

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.

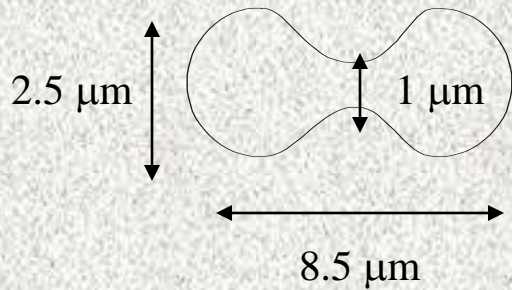
La sospensione è la parte cellulare:

- 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

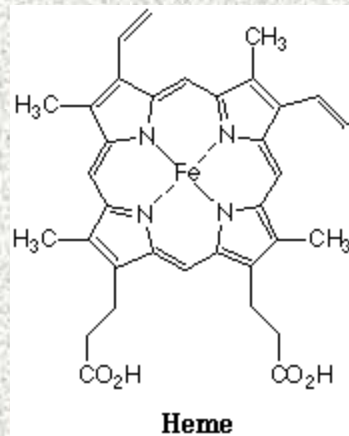
Per qr le proprietà meccaniche, hanno 3 caratteristiche importanti:

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

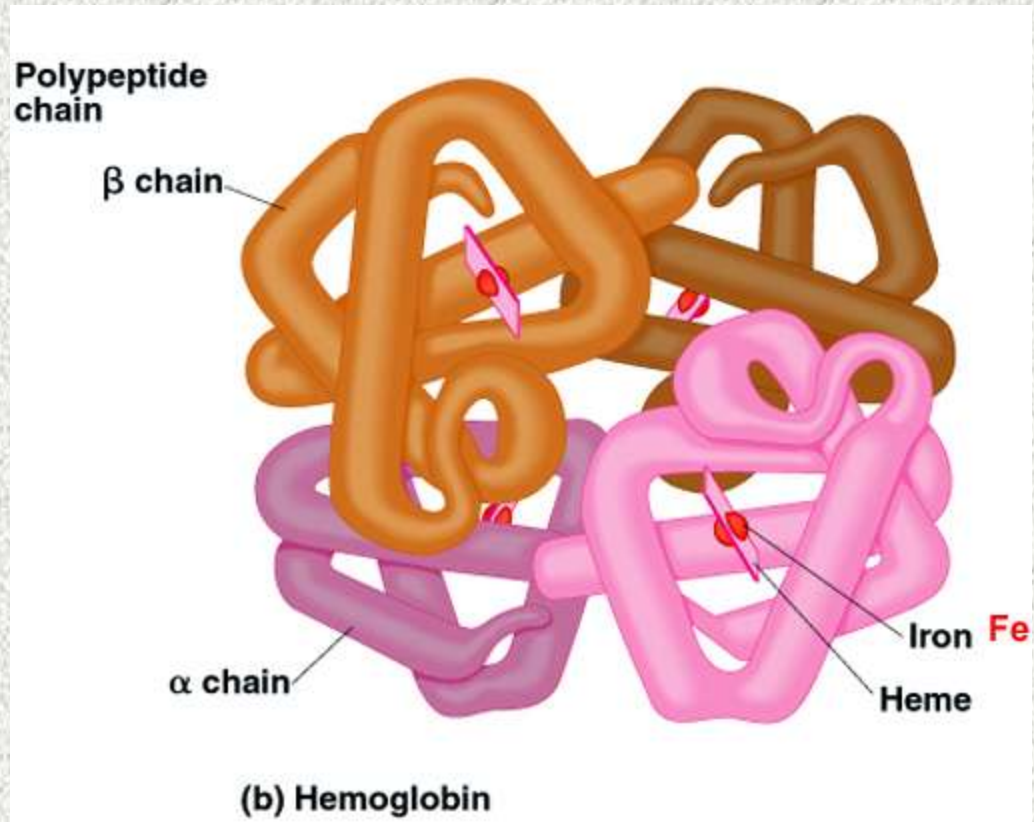


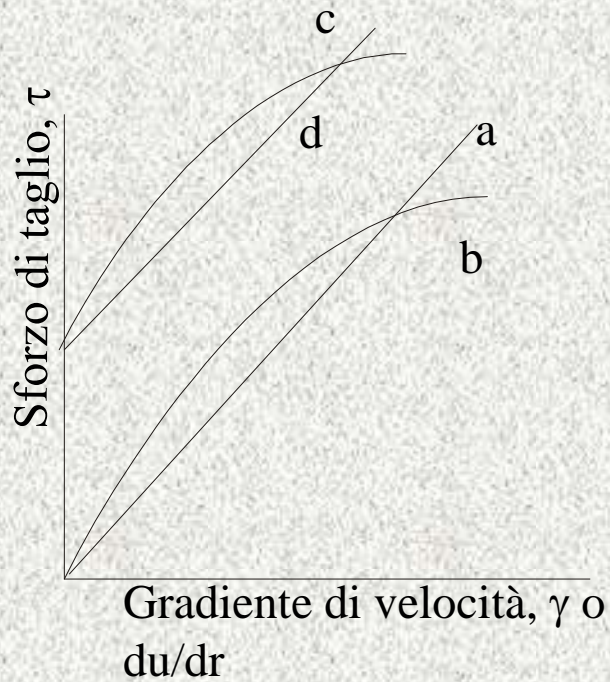
H= ematocrito, % del volume sanguigno occupato dalle cellule. Può spaziare dal 25% (anemia) a 75% (policitemia).

Ghost cells



E' una porfirina – funziona da gabbia per O₂.





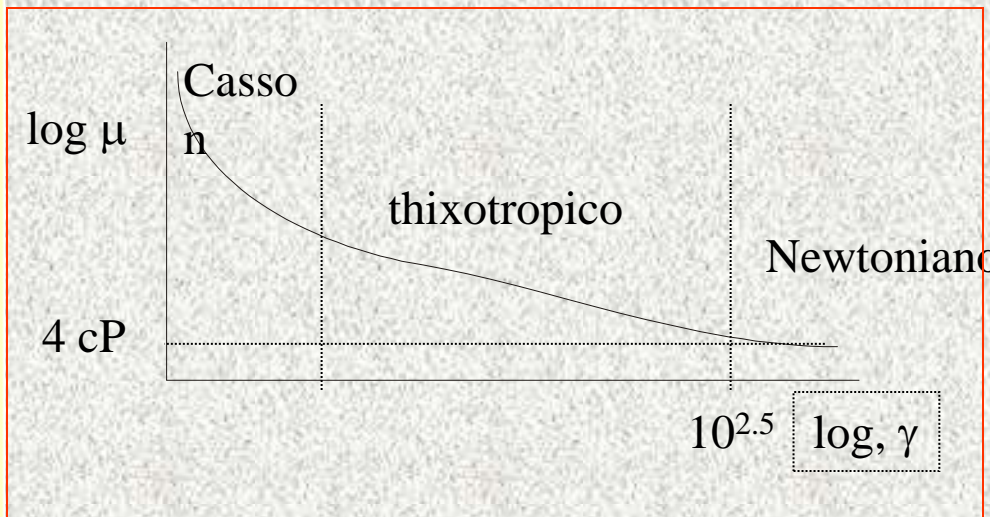
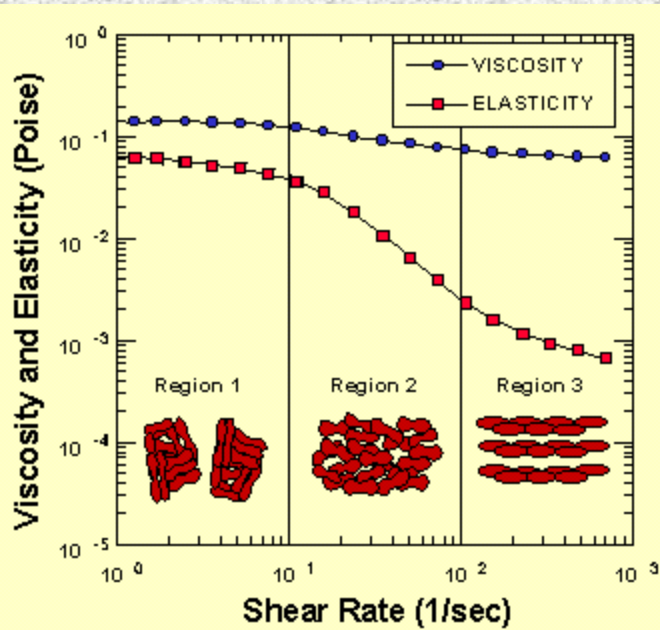
a: Fluido Newtoniano $\sigma = \mu \dot{\gamma}$

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

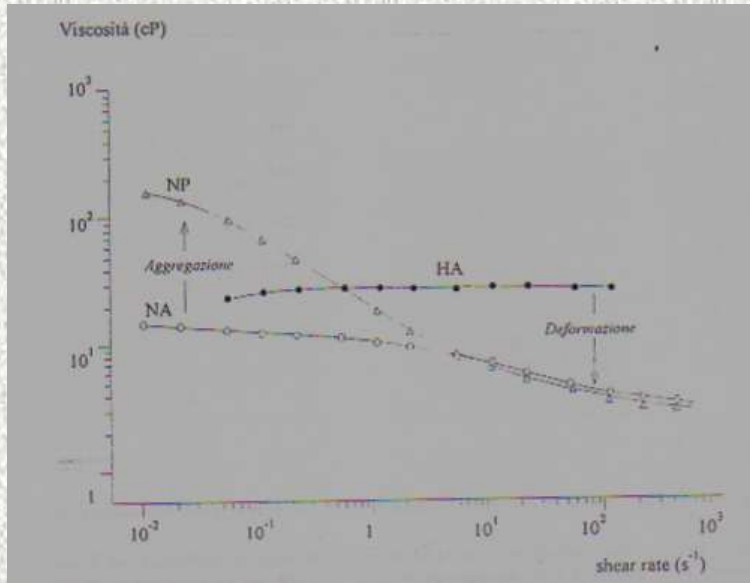
c: Plastica di Bingham $\tau = \mu \dot{\gamma} + \tau_y$

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

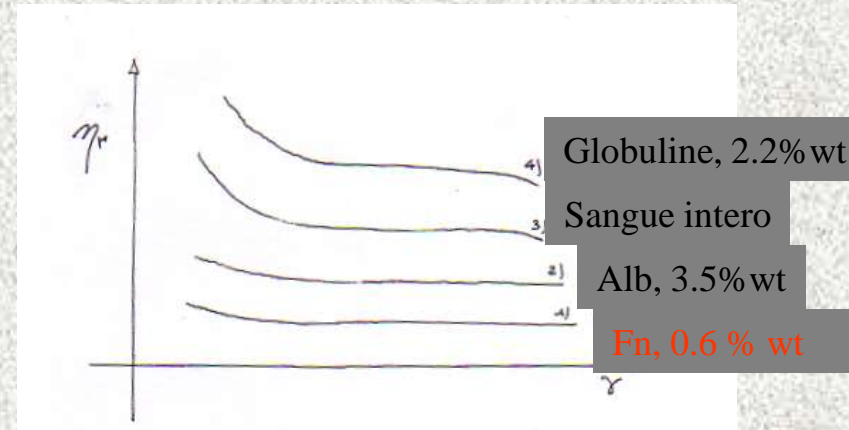
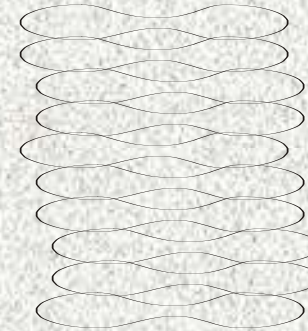
Le unità di viscosità μ sono Pa s, o Poise, P (g/(cm s)). Quanti Poise in un Pa s? La viscosità di acqua è 1 cP, quella del sangue ad alto $\dot{\gamma}$ è 4 cP. Plasma è Newtoniano, 1.2 cP.



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 γ , mentre a zero γ , il sangue si comporta come un solido- veramente è impossibile fare misure a zero γ . 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.

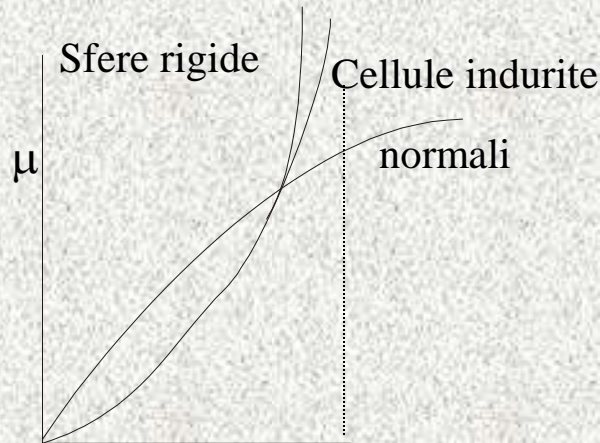


NP: cellule normali nel plasma, HA cellule indurite nel plasma, NA cellule in 11% albumina (senza Fn o Globuline)

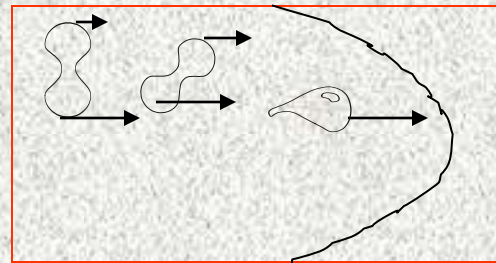


Deformabilità: i GR sono incompressibili, ma molto deformabili. Questo ha conseguenze importanti.

- 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

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

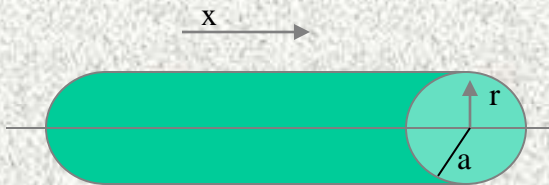
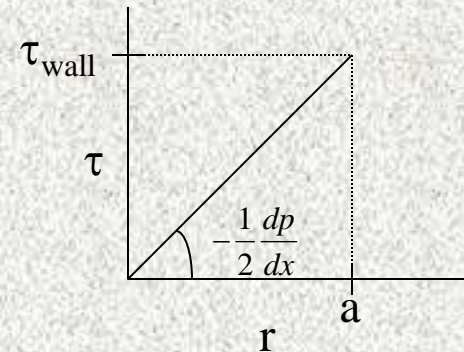
Le equazioni sono: $\tau = -\frac{r}{2} \frac{dp}{dx}$, $\tau = \mu \dot{\gamma}$, $\tau = -\mu \frac{du}{dr}$, $-\frac{du}{dr} = \dot{\gamma}$

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

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

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

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



Possiamo calcolare lo sforzo di taglio per i vari vasi

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

Calcolare γ_{wall} per vari vasi

Table 3.1. Some properties of the circulation and blood

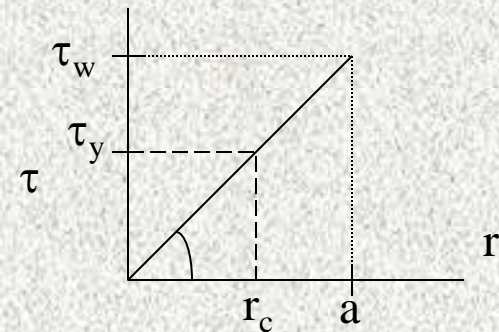
Number of red blood cells (mm^{-3})	5×10^6	Specific gravity	1.06
Number of white blood cells (mm^{-3})	10^4	Heart rate (min^{-1})	60–70
Blood volume (L)	5–6	Cardiac output (L min^{-1})	5–6
Viscosity of whole blood (mPa s; cP)	3–4*	Stroke volume (mL)	70

Vessels	Diameter (mm)	Length (cm)	Wall thickness (mm)	Contained volume (cm^3 or mL)	Mean pressure (mmHg)	Average velocity (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. τ_w è lo sforzo di taglio alla parete, e τ_y è lo sforzo critico o yield stress. a è il raggio del tubo e r_c il raggio dove sforzo di taglio = τ_y .



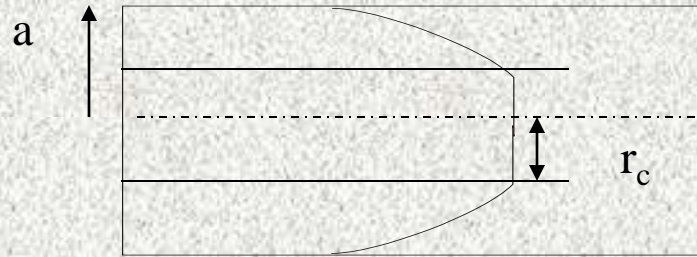
$$\tau_w = -\frac{a}{2} \frac{dp}{dx}$$

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

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 Poisellue. In questo caso si scrive μ_{app} , (unità Pa s or Poise),

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

Se μ_o è la viscosità del plasma, (1.2 cP), il rapporto μ_{app}/μ_o è la viscosità relativa (adimensionale)