Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 3, Autunno · 🧱 Calcolatore integrato

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 6 laboratori. Sono i totali reali, non un programma più lungo accorciato.

Un controllo è un numero o un risultato di codice in una pagina del corso che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero stampato e quello ricalcolato devono coincidere.

> Questo è lo schema di un corso gratuito di autoapprendimento scritto da Saving Planets. Non è un corso universitario, non dà crediti accademici e nessuna scuola è coinvolta.
>
> Il programma segue un corso semestrale di meccanica dei fluidi del terzo anno. Si ispira agli argomenti e alla profondità di MIT 2.06 Fluid Dynamics e MIT 1.060 Engineering Mechanics II (entrambi gratuiti su MIT OpenCourseWare), e a corsi come Purdue ME 309 e Georgia Tech CEE 3040, usando il capitolo gratuito sui fluidi di OpenStax University Physics e le simulazioni PhET, che citiamo dove sono utili. Nessuno di questi autori o istituti approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è collegata a lavoro reale con una fonte pubblica citata (idroelettrico, accumulo per pompaggio, energia marina, perdite d'acqua domestiche, circolazione oceanica e turbine eoliche), ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima della pubblicazione, e ogni laboratorio ha una simulazione gratuita o una versione sicura da fare a casa.
>
> Seguilo in ordine. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo per passo, esercizi con soluzioni complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

L'acqua e l'aria in movimento trasportano gran parte dell'energia rinnovabile del mondo: i fiumi attraverso le turbine idroelettriche, il vento sulle pale delle turbine eoliche, maree e onde nei dispositivi per l'energia marina. La meccanica dei fluidi decide anche quanta energia serve per pompare l'acqua verso città e aziende agricole, e quanta se ne perde per perdite e attrito.

Le correnti oceaniche spostano il calore intorno al pianeta e plasmano il clima. Ogni unità termina con una breve sezione con fonti. I valori che non provengono da una fonte sono indicati come valori di esempio.

Per gli insegnanti

Puoi insegnare questo corso, oppure lasciare che uno studente lo faccia da solo. È gratis. Saving Planets non dà un voto né crediti scolastici.

- Questa pagina è l'intero corso: 10 unità e 6 laboratori (ENGR 330).
- Prevedi 15 settimane, circa 6–9 ore a settimana, comprese le settimane di laboratorio.
- Segui il calendario di 15 settimane. Leggi l'unità, fai la pratica su carta, poi apri la risposta. Nella settimana di laboratorio, fai il laboratorio o la versione a casa.
- Un controllo è un numero o un risultato di codice nella pagina che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero che vedi e quello ricalcolato devono coincidere.
- Usa Stampa questa pagina, oppure scarica la guida di studio PDF. Il formulario è verso la fine.
- Chiedi: in che modo questa unità aiuta le persone e il pianeta? Ogni unità ha un riquadro verde con un fatto e la sua fonte.
- Copia il modello di guida per insegnanti e scrivi il nome della classe, il tempo che hai e le domande che farai. Apri il modello di guida per insegnanti

Prima di iniziare

Prerequisiti

- Analisi III: derivate parziali, divergenza e integrali multipli.
- Equazioni differenziali: EDO del primo e del secondo ordine.
- Statica e Dinamica: diagrammi di corpo libero, leggi di Newton e quantità di moto.
- La termodinamica aiuta con l'equazione dell'energia ma non è obbligatoria.

Come studiare

- Inizia ogni problema con uno schizzo: volume di controllo, linea di corrente o diagramma di corpo libero del fluido.
- Scrivi prima a parole l'equazione che governa il problema (massa, quantità di moto o energia), poi elimina i termini che puoi giustificare.
- Lavora in carichi (metri di fluido) per i sistemi liquidi; rendono facile confrontare pompe, condotti e turbine.
- Calcola il numero di Reynolds prima di scegliere una correlazione di attrito o di resistenza.
- Controlla unità e casi limite: portata nulla significa perdita nulla; raddoppiare la velocità quadruplica all'incirca le perdite turbolente.
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un computer o un tablet per le simulazioni gratuite PhET Density, Buoyancy, Under Pressure e Fluid Pressure and Flow.

- Una bottiglia di plastica trasparente, un chiodo o uno spiedino, un righello e del nastro adesivo.
- Una bilancia da cucina, una caraffa graduata, un secchio e un cronometro.
- Un tubo da giardino o un rubinetto del lavello.
- Un foglio di calcolo per i laboratori su condotti e pompe.

Programma suggerito di 15 settimane

Circa 6-9 ore a settimana: lettura, esercizi e, nelle settimane di laboratorio, il laboratorio.

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
1	Proprietà dei fluidi: densità, viscosità e tensione superficiale	Proprietà dei fluidi, viscosità, tensione superficiale	OpenStax UP1 14.1, 14.7
2	Statica dei fluidi, manometri e spinta di Archimede	Idrostatica e manometri	UP1 14.2
3	Statica dei fluidi, manometri e spinta di Archimede	Forze su superfici immerse, spinta di Archimede, stabilità; Laboratorio A	UP1 14.4
4	Bernoulli, carichi e l’equazione dell’energia	Continuità, Bernoulli, carichi, equazione dell’energia; Laboratorio B	UP1 14.5–14.6
5	Quantità di moto integrale: getti, pale, curve e turbine	Teorema del trasporto di Reynolds, quantità di moto, getti, pale, Pelton	MIT 2.06
6	Analisi differenziale: continuità, Navier–Stokes e flussi esatti	Cinematica, continuità, funzione di corrente	MIT 2.06
7	Analisi differenziale: continuità, Navier–Stokes e flussi esatti	Navier–Stokes, Couette e Poiseuille; Laboratorio C; esercitazione per l’esame intermedio	MIT 2.25
8	Analisi dimensionale, similitudine e prove su modello	Analisi dimensionale e similitudine	MIT 1.060
9	Moto nei condotti: attrito, diagramma di Moody e perdite concentrate	Moto laminare e turbolento nei condotti, diagramma di Moody	MIT 1.060
10	Moto nei condotti: attrito, diagramma di Moody e perdite concentrate	Perdite concentrate, reti; Laboratorio D	MIT 1.060

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
11	Pompe, turbine e impianti di pompaggio	Pompe, curve dell’impianto, leggi di affinità, turbine; Laboratorio F	Impianti di pompaggio del DOE
12	Flusso esterno: strati limite, resistenza e portanza	Strati limite, resistenza, flusso di Stokes	NASA Glenn
13	Flusso esterno: strati limite, resistenza e portanza	Portanza, energia eolica, limite di Betz; Laboratorio E	NASA Glenn; DOE wind
14	Correnti a pelo libero: fiumi, canali e risalti idraulici	Canali a pelo libero, numero di Froude, Manning	MIT 1.060
15	Correnti a pelo libero: fiumi, canali e risalti idraulici	Energia specifica, risalti idraulici, stramazzi; esercitazione per l’esame finale	MIT 1.060

I tuoi progressi

Spunta unità e laboratori man mano che li finisci, e fai i quiz. Progressi e punteggi sono salvati solo in questo browser e non ci vengono mai inviati.

Unità

Proprietà dei fluidi: densità, viscosità e tensione superficiale

Che cos'è un fluido, l'ipotesi del continuo, densità e densità relativa, pressione, viscosità e legge di Newton della viscosità, viscosità cinematica, fluidi non newtoniani, tensione superficiale e risalita capillare, tensione di vapore e cavitazione.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Definire un fluido e usare l'ipotesi del continuo.
- Usare la legge di Newton della viscosità per trovare lo sforzo di taglio.
- Calcolare la risalita capillare dalla tensione superficiale.
- Spiegare come le differenze di densità generano flussi.

Concetti chiave

- Un fluido si deforma continuamente sotto qualsiasi sforzo di taglio, per quanto piccolo. Trattarlo come un continuo permette di definire densità, velocità e pressione in ogni punto.
- Densità ρ (kg/m³) e densità relativa SG = ρ/ρ_water. L'acqua a 20 °C ha ρ = 998 kg/m³; l'aria a 15 °C ha 1.225 kg/m³.
- Legge di Newton della viscosità: sforzo di taglio τ = μ du/dy. La viscosità dinamica μ misura la resistenza al taglio; la viscosità cinematica è ν = μ/ρ. L'acqua è circa 56 volte più viscosa dell'aria ma ha una ν circa 15 volte più bassa.
- I fluidi non newtoniani (vernice, sangue, dentifricio) hanno una viscosità che varia con la velocità di deformazione.
- La tensione superficiale σ tende le superfici liquide; in un tubo sottile l'acqua sale di h = 4σ cos θ/(ρgD). Se la pressione locale scende alla tensione di vapore, il liquido bolle: è la cavitazione, che danneggia pompe ed eliche.

Equazioni chiave

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

τ=μdu/dy

Legge di Newton della viscosità

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ν=(μ)/(ρ)

Viscosità cinematica

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{water}}$$

`SG=ρρ_water`

Densità relativa

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g D}$$

`h=(4σθ)/(ρ gD)`

Risalita capillare

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 Acqua (μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s)) riempie una fessura di 1 mm tra una piastra fissa e una che si muove a 2 m/s. Trova lo sforzo di taglio.

1. du/dy = 2/0.001 = 2000 s⁻¹.
2. τ = 1.002 × 10⁻³ × 2000.

Risposta: τ = 2.00 Pa.

Esempio 1.2 Trova la risalita capillare dell'acqua (σ = 0.0728 N/m, θ = 0) in un tubo di vetro da 1 mm.

1. h = 4 × 0.0728/(998 × 9.81 × 0.001).

Risposta: h = 29.7 mm.

Esempio 1.3 Trova ν per l'acqua a 20 °C.

1. ν = 1.002 × 10⁻³/998.

Risposta: ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la SG dell'acqua di mare (1025 kg/m³).

1025/998 = 1.027.

2. Trova la risalita capillare in un tubo da 0.5 mm.

   Il doppio: 59.5 mm.

3. Trova μ_water/μ_air.

   $1.002 \times 10^{-3}/1.789 \times 10^{-5} = 56.0$.

4. Quale frazione di un iceberg sta sotto l'acqua di mare?

   917/1025 = 89.5%.

Errori concettuali comuni

Mito: Viscosità e densità sono la stessa cosa.
In realtà: Il miele è viscoso; il mercurio è denso ma poco viscoso.

Mito: I fluidi resistono al taglio come i solidi.
In realtà: Scorrono sotto qualsiasi sforzo di taglio.

Mito: La cavitazione richiede alta temperatura.
In realtà: Basta una bassa pressione.

Flashcard

Fluido

Si deforma continuamente sotto taglio.

Viscosità

$\tau = \mu\, du/dy$.

Viscosità cinematica

$\nu = \mu/\rho$.

Densità relativa

ρ/ρ_water.

Risalita capillare

$4\sigma \cos\theta/(\rho g D)$.

Cavitazione

Ebollizione a bassa pressione.

Quiz di autoverifica

1. Lo sforzo di taglio in un fluido newtoniano è...

μ du/dy

ρgh

ρV^2

σ/D

μ du/dy. Legge di Newton della viscosità.

2. La viscosità cinematica è...

μρ

μ/ρ

ρ/μ

τ/μ

μ/ρ. ν = μ/ρ.

3. La risalita capillare aumenta quando il tubo è...

più largo

più stretto

più lungo

più pesante

più stretto. h ∝ 1/D.

4. La cavitazione avviene quando la pressione scende a...

zero relativo

la tensione di vapore

quella atmosferica

quella di ristagno

la tensione di vapore. Ebollizione locale.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La NOAA spiega che i venti muovono le correnti oceaniche nei primi 100 metri, ma le correnti profonde, a migliaia di metri, sono mosse da differenze di densità dell'acqua, controllate da temperatura e salinità: la circolazione termoalina.

Nelle regioni polari si forma ghiaccio marino che lascia indietro il sale, così l'acqua circostante diventa più salata e densa e sprofonda; l'acqua superficiale affluisce per sostituirla, avviando il nastro trasportatore globale. La densità, la prima proprietà di questa unità, sposta calore su tutto il pianeta.

Su Saving Planets: Oceani · Osservazione della Terra

Fonti: NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP1, 14.1 Fluids, density and pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Sezione di un manuale gratuito.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Appunti del MIT sulle proprietà dei fluidi.
- PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density): La densità in modo interattivo.

☐ **Ho finito questa unità**

Statica dei fluidi, manometri e spinta di Archimede

Pressione in un punto, l’equazione idrostatica, pressione relativa e assoluta, manometri, forze idrostatiche su superfici piane immerse e centro di spinta, forze su superfici curve, principio di Archimede e stabilità dei corpi galleggianti.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la pressione in profondità e leggere i manometri.
- Trovare la forza risultante e il centro di spinta su una paratoia immersa.
- Applicare il principio di Archimede.
- Giudicare se un corpo galleggiante è stabile.

Concetti chiave

- La pressione in un punto agisce allo stesso modo in tutte le direzioni. In un fluido in quiete dp/dz = −ρg, quindi con densità costante p = p_0 + ρgh alla profondità h. La pressione relativa si misura rispetto all’atmosfera.
- I manometri bilanciano colonne di fluido: percorri il tubo aggiungendo ρgh scendendo e sottraendolo salendo.
- Su una superficie piana la forza risultante è F = ρg h_c A (h_c = profondità del baricentro). Agisce nel centro di spinta, sotto il baricentro: y_cp = y_c + I_xc/(y_c A).
- Sulle superfici curve, la componente orizzontale è la forza sulla proiezione verticale e quella verticale è il peso del fluido sovrastante.
- Archimede: la spinta è uguale al peso del fluido spostato, F_B = ρ_fluid g V_displaced. Un corpo galleggiante è stabile se il suo metacentro sta sopra il baricentro.

Equazioni chiave

$$p = p_0 + \rho g h$$

`p=p_0+ρ gh`

Pressione idrostatica

$$F = \rho g h_c A$$

`F=ρ g h_cA`

Forza su una superficie piana

$$y_{cp} = y_c + \frac{I_{xc}}{y_c A}$$

`y_cp=y_c+_xcy_cA`

Centro di spinta

$$F_B = \rho_f g V_{disp}$$

`F_B=ρ_f gV_disp`

Spinta di Archimede

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 Trova la pressione relativa 10 m sotto la superficie di acqua dolce (ρ = 998 kg/m³).

1. p = 998 × 9.81 × 10.

Risposta: p = 97.9 kPa (circa un’atmosfera).

Esempio 2.2 Una paratoia rettangolare verticale larga 2 m e alta 3 m ha il bordo superiore sulla superficie dell’acqua. Trova la forza e la profondità del centro di spinta.

1. h_c = 1.5 m; A = 6 m².
2. F = 998 × 9.81 × 1.5 × 6 = 88.1 kN.
3. I_xc = 2 × 3³/12 = 4.5 m⁴; y_cp = 1.5 + 4.5/(1.5 × 6).

Risposta: F = 88.1 kN applicata 2.0 m sotto la superficie (a due terzi della profondità).

Esempio 2.3 Un manometro a mercurio (ρ = 13600 kg/m³) collegato a un tubo d’acqua mostra un dislivello di 0.1 m. Trova la differenza di pressione.

1. Δp = (13600 − 1000) × 9.81 × 0.1 (acqua sopra il mercurio, ρ_water ≈ 1000 kg/m³).

Risposta: Δp = 12.4 kPa.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova la spinta su un oggetto da 2 L completamente immerso in acqua ($\rho \approx 1000$ kg/m³).

   $1000 \times 9.81 \times 0.002 = 19.6$ N.

2. Qual è la pressione assoluta a 10 m di profondità se $p_{atm} = 101.3$ kPa?

   199.2 kPa.

3. La forza su una diga dipende da quanto è lungo il bacino?

   No; solo dalla profondità e dall'area della parete.

4. Perché il centro di spinta sta sotto il baricentro?

   La pressione cresce con la profondità.

Errori concettuali comuni

Mito: La pressione dipende dalla forma del recipiente.
In realtà: Solo dalla profondità (il paradosso idrostatico).

Mito: La spinta di Archimede dipende dal peso dell'oggetto.
In realtà: Dipende dal volume spostato.

Mito: La forza su una paratoia agisce nel suo centro.
In realtà: Agisce nel centro di spinta, più in basso.

Flashcard

Idrostatica

$p = p_0 + \rho g h$.

Pressione relativa

Rispetto all'atmosfera.

Forza su superficie piana

$\rho g\, h_c\, A$.

Centro di spinta

$y_c + I/(y_c\, A)$.

Archimede

$F_B = \rho g V$.

Stabilità

Metacentro sopra G.

Quiz di autoverifica

1. La pressione alla profondità h è...

ρgh

ρV²/2

μ du/dy

mg/A

ρgh. Idrostatica (relativa).

2. La spinta di Archimede è uguale al...

peso dell'oggetto

peso del fluido spostato

massa dell'oggetto

zero

peso del fluido spostato. Archimede.

3. Per una paratoia verticale che parte dalla superficie, il centro di spinta è a...

metà profondità

due terzi della profondità

la superficie

il fondo

due terzi della profondità. Carico triangolare.

4. Un corpo galleggiante è stabile se...

G sta sopra M

M sta sopra G

B = G

è pesante

M sta sopra G. Metacentro.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE osserva che gli Stati Uniti hanno oltre 90000 dighe e che meno del 3% produce energia; le altre servono per attività ricreative, laghetti agricoli, controllo delle piene, approvvigionamento idrico e irrigazione. Ognuna è progettata con le equazioni di questa unità: il carico dell'acqua su una diga cresce con il quadrato della profondità e agisce in basso sulla parete.

Il DOE descrive l'impianto idroelettrico più comune, un impianto a serbatoio, come una diga che accumula l'acqua di un fiume in un bacino; l'acqua rilasciata attraverso una turbina fa girare un generatore, e i rilasci possono servire anche al controllo delle piene, alle attività ricreative, al passaggio dei pesci e alla qualità dell'acqua. La pressione dell'acqua accumulata sulla diga e il suo carico in turbina derivano direttamente da $p = \rho g h$.

Su Saving Planets: Statica · Oceani

Fonti: U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP1, 14.2 Measuring pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-2-measuring-pressure): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP1, 14.4 Archimedes' principle and buoyancy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-4-archimedes-principle-and-buoyancy): Sezione di un manuale gratuito.
- PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): L'idrostatica in modo interattivo.
- PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): La spinta di Archimede in modo interattivo.

Guarda la lezione

Fluid Dynamics and Statics and Bernoulli's Equation (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-20) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d'uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Bernoulli, carichi e l’equazione dell’energia

Linee di corrente e visualizzazione del flusso, continuità Q = AV, l’equazione di Bernoulli e i suoi limiti, carichi di pressione, cinetico e geodetico, linea dei carichi totali, legge di Torricelli, equazione dell’energia in regime stazionario con carichi di pompa, turbina e perdite, e produzione idroelettrica.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Applicare continuità e Bernoulli lungo una linea di corrente.
- Lavorare in carichi: pressione, velocità e quota.
- Usare l’equazione dell’energia con carichi di pompa, turbina e perdite.
- Calcolare la potenza idroelettrica e la potenza di pompaggio.

Concetti chiave

- Per un flusso stazionario incomprimibile, la portata volumetrica Q = AV è la stessa in ogni sezione di un condotto (continuità).
- Bernoulli lungo una linea di corrente (stazionario, non viscoso, incomprimibile): p/(ρg) + V²/(2g) + z = costante. Ogni termine è un carico in metri.
- Torricelli: un getto che esce da un serbatoio alla profondità h ha velocità V = √(2gh).
- I sistemi reali aggiungono pompe e turbine e perdono energia per attrito: $p_1/(\rho g) + V_1^2/(2g) + z_1 + h_{pump} = p_2/(\rho g) + V_2^2/(2g) + z_2 + h_{turbine} + h_L$.
- Potenza da un carico: P = ρgQH. Le turbine forniscono P = ηρgQH; le pompe richiedono P = ρgQH/η. Il DOE osserva che la produzione idroelettrica dipende da portata e salto.

Equazioni chiave

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

`Q=A_1V_1=A_2V_2`

Continuità

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{const}$$

`(p)/(ρ g)+(V^2)/(2g)+z=const`

Bernoulli in carichi

$$V = \sqrt{2gh}$$

V=2gh

Torricelli

$$P = \eta \rho g Q H$$

P=ρ gQH

Energia idroelettrica

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 Trova la velocità del getto da un foro 5 m sotto la superficie di un serbatoio.

1. V = √(2 × 9.81 × 5).

Risposta: V = 9.90 m/s.

Esempio 3.2 Un impianto idroelettrico ha Q = 50 m³/s, salto H = 100 m e rendimento complessivo 0.9 (valori di esempio; ρ = 1000 kg/m³). Trova la potenza.

1. P = 0.9 × 1000 × 9.81 × 50 × 100.

Risposta: P = 44.1 MW, un impianto «grande» secondo la definizione del DOE di 30 MW.

Esempio 3.3 Una pompa solleva 0.05 m³/s d’acqua di 20 m con 5 m di perdite nei condotti e un rendimento del 75%. Trova la potenza assorbita.

1. h_pump = 20 + 5 = 25 m.
2. P = 1000 × 9.81 × 0.05 × 25/0.75.

Risposta: P = 16.4 kW.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un tubo porta 0.4 L/s attraverso un foro da 20 mm verso un ugello da 10 mm. Trova entrambe le velocità.

   1.27 m/s e 5.09 m/s.

2. Converti 200 kPa in metri di colonna d’acqua.

   200,000/(1000 × 9.81) = 20.4 m.

3. Si raddoppia il salto di un impianto idroelettrico a parità di Q. Potenza?

   Raddoppia.

4. Perché un tubo di Pitot indica più di una presa statica?

   Aggiunge il carico cinetico.

Errori concettuali comuni

Mito: Bernoulli si applica attraverso una pompa.
In realtà: Usa l’equazione dell’energia con h_pump.

Mito: Un flusso più veloce significa pressione più alta.
In realtà: Lungo una linea di corrente, più veloce significa pressione statica più bassa.

Mito: Il carico è una pressione.
In realtà: È energia per unità di peso, in metri.

Flashcard

Continuità

$Q = AV$.

Bernoulli

$p/\rho g + V^2/2g + z = \text{cost.}$

Torricelli

$V = \sqrt{(2gh)}$.

Equazione dell’energia

Aggiunge h_pump, h_turbine, h_L.

Energia idroelettrica

$P = \eta\rho gQH$.

Potenza della pompa

$\rho gQH/\eta$.

Quiz di autoverifica

1. Il carico cinetico è...

$V^2/(2g)$

p/ρg

z

ρV²

V²/(2g). Energia cinetica per unità di peso.

2. Dimezzare l'area del condotto raddoppia...

la pressione

velocità

la portata

la perdita di carico

velocità. Continuità.

3. La potenza idroelettrica è proporzionale a...

solo Q

solo H

Q × H

Q/H

Q × H. P = ηρgQH.

4. La velocità del getto di Torricelli è...

gh

√(2gh)

2gh

√(gh)

√(2gh). Bernoulli dal serbatoio al getto.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE spiega che l'idroelettrico sfrutta l'energia cinetica dell'acqua che scorre, e che l'energia disponibile dipende sia dalla portata sia dal dislivello, il salto: più grande è la portata e più alto il salto, più elettricità si può produrre. L'acqua scorre in una condotta forzata e fa girare una turbina collegata a un generatore.

Il DOE classifica gli impianti per dimensione: grande idroelettrico oltre 30 MW, piccolo idroelettrico da 100 kW a 10 MW e micro-idroelettrico fino a 100 kW, sufficiente per una casa, una fattoria o un villaggio. $P = \eta\rho gQH$ permette di dimensionarli tutti da una misura di portata e un rilievo del dislivello.

Su Saving Planets: Soluzioni · Termodinamica

Fonti: U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works) · U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP1, 14.5 Fluid dynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-5-fluid-dynamics): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP1, 14.6 Bernoulli's equation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-6-bernoullis-equation): Sezione di un manuale gratuito.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): Bernoulli in modo interattivo.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Appunti sull'equazione dell'energia.

Guarda la lezione

Fluid Dynamics and Statics and Bernoulli's Equation (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-20) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d'uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Quantità di moto integrale: getti, pale, curve e turbine

Teorema del trasporto di Reynolds, l’equazione della quantità di moto per i volumi di controllo, forze dei getti su piastre e pale, forze su curve e ugelli, volumi di controllo mobili, turbine ad azione (ruote Pelton) e l’equazione del momento angolare per le turbomacchine.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Enunciare il teorema del trasporto di Reynolds.
- Applicare l’equazione della quantità di moto a getti e pale.
- Analizzare una pala mobile e una ruota Pelton.
- Usare il momento angolare per la coppia di turbine e pompe.

Concetti chiave

- Teorema del trasporto di Reynolds: la variazione nel tempo di una proprietà di un sistema fluido = variazione all’interno di un volume di controllo + flusso netto uscente dalla sua superficie.
- Quantità di moto in regime stazionario: ΣF = Σṁ_out V_out − Σṁ_in V_in (vettori). Includi le forze di pressione sulle sezioni tagliate e la reazione del supporto.
- Un getto di velocità V e portata Q che colpisce frontalmente una piastra piana esercita F = ρQV. Una pala che devia il getto di un angolo θ esercita F = ρQV(1 − cos θ) lungo il getto.
- Per una pala che si muove a velocità U, usa la velocità relativa (V − U). Le pale di una ruota Pelton deviano il getto di quasi 180°; la potenza F·U è massima per U = V/2.
- Momento angolare: coppia = ṁ(r_2V_θ2 − r_1V_θ1) (equazione di Eulero delle turbomacchine), la base della progettazione di pompe e turbine.

Equazioni chiave

$$\sum \mathbf{F} = \sum \dot{m}\mathbf{V}_{out} - \sum \dot{m}\mathbf{V}_{in}$$

```
F= m V_out- m V_in
```

Quantità di moto stazionaria

$$F = \rho Q V(1 - \cos\theta)$$

```
F=ρ QV(1-θ)
```

Forza di un getto deviato

$$F = \rho Q(V - U)(1 - \cos\beta)$$

F=ρ Q(V-U)(1-β)

Pala mobile

$$T = \dot{m}(r_2 V_{\theta 2} - r_1 V_{\theta 1})$$

T= m(r_2V_θ2-r_1V_θ1)

Equazione di Eulero delle turbomacchine

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 Un getto d'acqua da 50 mm a 20 m/s colpisce frontalmente una piastra piana. Trova la forza.

1. $A = \pi \times 0.05^2/4 = 1.963 \times 10^{-3}$ m².
2. $F = \rho A V^2 = 1000 \times 1.963 \times 10^{-3} \times 400$.

Risposta: F = 785 N.

Esempio 4.2 Lo stesso getto viene deviato di 120° da una pala fissa. Trova la forza lungo il getto.

1. $F = \rho A V^2(1 - \cos 120°) = 785 \times 1.5$.

Risposta: F = 1178 N.

Esempio 4.3 Una pala Pelton che si muove a 15 m/s riceve un getto di 0.01 m³/s a 30 m/s e lo devia di 165°. Trova la forza e la potenza.

1. $F = 1000 \times 0.01 \times (30 - 15)(1 - \cos 165°) = 294.9$ N.
2. P = F × U.

Risposta: F = 294.9 N; P = 4.42 kW (il getto trasporta $\tfrac{1}{2}\rho Q V^2 = 4.5$ kW).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. A quale velocità delle pale una ruota Pelton dà la potenza massima?

   Metà della velocità del getto.

2. Si raddoppia la velocità del getto a parità di area. Forza su una piastra?

   4 volte.

3. Elenca le forze in un bilancio di quantità di moto su una curva.

   Forze di pressione in ingresso e in uscita, peso e reazione del supporto.

4. Perché le pale Pelton sono divise al centro?

   Per deviare il getto di quasi 180° senza che colpisca la pala successiva.

Errori concettuali comuni

Mito: La forza sulla piastra dipende dalle dimensioni della piastra.
In realtà: Per un getto completamente deviato, solo da ρQV.

Mito: Una pala mobile vede l'intera velocità del getto.
In realtà: Vede $V - U$.

Mito: La quantità di moto è uno scalare.
In realtà: È un vettore; scomponila nelle componenti.

Flashcard

RTT

Variazione del sistema = variazione nel VC + flusso netto uscente.

Quantità di moto

$\Sigma F = \Sigma \dot{m} V_{out} - \Sigma \dot{m} V_{in}$.

Piastra

ρQV.

Pala

$\rho QV(1 - \cos \theta)$.

Pelton

Ottimale a $U = V/2$.

Turbina di Eulero

$T = \dot{m} \Delta(rV_\theta)$.

Quiz di autoverifica

1. La forza di un getto su una piastra piana è...

ρQV

ρgQH

½ρV²

QV

ρQV. Flusso di quantità di moto.

2. Deviare un getto di 180° dà una forza di...

ρQV

2ρQV

0

ρQV/2

2ρQV. 1 − cos 180° = 2.

3. Il miglior rapporto U/V per una ruota Pelton è...

0.25

0.5

1

2

0.5. Massimizza (V − U)U.

4. L'equazione di Eulero fornisce, per una turbomacchina, la...

il momento torcente

alla resistenza

il galleggiamento

viscosità

il momento torcente. Momento angolare.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE spiega che l'accumulo idroelettrico per pompaggio funziona come una batteria gigante: quando la domanda è bassa pompa l'acqua in un bacino superiore, e quando la domanda è alta l'acqua ridiscende attraverso una turbina. Il DOE riferisce che il pompaggio rappresenta l'88% di tutto l'accumulo di energia su scala di rete negli Stati Uniti, con 43 impianti, e che la capacità potrebbe più che raddoppiare.

Ogni pompa-turbina è progettata con le equazioni della quantità di moto e del momento angolare di questa unità: gli angoli delle pale della girante stabiliscono quanta coppia l'acqua cede o riceve. Accumulare così l'energia solare ed eolica dipende dal progettare bene quelle pale.

Su Saving Planets: Soluzioni · Dinamica

Fonti: U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Quantità di moto per volumi di controllo.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Appunti sulla quantità di moto.
- NASA Glenn: Conservation of momentum (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/conmo.html): Pagina gratuita della NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Trattazione più approfondita.

☐ **Ho finito questa unità**

Analisi differenziale: continuità, Navier–Stokes e flussi esatti

Cinematica dei fluidi (campo di velocità, accelerazione, vorticità, deformazione), l'equazione di continuità differenziale, la funzione di corrente, le equazioni di Eulero e di Navier–Stokes, condizioni al contorno e soluzioni laminari esatte: flusso di Couette, flusso di Poiseuille piano e flusso di Hagen–Poiseuille nei condotti.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare l'accelerazione materiale di un campo di velocità.
- Verificare la continuità e trovare una funzione di corrente.
- Enunciare le equazioni di Navier–Stokes e le loro condizioni al contorno.
- Risolvere i flussi di Couette e di Hagen–Poiseuille.

Concetti chiave

- Nella descrizione euleriana l'accelerazione ha una parte locale ∂V/∂t e una parte convettiva (V·∇)V; la somma è la derivata materiale DV/Dt.
- Continuità incomprimibile: ∇·V = ∂u/∂x + ∂v/∂y + ∂w/∂z = 0. In 2D, una funzione di corrente ψ con u = ∂ψ/∂y, v = −∂ψ/∂x la soddisfa automaticamente.
- Navier–Stokes (incomprimibile, newtoniano): ρ DV/Dt = −∇p + ρg + μ∇²V. Con l'aderenza alle pareti governa quasi tutti i flussi di questo corso; solo pochi casi hanno soluzione esatta.
- Flusso di Couette tra una piastra fissa e una mobile: profilo di velocità lineare, sforzo τ = μU/h.
- Flusso di Hagen–Poiseuille in un condotto: profilo parabolico, u_max = 2V_avg e Q = πR⁴Δp/(8μL). Vale finché il flusso resta laminare (Re sotto circa 2300).

Equazioni chiave

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\cdot\nabla)\mathbf{V}$$

```
(D V)/(Dt)=( V)/( t)+( V·) V
```

Accelerazione materiale

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Continuità incomprimibile

$$\rho\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho\mathbf{g} + \mu\nabla^2\mathbf{V}$$

```
ρ(D V)/(Dt)=- p+ρ g+μ^2 V
```

Navier–Stokes

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu L}$$

Q=(π R^4Δ p)/(8μ L)

Hagen–Poiseuille

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 Acqua scorre in un tubo di 4 mm di diametro con Δp/L = 100 Pa/m. Trova Q, V_avg, u_max e Re.

1. $Q = \pi \times 0.002^4 \times 100/(8 \times 1.002 \times 10^{-3}) = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s.
2. $V = Q/(\pi \times 0.002^2) = 0.0499$ m/s; u_max = 2V.
3. $Re = 998 \times 0.0499 \times 0.004/1.002 \times 10^{-3}$.

Risposta: $Q = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s, V = 0.0499 m/s, u_max = 0.0998 m/s, Re = 199 (laminare).

Esempio 5.2 Una piastra si muove a 1 m/s su un velo d’acqua di 2 mm. Trova lo sforzo di taglio.

1. $\tau = \mu U/h = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.002$.

Risposta: τ = 0.501 Pa.

Esempio 5.3 V = (2x, −2y) è incomprimibile, e qual è la sua accelerazione in (1, 1)?

1. $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 2 - 2 = 0$.
2. $a_x = u\,\partial u/\partial x = 2x \times 2 = 4x$; $a_y = v\,\partial v/\partial y = (-2y)(-2) = 4y$.

Risposta: Sì; a = (4, 4) m/s².

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Si dimezza il raggio del condotto a parità di Δp/L. Q?

   1/16 di prima.

2. Trova ψ per u = 1, v = 0.

$\psi = y$.

3. Dove è massimo lo sforzo di taglio nel flusso di Poiseuille?

   Alla parete.

4. Indica la condizione al contorno su una parete solida.

   Aderenza: la velocità del fluido è uguale a quella della parete.

Errori concettuali comuni

Mito: Un flusso stazionario ha accelerazione nulla.
In realtà: L'accelerazione convettiva può essere diversa da zero.

Mito: Navier–Stokes ha molte soluzioni esatte.
In realtà: Solo per poche geometrie semplici.

Mito: La legge di Poiseuille vale per qualsiasi moto nei condotti.
In realtà: Solo per il moto laminare.

Flashcard

Derivata materiale

$\partial/\partial t + V\cdot\nabla$.

Continuità

$\nabla\cdot V = 0$.

Funzione di corrente

$u = \partial\psi/\partial y$, $v = -\partial\psi/\partial x$.

Navier–Stokes

$\rho DV/Dt = -\nabla p + \rho g + \mu\nabla^2 V$.

Couette

$\tau = \mu U/h$.

Poiseuille

$Q = \pi R^4 \Delta p/8\mu L$.

Quiz di autoverifica

1. Il Q di Hagen–Poiseuille varia con il raggio come...

R

R^2

R^3

R^4

R^4. $\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$.

2. Nel flusso di Couette il profilo è...

parabolico

lineare

uniforme

logaritmico

lineare. Nessun gradiente di pressione.

3. L'accelerazione convettiva è...

$\partial V/\partial t$

$(V\cdot\nabla)V$

∇p

$\mu\nabla^2 V$

$(V\cdot\nabla)V$. La variazione spaziale.

4. u_max/V_avg nel moto laminare nei condotti vale...

1

1.5

2

4

2. Parabolico.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'EPA riferisce che le perdite domestiche possono sprecare quasi 1 trilione di galloni d'acqua l'anno a livello nazionale, che le perdite di una famiglia media possono sprecare oltre 9300 galloni l'anno, e che il 9% delle abitazioni ha perdite che sprecano 50 galloni o più al giorno.

Le piccole perdite da guarnizioni e raccordi usurati sono spesso flussi lenti e laminari attraverso fessure minuscole, dove la legge in R^4 vista sopra mostra perché un piccolo allargamento di una crepa fa una grande differenza. Secondo l'EPA, riparare le perdite domestiche facili da correggere può far risparmiare circa il 10% sulle bollette dell'acqua.

Su Saving Planets: Equazioni differenziali · Analisi III

Fonti: U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Lezioni su Navier–Stokes.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Soluzioni esatte.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Legge di Poiseuille.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Appunti di cinematica.

☐ **Ho finito questa unità**

Analisi dimensionale, similitudine e prove su modello

Omogeneità dimensionale, il teorema Pi di Buckingham, i gruppi adimensionali comuni (Reynolds, Froude, Mach, Weber, Eulero), similitudine geometrica, cinematica e dinamica, leggi di similitudine ed effetti scala, e adimensionalizzazione delle equazioni del moto.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Trovare i gruppi adimensionali con il teorema Pi.
- Dire che cosa confrontano Re, Fr, Ma e We.
- Riportare i risultati delle prove su modello alla scala reale con la similitudine di Froude o di Reynolds.
- Spiegare perché la similitudine completa è spesso impossibile.

Concetti chiave

- Ogni equazione valida è dimensionalmente omogenea. Il teorema Pi di Buckingham afferma che un problema con n variabili e k dimensioni fondamentali ha n − k gruppi adimensionali indipendenti.
- Gruppi comuni: Re = ρVL/μ (inerzia/viscosità), Fr = V/√(gL) (inerzia/gravità), Ma = V/a (comprimibilità), We = ρV²L/σ (inerzia/tensione superficiale), Eu = Δp/(ρV²) (pressione).
- Similitudine dinamica: se modello e prototipo hanno la stessa geometria e gli stessi gruppi adimensionali determinanti, i loro risultati adimensionali (C_D, C_p, rendimento) coincidono.
- Le correnti a superficie libera (navi, sfioratori, onde) usano la similitudine di Froude: V_m = V_p√(L_m/L_p); le forze scalano con il cubo della scala delle lunghezze e la potenza con la scala elevata a 3.5.
- Rispettare insieme Re e Fr richiede di solito un fluido impossibile, quindi gli ingegneri rispettano il gruppo dominante e correggono l’altro (effetti scala).

Equazioni chiave

$$\Pi \text{ groups} = n - k$$

`groups=n-k`

Teorema Pi di Buckingham

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu},\ Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

`Re=(ρ VL)/(μ),\ Fr=`

Numeri di Reynolds e di Froude

$$V_m = V_p\sqrt{L_m/L_p}$$

`V_m=V_p_m/L_p`

Similitudine di Froude

$$\frac{F_p}{F_m} = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3$$

`(F_p)/(F_m)=((L_p)/(L_m))^3`

Scala delle forze (Froude, stesso fluido)

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 La resistenza F su una sfera dipende da ρ, V, D e μ. Quanti gruppi Pi ci sono e quali?

1. n = 5 variabili, k = 3 dimensioni (M, L, T).
2. Gruppi: F/(ρV²D²) e ρVD/μ.

Risposta: 2 gruppi: C_D = f(Re).

Esempio 6.2 Un modello di convertitore del moto ondoso in scala 1:20 viene provato con la similitudine di Froude. La velocità delle onde in scala reale è 10 m/s. Trova la velocità sul modello.

1. V_m = 10/√20.

Risposta: V_m = 2.24 m/s.

Esempio 6.3 Per quel modello, come scalano forze e potenza?

1. F_p/F_m = 20³.
2. P_p/P_m = 20^3.5.

Risposta: Forze × 8000; potenza × 35777.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Quale gruppo conta di più per le onde di una nave?

Il numero di Froude.

2. E per il moto in un piccolo condotto?

   Il numero di Reynolds.

3. Un modello 1:10 nello stesso fluido deve rispettare Re. Velocità del modello rispetto alla scala reale?

   10 volte più veloce.

4. Che cosa confronta We?

   L’inerzia con la tensione superficiale.

Errori concettuali comuni

Mito: Le prove su modello usano la stessa velocità della scala reale.
In realtà: Usano velocità scalate.

Mito: Adimensionale significa irrilevante.
In realtà: I gruppi adimensionali governano la fisica.

Mito: Qualsiasi modello dà risultati esatti in scala reale.
In realtà: Gli effetti scala restano quando non tutti i gruppi coincidono.

Flashcard

Teorema Pi

n − k gruppi.

Reynolds

Inerzia/viscosità.

Froude

Inerzia/gravità.

Weber

Inerzia/tensione superficiale.

Similitudine

Stessi gruppi, stessi coefficienti.

Similitudine di Froude

$V \propto \sqrt{L}$.

Quiz di autoverifica

1. Il numero di Froude confronta l’inerzia con...

viscosità

la gravità

la tensione superficiale

la comprimibilità

la gravità. V/√(gL).

2. Con 6 variabili e 3 dimensioni ci sono...

2

3

6

9

3. n − k.

3. Con la similitudine di Froude (stesso fluido) le forze scalano con la lunghezza elevata alla...

1st

2nd

3rd

3.5th

3rd. L^3.

4. Il C_D di una sfera liscia dipende soprattutto da...

Fr

Re

We

Ma

Re. Effetti viscosi.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE descrive l'energia marina come l'energia ricavata da onde, maree, correnti fluviali e oceaniche, e dalle differenze di temperatura dell'oceano. Afferma che la risorsa marina totale degli Stati Uniti equivale a circa il 57% di tutta la produzione elettrica statunitense nel 2019, e che queste risorse sono molto prevedibili.

Il DOE osserva che i ricercatori stanno provando e installando nuove tecnologie per sfruttare questa risorsa. I convertitori del moto ondoso e le turbine mareomotrici vengono sviluppati con modelli in scala in vasche e canali molto prima che i dispositivi a grandezza reale vadano in mare, usando la similitudine di Froude e di Reynolds di questa unità.

Su Saving Planets: Oceani · Soluzioni

Fonti: U.S. DOE: Marine energy basics (https://www.energy.gov/eere/water/marine-energy-basics)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Lezioni di analisi dimensionale.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Appunti sulla similitudine.
- NASA Glenn: Similarity parameters (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airsim.html): Pagina gratuita della NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Scalatura.

☐ **Ho finito questa unità**

Moto nei condotti: attrito, diagramma di Moody e perdite concentrate

Moto laminare e turbolento nei condotti, lunghezza d'ingresso, l'equazione di Darcy–Weisbach, fattore d'attrito laminare 64/Re, il diagramma di Moody e le correlazioni di Colebrook e Haaland, perdite concentrate, condotti non circolari e diametro idraulico, e condotti in serie, in parallelo e in rete.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Stabilire se il moto in un condotto è laminare o turbolento.
- Calcolare le perdite per attrito con Darcy–Weisbach e la formula di Haaland.
- Aggiungere le perdite concentrate di raccordi e valvole.
- Risolvere semplici problemi di condotti in serie e in parallelo.

Concetti chiave

- Nei condotti il moto è laminare sotto Re ≈ 2300 e turbolento sopra circa 4000. Il moto turbolento mescola intensamente la quantità di moto e ha un profilo più piatto.
- Darcy–Weisbach: h_L = f(L/D)(V²/2g). Per il moto laminare f = 64/Re.
- Per il moto turbolento f dipende da Re e dalla scabrezza relativa ε/D (diagramma di Moody). La formula di Haaland è esplicita: 1/√f = −1.8 $\log_{10}$[(ε/D/3.7)^1.11 + 6.9/Re].
- Raccordi, valvole, curve e imbocchi aggiungono perdite concentrate h_m = K V²/(2g). Nelle condotte lunghe domina l'attrito; negli impianti idraulici domestici contano i raccordi.
- I condotti non circolari usano il diametro idraulico D_h = 4A/P. I condotti in serie hanno lo stesso Q e sommano le perdite; in parallelo hanno la stessa perdita di carico e sommano le portate.

Equazioni chiave

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

`Re=(ρ VD)/(μ)`

Numero di Reynolds nei condotti

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

`h_L=fL/D(V^2)/(2g)`

Darcy–Weisbach

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10}\left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re}\right]$$

`(1)/( f)=-1.8_10[(((/D)/(3.7))^1.11+(6.9)/(Re)]`

Haaland

$$h_m = K\frac{V^2}{2g}$$

`h_m=K(V^2)/(2g)`

Perdita concentrata

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Acqua scorre a 2 m/s in un tubo di acciaio commerciale da 50 mm (ε = 0.045 mm). Trova Re e f.

1. Re = 998 × 2 × 0.05/1.002 × 10⁻³ = 99,600.
2. ε/D = 0.0009; Haaland fornisce f.

Risposta: Re = 9.96 × 10⁴ (turbolento); f = 0.0216.

Esempio 7.2 Trova la perdita di carico per attrito su 100 m di quel tubo.

1. h_L = 0.0216 × (100/0.05) × 2²/(2 × 9.81).

Risposta: h_L = 8.82 m.

Esempio 7.3 Trova il fattore d’attrito laminare a Re = 1500 e la perdita di un imbocco a spigolo vivo (K = 0.5) a 2 m/s.

1. f = 64/1500.
2. h_m = 0.5 × 4/19.62.

Risposta: f = 0.0427; h_m = 0.102 m.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Trova D_h per un condotto di 0.2 m × 0.1 m.

   $4 \times 0.02/0.6 = 0.133$ m.

2. Si raddoppia V in moto turbolento completamente scabro. h_L?

   Circa 4 volte.

3. Due tubi identici in parallelo portano una Q totale. Portata in ciascuno?

   Q/2, con la stessa perdita di carico.

4. Re = 3000 è laminare o turbolento?

   Di transizione.

Errori concettuali comuni

Mito: Il fattore d'attrito è costante.
In realtà: Dipende da Re e dalla scabrezza.

Mito: Le perdite concentrate sono sempre piccole.
In realtà: Non nei tubi corti con molti raccordi.

Mito: Il moto laminare ha perdite maggiori.
In realtà: A parità di Re ha un f minore, ma il moto laminare si ha solo a basse velocità.

Flashcard

Transizione

Re ≈ 2300–4000.

Darcy–Weisbach

$f(L/D)V^2/2g$.

f laminare

64/Re.

Haaland

f esplicito.

Perdita concentrata

$KV^2/2g$.

Diametro idraulico

$4A/P$.

Quiz di autoverifica

1. Il fattore d’attrito laminare è...

64/Re

0.316/Re^0.25

0.02

Re/64

64/Re. Poiseuille.

2. La perdita di Darcy–Weisbach scala con...

V

V^2

V^3

1/V

V^2. A f fissato.

3. Il diametro idraulico è...

4A/P

A/P

P/A

2A/P

4A/P. Definizione.

4. I condotti in parallelo hanno in comune...

portata

la perdita di carico

diametro

velocità

la perdita di carico. Estremi comuni.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'EPA osserva che un rubinetto che gocciola una volta al secondo può sprecare oltre 3000 galloni l'anno, abbastanza per più di 180 docce, e che un soffione che perde 10 gocce al minuto spreca oltre 500 galloni l'anno. Una perdita d'irrigazione di 1/32 di pollice può sprecare circa 6300 galloni al mese.

Ogni gallone consegnato deve anche essere pompato attraverso chilometri di tubi, contro le perdite per attrito di questa unità. Riparare le perdite fa risparmiare insieme acqua ed energia di pompaggio; 3000 galloni sono circa 11355 L, cioè 31.1 L al giorno.

Su Saving Planets: Soluzioni · Scienza delle costruzioni

Fonti: U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Appunti sul moto nei condotti.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Lezioni sul moto interno.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Moto laminare e turbolento.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Turbolenza.

☐ **Ho finito questa unità**

Pompe, turbine e impianti di pompaggio

Pompe centrifughe e assiali, prevalenza, potenza e rendimento, curve caratteristiche delle pompe, curve dell'impianto e punto di funzionamento, pompe in serie e in parallelo, leggi di affinità e azionamenti a velocità variabile, cavitazione e NPSH, e turbine idrauliche (Pelton, Francis, Kaplan).

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Leggere una curva di pompa e trovare il punto di funzionamento con una curva dell'impianto.
- Calcolare la potenza e il rendimento di una pompa.
- Applicare le leggi di affinità ai cambi di velocità.
- Spiegare l'NPSH e come evitare la cavitazione.

Concetti chiave

- Una pompa aggiunge al flusso una prevalenza h_p; la potenza idraulica è ρgQh_p e la potenza all'albero è ρgQh_p/η.
- La curva della pompa (prevalenza che cala al crescere della portata) incontra la curva dell'impianto (dislivello statico più perdite che crescono con Q²) nel punto di funzionamento.
- Leggi di affinità per la stessa pompa a una nuova velocità N: Q ∝ N, H ∝ N², P ∝ N³. Rallentare una pompa con un azionamento a velocità variabile invece di strozzare una valvola fa risparmiare molta energia.
- La cavitazione inizia quando la pressione in aspirazione scende vicino alla tensione di vapore. L'NPSH disponibile (NPSH_A) deve superare quello richiesto dalla pompa (NPSH_R).
- Le turbine idrauliche sono pompe al contrario: Pelton (ad azione) per salti alti, Francis per salti medi, Kaplan (a elica) per salti bassi e grandi portate; molti gruppi di pompaggio sono pompe-turbine reversibili.

Equazioni chiave

$$P_{shaft} = \frac{\rho g Q h_p}{\eta}$$

```
P_shaft=(ρ gQh_p)/()
```

Potenza della pompa

$$H_{sys} = H_{static} + kQ^2$$

```
H_sys=H_static+kQ^2
```

Curva dell'impianto

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1},\ \frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2,\ \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

```
(Q_2)/(Q_1)=(N_2)/(N_1),\ (H_2)/(H_1)=((N_2)/(N_1))^2,\ (P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3
```

Leggi di affinità

$$NPSH_A > NPSH_R$$

Niente cavitazione

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Una curva di pompa è H = 40 − 7000Q² e la curva dell'impianto è H = 10 + 5000Q² (H in m, Q in m³/s). Trova il punto di funzionamento.

1. 40 − 7000Q² = 10 + 5000Q², quindi Q² = 30/12000.
2. Q = 0.05 m³/s; H = 10 + 5000 × 0.0025.

Risposta: Q = 0.05 m³/s, H = 22.5 m.

Esempio 8.2 Trova la potenza all'albero in quel punto con η = 0.75 (ρ = 1000 kg/m³).

1. P = 1000 × 9.81 × 0.05 × 22.5/0.75.

Risposta: P = 14.7 kW.

Esempio 8.3 Una pompa che fornisce 0.05 m³/s con 30 m di prevalenza viene rallentata da 1800 a 1500 giri/min. Trova la nuova portata, la nuova prevalenza e il rapporto delle potenze.

1. Q = 0.05 × 1500/1800.
2. H = 30 × (1500/1800)².
3. Rapporto di P = (1500/1800)³.

Risposta: Q = 0.0417 m³/s, H = 20.8 m, potenza al 57.9% dell'originale.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Due pompe identiche in serie: che cosa si somma?

   Le prevalenze a parità di portata.

2. Due in parallelo?

   Le portate a parità di prevalenza.

3. Si riduce la velocità del 20%. Potenza?

   $0.8^3 = 51.2\%$.

4. Quale turbina è adatta a un salto di 500 m?

   Pelton.

Errori concettuali comuni

Mito: Strozzare una valvola è un modo efficiente per ridurre la portata.
In realtà: Spreca prevalenza; è meglio rallentare la pompa.

Mito: Una pompa più grande è sempre migliore.
In realtà: Le pompe sovradimensionate lavorano lontano dal punto di massimo rendimento.

Mito: La cavitazione fa solo rumore.
In realtà: Erode le giranti e riduce le prestazioni.

Flashcard

Potenza della pompa

$\rho g Q h / \eta$.

Curva dell'impianto

$H_{static} + kQ^2$.

Punto di funzionamento

Le curve si incrociano.

Affinità

$Q \propto N$, $H \propto N^2$, $P \propto N^3$.

NPSH

Evitare la cavitazione.

Turbine

Pelton, Francis, Kaplan.

Quiz di autoverifica

1. La potenza di una pompa scala con la velocità come...

N

N^2

N^3

$\sqrt{N}$

N^3. Leggi di affinità.

2. Il punto di funzionamento è dove...

la curva della pompa incontra quella dell'impianto

il rendimento è zero

Q = 0

H = 0

la curva della pompa incontra quella dell'impianto. Equilibrio.

3. Per evitare la cavitazione...

NPSH_A > NPSH_R

NPSH_A < NPSH_R

aumentare la velocità

abbassare la pressione in aspirazione

NPSH_A > NPSH_R. Margine.

4. Salto basso e portata alta si addicono a una...

Pelton

Francis

Kaplan

pompa a pistone

Kaplan. Turbina a elica.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'ufficio per l'efficienza industriale del DOE afferma che nei sistemi di pompaggio si possono ottenere risparmi di energia e di costi notevolissimi applicando le migliori pratiche di gestione dell'energia e acquistando apparecchiature efficienti, e offre gratuitamente il Pumping System Assessment Tool (PSAT) e il software MEASUR per individuarli.

Le leggi di affinità mostrano da dove viene gran parte di quel risparmio: una pompa rallentata del 20% con un azionamento a velocità variabile richiede solo circa metà della potenza. La pagina del DOE sull'accumulo per pompaggio aggiunge che le pompe-turbine portano l'acqua in quota quando l'energia costa poco e producono quando serve.

Su Saving Planets: Soluzioni · Circuiti

Fonti: U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems) · U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Appunti sulle pompe.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Lezioni sulle turbomacchine.
- U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems): Strumenti gratuiti del DOE per le pompe.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Trattazione più approfondita.

☐ **Ho finito questa unità**

Flusso esterno: strati limite, resistenza e portanza

Moto attorno ai corpi, strati limite su lastre piane, resistenza d’attrito e di pressione, coefficienti di resistenza di sfere, cilindri e corpi aerodinamici, la crisi della resistenza, moto di Stokes e sedimentazione, portanza, e la potenza disponibile in una corrente d’aria o d’acqua.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare la resistenza da un coefficiente di resistenza.
- Spiegare il ruolo della resistenza d’attrito e di quella di pressione.
- Usare la legge di Stokes per le particelle piccole.
- Trovare la potenza di una corrente di vento e il limite di Betz.

Concetti chiave

- Resistenza F_D = C_D ½ρV²A e portanza F_L = C_L ½ρV²A, con A un’area di riferimento. C_D dipende dalla forma e da Re.
- I corpi aerodinamici hanno soprattutto resistenza d’attrito; i corpi tozzi (sfere, cilindri, camion) hanno soprattutto resistenza di pressione dovuta a una scia separata.
- Per una sfera liscia C_D ≈ 0.47 per 10^3 < Re < 2 × 10^5; intorno a Re ≈ 3 × 10^5 lo strato limite diventa turbolento, si separa più tardi e C_D crolla (la crisi della resistenza).
- A Re molto basso (Re < 1), resistenza di Stokes F = 3πμVD; una particella piccola sedimenta a V = (ρ_p − ρ)gD²/(18μ).
- Una corrente di sezione A trasporta una potenza ½ρAV³. Nessuna turbina può catturarne più di 16/27 ≈ 59.3% (il limite di Betz).

Equazioni chiave

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A$$

F_D=C_D12ρ V^2A

Resistenza

$$F = 3\pi\mu V D$$

F=3πμ VD

Resistenza di Stokes

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18\mu}$$

V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)

Velocità di sedimentazione

$$P = \tfrac{1}{2}\rho A V^3, \;\; C_{P,max} = \frac{16}{27}$$

P=12ρ AV^3,\ \ C_P,max=16/27

Potenza eolica e limite di Betz

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Un pallone da 0.22 m si muove a 20 m/s in aria (C_D = 0.47, valore d'esempio). Trova Re e la resistenza.

1. Re = 1.225 × 20 × 0.22/1.789 × 10⁻⁵ = 3.01 × 10⁵.
2. F = 0.47 × ½ × 1.225 × 400 × π × 0.11².

Risposta: Re = 3.01 × 10⁵ (vicino alla crisi della resistenza); F = 4.38 N.

Esempio 9.2 Trova la velocità di sedimentazione di un granello di sabbia da 50 μm (ρ_p = 2500 kg/m³) in acqua.

1. V = (2500 − 998) × 9.81 × (50 × 10⁻⁶)²/(18 × 1.002 × 10⁻³).
2. Verifica Re = 998 × 0.00204 × 50 × 10⁻⁶/1.002 × 10⁻³ = 0.102.

Risposta: V = 2.04 mm/s; Re < 1, quindi vale la legge di Stokes.

Esempio 9.3 Trova la potenza del vento attraverso un rotore di 100 m di diametro a 10 m/s, e il massimo di Betz.

1. A = π × 50² = 7854 m².
2. P = ½ × 1.225 × 7854 × 1000.
3. P_max = P × 16/27.

Risposta: P = 4.81 MW; massimo di Betz 2.85 MW.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Si raddoppia la velocità del vento. Potenza del vento?

   8 volte.

2. Perché i camion hanno carenature?

   Per ridurre la resistenza di pressione dovuta alla scia.

3. Si dimezza il diametro di una particella. Velocità di sedimentazione di Stokes?

   1/4.

4. Che cos'è la crisi della resistenza?

   Il crollo improvviso di C_D quando lo strato limite diventa turbolento.

Errori concettuali comuni

Mito: La resistenza è sempre proporzionale a V^2.
In realtà: A Re molto basso è proporzionale a V.

Mito: Una turbina può estrarre tutta la potenza del vento.
In realtà: Il limite di Betz la ferma al 59.3%.

Mito: Le superfici ruvide aumentano sempre la resistenza.
In realtà: Sulle sfere possono anticipare la crisi della resistenza.

Flashcard

Resistenza

C_D $\frac{1}{2}\rho V^2 A$.

Resistenza di pressione

Scia dietro i corpi tozzi.

Crisi della resistenza

C_D crolla vicino a Re 3×10^5.

Stokes

$F = 3\pi\mu VD$.

Potenza eolica

$\frac{1}{2}\rho A V^3$.

Betz

59.3%.

Quiz di autoverifica

1. La potenza del vento scala con V come...

V

V^2

V^3

V^4

V^3. $\frac{1}{2}\rho A V^3$.

2. Il limite di Betz è circa...

30%

45%

59%

100%

59%. 16/27.

3. La resistenza di Stokes vale quando Re è...

< 1

$\approx 10^3$

$> 10^5$

qualsiasi

< 1. Moto strisciante.

4. La resistenza di un corpo tozzo è soprattutto...

l'attrito

la pressione

indotta

d’onda

la pressione. Scia separata.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE spiega che le pale delle turbine eoliche funzionano come l’ala di un aereo o il rotore di un elicottero: la differenza di pressione tra le due facce della pala genera portanza e resistenza, e poiché la portanza supera la resistenza il rotore fa girare un generatore. Il DOE osserva che le turbine a terra vanno da 100 kilowatt a diversi megawatt.

La legge $\frac{1}{2}\rho AV^3$ spiega perché le turbine diventano sempre più alte e grandi: raddoppiare il diametro del rotore quadruplica l’area, e mozzi più alti raggiungono venti più veloci, con una potenza che cresce col cubo della velocità. Il limite di Betz fissa l’obiettivo che ogni progettista di pale insegue.

Su Saving Planets: Aerodinamica I · Soluzioni

Fonti: DOE degli Stati Uniti: come funzionano le turbine eoliche? (in inglese) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html): Pagina gratuita della NASA.
- NASA Glenn: Boundary layer (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html): Pagina gratuita della NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Lezioni sul moto esterno.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Sezione di un manuale gratuito.

☐ **Ho finito questa unità**

Correnti a pelo libero: fiumi, canali e risalti idraulici

Canali a pelo libero, raggio idraulico, numero di Froude e corrente lenta, critica e veloce, energia specifica e altezza critica, moto uniforme ed equazione di Manning, risalti idraulici e dissipazione di energia, e stramazzi per la misura delle portate.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Classificare il moto in un canale con il numero di Froude.
- Trovare l'altezza critica e l'energia specifica.
- Usare l'equazione di Manning per il moto uniforme.
- Calcolare l'altezza a valle di un risalto idraulico e l'energia dissipata.

Concetti chiave

- Nei canali a pelo libero è la gravità a muovere la corrente e la superficie libera è a pressione atmosferica. Il raggio idraulico è R_h = A/P (perimetro bagnato).
- Numero di Froude Fr = V/√(gy): Fr < 1 corrente lenta (subcritica, profonda), Fr = 1 critica, Fr > 1 corrente veloce (supercritica, bassa). Le onde superficiali possono risalire verso monte solo in corrente lenta.
- Energia specifica E = y + V²/(2g). Per una portata per unità di larghezza q, il minimo di E si ha all'altezza critica y_c = (q²/g)^(1/3).
- Moto uniforme (Manning, SI): V = (1/n) R_h^(2/3) S^(1/2), con scabrezza n (circa 0.013 per calcestruzzo lisciato) e pendenza del fondo S.
- Un risalto idraulico trasforma una corrente veloce in lenta: $y_2/y_1 = \tfrac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$, e dissipa il carico h_L = $(y_2 - y_1)^3/(4y_1y_2)$. Gli sfioratori usano i risalti per proteggere gli alvei a valle delle dighe.

Equazioni chiave

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

Numero di Froude

$$E = y + \frac{V^2}{2g}, \;\; y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$$

`E=y+(V^2)/(2g),\ \ y_c=((q^2)/(g))^1/3`

Energia specifica e altezza critica

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

V=1n R_h^2/3S^1/2

Equazione di Manning (SI)

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right)$$

(y_2)/(y_1)=12(1+8Fr_1^2-1)

Risalto idraulico

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Un canale in calcestruzzo largo 2 m (n = 0.013) scorre con 1 m di tirante su una pendenza di 0.001. Trova V e Q.

1. A = 2 m², P = 4 m, R_h = 0.5 m.
2. V = (1/0.013) × 0.5^(2/3) × 0.001^0.5.
3. Q = VA.

Risposta: V = 1.53 m/s; Q = 3.06 m³/s.

Esempio 10.2 L'acqua scorre con 0.5 m di tirante a 6 m/s al piede di uno sfioratore. Trova Fr, l'altezza dopo un risalto idraulico e il carico perso.

1. Fr = 6/√(9.81 × 0.5) = 2.71.
2. y_2 = 0.25 × (√(1 + 8 × 2.71²) − 1).
3. h_L = (y_2 − y_1)³/(4$y_1$$y_2$).

Risposta: Fr = 2.71; y_2 = 1.68 m; h_L = 0.491 m.

Esempio 10.3 Trova l'altezza critica per q = 2 m²/s.

1. y_c = (4/9.81)^(1/3).

Risposta: y_c = 0.742 m.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. V = 3 m/s con 1 m di tirante: corrente lenta o veloce?

   Fr = 0.958, corrente lenta.

2. Trova E per y = 1 m, V = 3 m/s.

   1 + 9/19.62 = 1.459 m.

3. Quale altezza porterebbe q = 2 m²/s a V = 1.53 m/s?

   2/1.532 = 1.31 m.

4. Perché costruire una vasca di dissipazione a valle di una diga?

   Per forzare un risalto che dissipi energia.

Errori concettuali comuni

Mito: Una corrente rapida è sempre supercritica.
In realtà: Confronta V con √(gy).

Mito: Un risalto guadagna energia.
In realtà: Perde energia.

Mito: La n di Manning è uguale ovunque.
In realtà: Dipende dalla superficie.

Flashcard

Froude

V/√(gy).

Raggio idraulico

A/P.

Energia specifica

$y + V^2/2g$.

Altezza critica

$(q^2/g)^{\wedge}(1/3)$.

Manning

$(1/n)R^{\wedge}(2/3)S^{\wedge}(1/2)$.

Risalto

$y_2/y_1 = ½(\sqrt{(1 + 8Fr^2)} - 1)$.

Quiz di autoverifica

1. Una corrente supercritica è...

Fr < 1

Fr = 1

Fr > 1

Fr = 0

Fr > 1. Veloce, bassa.

2. Il raggio idraulico è...

A/P

P/A

4A/P

y

A/P. Definizione.

3. L'energia specifica è minima a...

l'altezza critica

altezza zero

l'altezza di moto uniforme

qualsiasi altezza

l'altezza critica. dE/dy = 0.

4. Un risalto idraulico...

dissipa energia

aggiunge energia

è reversibile

accelera la corrente

dissipa energia. Mescolamento turbolento.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE descrive un impianto idroelettrico a derivazione, o ad acqua fluente, come uno che convoglia parte di un fiume in un canale e/o una condotta forzata, sfruttando il dislivello naturale dell'alveo per produrre energia, talvolta senza diga. Progettare quel canale è un problema di moto a pelo libero: l'equazione di Manning lo dimensiona per la portata e il dislivello fissa il salto.

Il DOE aggiunge che i rilasci dagli invasi possono servire al passaggio dei pesci e alla qualità dell'acqua. Gli ingegneri usano il numero di Froude e i risalti idraulici per sagomare sfioratori e canali che proteggono gli alvei e mantengono portate sicure per la fauna.

Su Saving Planets: Oceani · Osservazione della Terra

Fonti: U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Appunti sui canali a pelo libero.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Moti a superficie libera.
- NOAA: Currents tutorial (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html): Tutorial gratuito della NOAA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Trattazione più approfondita.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

Questi esercizi stanno dentro ogni unità. Falli su carta, poi apri la risposta.

1. Proprietà dei fluidi: densità, viscosità e tensione superficiale
   4 esercizi

2. Statica dei fluidi, manometri e spinta di Archimede
   4 esercizi
3. Bernoulli, carichi e l'equazione dell'energia
   4 esercizi
4. Quantità di moto integrale: getti, pale, curve e turbine
   4 esercizi
5. Analisi differenziale: continuità, Navier–Stokes e flussi esatti
   4 esercizi
6. Analisi dimensionale, similitudine e prove su modello
   4 esercizi
7. Moto nei condotti: attrito, diagramma di Moody e perdite concentrate
   4 esercizi
8. Pompe, turbine e impianti di pompaggio
   4 esercizi
9. Flusso esterno: strati limite, resistenza e portanza
   4 esercizi
10. Correnti a pelo libero: fiumi, canali e risalti idraulici
    4 esercizi

Il laboratorio (Fluid mechanics lab)

Il laboratorio è la parte pratica del corso. Qui è gratuito e solo per esercitarsi, senza crediti.

Ogni laboratorio si può fare con una simulazione gratuita o con oggetti di cucina e giardino. Lavora sopra un lavello o all'aperto, asciuga subito l'acqua versata per evitare di scivolare, usa solo acqua fredda del rubinetto e tieni l'acqua lontana da prese e apparecchi elettrici.

Riferimento per la sicurezza: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

Laboratorio A: Densità e galleggiamento per pesata

SETTIMANA 3

Obiettivo: Trovare il volume e la densità di un oggetto dal suo peso in aria e dal suo peso apparente in acqua, con il principio di Archimede.

$$V = \frac{m_{air} - m_{water}}{\rho_w}, \quad \rho = \frac{m_{air}}{V}$$

```
V=_air-m_waterρ_w,\ \ ρ=_airV
```

Principio di Archimede

Procedimento

1. Esplora PhET Buoyancy: cambia la densità dell'oggetto e quella del fluido e osserva le forze.
2. A casa: pesa un piccolo oggetto denso (un sasso o un cucchiaio di metallo) su una bilancia da cucina.
3. Appendilo a un filo completamente immerso in una caraffa appoggiata sulla bilancia (prima fai la tara), oppure usa una bilancia pesavaligie; annota la massa apparente.
4. Calcola il volume e la densità.

Tabella dei dati

Grandezza	Valore
Massa in aria	200 g
Massa apparente in acqua	120 g
Volume	80 cm^3
Densità	2500 kg/m^3

Valori d'esempio (tipici di pietra o vetro).

Calcolo di esempio

1. V = (200 − 120)/1.00 = 80 cm^3.
2. ρ = 200/80 = 2.50 g/cm^3 = 2500 kg/m^3.

> **Sicurezza**
>
> - Asciuga subito l'acqua versata.

Alternativa a casa o virtuale

- È un laboratorio a casa.

PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy) · PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density)

Legame con il pianeta: La NOAA spiega che le differenze di densità dovute a temperatura e salinità muovono il nastro trasportatore oceanico profondo. NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio B: La bottiglia di Torricelli

SETTIMANA 4

Obiettivo: Verificare la legge di Torricelli misurando quanto lontano arriva un getto d'acqua da un foro in una bottiglia.

$$V = \sqrt{2gh}, \;\; x = 2\sqrt{hY}$$

V=2gh,\ \ x=2

Velocità e gittata del getto dall'altezza Y

Procedimento

1. Pratica un piccolo foro sul fianco di una bottiglia di plastica vicino al fondo; coprilo con nastro adesivo.
2. Riempi la bottiglia e appoggiala su una scatola sopra un lavello o all'aperto, con il foro a Y = 0.3 m sopra la superficie di arrivo.
3. Togli il nastro; quando il livello dell'acqua è h = 0.2 m sopra il foro, segna dove arriva il getto.
4. Confronta con la previsione; ripeti ad altri livelli.

Tabella dei dati

Grandezza	Valore
Carico h	0.20 m
Velocità del getto	1.98 m/s
Altezza di caduta Y	0.30 m
Gittata prevista	0.49 m

Valori previsti; i getti reali arrivano un po' più corti per le perdite al foro.

Calcolo di esempio

1. V = √(2 × 9.81 × 0.2) = 1.98 m/s.
2. x = 2√(0.2 × 0.3) = 0.49 m.

> **Sicurezza**
>
> - Fallo sopra un lavello o all'aperto; asciuga l'acqua per evitare di scivolare.
> - Usa uno spiedino con cautela, con la punta lontana dalla mano.

Alternativa a casa o virtuale

- È un laboratorio a casa.

PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow) · PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure)

Legame con il pianeta: Il DOE osserva che la produzione idroelettrica cresce con il salto; la velocità del getto della bottiglia cresce con √h per lo stesso motivo. U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

☐ **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio C: Misurare la portata e il numero di Reynolds

SETTIMANA 7

Obiettivo: Misurare la portata di un rubinetto o di una canna con un secchio e un cronometro, e stabilire se il moto all'interno è laminare o turbolento.

$$Q = \frac{V_{bucket}}{t}, \quad Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Q=_buckett,\ \ Re=(ρ VD)/(μ)

Portata e numero di Reynolds

Procedimento

1. Cronometra quanto impiega una canna o un rubinetto a riempire 10 L.
2. Misura il diametro interno della canna o dell'uscita del rubinetto.
3. Calcola Q, la velocità media e Re.
4. Chiudi il rubinetto finché il getto appare liscio e vetroso, e ripeti.

Tabella dei dati

Grandezza	Valore
10 L in	25 s
Q	0.4 L/s
Diametro interno della canna	16 mm
V	1.99 m/s
Re	31,700

Valori d'esempio; un Re ben sopra 4000 significa moto turbolento nella canna.

Calcolo di esempio

1. V = 0.0004/(π × 0.008²) = 1.99 m/s.
2. Re = 998 × 1.99 × 0.016/1.002 × 10^{-3} = 31,700.

> **Sicurezza**
>
> - Chiudi il rubinetto alla fine; attenzione al pavimento scivoloso.

Alternativa a casa o virtuale

- È un laboratorio a casa.

PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow)

Legame con il pianeta: L'EPA suggerisce di controllare il contatore dell'acqua per due ore senza usare acqua; qualsiasi variazione indica una perdita. U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio D: Foglio di calcolo dell’attrito nei condotti

SETTIMANA 10

Obiettivo: Costruire un foglio di calcolo del numero di Reynolds, del fattore d’attrito e della perdita di carico in funzione della velocità, e vedere come crescono le perdite.

$$h_L = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

`h_L=fL/D(V^2)/(2g)`

Darcy–Weisbach

Procedimento

1. Poni D = 50 mm, L = 100 m, ε = 0.045 mm, acqua a 20 °C.
2. Calcola Re e la f di Haaland per V da 0.5 a 3 m/s.
3. Calcola h_L e tracciala in funzione di V.
4. Interpola h_L ∝ V^n e trova n.

Tabella dei dati

V (m/s)	Re	f	h_L (m)
1	49,800	0.0235	2.39
2	99,600	0.0216	8.82
3	149,400	0.0209	19.2

Valori calcolati; n risulta un po’ sotto 2 perché f cala lentamente al crescere di Re.

Calcolo di esempio

1. h_L(2 m/s) = 0.0216 × 2000 × 4/19.62 = 8.82 m.
2. Triplicare V moltiplica h_L per 19.2/2.39 = 8.0.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/)

Legame con il pianeta: Il DOE afferma che le buone pratiche nei sistemi di pompaggio fanno risparmiare moltissima energia; meno perdite significano pompe più piccole. U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio E: Sedimentazione della sabbia in acqua

SETTIMANA 13

Obiettivo: Osservare sabbia fine e grossa depositarsi in un bicchiere alto d'acqua e confrontare con la legge di Stokes.

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18 \mu}$$

`V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)`

Sedimentazione di Stokes

Procedimento

1. Riempi d'acqua un bicchiere alto o una bottiglia trasparente.
2. Lascia cadere un pizzico di sabbia fine e cronometra quanto impiegano i granelli a scendere di 0.2 m.
3. Ripeti con sabbia più grossa.
4. Confronta le velocità con la legge di Stokes e annota quando smette di valere.

Tabella dei dati

Diametro dei granelli	Velocità di Stokes	Re
50 µm	2.04 mm/s	0.102
100 µm	8.17 mm/s	0.81

Calcolato per granelli simili al quarzo (ρ = 2500 kg/m³); i granelli più grossi, con Re oltre circa 1, cadono più lentamente di quanto prevede Stokes.

Calcolo di esempio

1. V(50 µm) = 1502 × 9.81 × 2.5 × 10⁻⁹/(18 × 1.002 × 10⁻³) = 2.04 mm/s.
2. Raddoppiare D moltiplica la velocità per 4.

> **Sicurezza**
>
> - Usa sabbia pulita da gioco; lavati le mani dopo.

Alternativa a casa o virtuale

- È un laboratorio a casa.

NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html)

Legame con il pianeta: Il DOE osserva che i rilasci dagli invasi servono alla qualità dell'acqua; la sedimentazione decide come si riempiono i bacini e come i fiumi trasportano il limo. U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: Impianto di pompaggio e velocità variabile

SETTIMANA 11

Obiettivo: Trovare il punto di funzionamento di una pompa e usare le leggi di affinità per confrontare la strozzatura con il rallentamento della pompa.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

```
(P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3
```

Legge di affinità per la potenza

Procedimento

1. Inserisci la curva della pompa H = 40 − 7000Q² e la curva dell'impianto H = 10 + 5000Q².
2. Trova il punto di funzionamento e la potenza all'albero.
3. Applica le leggi di affinità a 1500 e 1200 giri/min al punto a 1800 giri/min (0.05 m³/s, 30 m).
4. Confronta le potenze richieste.

Tabella dei dati

N (giri/min)	Q (m³/s)	H (m)	Rapporto di potenza
1800	0.050	30.0	1.000
1500	0.0417	20.8	0.579
1200	0.0333	13.3	0.296

Scalatura di affinità ideale; il dislivello statico dell'impianto limita quanto si può rallentare una pompa reale.

Calcolo di esempio

1. Q(1200) = 0.05 × 2/3 = 0.0333 m³/s.
2. Rapporto di potenza = (2/3)³ = 0.296.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

Legame con il pianeta: Gli strumenti gratuiti PSAT e MEASUR del DOE aiutano gli stabilimenti a trovare proprio questi risparmi sulle pompe. U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Serie di esercizi per gli esami

Cronometrati: circa 10 minuti per problema. Poi confronta con le soluzioni complete.

Esercizi di preparazione all'esame intermedio (unità 1–5)

1. Trova lo sforzo di taglio nell'acqua tra due lastre distanti 0.5 mm quando una si muove a 1 m/s.
    1. $\tau = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.0005$.

    Risposta: 2.00 Pa.
2. Trova la pressione relativa a 25 m di profondità in acqua di mare (1025 kg/m³).
    1. $1025 \times 9.81 \times 25$.

    Risposta: 251.4 kPa.
3. Trova la potenza di una centrale idroelettrica con Q = 20 m³/s, H = 40 m, $\eta = 0.88$ ($\rho = 1000$).
    1. $0.88 \times 1000 \times 9.81 \times 20 \times 40$.

    Risposta: 6.91 MW.
4. Un getto d'acqua da 0.01 m³/s a 25 m/s viene deviato di 180° da una paletta fissa. Forza?
    1. $2\rho QV = 2 \times 1000 \times 0.01 \times 25$.

    Risposta: 500 N.
5. Trova la Q laminare in un tubo di raggio 2 mm, $\Delta p/L = 200$ Pa/m, acqua.
    1. $\pi \times 0.002^4 \times 200/(8 \times 1.002 \times 10^{-3})$.

    Risposta: 1.25×10^{-6} m³/s.

Serie di esercizi finale (tutte le unità)

1. Un modello di nave in scala 1:25 segue la similitudine di Froude. Velocità reale 10 m/s. Velocità del modello?
    1. 10/5.

Risposta: 2 m/s.

2. Trova h_L in 200 m di tubo da 0.1 m con f = 0.02 a 1.5 m/s.

    1. 0.02 × 2000 × 2.25/19.62.

    Risposta: 4.59 m.

3. Una pompa a 1200 giri/min dà 25 m di prevalenza. Prevalenza a 1500 giri/min?

    1. 25 × (1.25)².

    Risposta: 39.1 m.

4. Trova la potenza del vento attraverso un rotore da 80 m a 8 m/s (ρ = 1.225).

    1. ½ × 1.225 × π × 40² × 512.

    Risposta: 1.58 MW.

5. Trova Fr per una corrente a 4 m/s con 0.4 m di tirante.

    1. 4/√(9.81 × 0.4).

    Risposta: 2.02, corrente veloce.

6. Trova y_c per q = 3 m²/s.

    1. (9/9.81)^(1/3).

    Risposta: 0.972 m.

Formulario

$$\tau = \mu\, du/dy,\ \nu = \mu/\rho$$

$$p = p_0 + \rho g h,\ F = \rho g h_c A,\ F_B = \rho g V$$

$$Q = AV,\ p/\rho g + V^2/2g + z = \text{const}$$

$$P = \eta \rho g Q H,\ V = \sqrt{2gh}$$

$$\sum F = \sum \dot{m} V_{out} - \sum \dot{m} V_{in},\ F = \rho Q V (1 - \cos$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0,\ Q = \pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$$

$$Re = \rho V L/\mu,\ Fr = V/\sqrt{gL}$$

$$h_L = f(L/D)V^2/2g,\ f_{lam} = 64/Re$$

$$h_m = KV^2/2g,\ D_h = 4A/P$$

$$P = \rho g Q h/\eta,\ Q \propto N,\ H \propto N^2,\ P \propto N^3$$

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A,\ P_{wind} = \tfrac{1}{2}\rho A V^3$$

$$V = (1/n) R_h^{2/3} S^{1/2},\ y_c = (q^2/g)^{1/3}$$

$$y_2/y_1 = \tfrac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

Costanti

Costante	Valore
Acqua a 20 °C (valori da manuale)	ρ = 998 kg/m³, μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s), ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s, tensione superficiale σ = 0.0728 N/m
Aria a 15 °C (valori da manuale)	ρ = 1.225 kg/m³, μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)
Acqua di mare e ghiaccio (valori da manuale)	ρ_sea = 1025 kg/m³, ρ_ice = 917 kg/m³
Mercurio (valore da manuale)	ρ = 13,600 kg/m³
La gravità	g = 9.81 m/s²
1 gallone USA	3.785 L

Fonte: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

Testi e simulazioni gratuiti

Usa queste lezioni, sezioni di manuale e simulazioni gratuite insieme al corso.

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Appunti delle lezioni ed esercizi gratuiti del MIT.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Corso gratuito del MIT di fluidi per l'ingegneria civile.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Trattazione più approfondita del MIT.
- OpenStax University Physics Volume 1, Chapter 14: Fluid mechanics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): Capitolo di libro gratuito.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): Pressione e moto in modo interattivo.
- PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): La spinta di Archimede in modo interattivo.

Glossario

Strato limite

Strato sottile vicino a una parete in cui conta la viscosità.

Galleggiamento
Forza verso l'alto pari al peso del fluido spostato.

Cavitazione
Bolle di vapore che si formano dove la pressione scende alla tensione di vapore.

Continuità
Conservazione della massa in un flusso.

Coefficiente di resistenza
Resistenza divisa per $\frac{1}{2}\rho V^2 A$.

Numero di Froude
$V/\sqrt{(gL)}$, inerzia su gravità.

Carico
Energia per unità di peso del fluido, in metri.

Perdita di carico
Energia meccanica persa per attrito, per unità di peso.

Risalto idraulico
Passaggio brusco da corrente veloce a corrente lenta.

Raggio idraulico
Area della sezione divisa per il perimetro bagnato.

Moto laminare
Moto regolare, a strati, a basso numero di Reynolds.

Manometro
Tubo di liquido usato per misurare differenze di pressione.

Equazioni di Navier–Stokes
Equazioni della quantità di moto per un fluido viscoso.

Punto di funzionamento
Dove la curva della pompa incontra la curva dell'impianto.

Numero di Reynolds
$\rho VL/\mu$, inerzia su forze viscose.

Densità relativa
Densità rispetto all'acqua.

Moto di Stokes
Moto strisciante a Re molto minore di 1.

Tensione superficiale
Forza per unità di lunghezza lungo una superficie liquida.

Moto turbolento
Moto caotico e rimescolante ad alto numero di Reynolds.

Viscosità
Resistenza di un fluido al taglio.

Griglia di autovalutazione

Non si assegnano voti né crediti. Usala per valutare onestamente a che punto sei in ogni unità.

Livello	Come si presenta
4 · Padronanza	Disegna volumi di controllo, sceglie la legge giusta (idrostatica, Bernoulli, energia, quantità di moto, Navier–Stokes), controlla Re e Fr, tiene in ordine le unità e svolge i laboratori in sicurezza.
3 · Competente	Risolve gli esercizi con occasionali errori di unità o di segno.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma applica Bernoulli attraverso le pompe o ignora le perdite.
1 · Principiante	Inserisce numeri nelle formule senza uno schizzo; deve rivedere l'unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	20%
Laboratori	25%
Serie di esercizi di metà corso	25%
Serie di esercizi finale	30%

Punta al livello 3 o superiore in ogni unità prima di passare al corso successivo.

Corsi correlati

- Termodinamica ENGR 320
- Prestazioni dei velivoli AERO 320
- Aerodinamica I AERO 310
- Tutti i corsi