

Le proprietà reologiche del sangue (prima parte  
per il corso di Fenomeni di Trasporto 2013)

Arti Ahluwalia

**Arti.ahluwalia@centropiaggio.unipi.it**

Address: Centro di Ricerca “E. Piaggio”,  
Università d Pisa

Sangue è un tessuto connettivo, che può essere considerato una emulsione e una sospensione.

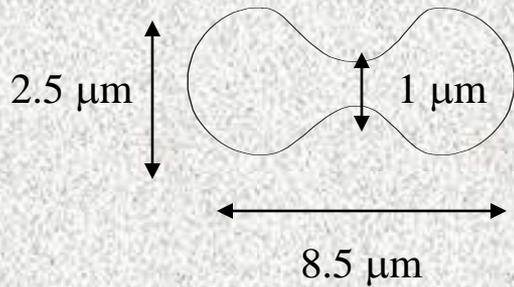
La sospensione è la parte cellulare:

- Globuli rossi (RBC, GR) o eritrociti:  $5 \cdot 10^6 / \text{mm}^3$  (95% del volume cellulare totale)- trasporto di ossigeni
- Globuli bianchi, sono maggiormente i linfociti :  $5 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^3 / \text{mm}^3$  (0.13%) - difesa
- Piastrine :  $250000-300000 / \text{mm}^3$  (4-5%)-coagulazione

L'emulsione è plasma

- Fibrinogeno: proteina responsabile per la coagulazione 0.3 g/100 ml
- Albumina 4.8 g/100 ml
- Globuline 2.5 g/100 ml
- Acqua: 90% del plasma
- Sali organici
- Glucosio
- Urea
- Vitamine, ormoni, grassi liberi etc

Siero è plasma senza fibrinogeno. Non coagula. Il fibrinogeno si polimerizza per formare la fibrina che intrappola le piastrine, così iniziando la formazione di un trombo.



GR: funzione principale è il trasporto di  $O_2$ .

Perché servono e come sarebbe la vita senza?

La parte cellulare è circa 50% del volume totale del sangue. I GR sono la componente predominante. Hanno una vita di circa 120 giorni, sono anucleate e sono formate nel midollo osseo. 33% wt del GR è emoglobina (Hb). Non hanno mitocondri

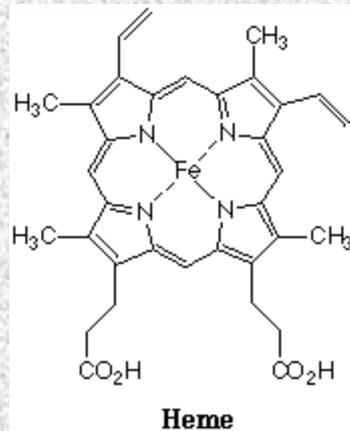
Per qr le proprietà meccaniche, hanno 3 caratteristiche importanti:

- Deformabilità (e incomprimibilità)
- Si allineano con il flusso
- aggregabilità

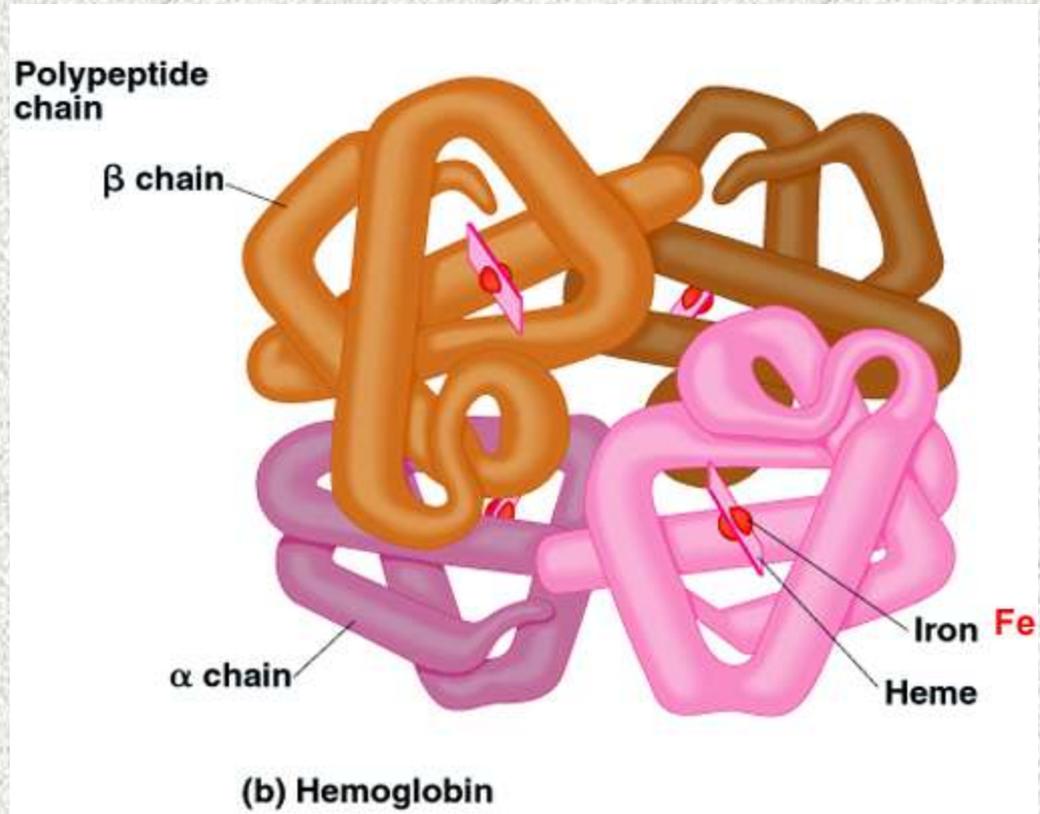


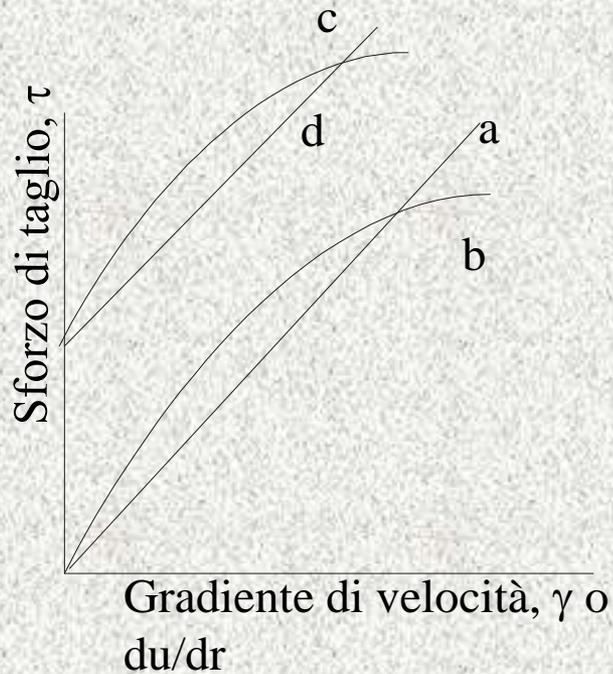
H= ematocrito, % del volume sanguigno occupato dalle cellule. Può spaziare dal 25% (anemia) a 75% (policitemia).

Ghost cells



E' una porfirina – funziona da gabbia per O<sub>2</sub>.





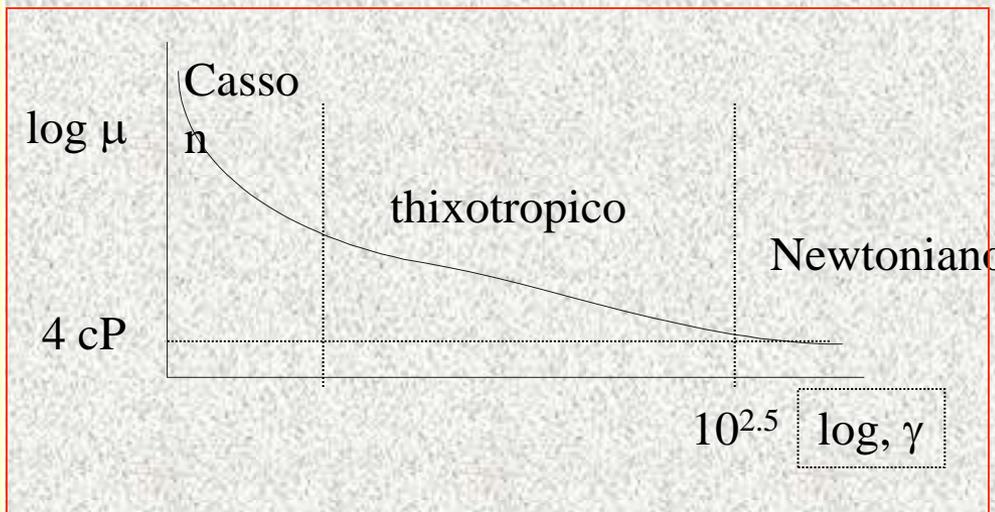
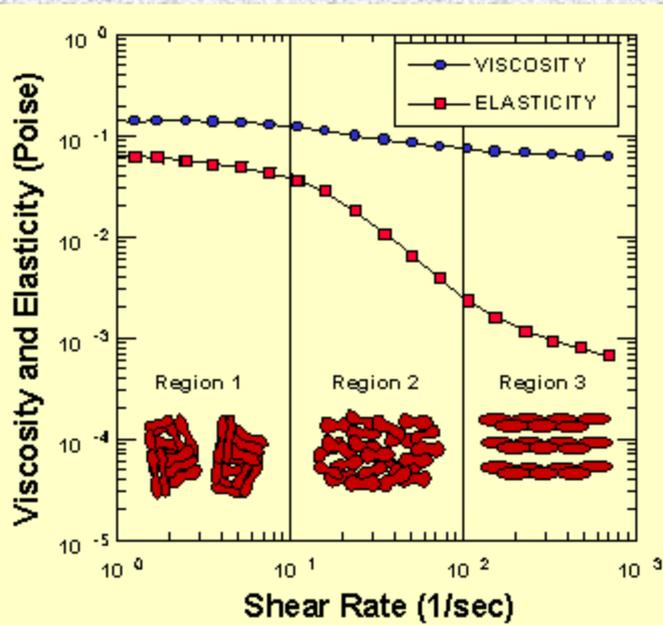
a: Fluido Newtoniano  $\sigma = \mu \dot{\gamma}$

b: Power law (thixotropico)  $\tau = \mu \dot{\gamma}^n$

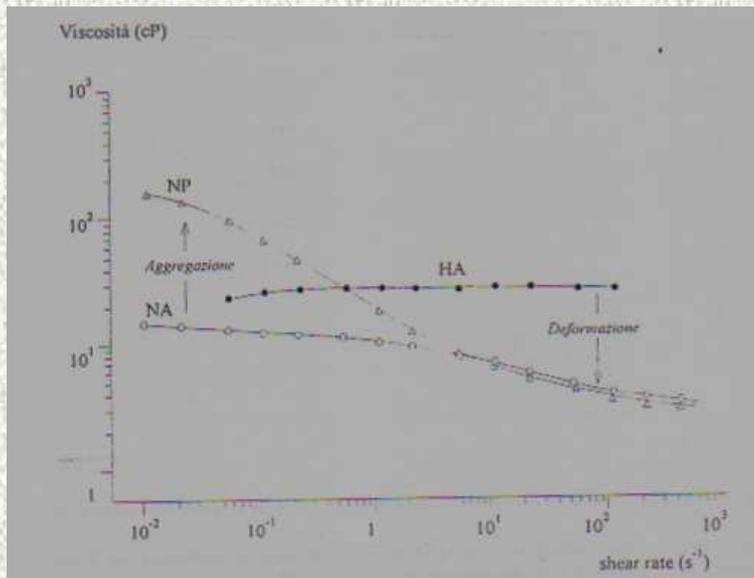
c: Plastica di Bingham  $\tau = \mu \dot{\gamma} + \tau_y$

d: Fluido Casson  $\sqrt{\tau} = \sqrt{\mu \dot{\gamma}} + \sqrt{\tau_y}$

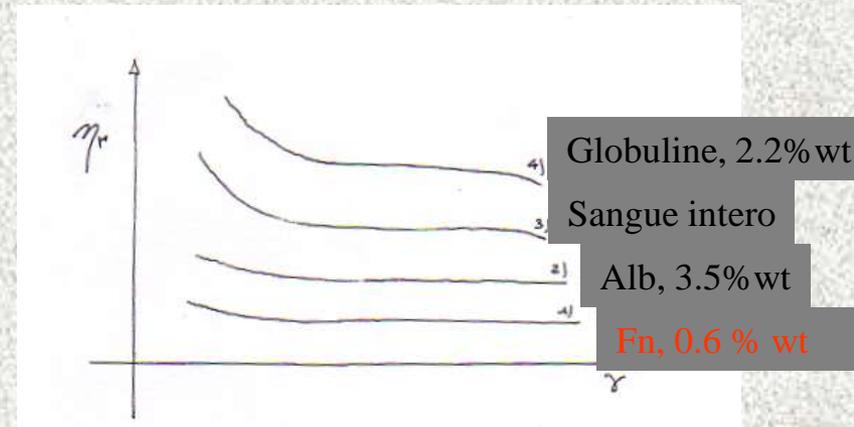
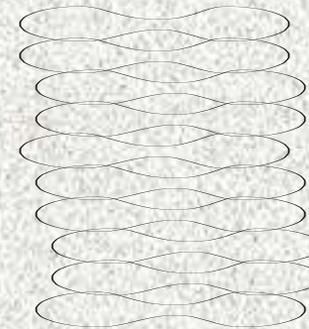
Le unità di viscosità  $\mu$  sono Pa s, o Poise, P (g/(cm s)). Quanti Poise in un Pa s? La viscosità di acqua è 1 cP, quella del sangue ad alto  $\dot{\gamma}$  è 4 cP. Plasma è Newtoniano, 1.2 cP.



**Aggregabilità:** i Gr formano aggregati, o rouleaux. La loro formazione è mediata da fibrinogeno e globuline. I rouleaux sono responsabili per la alta visosità del sangue a basse gradiente di velocità. L'aggregazione aumenta a basso  $\gamma$ , mentre a zero  $\gamma$ , il sangue si comporta come un solido- veramente è impossibile fare misure a zero  $\gamma$ . I rouleaux sono impilamenti di GR, circa 16. La loro lunghezza totale è minore della somma di lunghezze di GR liberi, mentre il diametro è maggiore.

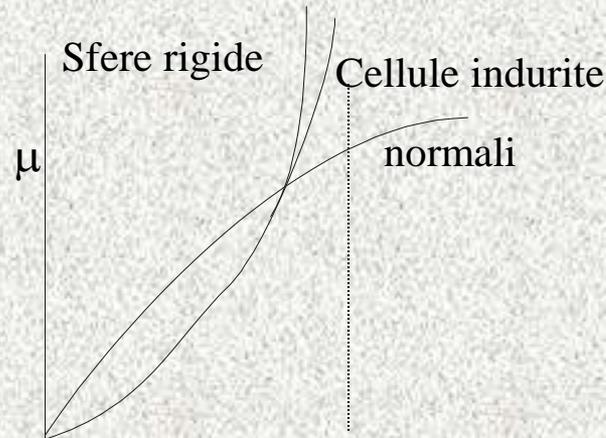


NP: cellule normali nel plasma, HA cellule indurite nel plasma, NA cellule in 11% albumina (senza Fn o Globuline)

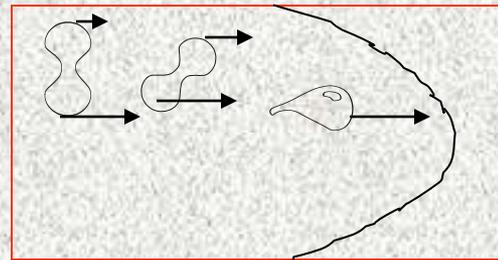


Deformabilità: i GR sono incompressibili, ma molto deformabili. Questo ha conseguenze importanti.

- Riduce la viscosità ad alto gradiente di velocità.
- Permette le cellule di allinearsi con il flusso così diminuendo la viscosità ad alti gradienti
- Permette iGR di passare nei capillari piccoli così  $O_2$  non deve attraversare il plasma per arrivare alle cellule del corpo.



H



Allineamento- si allineano con il flusso così i GR viaggiano nella parte centrale: plasma skimming.

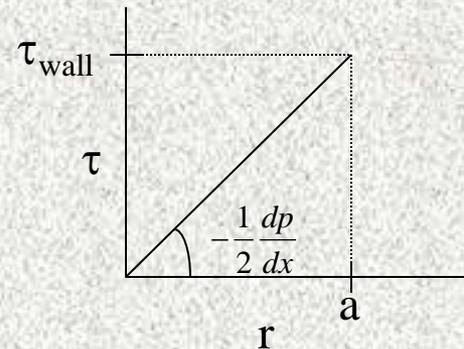
Rivedere la derivazione dell'equazione di Poiseulle

Newtoniano, no slip alle pareti, stazionario, laminare, uniassiale, tubo rigido e infinitamente lungo.

Le equazioni sono:  $\tau = -\frac{r}{2} \frac{dp}{dx}$  ,  $\tau = \mu \dot{\gamma}$  ,  $\tau = -\mu \frac{du}{dr}$  ,  $-\frac{du}{dr} = \dot{\gamma}$

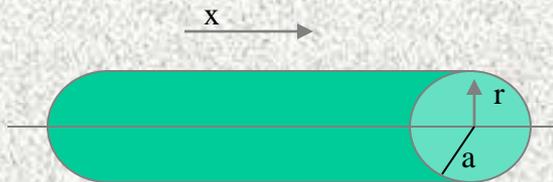
$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} (a^2 - r^2) \frac{dp}{dx} , \quad Q = 2\pi \int_0^a u r dr , \quad Q = -\frac{\pi a^4}{8\mu} \frac{dp}{dx}$$

$$u_m = \frac{a^2}{8\mu} \frac{dp}{dx}$$



$$\tau_{wall} = -\frac{a}{2} \frac{dp}{dx} = \frac{4\mu}{\pi a^3} Q = 4\mu \frac{u_m}{a}$$

$$\dot{\gamma}_{wall} = \frac{-4u_m}{a}$$



*Possiamo calcolare lo sforzo di taglio per i vari vasi*

$$\gamma_{wall} = \frac{-4u_m}{a}$$

Calcolare  $\gamma_{wall}$  per vari vasi

**Table 3.1.** Some properties of the circulation and blood

Number of red blood cells ( $\text{mm}^{-3}$ )	$5 \times 10^6$	Specific gravity	1.06
Number of white blood cells ( $\text{mm}^{-3}$ )	$10^4$	Heart rate ( $\text{min}^{-1}$ )	60–70
Blood volume (L)	5–6	Cardiac output ( $\text{L min}^{-1}$ )	5–6
Viscosity of whole blood (mPa s; cP)	3–4*	Stroke volume (mL)	70

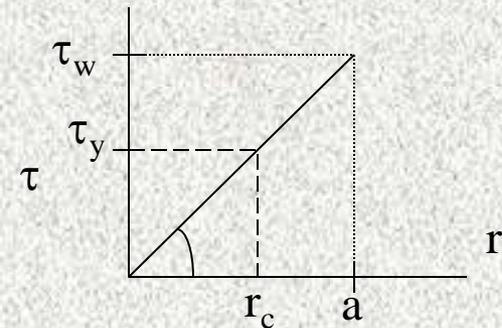
  

Vessels	Diameter (mm)	Length (cm)	Wall thickness (mm)	Contained volume ( $\text{cm}^3$ or mL)	Mean pressure (mmHg)	Average velocity ( $\text{cm s}^{-1}$ )	Reynolds number	
							Average	Maximum
Aorta	25.0	40.0	2.0	100	100(av.)	40(av.)	3000	8500
Arteries	15–0.15	15.0	0.8	350	90(av.)	40–10	500	1000
Arterioles	0.14–0.01	0.2	0.02	50	60	10–0.1	0.7	—
Capillaries	0.008	0.05	0.001	300	30–20	< 0.1	0.002	—
Venules	0.01–0.14	0.2	0.002	300	20	< 0.3	0.01	—
Veins	0.15–15	18.0	0.6	2500	15–10	0.3–5	150	—
Vena cava	30.0	40.0	1.5	300	10–5	5–30	3000	—

# Flusso Casson

Vicino al centro di un tubo o vaso con flusso stazionario, il centro ha sempre  $\gamma = 0$ , quindi c'è sempre un flusso di Casson al centro dei vasi (se hanno un diametro grande).

Supponiamo che il flusso di sangue è governato dall'equazione di Casson in un sistema uniassiale, laminare, tubo rigido ecc.  $\tau_w$  è lo sforzo di taglio alla parete, e  $\tau_y$  è lo sforzo critico o yield stress.  $a$  è il raggio del tubo e  $r_c$  il raggio dove sforzo di taglio =  $\tau_y$ .



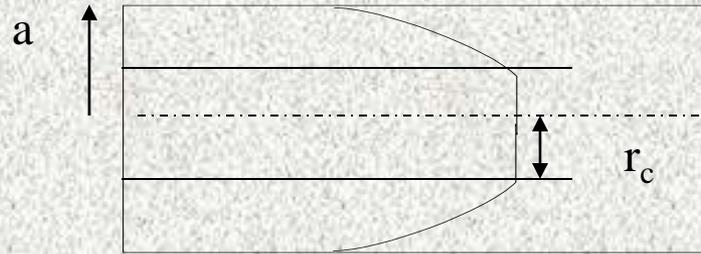
$$\tau_w = -\frac{a}{2} \frac{dp}{dx}$$

$$\tau_y = -\frac{r_c}{2} \frac{dp}{dx}$$

Se  $\tau_y > \tau_w$  o  $r_c > a$ , non c'è flusso- il sangue si comporta come un pistone solido (the blood moves like a solid piston if at all). Il flusso  $u=0$  quando

$$-\frac{dp}{dx} < \frac{2\tau_y}{a}$$

Se  $\tau_y < \tau_w$  cioè  $r_c < a$  o  $-\frac{dp}{dx} > \frac{2\tau_y}{a}$ , il profilo di velocità sarà come un pistone nel centro e poi obbedisce l'equazione di Casson.



Si può usare l'equazione di Casson invece del Newton  $\tau = -\mu \frac{du}{dr}$  per trovare il flusso Q.

Viscosità apparente e relativa: Se in un fluido non Newtoniano, si misura il flusso  $Q$  e la caduta di pressione  $dp/dx$  at un istante, si puo ottenere una viscosita apparente utilizzando l'equazione di Poiseuille. In questo caso si scrive  $\mu_{app}$ , (unità Pa s or Poise),

$$\mu_{app} = \frac{dp}{dx} \frac{\pi a^4}{8Q}$$

Se  $\mu_0$  è la viscosità del plasma, (1.2 cP), il rapporto  $\mu_{app}/\mu_0$  è la viscosità relativa (adimensionale)