

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA**  
**SCUOLA DI SCIENZE MEDICHE E FARMACEUTICHE**  
**CORSO DI LAUREA IN MEDICINA E CHIRURGIA**



**Ossigenoterapia iperbarica nei pazienti in  
ventilazione meccanica invasiva: analisi dei  
dati 2019-2021**

Relatore:  
*Prof. Lorenzo Ball*  
Correlatore:  
*Dott. Claudio Spena*

Candidato:  
*Francesco Della Torre Piccinelli*

Anno accademico 2021-2022

# SOMMARIO

ABSTRACT .....	4
CAPITOLO 1.....	6
1.1 INTRODUZIONE .....	6
1.2 OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA.....	8
1.3 CENNI STORICI.....	11
1.4 STRUTTURA DI UNA CAMERA IPERBARICA.....	13
1.5 SEDUTA DI OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA.....	15
1.6 EFFETTI DELL'ALTA PRESSIONE SUL CORPO UMANO.....	16
1.6.1 EFFETTI SUL SISTEMA RESPIRATORIO E SULLO SCAMBIO GASSOSO .....	17
1.6.2 EFFETTI SUL SISTEMA CARDIOVASCOLARE.....	18
1.6.3 EFFETTI SULL'ORECCHIO MEDIO.....	21
1.7 EFFETTI INDESIDERATI LEGATI AL TRATTAMENTO DI OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA.....	22
CAPITOLO 2.....	24
2.1 INDICAZIONI ALL'OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA NEL PAZIENTE CRITICO .....	24
2.2 CONTROINDICAZIONI ASSOLUTE ALL'OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA NEL PAZIENTE CRITICO .....	25
2.3 REQUISITI DELLA STRUTTURA IPERBARICA E SELEZIONE DELL'ATREZZATURA PER LA CURA DEL PAZIENTE CRITICO.....	26
2.3.1 CONSIDERAZIONI GENERALI.....	26
2.3.2 POSIZIONE.....	27
2.3.3 MONITORAGGIO DEL PAZIENTE .....	28
2.3.4 ALIMENTAZIONE ELETTRICA E BATTERIE.....	29
2.3.5 SEDAZIONE E MIORISOLUZIONE .....	31
2.3.6 INFUSIONE DI LIQUIDI .....	32
2.3.7 SISTEMI DI DRENAGGIO .....	34
2.4 PRINCIPI DI VENTILAZIONE MECCANICA .....	37
2.4.1 VENTILAZIONE SPONTANEA.....	37
2.4.2 VENTILAZIONE MECCANICA.....	38
2.4.3 MODALITA' DI VENTILAZIONE MECCANICA .....	40
2.5 VENTILAZIONE MECCANICA IN AMBIENTE IPERBARICO.....	41
2.5.1 STRATEGIE DI VENTILAZIONE MECCANICA IN AMBIENTE IPERBARICO.....	43
2.5.2 RIDUZIONE DELL'OSSIGENAZIONE DOPO TRATTAMENTO IPERBARICO.....	44
CAPITOLO 3.....	47
3.1 OBIETTIVO .....	47

3.2 STRUTTURA DEL CAMPIONE .....	48
3.3 MATERIALI E METODI .....	50
3.4 RISULTATI .....	51
3.5 CASO CLINICO .....	56
3.6 CONCLUSIONI E DISCUSSIONE.....	60
BIBLIOGRAFIA.....	61

## ABSTRACT

Il trattamento con ossigenoterapia iperbarica (OTI) risulta ampiamente diffuso ed utilizzato nella pratica clinica per differenti tipologie di patologie. Negli ultimi anni l'indicazione a tale trattamento è stata estesa anche a pazienti critici ricoverati presso reparti di Terapia Intensiva e sottoposti a ventilazione meccanica. In letteratura sono descritte alterazioni emodinamiche, ventilatorie e di scambio gassoso correlate con l'esposizione ad ossigeno iperbarico che possono risultare clinicamente significative in pazienti instabili e gravemente compromessi. Lo scopo dello studio è stato quello di valutare se il trattamento di OTI sottoposto a pazienti ventilati meccanicamente e ricoverati presso i reparti di terapia intensiva dell'Ospedale Policlinico San Martino di Genova abbia determinato alterazioni significative dei parametri emodinamici e respiratori e se si siano verificate complicanze periprocedurali.

Sono stati inclusi 9 pazienti ventilati meccanicamente e sottoposti a trattamento con OTI tra gennaio 2019 e dicembre 2021. Sono stati raccolti i dati relativi alle caratteristiche del paziente, ai parametri respiratori e quelli emodinamici prima e dopo le sedute iperbariche. Non sono state rilevate complicanze periprocedurali e non si sono verificati episodi di instabilità clinica a seguito dei trattamenti effettuati. In particolare, non sono state rilevate differenze significative pre-post trattamento per  $PaO_2$  ( $p=0.486$ ), rapporto P/F ( $p=0.951$ ), PAM ( $p=0.112$ ).

I risultati ottenuti evidenziano che il trattamento OTI in pazienti ventilati, se eseguito correttamente, non determina alterazioni emodinamiche e respiratorie tali da complicarne le condizioni cliniche e pertanto può essere utilizzato anche in questi casi. Studi con campioni più numerosi e di tipo prospettico sono necessari per la validazione del modello.

Treatment with hyperbaric oxygen therapy (OTI) is widely used and spread in clinical practice for different types of diseases. In recent years, the indication for this treatment has also been extended to critically ill patients admitted to intensive care units and subjected to mechanical ventilation. In the literature, hemodynamic, ventilatory and gas exchange alterations related to exposure to hyperbaric oxygen are described, which may be clinically significant in unstable and severely compromised patients. The aim of the study was to evaluate whether the treatment of OTI subjected to mechanically ventilated patients admitted to the intensive care units of the Ospedale Policlinico "San Martino" in Genova has led to significant alterations in hemodynamic and respiratory parameters and if periprocedural complications have occurred.

9 mechanically ventilated patients who underwent OTI treatment between January 2019 and December 2021 were included. Data on patient characteristics, respiratory and hemodynamic parameters before and after hyperbaric sessions were collected. No periprocedural complications were detected and no episodes of clinical instability occurred because of the treatments carried out. No significant pre-post treatment differences were found for PaO<sub>2</sub> (p= 0.486), P/F ratio (p= 0.951), PAM (p= 0.112).

The results obtained show that OTI treatment in ventilated patients, if performed correctly, does not determine hemodynamic and respiratory alterations such as to complicate their clinical conditions and therefore can also be used in these cases. Studies with larger samples and of a prospective type are necessary for the validation of the model.

# CAPITOLO 1

## 1.1 INTRODUZIONE

Tra i diversi centri iperbarici diffusi sul territorio italiano, quello dell'Ospedale Policlinico San Martino di Genova risulta essere un punto di riferimento sia per numerosi pazienti provenienti da tutto il territorio della Liguria, sia per molti centri ospedalieri situati nelle circostanti regioni del nord Italia.

La maggior parte dei pazienti sottoposti ad ossigenoterapia iperbarica effettuano i trattamenti in regime d'elezione, seguendo programmi terapeutici organizzati in base alla patologia di base e definiti in accordo con gruppi multidisciplinari che includono differenti specialità mediche.

Si tratta quindi di pazienti con grado di autonomia abbastanza elevato, che ripetono sedute iperbariche con cadenza quotidiana, conoscendo quindi le procedure e le manovre da eseguire per la buona riuscita del trattamento e le cui condizioni cliniche risultano essere spesso stabili e non rapidamente evolutive.

Tuttavia, una quota pari a circa il 2 % dei pazienti effettua i trattamenti iperbarici in regime d'emergenza/urgenza; le indicazioni cliniche più rilevanti per quanto riguarda quest'ultima modalità d'accesso sono le intossicazioni acute da monossido di carbonio, gli incidenti decompressivi legati all'attività subacquea, i quadri acuti da infezioni necrosanti dei tessuti molli e le sindromi compartimentali degli arti.

Tutte queste condizioni possono comprendere spettri di gravità molto ampi, sino a giungere alla necessità di ricorrere a supporti vitali di tipo intensivistico.

Negli ultimi anni, grazie alla disponibilità di tecnologie compatibili con l'utilizzo in ambiente iperbarico e con la diffusione di maggiori evidenze scientifiche a

supporto del trattamento con ossigenoterapia iperbarica, l'accesso a questa procedura terapeutica è quindi adottato anche per pazienti critici ricoverati presso reparti di terapia intensiva che necessitino di ventilazione polmonare meccanica.

Occorre considerare che il trattamento con ossigenoterapia iperbarica determina significativi impatti fisiologici in particolare a carico dell'equilibrio emodinamico e delle funzioni ventilatorie dei pazienti; questi, essendo già in un contesto di cura intensiva, si trovano così esposti a condizioni di instabilità a carico di diversi organi e/o apparati.

La sola presenza di una camera iperbarica in un contesto ospedaliero non è condizione sufficiente per poter proporre tale trattamento ad un paziente critico, in quanto è necessaria una specifica preparazione del personale dedicato, la presenza di strumentazione adeguata al monitoraggio e ai supporti vitali che tali pazienti necessitano ed una più breve distanza possibile tra il reparto di terapia intensiva ed il centro iperbarico, in modo tale da evitare spostamenti eccessivamente lunghi, con i relativi rischi associati. .

Pertanto, la decisione di trattare un paziente critico in camera iperbarica richiede un'attenta analisi rischio/beneficio relativa alle specificità sia del centro iperbarico che delle condizioni del paziente.

## 1.2 OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA

L'ossigenoterapia iperbarica (OTI) prevede la somministrazione di ossigeno puro o di miscele iperossiche all'interno di un ambiente chiuso ermeticamente, nel quale la pressione ambiente è portata a valori superiori ad 1.4 ATA (141.86 kPa) mediante l'impiego di aria compressa.

L'atmosfera è una miscela di gas che contiene in condizioni standard una percentuale di ossigeno pari a 20,94 %, 78,08 % di azoto, 0,04 % di anidride carbonica e tracce di altri gas; nella respirazione in aria, a pressione atmosferica, il 98,5% dell'ossigeno viene veicolato dai globuli rossi, per mezzo di legame con i gruppi EME delle molecole di emoglobina in essi contenuta<sup>1</sup>. Secondo la legge di Dalton ciascuna componente esercita la sua pressione (pressione parziale) in relazione alla sua proporzione sul volume totale, tale pressione parziale influenza in maniera direttamente proporzionale la quantità di gas che si discioglie in una componente liquida, come enunciato dalla legge di Henry.

Total pressure		pAO <sub>2</sub> breathing air
ATA	mmHg	mmHg
1	760	102
1.5	1140	182
2	1520	262
2.5	1900	342
3	2280	422
4	3040	582
5	3800	742
6	4560	902

Tabella 1 - Pressioni ideali dell'ossigeno a livello alveolare<sup>6</sup>

Pertanto, l'esposizione a pressioni elevate di ossigeno comporta l'aumento della quota di tale gas trasportato in soluzione nel plasma. Con valori di

pressione compresi fra le 2 e le 3 Atmosfere assolute (ATA) la quantità di ossigeno trasportato ai tessuti, in questa forma, può essere anche di 15 volte superiore al normale, mentre non si assiste ad un altrettanto significativo aumento della quota di ossigeno legato all'emoglobina, che in condizioni fisiologiche rappresenta il veicolo principale di trasporto per l'ossigeno verso i tessuti<sup>2</sup>.

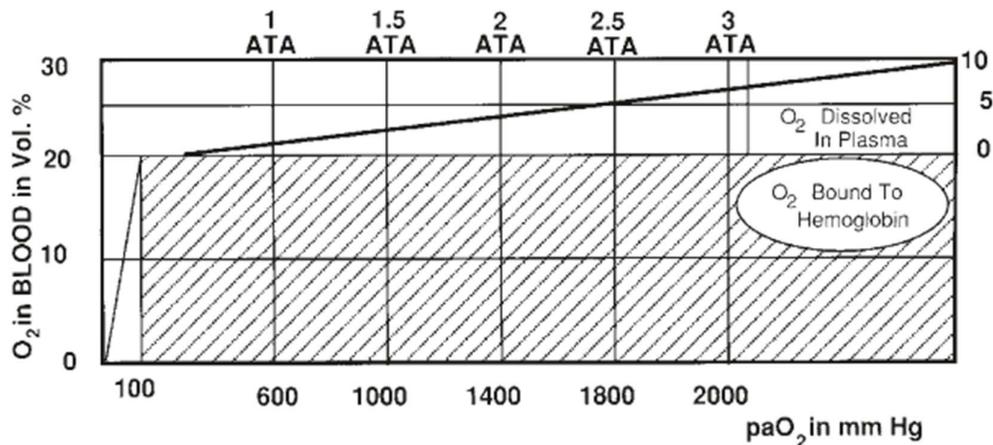


Figura 1 - Curva di assorbimento dell'ossigeno negli esseri umani sottoposti a trattamento di ossigenoterapia iperbarica<sup>6</sup>

L'aumento di ossigeno nel plasma permette di ripristinare l'ossigenazione in aree dove eventi patologici abbiano danneggiato vasi sanguigni o in zone dove essi siano carenti numericamente (aree ipossiche o ipoperfuse) permettendo così la ripresa di funzioni tissutali ossigeno-dipendenti. Il ripristino del metabolismo cellulare fisiologico promuove i processi riparativi attraverso una maggiore attività di fibroblasti, osteoblasti e della sintesi di collagene e matrice extracellulare<sup>3</sup>.

La maggiore disponibilità di ossigeno comporta inoltre la vasocostrizione nei tessuti sani con conseguente redistribuzione del sangue verso i tessuti ipossici e riduzione dell'edema post traumatico e/o post-chirurgico.

Oltre a questi effetti l'Ossigeno Iperbarico esplica anche un'azione antibatterica diretta ed indiretta, protegge le membrane dalla lipoperossidazione radicalica ed inibisce la produzione di beta2-integrine che favoriscono l'adesività dei leucociti sulla parete capillare, con conseguente danno endoteliale<sup>4-5</sup>.

Proprio grazie a questo effetto positivo sull'ossigenazione di tessuti periferici, l'ossigenoterapia iperbarica trova indicazione sia in acuto che in cronico per tutte quelle condizioni patologiche in cui esiste e persiste uno squilibrio locale fra necessità, apporto e capacità di utilizzo dell'ossigeno: insufficienze vascolari acute e croniche, malattie dell'osso, infezioni acute e croniche dell'osso e dei tessuti molli, deficit neurologici.

L'azione dell'Ossigeno Iperbarico per potersi esplicare ha bisogno di un certo tempo e di un certo numero di cicli di trattamento, in relazione alla gravità e delle comorbidità presenti. Può essere proposta sia a pazienti coscienti ed in respiro spontaneo, sia a pazienti sedati e ventilati meccanicamente; trattandosi di una tecnica complessa e non priva di rischi è però necessario che venga gestita e controllata da specialisti che conoscano le principali criticità legate a tale procedura, tra cui le diverse risposte del sistema cardiopolmonare ad un ambiente iperbarico e della tossicità legata ad alte concentrazioni di ossigeno circolante.

### 1.3 CENNI STORICI<sup>6</sup>

Le origini e lo sviluppo della medicina iperbarica vengono strettamente correlate con la storia della medicina subacquea, le applicazioni scientifiche di questa tecnologia sono uno sviluppo relativamente recente, ma è meno noto che l'uso del gas compresso in medicina ha in realtà radici antiche.

Risalgono al 1662 i primi documenti in cui viene descritto l'utilizzo di aria compressa per scopi sanitari. Il medico britannico, Nathaniel Henshaw, sviluppò una stanza

ermetica chiamata "domicilium", in cui potevano essere prodotte condizioni climatiche e di pressione variabili, con pressione fornita da un grande paio di mantici, tale trattamento si proponeva come espediente per aiutare la digestione, per facilitare la respirazione e l'espettorato, e di conseguenza, di ottimo uso per la prevenzione della maggior parte delle affezioni polmonari. Tuttavia, sembra che non ebbe una reale applicazione in vivo, e per ulteriori sviluppi in campo di medicina iperbarica bisognerà attendere quasi due secoli. Durante questo lasso di tempo vi fu un'ulteriore importante scoperta, nel 1775 venne isolato per la prima volta l'ossigeno, in breve venne impiegato come gas medicale ed altrettanto rapidamente ne fu individuata la tossicità correlata ad un uso scorretto, per molti anni infatti il suo utilizzo venne limitato ad un uso esclusivamente normobarico.

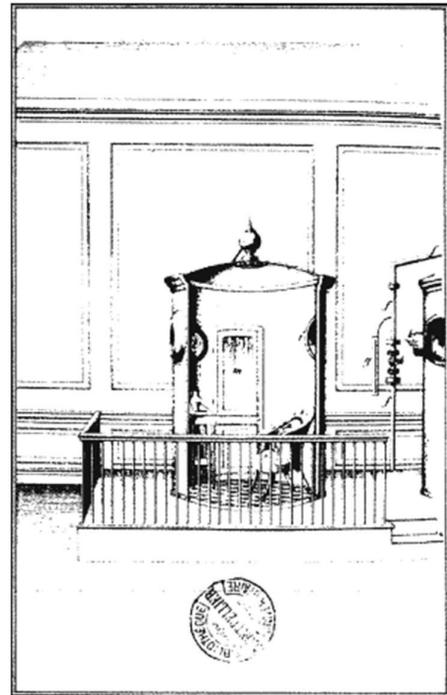


Figura 2- Camera iperbarica costruita nel 1874<sup>6</sup>

Solo nella seconda metà del Novecento vi fu un nuovo interesse nell'impiego di ambienti ad aumentata pressione, durante questo periodo in realtà i primi istituti iperbarici avevano però una funzione maggiormente assimilabile a centri di cura e benessere, non vi era un rationale comune nell'utilizzo di questo trattamento e la scelta ricadeva spesso sui singoli medici<sup>7</sup>.

Molta risonanza ebbe nei primi anni Venti la camera costruita dal medico statunitense Orval J. Cunningham, largamente impiegata per i pazienti affetti da influenza spagnola, osservò infatti come la mortalità di tale patologia fosse più elevata nelle aree a maggior altitudine e pertanto ipotizzò una correlazione con fattori barometrici. Negli anni successivi estese l'indicazione al trattamento iperbarico anche ad altre condizioni cliniche come sifilide, ipertensione diabete e neoplasie, tuttavia in seguito ad un incremento della fama relativa alla sua struttura venne richiesta da parte dell' American Medical Association (AMA) una dimostrazione scientifica dell'effettiva utilità del suo trattamento; Cunningham a parte qualche breve articolo non fece alcuno sforzo per descrivere e discutere la sua tecnica e per tanto fu infine censurato dall'AMA. Negli ultimi anni la ricerca e lo studio sulla terapia iperbarica ha subito un incremento significativo, la letteratura scientifica ha dimostrato l'efficacia e l'applicabilità di questa tecnica relativamente a numerose condizioni cliniche, sfruttando sia l'utilizzo del solo ambiente ad alta pressione in aria ambiente, sia con l'aggiunta di miscele di gas come l'ossigeno.

## 1.4 STRUTTURA DI UNA CAMERA IPERBARICA<sup>6</sup>

La struttura principale in cui avviene il trattamento iperbarico prende il nome di “camera iperbarica”, che consiste in un ambiente costruito per resistere e mantenere pressurizzazioni scelte in base al tipo di trattamento clinico previsto. L’ambiente viene realizzato nel rispetto delle normative tecniche di riferimento (UNI EN 14931, UNI EN 16081) mediante l’utilizzo in genere di materiali metallici, che costituiscono il guscio esterno. Un portello a tenuta stagna garantisce l’accesso e l’uscita dalla camera; è possibile trovare uno o più oblò in materiale acrilico che hanno la doppia funzione di permettere la diretta osservazione dell’interno della struttura da parte del personale ed inoltre rendono l’ambiente meno claustrofobico per chi vi si trova all’interno. Infine è presente una camera di equilibrio, pressurizzabile in maniera indipendente dalla camera principale, per consentire il transito del personale o materiali qualora sia necessaria assistenza ai pazienti durante il trattamento. Un interfono ed un sistema televisivo permettono di monitorare ed interagire con chi si trova all’interno.

La dimensione, la forma e le capacità di pressione delle camere iperbariche variano considerevolmente in funzione al tipo di struttura che le accoglie ed ai trattamenti previsti, la maggior parte di esse sono strutture fisse ad uno o più posti. Esistono inoltre camere iperbariche mobili alloggiate in container, per specifiche esigenze quali ad esempio quelle legate al contesto militare.

Tra i principali tipi di camere iperbariche troviamo:

- **CAMERE MONOPOSTO:** si tratta di strutture di dimensioni ridotte, in cui la capacità di pressione non supera in genere le 3 ATA. L’ambiente interno viene pressurizzato con aria medica mentre il paziente respira ossigeno attraverso una maschera o un casco.

Il paziente esegue il trattamento in singolo, viene così garantita migliore privacy e risultano ideali in casi di pazienti sottoposti a regime di isolamento da contatto (infezioni, immunodepressione).

Lo spazio di movimento all'interno è molto limitato, il personale sanitario si trova all'esterno e l'accesso diretto al paziente è possibile solamente interrompendo la procedura.

In questo tipo di camere i dispositivi rimangono per lo più all'esterno, in caso sia necessaria la somministrazione continua di terapia endovenosa le pompe infusione sono appositamente realizzate e va quindi cambiata la linea endovenosa. I ventilatori meccanici per il supporto respiratorio associati alle camere monoposto sono meno performanti e richiedono modalità di ventilazione controllata con miorisoluzione e livelli profondi di sedazione.

Questo le rende ideali per pazienti coscienti e che non necessitino di assistenza medica avanzata, mentre sono meno indicate in quei soggetti ricoverati presso reparti di terapia intensiva.

- **CAMERE MULTIPOSTO:** tali strutture accolgono al loro interno più pazienti contemporaneamente, la capacità massima è variabile in base al modello e può arrivare sino ad un numero di 20 posti. Ciascuna postazione è dotata di una maschera per l'erogazione di ossigeno e miscele di gas; pertanto, il resto dell'ambiente viene pressurizzato mediante aria medica e possono raggiungere livelli di pressione intorno alle 6 ATA.

Le camere multiposto sono più adatte per il trattamento di pazienti provenienti da reparti di Terapia Intensiva; l'assistenza durante la seduta iperbarica viene garantita in modo continuo, per tutti quegli

aspetti tipici di un paziente critico, come ad esempio la ventilazione meccanica, l'aspirazione endotracheale, il monitoraggio elettrocardiografico ed emodinamico o l'infusione endovenosa continua di farmaci, fino ad arrivare alla possibilità di eseguire la rianimazione cardiopolmonare e defibrillazione in caso di aritmie o arresto cardiaco. Tuttavia, l'utilizzo di tali camere richiede un numero più consistente di personale dedicato ed una formazione adeguata alla gestione di più pazienti contemporaneamente.

### 1.5 SEDUTA DI OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA<sup>6</sup>

Durante una seduta di ossigenoterapia iperbarica un tecnico qualificato, seguendo quanto prescritto dal medico iperbarico, controlla attraverso i dispositivi di gestione dell'impianto i livelli di pressione, la composizione delle miscele di gas che verranno inalate dal paziente, la durata della procedura e gli altri parametri ambientali rilevanti.

La maggior parte dei trattamenti vengono somministrati a pressione compresa tra 2.2 e 2.8 ATA con una durata di almeno 60 minuti a quota di trattamento, a cui si aggiungono circa 15 minuti per le fasi di compressione e decompressione per il ripristino di un ambiente normobarico.

C'è una grande varietà di camere iperbariche e di protocolli disponibili, la ricerca sia in ambito clinico che tecnologico è molto attiva ed il medico iperbarico deve optare per le soluzioni più appropriate in base alle esigenze cliniche del paziente ed alle risorse disponibili.

## 1.6 EFFETTI DELL'ALTA PRESSIONE SUL CORPO UMANO

Immergendosi al di sotto della superficie del mare il corpo umano è esposto ad un aumento notevole della pressione, gli effetti che si manifestano richiedono da parte dei sistemi di compenso una rapida risposta per garantire l'omeostasi dell'organismo, cui tuttavia si devono aggiungere interventi di supporto e prevenzione per evitare che tali alterazioni esitino in condizioni morbose e potenzialmente letali; in modo analogo le stesse risposte e misure di sicurezza sono da considerarsi durante una seduta terapeutica in ambiente iperbarico. Gli effetti della pressione sul corpo umano variano a seconda dei seguenti fattori<sup>6</sup>:

- Valore massimo di pressione raggiunto
- Durata dell'esposizione all'alta pressione
- Frequenza di esposizione ad alte pressioni
- Grado di attività fisica del soggetto durante l'esposizione all'alta pressione
- Miscela di gas respirata
- Presenza di farmaci e/o sostanze nell'organismo.

### 1.6.1 EFFETTI SUL SISTEMA RESPIRATORIO E SULLO SCAMBIO GASSOSO

L'esposizione all'ossigeno iperbarico determina un aumento del lavoro della muscolatura respiratoria, cui si deve aggiungere ulteriore lavoro per vincere l'aumentata resistenza delle vie aeree, il cui incremento è direttamente proporzionale a maggiori valori di densità della miscela respiratoria somministrata<sup>6</sup>.

Bisogna quindi considerare che nonostante lo scambio alveolare sia facilitato grazie all'aumento della pressione parziale di ossigeno, la muscolatura respiratoria è sottoposta ad un aumentato lavoro che deve essere considerato e correlato alla condizione fisica e clinica del soggetto cui si prescrive un trattamento iperbarico.

La ventilazione con ossigeno puro induce inoltre una diminuzione della clearance mucociliare e lo sviluppo di micro-atelettasie polmonari, aumentando lo shunt intrapolmonare, pertanto sono stati segnalati episodi di ipossia in seguito a trattamenti di ossigenoterapia iperbarica, tale condizione è sempre risultata completamente reversibile e non si è mai associata ad effetti clinicamente significativi<sup>8</sup>.

## 1.6.2 EFFETTI SUL SISTEMA CARDIOVASCOLARE

L'esposizione ad ambienti iperbarici determina alterazioni dell'attività elettrica cardiaca, che possono esitare in alterazioni del normale ritmo sinusale.

Questo sembra essere legato sia ad un aumento del tono parasimpatico, sia ad una diretta azione della pressione idrostatica sulle membrane cellulari del miocardio, con diminuzione dell'eccitabilità e della conduzione del potenziale elettrico<sup>6</sup>.

Inoltre, da un punto di vista emodinamico, è stato studiato<sup>9-10</sup> come soprattutto in relazione ad un' aumentata presenza di ossigeno circolante vi sia una riduzione della frequenza cardiaca e della portata cardiaca, legate presumibilmente sia ad una maggiore attività vagale, sia ad un fisiologico processo di autoregolazione da parte dei cardiomiociti.

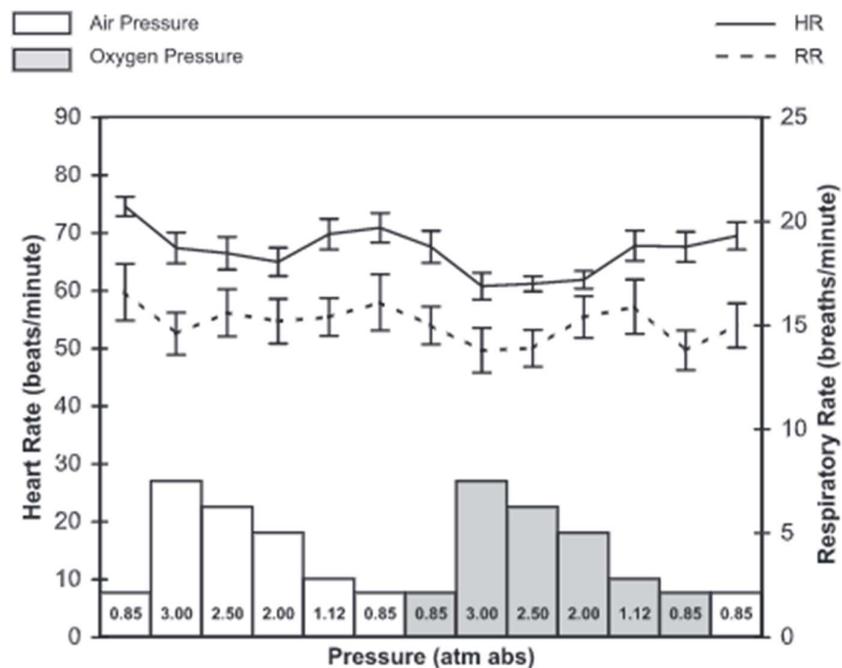


Figure 3-Frequenza respiratoria (RR) e frequenza cardiaca (HR) in soggetti esposti ad ambiente iperbarico<sup>9</sup>.

Anche i valori di pressione arteriosa risentono del trattamento iperbarico, in particolare studi presenti in letteratura <sup>11-12</sup> hanno evidenziato come vi sia un aumento dei valori di pressione arteriosa, in particolare l'incremento maggiore è stato rilevato in termini di pressione sistolica, dove l'aumento è risultato di circa il 9-10%, seguito da un incremento della pressione arteriosa media (circa 8%), mentre più modesto è risultato l'aumento della pressione arteriosa diastolica (6%).

ABP Measure	Pre-HBOT (mmHg)	Post-HBOT (mmHg)	Δ (95% CI)
Mean arterial pressure	91.2 ± 1.9	97.8 ± 1.9	6.6 (6.0, 7.2) *
Systolic arterial pressure	127.0 ± 3.1	138.0 ± 3.1	11.3 (10.3, 12.3) *
Diastolic arterial pressure	73.4 ± 1.7	77.7 ± 1.7	4.3 (3.7, 4.8) *

Data expressed as mean ± standard error (SE); \*  $p < 0.001$ . ABP, arterial blood pressure; HBOT, hyperbaric oxygen therapy.

Figure 4- Incrementi della pressione arteriosa prima e dopo sessioni di ossigenoterapia iperbarica<sup>12</sup>.

Questo cambiamento è modesto nei pazienti senza precedente storia di ipertensione ma diventa clinicamente rilevante nei pazienti con una pregressa storia di ipertensione arteriosa<sup>13</sup>.

ABP Measure	Clinical History of Hypertension	Estimated Mean Difference after HBOT
Mean arterial pressure	Normotensive	1.0 ± 2.7
	Hypertensive	7.7 ± 2.3
Systolic arterial pressure	Normotensive	2.5 ± 4.9
	Hypertensive	13.6 ± 4.1
Diastolic arterial pressure	Normotensive	0.2 ± 1.8
	Hypertensive	4.7 ± 1.5

Figure 5- Incrementi della pressione arteriosa in soggetti normotesi ed ipertesi, sottoposti a trattamento con ossigenoterapia iperbarica.<sup>12</sup>

Il meccanismo alla base di questo incremento pressorio è legato ad una diffusa vasocostrizione legata all'iperossia ematica, che causa ossidazione

dell'ossido nitrico prodotto dall'endotelio, importante fattore di modulazione in senso vasodilatatorio per la muscolatura liscia dei vasi.

Ulteriori contributi alla vasocostrizione includono:

- una diminuzione delle prostaglandine vasodilatatrici,
- un aumento dell'endotelina-1 vasocostrittrice,
- potenzialmente una stimolazione diretta del sistema nervoso ortosimpatico, che esita in un aumento delle concentrazioni plasmatiche di adrenalina e noradrenalina.

Nel complesso, la vasocostrizione arteriolare porta ad un aumento delle resistenze vascolari sistemiche con conseguente ipertensione arteriosa, questo provoca stimolazione dei barocettori e attivazione dei centri cardio-inibitori bulbari con conseguente aumento dell'attività parasimpatica vagale e diminuzione della frequenza cardiaca e della portata.

### 1.6.3 EFFETTI SULL'ORECCHIO MEDIO

L'orecchio medio risulta essere una cavità a contenuto aereo costituito da pareti ossee indeformabili, fatta eccezione per la membrana timpanica, non in diretta comunicazione con l'aria atmosferica. Tale comunicazione è garantita da un canale mucoso, detto Tuba di Eustachio, che collega l'orecchio medio con l'orofaringe, fisiologicamente risulta chiuso e nell'arco della giornata, si apre 2 o 3 volte al giorno per permettere la ventilazione della camera ossea, in risposta a variazioni della pressione<sup>14</sup>.



Figure 6-Condotto uditivo medio<sup>14</sup>

Durante la fase di pressurizzazione, l'aria contenuta nell'orecchio medio riduce il suo volume in risposta all'aumento della pressione ambientale, questo determina un effetto di suzione sulle pareti della cavità dell'orecchio che richiama il timpano verso l'interno, ossia lo introflette. Sono pertanto necessarie manovre attive dette di "compensazione" per aprire la Tuba di Eustachio al fine di ripristinare il volume di aria inizialmente contenuto ed equilibrare la pressione ambiente con quella interna all'orecchio medio. Al contrario, nella fase finale del trattamento iperbarico, l'abbassarsi dei valori pressori causa un incremento del volume di aria presente nella cavità

dell'orecchio medio, tuttavia per gradiente pressorio essa spontaneamente defluisce attraverso la Tuba di Eustachio, senza che siano necessarie manovre aggiuntive<sup>15</sup>.

## 1.7 EFFETTI INDESIDERATI LEGATI AL TRATTAMENTO DI OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA

Sono noti e descritti in letteratura diversi effetti indesiderati e complicanze post procedurali legate al trattamento di ossigenoterapia iperbarica, con gradi di gravità variabile e legati principalmente a fattori individuali.

Di gran lunga, i due effetti collaterali più frequenti e benigni comprendono il barotrauma dell'orecchio medio, che può essere prevenuto o ridotto al minimo insegnando tecniche di compensazione in pazienti coscienti e vigili.

Qualora il paziente non sia nelle condizioni di eseguire correttamente le manovre di compensazione si può ricorrere a tecniche chirurgiche di miringotomia con posizionamento di drenaggio transtimpanico<sup>16-17</sup>.

Un altro disturbo frequente è la claustrofobia, ossia la sensazione di paura legata all'essere confinati in spazi di piccole dimensioni con limitate vie di fuga.

I sintomi correlati a tale disturbo possono includere sudorazione, palpitazioni, iperventilazione, aumento della pressione sanguigna, tremori, ansia, e confusione.

Misure preventive di rassicurazione e educazione del paziente costituiscono i mezzi più efficaci per anticipare episodi spiacevoli e potenzialmente pericolosi, nei casi più estremi in cui tali interventi non siano sufficienti è possibile ricorrere ad un'eventuale sedazione del paziente<sup>17</sup>.

Altri effetti indesiderati più rari ma associati a maggior gravità, derivano dalla tossicità dell'ossigeno, correlata sia all'esposizione acuta sia a quella cronica.

Per quanto riguarda la tossicità acuta da ossigeno iperbarico, nota come Sindrome di Paul Bert, questa consiste in un quadro clinico di tipo epilettiforme dovuto all'incremento della concentrazione delle ROS a livello cerebrale. I sintomi, includono allucinazioni uditive, alterazioni visive, sguardo fisso, nausea, vertigini, ansia e irritabilità, nei casi più gravi è stata descritta la comparsa di attività convulsiva tonico-clonica<sup>18</sup>. Si tratta in ogni caso di un evento reversibile, senza danni residui neurologici e per la risoluzione è sufficiente una riduzione della pressione parziale inspirata di ossigeno<sup>19</sup>.

Gli effetti cronici dell'iperossia, che causano una sindrome restrittiva polmonare (S. di Lorraine Smith), costituiscono una problematica clinica significativa per i lavoratori esposti per ragioni professionali a questo rischio. In ambito clinico, la problematica viene considerata unicamente nei soggetti affetti da patologie polmonari croniche di tipo restrittivo<sup>20</sup>.

## CAPITOLO 2

### 2.1 INDICAZIONI ALL'OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA NEL PAZIENTE CRITICO<sup>21</sup>

Le indicazioni al trattamento iperbarico sono definite a livello europeo dall'European Committee for Hyperbaric Medicine (ECHM):

- Embolia gassosa o aerea;
- Malattia da decompressione;
- Intossicazione da monossido di carbonio (incluse le forme associate ad ustioni, inalazione di fumo o avvelenamento da cianuro);
- Infezioni necrotizzanti dei tessuti molli, inclusa la gangrena gassosa.
- Lesione da schiacciamento, sindrome compartimentale, frattura esposta di grado III b o III c, secondo classificazione di Gustillo ed altre ischemie acute traumatiche;
- Casi selezionati di disturbi neurologici (es. ascesso intracranico);
- Innesti o lembi compromessi nell'immediato periodo post-operatorio;
- Lesioni acute da ustione.

Non tutti i pazienti con tali affezioni sono da considerarsi pazienti critici, sono le forme più gravi con diffuso danno d'organo che richiedono cure intensive. Trovandosi di fronte ad un paziente critico, molti centri sono riluttanti ad iniziare un trattamento con ossigenoterapia iperbarica, ma paradossalmente sono questi pazienti gravemente malati che beneficiano maggiormente dell'aggiunta di OTI alla loro gestione clinica.

## 2.2 CONTROINDICAZIONI ASSOLUTE ALL'OSSIGENOTERAPIA IPERBARICA NEL PAZIENTE CRITICO<sup>22</sup>

La Società Italiana di Medicina Subacquea e Iperbarica (SIMSI) ha definito nell'ottobre del 2018, tramite pubblicazione di una Linea Guida, le controindicazioni al trattamento di ossigenoterapia iperbarica.

Tra le condizioni elencate nel documento redatto, quelle che coinvolgono il paziente critico e che quindi devono essere escluse prima di esporre il paziente all'ossigeno iperbarico sono:

- Pneumotorace (PNX) non drenato: questo perché è possibile che durante la fase di decompressione, dell'aria penetri nello spazio pleurico e aumentando di volume, possa scatenare o peggiorare lo pneumotorace.
- Stato di grande male epilettico: l'aumentata concentrazione di ossigeno circolante potrebbe ridurre la soglia di stimolo per una crisi nel corso del trattamento.

## 2.3 REQUISITI DELLA STRUTTURA IPERBARICA E SELEZIONE DELL'ATTEZZATURA PER LA CURA DEL PAZIENTE CRITICO

### 2.3.1 CONSIDERAZIONI GENERALI

Tutti i centri iperbarici hanno caratteristiche specifiche in termini di posizione, camere, dispositivi, ambiente e sicurezza. Tuttavia, per pazienti provenienti da reparti di terapia intensiva sono richieste condizioni altrettanto specifiche, che spesso sono molto lontane da quelle considerate per la pratica iperbarica elettiva.

Questi vincoli non sono necessariamente insormontabili, ma devono essere tenuti in considerazione e mitigati prima di accettare per il trattamento un paziente critico<sup>21</sup>.

Nonostante i potenziali vantaggi dell'ossigenoterapia iperbarica, che dovrebbero essere indipendenti rispetto alla posizione e alla modalità del trattamento, è chiaro che il rischio di complicanze in pazienti critici dipenda fortemente da fattori legati al tipo di camera iperbarica impiegata, alla sua posizione, all'esperienza del personale coinvolto e dal tipo di attrezzature disponibili<sup>23</sup>.



*Figure 7-Camera iperbarica durante trattamento di paziente critico*

### 2.3.2 POSIZIONE

Idealmente, una camera iperbarica dedicata a pazienti critici dovrebbe essere fisicamente integrata all'unità di terapia intensiva, o almeno immediatamente adiacente ad essa, in modo tale da ridurre al minimo le criticità legate al trasporto del paziente.

Tuttavia la maggior parte delle camere iperbariche non si trovano all'interno o adiacenti ai reparti, ed i potenziali benefici del trattamento di ossigenoterapia iperbarica devono essere bilanciati con i rischi derivanti dal trasporto del paziente. L'utilizzo di pratiche sicure per il trasporto intraospedaliero e la presenza di operatori sanitari qualificati possono ridurre al minimo il rischio per questi pazienti<sup>24</sup>.

Questo discorso riguarda principalmente camere iperbariche multiposto, le quali per dimensioni ed organizzazione strutturale non possono essere spostate e richiedono che il paziente venga trasferito all'interno<sup>25</sup>.

Le camere iperbariche monoposto, il cui impiego in ambito sanitario è peraltro vietato dalle normative italiane, possono invece essere portate direttamente all'interno del reparto di terapia intensiva. In questo tipo di camere l'accesso al paziente non è diretto e in caso di necessità va interrotto il trattamento; lo spazio di manovra è limitato ed inoltre i dispositivi necessari al monitoraggio e all'infusione di farmaci rimangono per lo più all'esterno. I ventilatori meccanici per il supporto respiratorio associati alle camere monoposto sono scarsamente performanti e richiedono modalità di ventilazione controllata con miorisoluzione e stadi profondi di sedazione<sup>26</sup>.

### 2.3.3 MONITORAGGIO DEL PAZIENTE

Una componente essenziale nella gestione del paziente critico è il monitoraggio costante di una serie di variabili fisiologiche; in particolare citiamo l'elettrocardiogramma, la saturazione di ossigeno nel sangue, la pressione arteriosa (invasiva o non invasiva), la temperatura ed il valore di anidride carbonica espirata, qualora il paziente fosse intubato e ventilato meccanicamente. Un sistema ottimale consentirà la continuità del monitoraggio dall'unità di terapia intensiva, durante il trasporto e durante il trattamento iperbarico, mediante l'impiego di apparecchiature simili o identiche<sup>23</sup>. Durante i trattamenti iperbarici su pazienti critici deve quindi essere garantito un monitoraggio adeguato, utilizzando dispositivi elettromedicali idonei all'impiego in tale ambiente.

Il monitor defibrillatore "Corpuls3 hyperbaric" è un dispositivo elettromedicale certificato per l'utilizzo in sicurezza all'interno delle camere iperbariche durante l'esecuzione di trattamenti terapeutici.

Presenta le seguenti funzioni di monitoraggio e diagnostiche<sup>27</sup>:

- ECG
- ECG diagnostico
- Feedback RCP
- Ossimetria (SpO<sub>2</sub>)
- Ossimetria estesa (SpCO®, SpHb, SpMet®)
- Capnometria (CO<sub>2</sub>)
- Temperatura (Temp)
- Monitoraggio non invasivo della pressione sanguigna (NIBP)
- Monitoraggio invasivo della pressione sanguigna (IBP)

Il “Corpuls3” dispone inoltre delle seguenti funzioni terapeutiche:

- Defibrillazione
- Cardioversione
- Stimolazione

#### 2.3.4 ALIMENTAZIONE ELETTRICA E BATTERIE

L'elevata pressione parziale e l'eventuale aumento della frazione di ossigeno nell'atmosfera della camera, combinato con un prodotto combustibile e una fonte di accensione (ad es. scintille elettrostatiche o una superficie surriscaldata) costituiscono il classico “Triangolo di fuoco”, pertanto durante tutta la procedura il rischio di esplosioni ed incendi risulta aumentato ed una delle fonti più probabili di innesco è l'utilizzo di dispositivi elettrici<sup>21</sup>.

La maggior parte delle linee guida e dei codici di sicurezza raccomandano l'utilizzo di impianti d'alimentazione a bassa tensione oppure di batterie, è consigliato impiegare connettori elettrici dedicati che non possano essere confusi o interconnessi con altri sistemi e che siano avvitabili o protetti in altro modo da una disconnessione accidentale durante il trattamento ad alta pressione.

Molte delle apparecchiature utilizzate nei reparti di terapia intensiva sono dotate di batterie ricaricabili, progettate principalmente per il trasporto di pazienti e per garantire la continuità delle cure durante interruzioni di breve durata dell'alimentazione.

A condizione che la durata della batteria sia sufficiente e che la tipologia di batteria sia stata testata ed autorizzata per l'uso in ambiente iperbarico, i dispositivi alimentati a batteria possono essere utilizzati durante le sedute di ossigenoterapia iperbarica.

Le batterie non devono essere caricate mentre è in corso la procedura, in quanto la fase di ricarica risulta essere il trigger più comune di guasti ad alta temperatura. Inoltre, alcuni tipi di batterie durante la ricarica rilasciano idrogeno, anch'esso un elemento altamente infiammabile, che aumenterebbe ulteriormente il già alto rischio di incendio.

Tra le batterie al piombo-acido, storicamente meno recenti rispetto alle moderne batterie al litio, vanno escluse dall'utilizzo in ambiente iperbarico quelle non sigillate e quelle che presentano la componente elettrolitica in forma liquida, in quanto si ha un elevato rischio di fuoriuscita della componente acida, con esiti potenzialmente dannosi.

Anche le batterie al litio, nonostante siano di più recente introduzione, non risultano prove di rischio ed in particolare quelle di comune utilizzo, impiegate per l'alimentazione di cellulari, tablet e lettori musicali, risentono di ripetute esposizioni a pressurizzazioni, che esita in una riduzione delle prestazioni, della durata e della loro stabilità, pertanto qualora fossero autorizzate all'uso in ambiente iperbarico andrebbe specificato il numero massimo di cicli di utilizzo prima della dismissione, che dovrebbero essere minori rispetto ad un utilizzo a normale pressione atmosferica<sup>23</sup>.

All'interno delle camere iperbariche è possibile posizionare, attraverso appositi passaggi a scafo, prese elettriche a bassa tensione di tipo interbloccato, conformi alle normative tecniche di sicurezza nazionali ed internazionali.

Per quanto riguarda il contesto italiano, la legislatura principale che regola la sicurezza di ambienti iperbarici in campo medico sanitario, fa riferimento alle linee guida redatte nel 1998 dall' Istituto Superiore per la

Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro (ISPESL) ed alla più recente normativa europea EN 14931:2006.

### 2.3.5 SEDAZIONE E MIORISOLUZIONE

In condizioni iperbariche, l'assorbimento dei farmaci per via parenterale può essere diverso rispetto alle condizioni standard come conseguenza della vasocostrizione periferica dovuta all'iperossigenazione ematica, in considerazione di tale fenomeno, la via di somministrazione più adeguata risulta essere quella endovenosa<sup>28</sup>.

La sedazione e l'analgesia del paziente critico intubato devono essere mantenute ottimali a causa dei numerosi eventi che si verificano durante una seduta di ossigenoterapia iperbarica: il trasporto intra o interospedaliero, variazioni di temperatura, otalgia o dolore legato alla patologia di base e l'eventuale tolleranza al ventilatore, sono alcuni esempi di condizioni che possono creare agitazione ed alterazioni dell'omeostasi in pazienti già molto fragili ed instabili.

La sedazione abituale che combina un farmaco oppioide (fentanil o remifentanil) con un farmaco ipnotico come il midazolam o il propofol è ben tollerata in condizioni iperbariche ed effetti farmacocinetici o farmacodinamici clinicamente significativi non sono stati dimostrati per i farmaci anestetici fino a livelli pressori di 6 ATA<sup>29</sup>.

Infine, l'utilizzo di bloccanti neuromuscolari è possibile solamente se associato ad una sedazione sufficiente, con gli stessi vantaggi e svantaggi legati all'uso in terapia intensiva<sup>30</sup>.

### 2.3.6 INFUSIONE DI LIQUIDI

All'interno di una camera iperbarica, le infusioni endovenose procedono normalmente per gravità, a condizione che si presti attenzione al livello del fluido nella camera di gocciolamento, il quale deve trovarsi ad un livello più alto rispetto al sito d'ingresso. Tuttavia, la moderna pratica clinica, in particolar modo per quanto riguarda pazienti ricoverati in terapia intensiva, richiede che più infusioni siano somministrate mediante l'utilizzo di pompe peristaltiche o pompe siringa, in modo tale da garantire maggiore accuratezza e costanza nel dosaggio dei farmaci.

Esistono evidenti vantaggi clinici se lo stesso dispositivo infusionale può essere utilizzato nell'unità di terapia intensiva, durante trasporto ed in corso di trattamento iperbarico, poiché questo elimina la necessità di interrompere le infusioni di farmaci dose-critici e riduce il rischio di errori umani legati al cambio di strumentazione<sup>23</sup>.

L'instabilità emodinamica durante sedute di ossigenoterapia iperbarica è un'entità clinicamente riconosciuta, in particolare durante le fasi di compressione e decompressione. Possibili cause di questa instabilità includono fisiologiche risposte cardiovascolari alla pressurizzazione ma possono essere anche associate a malfunzionamenti dei dispositivi di infusione.

Risulta quindi necessario che tutti questi dispositivi siano testati per la compatibilità all'interno di un ambiente iperbarico, tenendo presente che anche dispositivi regolarmente approvati per l'utilizzo iperbarico possono andare incontro ad alterazioni delle prestazioni durante le varie fasi del trattamento.

Un recente studio del 2017<sup>31</sup> ha preso in esame la pompa-siringa BBraun Perfusor Space™, ampiamente utilizzata sia nei reparti di terapia intensiva, sia all'interno delle camere iperbariche. Tale studio ha analizzato la precisione del dispositivo nell'erogare un volume costante preimpostato variando la pressione dell'ambiente circostante, nonostante i risultati ottenuti rientrassero in criteri di prestazione accettabili, è stato evidenziato come nelle fasi di pressurizzazione si andasse incontro ad una riduzione dei volumi erogati mentre si è osservata un'erogazione in eccesso in corso di depressurizzazione.

Questo evidenzia come sia necessario un costante monitoraggio anche di questo aspetto, con possibili aggiustamenti in termini di portata e velocità d'infusione durante la seduta iperbarica, nonostante vengano utilizzati dispositivi regolarmente approvati.

### 2.3.7 SISTEMI DI DRENAGGIO

- **DRENAGGIO PASSIVO:** questo tipo di drenaggio, tra cui rientrano ad esempio cateteri vescicali o sondini nasogastrici, può liberamente essere impiegato in ambiente iperbarico, con l'accortezza di verificare che l'aumento di pressione non determini barotraumi ai distretti interessati e che non si verifichi fuoriuscita del contenuto delle sacche di raccolta durante la fase di decompressione, per aumento del volume aereo<sup>23</sup>.
- **DRENAGGI PLEURICI:** per questo tipo di drenaggio è importante considerare innanzitutto che essi vengono, di routine, collegati a sistemi d'evacuazione di tipo tricamerale. Essi possono essere mantenuti in condizioni di neutralità rispetto alla pressione ambientale o collegati ad un sistema d'aspirazione presettato, sulla base delle esigenze cliniche del paziente. In tutti i casi, devono essere garantite le stesse condizioni d'aspirazione impostate per il paziente anche durante tutte le fasi del trattamento iperbarico<sup>23</sup>.

I sistemi d'evacuazione tricamerale sono costituiti da due compartimenti a contenuto aereo, posti ai lati di una terza camera contenente acqua; tali spazi risultano influenzati in termini di volume e pressione dalle variazioni ambientali che si vengono a creare sia durante la fase di pressurizzazione, sia durante la fase decompressiva. Il risultato di queste alterazioni determina una condizione di aspirazione che non rispetta i valori impostati precedentemente all'inizio del trattamento iperbarico, potendo altresì causare eventi dannosi per il paziente, come

lesioni pleuriche barotraumatiche oppure reflusso di materiale organico precedentemente aspirato<sup>32</sup>.

Nello studio qui citato<sup>33</sup> sono stati osservati i cambiamenti relativi alle caratteristiche d'aspirazione in corso di seduta iperbarica, utilizzando un sistema di raccolta tricamerale per drenaggio pleurico.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- FASE DI PRESSURIZZAZIONE: l'incremento della pressione ambiente all'interno della camera iperbarica comporta una diminuzione del volume d'aria presente nella camera di raccolta, di conseguenza all'interno di questo comparto, in comunicazione con la cavità pleurica, si sviluppa una pressione negativa con un rapporto di proporzionalità diretta rispetto alla velocità di pressurizzazione.

Nel modello sperimentale dello studio, l'acqua contenuta nella seconda camera ha refluito verso la camera di raccolta, richiamata dalla pressione negativa.

Tale pressione negativa deve essere riportata ai livelli iniziali mediante l'introduzione di aria dall'esterno per mezzo di valvole d'equilibrio, onde evitare un'eccessiva aspirazione a livello della cavità pleurica, con rischio di sovradistensione del polmone controlaterale e spostamento del mediastino. In relazione a tale negativizzazione spontanea della pressione in camera di raccolta, durante la fase di pressurizzazione è indispensabile regolare costantemente la pressione negativa imposta tramite il sistema in aspirazione.

- FASE IPERBARICA STAZIONARIA: durante questa fase si osservano valori di aspirazione più negativi rispetto a quelli impostati a pressione atmosferica (1 ATA), pertanto tali valori andranno regolati ed impostati, monitorando di continuo le variazioni relative ai cambiamenti pressori.
- FASE DI DEPRESSURIZZAZIONE: l'aumento di volume d'aria all'interno della camera di raccolta viene solitamente sfiato attraverso la camera ad acqua e per mezzo dei sistemi d'aspirazione. Il sistema va tenuto in equilibrio tramite l'azionamento delle valvole d'equilibrio del sistema tricamerale, assicurandosi che i sistemi di efflusso siano efficaci in quanto l'aumento di pressione correlato può indurre lesioni barotraumatiche pleuro-parenchimali.

La raccomandazione generale è quella di limitare la velocità delle variazioni di pressione all'interno dell'ambiente iperbarico, non superando mai il limite di 0,1 ATA/minuto. Il personale addetto all'assistenza di pazienti con drenaggi pleurici dev'essere in possesso delle competenze adeguate alla gestione di questi dispositivi.

## 2.4 PRINCIPI DI VENTILAZIONE MECCANICA

### 2.4.1 VENTILAZIONE SPONTANEA

La ventilazione è un processo fisiologico risultante dall'azione coordinata tra i centri nervosi del respiro, localizzati a livello del tronco encefalico, ed i muscoli respiratori. La funzione primaria di tale processo è quella di facilitare e garantire lo scambio di gas tra l'aria inspirata e il sistema circolatorio, mantenendo a livello alveolare una concentrazione di ossigeno maggiore rispetto a quella del sangue presente a livello dei capillari polmonari ed eliminando nell'aria ambiente l'anidride carbonica derivante dai processi metabolici dell'organismo<sup>34</sup>.

Il flusso d'aria inspirato ed espirato si viene a creare grazie ad una differenza di pressione tra l'interno degli alveoli e l'aria ambiente.

Nel respiro spontaneo, la differenza di pressione durante la fase inspiratoria è raggiunta grazie al lavoro dei muscoli inspiratori, la contrazione del diaframma e dei muscoli intercostali esterni portano all'espansione della gabbia toracica e consensualmente dei polmoni.

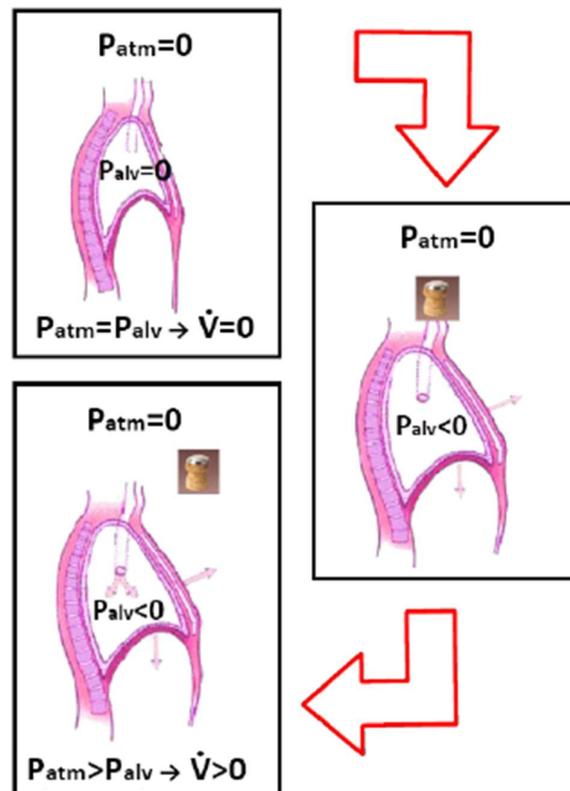


Figure 8- Nell'immagine è schematizzato il gradiente pressorio necessario ad ottenere un  $\dot{V}$  durante il respiro spontaneo.<sup>35</sup>

Il conseguente aumento di volume, in base alla legge fisica di Boyle ( $P \times V = k$ ) determina un calo della pressione alveolare ad un valore sub-atmosferico, che richiama quindi aria dall'esterno verso l'interno dei polmoni. Terminata l'inspirazione il sistema toraco-polmonare ritorna alla sua capacità funzionale residua per effetto delle forze di retrazione elastica, comportando un incremento della pressione alveolare che risulta essere, durante l'espiazione, maggiore della pressione atmosferica<sup>35</sup>.

#### 2.4.2 VENTILAZIONE MECCANICA

La ventilazione meccanica è una tecnica per il supporto vitale a breve termine che consiste nell'utilizzo di un dispositivo meccanico esterno al paziente, chiamato ventilatore, la cui funzione è quella di sostituirsi, totalmente o in parte, al lavoro della muscolatura respiratoria.

L'utilizzo di tale tecnica si rende necessaria in molteplici contesti; può essere impiegata per proteggere le vie aeree e controllare la respirazione del paziente durante un intervento chirurgico in anestesia generale, oppure per migliorare lo scambio gassoso col sangue qualora la fisiologica ventilazione sia insufficiente a mantenere adeguati livelli di ossigeno ed anidride carbonica, o ancora la ventilazione meccanica può essere sfruttata come supporto alla muscolatura respiratoria per ridurre il lavoro e preservarne la funzionalità in condizioni patologiche che richiedono un aumento dello sforzo necessario a compiere il singolo atto respiratorio<sup>36</sup>.

La sostanziale differenza rispetto alla fisiologica ventilazione è rappresentata dal fatto che in questo caso il gradiente pressorio necessario alla formazione di un flusso inspiratorio dall'esterno verso l'interno dei polmoni è generato dalla macchina, la quale applica a livello delle alte vie aeree una pressione maggiore

rispetto a quella alveolare, spingendo così un dato volume all'interno del sistema respiratorio. Al termine della fase inspiratoria il ventilatore interrompe la generazione di questo gradiente pressorio ed anche in questo caso l'espirazione avviene passivamente grazie al ritorno elastico del sistema toraco-polmonare<sup>35</sup>.

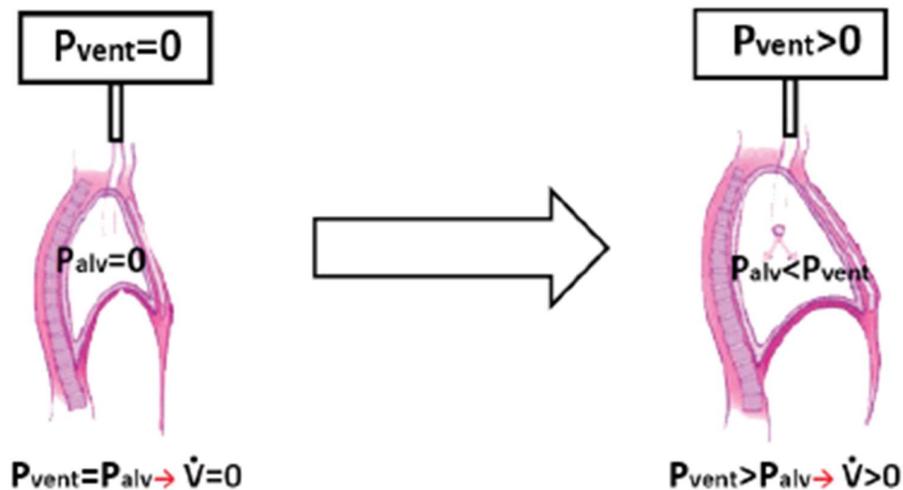


Figure 8- Nell'immagine è schematizzato il gradiente pressorio utile a creare un  $\dot{V}$  durante ventilazione meccanica a pressione positiva.<sup>35</sup>

Si distinguono due tipologie di ventilazione meccanica:

- **NON INVASIVA (NIV - non invasive ventilation):** viene effettuata tramite l'utilizzo di interfacce esterne quali maschere aderenti oronasali o facciali oppure tramite un casco che circonda completamente la testa del soggetto. Tale modalità viene riservata a pazienti che siano in grado di iniziare in maniera spontanea l'atto respiratorio, in quanto il rationale di tale tecnica è quello di supportare il lavoro della muscolatura respiratoria senza sostituirsi totalmente ad essa. Le principali indicazioni riguardano l'insufficienza respiratoria acuta o cronica riacutizzata, l'edema polmonare, riacutizzazioni in corso di broncopneumopatia cronica ostruttiva ed il supporto nella fase di svezzamento da ventilazioni di tipo invasivo<sup>37</sup>.

- **INVASIVA:** prevede il posizionamento di un tubo oro tracheale, naso tracheale, di una cannula tracheostomica oppure di una maschera laringea. Questi dispositivi garantiscono la diretta comunicazione tra il circuito del ventilatore e le vie aeree del paziente, permettendo oltre che a ventilazioni di supporto anche modalità in cui si ottiene un controllo totale dell'atto respiratorio, per tutti quei casi in cui il paziente non sia in grado di eseguirlo in maniera autonoma.

#### 2.4.3 MODALITA' DI VENTILAZIONE MECCANICA<sup>35</sup>

Possiamo distinguere tre principali modalità di ventilazione:

- **VENTILAZIONE CONTROLLATA:** con questa modalità il ventilatore è in grado di svolgere completamente tutto il lavoro respiratorio, grazie alle impostazioni scelte viene guidata la respirazione in tutte le sue fasi e, in assenza di trigger, l'inspirazione è iniziata, mantenuta e terminata dal ventilatore.

Le più comuni tecniche di ventilazione controllata sono tre: una volumetrica, (ventilazione a volume controllato) e due pressometriche (ventilazione a pressione controllata e ventilazione a pressione controllata con volume garantito).

- **VENTILAZIONE ASSISTITA:** tramite questa modalità il ventilatore integra l'atto respiratorio cominciato in maniera spontanea dal paziente. Il paziente, per ricevere un flusso d'aria, deve essere in grado di superare la soglia di trigger inspiratorio impostata, qualora non lo fosse,

la pressione di supporto non è erogata e, di fatto, non abbiamo alcuna ventilazione.

- VENTILAZIONE ASSISTITA/CONTROLLATA: si tratta di una modalità di ventilazione controllata la cui finalità è quella di erogare atti inspiratori di dimensione e durata prefissate, lasciando al paziente la possibilità di aumentare la frequenza respiratoria rispetto a quella impostata. Il paziente ha la possibilità di innescare un atto inspiratorio meccanico, ma non può realizzarne uno spontaneo.

## 2.5 VENTILAZIONE MECCANICA IN AMBIENTE IPERBARICO

Negli ultimi anni l'estensione dell'ossigenoterapia iperbarica in pazienti critici ricoverati presso reparti di terapia intensiva, ha inevitabilmente creato l'esigenza di sviluppare metodiche e strumentazioni che garantissero un'assistenza ventilatoria meccanica sicura ed efficace durante tutte le fasi del trattamento anche all'interno delle camere iperbariche.

Pazienti con embolia gassosa arteriosa, grave avvelenamento da monossido di carbonio, fasciti necrotizzanti, gangrena gassosa o lesioni midollari richiedono spesso un supporto ventilatorio meccanico; tale necessità può essere legata direttamente alla natura della patologia stessa oppure all'obiettivo di massimizzare la pressione parziale di ossigeno arterioso durante il trattamento<sup>38</sup>.

L'ambiente iperbarico a scopo clinico può raggiungere valori di pressione pari a 6 atmosfere assolute (ATA), tuttavia i ventilatori utilizzati normalmente in terapia intensiva sono progettati per un utilizzo in ambiente normobarico ed il loro funzionamento risulta spesso disturbato da incrementi della pressione

ambientale. I dati sul funzionamento dei ventilatori in camera iperbarica<sup>39</sup>, rendono evidente che ogni dispositivo si comporta in modo diverso in tali particolari condizioni, il comportamento di ogni specifico tipo di ventilatore non può essere previsto con precisione applicando le sole leggi fisiche sui gas, bensì è necessario considerare dettagli tecnici di progettazione del singolo dispositivo e modelli fisici che integrino equazioni derivanti dalle leggi sulla meccanica dei fluidi.

Alcune criticità accomunano tutti i dispositivi per la ventilazione meccanica e devono essere sempre prese in considerazione al fine di non incorrere in incidenti durante lo svolgimento del trattamento di ossigenoterapia iperbarica, in particolare, vanno sottolineati i seguenti aspetti:

1. La densità di un gas aumenta in maniera direttamente proporzionalmente all'aumento della pressione ambientale, determinando un incremento dei flussi turbolenti all'interno dei circuiti del ventilatore. Questo si traduce in un incremento delle resistenze al flusso delle vie aeree del paziente, richiedendo una maggiore pressione di insufflazione che il dispositivo deve esercitare per permettere una corretta espansione dei polmoni<sup>40</sup>.

Le conseguenze cliniche legate a tale fenomeno, nel caso esso non venga adeguatamente compensato sono l'ipoventilazione dovuta alla diminuzione del flusso proveniente dal ventilatore e/o l'aumento del lavoro respiratorio in caso di ventilazioni in modalità assistita<sup>41</sup>.

2. Qualsiasi ventilatore deve rispettare le norme per la sicurezza in camera iperbarica. Queste vertono in modo particolare sulla prevenzione del rischio di incendio, con indicazioni riguardanti l'alimentazione elettrica, il divieto all'utilizzo di lubrificanti oleosi potenzialmente infiammabili e di

mantenere la frazione di ossigeno su valori inferiori al 23% nell'ambiente della camera durante la procedura.

3. Eventuali meccanismi e sensori del ventilatore contenuti in spazi ermeticamente sigillati possono essere danneggiati durante le fasi di compressione e decompressione.

4. Le camere iperbariche tendono ad avere dimensioni ridotte con limitazioni spaziali per la disposizione e l'utilizzo di dispositivi che devono rimanere in prossimità del paziente. L'accesso per il personale è ridotto e pertanto il ventilatore è auspicabile che non richieda continue interazioni da parte degli operatori.

Conoscendo gli effetti specifici dell'esposizione iperbarica sul funzionamento del ventilatore, le impostazioni di quest'ultimo possono e devono essere adattate per mantenere una ventilazione costante durante tutte le fasi del trattamento iperbarico, in caso contrario, senza le opportune correzioni il supporto ventilatorio potrebbe diventare inadeguato con un risvolto clinico negativo sulle condizioni del paziente<sup>42</sup>.

#### 2.5.1 STRATEGIE DI VENTILAZIONE MECCANICA IN AMBIENTE IPERBARICO

Tra le diverse strategie di ventilazione meccanica abitualmente utilizzate in contesti di terapia intensiva, in corso di trattamento iperbarico vengono maggiormente consigliate e preferite modalità di ventilazione controllata, rispetto a ventilazioni assistite, nonostante non vi siano dati scientifici in letteratura che supportino pienamente questa scelta.

Nello specifico sono ampiamente utilizzate nella pratica clinica ventilazioni a volume controllato oppure ventilazioni a pressione controllata.

Nella ventilazione a volume controllato (VCV) vengono impostati come parametri fissi il volume corrente erogato dal ventilatore al paziente ed il tempo necessario per erogare tale volume. Durante la fase inspiratoria, il flusso di gas viene mantenuto costante al livello prestabilito grazie ad una regolazione interna che modula l'apertura della valvola inspiratoria. Nei ventilatori convenzionali, questo meccanismo funziona bene solo in condizioni normobariche, poiché la relazione tra l'apertura della valvola inspiratoria e il flusso volumetrico è costante solo per una definita densità del gas che la attraversa. In ambiente iperbarico, l'aumento della densità del gas legata alla pressurizzazione della camera, provoca una riduzione del flusso quando il grado di apertura della valvola viene mantenuto costante. Pertanto, il volume corrente erogato in corso di ventilazione a volume controllato diminuisce all'aumentare della pressione ambiente oppure viene prolungata la fase inspiratoria per ottenere il volume desiderato, determinando una riduzione della frequenza respiratoria<sup>43</sup>.

Nei ventilatori progettati appositamente per l'uso iperbarico la regolazione del volume corrente erogato viene eseguita automaticamente, a condizione di rispettare i limiti operativi definiti dal costruttore<sup>44</sup>.

### 2.5.2 RIDUZIONE DELL'OSSIGENAZIONE DOPO TRATTAMENTO IPERBARICO

In aggiunta alle difficoltà che accompagnano il trattamento di ossigenoterapia iperbarica nel paziente che necessita un supporto ventilatorio meccanico, ulteriore fattore che deve essere tenuto in considerazione per un migliore outcome clinico, risulta essere una riduzione transitoria dell'ossigenazione

ematica osservata al rientro del paziente nel reparto di terapia intensiva, nelle ore successive al trattamento in camera iperbarica<sup>8</sup>.

Le cause fisiopatologiche alla base di questo fenomeno non sono ancora state descritte con precisione, in letteratura si hanno pochi studi scientifici a riguardo che si concentrano principalmente sulla constatazione clinica di tale alterazione.

I possibili meccanismi responsabili di una riduzione transitoria dell'ossigenazione ematica in seguito a trattamento iperbarico sono<sup>45</sup>:

- Aumento della commistione venosa polmonare al sangue arterioso
- Blocco della vasocostrizione polmonare riflessa all'ipossia
- Atelettasia indotta dall'iperossia
- Peggioramento dell'efficienza dell'ossigeno legata a cambiamenti nella posizione del paziente
- Modifiche nell'infusione di farmaci vasoattivi
- Ventilazione meccanica inadeguata, dovuta a perdita della pressione positiva di fine espirazione o della pressione di supporto inspiratorio durante il trasporto, la movimentazione o il cambio di ventilatore.

Questa alterazione post procedurale si traduce clinicamente nella necessità di modificare le impostazioni di ventilazione per compensare al deterioramento dell'ossigenazione ematica, in genere l'intervento più diffuso consiste nell'aumentare la frazione percentuale di ossigeno inspiratoria ( $FiO_2$ ), meno frequentemente si ricorre ad incrementi della PEEP o della pressione di supporto.

Attualmente non sono stati dimostrati o descritti effetti a medio o lungo termine legati a questo fenomeno transitorio<sup>46</sup>.

**Table 3**  
**Characteristics of oxygenation and related mechanical ventilation parameters; data are mean (standard deviation)**

Respiratory parameter	Pre-HBOT	Return to ICU	+1 h	+2 h	+3 h	+6 h
F <sub>i</sub> O <sub>2</sub>	0.47 (0.1)	0.49 (0.2)	0.47 (0.1)	0.46 (0.1)	0.44 (0.1)	0.43 (0.2)
P <sub>a</sub> O <sub>2</sub> (mmHg)	141 (85)	101 (54)	104 (28)	118 (35)	115 (32)	116 (43)
P <sub>a</sub> O <sub>2</sub> /F <sub>i</sub> O <sub>2</sub> ratio	301 (99)	221 (87)	234 (75)	274 (86)	274 (16)	278 (78)
S <sub>a</sub> O <sub>2</sub> (%)	98 (2)	95 (5)	96 (5)	97 (24)	97 (1)	97 (2)
P <sub>a</sub> CO <sub>2</sub> (mmHg)	43 (7)	48 (9)	45 (10)	43 (8)	43 (7)	43 (6)
Respiratory rate min <sup>-1</sup>	17 (4)	16 (4)	17 (4)	17 (4)	16 (4)	17 (4)
Tidal volume (mL)	551 (170)	553 (170)	549 (130)	540 (150)	558 (130)	549 (150)
PEEP (cmH <sub>2</sub> O)*	7.0 (3.0)	7.1 (3.2)	7.1 (3.3)	7.1 (3.3)	6.9 (3.1)	6.9 (3.1)
I:E Ratio (1:)	2.4 (0.7)	2.4 (0.6)	2.4 (0.6)	2.4 (0.7)	2.5 (0.7)	2.4 (0.7)
Pressure support (cmH <sub>2</sub> O)	11 (3)	11 (3)	11 (3)	11 (3)	12 (3)	11.0 (3)

*Figura 9-Caratteristiche dell'ossigenazione arteriosa e dei parametri ventilatori<sup>45</sup>*

## CAPITOLO 3

### 3.1 OBIETTIVO

L'obiettivo di questa tesi è quello di definire, con i dati a disposizione, se il trattamento di ossigenoterapia iperbarica effettuato su pazienti ricoverati presso i reparti di terapia intensiva dell'Ospedale Policlinico San Martino di Genova e ventilati meccanicamente abbia determinato alterazioni significative dei parametri emodinamici e respiratori e se si siano verificate complicanze periprocedurali.

Nello specifico l'analisi dei dati è volta a:

1. Valutare se esista una differenza significativa nei valori di: pressione parziale di ossigeno e di anidride carbonica, concentrazione di lattati, pH e saturazione di ossigeno a livello arterioso, prima e dopo il trattamento con ossigenoterapia iperbarica.
2. Valutare se esista una differenza significativa nei valori del rapporto tra pressione parziale di ossigeno arterioso e frazione inspiratoria di ossigeno (rapporto P/F), prima e dopo il trattamento con ossigenoterapia iperbarica.
3. Valutare se esista una differenza significativa tra i valori di pressione arteriosa media e frequenza cardiaca, prima e dopo il trattamento con ossigenoterapia iperbarica.
4. Rilevare eventuali complicanze cliniche periprocedurali correlabili con il trattamento con ossigenoterapia iperbarica.

## 3.2 STRUTTURA DEL CAMPIONE

Nello studio sono stati inclusi retrospettivamente 9 pazienti ricoverati presso i reparti di terapia intensiva dell'Ospedale Policlinico San Martino di Genova sottoposti ad almeno una seduta di ossigenoterapia iperbarica nel periodo gennaio 2019 e dicembre 2021.

I criteri di inclusione erano quindi:

- Assistenza ventilatoria meccanica invasiva

Nella prossima tabella (tabella 2) viene rappresentata una visione macro del campione utilizzato, in cui sono incluse a scopo descrittivo le variabili:

- Genere
- Età
- Patologia principale
- Numero di sedute di ossigenoterapia iperbarica effettuate in regime di ventilazione meccanica

PROGRESSIVO	GENERE	ETA'	PATOLOGIA PRINCIPALE	NUMERO SEDUTE OTI
1	maschio	87	Intossicazione da CO	1
2	maschio	50	Fascite necrotizzante arto inferiore sx	10
3	maschio	55	Embolia gassosa iatrogena	3
4	maschio	84	Gangrena pelvica	1
5	femmina	64	Gangrena pelvica	8
6	femmina	48	Mediastinite	12
7	femmina	73	Fascite necrotizzante arto inferiore dx	5
8	femmina	34	Subamputazione traumatica arto inferiore dx	2
9	femmina	63	Gangrena pelvica	5

Tabella 2

### 3.3 MATERIALI E METODI

Sono stati registrati all'interno di un database i dati su parametri ventilatori ed emodinamici relativi ad un totale di 47 sedute di ossigenoterapia iperbarica, effettuate su pazienti in ventilazione meccanica invasiva.

Tra i parametri ventilatori in particolare sono stati valutati:

- pressione parziale di ossigeno arterioso ( $\text{PaO}_2$ )
- pressione parziale di anidride carbonica arteriosa ( $\text{PaCO}_2$ )
- concentrazione di lattati nel sangue arterioso
- saturazione di ossigeno arteriosa
- Rapporto tra pressione parziale di ossigeno arterioso e frazione di ossigeno inspiratoria ( $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ )

Tra i parametri circolatori:

- Pressione arteriosa media (PAM)
- Frequenza cardiaca

I parametri sono stati ottenuti consultando il diario clinico ed i referti delle emogasanalisi arteriose riportati nelle cartelle cliniche dei pazienti in esame.

Per ciascuna seduta è stato inserito nel database il valore di ciascun parametro analizzato prima e dopo il trattamento di ossigenoterapia iperbarica.

I dati sono stati analizzati con un modello lineare misto per tenere conto delle misure ripetute sugli stessi soggetti. Ogni variabile di outcome è stata modellizzata in funzione dell'effetto pre-post trattamento ed il numero di sedute di ossigenoterapia iperbarica.

In particolare, è stata indagata l'ipotesi di una assenza di differenze statisticamente significative, per quanto riguarda i parametri oggetto dello studio, tra i valori precedenti le sedute OTI e quelli rilevati successivamente ai trattamenti. Questa ipotesi appare rilevante ai fini di confermare la stabilità

clinica dei pazienti critici, per quanto sottoposti a ventilazione meccanica, in corso di ossigenoterapia iperbarica.

### 3.4 RISULTATI

I parametri ventilatori rilevati sui pazienti oggetto del presente studio sono stati:

- pressione parziale di ossigeno arterioso ( $\text{PaO}_2$ )
- pressione parziale di anidride carbonica arteriosa ( $\text{PaCO}_2$ )
- concentrazione di lattati nel sangue arterioso
- saturazione di ossigeno arteriosa
- Rapporto tra pressione parziale di ossigeno arterioso e frazione di ossigeno inspiratoria ( $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ )

Per quanto riguarda la pressione parziale di ossigeno a livello arterioso, la differenza tra valori pretrattamento e post-trattamento non è stata statisticamente significativa ( $p=0.482$ )

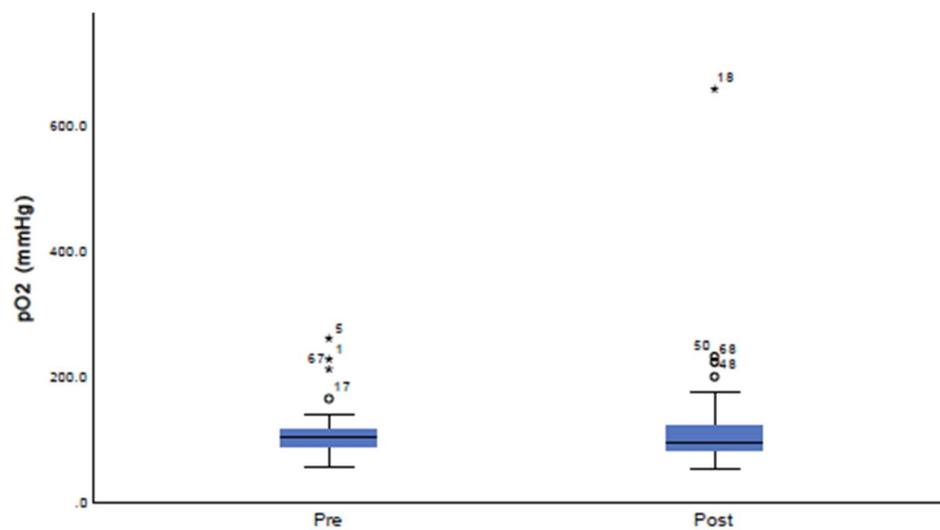


Grafico 1- Boxplot  $\text{PaO}_2$

Per quanto riguarda la pressione parziale di anidride carbonica a livello arterioso, la differenza tra valori pretrattamento e post-trattamento non è stata statisticamente significativa ( $p=0.744$ )

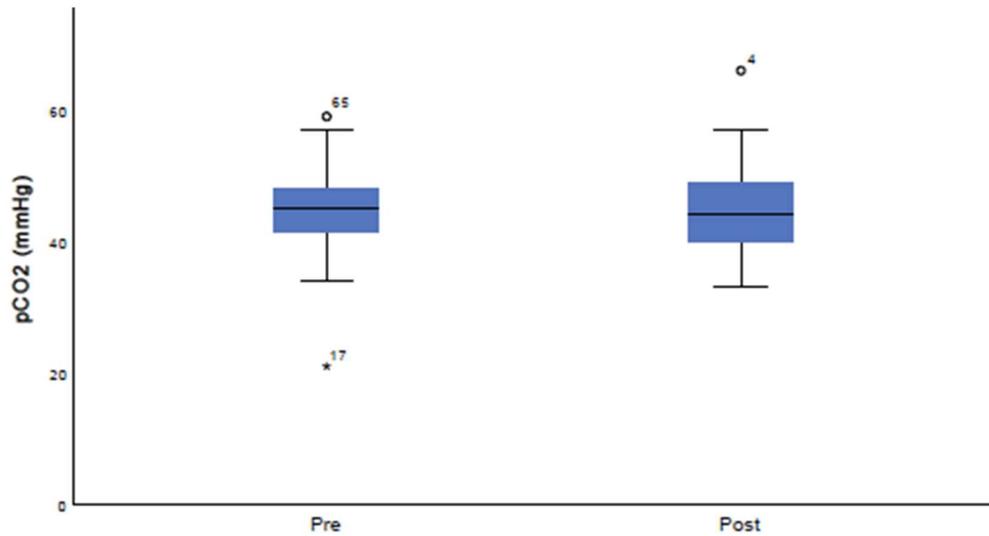


Grafico 2- Boxplot PaCO<sub>2</sub>

Per quanto riguarda il rapporto PaO<sub>2</sub>/FiO<sub>2</sub>, la differenza tra valori pretrattamento e post-trattamento non è stata statisticamente significativa ( $p=0.951$ )

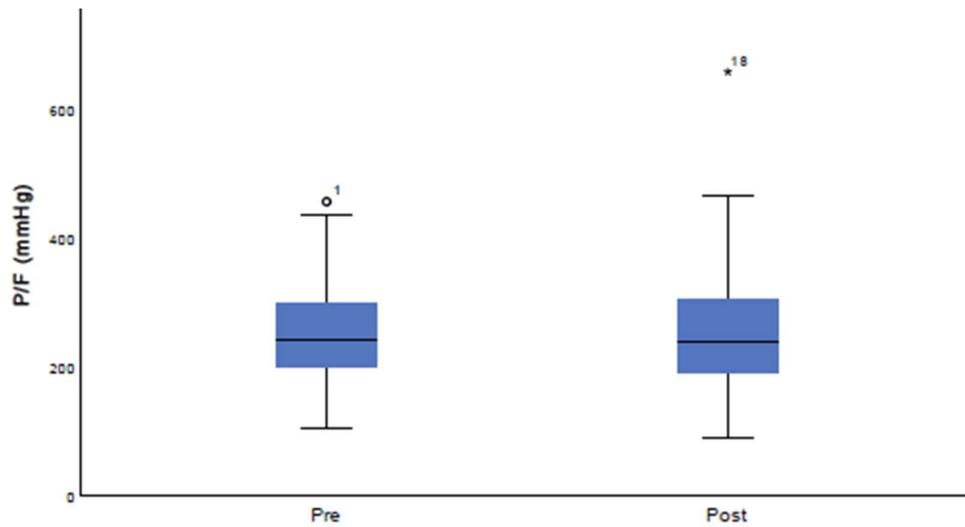


Grafico 3- Boxplot P/F

Per quanto riguarda la concentrazione di lattati nel sangue arterioso, la differenza tra valori pretrattamento e post-trattamento non è stata statisticamente significativa ( $p=0.603$ )

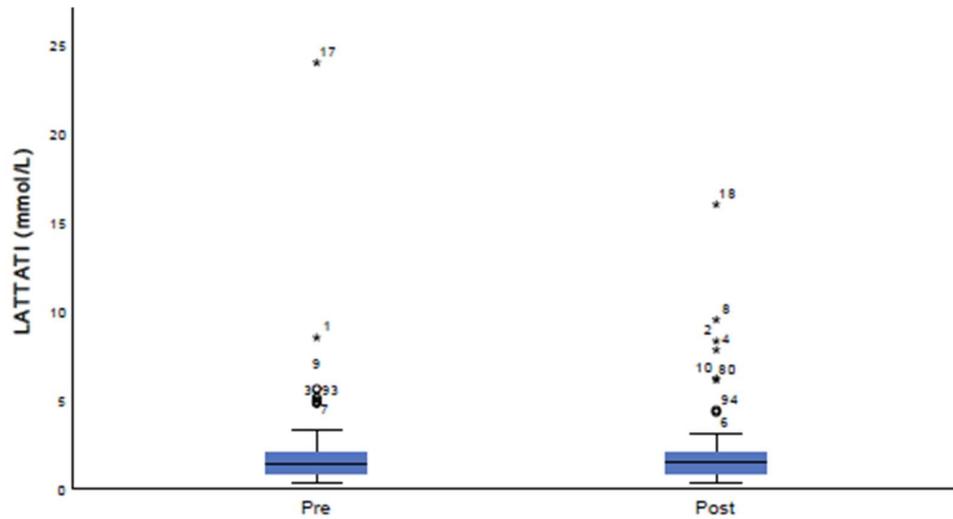


Grafico 4-Boxplot concentrazione lattati

Per quanto riguarda la saturazione di ossigeno nel sangue arterioso, la differenza tra valori pretrattamento e post-trattamento non è stata statisticamente significativa ( $p=0.402$ )

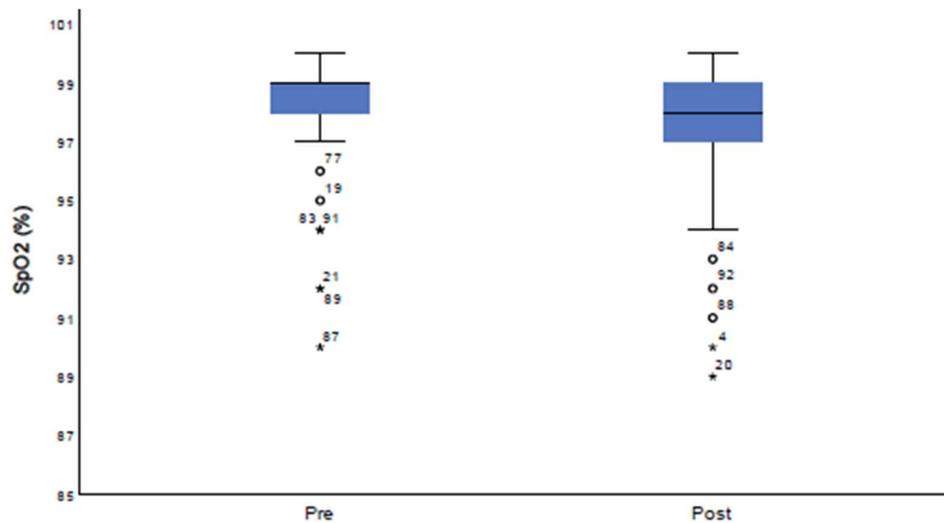


Grafico 5- Boxplot SpO<sub>2</sub>

Si può quindi ritenere confermata l'ipotesi che i pazienti presi in esame non abbiano manifestato variazioni significative dei parametri ventilatori correlabili con i trattamenti di ossigenoterapia iperbarica.

I parametri circolatori rilevati sui pazienti oggetto del presente studio sono stati:

- PAM
- FC

Delle 47 sedute di ossigenoterapia iperbarica considerate in questo studio, 29 sono state effettuate con la contemporanea somministrazione di noradrenalina per il supporto vasopressorio.

Per quanto riguarda la pressione arteriosa media, la differenza tra valori pretrattamento e post-trattamento non è stata statisticamente significativa ( $p=0,112$ )

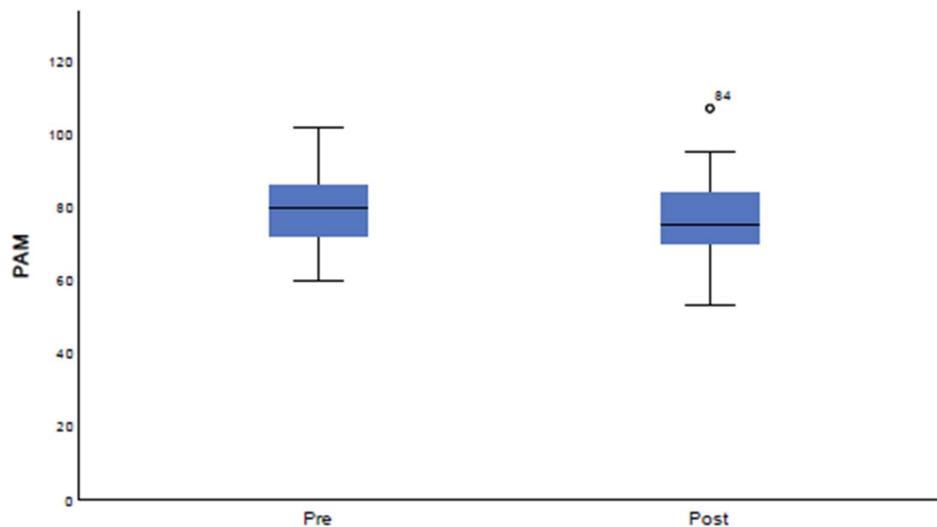


Grafico 6- Boxplot PAM

Per quanto riguarda la frequenza cardiaca, la differenza tra valori pretrattamento e post-trattamento non è stata statisticamente significativa ( $p=0,068$ )

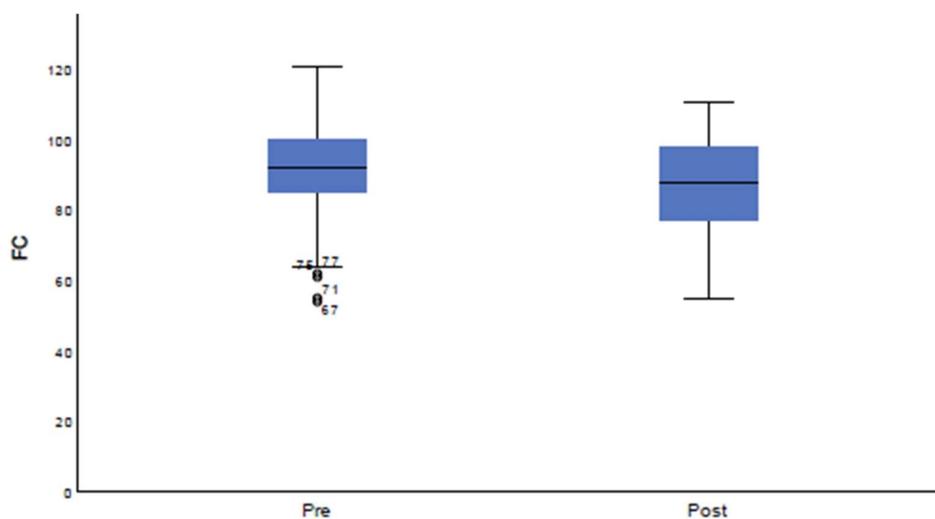


Grafico 7- Boxplot FC

Si può quindi ritenere confermata l'ipotesi che, nei pazienti presi in esame, i parametri circolatori non abbiano presentato differenze significative correlabili con i trattamenti OTI.

### 3.5 CASO CLINICO

Si riporta il caso di una paziente ricoverata presso il reparto di terapia intensiva e trattata presso la struttura Semplice Ossigenoterapia Iperbarica dell'Ospedale Policlinico "San Martino" di Genova.

La paziente, una donna di 48 anni, veniva centralizzata da un Ospedale dell'area metropolitana genovese ed accedeva al Pronto Soccorso del san Martino in data 23/12/2019, riferendo algie sottomandibolari, localizzate prevalentemente all'emivolta di destra e difficoltà nella deglutizione, sintomatologia comparsa in seguito ad un intervento odontoiatrico eseguito la settimana precedente.

L'esame radiologico eseguito mediante tecnica TC evidenziava una raccolta liquido-gassosa ascessuale in sede sottomandibolare destra che si estendeva lungo lo spazio retroesofageo fino al mediastino.

L'emiambito polmonare di sinistra risultava prevalentemente compresso ed atelettasico, occupato da estese formazioni liquide versamentali di aspetto ascessuale causanti dislocazione controlaterale a destra del mediastino.

Il polmone destro appariva ipoespanso con interessamento infiammatorio delle scissure.

Veniva quindi deciso in accordo collegiale, di procedere ad intubazione oro-tracheale, ventilazione meccanica in modalità volumetrica, associata ad analgo-sedazione e miorisoluzione, con previsione di intervento di chirurgia toracica eseguito il giorno stesso in regime d'urgenza.

In "Tabella 3" sono riportati i valori relativi alla prima emogasanalisi eseguita in pronto soccorso; il rapporto P/F pari a 160 è indice di una grave insufficienza respiratoria legata all'esteso danno polmonare atelettasico, che limita lo

scambio di ossigeno a livello alveolare. Inoltre, un valore ematico di acido lattico di 1,9 è correlabile con uno stato di sepsi.

FiO <sub>2</sub> 0,5	PaO <sub>2</sub> 80 mmHg
pH 7,39	PaCO <sub>2</sub> 43,8 mmHg
Hb 132 g/lt	P/F 160
Lac 1,9	

*Tabella 3-EGA 23/12/2019*

Durante l'intervento di chirurgia toracica veniva eseguita una toracotomia a destra ed a sinistra con rimozione di circa 1500 ml di materiale infiammatorio-purulento, nella stessa seduta si procedeva con lavaggio e disinfezione della cavità toracica e si posizionavano in totale sei drenaggi con valvola ad acqua per continuare l'evacuazione di eventuali raccolte in formazione.

Il giorno seguente, in data 24/12/2019 la paziente eseguiva la prima seduta di ossigenoterapia iperbarica, con pressione impostata a 2,8 ATA per 60 minuti. Alla TC di controllo del 26/12/2019 (Figura 10) si osservava una riduzione del versamento al polmone sinistro che risultava nuovamente espanso con riposizionamento in asse del mediastino.

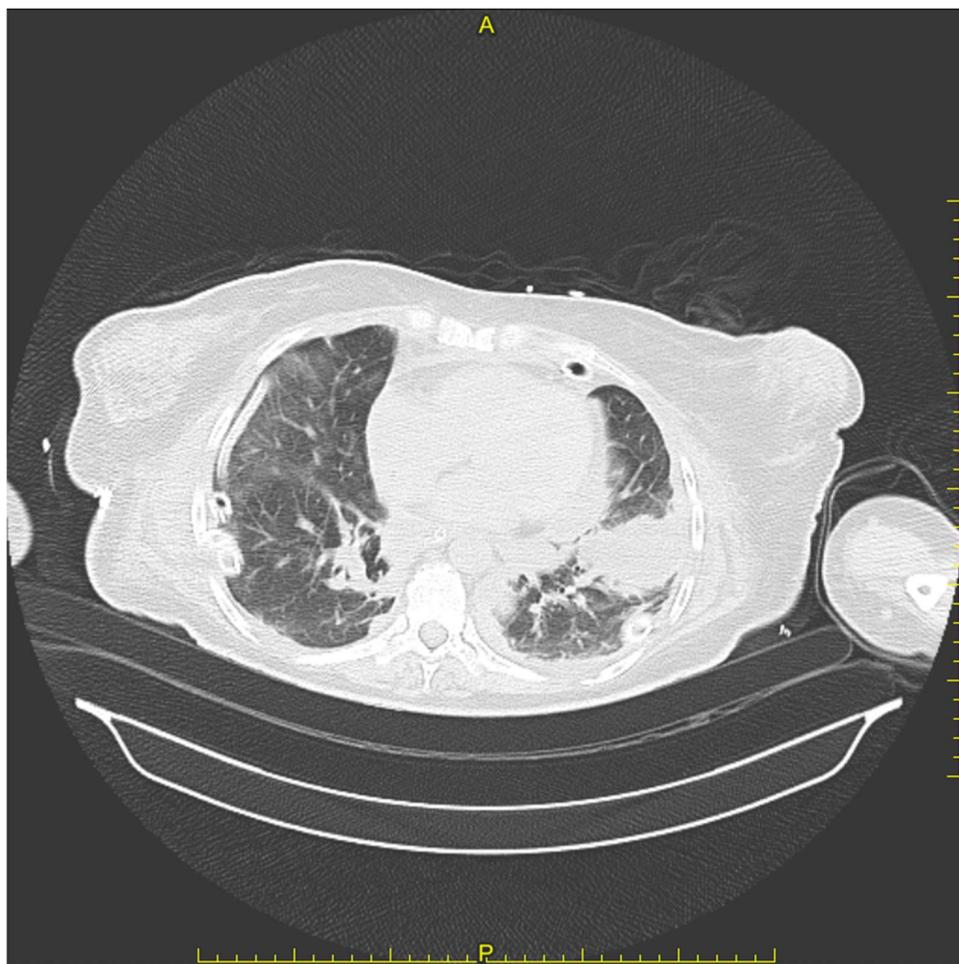


Figura 11-Scansione TC del 26/12/2019

Ripeterà il trattamento iperbarico fino al 06/01/2020 per un totale di 12 sedute, durante le quali la paziente rimaneva intubata e sedata, con i drenaggi ancora in sede. Tali condizioni richiedono un costante monitoraggio da parte del personale che presta assistenza in camera iperbarica, considerando le numerose criticità legate a ciascun dispositivo necessario al supporto vitale della paziente; ciascuna seduta si è svolta senza l'insorgenza di complicanze periprocedurali.

In aggiunta al trattamento iperbarico si affiancava la somministrazione di antibiotici su prescrizione dello specialista infettivologo ed ulteriori procedure

da parte dei chirurghi toracici finalizzate al completo drenaggio delle raccolte ed alla riespansione completa del parenchima polmonare.

L'emogasanalisi eseguito al termine dell'ultima seduta iperbarica (Tabella 2) evidenzia un miglioramento nel rapporto P/F e nella concentrazione ematica di acido lattico, valori che ancora richiedono un percorso di cura ma indicativi di un buon andamento nella guarigione.

FiO <sub>2</sub> 0,4	PaO <sub>2</sub> 109 mmHg
pH 7,44	PaCO <sub>2</sub> 49,8 mmHg
Hb 132 g/lit	P/F 272
Lac 0,4	

*Tabella 4- EGA del 06/01/2020*

Il decorso clinico è proseguito senza ulteriori complicanze, la paziente veniva estubata il 16/01, successivamente trasferita presso la degenza della chirurgia toracica e dimessa al proprio domicilio il 28/01.

Alla TAC di controllo eseguita il 02/10/2020, a circa un anno dall'evento infettivo, entrambi i polmoni risultano espansi e privi di raccolte purulente o di materiale infiammatorio e non vengono refertati esiti cicatriziali o di fibrosi.

### 3.6 CONCLUSIONI E DISCUSSIONE

L'obiettivo dello studio è stato quello di valutare l'impatto del trattamento di ossigenoterapia iperbarica in pazienti critici sottoposti a ventilazione meccanica invasiva.

In letteratura numerosi studi descrivono come, nei pazienti critici e sottoposti a ventilazione meccanica, l'ossigeno iperbarico abbia effetti indesiderati sui principali parametri vitali. Questi fenomeni vengono comunque considerati transitori e non impattanti sull'outcome delle cure, a condizione che le competenze dei curanti e le risorse tecnologiche disponibili siano adeguate. In effetti, occorre considerare alla stregua di rischi tutte le potenziali criticità evidenziate in letteratura. I dati rilevati nel corso di questo studio confermano come, in un contesto caratterizzato da un centro iperbarico integrato nel sistema dell'emergenza ed area critica, i rischi di instabilità dei parametri vitali possono essere adeguatamente gestiti. Questo ha consentito l'effettuazione di cicli di ossigenoterapia iperbarica su pazienti ad elevata criticità, senza che si siano manifestate complicanze periprocedurali.

La casistica è comunque certamente limitata e disomogenea. Per migliorare, l'affidabilità dei dati, sarebbe auspicabile l'attivazione di una raccolta dati sistematica multicentrica per il trattamento di ossigenoterapia iperbarica su pazienti in terapia intensiva.

## BIBLIOGRAFIA

- 
- <sup>1</sup> Linee-guida-simsi-2015-sulle-indicazioni-allossigeno-terapia-iperbarica.pdf. Accessed March 28, 2022. <http://www.luigivicari.it/med/wp-content/uploads/2012/09/linee-guida-simsi-2007-sulle-indicazioni-allossigeno-terapia-iperbarica.pdf>
- <sup>2</sup> Mathieu D, Coget JM, Vinckier L, Saulnier F, Durocher A, Wattel F. Filtrabilité érythrocytaire et oxygénothérapie hyperbare. *Med Sub Hyp* 1984;3:100- 4
- <sup>3</sup> Niinikoski J. Effect of oxygen supply on wound healing and formation of experimental granulation tissue. *Acta Physiol Scand Suppl* 1969;334:1-72
- <sup>4</sup> Hunt TK, Niinikoski J, Zederfeldt B. Role of oxygen in repair processes. *Acta Chir Scand* 1972;138:109- 10
- <sup>5</sup> Niinikoski J. Current concepts of the role of oxygen in wound healing. *Ann Chir Gynaecol* 2001;90 Suppl 215:9-11
- <sup>6</sup> Jain KK. *Textbook of Hyperbaric Medicine*. Springer International Publishing; 2017. doi:10.1007/978-3-319-47140-2
- <sup>7</sup> Haux GF. *History of hyperbaric chambers*. Flagstaff: Best Publishing; 2000.
- <sup>8</sup> Ratzenhofer-Komenda B, Offner A, Quehenberger F, et al. Hemodynamic and oxygenation profiles in the early period after hyperbaric oxygen therapy: an observational study of intensive-care patients: Hemodynamics after HBO therapy. *Acta Anaesthesiologica Scandinavica*. 2003;47(5):554-558. doi:10.1034/j.1399-6576.2003.00101.x
- <sup>9</sup> Andersen A, Hillestad L. Hemodynamic responses to oxygen breathing and the effect of pharmacological blockade. *Acta Med Scand* 188: 419–424, 1970
- <sup>10</sup> Weaver LK, Howe S, Bobbio V, Snow GL, Deru K. Arterial and pulmonary arterial hemodynamics and oxygen delivery/extraction in normal humans exposed to hyperbaric air and oxygen. *Journal of Applied Physiology*. 2009;107(1):336-345. doi:10.1152/jappphysiol.91012.2008

- 
- <sup>11</sup> Mathieu, D.; Favory, R.; Collet, F.; Linke, J.-C.; Wattel, F. Physiologic Effects of Hyperbaric Oxygen on Hemodynamics and Microcirculation. In *Handbook on Hyperbaric Medicine*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2006; pp. 75–101.
- <sup>12</sup> Schiavo S, Djaiani C, DeBacker J, et al. Magnitude and Clinical Predictors of Blood Pressure Changes in Patients Undergoing Hyperbaric Oxygen Therapy: A Retrospective Study. *IJERPH*. 2020;17(20):7586. doi:10.3390/ijerph17207586
- <sup>13</sup> Shenouda, M.B.M.; Lakdawala, S.; Sung, J.; Warhul, Z.; Bosco, G.; Camporesi, E.M. Quality Review for Hypertensive Patients Receiving HBO2. In *Proceedings of the UHMS Annual Scientific Meeting 2020, Virtual Meeting, San Diego, CA, USA, 18–20 June 2020*; Undersea & Hyperbaric Medical Society: North Palm Beach, FL, USA, 2020.
- <sup>14</sup> Okubo J, Watanabe I. Physiology and Pathophysiology of Air-Filled Ear Space and Eustachian Tube Function. *ORL*. 1988;50(5):273-305. doi:10.1159/000276003
- <sup>15</sup> Fernau JL, Hirsch BE, Derkay C, Ramasastry S, Schaefer SE. Hyperbaric Oxygen Therapy: Effect on Middle Ear and Eustachian Tube Function. *The Laryngoscope*. 1992;102(1):48-52. doi:10.1288/00005537-199201000-00009
- <sup>16</sup> Plafki C, Peters P, Almeling M, Welslau W, Busch R. Complications and side effects of hyperbaric oxygen therapy. *Aviat Space Environ Med*. 2000 Feb;71(2) 119-124. PMID: 10685584.
- <sup>17</sup> Camporesi EM. Side effects of hyperbaric oxygen therapy. *Undersea Hyperb Med*. 2014 May-Jun;41(3) 253-257. PMID: 24984321.
- <sup>18</sup> Banham NDG. Oxygen toxicity seizures: 20 years experience from a single hyperbaric unit. *Diving Hyperb Med* 2011;41:202–210.
- <sup>19</sup> Lambertsen CJ. Effects of oxygen at high partial pressure. In: Fenn WO, Rahn H, eds. *Handbook of Physiology*. Bethesda, MD: Am Physiol Soc, 1965: 1027–1046.
- <sup>20</sup> Torbati D, Church DF, Keller JM, Pryor W. Free radical generation in the brain precedes hyperbaric oxygen-induced convulsions. *Free Radic Biol Med* 1992;13:101–106

- 
- <sup>21</sup> Mathieu D, Ratzenhofer-Komenda B, Kot J. Hyperbaric oxygen therapy for intensive care patients: position statement by the European Committee for Hyperbaric Medicine. 2015;45(1):5.
- <sup>22</sup>[https://simsi.it/wpcontent/uploads/2019/04/Linea\\_Guida\\_controindicazioni\\_OTI\\_27.09.18.pdf](https://simsi.it/wpcontent/uploads/2019/04/Linea_Guida_controindicazioni_OTI_27.09.18.pdf)
- <sup>23</sup> Fanara B, Manzon C, Barbot O, Desmettre T, Capellier G. Recommendations for the intra-hospital transport of critically ill patients. Crit Care. 2010;14(3):R87. doi:10.1186/cc9018
- <sup>24</sup> Weaver LK. Hyperbaric oxygen in the critically ill: Critical Care Medicine. 2011;39(7):1784-1791. doi:10.1097/CCM.0b013e31821858d1
- <sup>25</sup> Lind F. A pro/con review comparing the use of mono- and multiplace hyperbaric chambers for critical care. Diving Hyperb Med. 2015;45(1):56-60.
- <sup>26</sup> Weaver LK. Hyperbaric oxygen treatment for the critically ill patient.
- <sup>27</sup> [Manuale\\_Corpuls3\\_v2.3\\_ITA\\_R\\_Druck.pdf](#).
- <sup>28</sup> Whelan HT, Kindwall EP. Hyperbaric Medicine Practice.; 2017.
- <sup>29</sup> Miller RD, Churchill Livingstone Edition. Miller's anesthesia, 7th ed; 2009.
- <sup>30</sup> Claudius C, Garvey LH, Viby-Mogensen J. The undesirable effects of neuromuscular blocking drugs. Anaesthesia. 2009;64:10-21. doi:10.1111/j.1365-2044.2008.05866.x
- <sup>31</sup> Frawley L, Devaney B, Tsouras T, Frawley G. Performance of the BBraun Perfusor Space syringe driver under hyperbaric conditions. 2017;47(1):6.
- <sup>32</sup> Hyperbaric Medicine Service, The Alfred Hospital, Melbourne, Victoria, Australia, Gelsomino M, Tsouras T, et al. A pleural vacuum relief device for pleural drain unit use in the hyperbaric environment. Diving Hyperb Med. 2017;47(3):191-197. doi:10.28920/dhm47.3.191-197
- <sup>33</sup> Walker KJ, Millar IL, Fock A. The Performance and Safety of a Pleural Drainage Unit under Hyperbaric Conditions. Anaesth Intensive Care. 2006;34(1):61-67. doi:10.1177/0310057X0603400112

- 
- <sup>34</sup> Brinkman JE, Toro F, Sharma S. Physiology, Respiratory Drive. In: StatPearls. StatPearls Publishing; 2022. Accessed May 2, 2022. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482414/>
- <sup>35</sup> Bulleri E, Fusi C. Manuale di monitoraggio grafico della ventilazione meccanica. Guida pratica alla rilevazione delle asincronie. FareLibri; 2015.
- <sup>36</sup> Pham T, Brochard LJ, Slutsky AS. Mechanical Ventilation: State of the Art. Mayo Clinic Proceedings. 2017;92(9):1382-1400. doi:10.1016/j.mayocp.2017.05.004
- <sup>37</sup> Mehta S, Hill NS. Noninvasive Ventilation. Am J Respir Crit Care Med. 2001;163(2):540-577. doi:10.1164/ajrccm.163.2.9906116
- <sup>38</sup> Moon RE, Bergquist LV, Conklin B, Miller JN. Monaghan 225 Ventilator Use Under Hyperbaric Conditions. Chest. 1986;89(6):846-851. doi:10.1378/chest.89.6.846
- <sup>39</sup> Gallagher TJ, Smith RA, Bell GC (1978) Evaluation of mechanical ventilators in a hyperbaric environment. Aviat Space Environ Med 49: 375-376
- <sup>40</sup> Roberts F. Measurement of volume and flow of gases. Anaesthesia and intensive care medicine. 2003; 4(1):32-35.
- <sup>41</sup> Blanch PB, Desautels DA, Gallagher TJ. Deviations in function of mechanical ventilators during hyperbaric compression. Resp Care 1991; 36(8): 803-814
- <sup>42</sup> Stahl W, Radermacher P, Calzia E. Functioning of ICU ventilators under hyperbaric conditions – comparison of volume- and pressure-controlled modes. Intensive Care Med. 2000;26(4):442-448. doi:10.1007/s001340051179
- <sup>43</sup> Longoni C, Marchesi G. Adapting the hyperbaric chamber to the health care environment: history and future trends. In Handbook on hyperbaric Medicine. G. Oriani, A. Marroni, F. Wattel (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, 1995: 741-764.
- <sup>44</sup> Kot, Jacek. (2006). MEDICAL EQUIPMENT FOR MULTIPLE HYPERBARIC CHAMBERS Part II: Ventilators. European Journal of Underwater and Hyperbaric Medicine. 7. 1605-9204.

---

<sup>45</sup> Weaver LK, Howe S. Arterial Oxygen Tension of Patients With Abnormal Lungs Treated With Hyperbaric Oxygen Is Greater Than Predicted. *Chest*. 1994;106(4):1134-1139. doi:10.1378/chest.106.4.1134

<sup>46</sup> Bingham G, Millar I, Koch S, Paul E, Varma D, Pilcher D. Changes in oxygenation in mechanically ventilated critically ill patients following hyperbaric treatment. 2011;41(2):5.