



DECOMMISSIONING CIVILE E INDUSTRIALE

INGEGNERIA CIVILE - AMBIENTALE
A.A. 2019 - 2020

eRWorx.



DE Department of
Engineering
Ferrara

**ELEMENTI DI FISIOLOGIA
RESPIRATORIA E TOSSICOLOGIA -
LE ATMOSFERE TOSSICHE,
ESPLOSIVE E INERTI**



DE Department of
Engineering
Ferrara

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 o, per esposizioni di breve durata, ai TLV-STEL 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 (LEL);
- 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 ($30 \div 300$ 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).

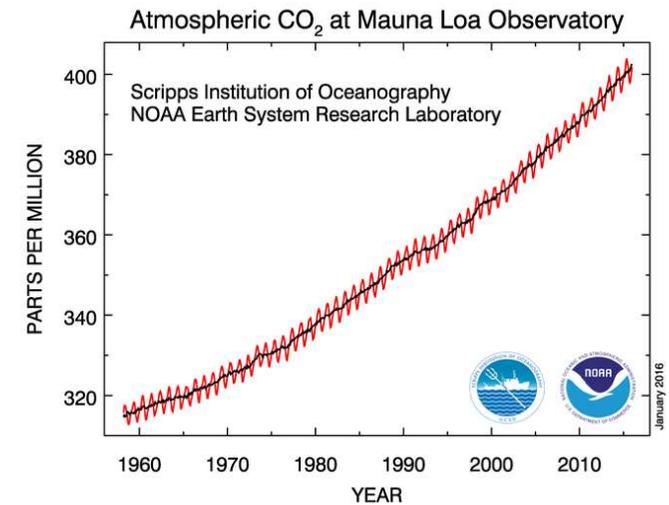
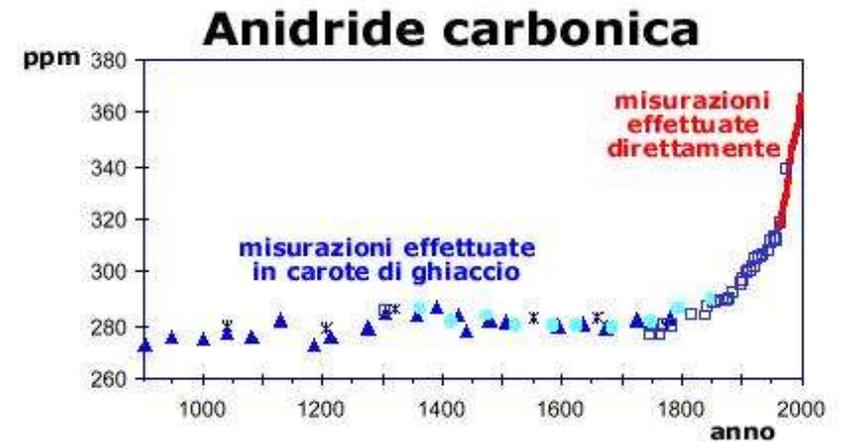


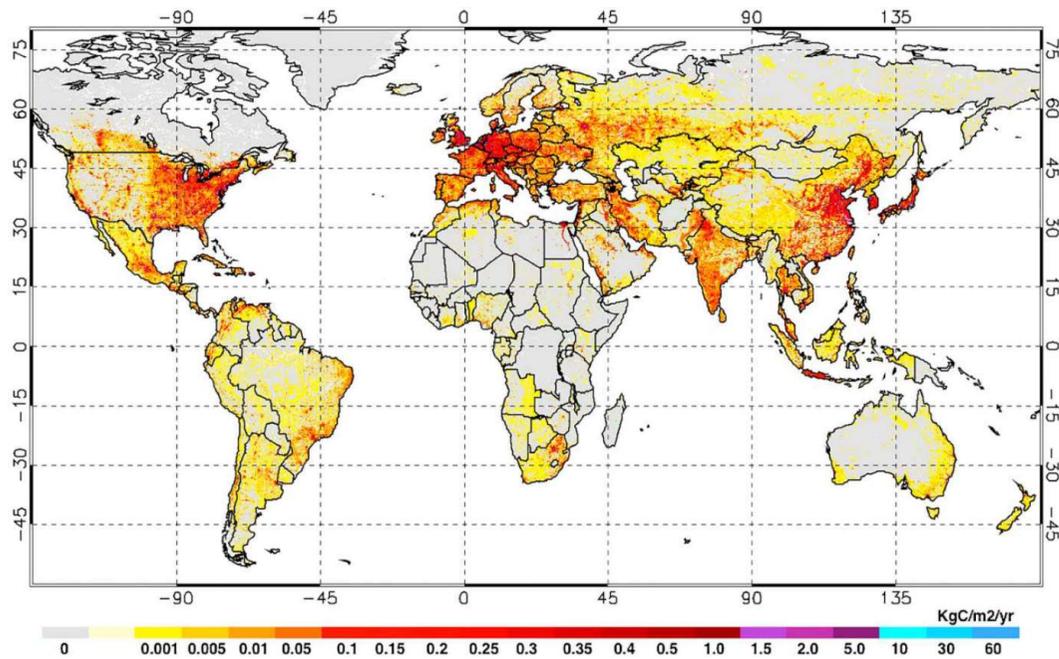
La **tossicità o la esplosività** di una atmosfera, possono derivare dalla presenza di gas di vario genere presenti nel sito, dalla vaporizzazione di un liquido o dalla sublimazione di una sostanza solida presente all'interno di un ambiente confinato o scarsamente ventilato.



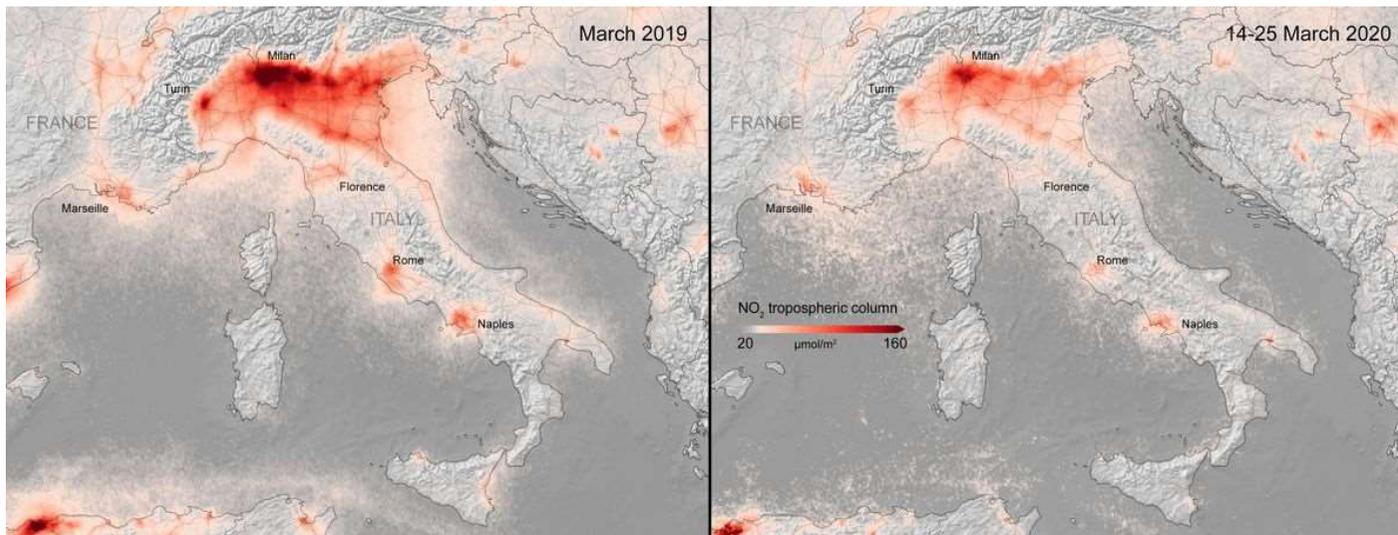
L'aria che respiriamo.

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





Distribuzione CO₂ a livello globale (a sn.); variazione distribuzione NO_x in Italia tra 03.2019 e 03.2020



DE Department of Engineering Ferrara

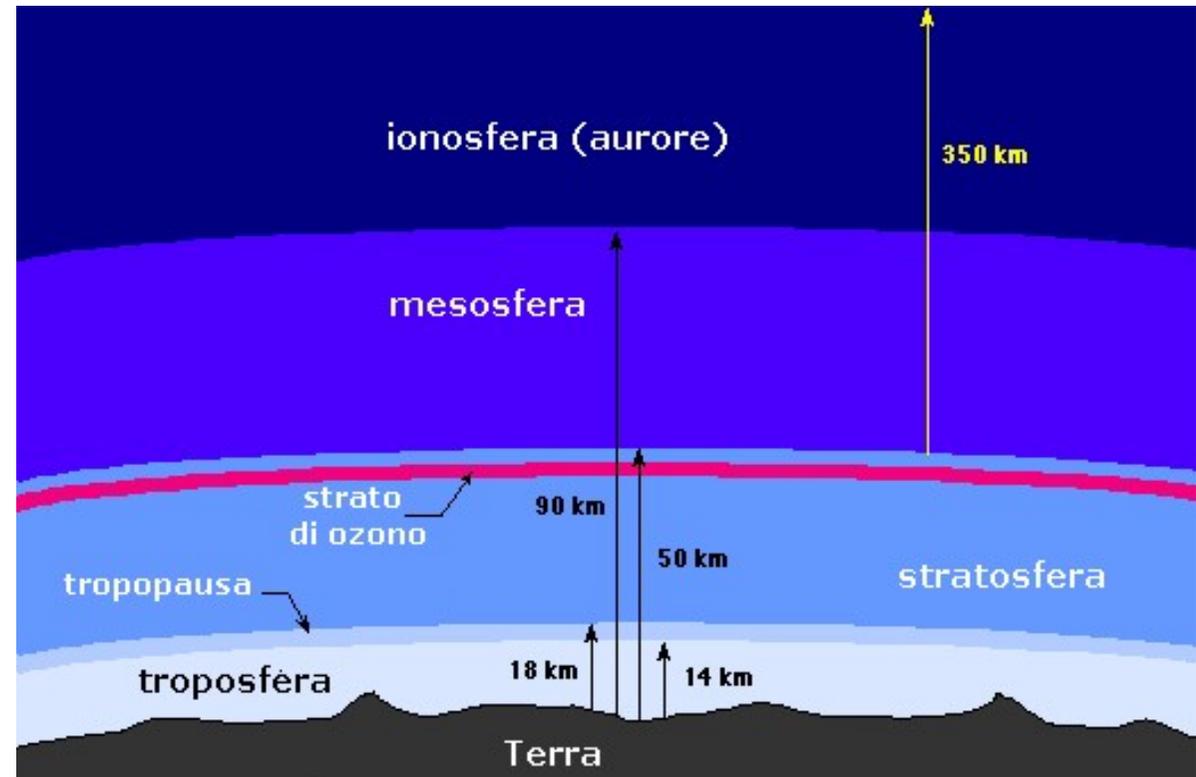
RISCHIO DI ASFISSIA (IPOSSIA)

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

O ₂ (%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 una calo della % in volume.



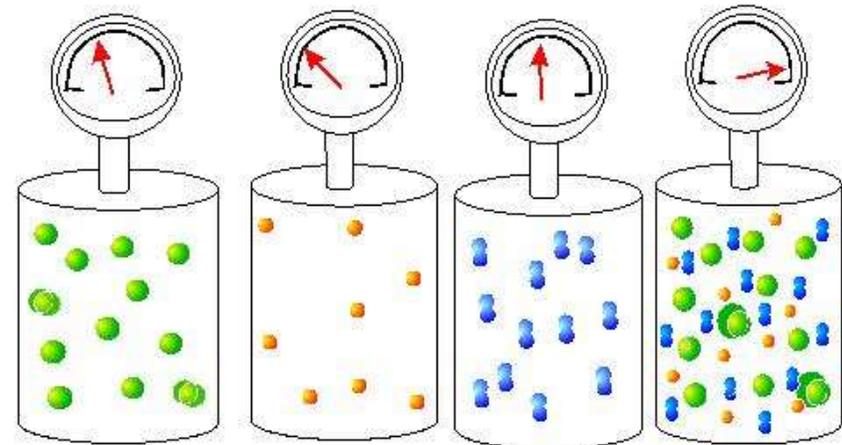
In fisica e in chimica, la **legge delle pressioni parziali di DALTON** è la legge che afferma che:

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)

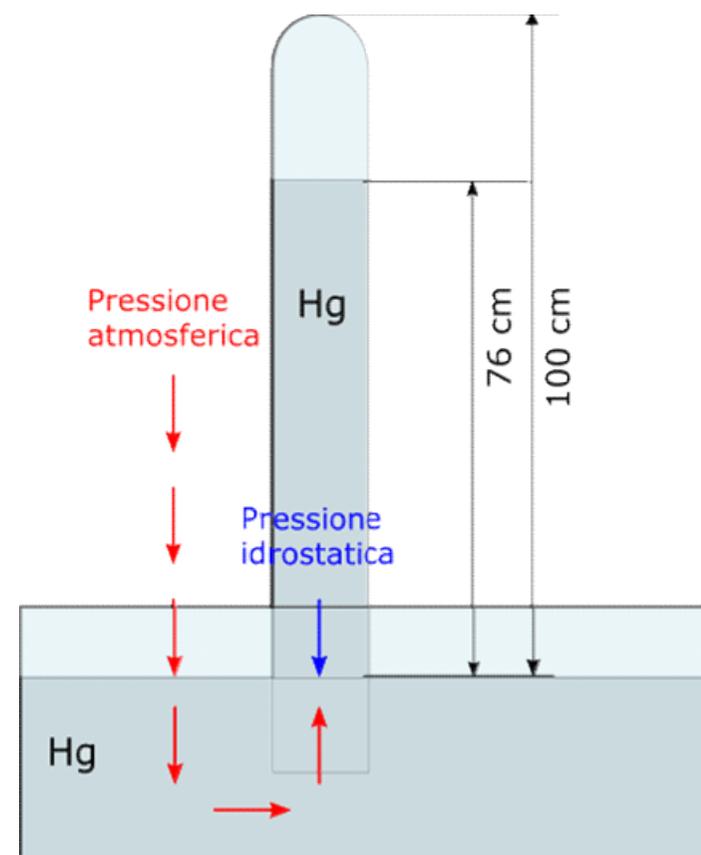
In una miscela di gas, la pressione e' la somma delle pressioni parziali.

- le molecole di ciascun gas si comportano indipendentemente



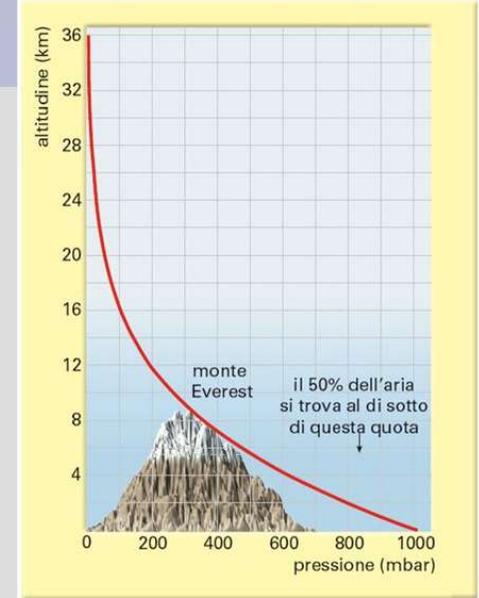
Unità di pressione e fattori di conversione

	Pa	bar (daN/cm ²)	MPa (N/mm ²)	kg _f /m ²	at (kg _f /cm ²)	atm	torr (mmHg)
Pa	1	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	0,102	0,102 × 10 ⁻⁴	9,87 × 10 ⁻⁶	0,0075
bar	10 ⁵	1	0,1	10 200	1,02	0,987	750
MPa	10 ⁶	10	1	1,02 × 10 ⁵	10,2	9,87	7 501
kg _f /m ²	9,81	9,81 × 10 ⁻⁵	9,81 × 10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	0,968 × 10 ⁻⁴	0,0736
at	98 100	0,981	0,0981	10 000	1	0,968	736
atm	101 325	1,013	0,1013	10 330	1,033	1	760
torr (mmHg)	133	0,00133	1,33 × 10 ⁻⁴	13,6	0,00136	0,00132	1



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 (± 30 alle ns. latitudini);
- VARIAZIONE IRREGOLARE DOVUTE ALL'UMIDITA' E ALLA TEMPERATURA (± 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 PpO_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
Altitudine (m)	0 ÷ 1800	1800 ÷ 3000	3000 ÷ 5500	5500 ÷ 9000
Pressione atmosferica (mmHg)	760 ÷ 611	611 ÷ 525	525 ÷ 379	379 ÷ 231
% O₂ equivalente a 0 m slm	20,9 ÷ 16,9	16,9 ÷ 14,5	14,5 ÷ 10,5	10,5 ÷ 6,3



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).

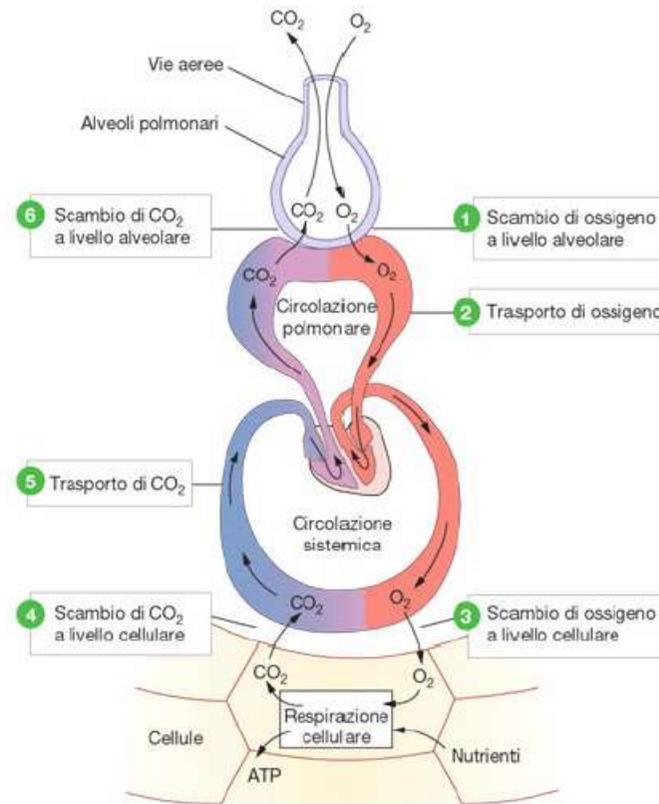
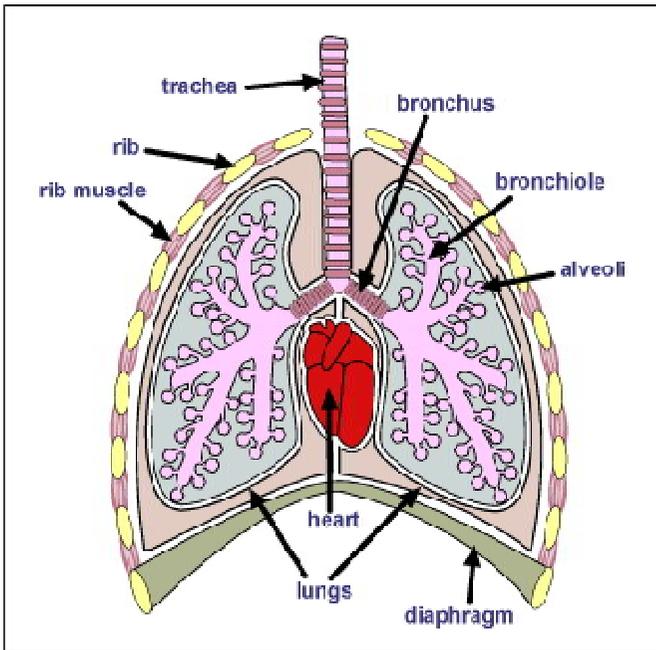


L'apparato preposto alla respirazione esterna è costituito da un sistema complesso che dalla bocca e dal naso giunge ai polmoni; la respirazione esterna ha la funzione di scambiare gas fra organismo e ambiente esterno ed in particolare assorbire ossigeno dall'ambiente e riemettendo CO₂.



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.

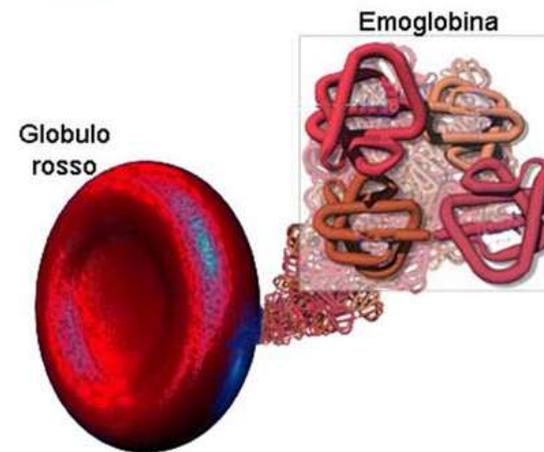
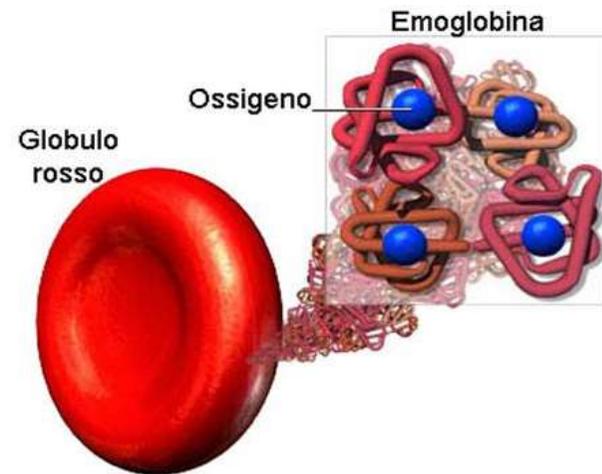
Il contrario avviene per l'anidride carbonica (CO_2) che dal sangue, attraversando la stessa interfaccia, si riversa negli alveoli da cui verrà espulsa all'esterno con l'atto espiratorio.



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.

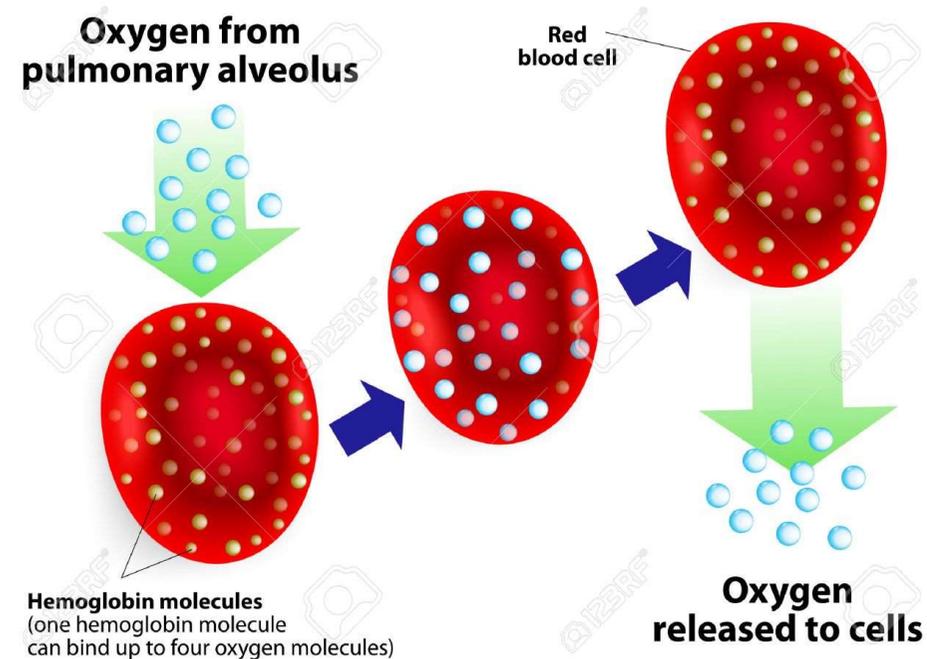


La funzione di questa particolare molecola è giustificata dal fatto che la limitata solubilità dell'ossigeno nella componente acquosa del sangue non consentirebbe da sola il trasporto di una sufficiente quantità di ossigeno fino ai vari tessuti periferici.



DE Department of
Engineering
Ferrara

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-O₂)**; essa si trasforma in **deossi-emoglobina** una volta che questa rilascia ai tessuti l'ossigeno e in **carbodiossi-emoglobina (Hb-CO₂)** 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.



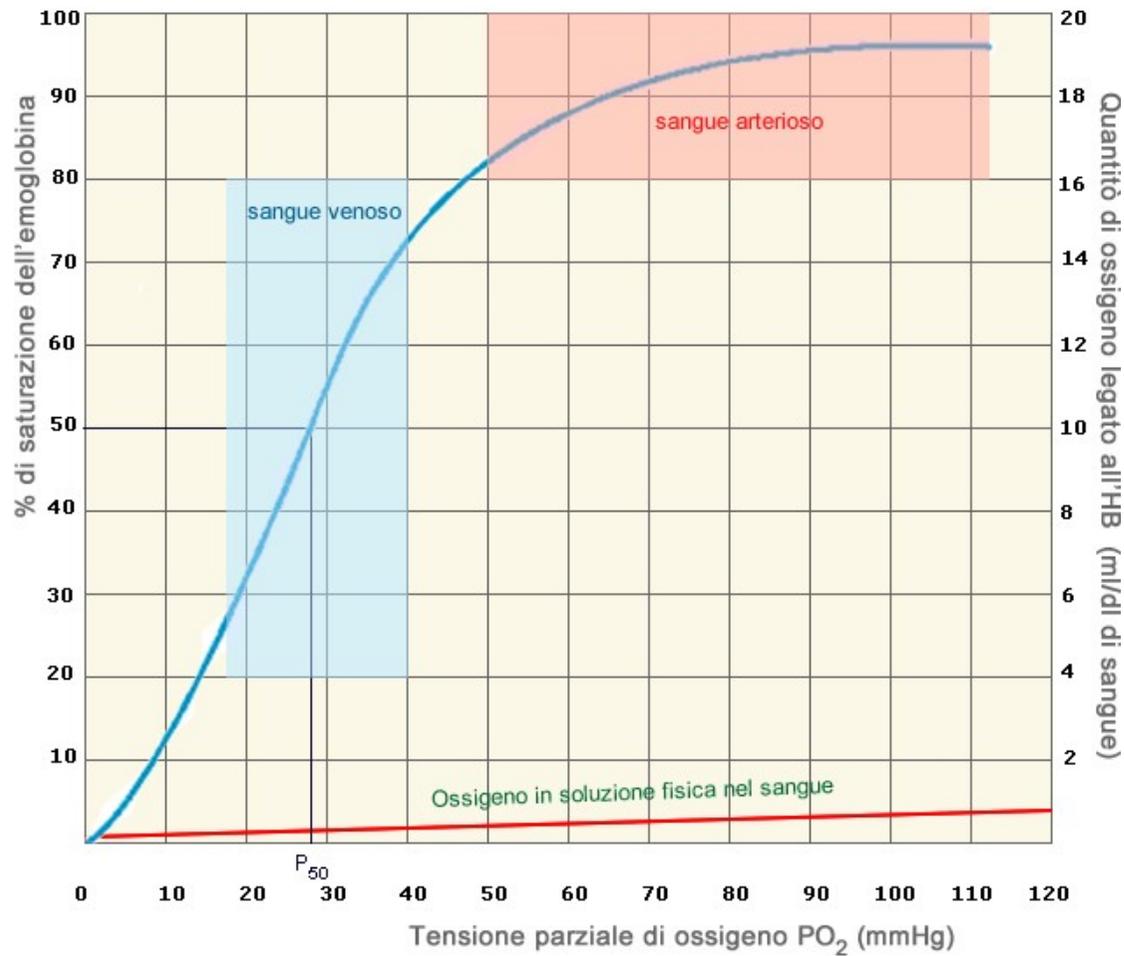
Ogni molecola di emoglobina contiene 4 atomi di ferro e può legare reversibilmente altrettante molecole di ossigeno. E' la presenza del Fe_{2+} che fa assumere all'emoglobina un colore rossastro, che aumenta quando il ferro si combina con l'ossigeno e diminuisce quando si lega all'anidride carbonica. 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_2 alveolare fino a 60mmHg
- REGIONE MASSIMA Permette una maggiore cessione di O_2 ai tessuti con piccole PENDENZA variazioni di pO_2



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.

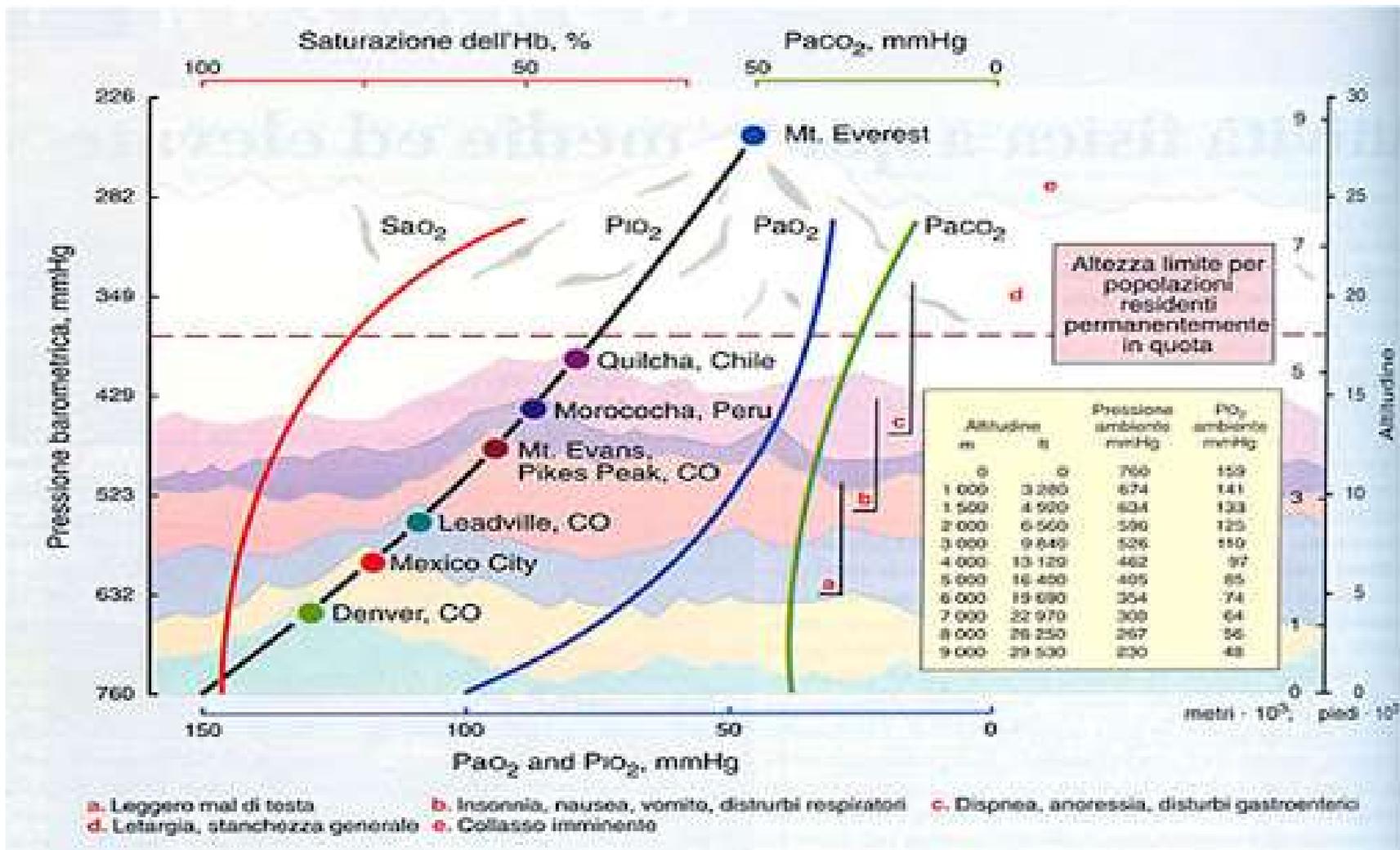


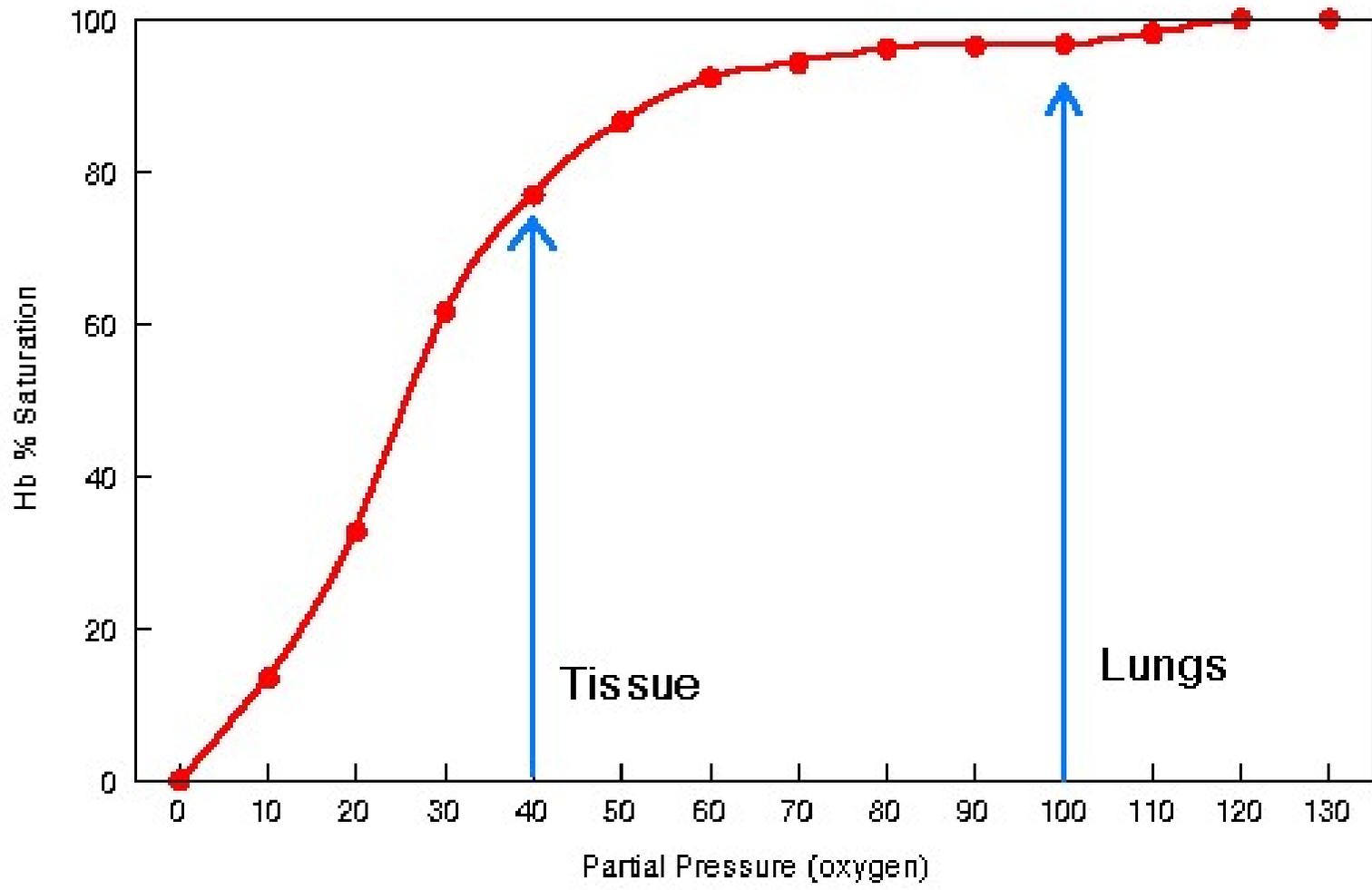
Il livello di saturazione dell'emoglobina da parte dell'ossigeno dipende dunque direttamente dal valore della pressione parziale dell'ossigeno atmosferico che, come abbiamo visto, dipende dalla quota, da fattori meteorologici e dal tenore di ossigeno; il valore di pressione sul quale l'organismo può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

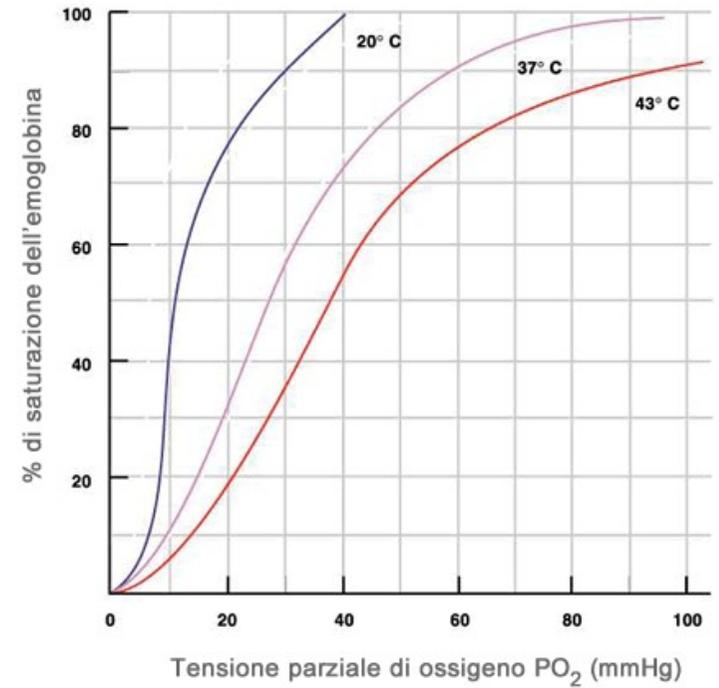
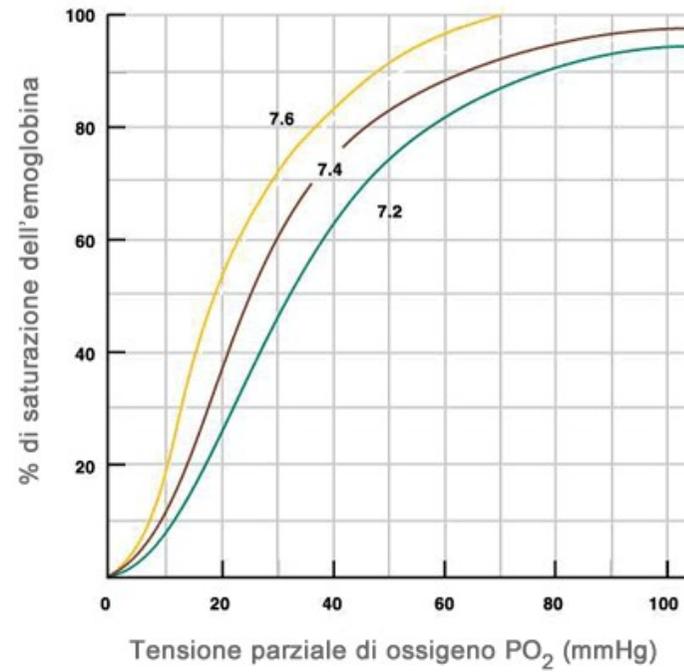
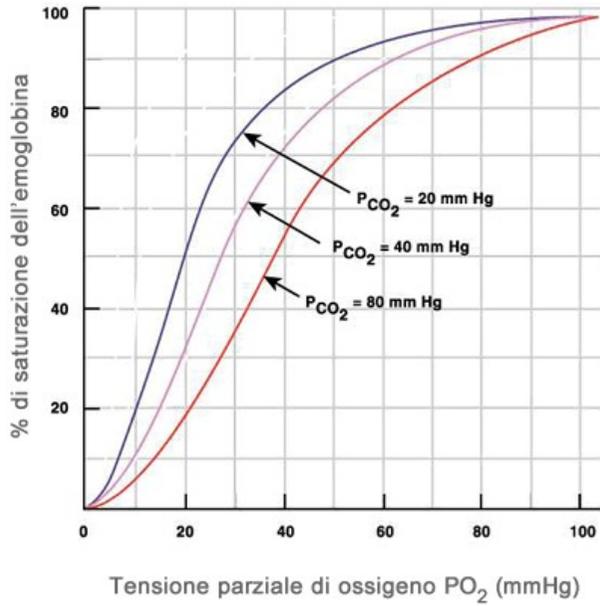


Questa diminuzione della P_{pO_2} a livello degli alveoli è stimabile in circa 60 mmHg ed è dovuta per circa 10 mmHg all'umidità dell'aria e per circa 50 mmHg principalmente allo scambio gassoso con la CO_2 ; naturalmente questi valori differiscono leggermente da individuo ad individuo.









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 P_{pO_2} ambientale sotto i 120 mmHg.

Quando la P_{pO_2} 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_2 alveolare pari a circa 60 mmHg o circa 120 mmHg di PpO_2 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_2 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_2 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:



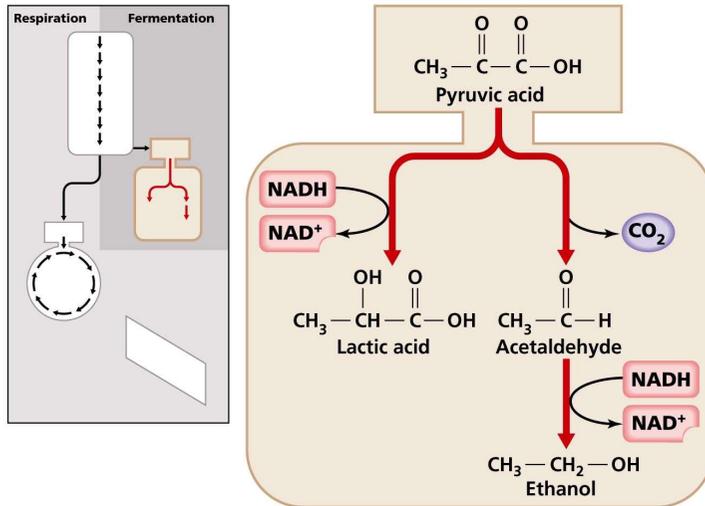
ad es. durante la tipica reazione di arrugginimento del ferro all'aria nella quale il ferro si combina con l'ossigeno; in caso di ambiente confinato, caratterizzato da scarsa o assente ventilazione, l'ossigeno viene così sottratto all'atmosfera interna.



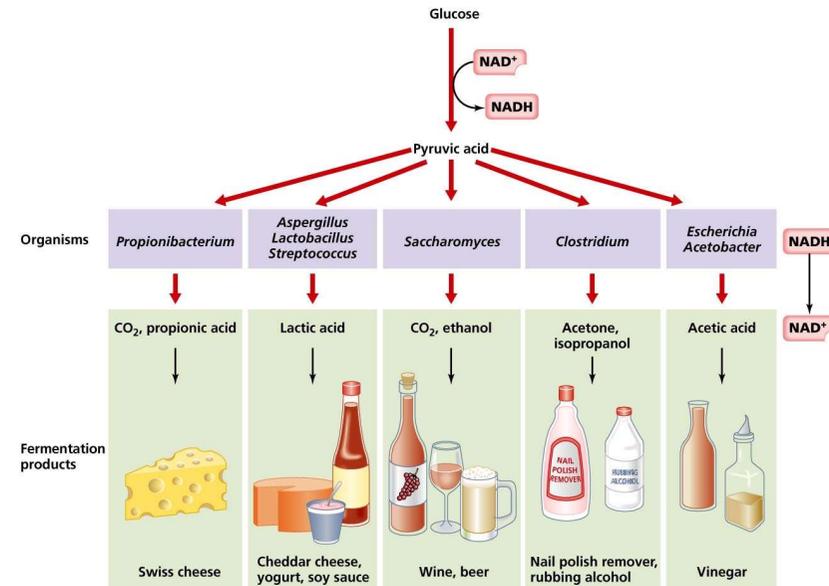
B. le reazioni di fermentazione:



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



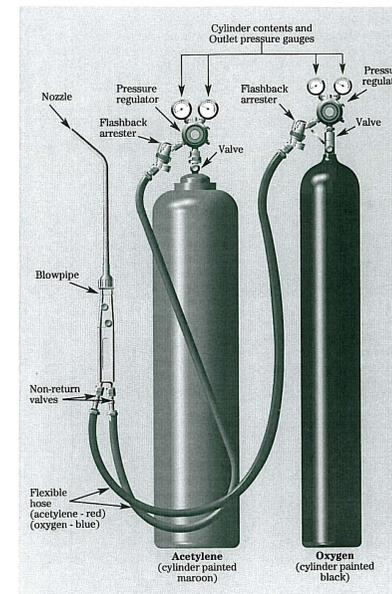
Copyright © 2006 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.



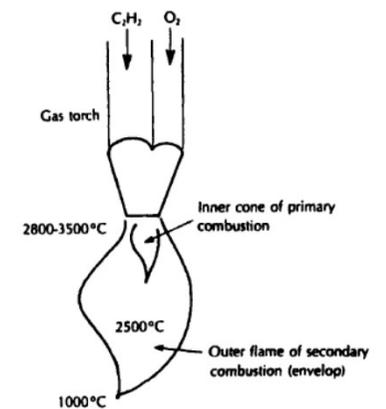
C. il consumo di ossigeno contenuto nell'aria attraverso processi che comportano l'utilizzo di fiamme libere (saldatura, taglio, preriscaldamento, ecc.) nei quali l'ossigeno presente in ambiente costituisce il comburente primario (nel caso ad esempio del GPL) o secondario (quando il comburente primario 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 (CO₂, 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)



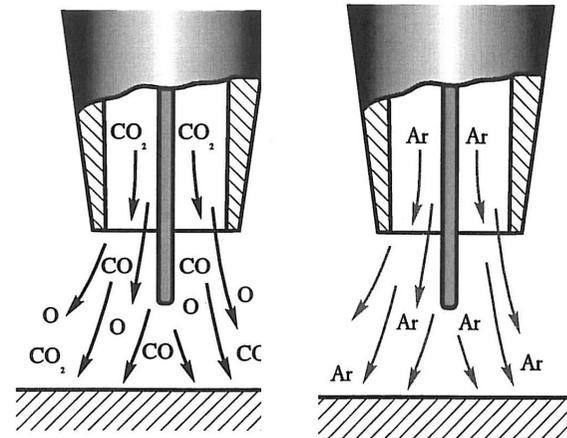
Fiamma ossidante (eccesso di ossigeno)

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. CO_2 , 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 Il ghiaccio secco sublima producendo da 1 kg di ghiaccio a -78°C fino a 400-500 litri di vapore (gas).



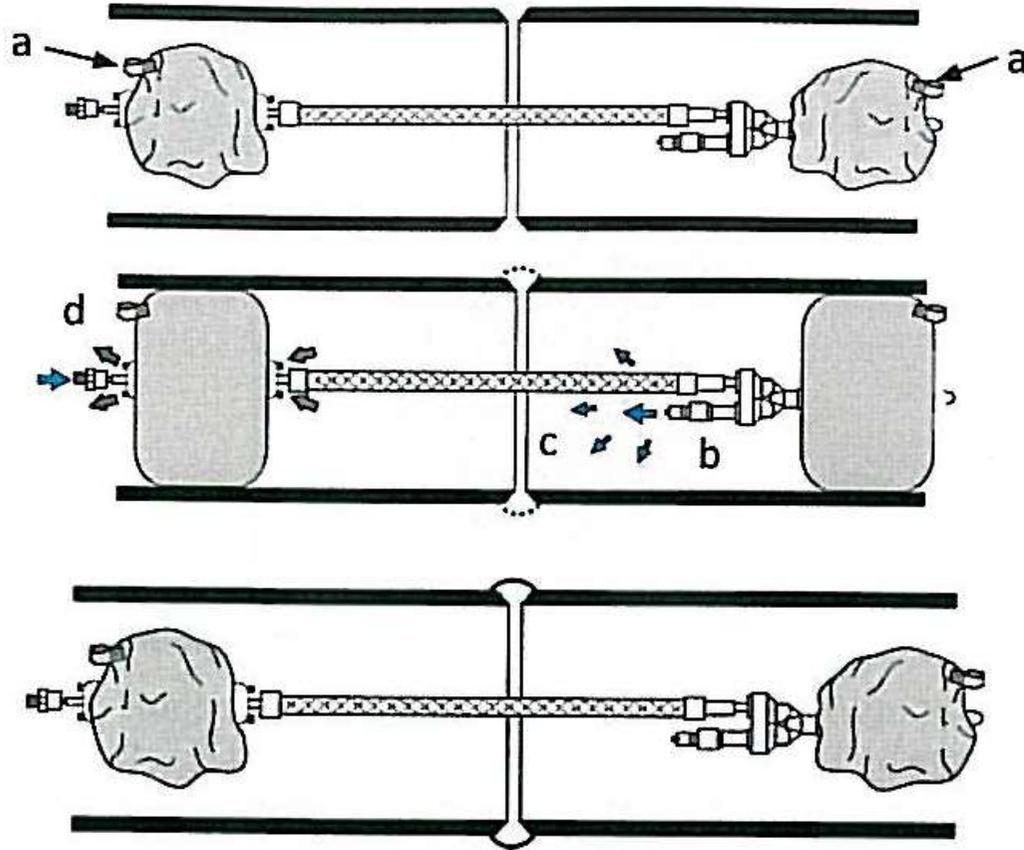
CO2 shielding g

Argon shielding gas





DE Department of
Engineering
Ferrara



E. le reazioni cellulari:



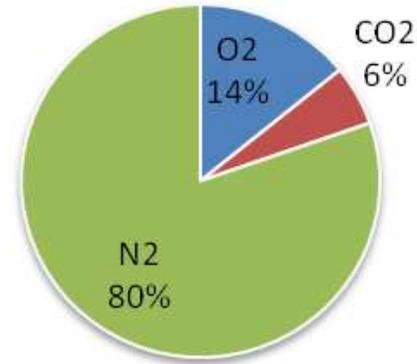
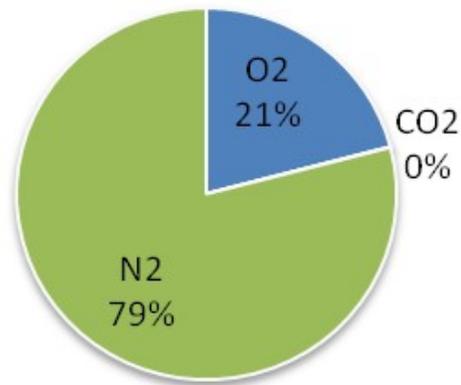
La respirazione cellulare è il meccanismo attraverso il quale la cellula in presenza di ossigeno è in grado di ricavare energia per i processi vitali (metabolismo basale) e lavorativi.

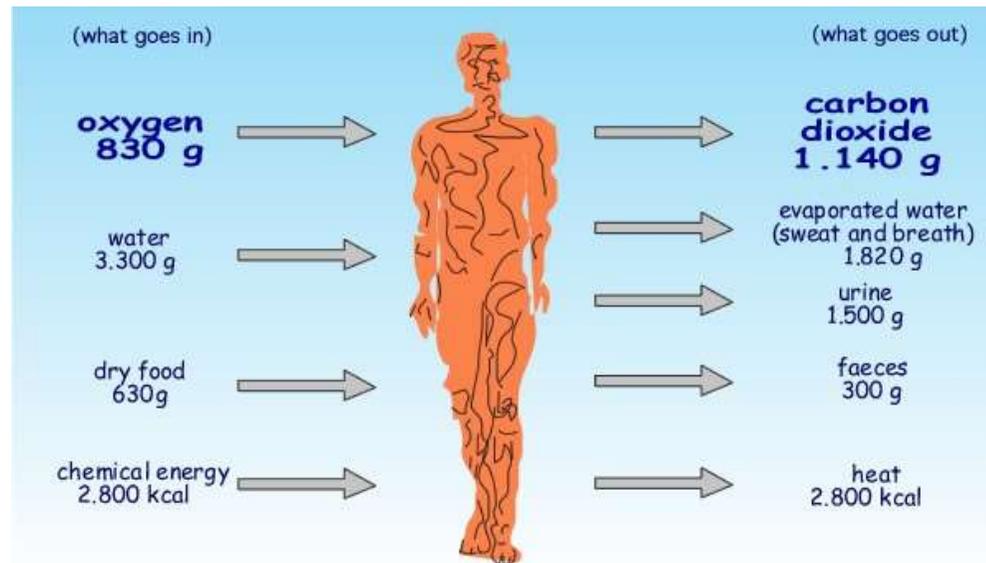
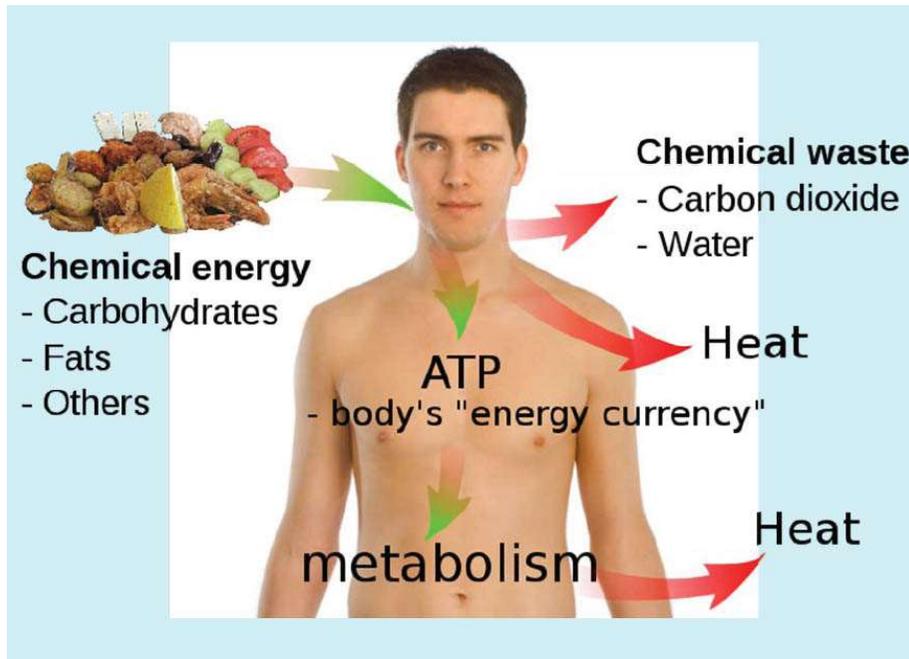
La respirazione cellulare è suddivisibile in parecchi passaggi in cui i prodotti di una reazione di ossidazione vengono poi utilizzati come base per una reazione successiva.

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



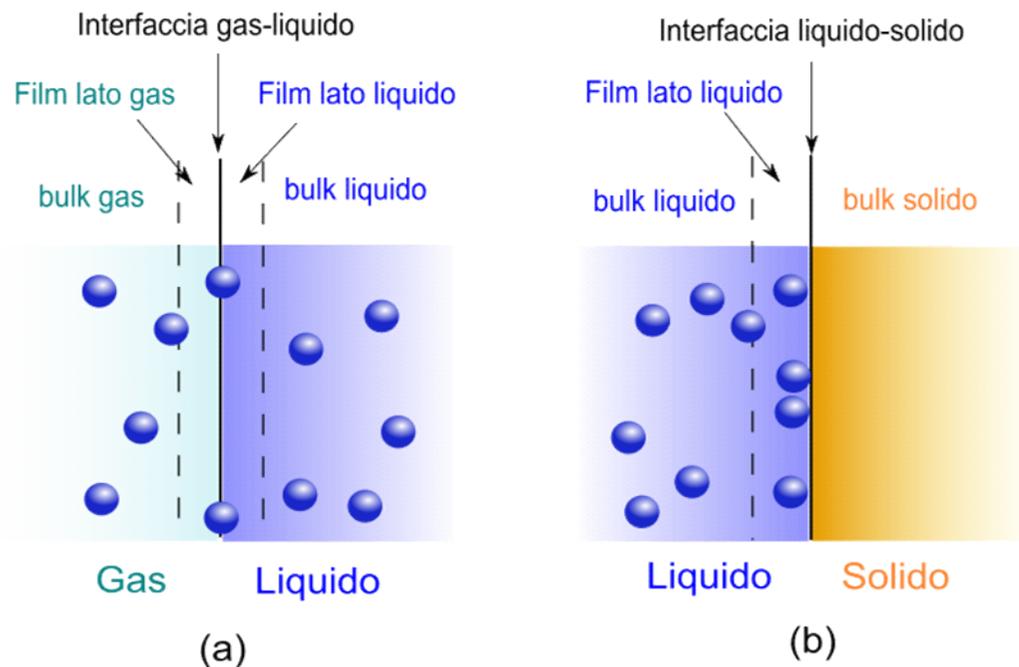
Durante il processo di respirazione esterna si immette aria contenente il 21% di O_2 (in condizioni standard) e si ri-emette in ambiente aria contenente il 16% di O_2 .





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 O₂ 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.

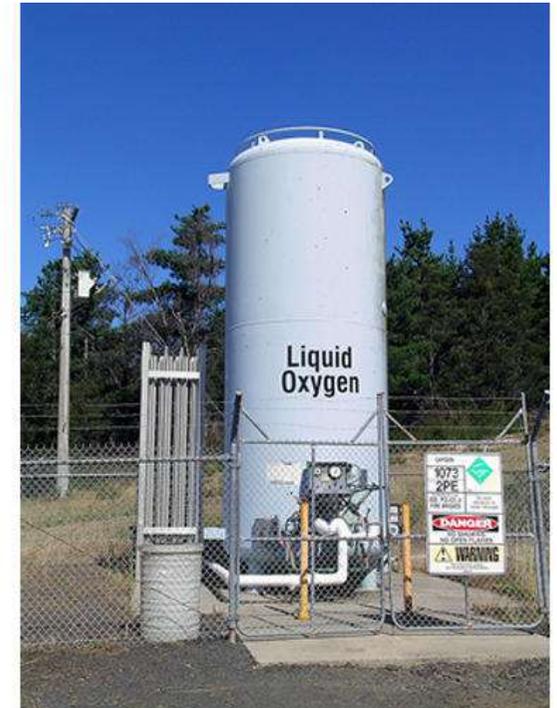


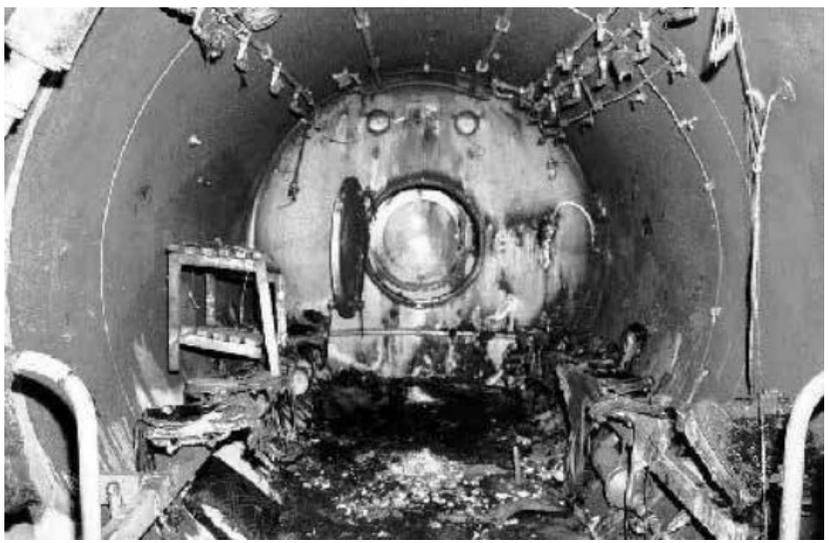
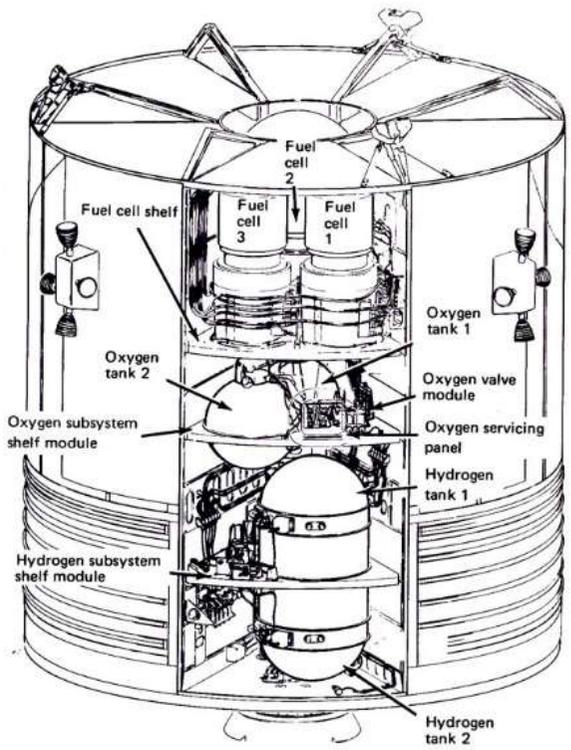
Un elevato rischio per la presenza di atmosfere sovraossigenate si ha anche negli impianti di produzione dell'ossigeno (generalmente ottenuto per distillazione dell'aria), a bordo dei mezzi di trasporto o nei siti di stoccaggio dell'ossigeno liquefatto o compresso.

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 m³ la dispersione di un litro di ossigeno liquido comporterebbe un incremento del gas fino al 29% in volume.





DE Department of
 Engineering
 Ferrara

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.

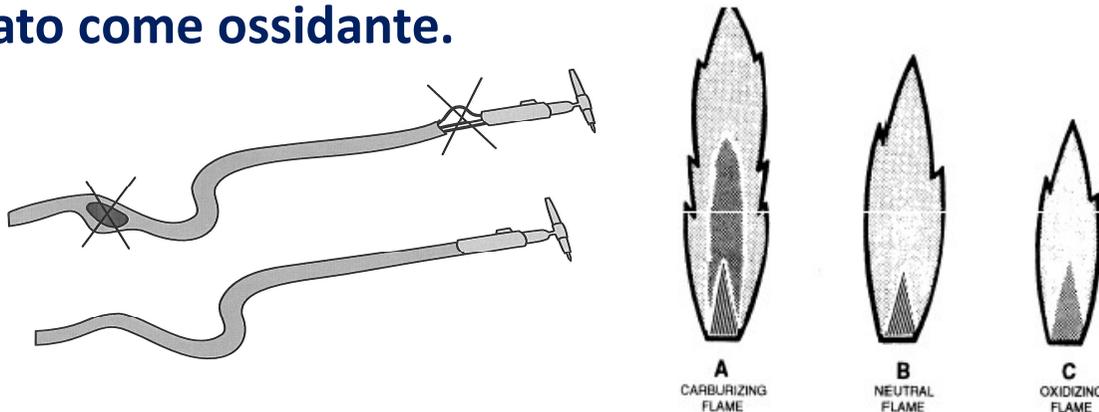


Figure 4-17. MAPP-gas flames.



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



DE Department of
Engineering
Ferrara

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”.

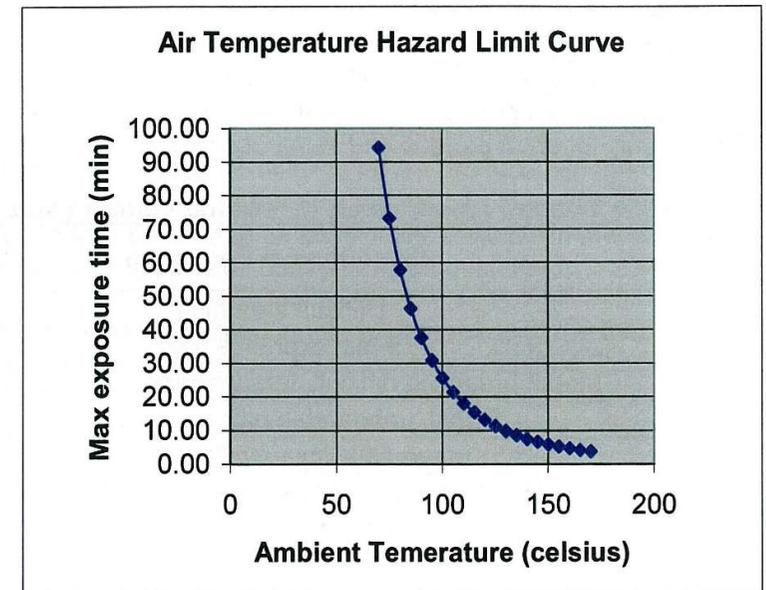


I prodotti della combustione possono essere costituiti, oltre che da energia termica (calore) e da radiazioni luminose (fiamme), anche da particolato (fumo), gas e vapori. Tra i gas e i vapori, i più diffusi sono CO_2 e vapore acqueo, ma possono essere presenti infiniti altri prodotti di combustione, spesso caratterizzati da elevata tossicità per l'uomo (CO , SO_2 , NH_3 , H_2S , HCN , HCl , NO_2 , 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**



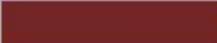
Temperatura in °C	Effetti fisiologici sull'organismo umano
127	Difficoltà respiratorie ma non determinanti un pericolo a breve termine
140	Limite di resistenza in condizioni di sicurezza per un tempo di esposizione di 5 minuti
149	Respirazione difficoltosa già dopo pochi secondi
160	Rapida insorgenza di uno stato di angoscia, pelle secca
182	Danni irreversibili all'organismo entro 30 secondi
203	Temperatura massima di sopravvivenza anche per esposizioni di pochi secondi



colore dei fumi

Colore		Tipo di combustibile
	Bianco	Paglia, Fosforo
	Giallo/marrone	Nitrocellulosa, Zolfo, Acido nitrico - solforico - cloridrico, Polvere da sparo.
	Grigio/marrone	Legno, Carta, Stoffa
	Viola	Iodio
	Marrone	Olio da cucina
	Marrone/nero	Nafta, Diluente per vernici
	Nero	Acetone, Cherosene, Benzina, Olio lubrificante, Gomma, Catrame, Carbone, Plastica

colore della fiamma

Colore della fiamma		Temperatura (°C)
	Amaranto pallido	480
	Amaranto	525
	Rosso sangue	585
	Rosso scuro	635
	Rosso	675
	Rosso chiaro	740
	Rosso pallido	845
	Rosa	900
	Arancione	940
	Giallo	995
	Giallo pallido	1080
	Bianco	1205
	Celeste	1400



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).



DE Department of
Engineering
Ferrara

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'innescio e sostenere la combustione.



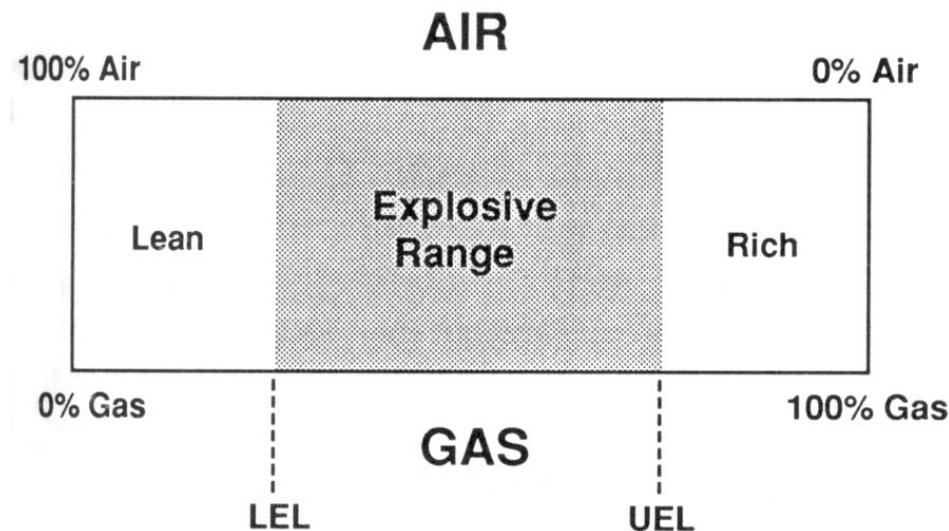
La temperatura minima di autoaccensione o di autoignizione (anche indicata come MIT – *Minimum Ignition Temperature*) di un combustibile viene definita come la minima temperatura (riferita generalmente alla pressione atmosferica ed a un tenore pari al 21% di ossigeno in aria) alla quale un combustibile 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_2 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.



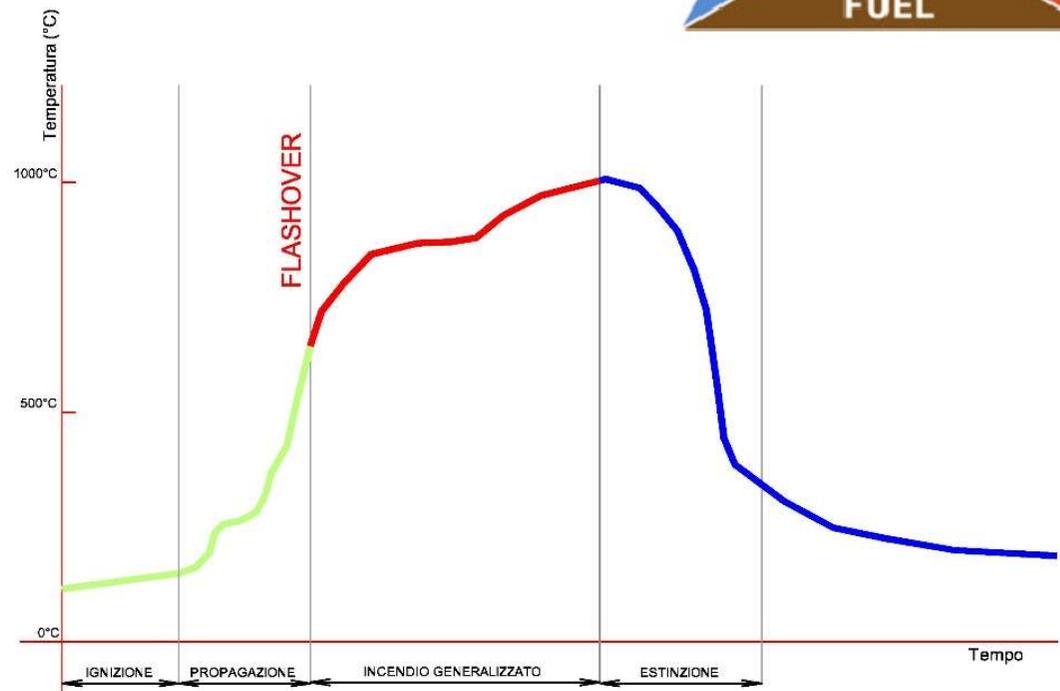
Carenza di ossigeno e pressioni più basse di quella atmosferica tendono oltretutto ad innalzare l'energia minima di ignizione anche a restringere il campo di infiammabilità; con la riduzione del tenore di ossigeno e della pressione, il limite di infiammabilità superiore (UEL) tende ad avvicinarsi al 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 O₂), 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.



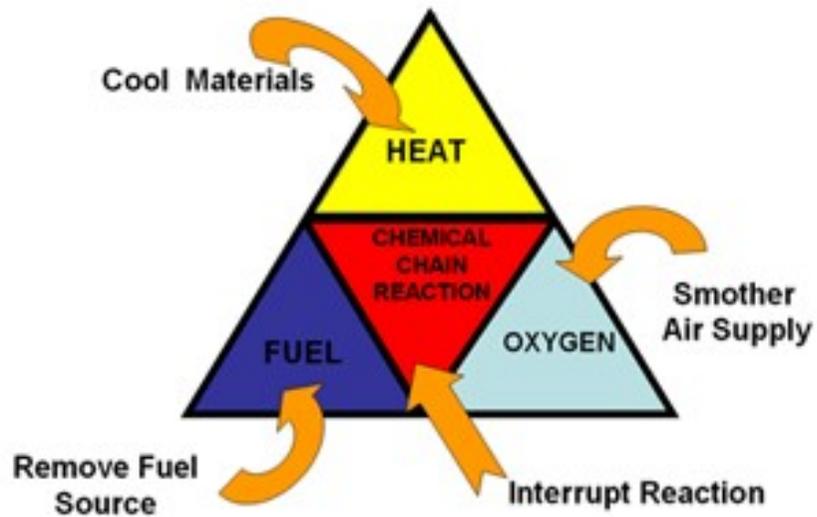
Qualsiasi sia la dinamica dell'innesco, parlare di temperatura di infiammabilità nel caso di nebbie non ha grande significato, poiché queste possono provocare esplosioni anche a temperature inferiori a quella di infiammabilità cioè in condizioni ancora lontane da quelle di vaporizzazione della massa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





Estinguente	Effetti sull'uomo	Azione estinguente			
		Separazione	Soffocamento	Raffreddamento	Inibizione chimica
Acqua					
Schiuma	Possibile formazione di sostanze tossiche per decomposizione				
Polvere	Irritazione occhi e vie respiratorie				
Anidride carbonica	Congelamento				
Idrocarburi alogenati	Possibile formazione di sostanze tossiche per decomposizione				

Azione estinguente: Buona Mediocre Nulla

Effettivo contributo all'estinzione usualmente riscontrato per ciascun estinguente



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.

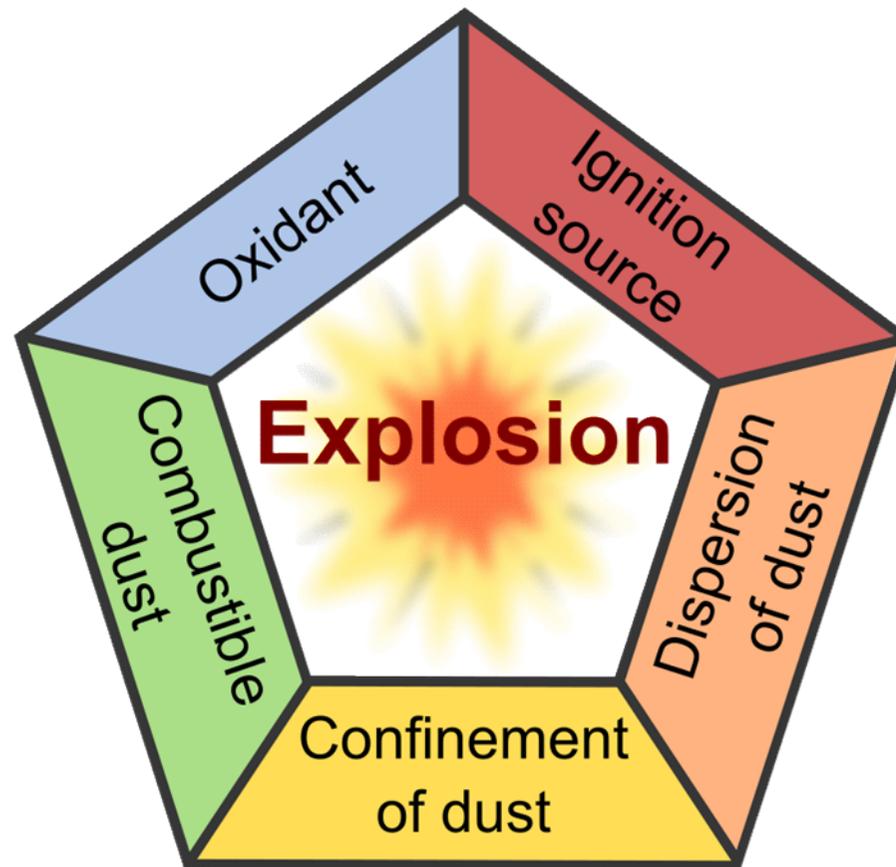
Tutti questi fattori influenzano fortemente il valore della “minima concentrazione di esplosività” o MEC (Minimum Explosive Concentration) in aria, indice omologo di quello che il LEL rappresenta per gas e vapori; resta aperto il dibattito sull’applicabilità del concetto di “concentrazione massima”, 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’innescò in modo più rigoroso rispetto al classico triangolo del fuoco utilizzato per l’incendio.



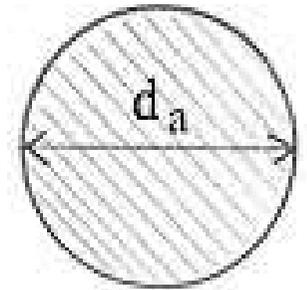
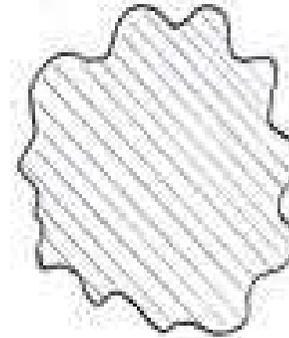
In relazione alla modalità di dispersione in ambiente se le polveri possiedono caratteristiche combustibili possono, a seconda dei casi, originarsi differenti situazioni di pericolo:

- 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 μm .

THE CHEMISTRY OF GUNPOWDER



CHARCOAL

Consists of broken down cellulose and provides carbon and other fuel for the reaction.

SALTPETRE

Saltpetre is a common name for potassium nitrate. It supplies oxygen for the combustion reaction.

SULFUR

Sulfur, also referred to as brimstone, lowers the ignition temperature required to start the reaction.

PRODUCTS OF COMBUSTION

56%

SOLID PRODUCTS

43%

GASEOUS PRODUCTS

1%

WATER

ENERGY DENSITY
3 MEGAJOULES PER KG

75%

Potassium Nitrate

KNO_3

15%

Charcoal

C

10%

Sulfur

S

A SIMPLIFIED EQUATION FOR THE BURNING OF BLACK POWDER



© COMPOUND INTEREST 2014 - WWW.COMPOUNDCHEM.COM
SHARED UNDER A CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION-NONCOMMERCIAL-NO DERIVATIVES 4.0 INTERNATIONAL LICENCE



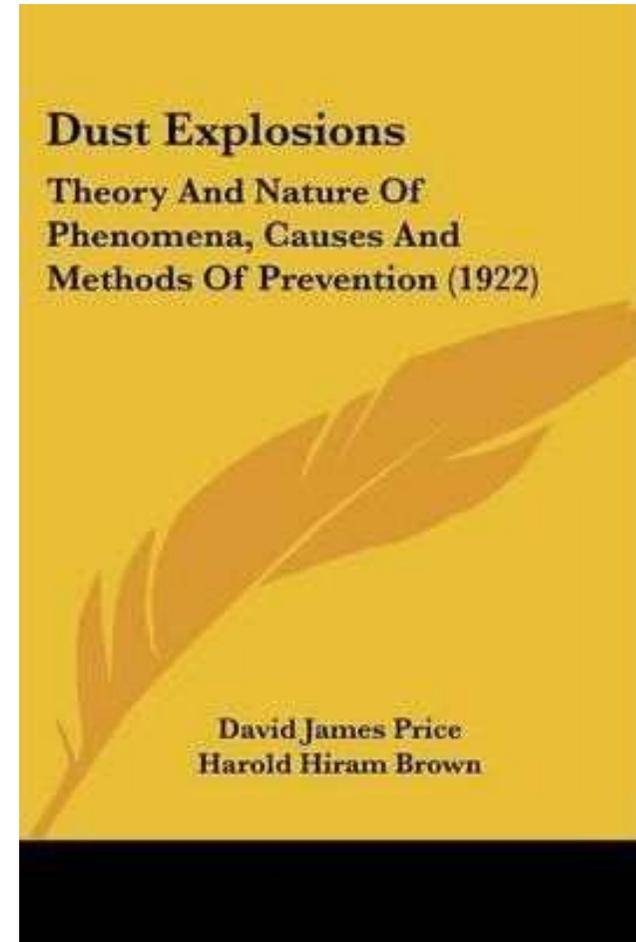
DE Department of
Engineering
Ferrara

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/m³.

In particolare per quanto riguarda le polveri di cereali il range è compreso tra 25 e 55 g/m³.

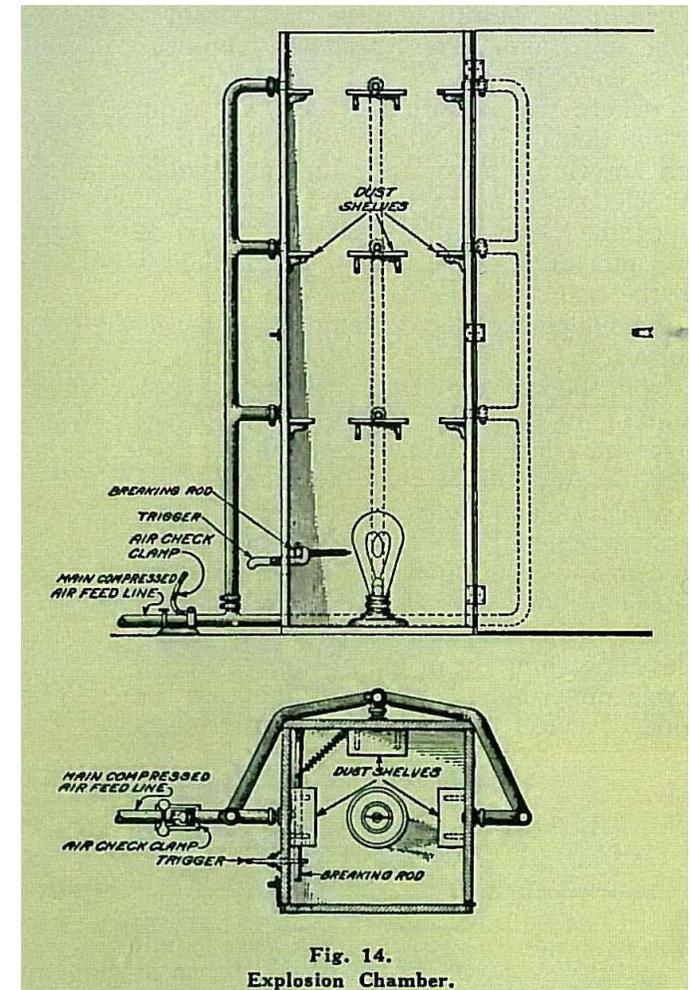


DE Department of
Engineering
Ferrara

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 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.



Alcuni episodi mortali relativi ad esplosioni da polveri

ANNO	LUOGO	ATTIVITÀ COINVOLTA	CONSEGUENZE
1872	Scozia	mulino	18 morti
1878	Francia	Fabbrica di coloranti	6 morti
1907	USA	Miniera di carbone	1148 morti
1919	USA	Fabbrica di amido	43 morti
1973	Norvegia	Produzione esplosivi	5 morti
1977	USA	Deposito di grano	36 morti
1981	USA	Sili di grano	9 morti
1982	Francia	Silo di malto	12 morti
1985	Argentina	Deposito di grano	22 morti
1989	Italia (Guardiagrele)	Mulino	8 morti
1995	USA	Impianto chimico	5 morti
1997	Francia	Sili di grano	11 morti
1998	USA	Deposito di grano	7 morti
2001	Italia (Vigliano Biellese)	Stabilimento tessile	3 morti
2007	Italia (Fossano)	Mulino	5 morti
2008	USA	Zuccherificio	4 morti



Prodotto	MEC (g/l)	Minima energia di ignizione (mJ)
Cellulosa	0,050	35
Resina epossidica	0,020	15
Malto di birra	0,055	30
Destrina	0,040	40
Fecola di patate	0,045	20
Caseina	0,045	60
Erba medica	0,10	/
Cacao	0,045	100
Farina di Mais	0,045	40
Amido di mais	0,040	20
Amido di riso	0,040	20
Cotone in fibra	0,500	/
Semi di cotone	0,500	/
Riso	0,045	40
Zucchero	0,035	30
Grano	0,055	/
Farina di frumento	0,025	20
Farina di grano (tenero o duro)	0,050	/
Alluminio atomizzato	0,045	50
Ferro	0,105	20

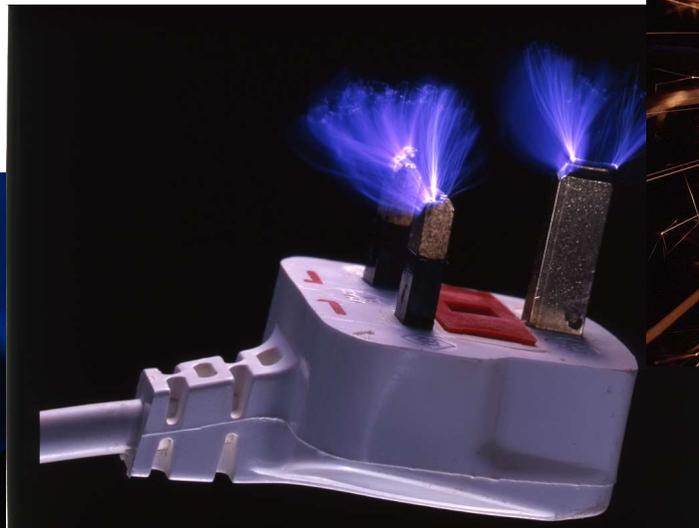


Cellulosa acetata	0,035	20
Magnesio	0,030	40
Nylon	0,030	20
Polietilene	0,020	10
Polistirene	0,020	15
Torio (cont. 1,2% O ₂)	0,075	5
Zolfo	0,035	30
Amido di patate	0,045	25
Urea formaldeide	0,020	34
Titanio	0,045	25
Segatura/Farina di legno	0,050	20
Cannella	0,060	30
Polvere di sughero	0,035	45
Metano	0,036	0,28
Butano	0,047	0,25
Propano	0,047	0,25
Idrogeno	0,004	0,011



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.



