

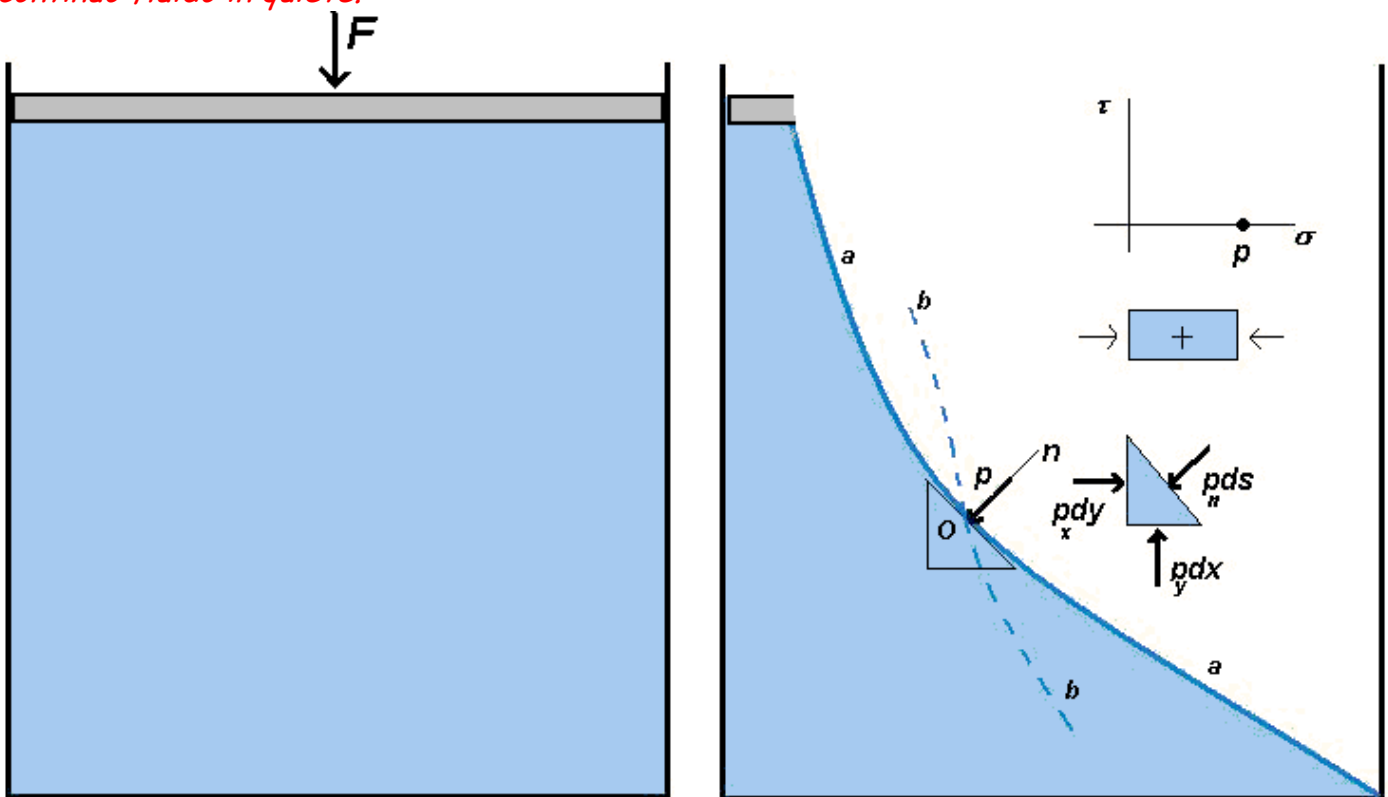
Prima, tuttavia, è opportuno chiarire che cosa si intenda per fluido.

definizione di fluido

COME definire il comportamento fluido? Quale è la differenza tra stato solido e stato fluido? Banale no? Proviamo a vedere se qualcuno riesce a definire in cosa consiste questa differenza. Definire in modo univoco e generale cosa si intenda per comportamento fluido è una operazione meno banale di quanto si creda.

Consideriamo fluidi ordinari: acqua e aria

Una prima definizione può fare ricorso allo stato di sforzo in un continuo e in un continuo fluido in quiete.

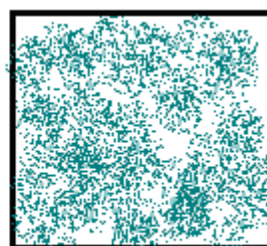


solido

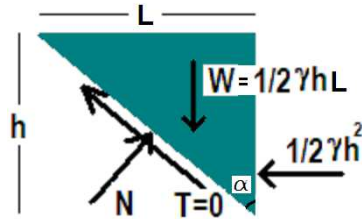
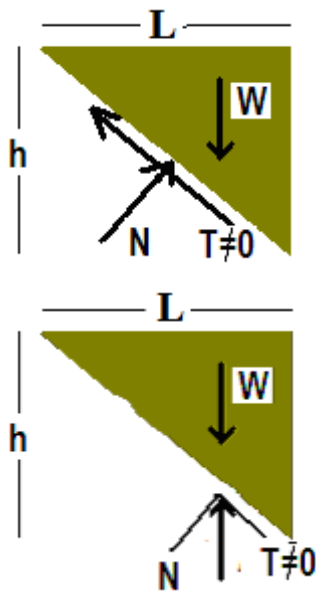
cubo di calcestruzzo cui sia stata tolta la cassetta



liquido contenuto da una recipiente

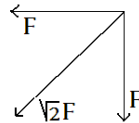


areiforme



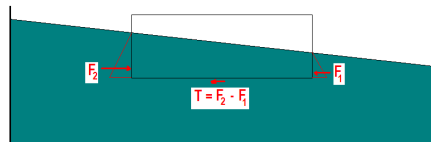
Ad esempio, nel caso di triangolo rettangolo isoscele,

$$\begin{cases} T + N = \sqrt{2}F \\ -T + N = \sqrt{2}F \\ F = 1/2 \gamma h^2 \end{cases}$$



mostrare prima questo e poi passare al liquido con aggiunta della spinta idrostatica

Una conferma empirica di tale fatto deriva da questa osservazione: forma assunta dalla superficie libera di un liquido in un recipiente. Se il liquido fosse in grado di sostenere azioni tangenziali senza scorrere la superficie potrebbe essere inclinata



Il bilancio delle forze, una volta tolto il recipiente, mostra che il liquido e l'areiforme non possono permanere in quiete poichè non possono reggere azioni di taglio senza entrare in movimento. L'elementino liquido scivola verso il basso poichè non vi è componente tangenziale che possa contrapporsi al suo scivolamento.

Quindi in un fluido in quiete lo stato di sforzo si riduce sul piano di Mohr ad un punto.

Mostrare isotropia del tensore degli sforzi

In realtà in movimento questa componente potrebbe svilupparsi ma si annulla all'annullarsi del gradiente di v . In moto le cose cambiano: un fluido può esercitare sforzi anche molto elevati che dipendono dalla velocità di deformazione. Per questa ragione l'impatto con un liquido ad alte velocità relative è assimilabile all'impatto contro una superficie solida. Si veda il film Camminare sopra un liquido che evidenzia che è proprio il gradiente di velocità che induce l'insorgere di sforzi che rendono simile ad un solido il comportamento del fluido.

Inoltre esistono liquidi che resistono a sforzi tangenziali anche in quiete: boiaccia di cemento, dentifricio, fanghi di perforazione...

Un'altra definizione, meno precisa, che enfatizzi gli aspetti tecnici, parziale conseguenza di quanto detto, è quella secondo cui il comportamento solido è quello di una sostanza dotata di forma e volume proprio, quello liquido è di una sostanza dotata

di volume proprio ma non di una forma specifica mentre un comportamento areiforme è proprio di una sostanza priva sia di forma che di volume proprio. Evidentemente tutto ciò è conseguenza della diversa forza del legame intermolecolare nei tre stati di aggregazione e della **posizione fissa delle molecole in un solido in contrapposizione al caso dei fluidi**. Inoltre, il fatto che i fluidi non siano dotati di forma propria è una conseguenza del fatto che i fluidi non resistono in quiete ad una azione tangenziale. Questo è interessante perchè come vedremo più avanti gli sforzi in un fluido non possono dipendere dallo spostamento.

Tuttavia il fatto che i liquidi siano dotati di volume proprio è poi parzialmente improprio, poichè, come vedremo tra poco, la comprimibilità è piccola ma non nulla nei liquidi. Se fosse così le onde sonore si trasferirebbero a velocità infinita nei liquidi, cosa non vera.

Sembra quindi tutto a posto: tuttavia ci possiamo rendere conto che ci sono comportamenti assimilabili ai fluidi che non rientrano in questa definizione:

la folla può definirsi come un fluido ? La sabbia (<http://youtu.be/yg2djmjENWs>) ? Il calcestruzzo ? Le colate detritiche ?
(vedi film e Debris Flow1-3 e Debris_flow_river)

Infine cosa dire del ghiacciaio, (mostrare [profilodivelocitàinn ghiacciaio.pdf](#)), del **mantello terrestre (tettonica a placche)**,

Partendo da quest'ultima considerazione potremmo **rinunciare a definire cosa sia un fluido per invece definire un comportamento fluido**, in termini molto generali, come fece Reiner, padre della reologia.

Egli osservò che alcune sostanze solide sottoposte a forzanti che permangono nel tempo possono dare luogo non solo ad una deformazione ma ad un vero scorrimento, che, su scale temporali lunghe o geologiche può inquadrarsi negli schemi del moto dei fluidi. Immaginando di avere filmato l'esperimento e riproiettando il tutto in rapida sequenza, vedremo sotto i nostri occhi che il piombo si è comportato in modo "fluido".

Parrebbe, quindi, che il comportamento fluido di sostanze che a prima vista hanno un comportamento solido sia una questione di scale temporali di osservazione. Questo fatto è noto da molto tempo. La profetessa Debora, ringraziando Dio per la vittoria sui Filistei, scriveva (Cantico di Debora e di Barak, Giudici 5. Versione Nuova Diodati)

I monti fluirono davanti all'Eterno...

e certo le montagne non possono sciogliersi di fronte all'uomo, ma per la semplice ragione che la vita dell'uomo è troppo breve per poterlo vedere!

In un tempo eterno anche un solido ha un comportamento assimilabile ad un fluido. Che poi il fatto sia in qualche modo vero lo attesta la presenza delle pianure alluvionali. Lo stesso principio è stato ribadito più recentemente da Bob Dylan, (Blowin' in the wind, 1963), il quale cantava

*How many years can a mountain exist
Before it's washed to the sea?*

Sulla base di queste considerazioni, potremmo introdurre il primo rapporto adimensionale del corso, che Reiner (fondatore della Reologia) ha chiamato numero di Deborah

$$De = \frac{T_R}{T_O}$$

Rapporto tra tempo di rilassamento di una sostanza (tempo di risposta molecolare alle sollecitazioni) e il tempo caratteristico di osservazione

Quindi, prescindendo dalla definizione di fluido, possiamo parlare di comportamento fluido quelli associati a bassi numeri di Deborah, che significano equivalentemente o tempi di riassetto molecolare assai rapidi o scale molto lunghe di osservazione.

Ovviamente, parlare di comportamenti fluidi come di quei comportamenti associati a bassi numeri di Deborah rischia di causare incomprensioni.

*Ora che abbiamo definito un fluido descriviamone alcune proprietà salienti;
Prima però precisiamo il concetto di continuo fluido,
Concetto di REV: noi facciamo uso di una meccanica del continuo. E' legittimo ?
Legittimiamola partendo da un semplice calcolo*

moli	1
R	8.314
T	293.15
P	101325
V	0.024054599 Volume occupato da una mole in mc 24054598.96 Volume occupato da una mole in mm cubi
N	6.02214E+23 numero di Avogadro 2.50353E+16 numero di molecole presenti in un mm cubo

Quindi questo mostra il numero straordinario di molecole presenti in un volume molto piccolo

Caso della molecola di Ossigeno

Diametro molecolare	3E-10 m
Volume molecolare	1.413E-29 volume di una singola molecola di O2
volume totale	3.53749E-13 volume complessivo delle molecole in mc
rapporto di riempimento	0.000353749 volume complessivo delle molecole in mm cubi

Questo mostra che lo spazio è sostanzialmente vuoto

libero cammino medio a P,T	0.000000063 m
numero di collisioni in un micron	15.87301587

Ma che è sede di frequenti collisioni tra le molecole: origine della pressione

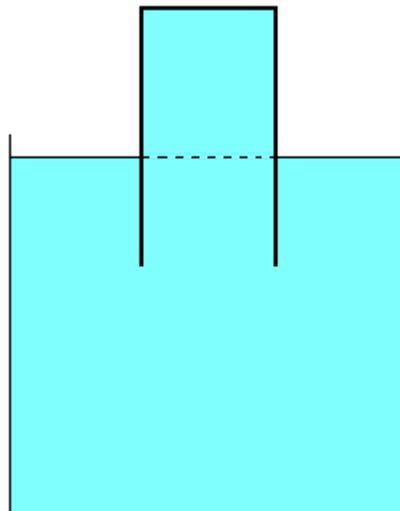
Il rev dipende dallo stato di aggregazione e dalla temperatura e pressione.

Proprietà dei fluidi

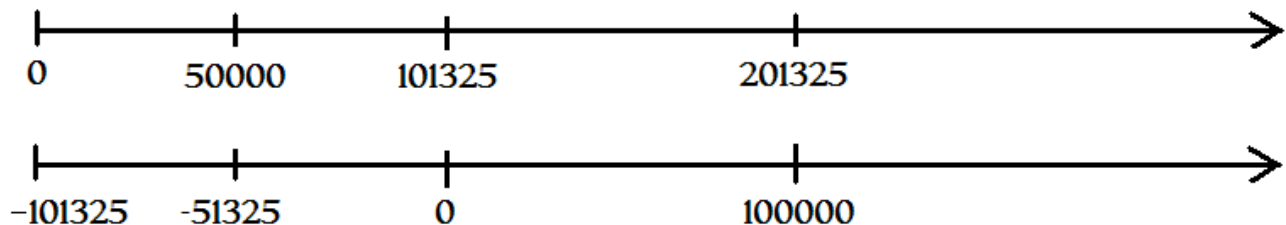
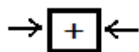
Si possono introdurre tre categorie diverse di proprietà: Cinematiche, di trasporto, termodinamiche.

Pressione

- Stato di sforzo in un continuo. Natura tensoriale
- In un fluido in quiete lo stato di sforzo è isotropo e sempre in compressione. Mostrare
- Origine fisica della pressione nei fluidi (collisioni e libero cammino medio)
- Importanza della pressione per le sollecitazioni sui manufatti (la p si esercita anche sul contorno) e dei gradienti di pressione per gli atti di moto: lo sbilanciamento di pressione fa partire un proiettile
- P atmosferica ed esperienza di Torricelli (1640). Equilibrio alla traslazione e valore della pressione atmosferica (fare esperienza in classe)



- P relative e assolute



- Unità di misura.

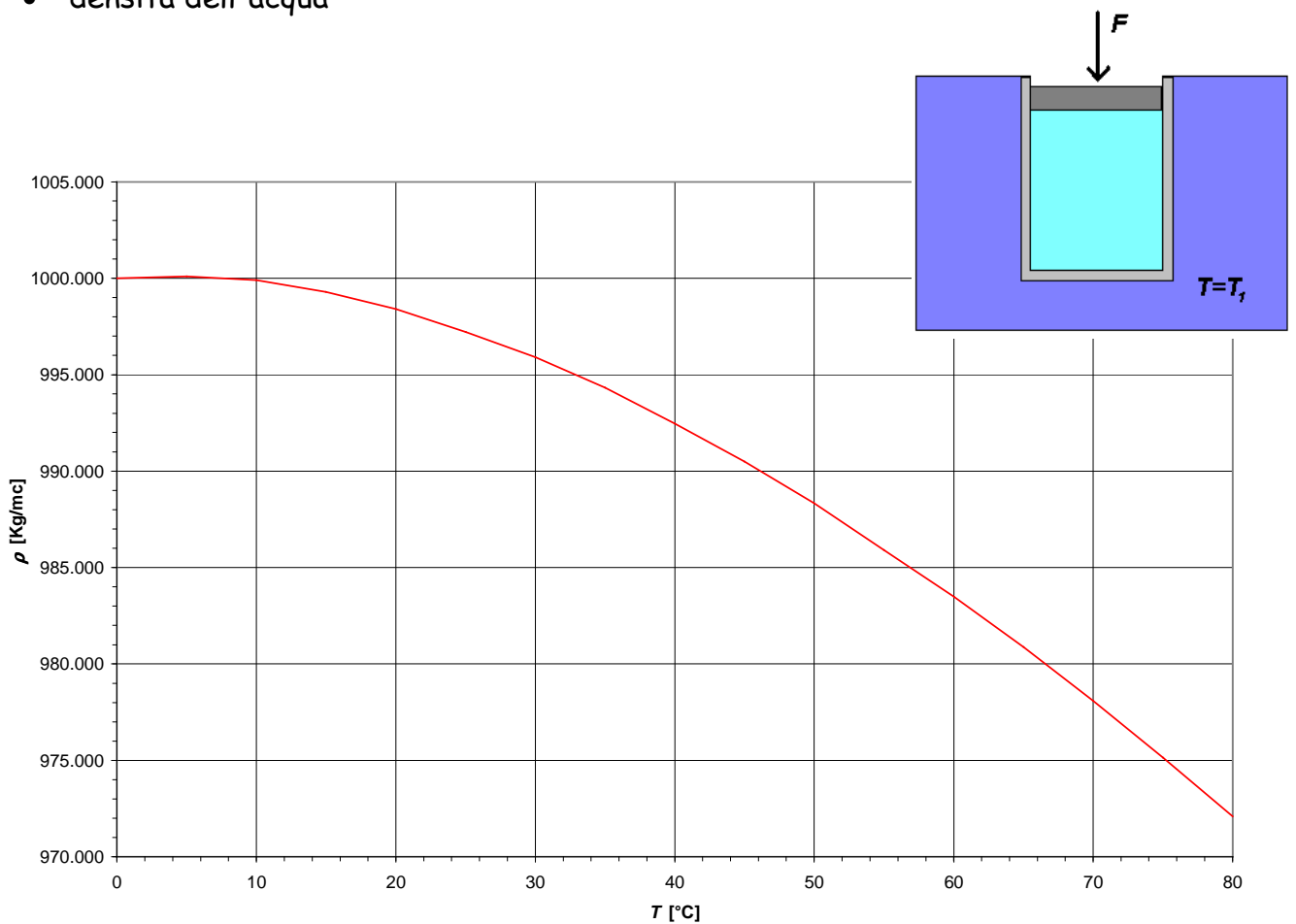
Temperatura

misura del livello di energia interna di un fluido. Gradienti di T determinano importanti flussi di calore e influiscono su pressione e densità.

Noi considereremo processi isotermi

Densità e peso specifico

- misura globale e unità
- prendiamo a riferimento questa quantità per introdurre il REV
- densità dell'acqua



- valori di rif. a 20 °C e 101325 Pa: (acqua: 1000 kg/m³ e 998.2 a 20 e 0 °C; attorno a 1030 per acqua salata. Fino a 1200 per acqua torbida nei torrenti e 1100 nei fiumi); benzina (680 kg/m³) aria (1.22 kg/m³), Hg (13596 kg/m³ a 20 °C), acciaio (7800 kg/m³), calcestruzzo (2300 kg/m³);

Calcolo della densità dell'aria nell'aula

P 100000 Pascal
T 20 293.15

M	0.029 massa molecolare aria in Kg
R	8.314
densità	1.190 kg/mc

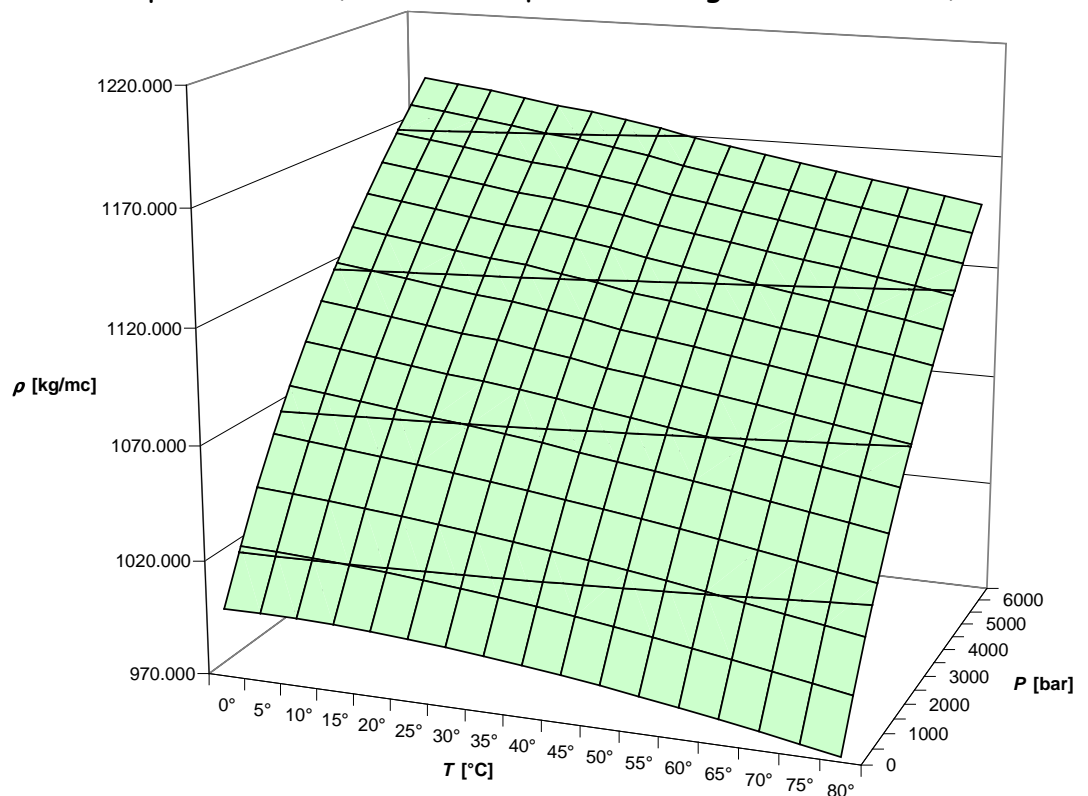
Massa d'aria complessivamente presente

L	30 lunghezza
H	3 altezza
W	15 larghezza
Volume	1350
Massa d'aria complessivamente presente	1606.31919 kg

- per ottenere gamma, variazioni di g sul geoide (da 9.78 ms⁻² all'equatore a 9.83 ai poli)

Eq. di stato

- in realtà la densità è funzione di P e T $\rho(P,T)$
- rappresentazione sperimentale (sostanza acqua e suo diagramma di stato).



-
- Espressioni semplificate: gas ideali; gas reali per basse densità (R=8.314 J/(mole K); n = m/M; fatt. di comprimibilità z); Van der Waals;
- eq. di stato per un liquido, che richiede l'introduzione del modulo di comprimibilità

Cambiamenti di volume in un fluido

in diverse questioni può essere molto importante saper valutare la attitudine ai cambiamenti di volume. A tale scopo, partendo dalla forma alternativa della eq.ne di stato

$$\boxed{V(P,T)}$$

calcoliamo il differenziale

$$\boxed{dV = \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT}$$

al fine di ottenere valori indipendenti dalla unità di misura scelta, normalizziamo le quantità in esame

$$\boxed{\frac{dV}{V} = \left(\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \frac{dP}{P} + \left(\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}\right)_P \frac{dT}{T}}$$

Modulo di comprimibilità isoterma

$$\bullet \quad \boxed{\frac{1}{\varepsilon} = -\left(\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P}\right)_T}$$

- valori caratt. a 20° C e 101325 Pa (acqua 2.2*10⁹ Pa, Hg, 25*10⁹ Pa);
- analogia con legge di Hooke (2*10¹⁰ Pa calcestruzzo, 2*10¹¹ Pa acciaio)
- Modulo di comp. per areiformi a seconda della trasformazione (n=Cp/Cv)
- Differenziazione tra liquido e areiforme sulla base della comprimibilità, con semplificazioni derivanti dalla condizione di incomprimibilità. Condizioni per la incomprimibilità di un fluido in moto permanente: numero di Mach

P	101325	Pa	U	300	km/h
n	1.4	[-]		83.33333	m/s
ρ	1.2	kg/mc			
Velocità suono					
c	343.8204	m/s	Ma	0.242375	[-]

Coefficiente di dilatazione termica

• $\alpha = \left(\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$ calcolarla per un gas perfetto: alfa = 1/T

in definitiva, la relazione precedentemente scritta si può riscrivere

$$\frac{dV}{V} = -\frac{1}{\epsilon} \frac{dP}{P} + \alpha \frac{dT}{T}$$

ci consente di capire, a fronte di un eguale incremento δ delle variabili indipendenti

$$\frac{dP}{P} = \frac{dT}{T} = \delta$$

in quale misura la variazione di pressione e la variazione di temperatura determinano la variazione di volume

$$\frac{dV}{V} = \delta \left(-\frac{P}{\epsilon} + \alpha T \right)$$

per esempio

P	101325 contributo relativo alla comprimibilità isoterma	4.60568E-05
T	293.16 contributo connesso al coefficiente di dilatazione	0.058632
eps	2200000000 rapporto tra i due	1273.036
alfa	0.0002	

il contributo conseguente alla temperatura è 1273 volte superiore a quello connesso ad un eguale variazione percentuale di pressione. Questo fatto è responsabile delle correnti e del trasferimento di calore per convezione naturale.

Invece per un areiforme che rispetti la legge dei gas perfetti i due contributi si compensano esattamente e la variazione di volume diviene nulla

FLUIDI	Conduttività Termica	Calore Specifico (p cost)	Densità
	λ W/m ¹ K ¹	c_p kJ/kg ¹ K ¹	ρ kg/m ³
	20°C	0°C	0°C
Aria	0.0255	1.012	1.205
Mercurio			13546
Acqua	0.604	4.182	998.23

METALLI	Conduttività Termica		Calore Specifico (p cost)	Densità
	λ W/m ¹ K ¹		c_p kJ/kg ¹ K ¹	ρ kg/m ³
	0°C	100°C	0°C	0°C
Acciaio	45	45	0.460	7850
Alluminio	202	205	0.870	2710
Argento	420	423	0.240	10500
Ferro, puro	62	63.2	0.435	7870
Ghisa, pura	57	55	0.460	7590
Oro	292	294	0.126	19270
Ottone	96.5	102	0.385	8520
Piombo	35	33	0.126	11290
Platino	70	73	0.131	21400
Rame	387	376	0.381	8940

Calore specifico dell'acqua

$$dQ = mC_p dT$$

Per C_p si può assumere il valore 4180 J/Kg/°C.

Tensione superficiale

- Spiegazione fenomenologica;
- Conseguenze in presenza di curvatura; relazione di Laplace

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

- Valori numerici,
- Angolo di contatto con una parete solida: comportamento bagnante e non bagnante
- Calcolo di sovrappressione in una goccia di pioggia e di mercurio. Calcolo della risalita capillare; filmato Mounsen et al.
- In definitiva la tensione superficiale svolge un ruolo importante solo se: sono presenti superfici libere con marcate curvature

calcolo della risalita capillare in un tubo; pensare alla risalita in una parete

sigma 0.07
gamma 9806

<i>R</i>	<i>h</i>
0.1	0.000143
0.01	0.001428
0.001	0.014277
0.0001	0.14277

Viscosità

Abbiamo detto che un fluido in quiete sostiene solo pressioni e non esercita azioni tangenziali. Tale situazione cambia in moto.

(modello costitutivo di Maxwell Voight

Per precisarla bisogna introdurre un modello costitutivo che permetterà di giungere alla costruzione di rappresentazioni matematiche più realistiche del moto dei fluidi.

(Posticipare alla introduzione di Navier))

Consideriamo un liquido ordinario (e.g., acqua, olio...): primo esp. di Couette. Filmato **Viscosity.flv di Rouse** da 1.45 minuti fino a 4.50 minuti

Componente traslatoria e componente rotatoria. Lo sforzo è proporzionale al gradiente spaziale di velocità ovvero al tasso temporale di deformazione angolare. Viscosimetro rotante come modo di misura della viscosità.

Primo coeff. di viscosità dinamica; viscosità cinematica; numero di Reynolds

fluidi newtoniani (ipotesi di linearità dovuta a Newton), bingham, dilatanti e pseudoplastici.

solubilità di areiformi in liquidi

	<p>Supponimo di avere un liquido con sovrapposto un gas. Parte del gas è disciolto nel liquido. La legge di Henry ci dice quanto</p>
--	--

Il volume di gas disciolto all'interno di un liquido è una costante che dipende dalla specie chimica e dalla temperatura.

Il rapporto tra il volume di gas disciolto e il volume del liquido solvente è una costante dipendente dalla temperatura, detta coefficiente di solubilità (Legge di Henry):
coefficiente di solubilità

	<p>Se abbiamo più gas, <i>ciascun gas si comporta come se fosse da solo solubile nel liquido (legge di Dalton)</i></p> <p>In questo caso tuttavia l'effettivo volume presente dipende dalla pressione parziale del gas</p>
--	--

Legge di Henry	A	B	C	D	E		
	% nell'aria	M	C. sol. A 20°C	A°C/100 Vol disciolto a 20°C, [-]	D/0.0187969 Proporzione dei volumi	C. sol. A 10°C	Vol disciolto a 10 °C [-]
ossigeno	20.95	32	0.031	0.0064945	0.3455091	0.038	0.007961
azoto	78	28	0.0154	0.012012	0.639041544	0.0186	0.014508
An. Carb.	0.033	44	0.88	0.0002904	0.015449356	1.19	0.0003927
tot	98.983	28.9		0.0187969			0.0228617

QUindi la massa presente dipende dalla pressione, crescendo linearmente con essa
Embolia

Esempio del condotto a sifone con possibilità di accumulo d'aria nella zona superiore.

Problemi di cavitazione e di ostacolo al deflusso, con possibile innesco di transitori connessi al rilascio di sacche di gas.
Necessità di introdurre degli sfiati

Pressione di vapore

ci dice ad una data temperatura, quale è la P per cui la fase vapore è in equilibrio con la sua fase liquida. Se la fase vapore è rimossa si ha ebollizione.

In generale tale fatto interessa per i processi di cavitazione, ovvero di nucleazione, crescita e esplosione o riassorbimento di bolle di gas/vapore

A 20 °C la pressione di vapore è di circa 2000 Pa= 0.2 m di colonna d'acqua

La cavitazione di può quindi verificare anche a temperatura ambiente, generalmente laddove il fluido è accelerato ovvero con particolari configurazioni altimetriche della condotta (filmato Rouse)

- Importanza dei valori assunti dalla pressione (si veda pressione di vapore; mostrare **filmato sulla cavitazione**)

Proprietà cinematiche

In realtà sono proprietà del campo di moto e non del fluido. Anche in questo ambito, comunque, i fluidi presentano delle specificità che ci costringono ad alcune precisazioni. Si dovrebbe qua parlare di

Descrizione Lagrangiana

Descrizione Euleriana

Campo di Velocità euleriano

Leggi della dinamica lagrangiane

Derivata sostanziale

Teorema del trasporto

Accelerazione

Scomposizione dell'atto di moto

posponiamo questi argomenti al capitolo successivo, dove il loro significato sarà chiarito dall'immediato utilizzo che faremo di questi concetti.

Proprietà di trasporto

Queste importantissime proprietà sono così chiamate perchè mettono in relazione il flusso di una quantità con la derivata spaziale di un'altra.

<i>flusso di quantità di moto</i>	<i>viscosità dinamica</i>	<i>gradiente della velocità</i>
<i>flusso di calore</i>	<i>conducibilità termica</i>	<i>gradiente di temperatura</i>
<i>flusso di massa</i>	<i>coefficiente di diffusione</i>	<i>gradiente di di concentrazione</i>

Questi processi sono accomunati da sorprendenti analogie.

viscosità dinamica

Esperienza di Couette

Primo coefficiente di viscosità dinamica per fluidi newtoniani.

Coefficiente di viscosità cinematica

Fluidi non newtoniani

conducibilità termica

$$q = -K\nabla T$$

dove q è un flusso di calore per unità d'area e di tempo e dove $K(P, T)$, coefficiente di conducibilità termica, è in generale un tensore del secondo ordine. In considerazione della isotropia dei fluidi, viene qui semplicemente scritto come un coefficiente, le cui dimensioni sono $W/(m K)$.

Nei problemi di trasferimento del calore nelle masse fluide, molto importante è il rapporto adimensionale noto come numero di Prandtl

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

coefficiente di diffusione

Se immaginiamo di rilasciare una goccia di tracciante colorato all'interno di un liquido in quiete, dopo un certo tempo osserveremo che il tracciante si è distribuito all'interno dell'intera massa. Nell'ipotesi di velocità media nulla, tale effetto di distribuzione è il risultato della diffusione molecolare ed è governata da una legge (legge di Fick) che la lega al gradiente di concentrazione.