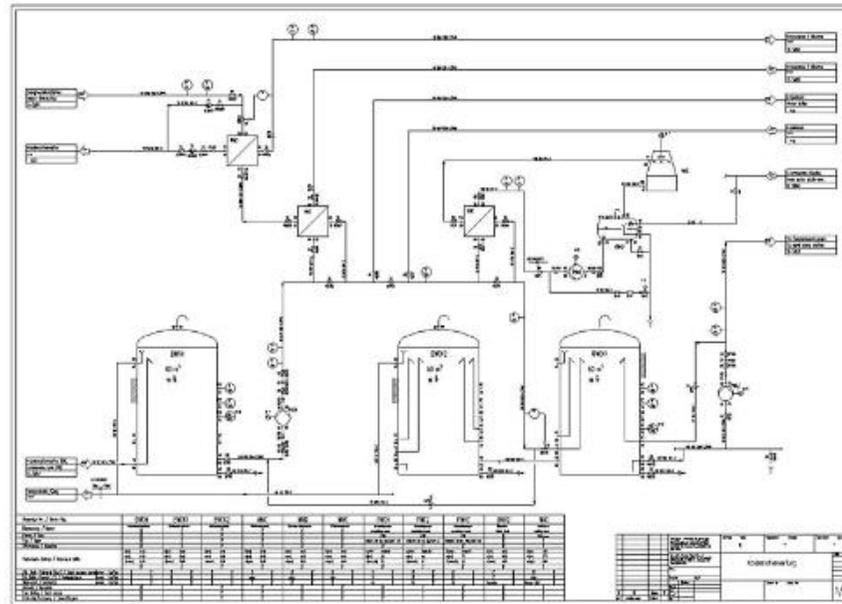
Immagini riportate su cataloghi o anche materiale divulgativo e pubblicitario.

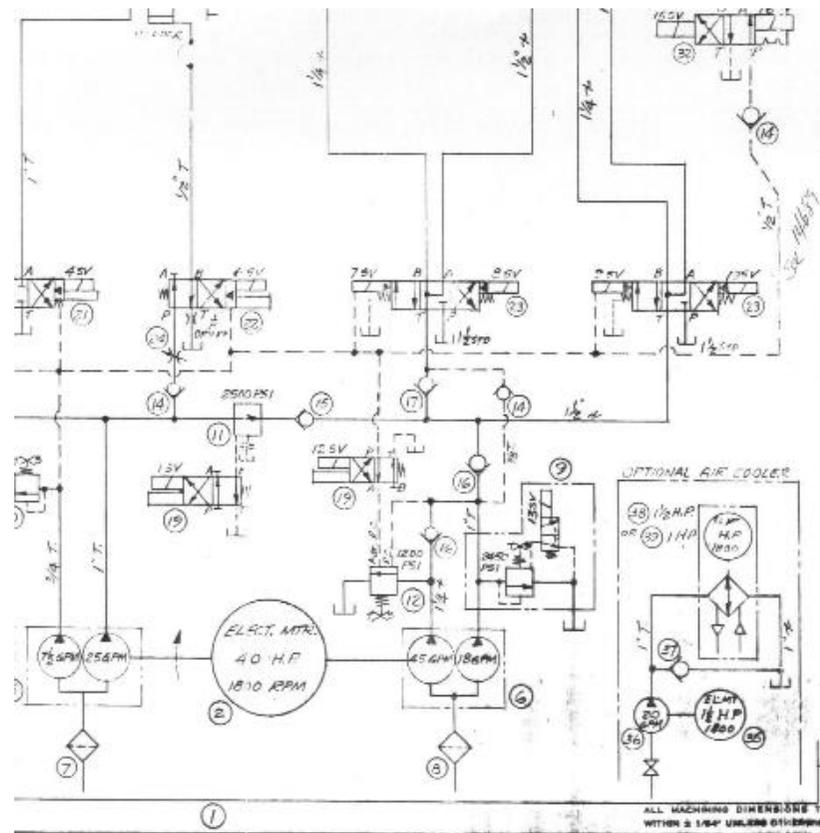


Disegni allegati ai permessi di costruzione originali...



P & I, schemi unifilari, schemi di marcia, ecc....





**E inoltre:**

**Report di lavoro, permessi di lavoro, verbali di riunione, report di NDT, relazioni tecniche, ecc...**



BONIFICA DELLE  
ATMOSFERE CONFINATE  
E MANTENIMENTO  
DELLE CONDIZIONI DI  
SICUREZZA



## ALCUNE DEFINIZIONI

### INERTIZZAZIONE

Per inertizzazione si intende la sostituzione di una atmosfera ricca di gas o vapori esplosivi con una atmosfera di gas inattivo priva di comburente (secondo le norme NFPA il valore più piccolo tra il 5% assoluto di Ossigeno in atm e il 50% di Ossigeno riferito al LEL).

### VENTILAZIONE

Per ventilazione si intende il lavaggio volumetrico di un ambiente confinato con ARIA fino al ripristino e mantenimento nel tempo del tenore di ossigeno a valori % di sicurezza.

### BONIFICA

Con questo termine deve a rigore essere indicato esclusivamente un “processo che, nel suo complesso, consenta la completa eliminazione di qualsiasi sostanza genericamente pericolosa presente nell’ambiente, utilizzando procedure che portino a un’atmosfera sicura, respirabile e stabile nel tempo”.

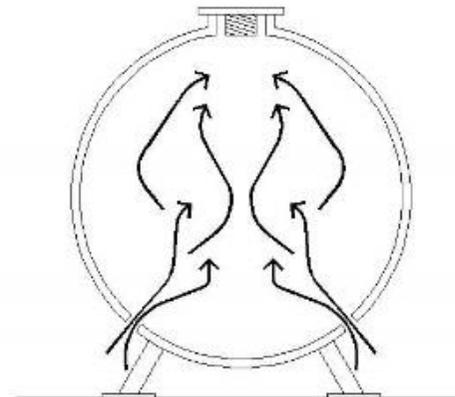
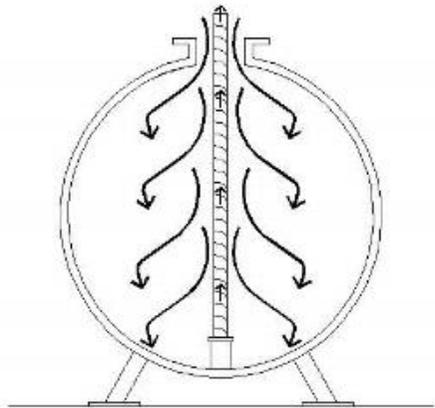


## Bonifica (o ventilazione) con aria

La bonifica con aria avviene attraverso sistemi meccanici che utilizzano ventilatori/aspiratori per effettuare il “lavaggio” dello spazio confinato.

Questo metodo, oltre che per la bonifica, può essere utilizzato anche per la semplice ventilazione.

La bonifica per ventilazione meccanica possiede un alto grado di efficacia a patto che le apparecchiature utilizzate vengano posizionate correttamente.



## Bonifica con acqua

Questo metodo di bonifica può essere utilizzato, ad esempio, per la rimozione di gas inerti presenti all'interno di uno spazio confinato e consiste sostanzialmente nel riempire completamente l'ambiente da bonificare con acqua e nell'immettere successivamente aria dopo aver fatto defluire l'acqua.

Può essere utilizzato anche per tutti i gas e vapori che abbiano una buona miscibilità e non reattività con l'acqua (cloro, ammoniacca, ecc.); assolutamente inaffidabile nel caso di altri prodotti non miscibili in acqua e/o con una alta penetrazione nella microporosità superficiale delle pareti dello spazio confinato (GPL, acetilene, ecc.).



## Bonifica con vapore

Il vapore può essere utilizzato per bonificare spazi confinati inquinati da sostanze che contengono idrocarburi con un basso punto di infiammabilità (bassobollenti) purchè la loro T. di autoaccensione sia almeno **pari al 120% della T. del vapore**.

L'utilizzo del vapore presenta, rispetto ad altri sistemi, il vantaggio di essere in grado di sciogliere incrostazioni, catrame e materiali viscosi dalle pareti dell'ambiente confinato.

Affinché il vapore possa essere utilizzato per bonificare l'ambiente, deve essere introdotto all'interno dello spazio confinato in una quantità tale che consenta di far aumentare la temperatura interna di **almeno 80°C**. In caso contrario il vapore condenserebbe e i contaminanti non potrebbero essere disciolti e portati all'esterno dello spazio confinato.

Durante le operazioni di bonifica tramite immissione di vapore le aperture superiori dell'ambiente confinato devono essere lasciate aperte (per evitare sovrappressioni e depressioni) e il vapore deve essere **introdotto a partire dal fondo**.

Il vapore presenta però la pericolosa caratteristica di generare facilmente **cariche elettrostatiche**.

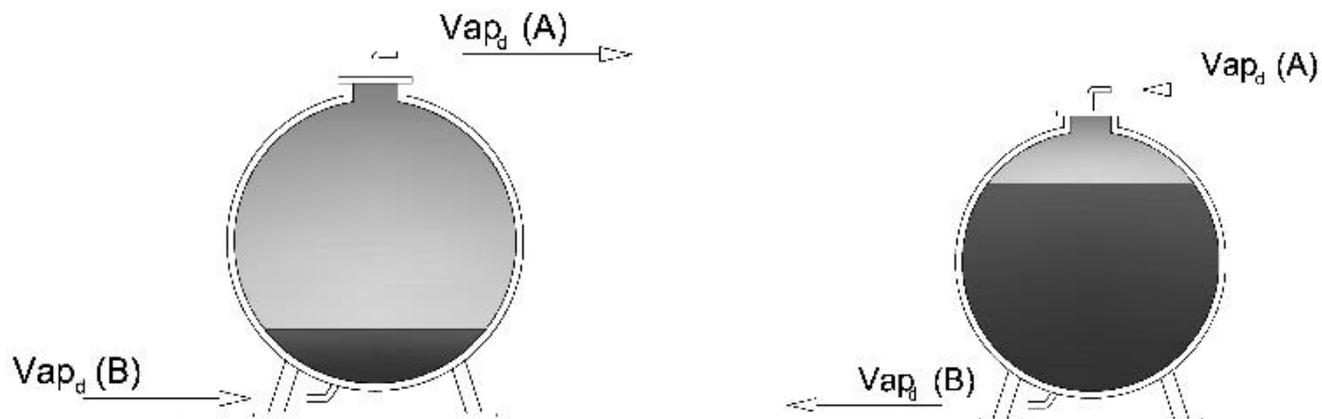


## Bonifica con gas inerte

Il rischio di esplosione dovuto a gas e vapori infiammabili può essere minimizzato attraverso una bonifica iniziale effettuata con un gas inattivo quale ad esempio l'anidride carbonica o l'azoto.

I gas inerti possono infatti essere utilizzati per abbassare il livello di ossigeno ad un punto tale da scongiurare l'accensione (in genere, tranne poche eccezioni, al di sotto del 5% in volume).

Trattandosi di gas non tossici per l'uomo, ma comunque asfissianti, una volta terminato il degasaggio, i gas inerti dovranno essere rimossi effettuando un adeguato lavaggio dell'ambiente con acqua/aria o aria.



Combustibile	Miscela comburente aria-N <sub>2</sub>		Miscela comburente aria-CO <sub>2</sub>	
	MOC	% di O <sub>2</sub> massima raccomandata	MOC	% di O <sub>2</sub> massima raccomandata
Acetone	13,5	11	15,5	12,5
Benzene	11	9	14	11
Butano	12	9,5	14,5	10,5
Disolfuro di carbonio	5	4	8	6,5
Ciclopropano	11,5	9	14	11
Alcool etilico	10,5	8,5	13	10,5
Benzina (73-100 ott.)	12	9,5	15	12
Benzina (100-130 ott.)	12	9,5	15	12
Benzina (115-145 ott.)	12	9,5	14,5	11,5
Esano	12	9,5	14,5	11,5
Idrogeno	5	4	6	5
Carburante JP-1	10,5	8,5	14	11
Carburante JP-3	12	9,5	14	11
Carburante JP-4	11,5	9	14	11
Kerosene	11	9	14	11
Metano	12	9,5	14,5	11,5
Alcool metilico	10	8	13,5	11
Propano	11,5	9	14	11



Sebbene gas e vapori nocivi tendano a diffondersi all'interno di tutto l'ambiente in cui si trovano confinati, essi hanno comunque la tendenza a stratificare in base alla loro densità.

Quelli più leggeri dell'aria ( $< 0,8$ ) tendono a salire verso l'alto e a stratificare quindi nella parte più alta.

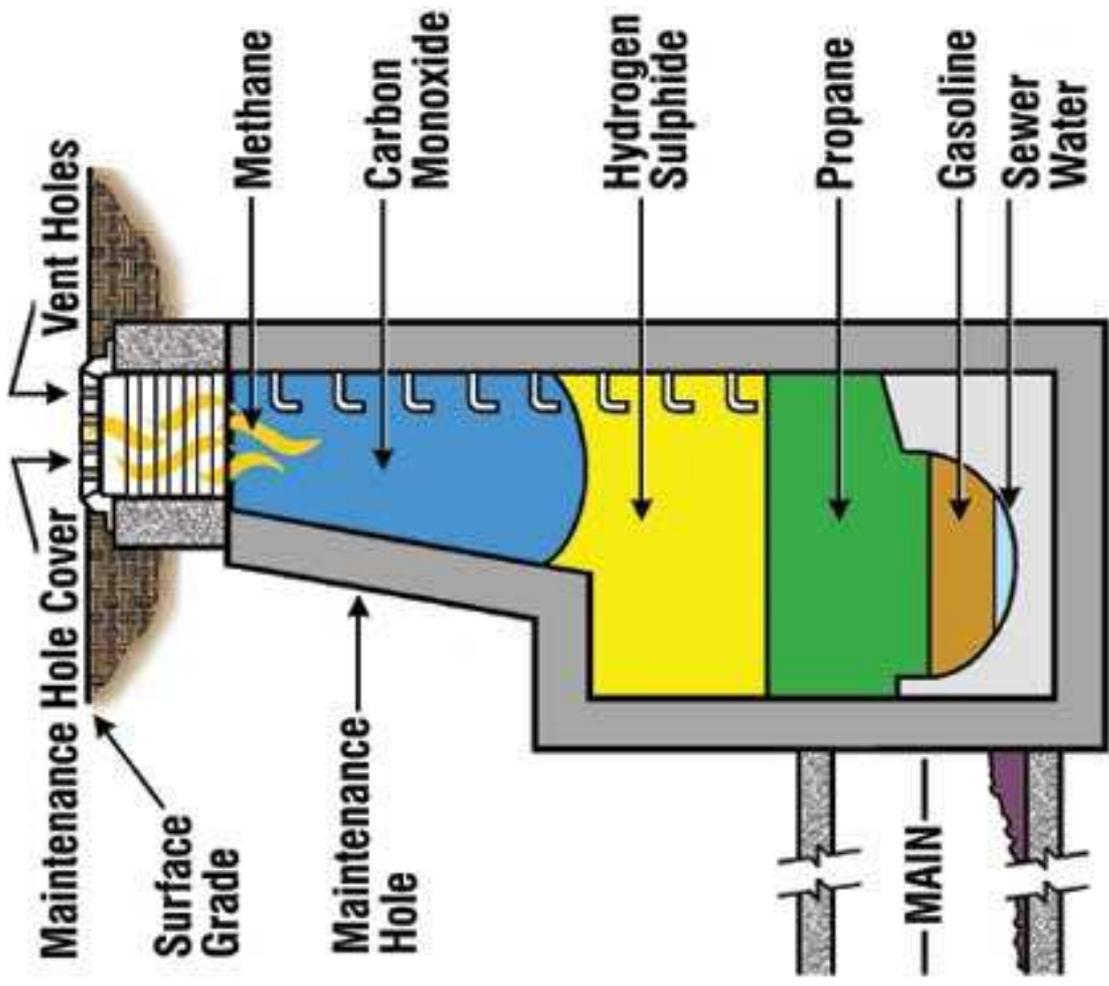
Quelli più pesanti dell'aria ( $> 1,2$ ) tendono invece a depositarsi sul fondo.

Naturalmente nella disposizione delle vie di sfogo dell'aria e delle prese per l'immissione si deve tenere conto di questo aspetto.

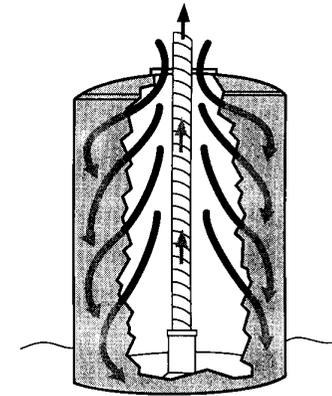
Se il gas da eliminare (ad esempio dopo una inertizzazione) presenta una densità molto diversa da quella dell'aria, come ad esempio nel caso di elio, argon o anidride carbonica, ecc., l'aria di ventilazione potrebbe non miscelarsi in modo efficace e l'intervento potrebbe risultare inadeguato.

Il calcolo del numero minimo di ricambi d'aria può essere effettuato mediante formule (ASHRAE) o per via grafica seguendo le indicazioni suggerite da standard e linee guida.

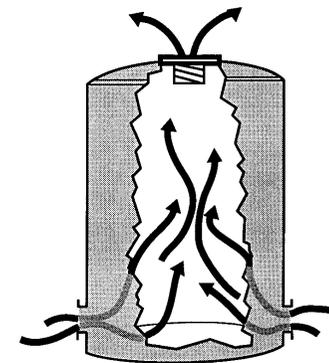


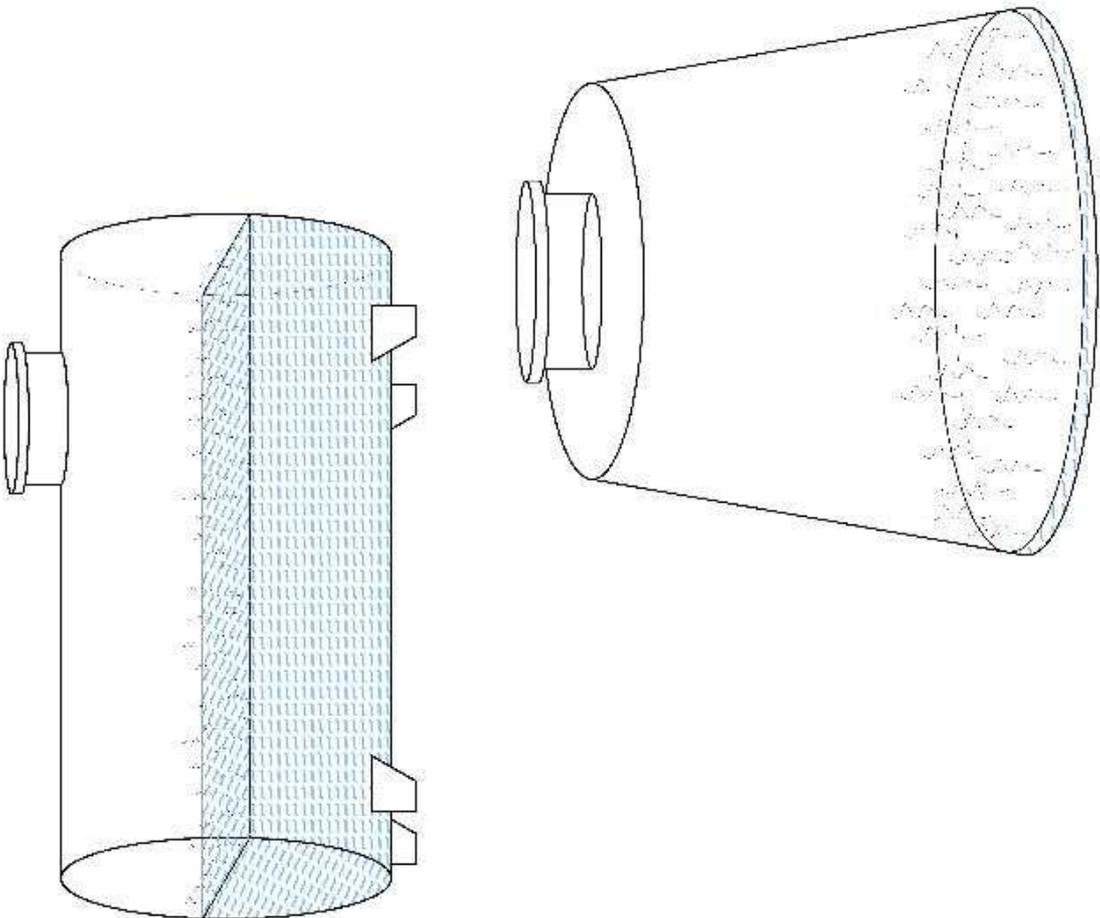
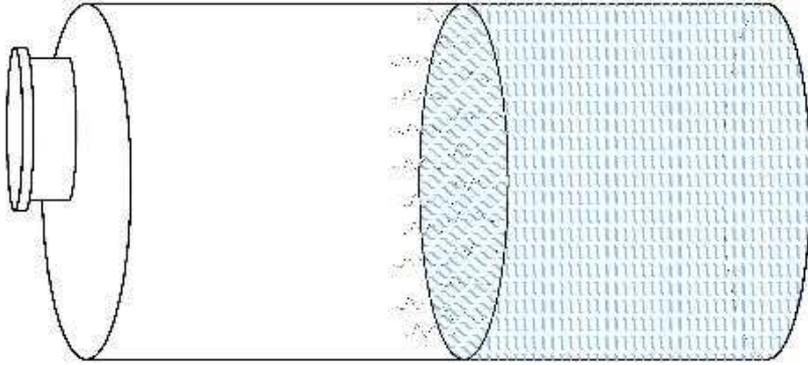


Il metodo consigliato per la bonifica di gas “pesanti” (come ad esempio l’argon o il vapore di azoto freddo) consiste nell’aspirare il gas dalla zona bassa dell’area interessata.



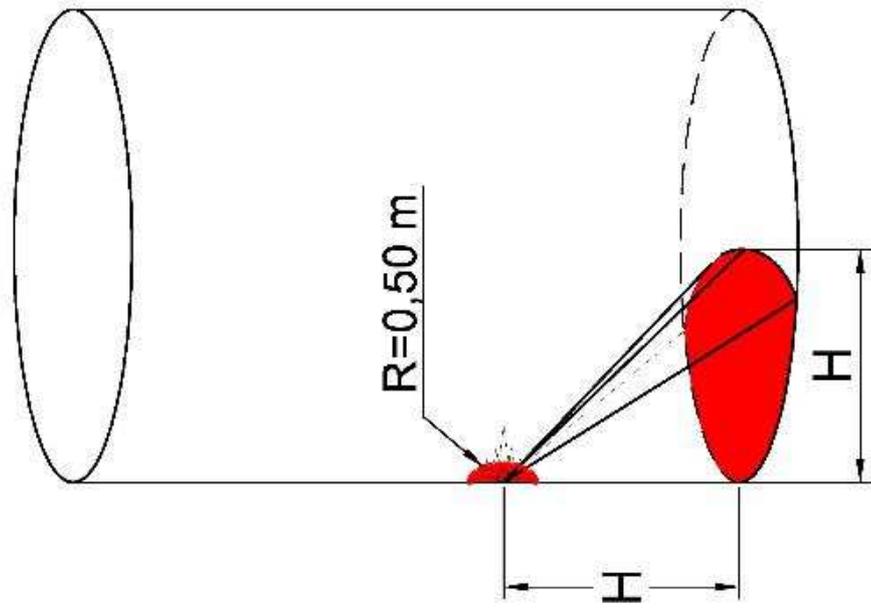
Quando i contaminanti, invece, sono più “leggeri” dell’aria devono essere prelevati dalla parte superiore dell’ambiente confinato e le prese per l’immissione dell’aria devono essere collocate nella parte inferiore.





In molti casi è maggiore il volume delle tubazioni di adduzione (spazi adiacenti) che di quello dell'ambiente confinato vero e proprio.





**QUALSIASI BONIFICA DEVE  
TERMINARE CON UNA VENTILAZIONE**



## Ventilazione

La ventilazione è il processo attraverso il quale viene fatta confluire continuamente aria fresca e pulita all'interno dello spazio confinato. Viene in genere adottata una volta terminate le operazioni di bonifica al fine di **stabilizzare il microclima**.

La ventilazione generale di un ambiente confinato ha lo scopo di diluire la concentrazione dei contaminanti presenti all'interno dell'ambiente di lavoro a valori non superiori a quelli accettabili per la salute e la sicurezza dei lavoratori.

Questo processo consente di ottenere:

- la stabilizzazione del corretto quantitativo di ossigeno nell'aria;
- la diluzione di contaminanti dovuti a particolari lavorazioni effettuate all'interno dello spazio confinato quali ad esempio saldatura, sabbiatura e ossitaglio, ma non la loro rimozione diretta.

Può inoltre essere utilizzata per eliminare odori sgradevoli all'interno dello spazio confinato, che possono originare fastidi per gli operatori nonché per regolare la temperatura d'ambiente.



Il processo di ventilazione consente di ottenere:

- la diluizione dei contaminanti residui presenti all'interno il cui sviluppo abbia origine per desorbimento, per fermentazione, per ossidazione, ecc.;
- la diluizione dei contaminanti che accidentalmente penetrino, per migrazione, nell'ambiente confinato provenendo dall'esterno;
- la diluizione dell'anidride carbonica prodotta dalla respirazione del personale presente all'interno dell'ambiente;
- la diluizione dei contaminanti dovuti a particolari lavorazioni effettuate all'interno dell'ambiente confinato quali, ad esempio, saldatura, ossitaglio, pulizia con solventi, levigatura, ecc. (ma non la loro rimozione alla fonte);
- la stabilizzazione del corretto tenore di ossigeno nell'aria;
- il mantenimento di un buon confort microclimatico per gli operatori.



La ventilazione può essere di due tipi:

- **naturale**
- **forzata** (generale o localizzata)



## Ventilazione naturale di diluizione

La ventilazione naturale di diluizione è il processo tramite il quale si introduce, dall'esterno, aria pulita in modo che questa si misceli con l'atmosfera interna allo spazio confinato, diluendo eventuali contaminanti e ripristinando la giusta percentuale d'ossigeno e allo stesso tempo mantenendo il valore degli inquinanti al di sotto dei TLV raccomandati.

Nella ventilazione naturale il movimento dell'aria **avviene spontaneamente**, senza alcun ausilio meccanico, grazie alla differenza di pressione e/o temperatura che si instaura tra interno ed esterno.

Risulta però completamente inefficace per la rimozione di alte concentrazioni di contaminanti tossici, quali ad esempio i fumi derivanti da processi di saldatura, ossitaglio e di particelle pesanti dovute ad esempio a processi di sabbiatura.



## PROs

- non introduce pericoli in quanto non ci sono organi in movimento;
- è economico perché non richiede costi per l'acquisto o la manutenzione;
- non presenta sorgenti di accensione;
- non ci sono parti elettriche o meccaniche che si possano deteriorare o rompere.

## CONs

- non fornisce una ventilazione localizzata;
- non può essere facilmente adattata per compensare mutate condizioni atmosferiche all'interno dello spazio confinato;
- il numero di ricambi orari non può essere determinato a priori, ma è semplicemente possibile controllare lo stato del contaminante mediante monitoraggio strumentale.



## Ventilazione forzata di diluizione

In questo caso la circolazione dell'aria è indotta da uno o più ventilatori **con modalità IN ASPIRAZIONE o IN IMMISSIONE.**

La ventilazione forzata è detta **combinata** quando si utilizzano contemporaneamente ventilatori aspiranti e ventilatori prementi.

In caso di ventilazione **aspirante**, l'ambiente da ventilare viene a trovarsi in leggera **depressione** rispetto all'ambiente circostante.

In caso di ventilazione **in immissione** l'ambiente da ventilare viene a trovarsi in leggera **sovrappressione** rispetto all'ambiente circostante.

Questo diverso assetto di pressione interna può essere sfruttato per ottenere benefici di varia natura.



## **Ventilazione forzata localizzata (aspirazione)**

La ventilazione localizzata viene utilizzata per rimuovere i contaminanti nel punto in cui essi vengono generati, con lo scopo di impedirne la diffusione in tutto l'ambiente.

L'aspirazione localizzata va preferita a quella generale quando il contaminante è altamente pericoloso, ma perché sia praticabile occorre che il contaminante sia generato in una zona circoscritta.

I sistemi di aspirazione localizzata ben si adattano ad essere utilizzati nei processi di saldatura e ossitaglio, ma possono essere utilizzati per rimuovere vapori generati anche da altre attività quali ad esempio applicazioni localizzate di solventi, applicazione di vernici o in NDT effettuati con "liquidi penetranti".

Generalmente i sistemi di aspirazione localizzata vengono adottati in combinazione con sistemi di diluizione d'ambiente.



Le attrezzature utilizzate per la ventilazione forzata disponibili in commercio sono sostanzialmente suddivisibili in due categorie:

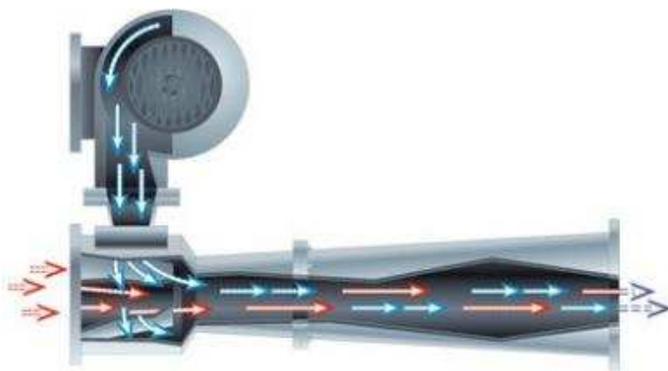
- **Estrattori Venturi**
- **Ventilatori meccanici**



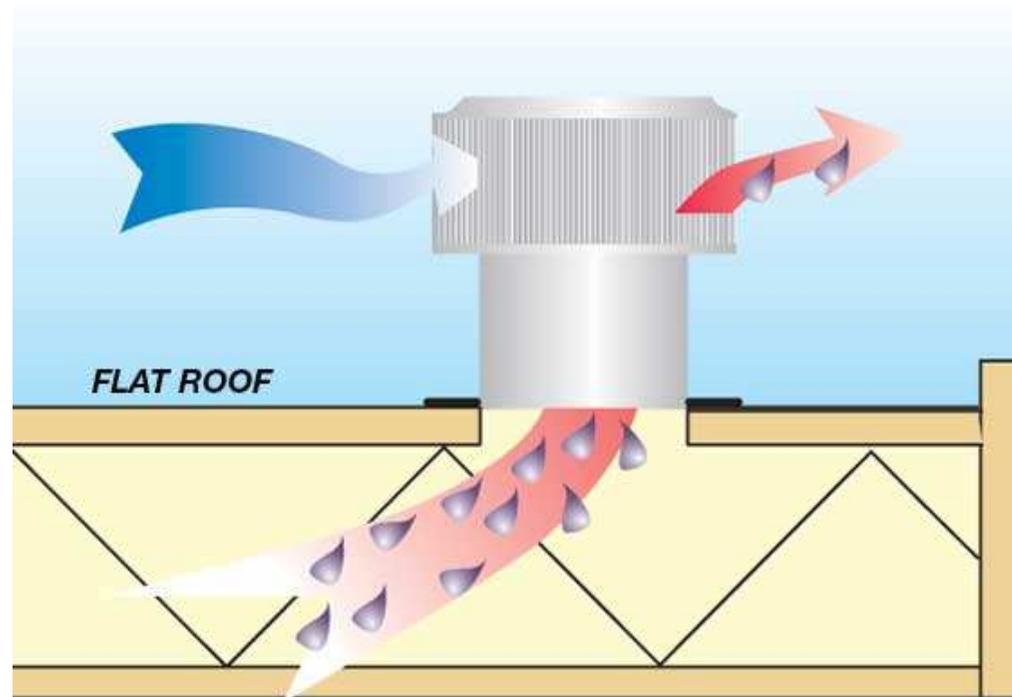
## Estrattori Venturi.

Con questo sistema dell'aria compressa o del vapore vengono immessi all'interno dell'eiettore (che viene in genere imbullonato ad una apertura praticata nella parete dello spazio confinato) attraverso un connettore laterale che conduce ad un ugello.

Per effetto Venturi si crea una depressione tale da aspirare l'aria inquinata presente all'interno dell'ambiente confinato accelerandola attraverso una strozzatura. L'aria aspirata e miscelata con l'aria o il vapore immesso, verrà poi scaricata all'esterno dello spazio confinato attraverso un diffusore conico. L'estrattore deve essere equipotenzializzato alla struttura dello spazio confinato se metallica.



Altri sistemi basati sull'effetto Venturi sono quelli in cui l'aspiratore è mosso dal vento.



## Ventilatori meccanici.

I ventilatori possono essere suddivisi in due classi:

- A flusso **assiale**, in cui il flusso dell'aria è parallelo all'asse di rotazione della girante. Si suddividono in:
  - Ventilatori a girante elicoidale
  - Ventilatori assiali intubati
  - Ventilatori assiali intubati con girante a palette
- A flusso **radiale (o centrifugo)**, in cui il flusso dell'aria è perpendicolare all'angolo di rotazione della girante.



## Ventilatori assiali a girante elicoidale

Sono ventilatori a bassa efficienza e l'uso deve essere limitato per applicazioni a bassa pressione. L'organo rotante è generalmente formato da due o più lame; questi ventilatori non sono adatti ad essere collegati ad un sistema di condutture.



## Ventilatori assiali intubati

Forniscono prestazioni migliori rispetto ai ventilatori assiali normali perché più efficienti e in grado di operare a pressioni maggiori. Le pale dei ventilatori assiali intubati sono montate all'interno di un tubo di acciaio, a stretto contatto, in modo da minimizzare lo spazio tra la girante e l'involucro.



## **Ventilatori assiali a palette**

Nella forma è simile al ventilatore assiale a tubo, ma è dotato di una serie di palette nella parte superiore e inferiore delle pale della girante anche di deflettori all'interno del tubo. Palette e deflettori hanno il medesimo scopo di raddrizzare il flusso circolare dell'aria dovuto alle pale rotanti migliorandone le caratteristiche di pressione e di efficienza.

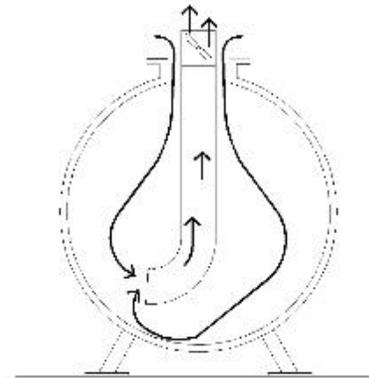
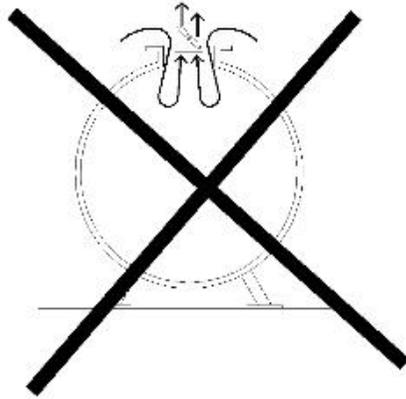
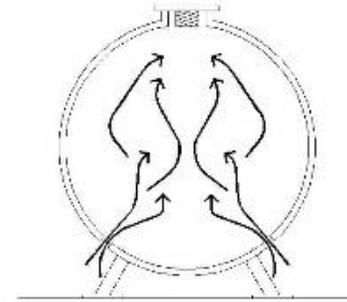
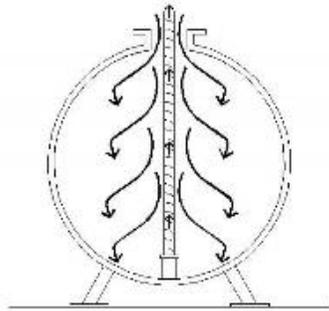
## **Ventilatori a flusso radiale**

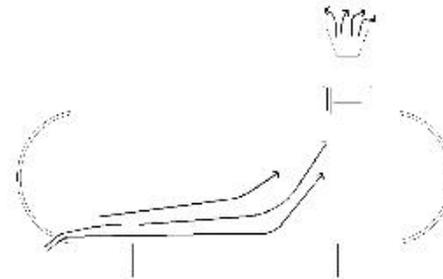
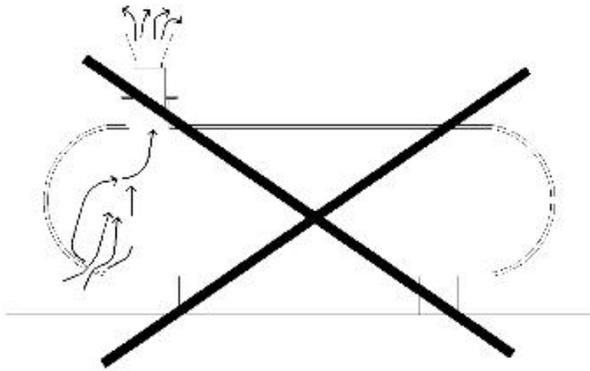
È formato da un rotore alettato montato su di un albero che a sua volta ruota all'interno di un contenitore cilindrico.

Il flusso dell'aria è in questo caso perpendicolare a quello dell'asse della girante.

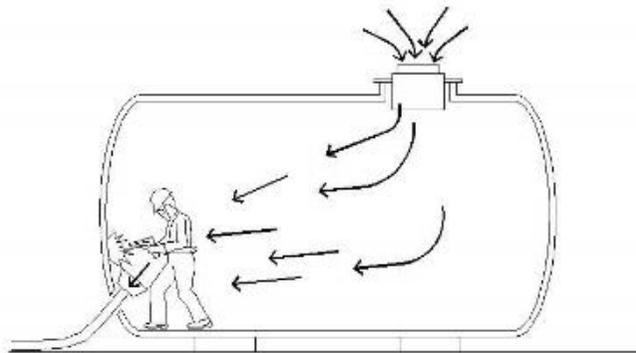


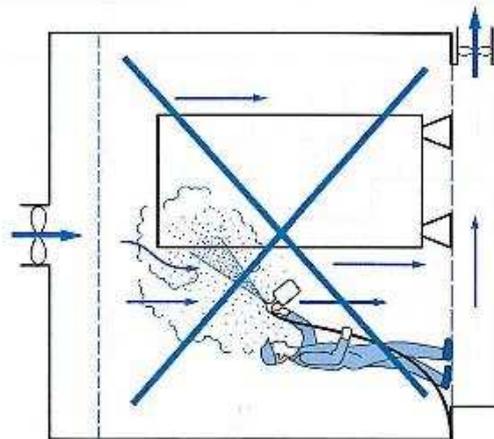
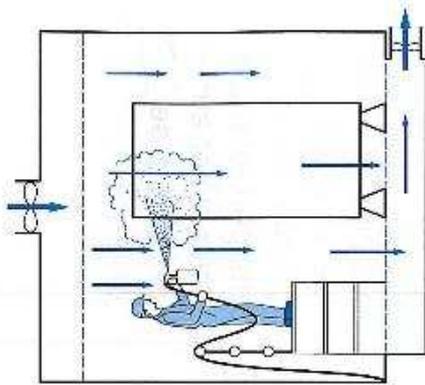
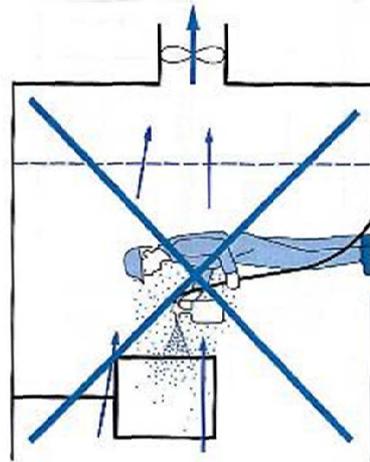
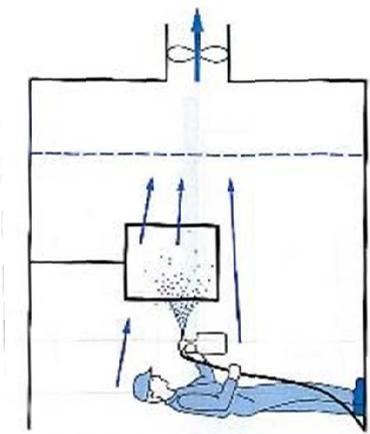
# Schemi di ventilazione meccanica di diluizione.

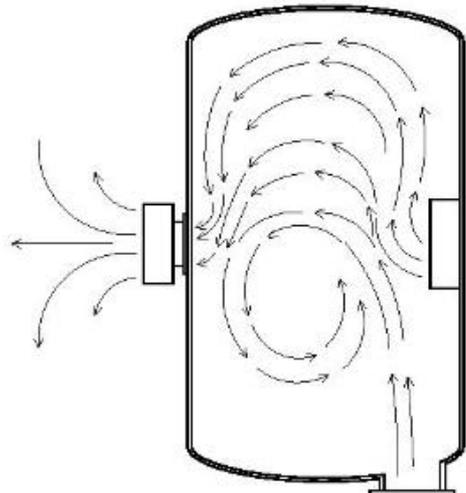
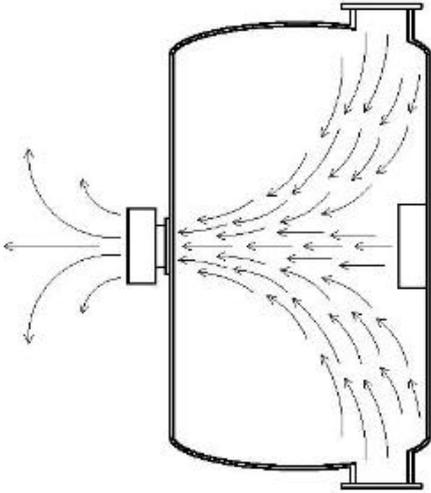


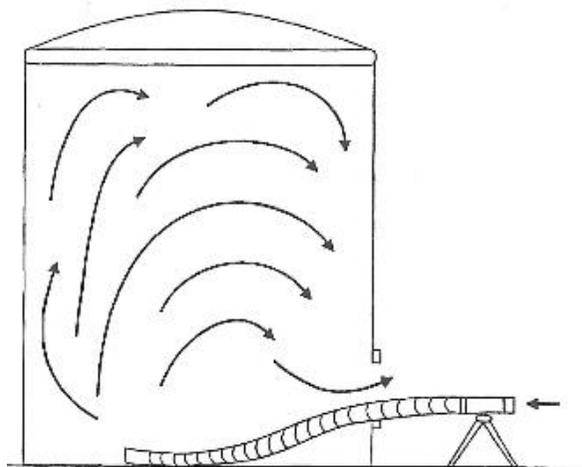


**In abbinamento ad una aspirazione localizzata**

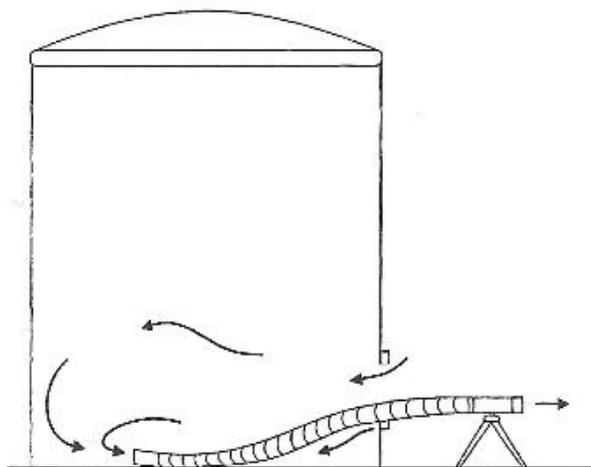






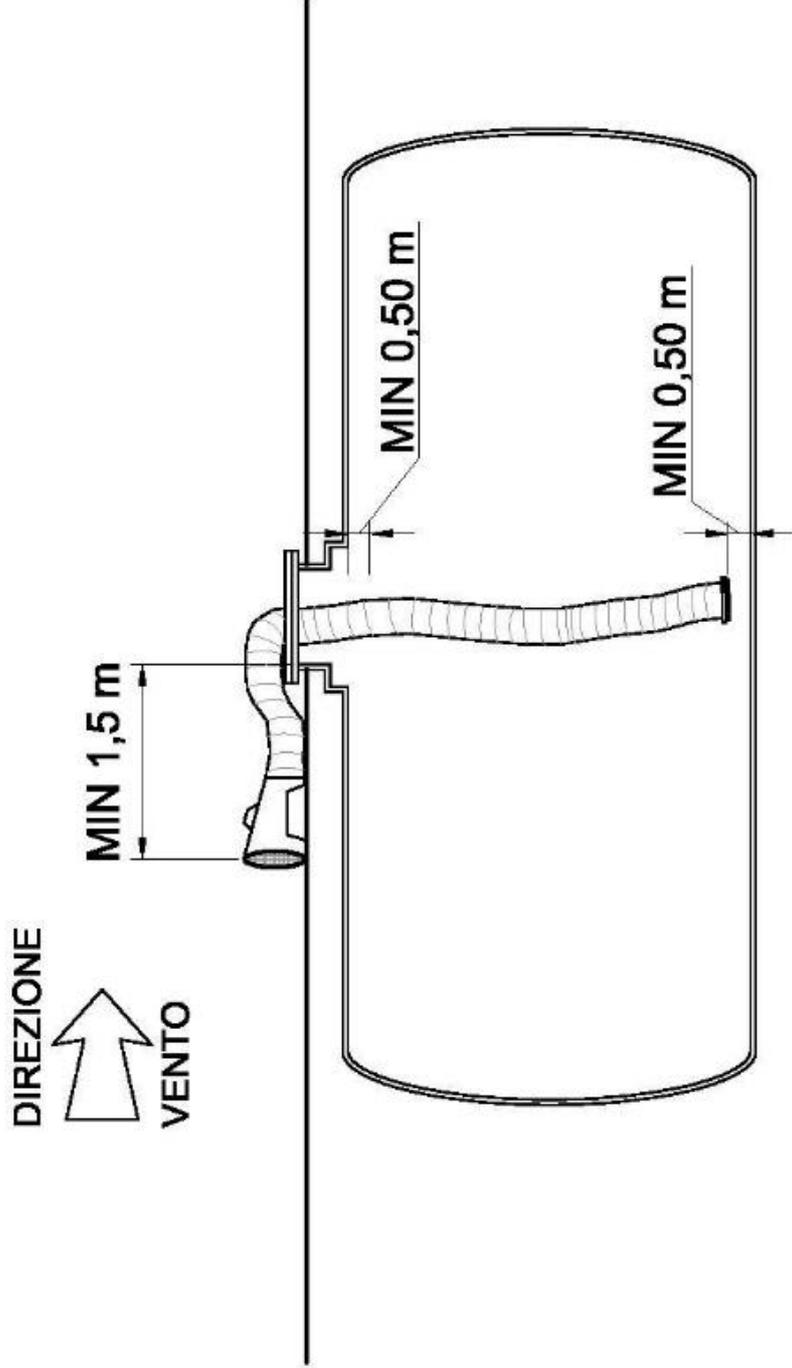


**IMMISSIONE**



**ESTRAZIONE**





# Il monitoraggio dell'atmosfera.



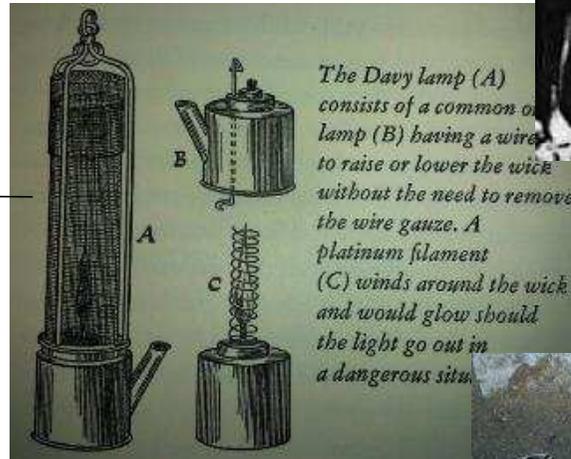
1700



1800



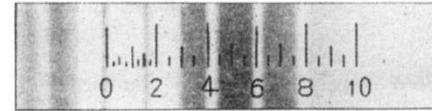
circa 1815



1850-1930



1925



1927



1935



1969

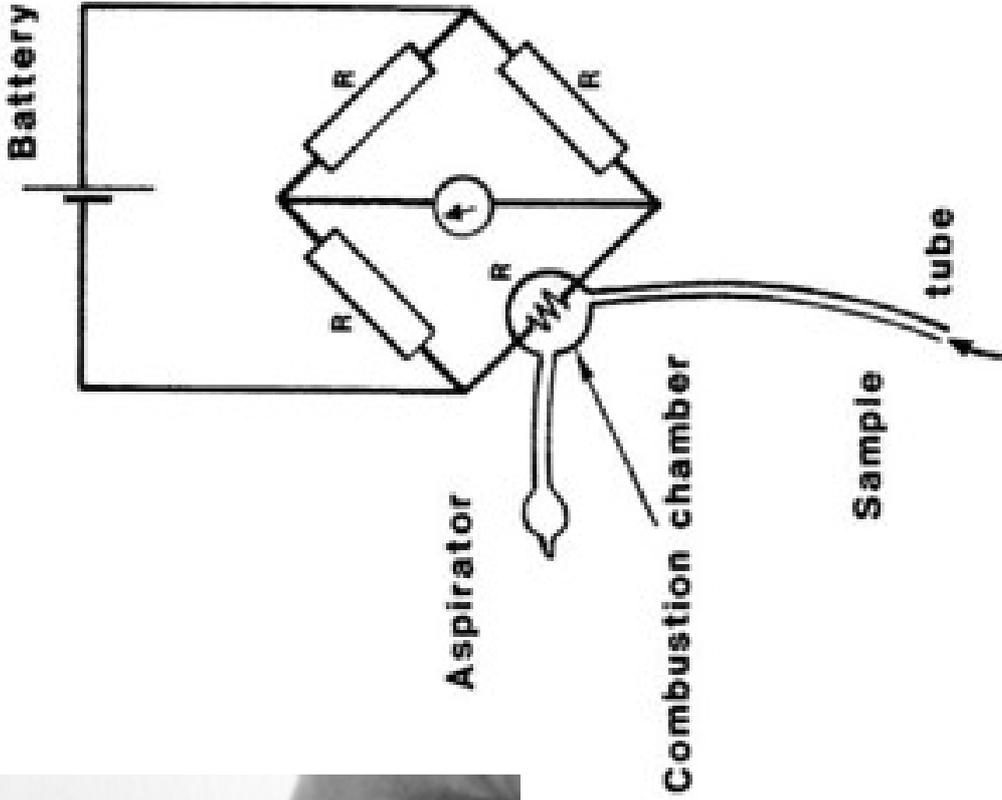
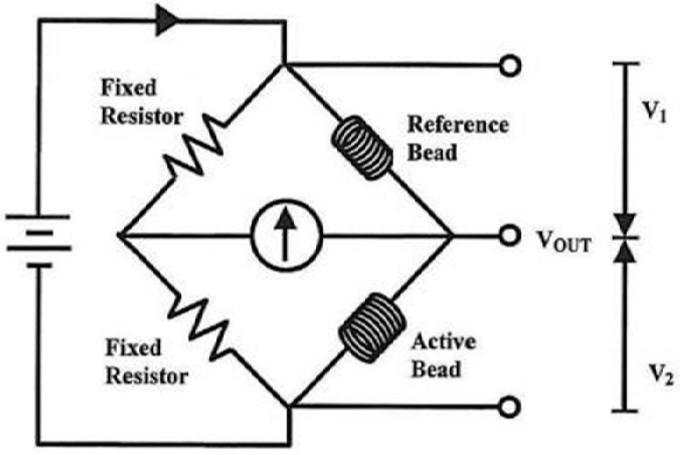
1986



Una serie di esplosioni avvenute a bordo di navi petroliere nel corso dei primi decenni del Novecento, indusse la Standard Oil Company of California, l'attuale Chevron, a finanziare la messa a punto di uno strumento che potesse risolvere definitivamente il problema della rilevazione delle atmosfere esplosive a bordo delle navi, nei terminal di stoccaggio e negli impianti di raffinazione degli idrocarburi.

Lo strumento, in grado di rilevare direttamente e indipendentemente dalla natura del gas o del vapore esplosivo, la percentuale in aria riferita al LEL, fu presentato ai dirigenti della società americana, nel 1927, da Oliver W. Johnson.





Johnson scoprì che un catalizzatore costituito da un filo di platino, inserito all'interno di una piccola capsula di materiale ceramico o comunque poroso, se opportunamente riscaldato, è in grado di ossidare gas o vapori combustibili anche quando questi sono presenti in aria in percentuali ridottissime, di molto inferiori a quelle necessarie per un'ossidazione di combustione completa in aria (percentuale corrispondente al valore del LEL).



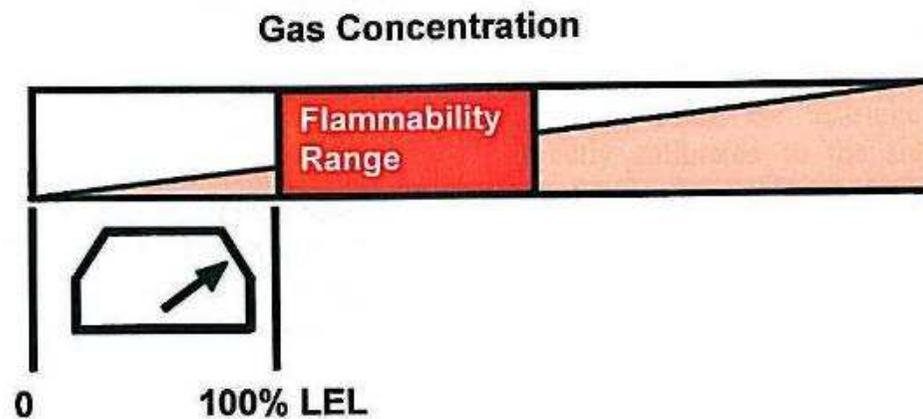
Johnson osservò anche che al crescere della percentuale del gas o del vapore combustibile in aria nell'intervallo compreso tra 0 e 100% LEL, l'incremento di temperatura sul filamento di platino, generato dalla reazione di ossidazione, si traduceva in un incremento della resistenza del conduttore di entità tale da essere facilmente misurabile.



Montando il catalizzatore su uno dei 4 rami di un ponte di Wheatstone (ramo attivo) e montando un'uguale resistenza su un secondo ramo di riferimento (ramo passivo), il cui conduttore era stato isolato in modo da non venire a contatto con il gas o vapore (cioè in modo tale da impedire che su questo ramo avvenga la reazione di ossidazione), era possibile effettuare facilmente una misurazione diretta della differenza di resistenza tra il ramo attivo e quello di riferimento



Risultava così possibile ottenere una misura che indicasse direttamente la percentuale di gas o vapore esplosivo riferita al valore del LEL in aria.



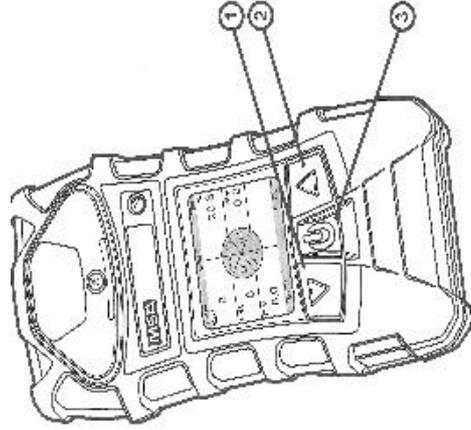
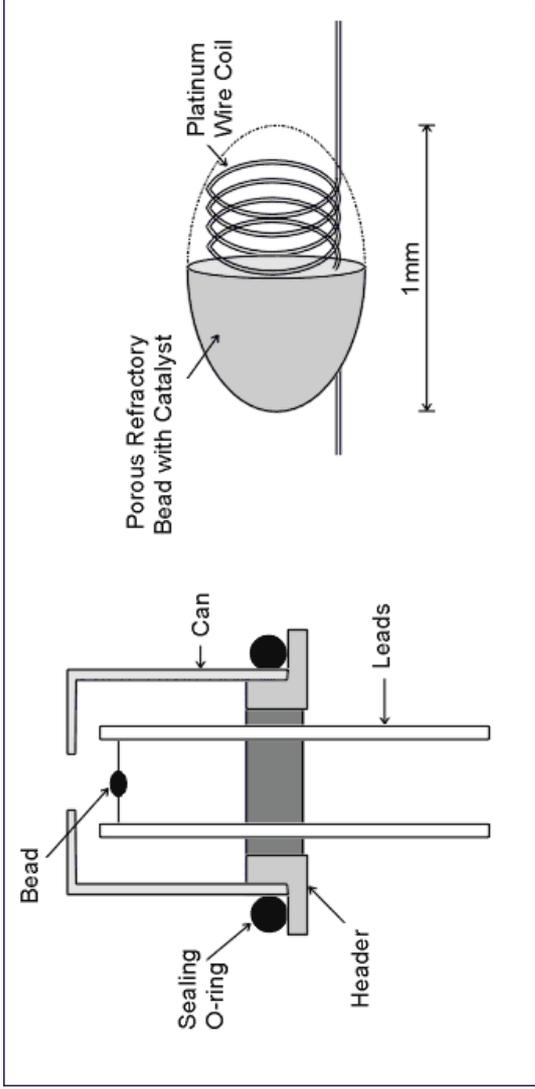
Con un siffatto dispositivo al raggiungimento di una concentrazione di gas/vapore combustibile pari al LEL si avrebbe ovviamente una combustione completa della miscela all'interno del ramo "attivo" del ponte; lo strumento venne però realizzato in modo tale che anche in questa evenienza l'effetto fortemente esotermico della reazione rimanesse confinato all'interno dell'involucro, scongiurandone la propagazione e il potenziale innesco generalizzato dell'atmosfera dell'ambiente in cui si effettuava la misura.

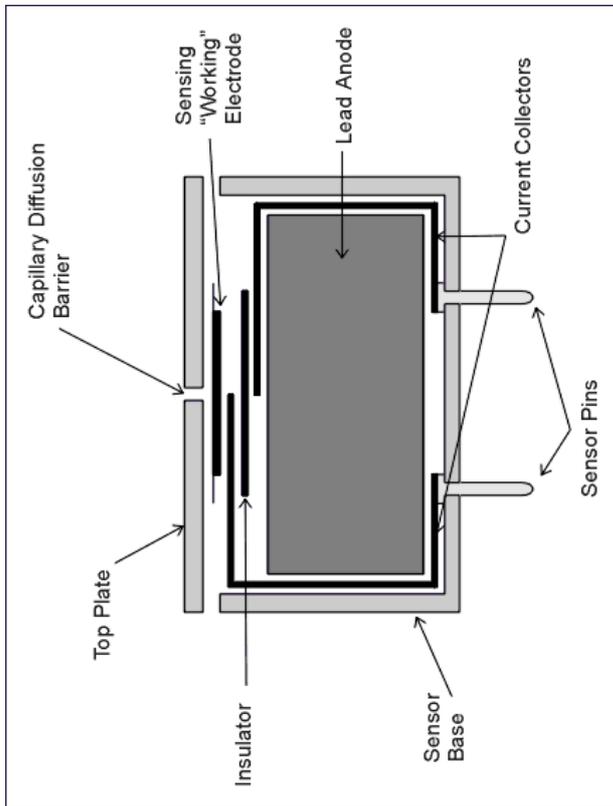
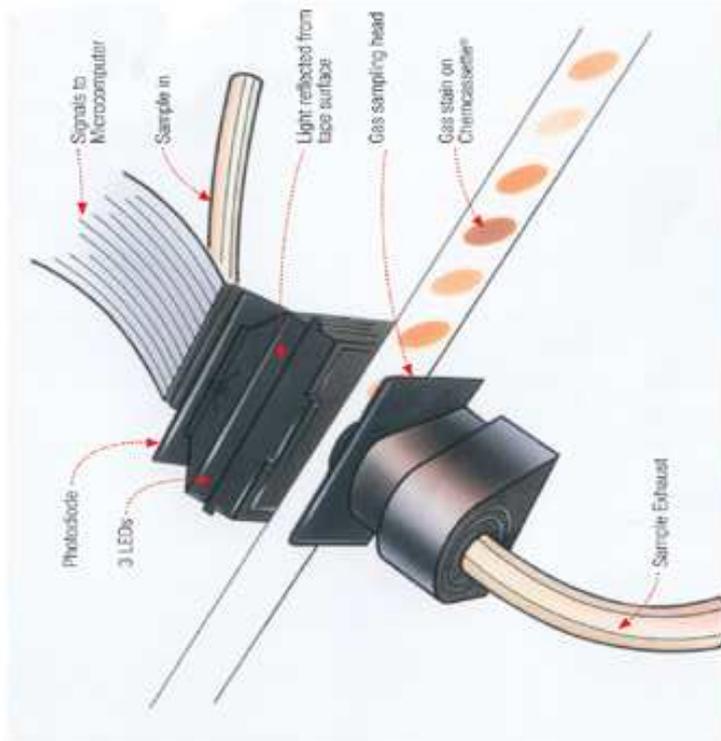


I moderni rilevatori elettronici per gas infiammabili e/o tossici possono essere classificati in sette diverse tipologie a seconda del sensore che adottano:

- Sensori catalitici
- Sensori a conducibilità termica – (catarometri)
- Rivelatori all'infrarosso (IR)
- Rivelatori a semiconduttore
- Rivelatori a fotoionizzazione (*Photo Ionization Detectors* – PID)
- Rivelatori a ionizzazione di fiamma (*Flame Ionization Detectors* – FID)
- Sensori elettrochimici

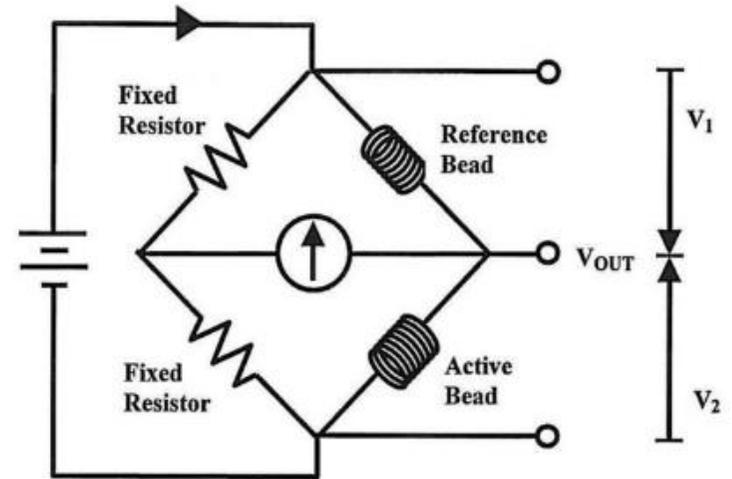






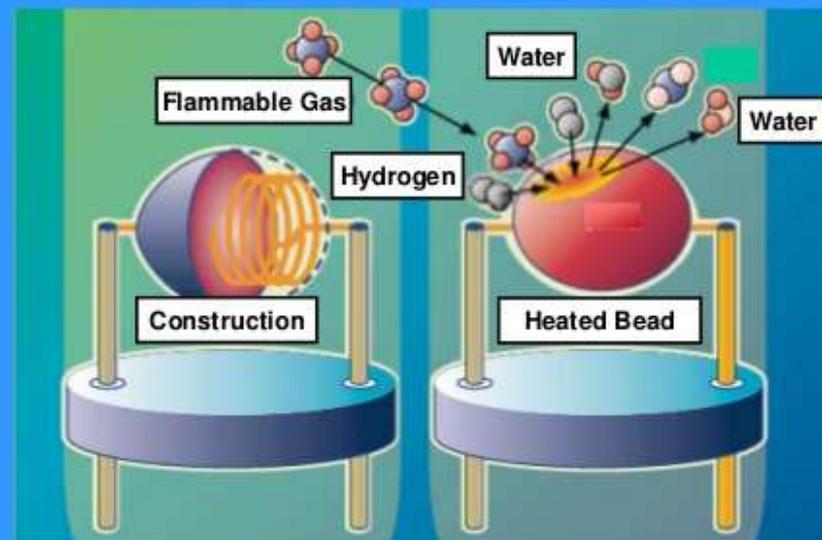
## FUNZIONAMENTO DEL SENSORE CATALITICO

Un filo di platino avvolto a spirale è ricoperto da un rivestimento poroso in grado di assorbire il gas o il vapore presente in atmosfera portandolo per diffusione a intimo contatto con il filo interno; questo rivestimento ha anche lo scopo di stabilizzare la temperatura del catalizzatore nella zona di contatto con il gas o vapore. Il filo viene riscaldato tramite una batteria fino ad una temperatura tale da consentire l'ossidazione del gas; quest'ultima ha luogo esclusivamente in presenza del catalizzatore che ovviamente non partecipa alla reazione.

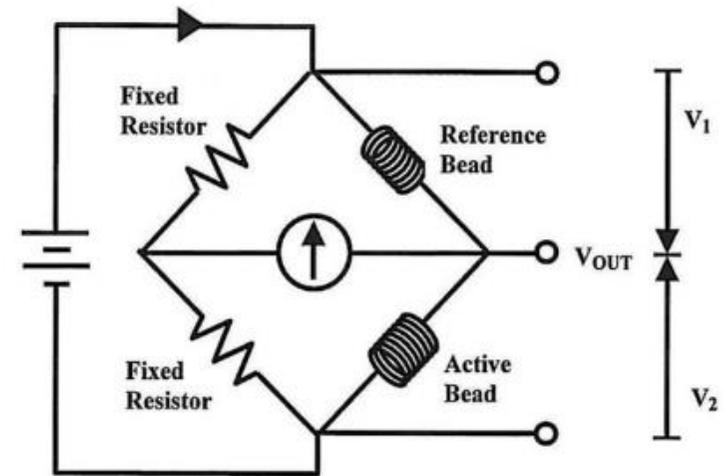


L'ossidazione del gas o del vapore a contatto con il filo riscaldato provoca un ulteriore innalzamento della temperatura del filo e di conseguenza un corrispondente aumento della resistenza (detta "attiva" o "di misura") del conduttore montata su uno dei 4 rami di un ponte di Wheatstone.

## Catalytic Bead Construction/Operation

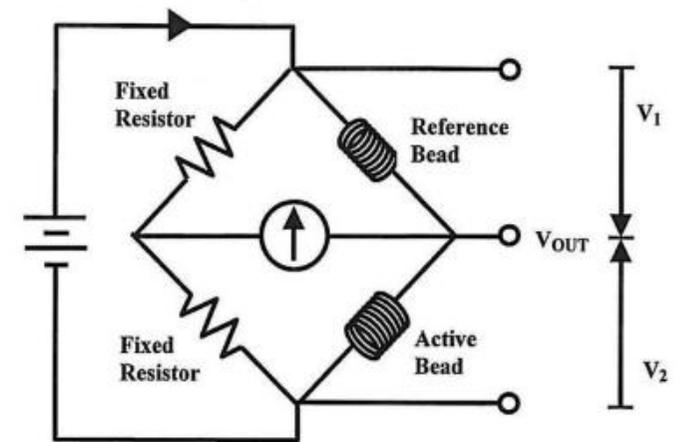


Su altri due rami vengono posizionate resistenze di valore noto, mentre sul quarto ramo viene montata una resistenza identica a quella del ramo attivo, ma configurata in modo da non entrare a contatto con il flusso del gas o vapore che si intende misurare e tale per cui non si abbia alterazione della sua temperatura e conseguentemente della sua resistenza (per questo, detta “passiva” o “di compensazione”).



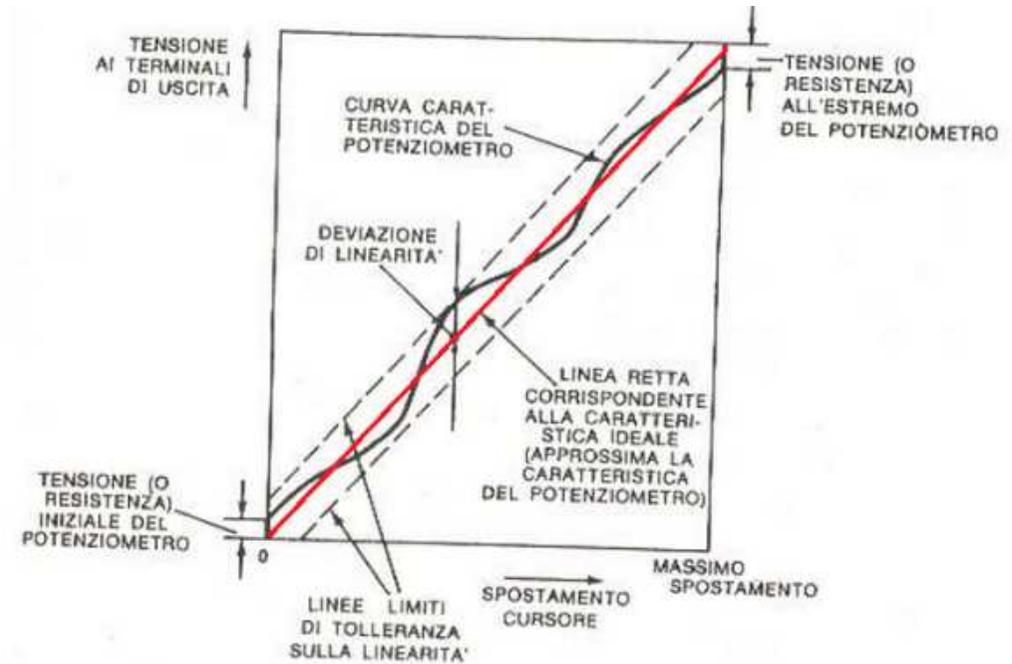
Il ramo “passivo” risulta indispensabile per bilanciare a vuoto il ponte in aria non contaminata, consentendo l’azzeramento dello strumento di misura e rendendo così la misura indipendente dall’influenza della pressione, della temperatura e della umidità atmosferica.

L’utilizzo, ancora oggi, del platino è dovuto al fatto che si tratta di un metallo che inizia a vaporizzare a temperature molto alte, superiore a quella dell’ossidazione di combustione (che inizia ad avvenire al 100% del LEL) di qualsiasi gas o vapore possa capitare di misurare.



Inoltre il platino è il materiale che più di ogni altro, è in grado di fornire una risposta lineare dell'aumento della resistenza in funzione della temperatura.

Una volta fatto fluire il gas o il vapore esplosivo attraverso il sensore, la lettura sullo strumento fornisce direttamente la % rispetto al LEL.



La temperatura che il catalizzatore deve raggiungere per consentire l'avvio dell'ossidazione è indicativamente attorno ai  $500 \div 550$  °C; il riscaldamento viene ottenuto applicando una differenza di potenziale al ponte di Wheatstone tramite una semplice batteria.



Per quanto riguarda gli esplosimetri catalitici, quanto meno quelli non di ultimissima generazione, affinché possa attivarsi l'ossidazione sul ramo attivo e sia possibile effettuare una misurazione sufficientemente corretta, è necessario che il tenore di ossigeno in aria raggiunga indicativamente il valore del 15%.

In assenza di questa condizione minima, cioè in una atmosfera che tende alla saturazione da parte del gas/vapore esplosivo, lo strumento potrebbe fornire indicazioni non corrette.



La necessità di disporre di un'atmosfera sufficientemente ossigenata non è quindi tanto relativa al restringimento del campo di infiammabilità prodotto dalla sottossigenazione, quanto alla necessità di fare avvenire correttamente l'ossidazione all'interno del sensore.

Per questo motivo tutti i moderni esplosimetri sono integrati da un misuratore del tenore di ossigeno (con tecnologia *fuel-cell*) in grado di segnalare immediatamente una eventuale sottossigenazione ambientale.



La *fuel-cell* o cella elettrochimica può essere descritta come un elemento elettrolitico che produce corrente proporzionalmente alla quantità di ossigeno che l'attraversa. La **misurazione diretta della corrente prodotta** può essere facilmente convertita nella percentuale di ossigeno presente in aria.

Basandosi sullo stesso principio è possibile realizzare celle elettrochimiche specializzate in grado di misurare la concentrazione in atmosfera di centinaia di altre sostanze.



Occorre però prestare attenzione al fatto che con questa tecnologia la corrente prodotta (e quindi la misurazione) è fortemente influenzata dalla temperatura, dall'umidità ambientale e dalla pressione barometrica; gli strumenti moderni sono comunque generalmente in grado di effettuare automaticamente una compensazione della misura tenendo conto della variabilità di tutti questi fattori.



Tutti gli strumenti che si basano sul principio della cella elettrochimica manifestano in generale un'elevata sensibilità a eventuali danneggiamenti dei sensori; in questi casi possono facilmente verificarsi difetti di diffusione del gas all'interno della cella tali da falsare le misurazioni.

Gli elettroliti di ultima generazione, a base di gel, hanno consentito di minimizzare sensibilmente gli errori di misura correlati alle basse temperature e ad altri fattori devianti.



Sia gli esplosimetri catalitici che gli analizzatori a cella elettrochimica sono inoltre soggetti a potenziale degrado dei sensori in caso di esposizione a particolari atmosfere; in questi casi si hanno frequentemente misurazioni non corrette.

Ciò dipende dal fatto che alcune sostanze possono accumularsi sul sensore, in un tempo più o meno breve, dando luogo ad un fenomeno di **avvelenamento acuto** o di invecchiamento progressivo irreversibile.



Per quanto riguarda le celle elettrochimiche possono risultare degradanti esposizioni a gas inerti, ad atmosfere corrosive o contenenti alte concentrazioni di gas o vapori esplosivi.

Ad esempio, il metanolo è in grado di avvelenare irreversibilmente i sensori del CO e dell'H<sub>2</sub>S.



Nel caso dei sensori catalitici sono possibili avvelenamenti da parte di composti siliconici, piombo, solventi a base di cloro, solfati e fosfati.

Polvere, acqua e atmosfere saline possono costituire ulteriori cause di danneggiamento; esposizioni prolungate a concentrazioni di molto superiori al 100% del LEL di una qualsiasi sostanza possono inoltre favorire il deposito di residui carboniosi sulla resistenza di misura.



La presenza in atmosfera di composti alogenati o di  $H_2S$  (entro certi limiti di concentrazione) può invece dare luogo ad inibizioni temporanee del sensore; in questo caso la ripresa della corretta funzionalità dello strumento avviene solitamente lasciando lo strumento esposto all'aria pura per periodi di tempo di 24 ÷ 48 ore.

L'esposizione ad una concentrazione di  $H_2S$  molto elevata può invece dar luogo, ancora una volta, ad un vero e proprio avvelenamento irreversibile.



In generale il grande vantaggio degli esplosimetri catalitici resta tutt'oggi quello di poter effettuare letture riferite direttamente a una percentuale del LEL anziché ad una concentrazione in valore assoluto del gas o del vapore in aria.

In quest'ultimo caso occorrerebbe infatti conoscere con esattezza quale gas o vapore si deve misurare per poter trasformare il risultato ottenuto in una percentuale rispetto al LEL.

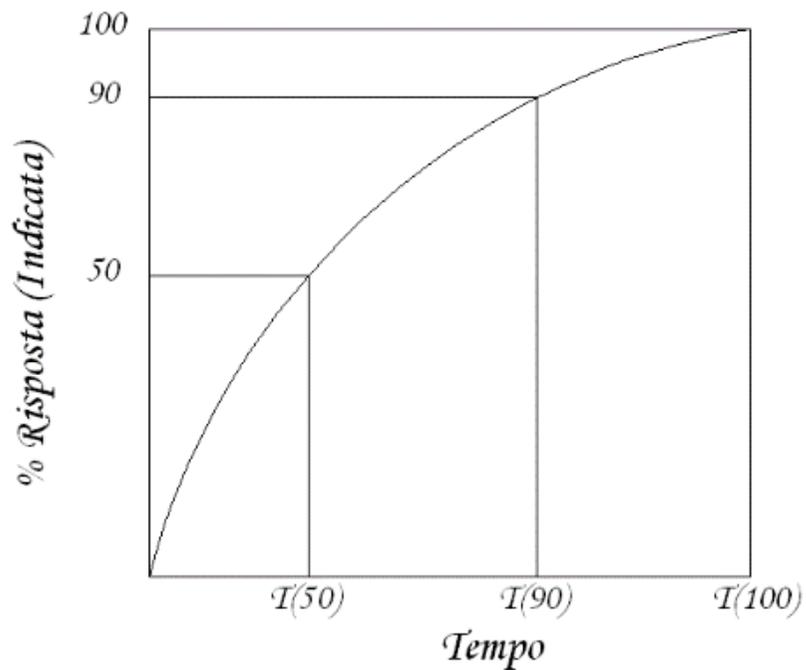


Facciamo un esempio per chiarire meglio il concetto:

Ipotizziamo che la misurazione assoluta effettuata indichi un valore pari a 1,3 % di gas o vapore in volume; questo valore assume un differente significato in funzione del tipo di gas; se si trattasse di cicloesano, il cui LEL è pari a 1,2%, questo valore (1,3% in volume) corrisponderebbe ad oltre il 100% del LEL, mentre se si trattasse di monossido di carbonio, il cui LEL è pari al 12,5%, corrisponderebbe al 10% circa del LEL.



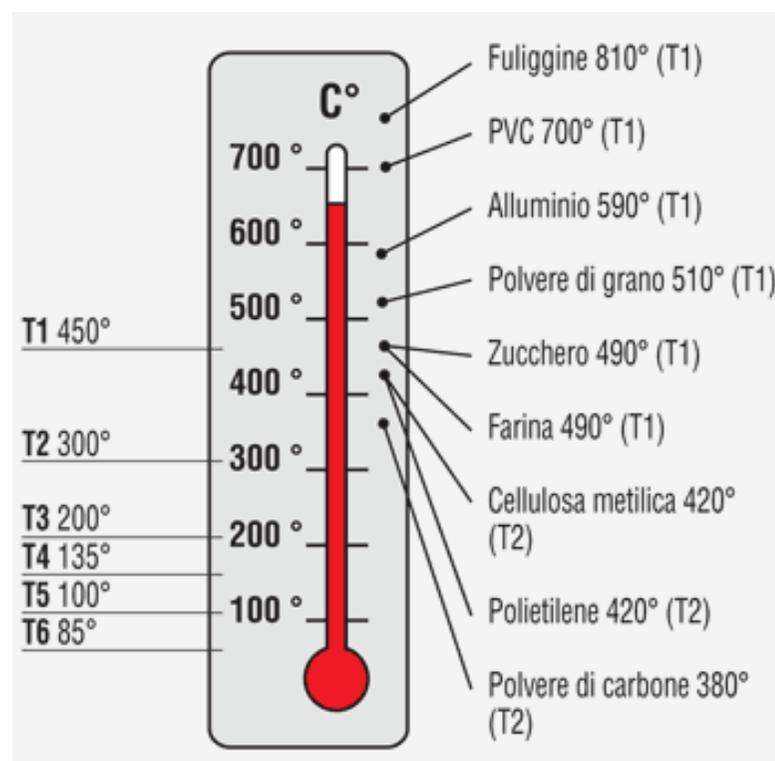
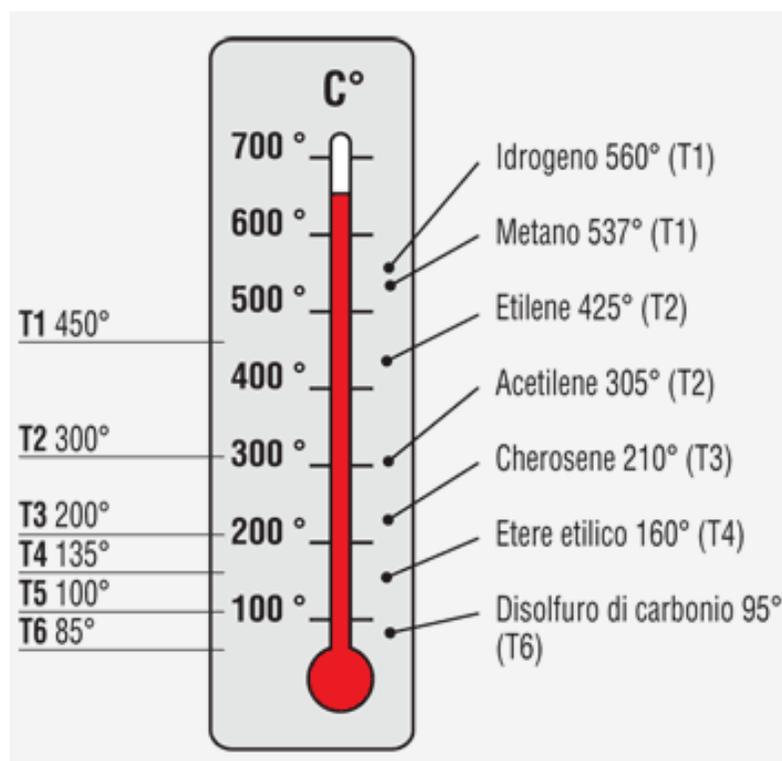
Particolare attenzione deve essere prestata ai tempi di risposta dello strumento che non sono mai istantanei soprattutto quando si utilizzino prolunghe per l'aspirazione del gas.



Un ulteriore problema, possibile fonte di errate letture (falsi positivi falsi negativi), è dato dalle possibili cross-reazioni originate da più gas presenti contemporaneamente all'interno di un medesimo ambiente.



A seconda della tipologia di gas/vapore da misurare e in particolare della relativa temperatura di autoaccensione i gas detector vengono comunque omologati in differenti classi di utilizzo.



Un ultimo cenno va rivolto al problema della calibrazione periodica dei sensori catalitici.

La soluzione ottimale sarebbe quella di effettuare sempre la calibrazione con il medesimo gas che dovrà essere monitorato ma, nel caso in cui si debba utilizzare l'analizzatore per la rilevazione di atmosfere esplosive non note, ciò è evidentemente impossibile.

In generale la calibrazione viene quindi effettuata utilizzando un gas campione che possa rappresentare un compromesso nei confronti del più ampio numero di gas: questo gas di calibrazione è frequentemente costituito da metano, pentano o propano o meglio da miscele a base di questi gas.



Questi tre gas (ma oggi se ne utilizzano anche altri diversi da questi) hanno ovviamente caratteristiche differenti in termini di esattezza di calibrazione nei confronti dei gas o delle miscele di gas che poi dovranno essere misurate.

Tutti i produttori di esplosimetri forniscono tabelle riportanti i coefficienti di correzione che, dato un certo gas di calibrazione e noto il gas/vapore presente nell'atmosfera (aria) in cui viene utilizzato l'analizzatore, consentono di tramutare il valore di lettura nella effettiva concentrazione (assoluta o rispetto al LEL) del gas/vapore in aria.

I fattori di correzione più frequenti sono compresi tra 0,5 e 2; ciò significa che una lettura pari al 50% del LEL potrebbe in realtà corrispondere, per alcuni tipi di atmosfera, ad un valore effettivo del 25% del LEL, mentre per altre atmosfere la medesima lettura potrebbe corrispondere al 100% del LEL.



Nel caso in cui l'esplosimetro, come frequentemente accade, venga utilizzato per la misurazione di atmosfere con diversa composizione, si dovrà ricercare un gas di calibrazione che fornisca per tutti i possibili gas/vapori curve di risposta il più possibile lineari nell'intervallo  $0 \div 100\%$  del LEL e il più possibile vicine in valore assoluto alla reale concentrazione del gas/vapore in atmosfera.

Pur disponendo della strumentazione di misura più idonea e pur provvedendo a calibrarla nel modo più rigoroso, quando non si conosce il gas/vapore che si sta monitorando occorre procedere nel modo più cautelativo: in sostanza occorre adottare un limite di accettabilità che sia il più basso possibile.



Tra i casi in cui si verifica uno degli scostamenti più elevati, vi è probabilmente quello della rilevazione della concentrazione in aria del toluene effettuata con un analizzatore calibrato con gas metano.

Il fattore di correzione è in questo caso all'incirca pari a 3, il che comporta che una misura del 20% del LEL corrisponde in realtà ad una concentrazione effettiva del toluene in atmosfera pari al 60% del LEL.



Da queste considerazioni discende il principio adottato da quasi tutti gli standard e linee guida internazionali di fissare il limite al **10% del LEL** in modo da compensare l'errore intrinseco di taratura.

L'adozione di un valore limite così cautelativo per quanto riguarda l'esplosività dell'atmosfera permette inoltre di compensare anche altre anomalie di misura; tra queste le fluttuazioni di concentrazione dovute a ingressi o desorbimenti improvvisi del gas/vapore, dovute alle cortocircuitazioni nella ventilazione oppure alle sacche di accumulo dovute ad elevate differenze di densità tra gas/vapori e aria, nonché la inevitabile non linearità della misura nell'intervallo 0 ÷ 100% del LEL.



Per molto tempo, tra i gas più frequentemente utilizzati per la calibrazione degli esplosimetri vi sono state le miscele pentano-aria e in particolare miscele caratterizzate da una concentrazione del pentano pari al 50% del LEL, in ragione del fatto che questa composizione assicura, per una ampia gamma di gas/vapori, il più basso scostamento di misura.

Una esposizione del sensore ad una concentrazione di vapori o gas esplosivi superiore al 100% del LEL e/o una carenza di ossigeno nell'atmosfera può danneggiare irreversibilmente l'apparecchiatura a causa dell'accumulo di nero fumo sul catalizzatore; oltre a ciò tutti i sensori catalitici sono soggetti a un invecchiamento costante nel tempo causato dall'accumulo di infinitesime quantità di sostanze avvelenanti.



Entrambi questi fenomeni inducono ad una progressiva desensibilizzazione che si manifesta, per prima, nei confronti delle atmosfere contenenti metano, la cui concentrazione in aria non viene quindi più misurata correttamente. questa desensibilizzazione del catalizzatore non si verifica però nei confronti di miscele contenenti altri gas quali, ad esempio, proprio il pentano.



Accade quindi che, utilizzando quest'ultimo gas per la calibrazione del sensore, potrebbero non rivelarsi gli effetti dell'avvelenamento; tali difetti potrebbero infatti evidenziarsi esclusivamente utilizzando miscele a base di metano che, per contro, generano errori di calibrazione notevolmente superiori rispetto al pentano.

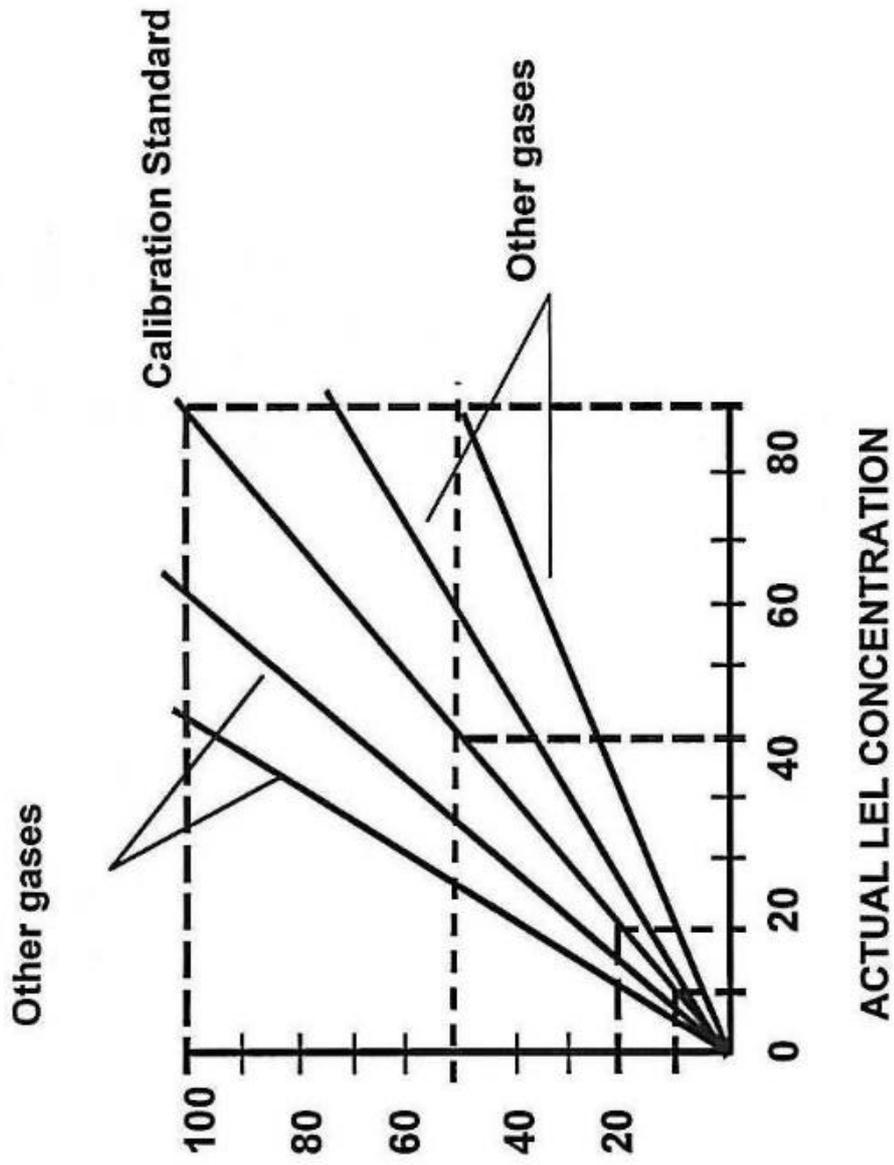
Per questo motivo sono state messe a punto miscele, cosiddette "pentano-equivalenti", che, pur essendo a base di metano, si avvicinano come precisione di calibrazione al pentano eliminando però la problematica dell'insensibilità a fenomeni di avvelenamento del sensore.



Per fare un esempio, se la sensibilità relativa tra metano (gas di calibrazione) e l'etanolo (gas in corso di campionamento) è 0,8, ciò significa che il fattore correttivo è pari a  $1/0,8 = 1,25$ ; questo comporta che se la lettura che appare sul display dello strumento è 10% LEL la concentrazione effettiva in atmosfera è effettivamente pari al 12,5% del LEL.

Nel caso della calibrazione con propano la sensibilità relativa tra propano e etanolo è indicata con il valore di 1,2 e di conseguenza il fattore correttivo per l'etanolo diviene 0,83, in questo caso una lettura sul display di 10% LEL corrisponde ad un valore effettivo di 8,3% del LEL.





## LE FIALE COLORIMETRICHE

Esistono anche dispositivi di misurazione di tipo chimico che utilizzano fiale (“detector tubes”) saturate con un reagente granulare che se messo a contatto con una atmosfera contenente un determinato gas contaminante è in grado di variare il proprio colore (per questo motivo la tecnica di misura viene anche detta a “fiale colorimetriche”).

Si tratta di un sistema che risale agli anni Venti del secolo scorso e ancora diffuso; originariamente fu brevettato negli USA da A.B. Lamb e C.R. Hoover per la rilevazione (solo qualitativa e non ancora quantitativa) del monossido di carbonio utilizzando come reagente pomice impregnata di acido solforico e pentossido di iodio.



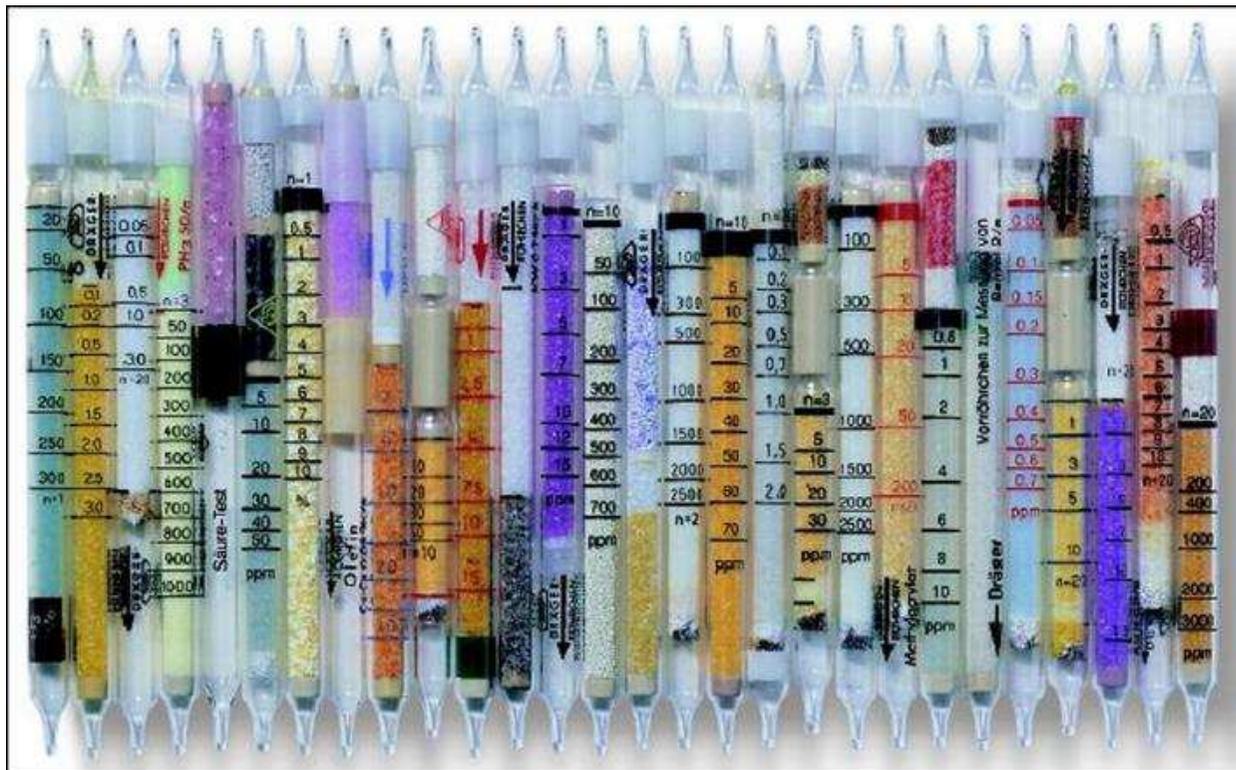
La fiala, della lunghezza di una quindicina di centimetri e del diametro di circa 20 mm, una volta fratturata alle estremità va innestata su un'apposita pompa (manuale o automatica) che consente di aspirare una quantità calibrata, generalmente un volume pari a 50 ml o 100 ml, dell'atmosfera contenente il gas di cui si deve misurare la concentrazione; molte pompe sono predisposte per montare sonde di lunghezza anche fino a 30 metri. Con l'impiego di prolunghe è possibile determinare anche concentrazioni di gas e vapori molto caldi grazie al raffreddamento che essi subiscono durante il transito all'interno della sonda.



Al crescere della concentrazione il reagente vira il proprio colore per un tratto di lunghezza via via crescente. La lettura diretta su una scala graduata riportata sulla fiala stessa fornisce la concentrazione in aria del contaminante in ppm.



Con il sistema a fiale è oggi possibile misurare la concentrazione in atmosfera di oltre 500 differenti sostanze.



# QUANDO EFFETTUARE IL MONITORAGGIO?

## NFPA 326

- antecedentemente al primo ingresso (anche se effettuato ai soli fini di un'ispezione visiva o per effettuare una disenergizzazione) e all'atto di ogni ingresso successivo ad eventuali pause lavorative;
- antecedentemente all'inizio di qualsiasi tipo di attività operativa all'interno dell'ambiente confinato;
- prima e durante qualsiasi operazione con utilizzo di fiamme libere (saldatura, taglio, riscaldamento, ecc.);
- frequentemente durante la permanenza all'interno dell'ambiente;
- successivamente a qualsiasi attività di pulizia o rimozione di sostanze presenti all'interno dell'ambiente in modo da verificare l'efficacia delle azioni eseguite;
- a seguito dell'inizio di qualsiasi tipo di attività svolta all'interno dell'ambiente che possa potenzialmente essere responsabile di una variazione dei parametri atmosferici.





Occorre, per quanto possibile, evitare di entrare negli ambienti confinati o non ventilati.



## Alcuni suggerimenti per la ricerca di sostanze pericolose occulte.

- **stirene**: se vi è presenza di tubazioni, rivestimenti o altri manufatti realizzati in fibra di vetro;
- **sostanze sensibilizzanti**: se sono state effettuate in tempi recenti pitturazioni, coibentazioni, ecc. con prodotti contenenti isocianati o poliuretani;
- **monossido di carbonio**: se sono presenti in ambiente non ventilato motori endotermici o vi transitano collettori di scarico dei gas di combustione;
- **vapori di solventi**: se sono stati utilizzati sgrassanti e detergenti per la pulizia;
- **idrogeno solforato**: se all'interno o nelle vicinanze sono presenti tubazioni o scarichi di condotte fognarie o di depuratori oppure vi siano terreni inquinati da materiali organici;
- **metano**: quando si rilevano le stesse condizioni del punto precedente oppure vi siano infiltrazioni di acqua di falda e il territorio sia riconosciuto metanifero;
- **radon**: nel caso di scavi o ambienti sotterranei, quando sia nota la presenza di questo gas nel territorio;
- **anidride carbonica**: se all'interno dell'ambiente sono presenti residui solidi di materiali organici fermentabili;
- **benzene o idrocarburi**: se si è in presenza di terreno contaminato da sversamenti accidentali, anche relativamente distanti dall'ambiente confinato e/o avvenuti a distanza di tempo.



## DOVE EFFETTUARE IL MONITORAGGIO?

- in corrispondenza di tutte le compartimentazioni verticali e orizzontali dell'ambiente;
- all'interno delle intercapedini, in caso di doppie pareti o isolamenti;
- in corrispondenza di tutte le zone di sigillatura;
- all'interno di eventuali sentine o doppi fondi;
- in prossimità di tutte le zone in cui sono presenti tubazioni di adduzione o scarico di liquidi, gas, vapori;
- in corrispondenza di tutte le aperture verso altri ambienti siano essi passi d'uomo, drenaggi, sfoghi d'aria, ecc..



