

Capitolo 1

INTRODUZIONE

Alcune patologie cardiache, congenite o acquisite, come valvulopatie, occlusioni coronariche o malformazioni, per essere risolte necessitano di un intervento chirurgico.

Per poter operare, è necessario fermare il cuore, permettendo così al chirurgo di innestare bypass, o di intervenire all'interno del cuore stesso, per esempio, per una sostituzione valvolare.

La sopravvivenza dei pazienti in arresto cardiaco è assicurata dall'utilizzo di dispositivi, i quali consentono di sostituire, almeno temporaneamente, le funzioni cardio-polmonari.

Questo insieme di macchine prende il nome di *Circolazione Extracorporea* (CEC).

1.1 Fisiologia Cardiocircolatoria

Il sistema cardiovascolare, garantisce gli scambi di massa e di calore che sono alla base della vita umana.

Il sangue rifornisce d'ossigeno l'organismo, il quale attraverso complicati processi di combustione, trasforma questa energia chimica in energia meccanica.

Nel suo complesso, il sistema circolatorio è schematizzabile mediante due circuiti posti in serie tra loro: circuito sistemico e circuito polmonare. La dualità dei due circuiti è evidente: il secondo rifornisce d'ossigeno il sangue e lo lava dall'anidride carbonica, mentre il primo consente il rifornimento d'ossigeno ai tessuti e provvede all'asportazione da essi di anidride carbonica.

Il cuore è una pompa pulsatile volumetrica che fornisce al sangue l'energia meccanica necessaria a vincere le perdite di carico fluidodinamiche dei circuiti periferici.

Ha una struttura composta da quattro camere, rispettivamente: Atrio Sinistro, Ventricolo Sinistro, Atrio Destro, Ventricolo Destro.

Per comodità viene definito un cuore sinistro (AS + VS) e un cuore destro (AD + VD), in modo da rendere più chiara la loro funzionalità.

Il cuore sinistro è quello che si deve occupare della circolazione sistemica che, come si vede in figura 1.1, rappresenta un carico notevolmente maggiore rispetto a quello polmonare (assegnato al cuore destro).

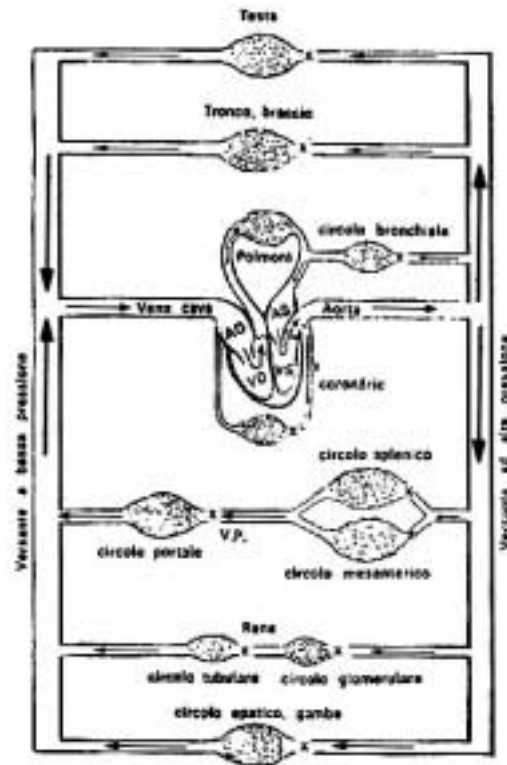


Figura 1.1 Aspetto Funzionale del Sistema Cardiocircolatorio

È per questo motivo che il ventricolo sinistro è più grosso e ha una muscolatura più spessa di quello di destra.

Anche la posizione anatomica conferma la prevalenza d'importanza del cuore sinistro su quello destro: il cuore è disposto in modo che l'atrio e il ventricolo destro stiano tra lo sterno e il cuore sinistro, in modo che quest'ultimo sia il più protetto possibile.

Il cuore sinistro risulta più soggetto a malfunzionamenti o danni, essendo sempre sottoposto ai carichi maggiori, con possibili conseguenze dannose alle fibre muscolari del miocardio o alle valvole (mitrale e aortica).

Come si vede dalla figura 1.1, il sangue viene pompato dal ventricolo sinistro e, attraverso l'aorta, raggiunge tutti i distretti sistemici (compreso il circolo bronchiale dal quale rifluisce, contrariamente agli altri circoli, nell'atrio sinistro). Dopo essere passato attraverso arterie e arteriole il sangue raggiunge i capillari, luogo dove diminuisce l'affinità tra ossigeno ed

emoglobina, mentre aumenta quella con l'anidride carbonica: in questo modo si ha migrazione di O_2 dal sangue verso i tessuti e di CO_2 dai tessuti verso il sangue.

Oltrepassati i capillari il sangue viene raccolto dal sistema venoso, che defluisce nelle vene cave, e quindi riversato nell'atrio destro.

Passando nel ventricolo destro, il sangue viene pompato nel circolo polmonare. L'ossigeno entra nel sangue attraverso gli alveoli polmonari per andarsi a legare con l'emoglobina, mentre l'anidride carbonica viene rilasciata attraverso i polmoni.

Poi il sangue raggiunge l'atrio sinistro e quindi nuovamente il ventricolo sinistro, ricominciando il circolo.

Anche il cuore, essendo un muscolo, deve ricevere il giusto apporto di sangue e quindi di ossigeno. È però un muscolo particolare: non avendo la possibilità di fermarsi temporaneamente, lavorando in maniera continuativa, ha bisogno di un gran quantitativo di energia, e quindi di sangue. Ciò avviene attraverso le coronarie, nelle quali scorre circa il 10% del sangue eiettato ad ogni battito. È intuibile quanto siano pericolose ostruzioni o malfunzionamenti alle coronarie e che, di conseguenza, quando ciò si verificasse, si abbia bisogno di ricorrere a un intervento chirurgico.

1.2 La Circolazione Extracorporea

La necessità di effettuare interventi sul cuore significa quasi sempre arrestare le funzioni cardiache e polmonari e sostituirle con un insieme di dispositivi che prende il nome di circolazione extracorporea (CEC) [3].

Un metodo di incannulazione cardiaca è il by-pass Cardio – Polmonare: consiste nel bypassare tutto il sistema cardiaco, deviando il sangue dalle vene cave direttamente nell'aorta.

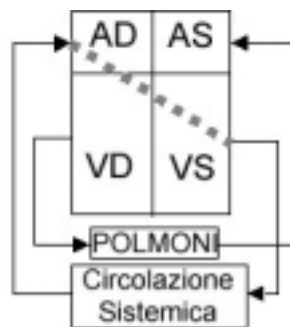


Figura 1.2 By-pass Cardio – Polmonare

In questo modo vengono bypassati i polmoni: nel circuito per la circolazione extracorporea è necessario un dispositivo in grado di rifornire di O_2 il sangue e di asportare la CO_2 . Questa macchina prende il nome di ossigenatore.

Un circuito per la circolazione extracorporea, è composto da:

- Cannule venose e arteriose
- Reservoir
- Ossigenatore
- Pompe
- Scambiatori di calore
- Aspiratori
- Filtri

Open-heart surgery:
cardiovascular products

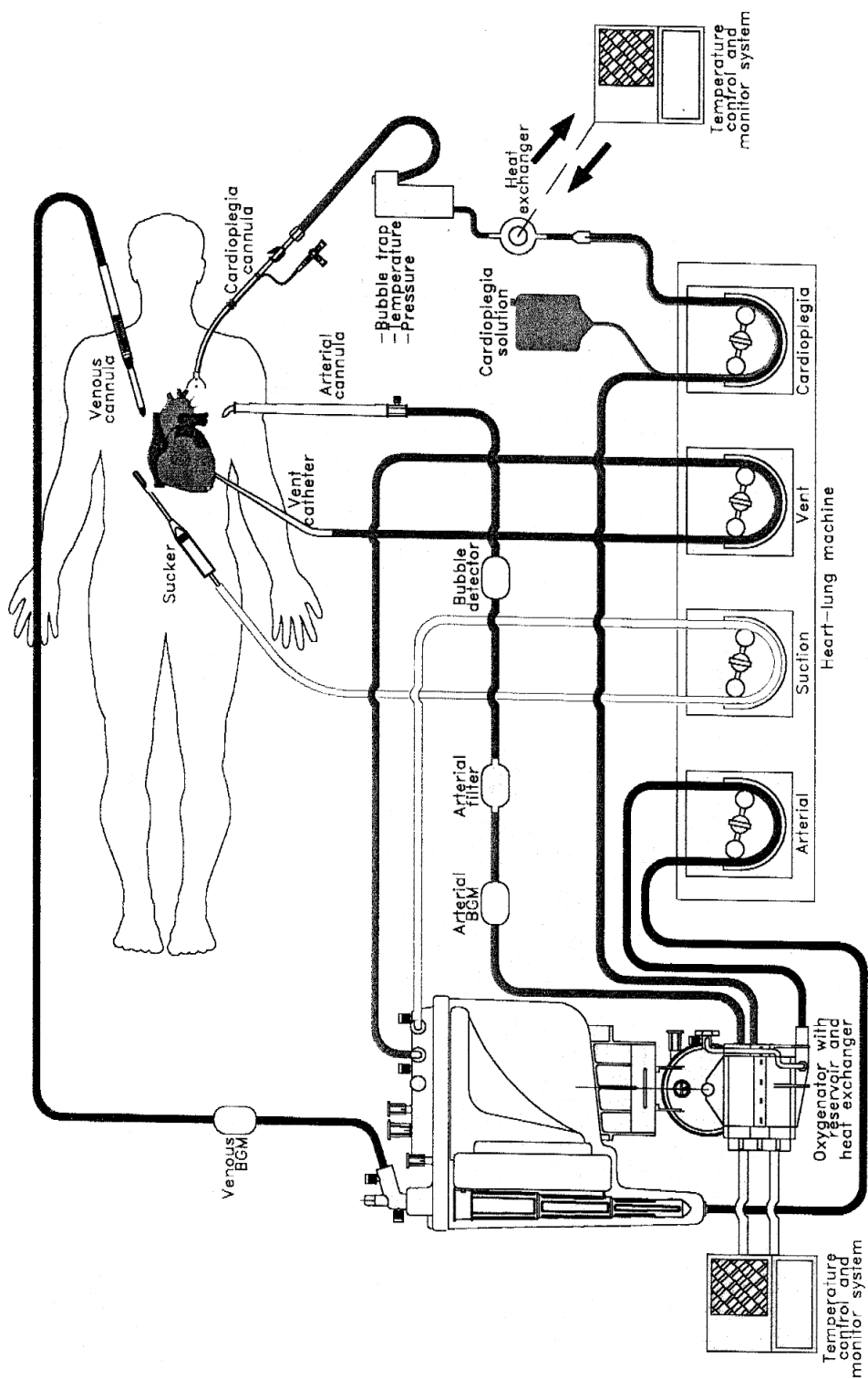


Figura 1.3 Schema di un Circuito per la Circolazione Extracorporea
(con Pompa Roller e Ossigenatore a Membrana)

1.2.1 Cannule

Le cannule utilizzate in circolazione extracorporea, sono tubi in materiale polimerico. Sono progettate in modo da far circolare il sangue con il minimo grado di turbolenza. Devono anche essere sufficientemente robuste per evitare che si pieghino o collabiscano ma, allo stesso tempo, devono essere flessibili per essere maneggiate facilmente.

1.2.2 Pompe

Le pompe utilizzate nel circuito per la circolazione extracorporea (di solito è presente anche una pompa d'emergenza) sono quattro: una è la *main pump*, cioè la pompa che mantiene il sangue in circolo, un'altra è utilizzata per la cardioplegia e le altre due servono come aspiratori.

La pompa principale può essere di due tipi: *Roller* o *Centrifuga*. Entrambe sono a flusso continuo, contrariamente al cuore che, invece, è una pompa pulsatile.

A seconda di parametri soggettivi, la pompa assicura la portata adeguata al paziente (dai 4 ai 7 l/m).

La caratteristica teorica saliente della Roller, essendo una pompa volumetrica, è la capacità, grazie alla sua struttura meccanica, di mantenere costante la portata qualsiasi sia il carico (la resistenza) a valle.

Al contrario con la pompa Centrifuga, la portata varia in relazione al carico (a parità di numero di giri), ma, visto il suo principio di funzionamento, provoca molta meno emolisi della Roller e non manda in circolo eventuali bolle gassose.

I circuiti che sono stati utilizzati negli interventi considerati, includevano taluni una Centrifuga, e gli altri una Roller.

1.2.3 Ossigenatore

In CEC possono essere utilizzati due tipi fondamentali di ossigenatori: a membrana e a gorgogliamento.

La scelta dell'ossigenatore determina differenze nel lay-out circuitale.

Come si vede dalla figura 1.4 lo schema generale di un circuito per la CEC, con Ossigenatore a *membrana*, è il seguente:

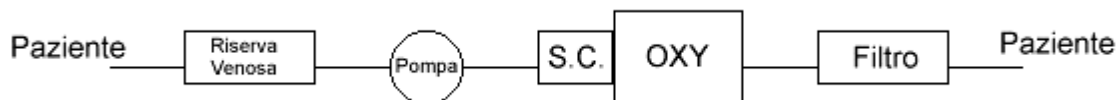


Figura 1.4 Schema del Circuito per la Circolazione Extracorporea

L'ossigenatore è messo a valle della pompa a causa delle sue elevate perdite di carico, che influenzerebbero pesantemente la quantità di sangue che ritorna dal paziente stesso; in questo modo la pompa provvede a compensarle.

Al contrario l'ossigenatore a gorgogliamento andrebbe messo prima della pompa, essendo strutturato in modo da avere una riserva arteriosa derivante dal deschiumpaggio, procedimento necessario dopo il gorgogliamento.

1.2.4 Scambiatore di Calore

Gli scambiatori di calore hanno la funzione di regolare la temperatura del sangue e, di conseguenza, la temperatura del paziente.

Lo scambiatore di calore è posto a monte dell'ossigenatore: l'ossigenatore aumenta notevolmente la pressione parziale dell'ossigeno nel sangue, il quale si può trovare sia in forma legata all'emoglobina, sia in forma disciolta nel plasma; l'ossigeno disciolto, tende ad aggregarsi all'aumentare della temperatura, formando bolle.

Una caratteristica importante di questo dispositivo, posta a salvaguardia dell'asetticità del sangue, è quella di evitare, in caso di danneggiamento, che il liquido termovettore (acqua) vada a contatto col sangue ed entri in circolo. Questo è possibile mantenendo il liquido ad una pressione leggermente inferiore a quella del sangue, in modo tale che, in caso di danneggiamento, sia il sangue a trasferirsi nel circuito esterno e non viceversa.

1.2.5 Reservoir

È un recipiente in cui il sangue va a depositarsi.

Questo dispositivo dà la possibilità di accumulare un certo quantitativo di sangue, svuotando il paziente se il chirurgo ne ha l'esigenza. Esso consente anche di evitare che le vene cave collabiscano a causa di un aumento dei giri della pompa o una vasodilatazione del paziente (comportando un accumulo di sangue nel corpo stesso).

1.2.6 Filtro

Il filtro è sempre presente anche se alcuni lo considerano solo uno strumento cautelativo, visti gli accorgimenti precedenti.

Grazie alla sua struttura microreticolata, impedisce il passaggio di microcoaguli, minuscoli frammenti di tessuto, piccolissime bolle.

Non si monta più di un filtro in serie perché oltre l'alta efficienza del filtro, vi sono misure preventive anche a monte del circuito e soprattutto si aumenterebbero eccessivamente le perdite di carico nel circuito.

1.2.7 Aspiratori

Due delle quattro pompe presenti nel circuito per la CEC, sono usate per gli aspiratori.

Vengono utilizzati due aspiratori, il primo per recuperare il sangue versato nella cavità toracica a causa, per esempio, delle ingiurie chirurgiche, il secondo per recuperare il sangue dall'atrio sinistro proveniente dal circolo bronchiale.

Il sangue recuperato viene filtrato, ossigenato e reimesso nel circuito.

Per il loro principio di funzionamento e le tecniche costruttive, gli aspiratori sono altamente emolitici, poiché sottopongono i globuli rossi a depressioni e a moti turbolenti considerevoli.

1.2.8 Cardioplegia

Nel lasso di tempo in cui avviene l'operazione chirurgica, il cuore deve comunque essere alimentato, per impedire il deterioramento delle fibre muscolari del miocardio.

Se alimentato con sangue però, il cuore tende a riprendere a pulsare. La cardioplegia ematica risolve questo problema: è una soluzione cristalloide, che viene fatta scorrere in maniera anterograda o retrograda, contenente un'elevata concentrazione di ioni potassio che impediscono qualsiasi attività al miocardio [1]. Nella soluzione viene introdotta una piccola quantità di sangue per tentare di ricreare l'ambiente fisiologico.

1.2.9 Eparina

Il contatto tra sangue e materiale estraneo, provoca coagulazione: per evitare ciò, il sangue viene eparinato prima di entrare in circolazione extracorporea. Terminata l'operazione viene somministrato al paziente del solfato di protamina, antidoto dell'eparina, ripristinando l'attività coagulatoria.

La dose iniziale di eparina è 4 mg per chilogrammo peso del paziente ed è iniettata dal chirurgo nell'atrio destro. Il tempo di coagulazione è determinato prima di cominciare la CEC, per assicurare adeguata anticoagulazione. Il tempo di coagulazione è monitorato ogni mezz'ora ed è mantenuto maggiore di 480 secondi da dosi supplementari di eparina.

1.2.10 Volume di Priming

L'intero circuito per la circolazione extracorporea viene preventivamente riempito con un liquido detto di *priming* (dall'inglese: riempimento), costituito principalmente da soluzione fisiologica, eparina, ed eventuali farmaci richiesti dall'anestesista per le condizioni particolari del paziente (uguirol, tranex, ecc.).

Il perché del liquido di priming è semplice: evitare la presenza d'aria (e quindi di bolle) nel circuito.

Il *volume* di priming deve essere il *minore possibile*, il collegamento del paziente al circuito per la circolazione extracorporea, comporta un aumento del volume vasale, e data la presenza del liquido di priming si ha una conseguente diluizione del sangue. E' stato accertato che è

ammissibile un abbassamento dell'ematocrito fino ad un limite del 15%, al disotto del quale, i globuli rossi non sono più sufficienti per soddisfare le esigenze vitali del paziente, anche se si aumenta la portata [2] (andando incontro a seri problemi dovuti all'emolisi).

Quindi, più piccolo è il volume di priming, più piccolo è il grado di diluizione del sangue, con conseguente riduzione delle eventuali complicanze.

1.3 La Teoria sulle Pompe

In circolazione extracorporea, la portata di sangue è garantita dalla pompa del circuito. Attualmente il 99% dei circuiti per la CEC, includono pompe o Roller, o Centrifughe.

Elementi fondamentali per valutare una pompa sono:

- principio di funzionamento
- curva caratteristica ideale – reale
- volume di priming
- emolisi

1.3.1 Le Pompe Roller

Il principio di funzionamento della pompa roller è il seguente: un tubo deformabile, viene posto in un vano semicircolare dove due o più rulli collegati ad altrettanti bracci, ruotando, lo comprimono, spingendo avanti il volume di sangue antecedente al rullo.

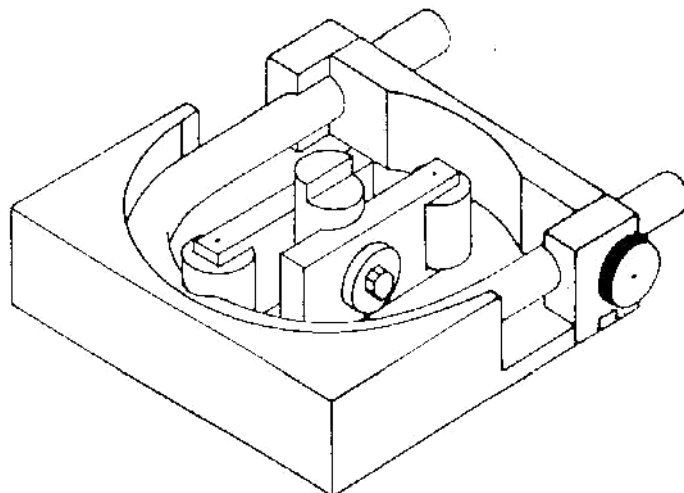


Figura 1.5 Schema della Pompa Roller

La roller è una pompa volumetrica; ciò vuol dire che, se il motore a disposizione è sufficientemente potente, la sua portata dipende esclusivamente dal volume di sangue

spinto nel vano semicircolare e dal numero di giri, indipendentemente dal carico idraulico che deve vincere. Per questo motivo è normale che il motore di questa pompa sia sovradimensionato.

La portata della pompa risulta:

$$Q_{POMPA} = V_{SANGUE} * n_{RULLI} * rpm_{GIRI/UNITA_DI_TEMPO} * \xi$$

dove:

ξ = rendimento volumetrico

V_{SANGUE} = volume presente nel tubo compreso tra due rulli consecutivi

$$= r_1^2 * \pi * \frac{2 \pi r_2}{n} \quad (r_1 = \text{raggio del tubo}; r_2 = \text{raggio del vano semicircolare}; n = \text{numero dei raggi della pompa})$$

Il rendimento volumetrico è un parametro di correzione: calcolando il volume di sangue non si tiene conto del volume di sangue perso, dovuto allo schiacciamento del tubo da parte del rullo stesso.

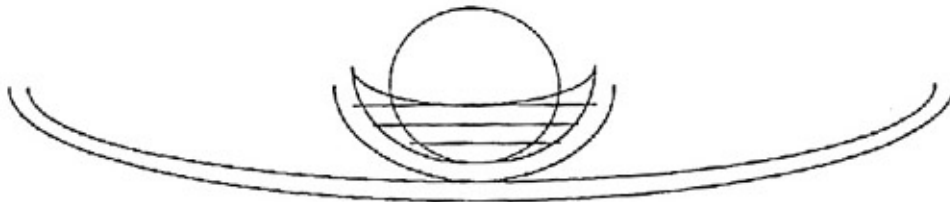


Figura 1.6 Volume Occupato dal Rullo

Un fattore che può far variare la portata, a parità di numero di giri, è la temperatura del sangue e la temperatura a cui la pompa si trova. Infatti, il tubo essendo di materiale polimerico, risente facilmente delle variazioni di temperatura, che provocano variazioni del suo diametro, con conseguente variazione della portata.

Per valutare e comprendere il funzionamento di una pompa, bisogna guardare il grafico rappresentante la sua curva caratteristica.

Questa curva mette in relazione la portata con la prevalenza ΔH . La prevalenza è la differenza di pressione (o di energia) del fluido tra ingresso e uscita della pompa, e ΔH indica l'altezza, in metri, di una colonna d'acqua che la pompa riesce a pompare in verticale.

La curva caratteristica della pompa roller è una semiretta parallela all'asse della prevalenza:

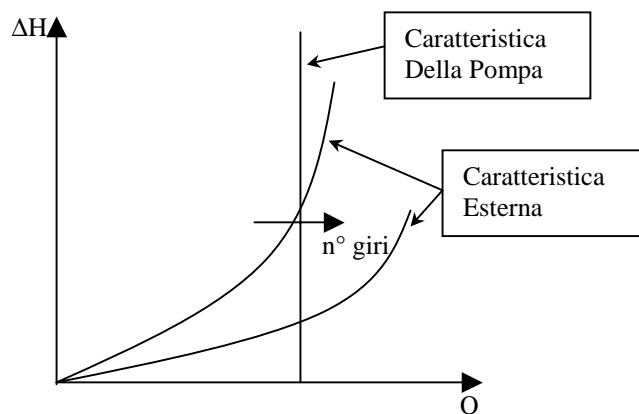


Figura 1.7 Curva Caratteristica della Pompa Roller

Il numero di giri è direttamente proporzionale alla portata; facendo traslare parallelamente all'asse della prevalenza la retta caratteristica (all'aumentare del numero di giri, aumenta proporzionalmente la portata).

Avendo questo tipo di caratteristica, la pompa roller, mantiene costante la portata qualsiasi sia la caratteristica esterna e ciò è di fondamentale importanza per la circolazione extracorporea.

Il volume di priming di questa pompa è rappresentato dal volume del tratto di tubo posto all'interno della sede semicircolare (tubo sottopompa), oltre, ovviamente, ai tubi necessari per collegare la pompa al resto del circuito.

L'emolicità della pompa roller è alta. Se i rulli ocludessero totalmente il tubo, la pompa provocherebbe un'emolisi troppo elevata, ma se ocludessero troppo poco la portata crollerebbe.

Quindi è necessario sollevare il rullo quanto basta per permettere di sfuggire allo schiacciamento ai globuli rossi troppo vicini al fronte del rullo che avanza.

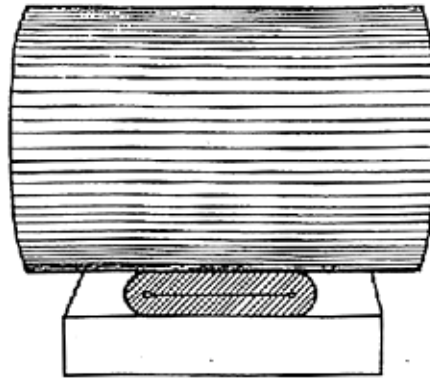


Figura 1.8 Rullo che Schiaccia il Tubo: Formazione dei Meati

In questo modo si ha la formazione di due meati agli estremi del tubo schiacciato. Grazie ai meati i globuli rossi, che stanno per essere schiacciati, hanno la possibilità di rifluire in senso contrario al moto dei rulli.

Così facendo, l'unica emoliticità è quella dovuta agli sforzi di taglio causati dagli elevati salti di pressione nei meati:

$$\tau = J * \frac{D}{4} * \gamma$$

dove J è la cadente:

$$J = \lambda * \frac{v^2}{2gD} \quad \text{in cui} \quad \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{\text{LAMINARE}} = \frac{64}{\text{Re}} \\ \lambda_{\text{TURBOLENTO}} = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}} \end{array} \right.$$

La presenza di questi meati però, toglie alla pompa le proprietà volumetriche, dando luogo ad una portata di rigurgito, rendendo così la portata funzione del carico esterno.

La curva caratteristica varia notevolmente, dipendendo dal diametro di questi orifizi, il quale è indicato con ΔR , cioè la distanza del rullo dalla posizione di completa occlusività (per decimi di millimetro cambia la curva caratteristica):