

NATURA E SIGNIFICATO DEL MONITORAGGIO ULTRASONORO AD EFFETTO DOPPLER DI BOLLE GASSOSE CIRCOLANTI NEL SISTEMA VENOSO DOPO IMMERSIONI SUBACQUEE

A. Marroni, DAN Europe

Introduzione

La prevenzione e la diagnosi precoce della patologia da decompressione richiedono la disponibilità di un mezzo capace di dimostrare l'esistenza del fattore di rischio prima della comparsa dei sintomi ed i cui risultati possano essere correlabili con l'evento patologico che si vuole prevenire.

L'analisi Doppler delle bolle circolanti risponde a questi requisiti. Infatti è dimostrato che le bolle gassose circolanti sono la causa primaria delle patologie da decompressione (PDD). E' altrettanto noto che, se possono esserci bolle senza PDD, non c'è PDD senza bolle.

La detenzione di bolle gassose circolanti nei tessuti corporei, specie se eseguita con strumenti di adeguata sensibilità, può quindi consentire l'identificazione della causa primaria di PDD al suo insorgere e prima che causi danni biologici diversi dalla semplice presenza di un ostacolo meccanico al circolo e di un corpo estraneo nei tessuti.

L'utilità del monitoraggio Doppler nella prevenzione di forme di patologia da decompressione è facilmente comprensibile; infatti un determinato profilo d'immersione sarà tanto più sicuro, quanto meno produrrà bolle gassose circolanti.

Analogamente, uno studio comparato della produzione di bolle circolanti, dei profili d'immersione interessati e dei quadri sintomatologici eventualmente correlati, consentirà sia di determinare i profili che producono meno bolle gassose circolanti, che di comprendere quale sia il massimo livello di bolle circolanti tollerabile senza che si sviluppino reazioni patologiche.

Principi generali dell'analisi ultrasonora ad effetto Doppler

Un fascio di ultrasuoni emesso da un trasduttore specifico - generalmente cristalli piezo-elettrici di titanato di bario o titanato-zirconato di piombo - viene riflesso dalle particelle rifrangenti che circolano nel sangue (globuli rossi, bianchi, etc.) con intensità proporzionale alla frequenza ultrasonora di emissione.

Trattandosi di particelle in movimento, la riflessione sonora seguirà le leggi dell'effetto Doppler, o di compressione dell'onda sonora, che risulta in una tipica modulazione del suono *crescente - picco - decrescente*. L'esempio abitualmente portato è quello del rumore del treno che sopraggiunge e poi si allontana dal posto in cui sta un osservatore.

Quando un fascio di ultrasuoni viene indirizzato contro particelle in movimento, la riflessione del suono dipenderà dalla frequenza di emissione ultrasonora, dalla

velocità delle particelle in avvicinamento, dalla loro capacità di rifrangenza e dall'angolo fra la direzione del fascio ultrasonoro e la direzione delle particelle.

Poichè le bolle gassose presentano superfici altamente rifrangenti, rispetto alle cellule del sangue, i segnali sonori riflessi sono caratteristici, intensi, ad alta frequenza e si sovrappongono al normale rumore di fondo provocato dalla riflessione Doppler delle particelle ematiche in movimento.

Questi echi sono tipici e non esistono in assenza di bolle gassose. La loro presenza e la loro intensità sono quindi indice sia della presenza, che dell'entità delle bolle gassose circolanti.

Caratteristiche e sensibilità del segnale Doppler riflesso dalle bolle gassose e dei trasduttori

Alle condizioni di velocità tipiche del circolo ematico nell'uomo, la frequenza di riflessione Doppler cade nello spettro delle frequenze udibile dall'orecchio umano quando la frequenza di emissione del trasduttore Doppler è fra i 2 ed i 10 MegaHertz.

La viscosità del sangue, la presenza di numerose particelle circolanti e lo spessore di tessuto cutaneo, grasso e connettivo fra la sonda ed il bersaglio del fascio ultrasonoro hanno un notevole effetto di attenuazione delle frequenze di emissione, con il rischio di dover usare frequenze elevate e potenzialmente dannose per l'integrità tissutale.

Il suono riflesso ha, però, fortunatamente, una lunghezza d'onda circa 300 volte superiore al raggio della bolla gassosa che lo ha provocato e le onde lunghe risentono meno dell'attenuazione del passaggio intratissutale. Questo consente di limitare la frequenza di emissione.

Poichè la frequenza di risonanza aumenta in proporzione inversa al raggio della bolla gassosa, bolle piccole daranno segnali ad alta frequenza, mentre bolle più grandi danno segnali a bassa frequenza, che saranno più facilmente attenuati dalla viscosità del sangue e dalle particelle circolanti. L'effetto di attenuazione dei segnali emessi da bolle grandi sarà tanto più evidente quanto minore sarà la frequenza di emissione.

Per i nostri scopi si utilizzano normalmente frequenze di emissione di 5 MHz, che rappresentano un buon compromesso fra l'attenuazione del segnale ed il potere di risoluzione. E' possibile stabilire una correlazione fra la frequenza e l'intensità del segnale riflesso e la dimensione della bolla che lo ha prodotto. Tale correlazione è abbastanza affidabile nel range di bolle di raggio compreso fra i 7 e gli 800 micron (1 micron = 1 millesimo di millimetro).

Con un trasduttore a 5 MHz, mirato su un grosso vaso venoso centrale in un uomo normale, si possono rilevare bolle del diametro minimo di 30-50 micron. Calcoli teorici dimostrano che una bolla, più piccola all'origine nei tessuti periferici, può raggiungere queste dimensioni al momento dell'arrivo in un vaso venoso centrale (vena succlavia, femorale, cava), nel cuore destro o nell'arteria polmonare.

I segnali riflessi dalle bolle sono tipicamente di alta frequenza ed acuti. La forma d'onda sinusoidale dei segnali, tipica dell'effetto Doppler, fa sì che, a seconda

degli apparecchi usati, possono suonare come un acuto e rapido cinguettio "**Cirrp**" o rumore di ticchettio metallico "**Cling-Tick**".

Negli apparecchi Doppler utilizzati per il Progetto Safe Dive del DAN Europe è stata apportata una particolare modifica che filtra i rumori a bassa frequenza prodotti dal movimento delle valvole cardiache e delle pareti del cuore -"**Filtro Passa Alto**"- che rende più facile l'identificazione dei segnali ad alta frequenza tipici delle bolle, eliminando molti dei rumori di fondo.

I segnali riflessi possono essere ascoltati e registrati su audiocassetta e valutati sia mediante l'ascolto da parte di personale appositamente addestrato che attraverso analisi computerizzata dello spettro sonoro.

Correlazione fra segnali Doppler e bolle gassose circolanti

I segnali delle bolle gassose circolanti sono indicativi più della presenza e del numero delle bolle, che delle loro dimensioni singole. Sono quindi un buon indicatore del volume totale di gas che circola.

Spencer, nel 1971, propose una gradazione dei segnali di bolle che è stata internazionalmente accettata e che è stata adottata per il progetto Safe Dive del DAN:

Grado 0	Nessun segnale di bolle;
Grado I	Segnali occasionali singoli, ma la grande maggioranza dei cicli cardiaci è libera da segnali;
Grado II	Segnali di bolle molteplici, singole o a gruppi ma in meno della metà dei cicli cardiaci sul periodo osservato (minimo 60 sec.);
Grado III	Segnali di bolle, singole o a raffica, presenti su ogni ciclo cardiaco
Grado IV	Segnali di bolle di grande intensità e continui, fino a superare il rumore cardiaco

Sulla base della correlazione clinica con quadri sintomatologici di patologia da decompressione, sono stati sviluppati, nell'ambito del diving professionale e scientifico, protocolli di prevenzione secondaria, cioè di prevenzione del danno biologico causato dalla presenza di bolle gassose circolanti:

Grado 0	Nessuna azione
Grado I – II	Somministrare ossigeno fino alla scomparsa del segnale. Non consentire immersioni successive.
Grado III – IV	Ossigeno 100% o ricompressione in Ossigeno a 2 ATA in camera iperbarica fino alla scomparsa del segnale. Non consentire immersioni successive.

Preparazione e posizionamento della sonda e del soggetto, esecuzione del monitoraggio

1. Preparazione dell'apparecchio Doppler e posizionamento della sonda.

a. Selezionare la sonda da 5 MHz a collegarla al cavo dell'apparecchio Doppler rispettando i segnali di allineamento degli spinotti.

- b. Applicare il gel sulla cute del soggetto nella zona da esaminare prescelta (circa 1-2 cc)
- c. Accendere l'apparecchio Doppler e regolare il volume dell'altoparlante al livello adeguato.
- d. Posizionare l'apice della sonda sul sito da monitorare:

I. **Sito Precordiale** - posizionare la sonda perpendicolare rispetto al piano costale, ma lievemente angolata in alto e a destra, a livello del terzo spazio intercostale, sul bordo sinistro dello sterno. Può essere necessario spostare la sonda a livello del secondo spazio intercostale se il segnale ottenuto sul terzo spazio è eccessivamente contaminato da rumori valvolari.

II. **Sito Sopraclavicolare** - posizionare la sonda a livello della fossa sopraclavicolare, a metà ed a ridosso della faccia dorsale della clavicola, orientata verso la spalla ad un angolo di 40-45 °. Il lato sinistro è generalmente più facile da monitorare. L'arteria e la vena succlavia scorrono vicine, con l'arteria generalmente in posizione frontale rispetto alla vena. Il segnale dell'arteria sarà pulsatile e ad alta frequenza, mentre quello venoso sarà continuo ed a frequenza più bassa. E' generalmente più facile trovare l'arteria prima e poi localizzare la vena angolando la sonda lievemente indietro.

In tutti i casi potrà essere necessario spostare la sonda per trovare la zona di miglior segnale, sia di flusso (segnale sonoro di flusso-scorrimento-fruscio, pulsatile per i vasi arteriosi, continuo per i vasi venosi) che cardiaco (segnali composti di battito-fruscio-staffilata alternati, sincroni con il ciclo cardiaco). In generale, specie per i siti vascolari, è meglio ricercare il miglior segnale modificando l'angolo della sonda piuttosto che spostandone l'estremità.

2. Posizione del soggetto da esaminare

- b. **Monitoraggio Precordiale:** in piedi, a gambe leggermente divaricate e lievemente piegato in avanti per il monitoraggio precordiale; l'esaminatore si porrà di fronte e leggermente di lato rispetto al soggetto
- c. **Monitoraggio Sopraclavicolare:** semisdraiato con l'esaminatore posto dietro la sua testa; per esempio l'esaminatore si potrà sedere sui talloni ed il soggetto si potrà appoggiare con la schiena sulle cosce dell'esaminatore e con la testa sul suo grembo.

3. Sforzo standardizzato

- a. Il monitoraggio Doppler di bolle gassose circolanti va eseguito sia a riposo che dopo uno sforzo muscolare standardizzato. Lo scopo dello sforzo è quello di mobilizzare bolle gassose dai capillari e dai vasi venosi delle grandi masse muscolari degli arti, attraverso la contrazione muscolare che provoca una "spremitura" dei vasi sanguigni. In questo modo bolle intrappolate in periferia possono raggiungere i grandi vasi venosi ed essere monitorizzate. La distinzione fra le bolle rilevate a riposo e quelle rilevate dopo sforzo può assumere una certa rilevanza per la comprensione di situazioni limite e per una più consapevole prevenzione.

I. **Monitoraggio Precordiale:** due flessioni complete sulle gambe

II. **Monitoraggio Sopraclavicolare:** due forti contrazioni del pugno mantenute per qualche secondo

Il monitoraggio andrà eseguito, nei siti e nei tempi prescritti dal protocollo, per 60 secondi su ogni sito, a riposo e immediatamente dopo lo sforzo standard previsto dal protocollo.