centro appunti
www.centroappunti.it
Corso Luigi Einaudi, 55/B - Torino

Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO: 1182

DATA: 22/10/2014

A P P U N T I

STUDENTE: Porcelli

MATERIA: Fisica Tecnica + Temi + Eserc.

Prof. Perino

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 328

ATTENZIONE A
(1) UNITÀ di MISURA da scrivere
(2) CONVERTO tutte le unità di misura in S.I. subito!

8 CREDITI

Corso di laurea in

Ingegneria per L'Ambiente e il Territorio; Ingegneria Civile; Ingegneria Edile

AA 2013-2014

10AXY - FISICA TECNICA

Docente
(lezioni ed esercitazioni I squadra)
Prof. Marco Perino (marco.perino@polito.it – tel. interno 4423 – Dip.di Energia – DENERG
http://www.polito.it/tebe)

Orario di ricevimento: pubblicato ed aggiornato sul portale della didattica

Esercitatore
Esercitazioni II squadra: Ing. Ylenia Cascone (ylenia.cascone@polito.it - tel. interno 4519)
– Dip.di Energia – DENERG
Orario di ricevimento: comunicato dal docente in aula nel corso della I esercitazione

Obiettivi dell'insegnamento
Il corso si propone di fornire conoscenze tecnico-scientifiche di base e di sviluppare le capacità progettuali degli allievi nei settori della illuminotecnica, dell'acustica dell'ambiente esterno e confinato, della trasmissione del calore e della termodinamica.

Prerequisiti
Fondamenti di fisica, chimica, analisi matematica.

Competenze attese
Conoscenza dei principi teorici fondamentali nonché degli strumenti di valutazione quantitativa e dei dati di riferimento principali nei settori della illuminotecnica, dell'acustica dell'ambiente esterno e confinato, della trasmissione del calore e della termodinamica. Capacità di elaborare soluzioni progettuali di massima, ottimizzate anche sotto il profilo energetico/ambientale, per i principali problemi di natura fisico-tecnica che si presentano oggi agli operatori del settore.

Programma
Elementi di illuminotecnica: sistema energetico e sistema fotometrico, curva di visibilità, sorgenti naturali, fattore di luce diurna, sorgenti artificiali, lampade a basso consumo energetico, apparecchi illuminanti, efficienza luminosa, analisi costo/benefici, altri parametri di caratterizzazione. Criteri progettuali per l'illuminazione artificiale di interni ed esterni.
Elementi di acustica: grandezze fondamentali, meccanismo dell'udito, sensazioni auditive, audiogramma normale. Fonoassorbimento e fonoisolamento, caratteristiche di assorbimento e di attenuazione acustica dei materiali. Calcolo del tempo di riverberazione in un ambiente chiuso (formula di Sabine) e scelta del suo valore ottimale. Calcolo del fonoisolamento tra due ambienti chiusi adiacenti. Criteri progettuali per interventi di acustica architettonica. Valutazione del rumore e Curve di ponderazione
Fondamenti di termodinamica: equazioni di conservazione. Trasformazioni termodinamiche reversibili e non, lavoro e calore. I° principio della termodinamica per sistemi chiusi e aperti. Energia interna ed entalpia. II° principio della termodinamica. Entropia. Diagramma delle fasi, liquidi e vapori, gas ideali. Macchine termiche a ciclo diretto e inverso. Concetto di efficienza.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 328

M. Perino - Rev. del 28/9/12

Regole d'Esame e Criteri di valutazione della prova scritta

Corso Amb. E Terr., Civili, Edili – Fisica Tecnica 10AXY

REGOLE D'ESAME

L'esame è costituito da una prova scritta obbligatoria ed una prova orale facoltativa (da svolgersi contestualmente alla parte scritta).
Gli appelli d'esame si tengono ESCLUSIVAMENTE nelle sessioni ufficiali.
L'iscrizione online all'appello è obbligatoria.

Nel caso in cui si decida di non sostenere la prova orale il voto massimo registrabile è di 24/30 (ovvero il voto dell'esame viene determinato come media aritmetica fra il voto della prova scritta e 18/30. Per cui se risulta: scritto = 30/30 il voto registrabile sarà: (30+18)/2 = 24/30).

COMPITO SCRITTO

Il compito scritto consta di 2 parti: una parte di Teoria ed una parte di Esercizi.
Ciascuna parte vale 32/30 (corrispondente al 30 e lode) ed il voto finale risulta dalla media aritmetica delle due parti, a condizione che ciascuna di esse risulti superiore a 15/30 (se anche una sola delle 2 parti viene valutata meno di 15/30 il compito scritto risulta non superato).

Parte di Teoria
E' costituita da:

- 32 affermazioni del tipo vero/falso
- 4 definizioni sintetiche

Durante la prova di teoria non si possono utilizzare libri, dispense, formulari, appunti esercizi svolti ed altro materiale di supporto.

La prova dura 45 minuti, ma se si termina prima è possibile consegnare ed iniziare in anticipo la parte di esercizi (guadagnando tempo utile).

punteggi:

- per ogni affermazione vera/falsa giusta: +0.75
- per ogni affermazione vera/falsa sbagliata: -0.60
- per ogni affermazione vera/falsa non data: 0
- valore di ogni definizione sintetica: da 0 a 2

Parte di Esercizi
E' costituita da 4 esercizi numerici da svolgere in 1ora e mezza (Si possono utilizzare le dispense ed i formulari, non gli appunti. La valutazione degli esercizi è fatta per i soli candidati la cui parte di teoria sia risultata al di sopra di 15/30 – Per gli altri le soluzioni degli esercizi sono messe sul portale la settimana successiva all'appello in modo che tutti possano verificare come si doveva fare lo svolgimento)
punteggi:

- Esercizio di illuminotecnica: 6 pt.
- Esercizio di acustica: 6 pt.
- Esercizio di Termodinamica: 10 pt.
- Esercizio di Trasmissione del calore: 10 pt.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 328

- $\phi_e(\lambda) = \frac{d\phi_e}{d\lambda}$ $\left[\frac{W}{\mu m}\right]$ FLUSSO energetico monocromatico

- $\phi_e = \int_0^\infty \phi_e(\lambda)\, d\lambda$ $[W]$ flusso energetico integrale

- $\phi(\lambda) = k(\lambda)\, \phi_e(\lambda)$ $\left[\frac{lm}{\mu m}\right]$ flusso luminoso monocromatico

- $\phi = \int_0^\infty k(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, d\lambda$ $[lm]$ (2) flusso luminoso → QUANTITÀ FLUSSO

- $v(\lambda) = \frac{k(\lambda)}{k_{max}}$ $(0 \div 1)$ (1) $k_{max} = 683 \frac{lm}{W}$ $v(\lambda)$ = FATTORE di VISIBILITÀ Relativo

  $k(\lambda)$ = fattore di visibilità

- $I = \frac{d\phi}{d\omega}$ $\left[cd = \frac{lm}{sr}\right]$ INTENSITÀ luminosa → QUANTITÀ DIREZIONE FLUSSO

- $\phi = \int_{\Omega} I\, d\omega$ ↳ 4π

- $\eta = \frac{\phi}{\phi_e}$ $\left[\frac{lm}{W}\right]$ (3) EFFICIENZA LUMINOSA SORGENTI NATURALI

  $\eta = \frac{\text{EFFETTO UTILE}}{\text{SPESA SOSTENUTA}}$

- $\eta = \frac{\phi}{W}$ $\left[\frac{lm}{W}\right]$ EFFICIENZA LUMINOSA SORGENTI ARTIFICIALI

CANDELA = quantità di luce emessa da una sorgente monocromatica che emette luce alla frequenza di $540 \cdot 10^{12}$ Hz lungo una data direzione, all'interno di un angolo solido unitario ↓ corrispondente a $\lambda = 0{,}555\ \mu m$ la cui intensità energetica ϕ_e lungo la medesima direzione vale $\frac{1}{683} \frac{W}{sr}$

$W = J/s$

Dalla (1) $v(\lambda) = \frac{k(\lambda)}{k_{max}}$ • $\boxed{k(\lambda) = v(\lambda)\, k_{max}}$

sostituendo nella definizione di flusso luminoso (2)

$$\phi = \int_0^\infty k(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, d\lambda = \int_0^\infty \underbrace{v(\lambda)\, k_{max}}_{\text{costanti}}\, \phi_e(\lambda)\, d\lambda$$

$$\boxed{\phi = v(\lambda)\, k_{max} \cdot \int_0^\infty \phi_e(\lambda)\, d\lambda} \quad (4)$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 328

ESERCIZI

1.1 $v(\lambda) = ?$ $K(\lambda) = 410 \frac{lm}{W}$

$$v(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{max}} = \frac{410}{683} = 0.6$$

1.2

$\lambda = ?$ corrispondente a 478 lm/W

$$K(\lambda) = 478 \frac{lm}{W} \qquad v(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{max}} = \frac{478}{683} = 0{,}7 \quad \begin{cases} \lambda = 0{,}52\ \mu m \\ \lambda = 0{,}59\ \mu m \end{cases}$$

1.3 $\lambda = ?$ tale che

$v(\lambda)$ ha stesso valore in visione scotopica e fotopica.

λ_{max} FOTOPICA $= 0{,}555\ \mu m$

λ_{max} SCOTOPICA $= 0{,}505\ \mu m$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} = \frac{0{,}555 + 0{,}505}{2} \rightarrow 0{,}530\ \mu m$$

1.4 $\phi_e(\lambda) = 1'000 \frac{W}{\mu m}$ $\phi = ?$ su tutta la gamma del visibile

$0{,}38 \le \lambda \le 0{,}78\ \mu m$

trascurando i fattori di visibilità relativi inferiori a 10^{-2}

$$\phi = \int_{0{,}43}^{0{,}67} \phi_e(\lambda) K(\lambda)\, d\lambda =$$

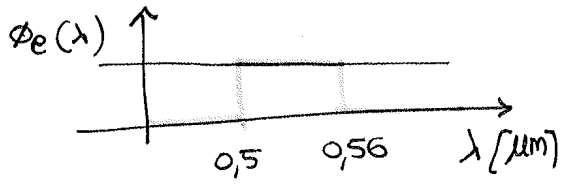
$$= \int_{0{,}43}^{0{,}67} v(\lambda) K_{max} \phi_e(\lambda)\, d\lambda \simeq K_{max} \sum_{0{,}43}^{0{,}67} \left(v(\lambda) \phi_e(\lambda) \underset{0{,}01\ \mu m}{\Delta\lambda}\right) =$$

$$= K_{max} \phi_e(\lambda) \sum_{0{,}43}^{0{,}67} \left(\frac{f(\lambda_{i+1}) + f(\lambda_i)}{2} \Delta\lambda\right) = 72'850\ lm$$

1.5

S $\phi_e = 50\ W$ per $0{,}5 < \lambda < 0{,}56\ \mu m$

$\phi = ?$ $\eta = ?$



$$\phi = \int_{0{,}5}^{0{,}56} \phi_e(\lambda) K(\lambda)\, d\lambda = \int_{0{,}5}^{0{,}56} v(\lambda) K_{max} \phi_e(\lambda)\, d\lambda$$

$$v(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{max}}$$

$$\phi = K_{max} \int_{0{,}5}^{0{,}56} v(\lambda) \phi_e(\lambda)\, d\lambda = K_{max} \phi_e(\lambda) \int_{0{,}5}^{0{,}56} v(\lambda)\, d\lambda = K_{max} \phi_e \sum_{0{,}5}^{0{,}56} \left(v(\lambda) \Delta\lambda\right)$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 328

FISICA TECNICA

Marco Perino
Marco.perino@polito.it

Mercoledì: esercitazione (dalla 2ª settimana)

4 GROSSI ARGOMENTI

1/3 [• Illumino Tecnica [TESINA]
1/3 [• Acustica [TESINA]
1/3 [• Termodinamica
1/3 [• Trasmissione del calore [TESINA]

} lezioni + esercitazioni → importante evidenziare al risultato corretto (NUMERO) e non solo al procedimento

TESINA (non dà voti in più ma dimostra la presenza alla lezione)
- Illuminotecnica (simulo illuminazione esterna)
- Acustica (correzione acustica di un ambiente)
- Trasmissione del calore (progetto termicrometrico di una parete edilizia)

- Fenomeno
- Grandezze fondamentali
- Principi fondamentali
- Applicazione

PROVA SCRITTA [OBBLIGATORIA]

1. TEST = 32 VERO/FALSO + 4 DEFINIZIONI SINTETICHE (45 min) [15 minimo] anche 14

Se consegno prima la prima parte ho più tempo per gli esercizi

2. 4 ESERCIZI NUMERICI [15 minimo]
→ POSSO USARE DISPENSE E FORMULARIO MIO

Termodinamica (10 punti) — Trasmissione calore (10 punti) — Illuministica (6 punti) — Acustica (6 punti)

MAX VOTO 24/30 [Teoria + Esercitazione = Voto /2]

PROVA ORALE FACOLTATIVA [MINIMO 15/30 allo scritto]
media flessibile

PREREQUISITI
- Logaritmi
- Integrali
- Geometria di base
- Derivate
- Equazioni differenziali
- Fisica concetti fondamentali

→ UTILE SEGUIRE LE LEZIONI

- CALCOLATRICE SCIENTIFICA

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 328

ILLUMINOTECNICA - capitolo 1

Comfort — Tecniche del controllo ambientale
↓
luce sufficiente, non abbagliante, voce recepita senza rumore

percezioni → soggettive
→ legate alle azioni

Studiare → le leggi fisiche
→ percezione delle leggi fisiche → per rendere confortevole l'ambiente

- fenomeno fisico (cause)
- percezione del fenomeno
- range di valore gradito dalle persone
- rendere confortevole

Impatto sui consumi energetici: impianto illuminazione
↓
consumo di energia
limitare i consumi!

- Studiare il fenomeno dell'ambiente luminoso e consentire la progettazione corretta dell'ambiente sfruttando al massimo la luce naturale.

(Luce) → radiazione elettromagnetica (onda)
→ frequenza, lunghezza d'onda differenzia la luce dalle onde elettromagnetiche della radio (per es.)

Insieme delle lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche a cui è sensibile l'occhio umano.
(sistema percettivo)

$$0,38 \leq \lambda \leq 0,78$$

CAMPO del VISIBILE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 328

$d\Phi_e = \Phi_e(\lambda)\, d\lambda$

⇓

Il flusso energetico tot associato alla lampadina è data dalla somma dei contributi infinitesimi

⇓

$$\boxed{\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda)\, d\lambda}$$

FLUSSO ENERGETICO INTEGRALE [W]

su tutte le lunghezze d'onda

Ho capito bene?

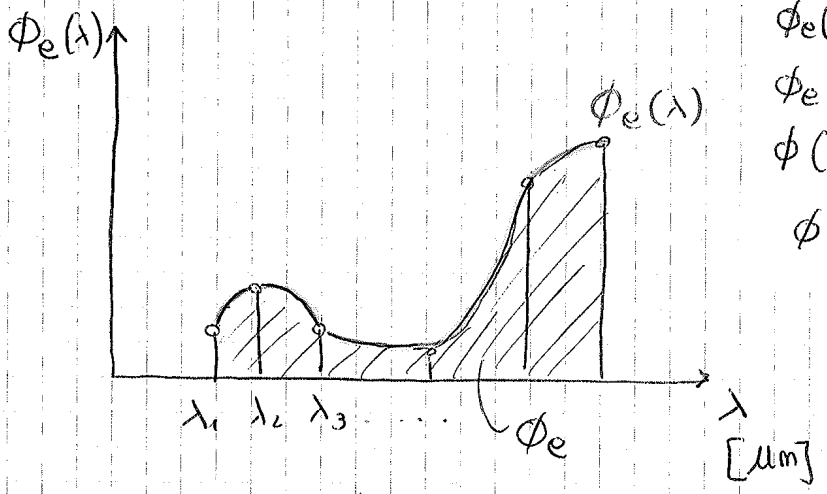
$\Phi_e(\lambda) = \frac{W}{\mu m}$

$\Phi_e = W$

$\Phi(\lambda) = \frac{lm}{\mu m}$

$\Phi = lm$

?



A intervalli infinitesimi ottengo una curva

L'integrale = area sottesa ⇒ curva = $\Phi_e(\lambda)$

area sottesa = Φ_e

Come il flusso si trasforma in luce? La sensibilità umana varia al variare della lunghezza d'onda. Ogni lunghezza d'onda fornisce un contributo alla sensazione.

$$\boxed{\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)}$$

$\left[\frac{lm}{\mu m}\right]$

FLUSSO LUMINOSO MONOCROMATICO

quantità di luce percepita

costante che dipende da λ

CARATTERISTICA dell'OCCHIO

FATTORE di VISIBILITÀ relativo

funzione di λ (costante di calibrazione del nostro occhio e che varia nell'intervallo di visibilità)

pagina precedente

Se la luce fosse monocromatica vedrei un solo colore

SPETTRO COMPLESSO ELETTROMAGNETICO = mondo in cui l'uomo è immerso

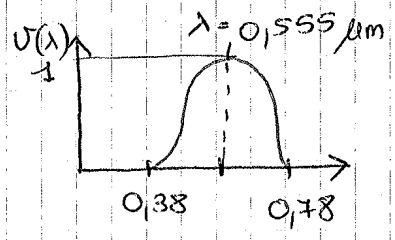
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 328

BASTONCELLI = sensibili solo alla quantità di luce e non alla lunghezza d'onda
[CONTRASTO di LUMINANZA] poca luce VISIONE NOTTURNA

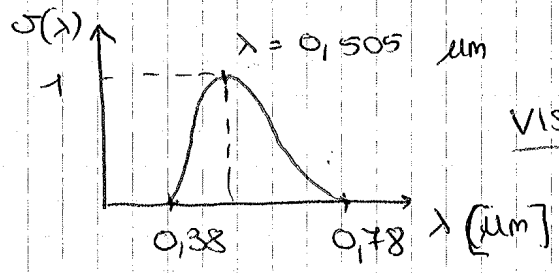
CONI = tanta quantità di luce e sensibili anche alla radiazione
VISIONE DIURNA

modalità DIURNA →



curva di visibilità in condizioni FOTOPICA (diurna)

modalità NOTTURNA



VISIBILITÀ SCOTOPICA

Visione FOTOPICA → $K_{max} = 683 \ \frac{lm}{W}$ (spesa energetica + bassa)

Visione SCOTOPICA → $K_{max} = 1700 \ \frac{lm}{W}$

[pag 177]

Se sostituisco il concetto di visibilità relativa nella funzione ϕ ottengo

$$[lm] \quad \boxed{\phi = K_{max} \int_0^{\infty} V(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, d\lambda}$$

costante e posso portarlo fuori dall'integrale

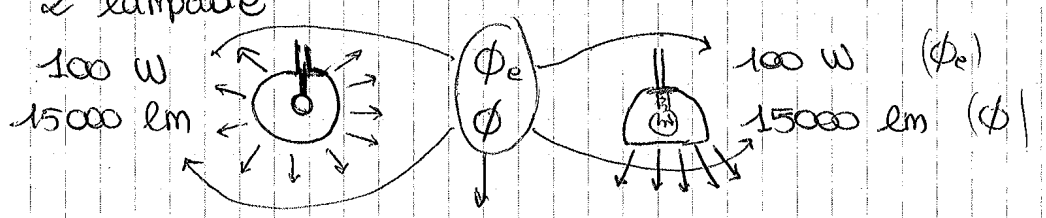
$$V(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{max}}$$

$$K(\lambda) = V(\lambda)\, K_{max}$$

LA GRANDEZZA fondamentale in ILLUMINOTECNICA è I = INTENSITÀ LUMINOSA [cd] → candela

- Grandezza fondamentale → viene definita l'unità di misura
- Grandezza derivata → attraverso operazioni delle grand. fond.

2 lampade



mi dice solo la quantità di luce prodotta ma non mi spiega come questa venga distribuita nello spazio!
(se devo illuminare la scrivania uso la 2ª lampada)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 328

Capitolo 2 SORGENTI LUMINOSE

NATURALI = SOLE, VOLTA CELESTE

ARTIFICIALI = LAMPADINE → 1880 Edison le fa conoscere a larga scala

EFFICIENZA LUMINOSA $\eta_{luminosa}$

$$\boxed{\eta = \frac{\text{EFFETTO UTILE}}{\text{SPESA SOSTENUTA}}}$$

↳ grandezza adimensionale

devo mangiare 1 kg di mele, per mangiarne effettivamente 1 kg devo comprarne di più perché le mele hanno la buccia, il torsolo ...

EFFETTO LUCE → flusso integrale luminoso ϕ
SPESA SOSTENUTA → flusso integrale emesso ϕ_e] SORGENTI NATURALI

$$\boxed{\eta = \frac{\phi}{\phi_e}} \quad \frac{lm}{W}$$

$W = J/s$
$J = W \cdot s$

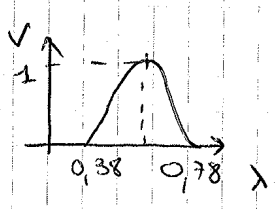
EFFETTO UTILE → flusso integrale luminoso ϕ
SPESA SOSTENUTA → potenza elettrica assorb. W] SORGENTI ARTIFICIALI

$$\boxed{\eta = \frac{\phi}{W}}$$

$$\phi = K_{max} V \int_0^\infty \phi_e(\lambda)\, d\lambda$$

ϕ ↓ flusso luminoso integrale

$\int_0^\infty \phi_e(\lambda)\, d\lambda$ ⇓ EFFETTO UTILE



- spesa per sorgenti naturali → avviene in maniera "radioattiva".

$$\phi_e = \int_0^\infty \phi_e(\lambda)\, d\lambda$$

⇓ SPESA SOSTENUTA

$K_{max} = 683$

$0 \le V(\lambda) \le 1$

Efficienza luminosa ←

$$\boxed{\eta = K_{max} \frac{\int_0^\infty V(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, d\lambda}{\int_0^\infty \phi_e(\lambda)\, d\lambda}}$$

→ EFFETTO UTILE
→ SPESA SOSTENUTA

- se $V(\lambda) = 1$ $K_{max} = 683$ → $\underline{\eta_{max} = 683}$ → in natura non esiste

SCAMBIO CALORE
- IRRAGGIAMENTO → in funzione dell'esposizione del corpo
- CONDUZIONE → scambio termico tra SOLIDI
- CONVEZIONE → scambio tra sorgente di calore (SOLIDO) e FLUIDO

CIRCONVEZIONE tra 2 fluidi

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 328

$\eta = 100 / 200 \ \frac{lm}{W}$

↳ RADIAZIONE del SOLE

ARTIFICIALI

1. INCANDESCENZA → ALOGENI (sottocategoria)
2. LUMINESCENZA → FLUORESCENZA
3. SSD → LED
   → OLED

INCANDESCENZA →
- BULBO o AMPOLA
- ATTACCO
- FILAMENTO
- GAS di RIEMPIMENTO

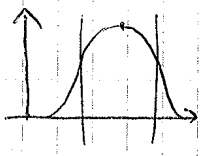
prime sorgenti luminose ad alto consumo vietate dal 2012 circa.

- Lampadine ad incandescenza: hanno un filamento collegato alla rete elettrica attraverso un attacco (vite), riceve una corrente elettrica e dissipa potenza per effetto Joule, si scalda diventando incandescente ed emette radiazione secondo le leggi del corpo nero (grigio)

→ parte della potenza per → scaldare l'ambiente
→ trasforma in flusso

⇓ lampadina al TUNGSTENO

maggiore è la temperatura migliore è il funzionamento, il picco di emissione si sposta nel campo del visibile e aumenta la POTENZA di EMISSIONE



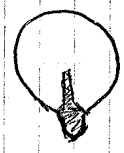
$Q = RI^2$

Q potenza elettrica = Resistenza R opposta al passaggio della corrente elettrica I

Inizialmente usato il TUNGSTENO = (W), sostanza chimica naturale che ha una temperatura di fusione molto alta (3370 °C).

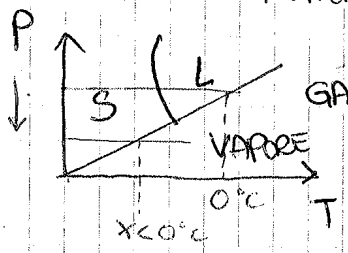
→ uso del BULBO IN VETRO = garantisce un'atmosfera rarefatta per evitare la combustione della lampadina, creo quasi il vuoto in modo tale da abbassare la pressione.

↓ evito la combustione del filamento



→ pressione bassa = possibilità SUBLIMAZIONE (da solido a gassoso)

2450 °C



abbassando la pressione anche a T minori (temperature) ottengo il passaggio da solido a VAPORE

- Il Tongsteno però sublimando tende a depositarsi sulla faccia interna del bulbo opacizzandola parzialmente.
  Per evitare tale problema vengono introdotti GAS INERTI (Argon, Azoto, Krypton) che consentono di raggiungere temperature del filamento di 2800 °C

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 328

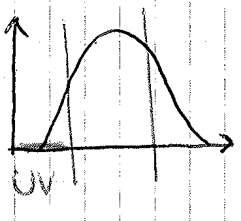
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 328

- A-B aumenta la tensione ma non la corrente scarica
- B-C ho salto di valenza e la corrente di scarica cresce
- in C ho la VALANGA ELETTRONICA o EFFETTO VALANGA che crea un innalzamento della tensione tale da accendere la lampadina

Se non controllo la tensione la corrente di scarica aumenta troppo e si verifica la ROTTURA → EFFETTO ARCO

3) Lampade a Fluorescenza (sottogruppo luminescenza)

Come le lampade a luminescenza ma all'interno del bulbo viene spalmato un sottile strato di sostanza luminescente / fluorescente. Queste sostanze hanno la capacità di assorbire la radiazione ultravioletta (UV) aumentandone la lunghezza d'onda e riemettendole → aumenta l'EFFICIENZA.



la potenza più o meno delle lampadine è di 100 W

LUM [FLUOR]	LED/OLED	INCAND	ALO
50-80 $\frac{lm}{W}$	90-120 $\frac{lm}{W}$	10-20 $\frac{lm}{W}$	30 $\frac{lm}{W}$
8'000 h	5'000 h	1'000 h	3'000 h

↓

2 PROBLEMI

- Resa cromatica
- Tensione di accensione (tempo di accensione)

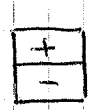
SSD → SOLID STATE DRIVE
UNITÀ A STATO SOLIDO
SORGENTI A STATO SOLIDO

- LED → light emitting diode
- OLED → organic light Emitting Diode

} diffusione da anni '90 nascita dal '50 come spie (computer)

PROBLEMI

- Potenze bassissime (non oltre 0,1 W) 100 $\frac{lm}{W}$
- colore → Rosso → Verde



pn

parte carica positivamente (+)
parte carica negativamente (-)
} salti di potenza emissione fotoni

I primi LED facevano luce solo grazie alla SINTESI ADDITIVA → ottengo la luce bianca solo passando attraverso le 3 luci principali → verde, rosso, blu

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 328

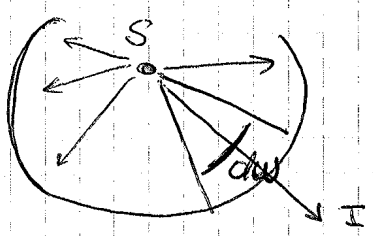
7/10/2013

Intensità luminosa e candela

$[cd]$ $I = \frac{d\Phi}{d\omega}$ $\Phi = \int_{4\pi} I \, d\omega$ $[lm]$

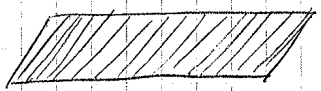
└ FLUSSO LUMINOSO

$K_{max} = 683 \frac{lm}{W}$



sorgente concentrata in un punto → devo sapere il Φ (flusso luminoso) e l'intensità I

Se invece ho una SUPERFICIE EMETTENTE

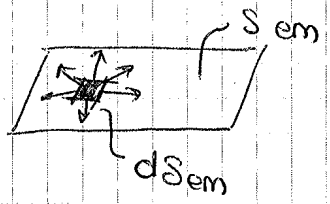


può accadere che da un punto all'altro la superficie emette luce in modo diverso e quantità diversa

Per misurare quanta luce viene emessa

EMETTENZA M — EMETTENZA M = quantità di flusso luminoso emesso da un'aureola elementare

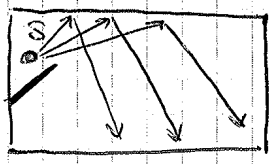
$$\boxed{M = \frac{d\Phi}{dS_{em}}}$$



$[M] = \frac{lm}{m^2}$ ⇒ lux sul bianco = $[lx_{sb}]$

Spesso uso i fenomeni di RIFLESSIONE per distribuire la LUCE

parte opaca →



S = sorgente che
produce la luce
riflessa da specchio
opaco e la luce illumina così gli ambienti → la luce arriva dal soffitto come se si accendesse

luce emessa da S e riflessa

→ Non è necessariamente la superficie che emette la luce ma anche una superficie che la riflette
→ ne posso calcolare l'EMETTENZA (per es. dei muri)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 328

Luminanza: grandezza importante x progetto illuminotecnico ambienti → il nostro occhio grazie alla luminanza posso capire quanto percepisce luminoso un ambiente e mediante la luminanza il mio occhio si "accomoda" a percepire la luce.
Come la macchina foto capisce per quanto tempo e per quanto (grandezza) deve mantenere il diaframma aperto, così il nostro occhio si "adatta" all'ambiente in cui si trova.
L'occhio ricevendo contributi da tutte le parti si "accomoda" sulla LUMINANZA MEDIA. Ma un ambiente luminoso la foto viene bene se però il sole arriva direttamente all'occhio l'immagine non viene bene poiché la media è alta → l'occhio perde i dettagli delle zone luminose e in ombra ⇒ ABBAGLIAMENTO se la sorgente luminosa è diretta ⇒ devo sapere la direzione luminosa [SOLE IN FACCIA]

BASE PROGETTAZIONE LUMINOSA ⇒ sapere come la luce è DISTRIBUITA.

Per esempio → lamelle nelle luci al NEON → riducono l'effetto dell'abbagliamento ma permettono al flusso luminoso di illuminare la stanza.

ILLUMINAMENTO E

OBIETTIVO PRIMARIO = far arrivare quantità di luce sufficiente a darmi una corretta percezione di ciò che sto facendo [x es. leggere o scrivere].

ILLUMINAMENTO → mi dice quanta energia arriva alla superficie

↳ quantità di flusso luminoso che raggiunge la superficie ricevente (elementare)
↓
in ogni punto il flusso ricevuto cambia

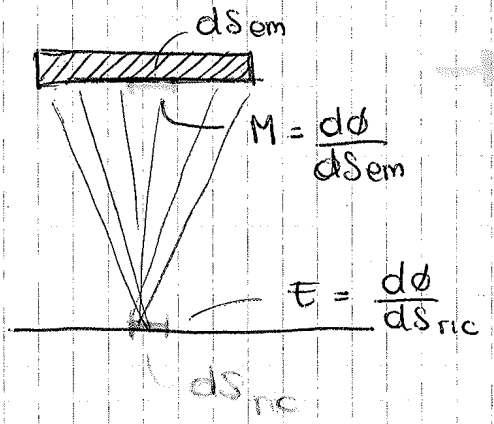
$$\boxed{E = \frac{d\phi}{dS_{ric}}}$$

$\left[\frac{lm}{m^2}\right] = lux$ [lx]

N.B. Anche se emettenza ha la stessa unità di misura ma $S_{em} \neq S_{ric}$!

↓

è la GRANDEZZA "BASE", il REQUISITO FONDAMENTALE su cui si basa il PROGETTO ILLUMINOTECNICO!



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 328

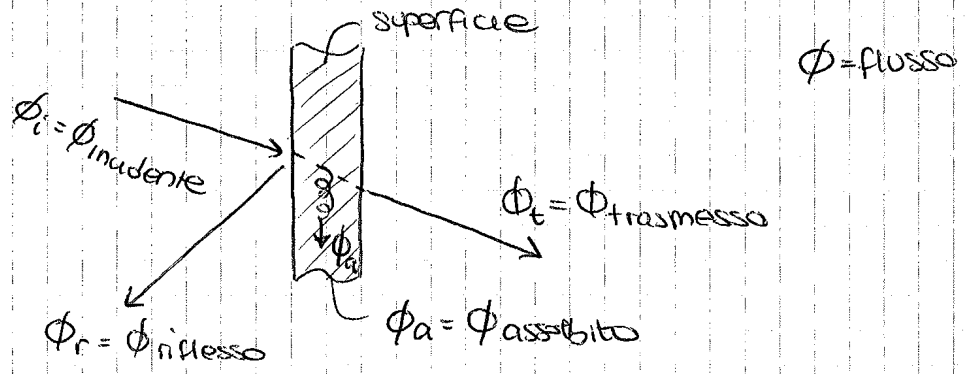
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 328

GRANDEZZE e CONCETTI

come la luce interagisce con l'oggetto solido

INTERAZIONE LUCE/SUPERFICIE

La luce emessa incontra / incide su una superficie solida



Flusso che incide la superficie solida in parte
- riflesso [o non vedrei l'oggetto e il suo colore]
- trasmesso
- assorbito

Vedo un oggetto e il suo colore perché esso assorbe e riemette (riflette) la luce

Parte della radiazione non riflessa né trasmessa è assorbita dall'oggetto e trasformata in calore

- RIFLESSIONE
- ASSORBIMENTO
- TRASMISSIONE

Anche questo fenomeno deve rispondere al PRINCIPIO di CONSERVAZIONE dell'ENERGIA

FLUSSO LUCE INCIDENTE = FLUSSO ASSORBITO + FLUSSO RIFLESSO + FLUSSO TRASMESSO

$$\boxed{\phi_i = \phi_a + \phi_r + \phi_t}$$

Divido i membri per ϕ_i

GRANDEZZE ADIMENSIONALI

$$\boxed{\frac{\cancel{\phi_i}}{\cancel{\phi_i}} = \underbrace{\left(\frac{\phi_a}{\phi_i}\right)}_{\alpha_e} + \underbrace{\left(\frac{\phi_r}{\phi_i}\right)}_{\rho_e} + \underbrace{\left(\frac{\phi_t}{\phi_i}\right)}_{\tau_e}}$$

$$\boxed{1 = \alpha_e + \rho_e + \tau_e}$$

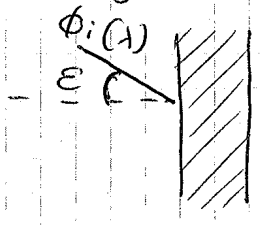
- Misurati in laboratorio: variano a seconda del colore della superficie

- α_e = coeff. di ASSORBIMENTO LUMINOSO $\left(0{,}38\,\mu m \leq \lambda \leq 0{,}78\,\mu m\right)$ → $\frac{\phi_a}{\phi_i}$
- ρ_e = coeff. di RIFLESSIONE LUMINOSA = $\frac{\phi_r}{\phi_i}$
- τ_e = coeff. di TRASMISSIONE LUMINOSA = ϕ_t / ϕ_i

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 328

α, ρ, τ → funzione della lunghezza d'onda (λ)
e
→ funzione dell'angolo di incidenza (ε)



$$\boxed{\alpha, \rho, \tau \Rightarrow f(\lambda, \varepsilon)}$$

funzione di

Nel vetro mi specchio solo per determinati ε, per $\varepsilon = 0$ non vedo la mia immagine

$\alpha(\lambda, \varepsilon), \rho(\lambda, \varepsilon), \tau(\lambda, \varepsilon)$ → coefficienti spettrali o monocromatici ($f(\lambda)$) e angolari ($f(\varepsilon)$)

$\alpha(\lambda), \rho(\lambda), \tau(\lambda)$ → valori spettrali o monocromatici ($f(\lambda)$) EMISFERICI (medi su tutte le direzioni (ε))

α, ρ, τ → coeff. integrali ($\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda$ o $\int_0^{\infty} d\lambda$)
EMISFERICI (non dipendono da ε

→ $\int_{0,38}^{0,78} d\lambda$ ⇒ LUMINOSI

↑ trasmissione del calore

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 328

$$M = \rho_e \cdot \frac{d\Phi_{inc}}{dS} = \rho_e \cdot E$$

$L = f(E) \rightarrow M = \rho_e E$

$\Rightarrow M = \pi L$

$$L = \frac{\rho_e E}{\pi}$$

solo se superfici lambertiane

CAPITOLO 3
ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE

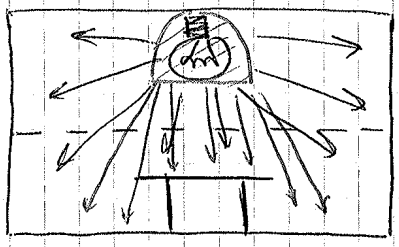
La sorgente luminosa non viene mai usata da sola ma usata all'interno di un complesso che prende il nome di LAMPADA o APPARECCHIO LUMINOSO

Le SORGENTI sono inserite in un sistema più complesso detto APPARECCHIO LUMINOSO

perchè? → carattere illuminotecnico
→ pratico

ASPETTO PRATICO
- Tutte le sorgenti sono alimentate elettricamente → sistema che collega alla rete e crea isolamento elettrico (per evitare shock)
- Gli apparecchi elettrici spesso sono pericolosi (problemi di scottatura) e le sorgenti sono calde → ISOLAMENTO MECCANICO per evitare che la sorgente sia toccata o rotta
- evitare che l'acqua entri a contatto con la sorgente e il circuito elettrico → PROTEZIONE (e non solo isolamento)

ASPETTO ILLUMINOTECNICO
Tipicamente in uno spazio io occupo e lavoro in uno spazio basso



Una lampadina diffonde luce in tutte le direzioni → SORGENTE MOLTO INEFFICACE
poichè energeticamente illumino parti che non mi interessa illuminare

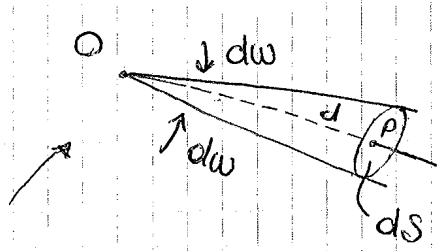
APPARECCHIO → aiuta a dirigere il flusso luminoso in modo che sia flusso utile e illumini le zone che mi interessano, all'interno posso avere superficie riflettente che concentra la luce riflettendola nella zona che desidero.
→ il flusso arrivi quindi nelle zone che mi servono

Modifico attraverso fenomeni di
- RIFLESSIONE
- RIFRAZIONE
- DIFFUSIONE

la luce e ragionare il flusso luminoso prodotto

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 328

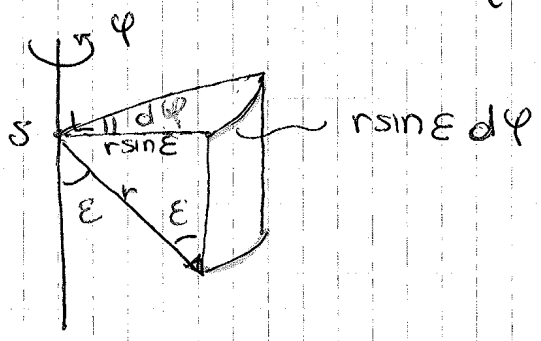
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 328

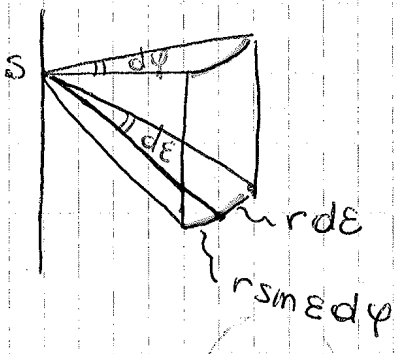


$$\boxed{d\omega = \frac{dS}{d^2}} \; [sr] \qquad \frac{\text{superficie di base}}{(\text{distanza})^2} = \text{angolo solido infinitesimo}$$

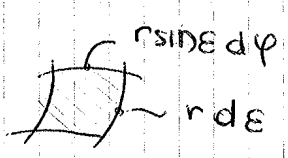
Immagino di prendere l'angolo solido e farlo ruotare attorno all'asse. [figura 1]

ruoto prima di $d\phi$ e poi di $d\varepsilon$

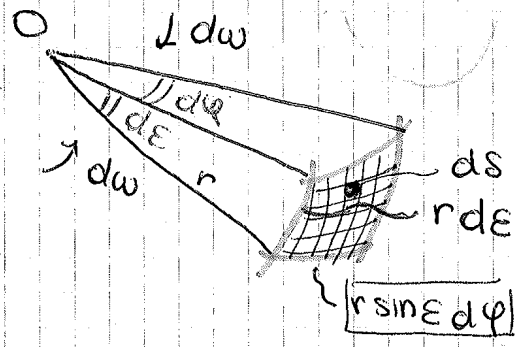




$$\boxed{d\omega = \sin\varepsilon \, d\varepsilon \, d\varphi}$$



$dS = r\sin\varepsilon d\varphi \cdot r d\varepsilon$



$$d\omega = \frac{dS}{r^2}$$

$$\boxed{d\omega = \frac{dS}{r^2} = \frac{(\cancel{r}\, d\varepsilon)(\cancel{r}\sin\varepsilon \, d\varphi)}{\cancel{r^2}}}$$

$I = I(\varepsilon, \varphi) \rightarrow$ <u>SUPERFICIE</u> : luogo geometrico dei vettori intensità luminosa

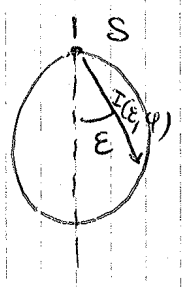
$z = f(x, y)$

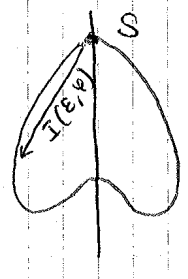
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 328

Spesso lavoro con 2 indicatrici di emissione

$\varphi = \varphi_1$ $\qquad\qquad$ $\varphi_2 = \varphi_1 + \pi/2$



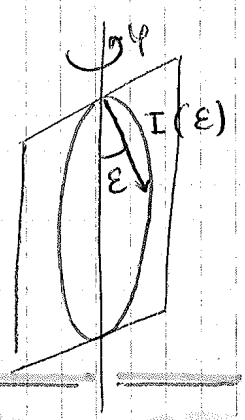


se il solido fotometrico è di rotazione, affronto un problema semplice poiché l'influenza dell'angolo φ sparisce

Se il solido fotometrico è di ROTAZIONE $\Rightarrow$ $I = I(\varepsilon)$

I è solo funzione di ε

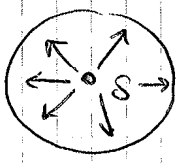
è SUFFICIENTE una sola indicatrice di emissione per caratterizzare compiutamente l'apparecchio.



CASO PARTICOLARE

$\Rightarrow$ SOLIDO FOTOMETRICO SFERICO

$\rightarrow$ come se sorgente al centro sfera



indica la direzione! uguale in ogni punto

$I = I_0 = cost$

equazione dell'INDICATRICE di emissione

$I = \dfrac{d\phi}{d\omega}$ $\qquad$ $y = ax$ eq. algebrica

eq. differenziale di 1° ordine, ordinaria a variabili separabili

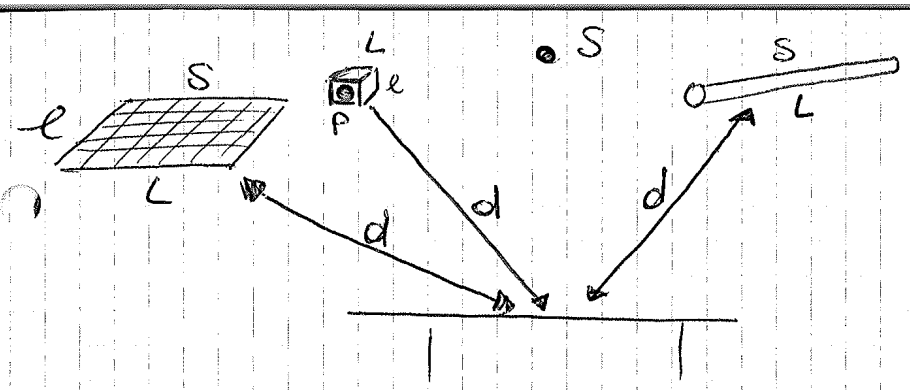
$d\phi = I\, d\omega \rightarrow \int_{\phi} d\phi = \int_{\Omega} I\, d\omega$ $\qquad$ $\Omega = 4\pi$ (angolo solido)

$$\boxed{\phi = \int_{4\pi} I\, d\omega}$$

ma poiché $I = I_0 = cost$ $\rightarrow$ $\boxed{\phi = I_0 \int_{4\pi} d\omega}$ $\rightarrow$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 328



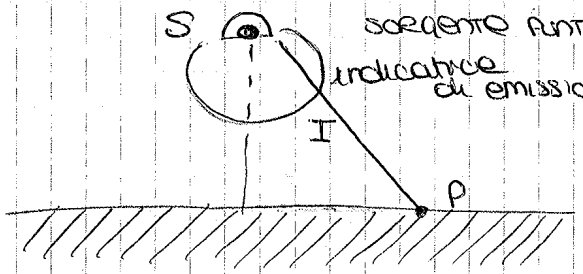
PROGETTO ILLUMINAZIONE NATURALE DI EDIFICI

9/10/2013

→ CALCOLO DI PROGETTO PRELIMINARE

Il problema si riduce a: quanto deve essere potente o grande la sorgente per garantire in tutti i punti della superficie illuminata un'illuminamento adeguato.

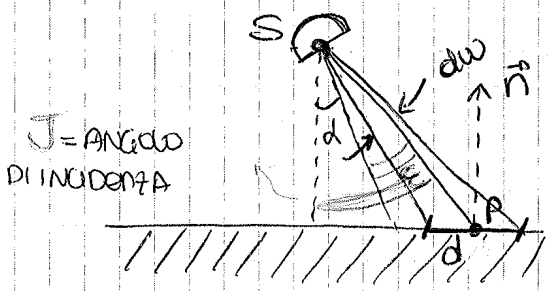
→ CALCOLO DELL'ILLUMINAMENTO SU UN PUNTO DI UNA SUPERFICIE dovuto ad una SORGENTE PUNTIFORME
↓
rappresenta spesso bene la realtà



vedere qual è in P il valore dell'illuminamento L
devo conoscere l'indicatrice di emissione di S e il valore di I lungo la direzione considerata.

ASSE lampada = inclinato di α rispetto alla verticale, prendo $P \in S$ generico con la normale $\vec{n}$ // verticale

→ OBIETTIVO → quanto vale L in P?



ANGOLO di INCIDENZA

J = ANGOLO DI EMISSIONE + ANGOLO DI INCLINAZIONE

(1) $\boxed{J = \varepsilon + \alpha}$

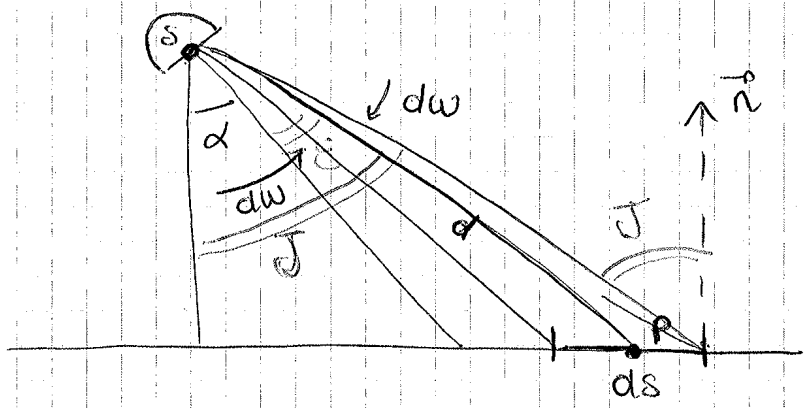
Individuo area dS attorno a P (area elementare) e vedere di tutto il flusso che finisce l'angolo solido quale intercetta la sup. dS

E_P = QUANTITÀ FLUSSO ELEMENTARE che incide su dS

(2) $\boxed{E_P = \frac{d\phi}{dS}}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 328



$\overline{SP} = d$

$$\boxed{\hat{J} = \hat{\alpha} + \hat{\varepsilon}}$$

$\hat{J}$ = angolo di incidenza

$\hat{\alpha}$ = angolo di inclinazione dell'asse della lampada

$\hat{\varepsilon}$ = angolo di emissione

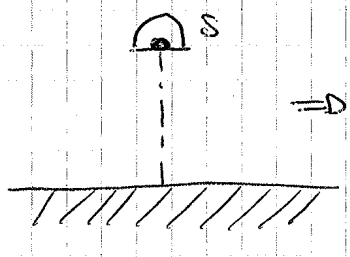
CASI

(1) Se l'indicatrice di emissione genera un solido fotometrico di ROTAZIONE $\Rightarrow I = I(\varepsilon)$

$$\boxed{E_p = \frac{I(\varepsilon)\cos J}{d^2}}$$

(2) Solido fotometrico di ROTAZIONE $\Rightarrow I = I(\varepsilon)$

$\perp$ asse della lampada verticale e sup. illuminata orizzontale



$\Rightarrow \hat{\alpha} = 0 \Rightarrow \boxed{\hat{J} = \hat{\varepsilon}}$

$$\boxed{E_p = \frac{I(\varepsilon)\cos\varepsilon}{d^2}}$$

$\Rightarrow$ Se guardo l'eq. generale $E_p = \dfrac{I(\varepsilon,\varphi)\cos J}{d^2}$

tutti e 3 gli elementi dell'eq. dipendono dalla posizione relativa punto-sorgente

In particolare $\cos J$ diminuisce e d aumenta all'allontanarmi dal piede della lampada

$\dfrac{\cos J}{d^2}$ diventa sempre più piccolo! $(d^2 > \cos J)$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 328

Rispettare il requisito di UNIFORMITÀ di ILLUMINAMENTO

a) $\boxed{U_o = \frac{E_{min}}{\bar{E}}}$ $\bar{E}$ = illuminamento medio sulla superficie

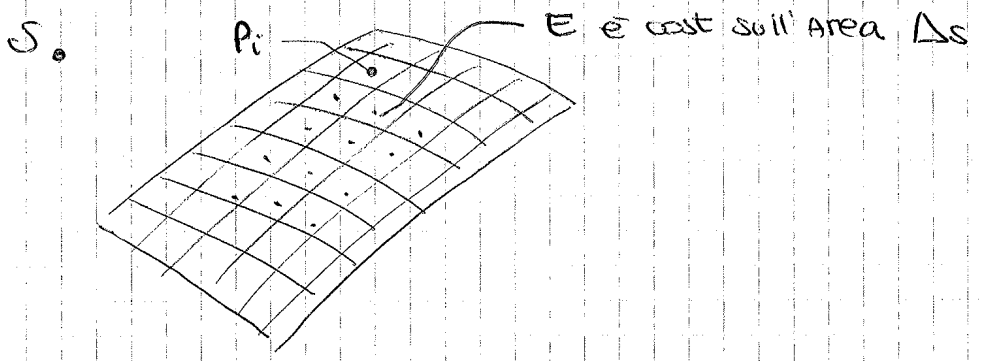
$\boxed{U_l = \frac{E_{MIN}}{E_{MAX}}}$ → adimensionale [-] $(0 \div 1)$

U_o = fattore di UNIFORMITÀ GENERALE

U_l = fattore di UNIFORMITÀ LONGITUDINALE

b) $\boxed{U_o > U_{o\,min}}$ e $\boxed{U_l > U_{l\,min}}$

Prendo la Sup. da illuminare e la divido in aree dS piccole in modo da poter considerare l'illuminamento costante



Calcolo su ogni area nel baricentro l'illuminamento E_i

$E_{P_i} \; \forall i \in 1-n$

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{N} E_i \Delta S_i}{S_{TOT}}$$

da prima so • $\bar{E} = \frac{\Phi_{sulla\ sup.}}{S_{sup}} = \frac{1}{S}\int_S E\,dS \simeq \frac{\sum E_i \Delta S_i}{S_{TOT}}$

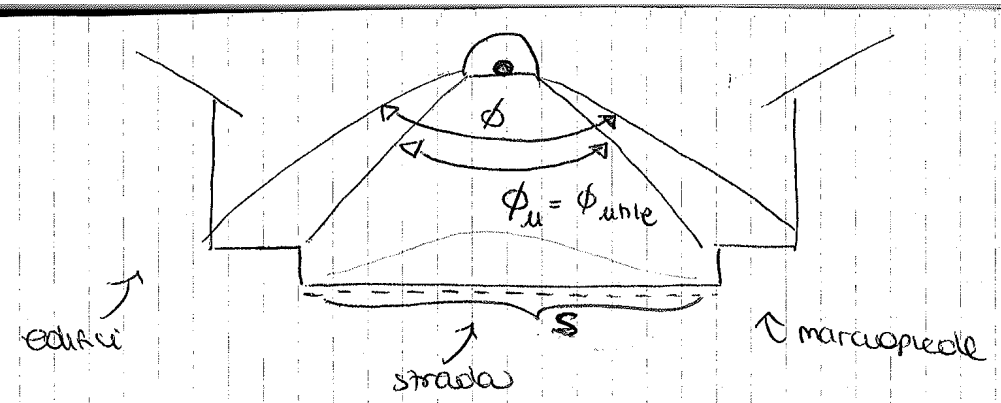
• $E_{P_{MIN}} = \min(E_{P_i})$ ⇒ VERIFICO SE $E_{P_{min}} > E_{min}$

• $E_{P_{MAX}} = Max(E_{P_i})$

⇒ $U_o = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$ ⇒ verifico se $> U_{o\,min}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 328



Non è detto che l'illuminamento sia dato solo da S, parte del flusso di S viene disperso e non riesco ad illuminare tutta la strada correttamente

ϕ = flusso totale

ϕ_u = flusso utile ⟹ parte di luce che viene utilizzata realmente

Per misurare la prestazione del sistema si utilizza il C_u

C_u = COEFFICIENTE DI UTILIZZAZIONE DEL FLUSSO

$\bar{E} = \frac{\phi_u}{S}$ $\quad \phi_u = \phi C_u$

$\bar{E} = \frac{\phi C_u}{S}$

$\phi = \frac{\bar{E} S}{C_u}$

$\phi = \frac{\bar{E} S}{C_u D \cdot M}$

$$\boxed{C_u = \frac{\phi_u}{\phi}} \quad [-] \quad (0 \div 1)$$

↳ faccio in modo che C_u sia il + grande possibile x usare la maggior parte del flusso emesso

⇓

$\phi_u = \phi C_u$ sostituendola dentro la definizione di $\bar{E}$

PRESTAZIONE PER IMPIANTO NUOVO!

$$\boxed{\bar{E} = \frac{\phi_u}{S} = \frac{C_u \phi}{S}} \Rightarrow \boxed{\bar{E} = \frac{C_u \phi}{S}} \Leftrightarrow \boxed{\phi = \frac{\bar{E} S}{C_u}}$$

Gli ingegneri introducono coeff. correttivi → le sorgenti invecchiano e tendono ad emettere meno luce nel tempo

↓

introduco 2 coeff.

$$\Rightarrow \boxed{\phi = \frac{\bar{E} \cdot S}{D M C_u}}$$

D = coeff. di DEPREZZAMENTO tiene conto del decremento della prestazione della sorgente

M = coeff. di MANUTENZIONE tiene conto del decremento della prestazione dell'apparecchio

$$\left\{ \begin{array}{ll} D < 1 & M < 1 \\ D \simeq 0{,}80 \div 0{,}90 & M \simeq 0{,}55 \div 0{,}80 \end{array} \right\}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 328

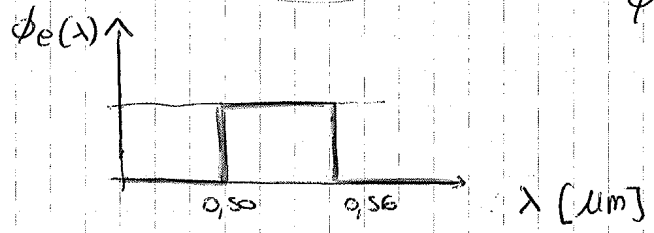
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 328

ES. 1.5.

Sorgente luminosa S che emette un flusso energetico pari a 50 W (ϕ_e) ha flusso costante fra $\lambda = 0.50\ \mu m$ e $\lambda = 0.56\ \mu m$ e 0 al di fuori - S.

$\phi_e = 50\ W$

$\phi_e = 50\ W$



Qual è il flusso luminoso e l'efficienza della sorgente?

$\phi = ?$ $\qquad$ $\eta_e = ?$

legame tra $\phi_e \to \phi$ passa da $V(\lambda)$ e K_{max}

$$\phi_e \to \underset{K_{max}}{V(\lambda)} \to \phi$$

$$\phi(\lambda) = \phi_e(\lambda)\, V(\lambda)\, K_{MAX}$$

$$\to \phi = \int_0^\infty \phi(\lambda)\, d\lambda = \int_0^\infty V(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, K_{max}\, d\lambda$$

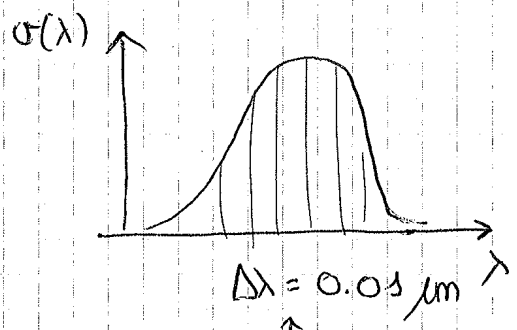
$V(\lambda) = \dfrac{K(\lambda)}{K_{max}}$

$K_{max} = 683\ \dfrac{lm}{W}$

$$\boxed{\phi = K_{max} \int_0^\infty V(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, d\lambda}$$

$V(\lambda)$ la conosco solo sperimentalmente $\to$ tabella pag 177

λ	$V(\lambda)$
0.50	0.503
0.51	0.503
0.52	0.710
...	



λ intervallati a $0.01\ \mu m$

Allora $\quad \phi = K_{max} \int_0^\infty V(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, d\lambda \simeq K_{max} \sum_0^\infty \left(V(\lambda)\, \phi_e(\lambda)\, \Delta\lambda \right)$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 328

$$* \quad A_i = \frac{[f(\lambda_1)+f(\lambda_2)]\cdot(\lambda_2-\lambda_1)}{2} = \frac{f(\lambda_1)+f(\lambda_2)}{2}\cdot\Delta\lambda$$

$$A_{TOT} = \sum A_i = \frac{f(\lambda_1)+f(\lambda_2)}{2}\Delta\lambda + \dots + \frac{f(\lambda_2)+f(\lambda_3)}{2}\Delta\lambda$$

Essendo $\phi_e = cost$ (problema) allora posso fuori dall' $\int$

$$\phi = K_{max}\,\phi_e(\lambda)\int_{0,50}^{0,56} v(\lambda)\,d\lambda$$

$$\Rightarrow \boxed{\phi = K_{max}\cdot\phi_e(\lambda)\cdot\underbrace{\sum_{0,50}^{0,56}\left(\frac{v(\lambda_{i+1})+v(\lambda_i)}{2}\Delta\lambda\right)}_{*}}$$

posso portarlo fuori perché in tabella è fisso $\Delta\lambda = 0,01\ \mu m$

$$\boxed{\phi_e(\lambda) = \frac{d\phi_e}{d\lambda}} = \frac{\phi_e}{\Delta\lambda} = \frac{50}{0,56-0,50} = 833,3\ \frac{W}{\mu m}$$

$$K_{max} = 683\ \frac{lm}{W}$$

$$K_{max}\cdot\phi_e(\lambda)\cdot\Delta\lambda\cdot\int_{0,50}^{0,56} v(\lambda)$$

$$\phi = 683\cdot 833,3\cdot\underbrace{0,01}_{\Delta\lambda}\cdot\left[\frac{\overset{\lambda=0,50}{0,323}+\overset{\lambda=0,51}{0,503}}{2} + \frac{0,503+\overset{0,51}{0,710}}{2} + \dots + \frac{\overset{\lambda=0,55}{0,995}+\overset{\lambda=0,56}{0,995}}{2}\right] = 833,3\cdot 683\cdot 0,01\cdot(0,413+0,6065+$$

$$+0,786+0,908+0,9745+0,995) = 26621\ lm$$

$$\boxed{\phi = 26'621\ lm}$$

$$\boxed{\eta_e} = \frac{K_{max}\int_0^\infty \phi_e(\lambda)\,v(\lambda)\,d\lambda}{\int_0^\infty \phi_e(\lambda)\,d\lambda} = \boxed{\frac{\phi}{\phi_e}}$$

$$\boxed{\eta_e = \frac{2'6621}{50} = 532,4\ \frac{lm}{W}}$$

[Oggi le sorgenti artificiali con efficienza maggiore possono arrivare a $300\ \frac{lm}{W}$]

- lampadina a incandescenza $\eta_e = 7 \div 10\ \frac{lm}{W}$
- lampadine alogena $\eta_e = 15 \div 20\ \frac{lm}{W}$
- lampadine fluorescente $\eta_e = 30 \div 50\ \frac{lm}{W}$
- lampade a vapori di sodio e mercurio $\eta_e = 150 \div 200\ \frac{lm}{W}$

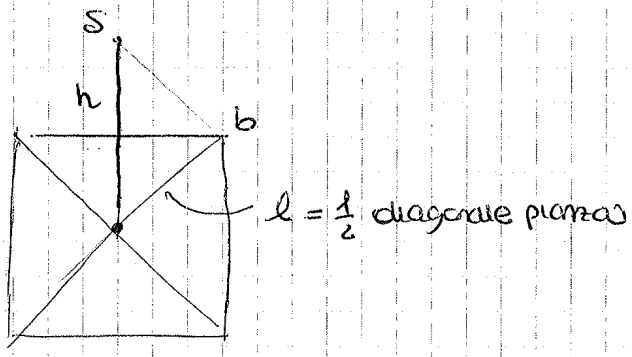
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 328

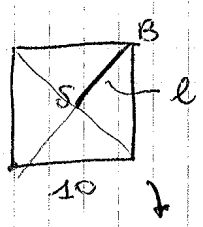
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 328

$$E_A = \frac{500(1+1)\cdot 1}{4^2} = \underline{\underline{62,5}} \text{ lux} \quad \left[\frac{lm}{m^2}\right]$$

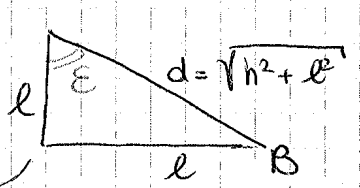
$\boxed{E_{min}}$

$E_{min} = E_B$





$$l = \frac{\sqrt{10^2+10^2}}{2} = 7,07 \text{ m}$$



$$d = \sqrt{4^2+7,07^2} = 8,12 \text{ m}$$

$$h = d\cos\varepsilon \Rightarrow \cos\varepsilon = \frac{h}{d} = \frac{4}{8,12} = 0,492 \rightarrow$$

$$\rightarrow \varepsilon = \text{arcsen}(0,492) \cong \underset{\sim}{60°}, 5'$$

$$E_B = \frac{500(1+\cos\varepsilon)\cos\varepsilon}{d^2} = \frac{500\cdot(1+0,492)\,0,492}{8,12^2} = \underline{\underline{5,56 \text{ lx}}}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} E_{min} = E_B = 5,56 \text{ lx} \\ E_{max} = E_A = 62,5 \text{ lx} \end{array}}$$

$$U_l = \frac{E_{min}}{E_{MAX}} = \frac{5,56}{62,5} = 0,09 \quad (9\%) \rightarrow \underline{\text{schifo}}!$$

<u>ES. 1.13</u> → RISULTATO ⇒ 809,3 lm = ϕ

<u>ES. 1.8</u>

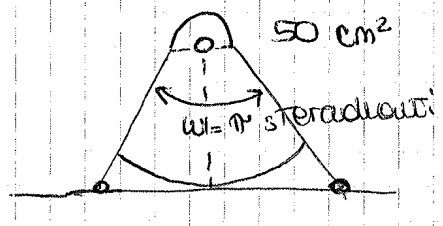
$S = S_{sog} = 50 \text{ cm}^2$ $\quad \phi = 250$ lm

emittenza

$M = ?$

$I = ?$

$L = ?$



Poiché $\phi = \text{cost}$ $\quad I = \frac{d\phi}{d\omega} = \frac{\phi}{\omega}$ $\quad (I = I_0 = \text{cost}$ entro $\omega)$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 328

Capitolo 4 ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE di INTERNI

REQUISITI dell'ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE di INTERNI

1. ILLUMINAMENTO E
   - UNIFORMITÀ di E (ILLUMINAMENTO)
2. CONTRASTO
3. ABBAGLIAMENTO
4. RESA del COLORE

(1) Vengono richiesti valori medi minimi e massimi di illuminamento E, questo dipende dal tipo di locale

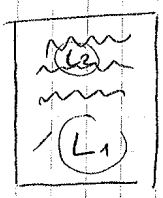
non sapere a memoria:
- UFFICI 500 lux di $\bar{E}$ (illuminamento medio)
- AULA da DISEGNO 750 lux
- SALA OPERATORIA 30'000 lux
- LOCALI A USO DOMESTICO 300 lux

- UNIFORMITÀ di ILLUMINAMENTO E

$$U_0 = \frac{E_{min}}{\bar{E}_{medio}} > 0,8$$

(2) FATTORE DI CONTRASTO

$$C = \frac{|L_2 - L_1|}{L_1}$$



L_1 = luminanza sfondo

L_2 = luminanza scritte

ho un limite, il contrasto non deve superare determinati valori

- FOGLIO e PIANO VALORE $C < 3$
- OGGETTO - AMBIENTE CIRCOSTANTE $C < 10$
- SORGENTE - SFONDO $C < 20$

(3) ABBAGLIAMENTO → SCONFORT

se la sorgente è troppo luminosa

ABBAGLIAMENTO → continuo / → momentaneo

Per evitare abbagliamento si prescrive che $L < 1'400 - 3000$ cd/m² (L: LUMINANZA; dipende dall'ambiente)

(4) RESA CROMATICA

1. Temperatura di colore T_c [K]
2. Tonalità di colore
3. Indice di Resa cromatica (CRI)
4. Resa del colore (R_a)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 328

entra in gioco M = FATTORE di MANUTENZIONE

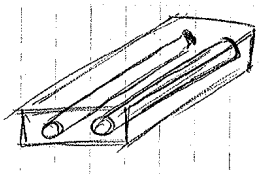
$\phi_{em} = \phi_{tot} \cdot D \cdot M$ D = deprezzamento ⟹ dato dal disfacimento del filo di tungsteno

$\boxed{C_u = \frac{\phi_u}{\phi_{em}}}$ → $\phi_{em} = \frac{\phi_u}{C_u}$ ϕ_{tot} = flusso totale

$\frac{\phi_u}{C_u} = \phi_{tot} \cdot D \cdot M$ $\phi_{tot} = \frac{\phi_u}{C_u \cdot D \cdot M}$

$\boxed{\phi_{tot} = \frac{E \cdot S}{C_u \cdot D \cdot M}}$ FLUSSO TOTALE

→ mediante questo passo calcoliamo quante lampade servono per illuminare un ambiente



$\boxed{\phi_{app} = \phi_s \cdot n_s}$

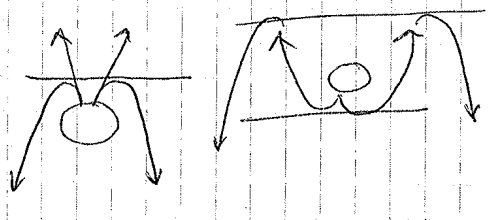
ϕ_{app} → flusso apparecchio; ϕ_s → flusso sorgente; n_s → numero di sorgenti

ϕ_{tot} = n° apparecchi × flusso emesso da ogni apparecchio

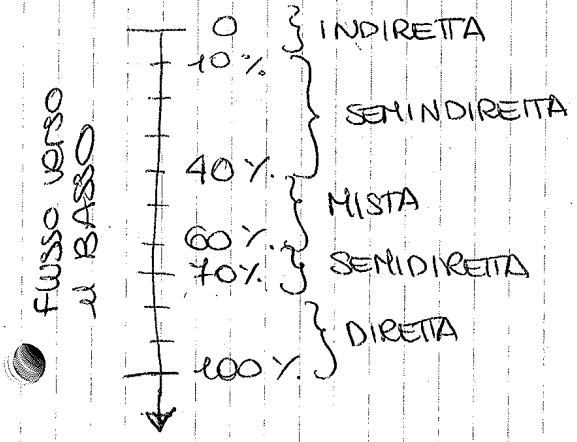
$\boxed{n_{app} = \frac{\phi_t}{\phi_{app}}}$ → APPROSSIMO per ECCESSO [EFFICIENZA LUMINOSA APPARECCHIO

TIPO APPARECCHIO

C_u → tipo di apparecchio
→ colore pareti → ρ
→ geometrie locali → indice del locale i (classe che varia da A ÷ H)



apparecchi che riflettono verso il basso o l'alto

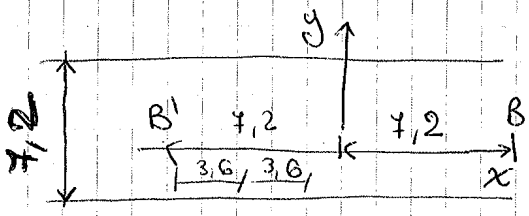


0 ÷ 10	indiretta
10 ÷ 40	semindiretta
40 ÷ 60	Mista
60 ÷ 70	semidiretta
70 ÷ 100	diretta

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 328

1



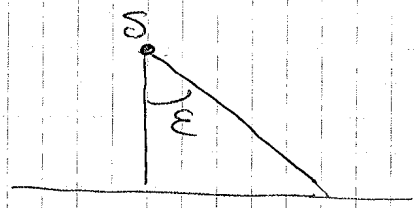
$h = 6{,}4$ m

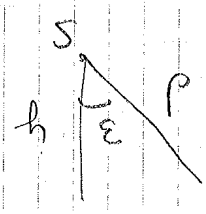
Decido P arbitrariamente fino ad arrivare a 3,6 (distanza media AB)

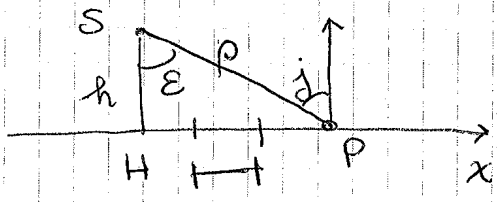
$$\boxed{I = I_0(1+\cos\varepsilon)}$$

$I_0 = 1200 + (N+C)\cdot 5$

N = nome
C = cognome







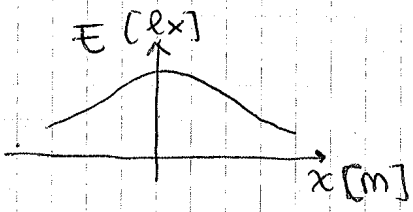
$\rho = h\cos\varepsilon$

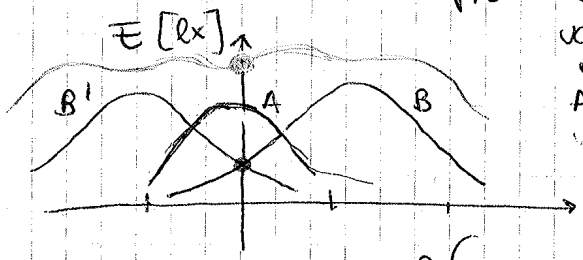
$E_P = \dfrac{I(\varepsilon)\cos\varepsilon}{\rho^2}$ → distanza

$\cos\varepsilon = \dfrac{h}{\rho}$

$\rho = \sqrt{h^2 + \overline{HP}^2} = \sqrt{h^2 + x_i^2 + y_j^2}$

2



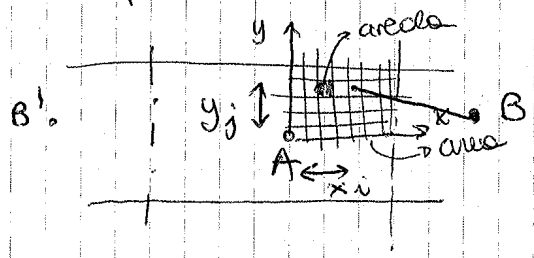


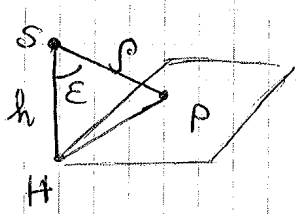
valori della somma delle sorgenti A, B e B'

valori della somma di A, B e C

$P_{ij} = (x_i, y_j)$

3 Divido l'area in aree più piccole → calcolo l'illuminamento E in ogni area e poi faccio la media





x_i, y_j = coordinate su x, y di P.

$\cos\varepsilon = \dfrac{h}{\rho}$

$\rho = \sqrt{h^2 + \overline{HP}^2}$

$\rho = \sqrt{h^2 + x_i^2 + y_j^2}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 328

(9) $\boxed{E_{el} = \phi_e \cdot \tau}$ ⇒ x 1 lampione

ϕ_e: flusso energetico; τ: numero di ore

$\phi = \int \phi_e(\lambda)\, d\lambda\, k(\lambda)$

$\tau = 3'650\ h$

E_{el}: J → secondi, Wh → ore } τ

J/Wh: Joule, Watt/ora

ϕ → flusso luminoso per 1 lampione

$\eta = \frac{\phi}{\phi_e}$ $\quad \phi_e = \frac{\phi}{\eta}$ → scegliamo noi il valore della luminescenza e incandescenza ⇒ scelgo io η

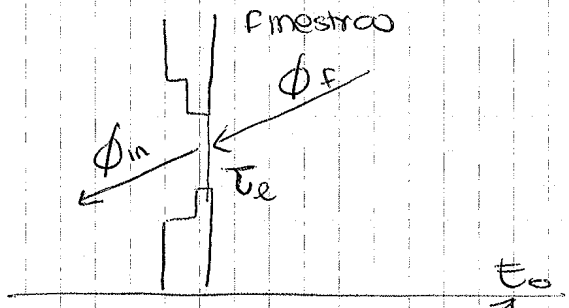
$\phi_{e,1km} = n^\circ_{lamp.} \cdot \phi_e$ $\quad$ KWh

$$E_{el} = n^\circ_{lamp.} \cdot \frac{\phi}{\eta} \cdot \tau \cdot 10^{-3}\ [kWh]$$

↳ $E_{el} = \phi_{e,1km} \cdot \tau$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 328



ϕ_f = flusso luminoso che entra dalla finestra

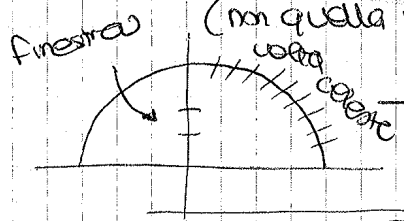
Flusso luminoso entrante dalla finestra

$$\boxed{\phi_f = E_f \cdot A_v}$$

A_v ← area finestra (parte vetrata)

E_f ← illuminamento esterno riferito al PIANO VERTICALE (non quella verticale E_o!)

[infatti $\phi = \int I \, d\omega$ → $\phi = E \cdot S$]



→ considero solo metà volta celeste!

$$\boxed{F = 0{,}5}$$

ILLUMINAMENTO FINESTRA

$$\boxed{E_f = E_o \cdot F}$$

E_o → esterno

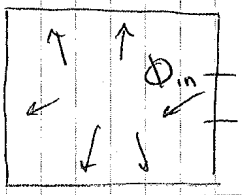
F ← FATTORE FINESTRA (dipende dalla finestra)

$$\boxed{\begin{aligned} E_f &= E_o \cdot F \\ \phi_f &= E_f \cdot A_v \\ \phi_{in} &= \phi_f \cdot \tau_e \end{aligned}}$$

$$\boxed{\phi_{in} = \tau_e \cdot A_v \cdot F \cdot E_o}$$

ϕ_{in} → FLUSSO INTERNO; A_v → AREA FINESTRA; F → FATTORE FINESTRA; E_o → ILLUMINAMENTO ESTERNO

FLUSSO USCENTE



Nell'area considero anche la finestra!

$E_{i,m}$ = illuminamento medio interno

A_{tot} = area pareti interne (considero la finestra)

$$\boxed{\phi_{out} = E_{i,m} \cdot A_{tot} \cdot \alpha_{e,m}}$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

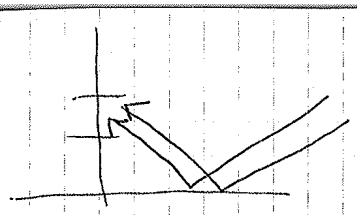
$\tau = 0$ se parlo di componenti delle quali non passa la luce (pareti)

$$\alpha + \rho = 1 \Rightarrow \boxed{\alpha = 1 - \rho}$$

$$\boxed{\phi_{out} = E_{i,m} \cdot A_{tot} (1 - \rho_{e,m})}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 328

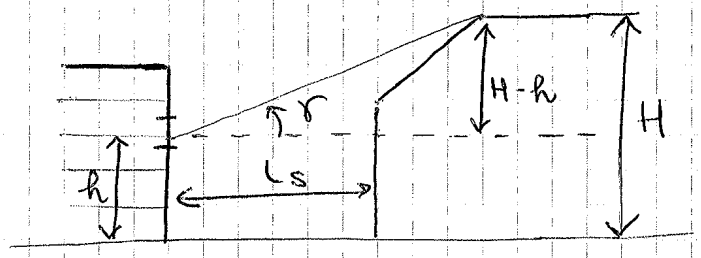
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 328



$$1-F = \frac{1-\cos(\varepsilon+\gamma)}{2}$$

$$\boxed{F = \frac{1+\cos(\varepsilon+\gamma)}{2} + \rho_t \frac{1-\cos(\varepsilon+\gamma)}{2}}$$

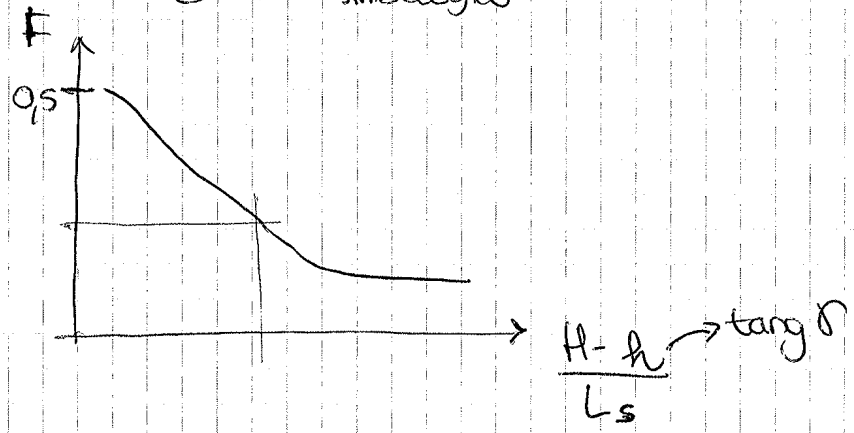
ρ_t = coefficiente di riflessione del terreno



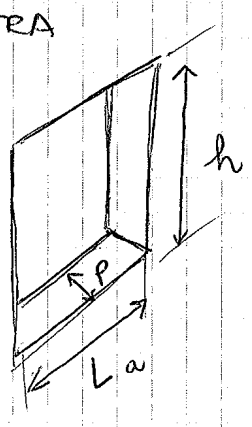
h = altezza "media" finestra

Ls = larghezza strada

$\varepsilon = F$ simbologia

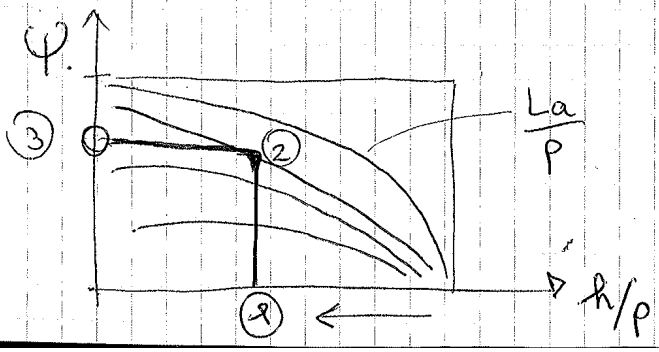


FINESTRA



p = profondità

La = larghezza
p = profondità
h = altezza



PS)

$\boxed{\psi = \text{fattore di riduzione del fattore finestra}}$

1. calcolo h/p
2. interseca la curva
3. leggo ψ

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 328

ACUSTICA III PARTE

22/10/2013

Fenomeno che determina SENSAZIONI → sensibile all'uomo
↘ percezione umana

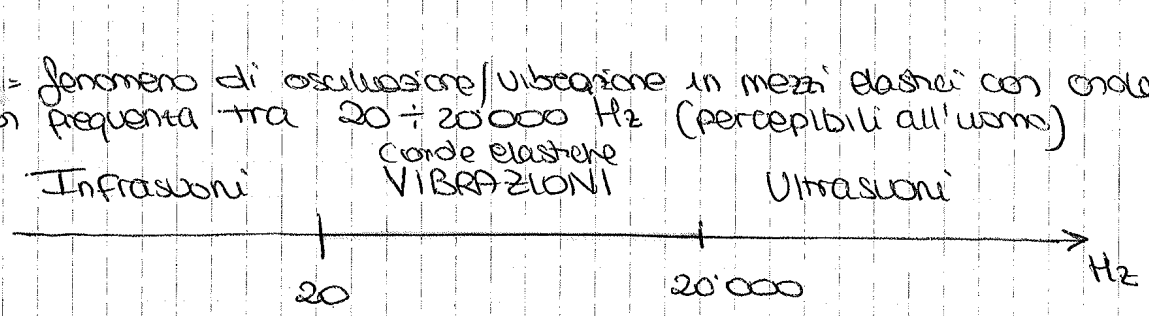
sottoinsieme degli STUDI delle OSCILLAZIONI (VIBRAZIONI)

Studio della loro propagazione nei mezzi ELASTICI (così come la luce generazione e propag. onde elettromagn.)

lo chiamo VIBRAZIONE → se PERCEPITA
OSCILLAZIONE → non percepito

ORECCHIO = sensore x captare oscillazioni è sensibile a oscillazioni con frequenza compresa tra circa $\boxed{20 \div 20'000 \text{ Hz}}$
↑ in mezzi ELASTICI

ACUSTICA = fenomeno di oscillazione/vibrazione in mezzi elastici con onde con frequenza tra 20 ÷ 20'000 Hz (percepibili all'uomo)



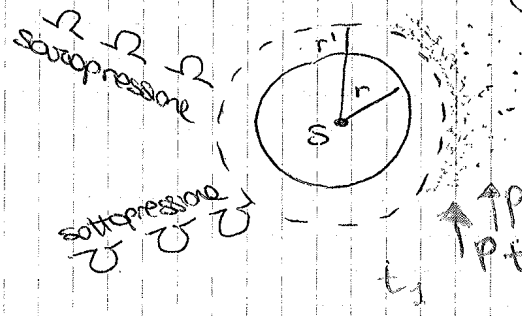
- Abbina la FISICA alla FISIOLOGIA (percezione umana)
- Stabilito su "esperimenti" sull'uomo
  LEGGI DETERMINISTICHE ↔ RISULTATO INDAGINE EPIDEMIOLOGICA (STATISTICA sull'uomo)

Come si genera oscillazione?

Vibrazione oggetto solido (SORGENTE SONORA)

Circonferenza

faccio variare il raggio da r a r' (r' > r)



I primi strati di aria vengono schiacciati, compressi
→ la pressione in questo strato cresce per ESPANSIONE RAPIDA della sfera, l'aria non ha tempo di spingere subito l'aria attorno (per un secondo) poi l'aria torna (poiché è un mezzo elastico) nel suo stato originario, lo strato adiacente invece aumenta la pressione

$t_1 < t_2$

PERTURBAZIONE NEL MEZZO ELASTICO CHE SI PROPAGA RADIALMENTE ALLONTANANDOSI

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 328

ONDA di PRESSIONE / ONDA PERTURBAZIONE di PRESSIONE

$\Delta p(t) = p(t) - P_{a0}$ → pressione atmosferica

[Pa]

↳ 1 atm = 101'325 Pa (10^5 Pa)

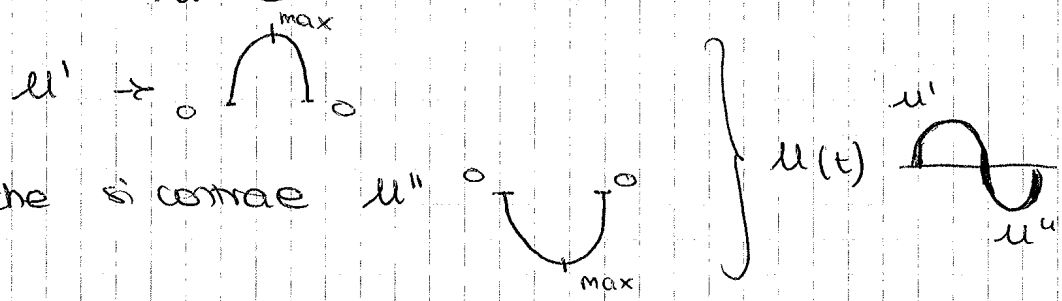
Se analizzo i segnali acustici $\Delta p(t)$ è una quantità piccolissima e provoca la sensazione di rumore, bastano piccole variazioni di pressione

$$10^{-5}\ Pa < \Delta p(t) < 10\ Pa$$

A 1000 Hz, con $20\ Pa = \Delta p(t)$ ⇒ SOGLIA del DOLORE

Altra perturbazione

- sfera che si espande spinge le molecole verso l'esterno ad una certa velocità u', inizialmente $u' = 0$ poi cresce, quando la sfera si ferma $u' = 0$



PERTURBAZIONE di VELOCITÀ ⇒ particelle di aria oscillano attorno al loro punto di equilibrio se la sfera si muove sinusoidalmente anche le particelle si muovono sinusoidalmente

1. ONDA di PRESSIONE : $\boxed{\Delta p(t)}$
2. ONDA di VELOCITÀ o di OSCILLAZIONE : $\boxed{u(t)}$ → N.B Non è la velocità vera e propria ma velocità di vibrazione

La velocità di PROPAGAZIONE ≠ velocità di OSCILLAZIONE

↓ È l'onda che si PROPAGA

↓ particelle che si muovono

VELOCITÀ di PROPAGAZIONE = velocità di propagazione dell'onda sonora SUONO

c

↓

determinata analiticamente

VELOCITÀ di PROPAGAZIONE del SUONO c

- MEZZI ELASTICI IDEALI, OMOGENEI e UNIFORMI

LIQUIDI SOLIDI

$$\boxed{c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}} \quad [m/s]$$

[Pa] (K) = modulo di compressione elastica del materiale

[kg/m³] (ρ) = densità (massa volumica) del mezzo

Ci dice a seconda del mezzo che la velocità con cui il suono si propaga è diversa.

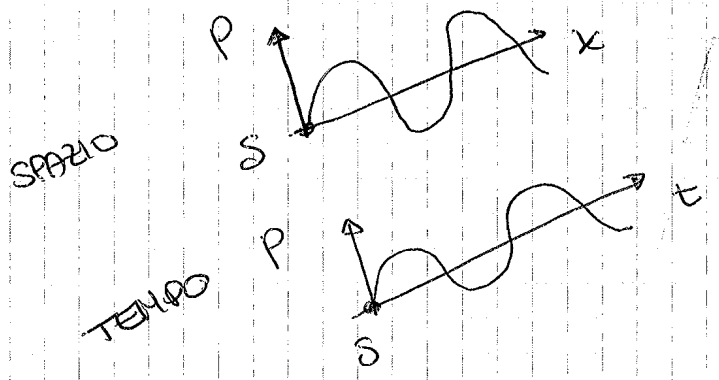
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 328

Studio come ONDA ELASTICA

→ ONDE ELASTICHE

Onda di perturbazione di velocità IN FUNZIONE di → x (spazio) → t (tempo)



Vorrei sapere quanto vale $\Delta p(t, x)$ (→ valore di perturbazione sonora) per un punto P in un certo istante t.

CONOSCENZA del CAMPO di una GRANDEZZA → a seconda di t e x
→ valore delle variabili di un fenomeno in uno spazio in un istante
CAMPO è descritto come derivate parziali $\left[\text{tipo } \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial f}{\partial z} = k\frac{\partial f}{\partial t}\right]$

Studio il CAMPO SONORO = insieme delle perturbazioni nello spazio e nel tempo.

$$\nabla^2(\Delta p(t)) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2(\Delta p(t))}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2(u(t)) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2}$$

EQUAZIONE DIFFERENZIALE dell'ONDA ACUSTICA o SONORA

Saprei dire per ogni punto l'onda di oscillazione e perturbazione

→ Per trovare la soluzione esistono casi semplici

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 328

- CAMPO LIBERO ⇒ negli spazi aperti
- CAMPO di RIVERBERO ⇒ spazi confinati/semiconfinati (interno o ostacoli)

- CAMPO LIBERO

La soluzione delle 2 eq. differenziali danno una soluzione del tipo...

Δp → dipende da x, solo dalla distanza

$$\boxed{\Delta p = \Delta P_{max} \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right]}$$

ONDA di PRESSIONE

valore max di perturbazione sonora

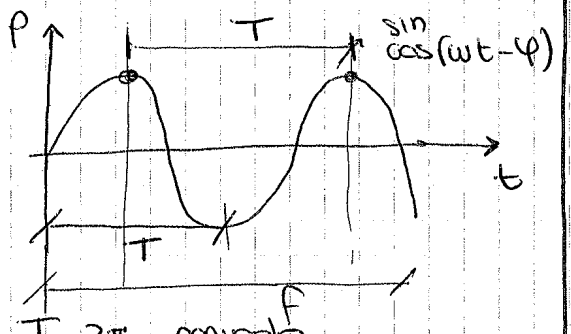
- t = tempo
- x = distanza P-S
- c = velocità propagazione del suono
- ω = pulsazione dell'oscillazione (armonica)

caratteristica dei fenomeni armonici

$\boxed{\omega = 2\pi f}$

f = frequenza
T = periodo

RIPASSO FENOMENI ARMONICI

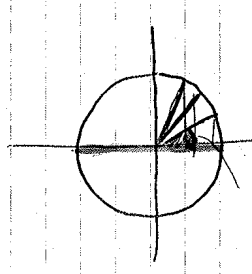


- $T = 2\pi$ periodo
  ↳ ogni 2π i valori di f si ripetono

i due massimi si ripetono ogni periodo di tempo = T [s]

- f = n° di onde (oscillazioni) nell'unità di tempo $f = \frac{1}{T}$ [Hz]
- $\omega = 2\pi f$
  oppure
- $\omega = \frac{2\pi}{T}$ = velocità angolare

] VELOCITÀ con cui si genera il fenomeno



vettore che ruota attorno all'origine la sua proiezione sull'asse x o y è un punto che si muove avanti e indietro sull'asse delle ascisse

ωt = angolo

Nel campo libero il risultato è un SEGNALE ARMONICO di PRESSIONE
→ funzione sinusoidale in cui compare ω, c, x, t.

Allo stesso modo

$$\boxed{u(t) = \frac{\Delta P_{max}}{\rho c} \cdot \cos\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right]} \rightarrow u(t) = \frac{\Delta p}{\rho c}$$

ρc = impedenza ACUSTICA del MEZZO ELASTICO $\left[\frac{kg}{m^2 s}\right]$
ρ = densità del mezzo elastico [Aria a T=20°C P=1 atm

↳ $\rho c = 413 \frac{kg}{m^2 s}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 328

23/10/2013

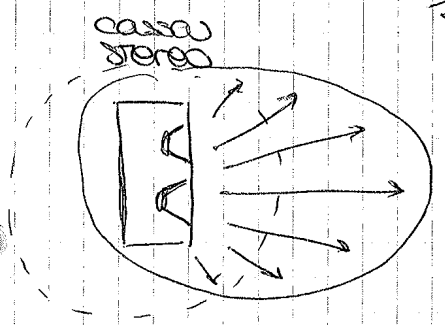
(1) $\Delta p = \rho C u(t)$

GRANDEZZE

- POTENZA SONORA = potenza emessa dalla sorgente
  W [W]

Δp è molto piccolo $20 \div 2$
Nei fenomeni reali la potenza W è molto bassa, anche le sorgenti che emettono tanto rumore

qualche 10 millesimo di Watt a qualche Watt
$10^{-4} \div 1$ W

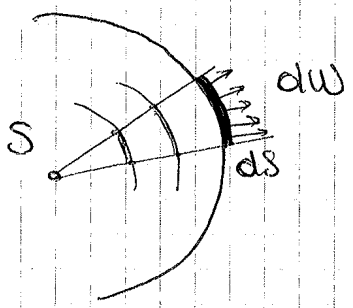


non emette uniformemente ma in maniera percettiva lungo certe direzioni, mi interessa che il suono sia emesso anteriormente
⇒ come le S luminose vanno nelle direzioni

- INTENSITÀ SONORA = come W viene emessa nelle direzioni dello spazio

dW → potenza infinitesima

→ dW distribuita sulla superficie dS del fronte d'onda



se cambio il fronte d'onda dS cambia → cambia dW

$$\boxed{I = \frac{dW}{dS}} \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

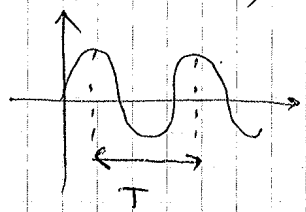
dS = superficie infinitesima del fronte d'onda

Dimostro che I si può misurare in funzione di $\Delta p(t)$ e $u(t)$

$$I = f(\Delta p(t), u(t))$$

$$\boxed{I = \frac{1}{T}\int_0^T \Delta p(t)\, u(t)\, dt}$$

Il segnale è stazionario nel periodo con unica frequenza (tipo pendolo)



T = periodo di un'oscillazione
τ = t = tempo

dalla (1)

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T \Delta p(t)\, \frac{\Delta p(t)}{\rho C}\, dt = \frac{1}{\rho C}\left[\frac{1}{T}\int_0^T \Delta p^2(t)\, dt\right] = I$$

ρC → costante

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 328

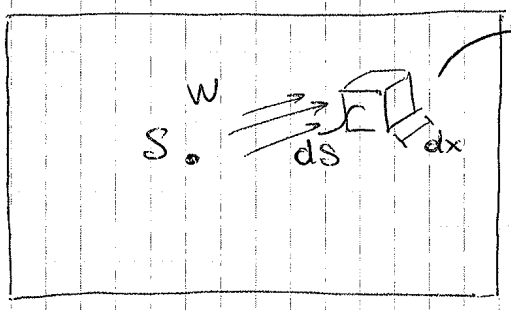
② $\boxed{I = \frac{p^2}{\rho C}}$ $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ • INTENSITÀ SONORA

Se conosco punto per punto l'intensità sonora posso scrivere

$$I = \frac{dW}{dS} \rightarrow \boxed{W = \int_S I\,dS}$$

• DENSITÀ di ENERGIA SONORA U

Sorgente S che emette nello spazio, se isolo un cubo di lato dS di lati dx, posso immaginare che per $\forall t$ (istante) dentro al cubetto ho un'energia acustica a causa dell'emissione di S, so che $\boxed{dE = W\,dt}$



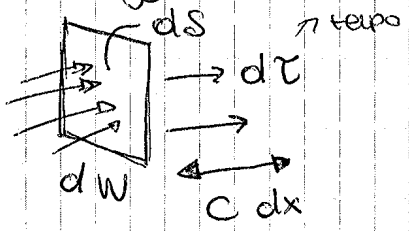
dE = ENERGIA ACUSTICA

Nel tempo dt l'intensità sonora I riempie il cubetto con energia acustica dE

$$dE = W\,dt \qquad W = \frac{dE}{dt}\ [J/s] \rightarrow [W]$$

$$\boxed{U = \frac{dE}{dV}} \quad \left[\frac{J}{m^3}\right] \qquad dV = \text{volume infinitesimale}$$

Nel tempo dt viaggiando a velocità pari a spazio percorso lo spazio sonoro?



$$dV = dS \cdot dx = dS \cdot \underbrace{C \cdot dt}_{dx}$$

sostituendo

$$U = \frac{dE}{dV} = \frac{dW\,dt}{dS\,C\,dt} = \frac{I}{C}$$

($dW\,dt \rightarrow d^2E$; $dS\,C\,dt \rightarrow d^2V$; $I \rightarrow \frac{dW}{dS}$)

[• assenza di onda riflessa
• monofrequenza
• onda piana] $\Rightarrow$ $\boxed{U = \frac{I}{C} = \frac{p^2}{\rho C^2}}$ ②

un ambiente esterno

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 328

1] PRIME BANDE CONFRONTABILI : BANDE di OTTAVA

$$f_2 = 2 f_1$$

$$f_1 = \frac{1}{2} f_2$$

$$f_c = \sqrt{f_2 \cdot f_1}$$

frequenza centrale della banda

frequenza superiore = 2 volte frequenza inferiore

→ ampiezza di banda cambia! perché ho una suddivisione che non ha la stessa frequenza in una banda, ma la STESSA ENERGIA nella BANDA

2] BANDE di N-ESIME di OTTAVA

Bande minori, informazioni più accurate

$$f_2 = 2^{1/n} f_1$$

• bande in terza di ottava ($n=3$)

- Ampiezza banda più piccola (affetto in modo + sottile la funzione)
- Ripeto + volte i calcoli

Grazie alle bande di ottava ho relazioni + semplici

ACUSTICA FISIOLOGICA - capitolo 2

(1) OREECHIO UMANO sensibile a VIBRAZIONI 20 ÷ 20'000 Hz
↳ sensibilità non costante!

(2) Come per l'occhio la sensibilità dell'orecchio è funzione della FREQUENZA

3'000 ÷ 4'000 Hz (campo dove l'orecchio è + sensibile)

↳ molto importante se ho 2 sorgenti che emettono entrambe 1 W, la macchina A le emette tra 50 ÷ 60 Hz, la macchina B tra 3'000 a 4'000 Hz
la macchina A non è fastidiosa quanto la macchina B!

| diversa SENSAZIONE = STESSA POTENZA, FREQUENZA DIVERSA |

(3) Sono a $f = 1'000$ Hz

la minima pressione efficace in grado di generare una sensazione sonora è di

$$20\ \mu Pa = 20 \cdot 10^{-6}\ Pa = 2 \cdot 10^{-5}\ Pa$$

20 Pa → SOGLIA del DOLORE a 1'000 Hz

20 μPa → SOGLIA di UDIBILITÀ a 1'000 Hz

valore convenzionale ma vicino alla soglia di frequenza di sensibilità dell'orecchio umano.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 328

In acustica si lavora non tanto sulle grandezze fisiche, ma sui loro livelli (3 livelli):

1. $L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0}$
   ↳ livello di pressione sonora

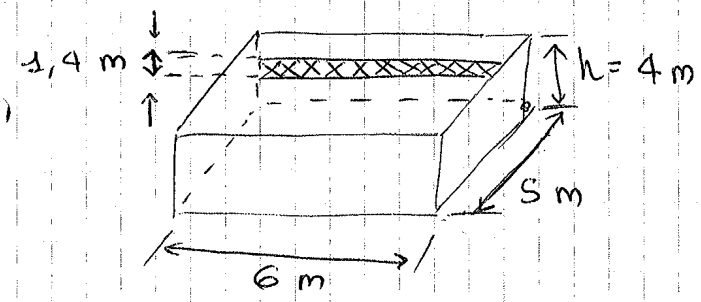
2. $L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$
   ↳ livello di intensità sonora

3. $L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}$
   ↳ livello di potenza sonora

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 328

ES. 1.18



Nastro ad altezza 1,4 m

$\rho_{pavr} = 0,7$ $\rho_{pav} = 0,6$ $\rho_{vetro} = 0,3$

$\tau_v = 0,6$

$FLD_m = ?$

⇒ devo calcolare l'illuminamento interno riferito all'illuminamento esterno su un piano orizzontale!

⇒ La finestra mi garantisce illuminamento solo se ho luce esterna! ⇒ posso calcolare l'illuminamento interno che dipende dall'illuminamento esterno!
↓
di notte all'interno è zero

DOMANDA ESAME

Il fattore di luce diurna medio dipende dall'esterno?

NO! Introduco questo fattore proprio perché **NON** sia dipendente da E_0!

$$FLD_m = \frac{\overline{E}}{E_0} = \frac{a\cancel{E_0}}{\cancel{E_0}} \qquad FLD_m = \overline{E} \cdot a$$

⇓

INDIPENDENTE da E_0

nastro — dipende dalla posizione finestra

$$FLD_m = \frac{\overline{E}}{E_0} = \frac{\tau_v \cdot A_v \cdot F}{(1-\rho_m) \cdot S} = \frac{0,6 \cdot (1,4 \cdot 6) \cdot 0,5}{(1 \cdot \quad) \underbrace{[2(5 \cdot 6) + 2(5+6) \cdot 4]}_{148\ m^2}}$$

mi permette di caratterizzare il legame tra esterno e interno

superficie ambiente (anche vetro)

F = rappresenta la porzione di volta celeste che vedo dalla finestra

$\varepsilon\varphi$ ⇒ F
- Tutta la volta $F = 1$
- semisfera $F = 0,5$
- oppure inclinata di 45° calcolo il coseno

Superficie parallelepipedo $= 2(a \cdot b) + 2(a+b) \cdot h = S = 148\ m^2$

ρ_m = media pesata!

$$\rho_m = \frac{\sum \rho_i S_i}{S} = \frac{0,6(5 \times 6) + [2[5 \cdot 6] \cdot 4 - 8,4]}{148} \ldots$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 328

3 apparecchi = illuminazione diretta

$W_{TOT\,el} = 200\,W$ $\qquad \bar{\rho}_{par} = 50\%$

$\bar{\rho}_{soff} = 75\%$

$\eta_{app} = 75\%$

$\eta_e = 45\ \frac{lm}{W}$

a) ϕ_{TOT}, ϕ_u

b) $\bar{E}$ sul piano utile e verificare se è a norma

a)

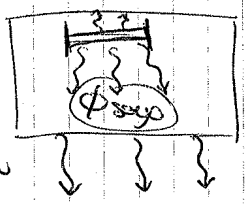
1) $\eta_{app} = \frac{\phi_{TOT}}{\phi_{sogo}}$ $\qquad \eta_e = \frac{\phi_{sogo}}{W_{el}} \left[\frac{lm}{W}\right]$

$\phi_{sogo} = \eta_e \cdot W_{el} = 45 \cdot 200$

$\phi_{sogo} = 9000\ lm$

Lavorando l'ambiente ho il flusso dell'apparecchio

$\phi_{TOT} = \eta_{app} \cdot \phi_{sogo} = 0{,}75 \cdot 9000 = 6750\ lm$



2) Mi interessa quello che arriva sia per emissione diretta che per riflessione

$\Rightarrow$ ricorro al COEFFICIENTE di UTILIZZAZIONE C_u

$C_u = \frac{\phi_u}{\phi_{TOT}}$ $\quad$ → flusso sul piano utile → flusso apparecchi

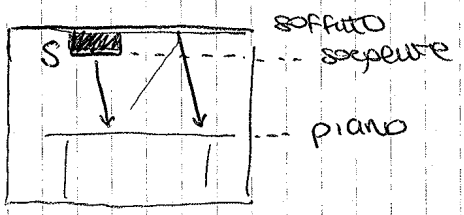
$\Rightarrow \boxed{\phi_u = C_u \cdot \phi_{TOT}}$

$C_u = f(\text{geometria problema}, \bar{\rho}_{pareti}, \bar{\rho}_{soffitto}, \text{tipo illuminazione})$

↳ i

diretta / mista / semidiretta / semindiretta / indiretta

⇒ [Illuminazione diretta = distanza = SORGENTE - PIANO
Illuminazione indiretta = distanza = SOFFITTO - PIANO



Determino C_u $\qquad$ PAG 210 - 208

1) LOCALE CLASSE D

2) $\boxed{C_u = 0{,}50}$ dalla tabella

$i = \frac{5 \times 4}{1{,}80\,(5+4)} = 1{,}23$

distanza parete - piano utile

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 328

LIVELLI

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0} = 20 \log \frac{p}{p_0}$$

P = livello di pressione sonora

p_0 = pressione sonora di riferimento

$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa $= 20$ μPa

↳ SOGLIA di UDIBILITÀ a 1000 Hz

28/10/2013

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$$I_0 = 10^{-12} \, W/m^2$$

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \quad [dB]$$

$W_0 = 10^{-12}$ W ⇒ valore convenzionale che non corrisponde a nulla

- Quello che sente il mio orecchio è p o I ⇒ è onda sonora dovuta alla pressione
- W è solo la potenza emessa dalla sorgente

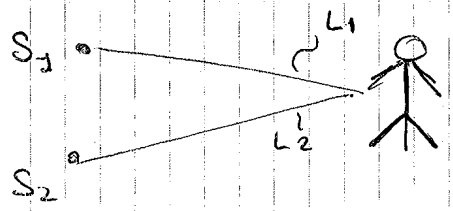
S emette W che si propaga

→ io percepisco I e p

(N.B) W CARATTERIZZA SOLO LA SORGENTE, W_0 = valore totalmente convenzionale che corrisponde al valore di I_0

N.B I LIVELLI NON si SOMMANO, ma si COMPONGONO

Se ho una sorgente che genera un'onda sull'ascoltatore di livello L_1 e un'altra S_2 che genera un'onda di livello L_2 sull'ascoltatore. Quale livello L_{TOT} genera $S_1 + S_2$?



~~$L_1 + L_2$~~ NO!

Si sommano, grazie al principio di conservazione dell'energia,

- I e W
- p^2

→ ma NON

- L_1 e L_2 !

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 328

se compongo i due livelli il livello totale è il maggiore dei 2 o se sono uguali al valore + 3 dB

$$L_{TOT} = L_1 \oplus L_2 = Max(L_1, L_3) + (0 \div 3)$$

$3 \simeq 10 \log 2$

OSSERVAZIONE

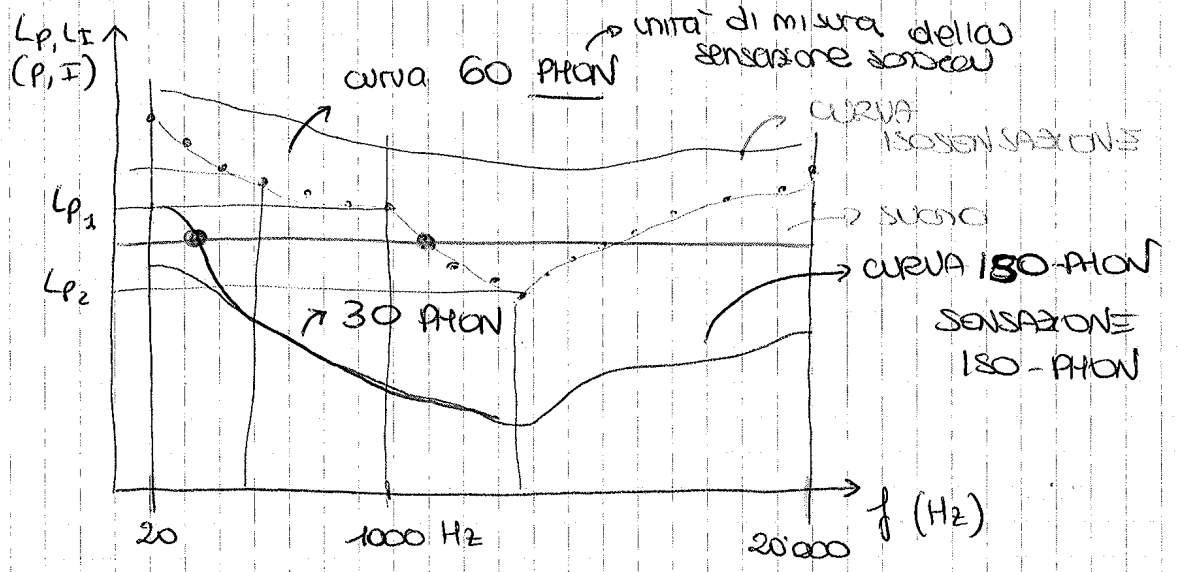
- I livelli NON si sommano
- Un aumento di 3 dB corrisponde ad un RADDOPPIO dell'EFFETTO ⇒ aumenta molto il fenomeno acustico
- Percepisco solo il livello dominante! [es in casa se accendo la TV 120 dB]

AUDIOGRAMMA NORMALE

È stato normalizzato nel 1961, è basato sullo studio di Fletcher e Munson.

→ Hanno dato una misura razionale e rigorosa all'INTENSITÀ SONORA

- I, W, P, L_I, L_P, L_W ⇒ GRANDEZZE OGGETTIVE
- S, L_S, ⇒ GRANDEZZE SOGGETTIVE (basate su studi epidemiologici sulla percezione)



- Suono a 1000 Hz riprodotto ad un certo livello L_{P_1}
- Altro suono a frequenza più bassa ⇒ aumentando il LIVELLO del suono lo aumento a tal punto da sentire il suono alla stessa intensità del primo suono ⇒ stessa intensità di sensazione sonora
- Cambio frequenza e ripeto l'esperimento per frequenze tra 20 ÷ 20'000 Hz (campo udibile)

Ricostruisco per punti una curva sperimentale

[⇒ È LUOGO dei PUNTI che DANNO ORIGINE alla STESSA SENSAZIONE SONORA S]

CURVA ISOSENSAZIONE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 328

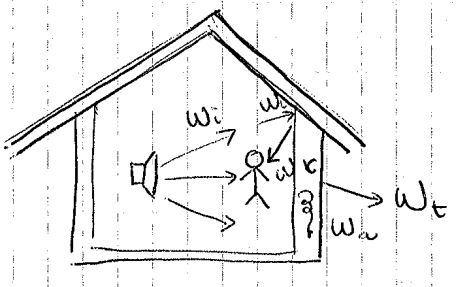
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 328

→ Nell'acustica degli ambienti mi interessa r e la somma di $a' + t$

In acustica $\boxed{a' + t = a}$ ⇒ COEFF. di ASSORBIMENTO SONORO APPARENTE

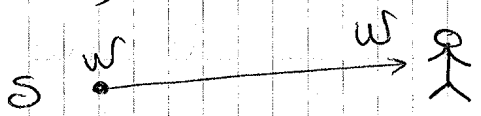
A differenza della luce ⇒ $\boxed{a + r = 1}$ che significa NON che $t = 0$ ma che inserisco t in $a = a' + t$

$$a = 1 - r$$



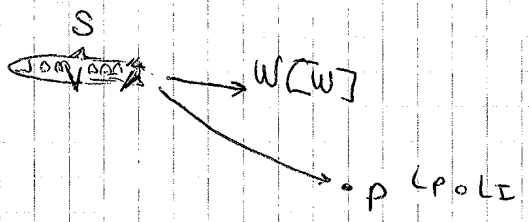
In ambiente chiuso ⇒ ho riflessione
In campo libero ⇒ non ho contributo dalla riflessione

CAMPO LIBERO ⇒ Non ho contributo dalla riflessione (es. aereo)



esiste solo la componente diretta del suono (non W_r)

ES. Aereo



$\boxed{U = \frac{I}{c}}$ DENSITÀ di ENERGIA SONORA

LEGAME $L_p \longleftrightarrow L_I$ in CAMPO LIBERO ⇒ N.B SOLO in CAMPO LIBERO

$$\boxed{I = \frac{p^2}{\rho c}} \qquad p^2 = I \rho c$$

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{\rho c \, I}{p_0^2}$$

solo in campo libero

$$\rho c = 400 \ kg/m^2 \cdot s$$

$$p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \ Pa$$

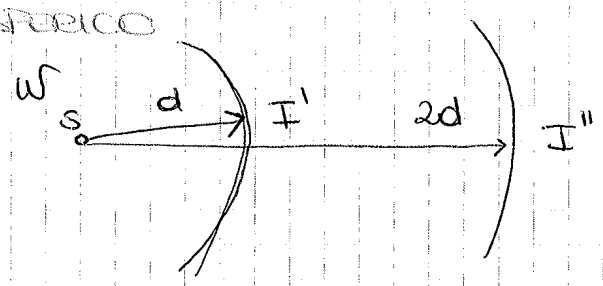
$$p_0^2 = 400 \cdot 10^{-12} \ Pa$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 328

VARIAZIONE di L_I (o L_p) al RADDOPPIARE della DISTANZA

- SFERICO



$$L_{I'} = 10 \log \frac{I'}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{W}{4\pi d^2}}{I_0}$$

$$L_{I''} = 10 \log \frac{I''}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{W}{4\pi (2d)^2}}{I_0}$$

$$\cancel{\Delta L = I - I} \qquad \Delta L = L_{I'} - L_{I''} = 10 \log \frac{I'}{I_0} - 10 \log \frac{I''}{I_0} =$$

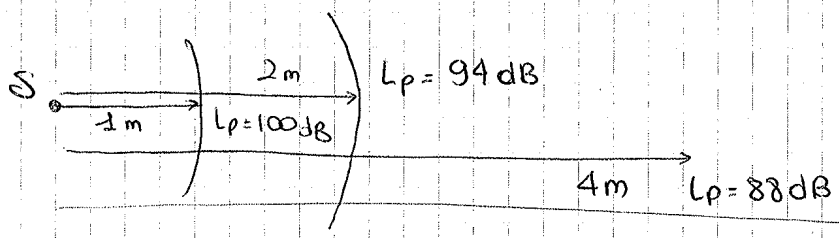
$$= 10 \log \left(\frac{I'}{\cancel{I_0}} \cdot \frac{\cancel{I_0}}{I''} \right) = 10 \log \left(\frac{\cancel{W}}{\cancel{4\pi d^2}} \cdot \frac{\cancel{4\pi} (2d)^2}{\cancel{W}} \right) =$$

$$= 10 \log 4 \simeq \underline{\underline{6{,}02 \text{ dB}}}$$

[In campo libero (semi) sferico il livello decresce di ~ 6 dB ad ogni raddoppio di distanza

ES

$L_{p_i} = L_{p_{i+1}} - 6$



Q_θ = COEFFICIENTE di DIRETTIVITÀ

$$\boxed{Q_\theta = \frac{I}{I_m}} \qquad \text{dove } I_m = \frac{W}{4\pi d^2}$$

I_m: medio

Quando $a \to 1$ ho campo libero anche in una stanza.
$\Rightarrow$ CAMERA ANECOICA.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 328

$L_P = L_I = f(d)$

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{1}{I_0}\left(\frac{W Q_\theta}{4\pi d^2}\right) =$$

$$= 10 \log\left(\frac{W}{I_0} \cdot Q_\theta \cdot \frac{1}{4\pi d^2}\right) = 10 \log \frac{W}{I_0} + 10 \log Q_\theta - 10 \log(4\pi d^2)$$

$I_0 \to 10^{-12}\ W/m^2$

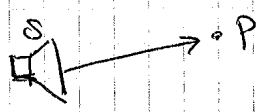
$$\Rightarrow \quad 10 \log \frac{W}{W_0} = L_W$$

N.B dal punto di vista aritmetico il risultato di $10 \log \frac{W}{I_0} = 10 \log \frac{W}{W_0}$ ma SOLO NUMERICAMENTE!

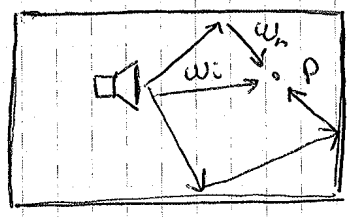
$$\boxed{L_I = L_P = L_W + 10 \log Q_\theta - 10 \log(4\pi d)}$$

CAMPO RIVERBERATO

- CAMPO LIBERO → suono dovuto solo all'onda della sorgente (diretto)



- CAMPO RIVERBERATO → infinità di situazioni, suono = segnale del suono diretto + suono riflesso

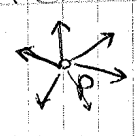


Ogni riverberazione dà origine ad un campo complesso
Se ho molta riflessione la maggior parte del suono è della componente riflessa viceversa da quella diretta.

Se ho molte riflessioni potrebbe accadere che in prima fila si sente bene quanto in ultima fila
→ Nel caso reale ho riflessioni ma non preponderanti

(1) COMPONENTI PREPONDERANTI

I



Talmente tante riflessioni che (A) I netta è NULLA ⇒ INTENSITÀ NETTA NULLA

(lo percepisco L_P)

(B) la densità di ENERGIA SONORA U è UNIFORME in tutto l'ambiente

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 328

Tempo convenzionale di riverberazione o τ_{60}

- Tempo necessario affinché il livello di pressione sonora si riduca di 60 dB rispetto al valore che esso aveva quando la sorgente era in funzione.

≡

- Tempo necessario affinché la densità di energia sonora si riduca di 1 milione di volte al cessare dell'emissione sonora

→ vedo qual'è il tempo dopo il quale cessato il suono esso si riduce di 60 dB, si misura con τ_{60} quindi.

$$U = \frac{p^2}{\rho c^2}$$

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{\left(p^2/\rho c^2\right)}{\left(p_0^2/\rho c^2\right)} = 10 \log \frac{U}{U_0} \quad *$$

$\left(p^2/\rho c^2\right) \to U$, $\left(p_0^2/\rho c^2\right) \to U_0$

$$\frac{U}{U_0} = 10^6 \quad \Rightarrow \quad * \quad \boxed{10 \log 10^6 = 60 \text{ dB}}$$

Il τ_{60} si può quantificare attraverso la formula di Sabine:

$$\boxed{\tau_{60} = 0{,}163 \frac{V}{A_{TOT}}} \quad [s]$$

COSTANTE DIMENSIONATA

A_{TOT} = potere fonoassorbente del locale o unità di fonoassorbimento del locale

$A_{TOT} = [m^2]$ $\quad V = [m^3]$

→ parametro sintetico che mi permette di caratterizzare la capacità del locale di assorbire onde sonore

$$\boxed{A_{TOT} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i}$$

- n = n superfici che circondano l'ambiente
- S_i = superficie $[m^2]$
- α_i = coeff. di assorbimento apparente [-]

(N.B.) Non ho considerato gli oggetti che ci sono dentro!

Gli arredi contribuiscono ad assorbire il suono ⇒ devo aggiungere il loro contributo ma non posso continuare con la stessa tecnica di A_{TOT} perché devo calcolare ogni oggetto! (persona, cappotto, banchi ...) Parlando di oggetti è difficile definire la superficie degli oggetti!

$$\boxed{A_{TOT} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i + \sum N_j \cdot A_j}$$

N_j = n° oggetti

A_j = area oggetti

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 328

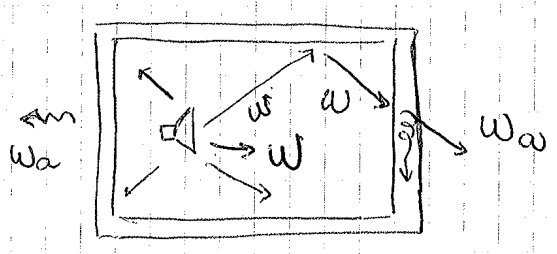
DIMOSTRAZIONE FORMULA di SABINE

30/10/2013

Applica il principio di conservazione dell'energia
Spazio chiuso con sorgente che emette ad una certa potenza, la quale incontra le superfici sociali

POTENZA EMESSA → POTENZA INCIDENTE

in parte → RIFLESSA r ; TRASMESSA + assorbita $t + a' = a$



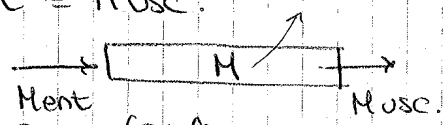
$$W_{ent} = W_{usc}.$$

potenza entrante = pot. uscente

alla MASSA...

- REGIME STAZIONARIO! M è costante nel tempo

$M_{ent} = M_{usc}$.

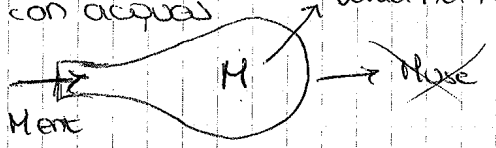


(per es acqua attraverso un tubo)

REGIME TRANSITORIO / DINAMICO

Palloncino con acqua

varia nel tempo → aumenta



Il principio non funziona perché è un principio SEMPLIFICATO

CASO IDEALE (raro in natura)

$\boxed{M_{ent} = M_{usc}}$ funziona SOLO in REGIME STAZIONARIO

condizioni del sistema tali che le grandezze sono costanti indipendentemente dal tempo.

Tutte le grandezze che caratterizzano il fenomeno sono costanti nel tempo

Fenomeni reali → le grandezze cambiano (almeno una) nel tempo

REGIME TRANSITORIO

Una o più grandezze che caratterizzano il fenomeno variano nel tempo.

$\boxed{M_{ent} = M_{usc} \iff \text{REGIME STAZIONARIO}}$

Perché valga anche nel regime TRANSITORIO devo introdurre il concetto di variazione di grandezza nel tempo → derivata della grandezza che varia

$$\boxed{M_{ent} - M_{usc} = \frac{dM}{d\tau} \quad \text{REGIME TRANSITORIO}}$$

→ Nella CODA SONORA

differenza tra ciò che entra e esce = variazione nel tempo di ciò che resta

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 99 di 328

Sostituendo, ottengo:

$$W - \frac{C \cdot U \cdot S \cdot a_m}{4} = V \cdot \frac{dU}{d\tau}$$

A_{TOT} = potere di fonoassorbimento

$$\boxed{W - \frac{C U \cdot A_{TOT}}{4} = V \frac{dU}{d\tau}}$$

LIMITATA nell'IPOTESI di CONTINUITÀ!

eq. differenziale a variabili separabili

① CASO di REGIME STAZIONARIO → grandezze indipendenti dal tempo = costanti nel tempo

Sorgente accesa, potenza costante

$$\boxed{\frac{dU}{d\tau} = 0} \; !$$

$$W - \frac{C \cdot U \cdot A_{TOT}}{4} = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{U = \frac{4W}{C \cdot A_{TOT}}}$$

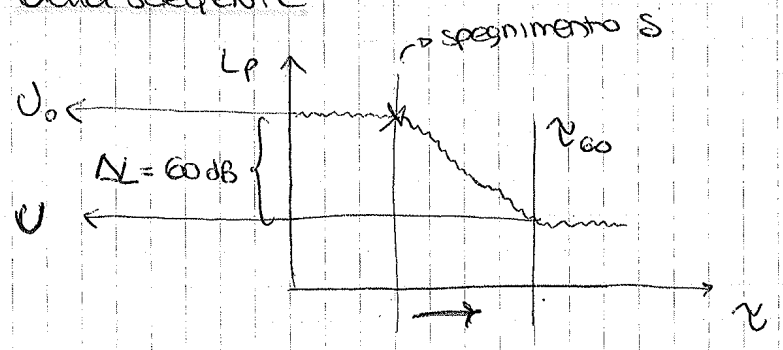
(✱) IPOTESI di CONTINUITÀ

$$W = \frac{E_n}{\tau_{tempo}}$$

energia sonora $= W_i \cdot T_m$

W_i ⇓ potenza incidente sulle pareti

② CASO di REGIME TRANSITORIO a valle dello spegnimento della sorgente (CODA SONORA)



CODA SONORA ⇒ $W = 0$ → $-a_m W_i = V \frac{dU}{d\tau}$

$$-\frac{C U \cdot A_{TOT}}{4V} = V \frac{dU}{d\tau}$$

$$-\int_0^{\tau_{60}} \frac{C A_{TOT}}{4V} \, d\tau = \int_{U_0}^{U} \frac{dU}{U} \qquad -\frac{C A_{TOT}}{4V} \cdot \tau_{60} = \ln \frac{U}{U_0}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 99 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 328

- $L_p = L_W - 10 \log (4\pi d^2) + 10 \log Q_\theta$

$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \left(\frac{W/A_{TOT}}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{W}{I_0} \right) - 10 \log A_{TOT}$ → L_W

↳ numericamente uguale a $\frac{W}{W_0} = L_W$

⇒ in campo perfettamente riverberato vale

① $\boxed{L_I = L_W - 10 \log A_{TOT}}$

↳ L_I alle pareti

- $L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{U}{U_0} \underset{*}{=} 10 \log \left(\frac{1}{U_0} \cdot \frac{4W}{CA_{TOT}} \right) =$ (+)

* ma $\boxed{U = \frac{4W}{CA_{TOT}}}$

$= 10 \log \left(\frac{4}{A_{TOT}} \cdot \frac{W}{U_0 C} \right) \underset{**}{=}$

$U_0 = \frac{p_0^2}{\rho C^2} \Rightarrow U_0 C = \frac{p_0^2}{\rho C}$ ma $\boxed{\frac{p_0^2}{\rho C} = I_0}$ **

$= \underbrace{10 \log \left(\frac{W}{I_0} \right)}_{L_W} + \underbrace{10 \log 4}_{\simeq 6} + 10 \log \frac{1}{A_{TOT}} =$

$= L_W - 10 \log A_{TOT} + 6$ ②

quindi ① $\boxed{L_I = L_W - 10 \log A_{TOT}}$ campo riverberato, L_I alle pareti

② $\boxed{L_p = L_W - 10 \log A_{TOT} + 6}$ in qualunque punto del campo

Incrementando A_{TOT} → a pari sorgenti cambia (L_W) → L_p è più basso ma a svantaggio

τ_{60} scende → qualità non piacevole della sala

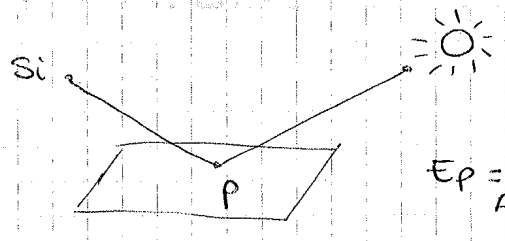
$\downarrow \tau_{60} = 0{,}163 \frac{V}{A_{TOT} \uparrow}$ [SALA OVATTATA]

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 328

30/10/2013

$$E = \frac{d\phi}{dS}$$



$$E_P = \underset{\text{ART.}}{E_{P_1}} + E_{P_2}^{\text{NATU}}$$

$E_{P_1} \rightarrow C_u \cdot \phi_{TOT}$

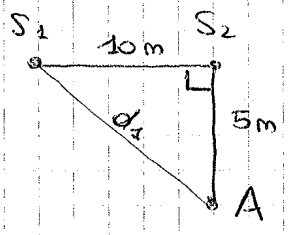
$E_{P_2} \rightarrow FLD_m = \frac{\overline{E}}{E_0}$ ← conosco

lo calcolo con la formula

Calcolo e trovo E_{P_1} = ILLUMINAMENTO ARTIFICIALE
e E_{P_2} = ILLUMINAMENTO NATURALE
⇓
a questo punto posso sommarli

ACUSTICA

ES. 1.4



$\overline{S_2A} \perp \overline{S_1S_2}$

- $S_1 \rightarrow L_{W_1} = 70$ dB (livello di potenza)
- $S_2 \rightarrow L_{W_2} = 65$ dB

In condizioni di CAMPO LIBERO SFERICO $\rightarrow Q_\theta = 1$

1. livello di pressione sonora accesa solo S_1
2. livello di intensità sonora accesa solo S_2
3. livello totale

$$\begin{cases} L_{P_1} = ? \\ L_{I_2} = ? \\ L_{TOT\,S_1+S_2} = ? \end{cases}$$

⇒ In campo libero sferico

$$I = \frac{W}{4\pi d^2}$$

$d_2 = 5$ m

$d_1 = \sqrt{10^2 + 5^2} = 11{,}2$ m

(accesa solo S_1) $I_1 = \frac{W_1}{4\pi d_1^2}$

$I_2 = \frac{W_2}{4\pi d_2^2}$ (accesa solo S_2)

$I_{TOT} = I_1 + I_2$ (accesa S_1 e S_2)

$$L_{W_1} = 10 \log \frac{W_1}{W_0} \Rightarrow W_1 = W_0 \cdot 10^{L_{W_1}/10}$$

W_0 → convenzionale

- $W_1 = 10^{-12} \cdot 10^{70/10} = 10^{-5}$ W — potenza molto piccola
- $W_2 = 10^{-10} \cdot 10^{65/10} = 3{,}2 \cdot 10^{-6}$ W

$$\rightarrow I_1 = \frac{W_1}{4\pi d_1^2} = \frac{10^{-5}}{4\pi \cdot 11{,}2^2} = 6{,}3 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2}$$

$$\rightarrow I_2 = \frac{W_2}{4\pi d_2^2} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 25} = 10^{-8} \frac{W}{m^2}$$

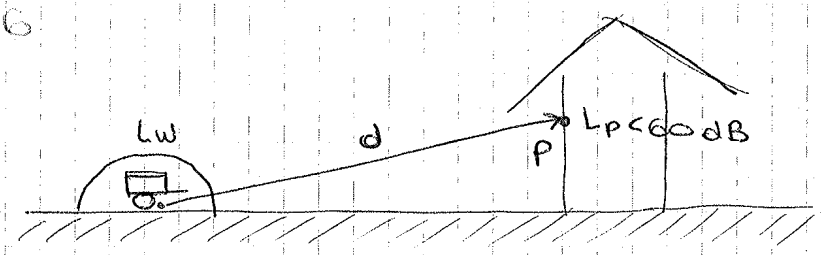
N.B.

In CAMPO LIBERO $L_P = L_I$!

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 328

ES. 1.6



d = distanza

$W = 0{,}1$ Watt

① A che d devo mettere la sorgente affinché alla casa ho un livello $L_p < 60$ dB?

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{0{,}1}{10^{-12}} = 110 \text{ dB}$$

CAMPO SEMISFERICO

Calcolo in P L_I e poi I_{lim} per non superare 60 dB

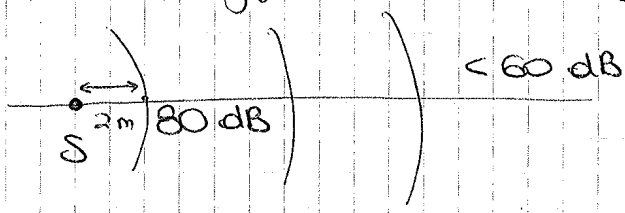
$$L_P = L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 60 \text{ dB}$$

$$I_{lim} = I_0 \cdot 10^{L_I/10} = 10^{-12} \cdot 10^{6} = 10^{-6} \ W/m^2$$

$$I = \frac{W}{2\pi d^2} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{W}{2\pi I_{lim}}} = \sqrt{\frac{0{,}1}{2\pi \cdot 10^{-6}}} = 89{,}2 \text{ m}$$

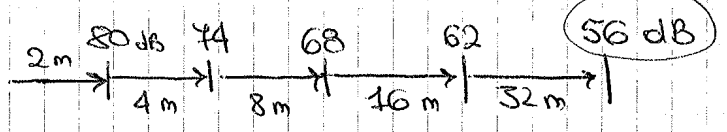
↳ SEMISFERICO

② A 2 m dalla sorgente misuro 80 dB



d = ?

Ad ogni raddoppio di distanza corrisponde ad una diminuzione di 6 dB



Sicuro a 32 m = d

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 328

$\Rightarrow A_{par} + A_{soff} = A_{TOT} - A_{pav} = 14,7 - 2 = 12,7\ m^2$

$A'_{TOT} = (\underbrace{A_{pareti} + A_{soff.}}_{12,7}) + \alpha_{pav} \cdot S_{pav} =$

nuovo ambiente!

α_{pav} nuovo $= 0,5$

$= 12,7 + 0,5 \cdot (6 \times 6) = 30,7\ m^2$

$\rightarrow \tau'_{60} = 0,163 \frac{V}{A'_{TOT}} = 0,163 \cdot \frac{6 \cdot 6 \cdot 3}{30,7} = 0,57\ s$

$\Rightarrow$ per modificare τ_{60} posso modificare il materiale di copertura

τ'_{60} ACCETTABILE?

$\rightarrow$ Calcolo un $\tau_{60,ottimale}$

$\tau_{ott,1000\ Hz} = K \sqrt[9]{V} = 0,35 \cdot \sqrt[9]{6 \times 6 \times 3} = 0,59\ s$

K parlato $= 0,35$

$\sim 0,57\ s$

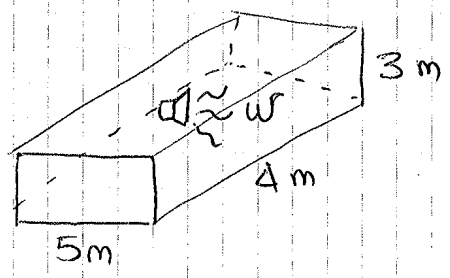
OK!

$\tau'_{60} = 0,57\ s$

$\tau_{60\,ott} = 0,59\ s$

$\tau_{60} = 1,2\ s$ (eccessivo!)

ES. 1.17



1000 Hz

CAMPO PERFETTAMENTE RIVERBERATO

(Al centro $I = 0$

$I_{pareti} \neq 0$!)

$L_I = 55\ dB$

$L_W = ?$

$I_p = \frac{W}{A_{TOT}}$

- pareti e soffitto sono un intonaco acustico $\alpha_{intonaco} = 0,25$
- pavimento è in battuto di cemento [PAG 152] $\alpha_{pav} = 0,05$
- 10 poltrone imbottite [PAG 152] $A_{poltrone} = 0,35\ m^2$

$I_{pareti} = \frac{W}{A_{TOT}}$

$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \rightarrow I = I_0 \cdot 10^{L_I/10} = 10^{-12} \cdot 10^{5,5} = 3,16 \cdot 10^{-7}\ \frac{W}{m^2}$

$W = I \cdot A_{TOT}$

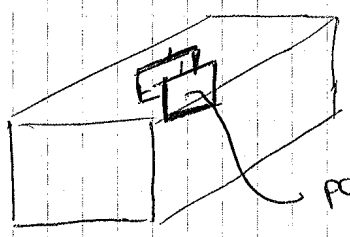
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 328

posso mettere nell'aula pannelli che assorbono il suono, mettendoli alle pareti o soffitto però modifico la superficie!
→ posso APPENDERLI

assorbono su 2 lati — posso appendere una superficie maggiore!

→ Qual'è la S di pannelli sapendo che essi hanno $a_{pann.} = 0,5$?



pannelli
S_{pann} ?
$a_{pann} = 0,5$

PANNELLO assorbe su 2 lati!

$$\tau_{60,ott} = 0,53\ s$$

$$\tau_{60} \rightarrow A_{TOT} = 0,163 \frac{V}{\tau_{60}} = 0,163 \cdot \frac{7 \cdot 6 \cdot 4}{1,8} = 15,2\ m^2$$

$$\rightarrow \tau_{60,ott} = 0,163 \frac{V}{A_{TOT,ott}}$$

$$A_{TOT,ott} = 0,163 \cdot \frac{V}{\tau_{60,ott}} = 0,163 \cdot \frac{7 \cdot 6 \cdot 4}{0,53} = 51,7\ m^2$$

$A_{TOT} = 15,2\ m^2$
$A_{TOT,ott} = 51,7\ m^2$

devo aggiungere perché l'aula risponda bene acusticamente

$$\Delta A_{TOT} = A_{TOT,ott} - A_{TOT} = (51,7 - 15,2)\ m^2 = 36,5\ m^2$$

$$\Delta A_{TOT} = a_{pannello} \cdot \underbrace{(S_{pannello} \cdot 2)}_{\text{assorbe sia a dx o a sx (due lati)}} \Rightarrow$$

$$S_{pannello} = \frac{\Delta A_{TOT}}{a_{pann} \cdot 2} = \frac{36,5}{0,5 \cdot 2} = 36,5\ m^2 \text{ di pannelli}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 328

- RESA ACUSTICA di un'aula → FONOASSORBIMENTO
- ISOLAMENTO ACUSTICO e CONTROLLO dell'INGRESSO del RUMORE

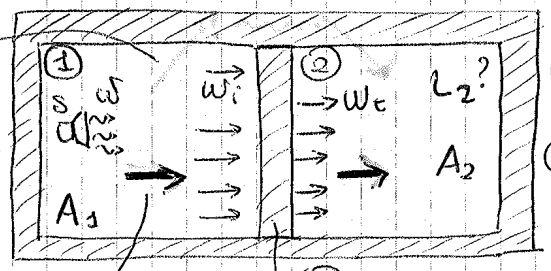
⇓

FONOISOLAMENTO → propagazione del rumore fra ambienti contigui

Trasmissione del rumore tra ambienti contigui
Devo garantire un buon FONOISOLAMENTO delle PARETI!

- FONOISOLAMENTO è DIFFERENZA di LIVELLO SONORO TRA AMBIENTI CONTIGUI
  Due stanze contigue che confinano con un tramezzo (parete) vuoto in pianta

propagazione per via indiretta/ o strutturale



ⓐ LOCALE 1 = LOCALE DISTURBANTE
ⓑ 1 e 2 → CAMPO PERFETTAMENTE RIVERBERATO
ⓒ LOCALE 2 = LOCALE DISTURBATO

propagazione per via diretta = aria

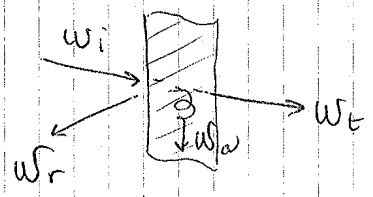
ⓓ Tramezzo di superficie S_d [m²]

ⓔ Ogni locale ha un potere fonoassorbente

locale 1 A_1 — locale 2 A_2

→ Incide sulla parete una certa intensità sonora

ⓕ W_i = potenza incidente sulla parete
ⓖ W = potenza globalmente emessa dalla sorgente



$1 = a + r + t$

$1 = a + r$

Ma in questo caso mi interessa W_t = potenza trasmessa nel locale 2
Devo considerare quindi il coefficiente di trasmissione t

→ t "qualifica" la prestazione del tramezzo in termini di capacità di ISOLARE i RUMORI

$$\boxed{t = \frac{W_t}{W_i}}$$

Si preferisce introdurre un nuovo parametro → POTERE FONOISOLANTE del TRAMEZZO/ PARETE R

- R è f(freq.) → funzione della frequenza!

⇓

- → per far venire un valore positivo faccio $\log 1/t$ ← $t < 1$

$$\boxed{R = 10 \log \frac{1}{t}} \quad [dB]$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 328

In ambiente PERFETTAMENTE RIVERBERANTE $I_{pareti} = \frac{W}{A_{TOT}}$

$$\underbrace{W_t = t \cdot W_i = t \cdot (I_1 S_d)}_{\text{sostituisco in } (\times)}$$

$$L_{p_2} = 10 \log \left(\frac{1}{U_0} \cdot \frac{4}{C A_2} \cdot t \cdot I_1 S_d \right) = \qquad U_1 = \frac{4I}{C} \quad \star$$

$$\star = 10 \log \left(\frac{U_1}{U_0} \cdot \frac{S_d}{A_2} \cdot t \right) = \underbrace{10 \log \frac{U_1}{U_0}}_{L_{p_1}} + 10 \log \frac{S_d}{A_2} + \underbrace{10 \log t}_{-R} =$$

$$\boxed{L_{p_2} = L_{p_1} - R + 10 \log \frac{S_d}{A_2}}$$

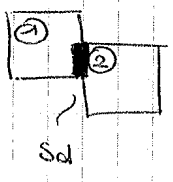
$$\Downarrow$$

$$\boxed{\Delta L = L_{p_1} - L_{p_2} = R - 10 \log \frac{S_d}{A_2}}$$

Devo conoscere
- R = potere fonoisolante
- A_2 = potere fonoass del locale disturbato
- S_d = superficie di contatto

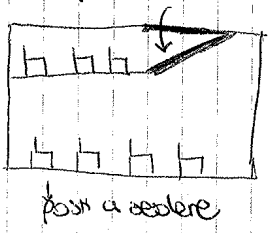
→ LIMITARE IL DISTURBO nel LOCALE 2
- incremento R ⇒ modifico il tramezzo
- lavoro su A_2 ⇒ migliorare introducendo pannelli assorbenti
  ⇒ arredamento stanza aumento

→ FACENDO IL PROGETTO EX-NOVO
- avere S_d piccolo ⇒ sfalsare gli ambienti



→ ACUSTICA SALA
- forma
- occupazione (persone, oggetti, arredi) ⇒ A

- PER OTTIMIZZARE un AULA devo considerare quindi L'AULA come se fosse 70% piena
- IN TEATRO → alle pareti, realizzate in materiale, hanno quadranti che da una parte sono RIFLETTENTI e dall'altra FONOASSORBENTI e si possono regolare sapendo che $K = 0,5 \div 0,8$
- Le SEDIE CINEMA si ribaltano → stesso assorbimento che ho se la persona si siede o il sedile si alza perché simula l'assorbimento di una persona
- $\tau_{60} = 0,163 \frac{V}{A_{TOT}}$ lascio A_{TOT} e vario V → il soffitto per esempio che può scendere



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 328

4/11/2013 FONOISOLAMENTO → grafico Fig. 4.3 POTERE FONOISOLANTE di una PARETE

POTERE FONOISOLANTE, R [dB]

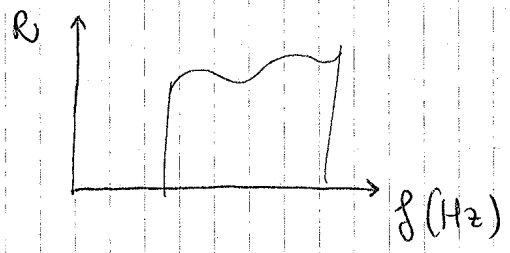
$$\boxed{R = f(freq)}$$

per strati omogenei e freq. medie → LEGGE della MASSA

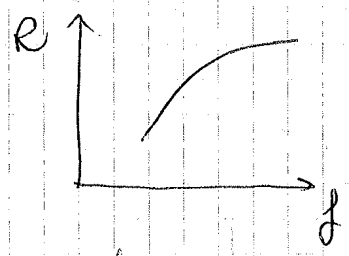
$$R = 20 \log (f \cdot M_s) - 48 \ [dB]$$

- per pareti multistrato → dati da produttori (misurati).

R è una funzione!



da maggior parte delle volte R↑ se f↑



da norma ha introdotto un FATTORE di MERITO / INDICE di VALUTAZIONE STANDARD I

è il valore della curva normalizzata R f corrispondente ad f = 500 Hz

I valutazione maggiore = fattore migliore

trasto la curva di R misurato di un livello in modo tale che la curva si avvicini il più possibile alla curva di riferimento

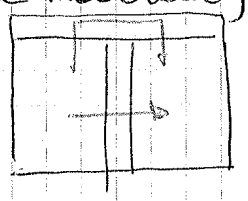
A 500 Hz vedo quanto vale I della curva traslata

$$\sum_{i=1}^{n} (R_i - I_i) < 12 \ dB$$

$$Max (R_i - I_i) < 5 \ dB$$

→ IN RIFERIMENTO A TRASMISSIONE del SUONO DIRETTA

Se avessi anche la COMPONENTE INDIRETTA devo aggiungere 3÷5 dB per via SOLIDA (attraverso vibrazione materiale)



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 328

ESEMPIO

f [Hz]	Lp CASO A	Lp CASO B	PESO
63	80 (53,8)	10 (0)	−26,2
125	100 (83,9)	20 (3,9)	−16,1
250	80 (71,4)	40 (31,4)	−8,6
500	80 (76,8)	30 (26,8)	−3,2
1'000	70	90	0
2'000	30 (31,2)	70 (71,2)	+1,2
4'000	40 (41)	60 (61)	+1
16'000	30 (23,4)	80 (73,4)	−6,6
TOT	100,13 dB 85,0 dB	90,5 dB 90,15 dB	

Sottraggo o sommo ai casi Lp il PESO!

- I LIVELLI PESATI, PONDERATI tengono conto della mia percezione
- LIVELLI LINEARI dicono solo come funziona oggettivamente la sorgente

→ in conclusione obiettivamente e cioè calcolando il livello ponderato (cioè sentendo) il CASO B disturba maggiormente del CASO A

$$\boxed{L_{p_{TOT}} = 10 \log \left(\sum 10^{L_i/10} \right)}$$

CASO A

$$L_{p_{TOT}}(A) = 10 \log \left(10^{8} + 10^{10} + 10^{8} + 10^{8} + 10^{7} + 10^{3} + 10^{4} + 10^{3} \right) =$$
$$= 100,13 \text{ dB}$$

CASO B

$$L_{p_{TOT}}(B) = 10 \log \left(10^{1} + 10^{2} + 10^{4} + 10^{3} + 10^{9} + 10^{7} + 10^{6} + 10^{8} \right) =$$
$$= 90,5 \text{ dB}$$

Se non contassi il PESO direi che il CASO A è più fastidioso, → ma così ho solo l'AZIONE del suono OGGETTIVA! cioè senza considerare la percezione UDITIVA!

Ora calcolo Lp TOT! CON PESO!

CASO A

$$\Rightarrow L_{p_{TOT}}(A) = 10 \log \left(10^{5,38} + 10^{8,39} + 10^{7,14} + 10^{7,68} + 10^{7} + 10^{3,12} + 10^{4,1} + 10^{2,34} \right) = 85,0$$

CASO B

$$\Rightarrow L_p(B) = 10 \log \left(10^{0} + 10^{0,39} + 10^{3,14} + 10^{2,68} + 10^{9} + 10^{7,12} + 10^{6,1} + 10^{7,34} \right) = 90,15$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 328

Il danno da esposizione al rumore dipende da L_{eq}

FIG. 5.3

a → funzione del
b → tempo di esposizione

4/11/2013

TERMODINAMICA

Capitolo 1

Ramo della fisica che studia
- ENERGIA
- SCAMBIO di ENERGIA tra CORPI
- TRASFORMAZIONI di ENERGIA da una FORMA ad un'altra
- QUALI EFFETTI gli SCAMBI di ENERGIA hanno sui cambiamenti dei CORPI e SISTEMI
- INSERISCE dei VINCOLI alle trasformazioni di energia

• ENERGIA SI CONSERVA (quantitativamente) → PRINCIPIO di CONSERVAZIONE dell'ENERGIA

↓

implicitamente introduciamo il

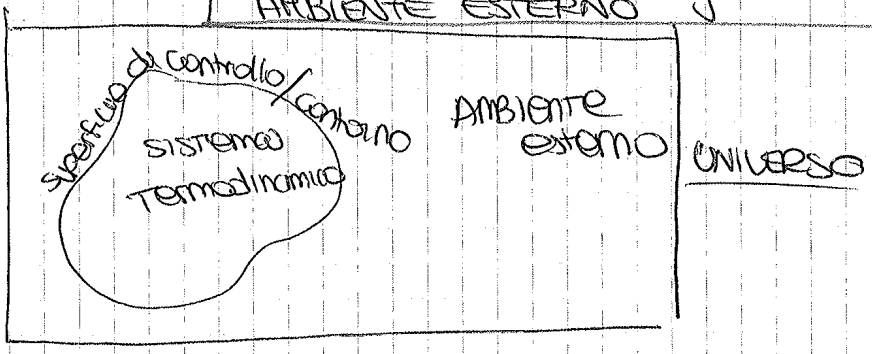
• SISTEMA TERMODINAMICO → sistema per il quale l'energia si conserva

↓

⇒ una qualunque porzione di spazio univocamente identificabile

• Tutto ciò che è parte del sistema termod. deve essere IDENTIFICABILE in maniera unica ed equivocabile
• Tutto ciò che è fuori è AMBIENTE ESTERNO

SISTEMA TERMODINAMICO + AMBIENTE ESTERNO } = UNIVERSO



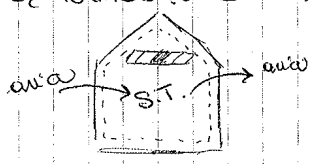
La superficie ideale che divide il sistema è detta SUPERFICIE di CONTROLLO o CONTORNO

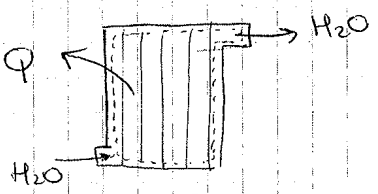
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 328

- SISTEMI TERMODINAMICI CHIUSI → possono scambiare energia con l'esterno ma non scambiano massa → per es. sotto forma di calore
  - ↳ (bombola del gas)
  - ↳ (rubinetto dell'acqua chiuso)
  - ↳ (bidone pieno d'acqua chiuso)

- SISTEMA TERMODINAMICO APERTO → oltre che l'energia può scambiare massa con l'esterno
  - ↳ casa, aria che vi è dentro
  - ↳ termosifone → acqua che passa

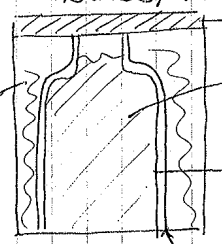




- SISTEMA TERMODINAMICO ISOLATO (IDEALE) → non possono scambiare né massa né energia
  - ↓ (universo)

qualsiasi sistema può solo avvicinarsi al sistema isolato (termos)

Thermos / Vaso Dewar



→ tappo isolante → conduttivo

→ Q ↓

materiale isolante si limita scambio CONDUTTIVO

→ superficie argentata → si limita lo scambio con IRRAGGIAMENTO

→ vuoto → si limita scambio CONVETTIVO

le leggi della termodinamica si possono riscrivere in modo più semplice a seconda del sistema in uso.

TIPOLOGIE di ENERGIA

- ENERGIE POSSEDUTE
- ENERGIE di SCAMBIO

ENERGIE POSSEDUTE dal SISTEMA

→ Energia cinetica = dovuta alla velocità del sistema [Ec]

→ Energia potenziale = in virtù della posizione del sistema all'interno del campo gravitazionale [Ep]

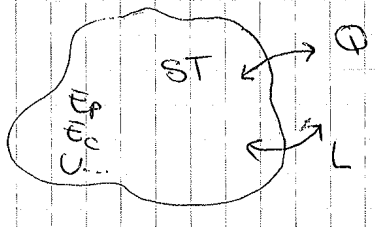
→ Energia INTERNA = in virtù della pressione e temperatura del sistema [U]

ENERGIE di SCAMBIO del SISTEMA con L'ESTERNO

→ CALORE [Q]

→ LAVORO [L]

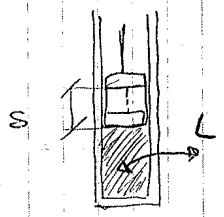
↳ determinano variazioni del sistema come il cambiamento delle energie proprie del sistema



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 328

POMPA BICICLETTA



Spingo lo stantuffo
cilindro scende applicando $\vec{F}_{est}$
il cilindro scende
deformato il contorno

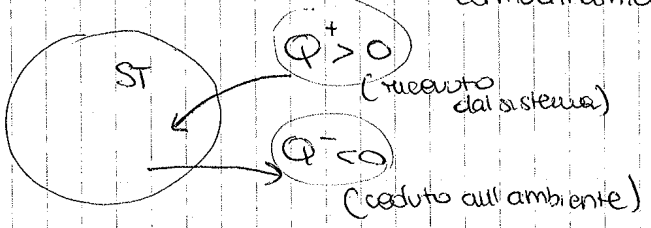
→ ENERGIA come LAVORO

CONVENZIONE di SEGNI

CALORE

- Si considera POSITIVO → calore fornito dall'ambiente esterno al sistema termodinamico

$Q^+ > 0$

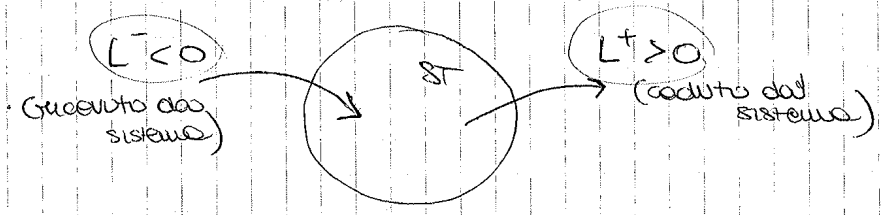


- Si considera NEGATIVO → calore .. che il sistema cede all'ambiente esterno

$Q^- < 0$

x IL LAVORO → OPPOSTO

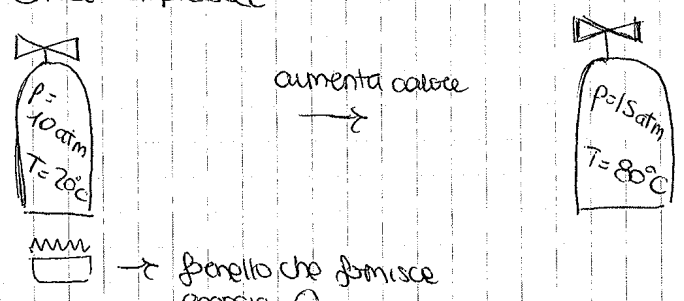
- Si assume POSITIVO → lavoro effettuato dal sistema termodinamico sull'ambiente esterno
- Si assume NEGATIVO → lavoro effettuato dall'ambiente esterno sul sistema termodinamico



CAMBIAMENTI QUALITATIVI del SISTEMA

Gli scambi di energie determinano cambiamenti delle proprietà intrinseche del sistema

- Bombola aria compressa



→ fornello che fornisce energia Q

[Le proprietà del sistema termodinamico sono rappresentate da qualunque GRANDEZZA FISICA MISURABILE sul SISTEMA TERMODINAMICO]

GRANDEZZE di STATO ↔
- VOLUME V [m^3]
- PESO - MASSA M [kg]
- TEMPERATURA T [°C]
- PRESSIONE P [Pa]

- ENTROPIA
- ENTALPIA
- ....
- ....

} esempi di caratteristiche del sistema che variano al cambiare dell'Energia

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 328

EQUILIBRIO: Si dice che un sistema è in equilibrio quando lasciato libero di evolvere è incapace di cambiamenti spontanei

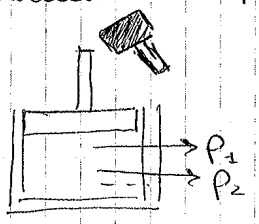
- equilibrio chimico, meccanico (moto quiete o rettilineo unif.), termico ⇨ casi particolari dello STATO DI EQUILIBRIO TERMODINAMICO

STATO DI EQUILIBRIO TERMODINAMICO = Un sistema è in equilibrio Termodinamico quando è contemporaneamente in
- EQUILIBRIO CHIMICO
- EQUILIBRIO MECCANICO
- EQUILIBRIO TERMICO

- Se il sistema non fosse in equilibrio non ~~sarebbe~~ fosse misurabile un unico valore delle grandezze di stato (unità di stato) le quali invece variano nel tempo → non ho una misurazione univoca.

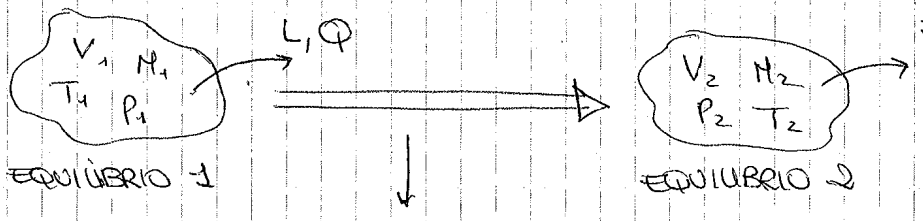
Esempio

Martellata ad un pistone → in un primo istante solo la pressione + vicino alla martellata varia aumentando
→ poi se ne accorgono gli altri stati
→ È CAPACE di CAMBIAMENTI SPONTANEI
→ non posso caratterizzare con un unico valore le grandezze di stato



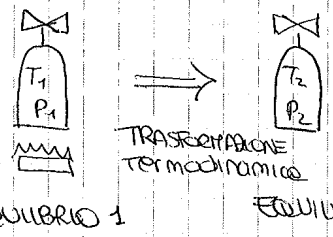
(1) SIAMO IN GRADO di MISURARE in modo UNIVOCO le GRANDEZZE di un SISTEMA TERMODINAMICO IN EQUILIBRIO

→ EQUILIBRIO
→ Sistema termodinamico in condizioni di EQUILIBRIO 1
→ scambio energia → variano i valori
→ dopo un certo T il sistema non è in equilibrio
→ dopo tempo lungo → nuovo valore di assestamento → NUOVO EQUILIBRIO
EQUILIBRIO 2



↓ il sistema ha subito una TRASFORMAZIONE TERMODINAMICA che a fronte di uno scambio di L, Q con l'ambiente esterno fa passare il SiT. dallo stato di EQUILIBRIO 1 allo stato di EQUILIBRIO 2.

Es.



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 328

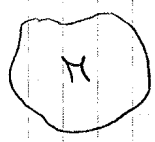
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 328

GRANDEZZE di STATO SPECIFICHE o MASSICHE 6/11/2013

V, M, U, H, S } estensive (dipendono dalla massa) ⇒ se ne può calcolare GRANDEZZE SPECIFICHE o MASSICHE

OTTENGO GRANDEZZE INTENSIVE

- $\left[\frac{m^3}{kg}\right]$ $v = \frac{V}{M}$ volume massico
- $\left[J/kg\right]$ $h = \frac{H}{M}$ entalpia massica
- $\left[J/kg\right]$ $u = \frac{U}{M}$ energia interna massica
- $\left[J/kg \cdot K\right]$ $s = \frac{S}{M}$ entropia massica



Dividendo le grandezze estensive per la massa M esse diventano indipendenti dalla M del sistema ⇒ diventano GRANDEZZE INTENSIVE

T, p → $\boxed{\text{Grandezze intensive}}$

v, u, h, s →

$v = \frac{V}{M}$ volume massico

$\boxed{\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}}$ → densità o massa volumica $[kg/m^3]$

Di quante grandezze ho bisogno per definire un sistema? → sicuramente un numero finito ⇒ le altre sono dipendenti!
→ Quante variabili indipendenti necessito (di cui le altre sono funzioni)?

SISTEMI TERMODINAMICI SEMPLICI

Formati da una SOSTANZA PURA (≠ elemento), bastano 3 grandezze per determinare lo stato termodinamico del sistema. Tutte le altre sono legate in modo funzionale

3 GRANDEZZE → $\boxed{p, V, T}$

⇓

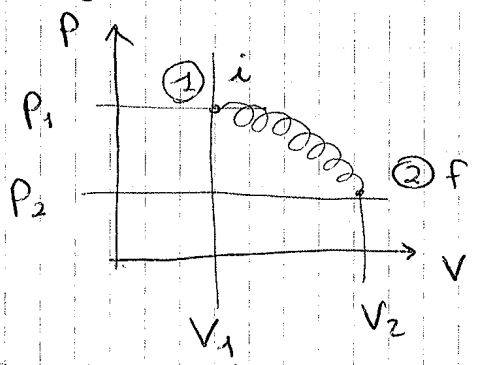
$\boxed{\text{SISTEMI } p, V, T}$

le altre sono legate tra loro da una funzione del tipo $\boxed{f(p, V, T) = 0}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 328

→ posso caratterizzare e rappresentare i due STATI di EQUILIBRIO ① e ② con le loro grandezze e in mezzo la trasformazione di stato

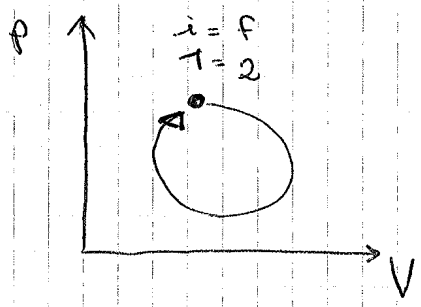


① = i = stato iniziale

② = f = stato finale

TRASFORMAZIONE CICLICA

Il sistema compie una trasformazione per cui lo stato di equilibrio iniziale è lo stesso del finale



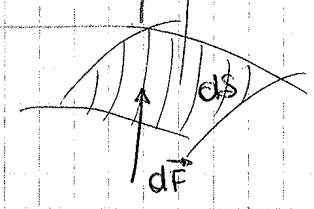
TRASFORMAZIONE CICLICA

① PRESSIONE (P) [Pa]

Rapporto tra Forza e superficie sulla quale F agisce

$$\boxed{P = \frac{d\vec{F}}{d\vec{S}} \quad \left[\frac{N}{m^2}\right] = [Pa]}$$

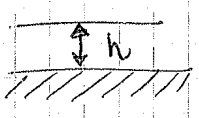
$d\vec{S}$ = sup. orientata



(N.B.) Riguarda le forze in direzione NORMALE alla superficie

Perché uso Pascal e non Atmosfere? → ma $\boxed{\text{Pascal è SI}}$

legge stevino $P = \rho g h$



$\rho = 1000\ kg/m^3$

$g = 10\ m/s^2$

$$h = \frac{P}{\rho g} = \frac{1\ Pa}{1000 \cdot 10} = \frac{1}{10000}\ m = 0{,}1\ mm$$

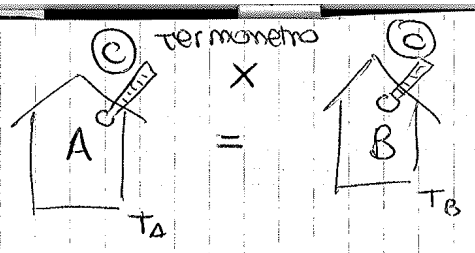
$10{,}33\ m\ H_2O = 1\ atm = 760\ mmHg$ ⇒ 1 Pa è piccolissimo! come unità di misura

$\boxed{1\ atm = 101325\ Pa}$

Tutti i fenomeni fisici con cui è a contatto l'uomo vengono in relazione all'atmosfera! che nel Pascal indica un ordine dei 100 000 per questo solitamente mi esprimo in atm non in ingegneria.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 328



SISTEMI TERMODINAMICI:
- A = casa
- B = casa
- C = termometro

Metto il termometro nella casa A finché essa non è in equilibrio termodinamico con la casa → leggo T

se T_A, T_B, T_C sono uguali ⇒ A, B, C sono in equilibrio termodinamico

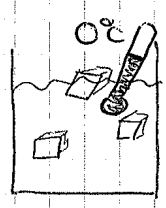
⇑

APPLICO IL PRINCIPIO Ø

[IL SISTEMA TERMODINAMICO C È IL TERMOMETRO!]

Per dire quanto vale T devo introdurre il concetto di SCALA EMPIRICA di TEMPERATURA

1. SCALA CELSIUS o CENTIGRADA

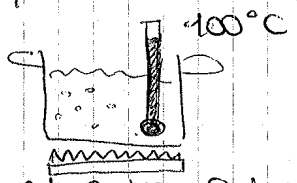


A = H_2O + ghiaccio

C = termometro

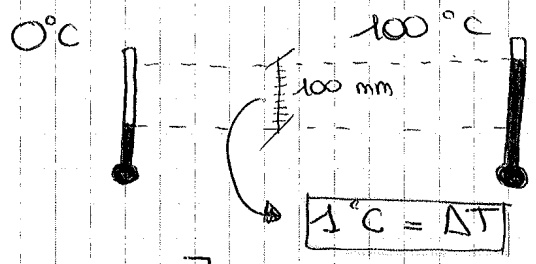
Aspetto che C vada in equilibrio termodinamico con A

- La altezza a cui si ferma il mercurio viene definita convenzionalmente Temperatura a 0°C
- Metto dell'acqua a bollire, metto il termometro e aspetto che C vada in equilibrio con B



- Convenzionalmente Celsius definisce l'altezza della temperatura come 100°C

L'intervallo di differenza tra 0°C e 100°C è pari a 100 mm



$1mm = \Delta T = 1°C$

0°C	100°C
32°F	212°F

→ STESSA COSA CONVENZIONALMENTE in modo diverso fa Faraday

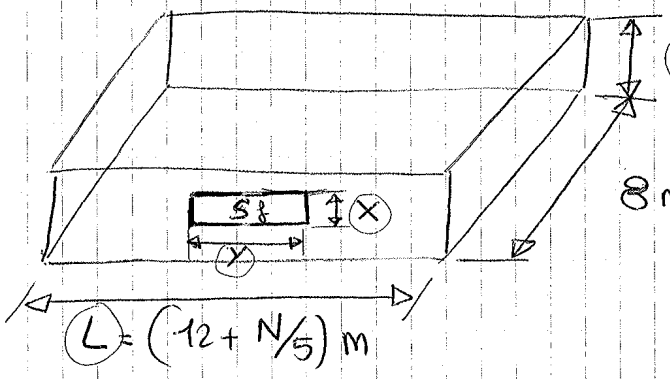
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 328

ESERCITAZIONE

6/11/2013

→ Tesina Acustica ←



$h = \left(3 + \frac{C}{6}\right)$ m

8 m = l

N = nome
C = cognome

es. DARIO → 4
BALDI → 2

① * Calcolo (h) e lunghezza (L)

② * FINESTRA = $X \cdot Y$

$$X = \left(2 + N/5\right) / 2$$

$$Y = \left(3 + \frac{C}{6}\right)$$

① A_{TOT} (125, 250, 500, 1000, 2'000, 4'000 Hz)

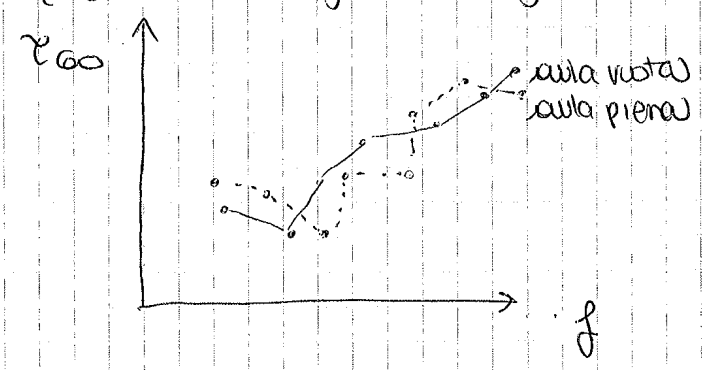
- A) Aula vuota (30 sedie di legno + 2 persone
- B) Aula piena (30 persone + 30 sedie di legno)

MATERIALI
- pavimento in gomma
- intonaco
- lastra di vetro di spessore 4 mm

⇒ α = valori di assorbimento apparente [TABELLE DISPENSE]

② • τ_{60} aula vuota (alle varie frequenze)
• τ_{60} aula piena (alle varie frequenze)

→ arrivo a disegnare diagramma di questo tipo



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 328

[PAG 152]

$f \rightarrow$	125	250	.....	4'000
A persone	0,20	..	....	0,40
A sedie legno	0,01	..	....	0,06

$\rightarrow m^2$

$f \rightarrow$	125	250	.....	4'000
aula vuota	$A_{TOT,125}$			$A_{TOT,4'000}$ Hz
aula piena	$A_{TOT,125}$			$A_{TOT,4'000}$

*

B) Aula piena

$$A_{TOT} = a_{inton} \cdot S_{soff} + a_{int} \cdot S_{pareti} + a_{gomma} \cdot S_{pavim.} + a_{vetro} \cdot S_{Fin} + 30 \cdot A_{persona} + 30 \cdot A_{sedie}$$

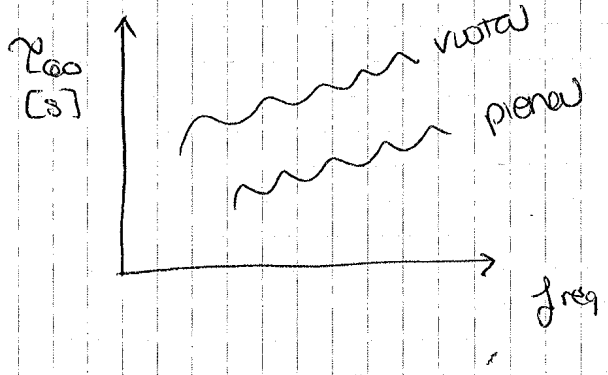
2) $\tau_{60} = f(freq)$ $\Rightarrow$ FORMULA di SEBINE

$$\tau_{60} = 0{,}163 \frac{V}{A_{TOT}}$$

* idem tabella di prima

$f \rightarrow$	125	.....	4'000
aula vuota	$\tau_{60/125}$		$\tau_{60,4'000}$ Hz
aula piena	$\tau'_{60/125}$		$\tau'_{60/4'000}$ Hz

Tabella



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 328

se $\tau'_{60} > \tau'_{60,ott}$

$\Downarrow$

CORREZIONE ACUSTICA della SALA

$\Downarrow$

incremento A'_{TOT}

← AULA PIENA

$A'_{TOT} \longrightarrow \tau'_{60} = 0{,}163 \dfrac{V}{A'_{TOT}} \longrightarrow A'_{TOT} = 0{,}163 \dfrac{V}{\tau'_{60}}$ → tabella punto (2)

$A'_{TOT,ott} \rightarrow \tau'_{60,ott} = 0{,}163 \dfrac{V}{A'_{TOT,ott}}$

$\Downarrow$

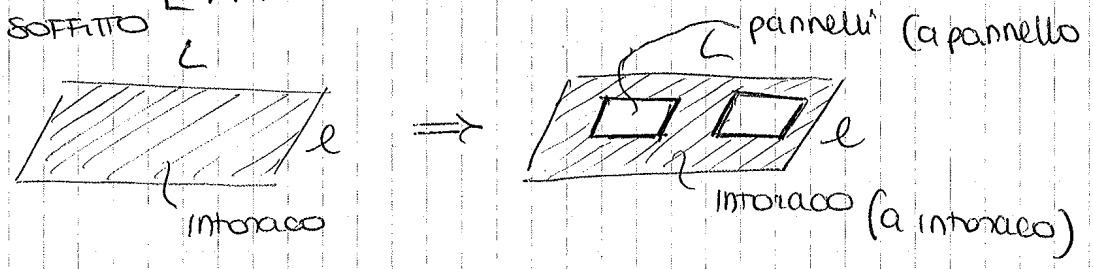
$A'_{TOT,ott}$

$$\Delta A_{TOT} = A'_{TOT,ott} - A'_{TOT} = *$$

(N.B) Mi serve la SUPERFICIE dei PANNELLI! Per sapere quanti pannelli servono!

$$-A'_{TOT} = \left[-(a_{gomma} \cdot S_{pav} + a_{intona} \cdot S_{soff} + a_{int} \cdot S_{paret} + a_{vetro} \cdot S_f + 30 \cdot A_{pers} + 30 \cdot A_{sedie}) \right.$$

$$A'_{TOT,ott} = \left[a_{gomma} \cdot S_{pav} + a_{intonaco} \cdot (\overset{L \cdot l}{S_{soff}} - S_{pannelli}) + a_{pannelli} \cdot S_{pannelli} + a_{intonaco} \cdot S_{pareti} + a_{vetro} \cdot S_f + A_{persona} \cdot 30 + 30 \cdot A_{sedie} \right.$$



$$* = \Delta A'_{TOT} = (\cancel{a_{gom} \cdot S_{pav}} + a_{int} \cdot (S_{soff} - \overset{L \cdot l}{S_{pann}}) + a_{pann} \cdot S_{pannt} + \cancel{a_{intona} \cdot S_{paret}} + \cancel{a_{vetro} \cdot S_f} + \cancel{A_{pers} \cdot 30} + A_{sedie} \cdot 30) - (a_{gomma} \cdot S_{pav} + a_{intona} \cdot S_{soff} + \cancel{a_{int} \cdot S_{paret}} + \cancel{a_{vetro} \cdot S_f} + \cancel{30 \cdot A_{pers}} + \cancel{30 \cdot A_{sedie}})$$

$$\Rightarrow \Delta A'_{TOT} = \cancel{a_{intonaco} \cdot S_{soff}} + S_{pannelli} (a_{pannello} - a_{intonaco}) - \cancel{a_{intonaco} \cdot S_{soff}}$$

↳ [da PAG 163-164]

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 328

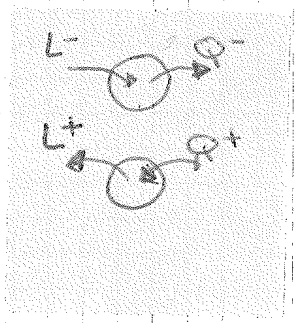
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 328

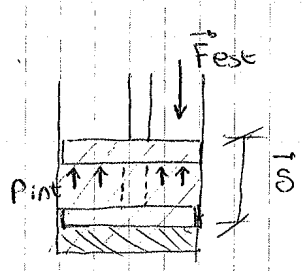
ENERGIE SCAMBIATE

7/11/2013

trasformazione reversibile

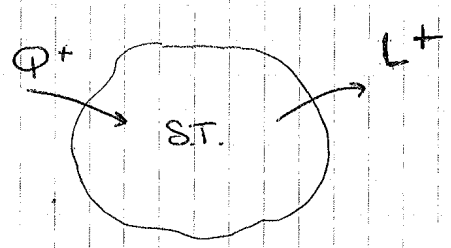
L - LAVORO [J]





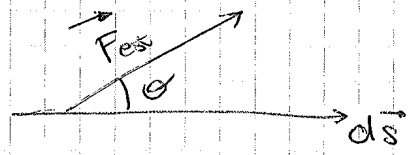
Il LAVORO TERMODINAMICO

$$\boxed{L_{termodinamico} = -\int_s \vec{F}_{est} \cdot d\vec{s}}$$

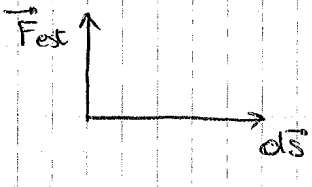


$\Rightarrow$ MACCHINE MOTRICI = fornendo calore crea lavoro

$$\vec{F}_{est} \cdot d\vec{s} = |\vec{F}_{est}| \cdot |d\vec{s}| \cos\theta$$



Una forza esterna applicata al sistema ed uno spostamento del punto di applicazione ortogonalmente non producono lavoro termodinamico



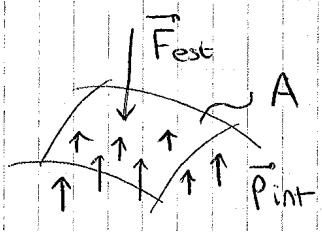
$L = 0$

(N.B) In alcuni casi compare la pressione interna

In generale

$$L = -\int_s \vec{F}_{est} \cdot d\vec{s} = -|\vec{F}_{est}| \cdot |\vec{s}| \cos\theta = -|\vec{F}_{est}| \cdot |\vec{s}|$$

Caso particolare



TRASFORMAZIONE REVERSIBILE

Istante per istante la FORZA esterna è equilibrata da p_{int} = pressione interna

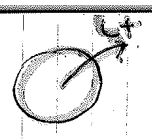
$$\boxed{|\vec{F}_{est}| = \vec{p}_{int} \cdot A}$$

ovvero $\vec{F}_{est} = -p_{int} \cdot A$ $\rightarrow$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 328

- MACCHINE MOTRICI



$L > 0$

$$L = \underbrace{\overbrace{\int_V p_i \, dV}^{L_{REV}}}_{>0} - \underbrace{L_w}_{>0}$$

$P_{relativo} = P_{assoluta} - \underbrace{P_{atmosferica}}_{101'325 \text{ Pa}}$

$>< 0$ $\quad \geq 0$

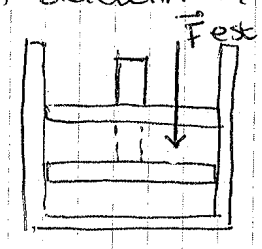
uso sempre $P_{assoluta} \geq 0$

$\boxed{L < L_{REV}}$ → lavoro minore di quello reversibile

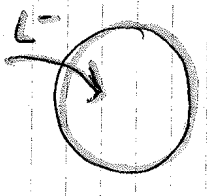
- MACCHINA OPERATRICE REALE → frigorifero, pompa bicicletta

POMPA BICICLETTA → faccio lavoro sul sistema T.

FORZA SUL SISTEMA $\quad F_{est} < 0 \Rightarrow L < 0$



$dV < 0$



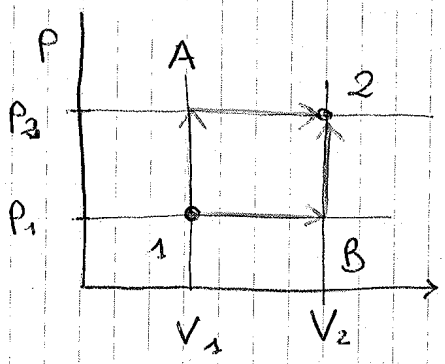
$L < 0$

$$\underset{<0}{L} = \int_V \underbrace{p_i \, dV}_{<0} - \underbrace{L_w}_{>0} \Rightarrow \boxed{L > L_{REV}}$$

$-1000 \quad -600$

in senso NEGATIVO!

CALCOLO L



pensiamo di operare 2 TRASFORMAZIONI REVERSIBILI che portino il sistema dallo stato 1 allo stato 2

1) da 1 a A → aumento p_1 a V_1 costante
da A a 2 → aumento V_1 a p_2 costante

2) da 1 a B → a p_1 costante
da B a 2 → a V_2 costante

1) p aumenta — ISOCORA $V = cost$
V aumenta — ISOBARA $p = cost$

2) V aumenta — ISOBARA $p = cost$
p aumenta — ISOCORA $V = cost$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 328

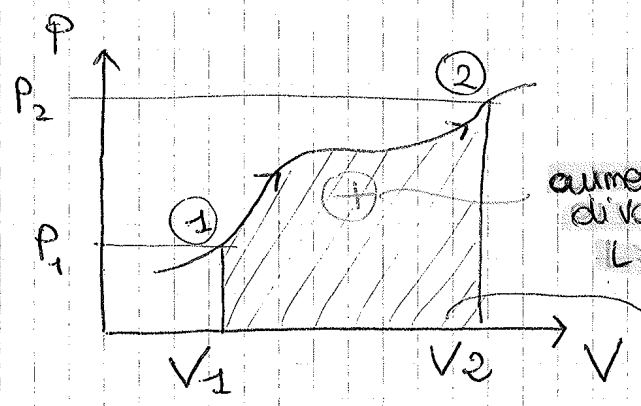
IL SISTEMA NON POSSIEDE CALORE (Q) o LAVORO (L), ma il SISTEMA SCAMBIA CALORE (Q) e LAVORO (L)

[Q, L } dipendono da
- PERCORSO di TRASFORMAZIONE
- INIZIO e FINE TRASF.]

INTERPRETAZIONE GRAFICA

$L = \int p\,dV$ TRASFORMAZIONE REVERSIBILE

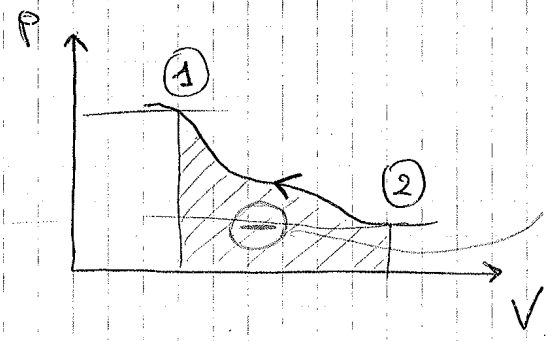
se considero $L = \int_1^2 p\,dV$ ⇒ rappresenta l'area sottesa dalla trasformazione (dalla curva)



aumento di volume $L > 0$

$\int p\,dV = L > 0$

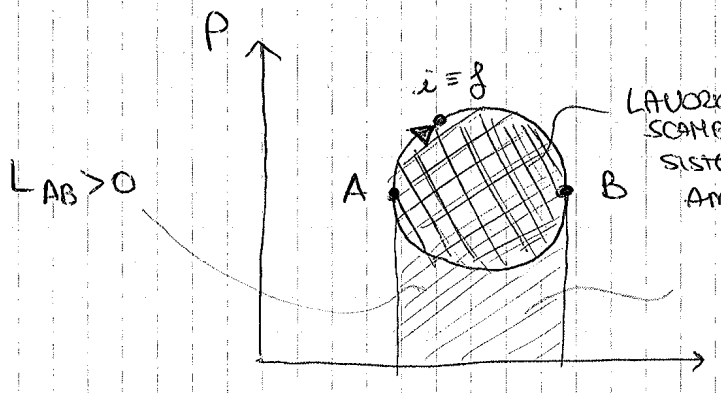
area sottesa dalla trasformazione sull'asse delle ascisse



diminuisco il volume V

$\int p\,dV = L < 0$

TRASFORMAZIONE CICLICA



LAVORO NETTO SCAMBIATO dal SISTEMA con AMBIENTE esterno

i = iniziale
f = finale (stato)

L'area dentro il ciclo termodinamico rappresenta il LAVORO NETTO scambiato dal SISTEMA con l'esterno.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 328

Q viene SCAMBIATO solo se ho una DIFFERENZA di TEMPERATURA ma gli OGGETTI NON POSSEGGONO CALORE

CAPACITÀ TERMICA C

Si definisce capacità termica la quantità di calore che occorre fornire al S.T. per far innalzare la sua temperatura di 1 °C o EQUIVALENTEMENTE di 1 K.

$$\boxed{C = \frac{\delta Q}{dT}} \quad [J/K] \cong [J/°C]$$

variazione infinitesima di temperatura

dipende da
- MASSA SISTEMA
- SOSTANZA

perché C dipende solo dalla sostanza e NON DIPENDE dalla MASSA introduco la grandezza

c = CAPACITÀ TERMICA MASSICA o CALORE SPECIFICO

minuscolo

$$\boxed{c = \frac{C}{M} = \frac{\delta Q}{M\,dT} = \frac{\delta q}{dT}} \quad [J/kg \cdot K]$$

poiché $dq = \frac{dQ}{M}$ $[J/kg]$

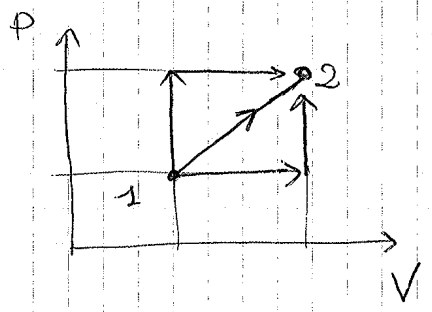
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 328

PROPRIETÀ dei GAS PERFETTI

$$C = \frac{\delta Q}{M\,dT}$$

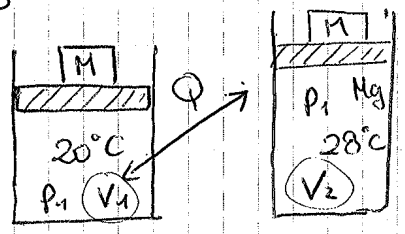
Q, L dipende da
- INIZIO, FINE
- TIPO PERCORSO TRASFORMAZIONE



⇓

C dipende dalla TRASFORMAZIONE, soprattutto nei gas dipende dalla trasformazione per fornire o cedere calore

Esempio



- A 20°C
- fornisco calore Q
- M = massa non cambia
- p non cambia perché $p = \frac{Mg}{S}$

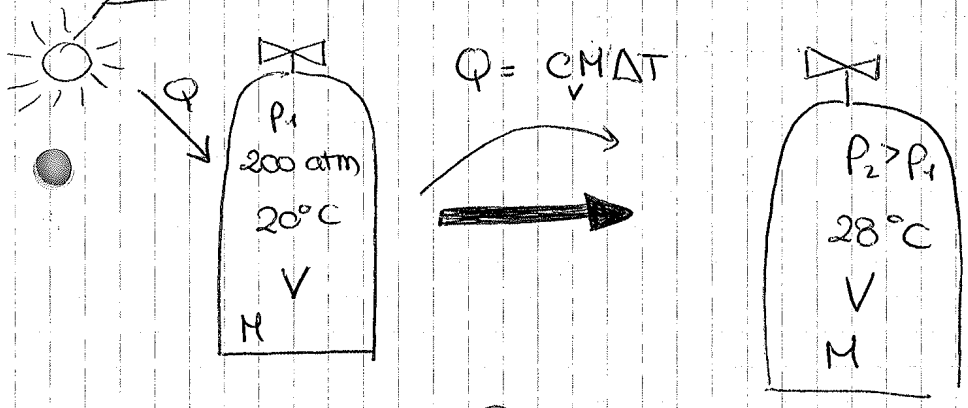
Mg = massa gas

p = costante ⇒ TRASFORMAZIONE ISOBARA

Uso $\boxed{c_p = \frac{\delta Q}{M\,dT}\Big|_{p=cost}}$ $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$ CAPACITÀ TERMICA MASSICA A PRESSIONE COSTANTE

$\boxed{Q = c_p M_g \Delta T}$ → $Q = c_p M \Delta T$

$C = \frac{\delta Q}{dT}$ $c_p = \frac{\delta Q}{M\,dT} = \frac{\delta q}{dT}$



TRASFORMAZIONE ISOCORA
→ V = costante

Non uso c_p! ma c_V

$$\boxed{c_V = \frac{\delta Q}{M\,dT}}\Big|_{V=cost} \quad \left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$$

CAPACITÀ TERMICA MASSICA A VOLUME COSTANTE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 328

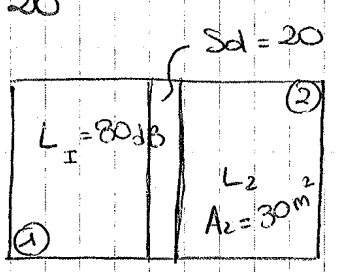
invece

$\delta Q = C_p M dT$ → si applica SOLO x TRASFORMAZIONI A PRESSIONE COSTANTE (e REVERSIBILI)

$\delta Q = C_v M dT$ → si applica SOLO x TRASFORMAZIONI A VOLUME COSTANTE (e REVERSIBILI)

ESERCIZI di ACUSTICA

- ES. 1.20



$$\Delta L = R + 10 \log \frac{A_2}{Sd}$$

$$\Delta L = L_1 - L_2$$

$$\rightarrow \underset{\uparrow \atop L_{p_2}}{L_2} = \underset{\uparrow \atop L_{p_1}}{L_1} - R - 10 \log \frac{A_2}{Sd}$$

ma in campo PERFETTAMENTE RIVERBERATO

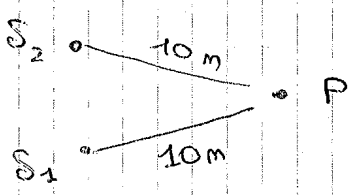
$$\boxed{L_p = L_I + 6} = 80 + 6 = 86 \text{ dB}$$

← 10 log 4

$$L_2 = 86 - 46 - 10 \log \frac{30}{20} = 40 - 10 \log \frac{3}{2} = 38{,}2 \text{ dB}$$

- ESERCIZIO

CAMPO LIBERO SFERICO



CARATTERISTICHE SORGENTI S_1, S_2

f [Hz]	Lw [dB] sorgente 1	Lw [dB] sorgente 2
62,5	85	60
125	80	60
250	60	70
1000	80	80
2'000	45	65
2'500	45	65

a) $Lw_{1\,TOT}$, $Lw_{2\,TOT}$?

b) Lp_1, Lp_2 $\forall$ freq

c) $Lp_{1\,TOT}$, $Lp_{2\,TOT}$

d) stabilire quale delle due sorgenti è più disturbante per P.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 328

TEORIA 11/11/2013

Osservazione

Per le ENERGIE SCAMBIATE Q e L

$\oint \delta Q \neq 0$

$\oint \delta L \neq 0$

$\rightarrow$ dQ, dL NON sono differenziali esatti ma solo QUANTITÀ INFINITESIME

$\Rightarrow \int \delta Q$ e $\int \delta L$ dipendono dal percorso (e non solo dallo stato iniziale e finale del sistema).

GRANDEZZE di STATO

$(T, p, V, U, H, S \ldots)$

dT, dp ... SONO dei DIFFERENZIALI ESATTI.

$\Rightarrow \boxed{\oint dx = 0}$ x = grandezza di stato generica

$\int_D dx = x_f - x_i$ non dipende dalla trasformazione

$$\int_1^2 dx = \int_1^2 dx\Big|_A = \ldots \int_1^2 dx\Big|_C = x_2 - x_1$$

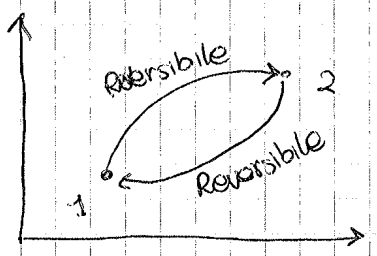
↳ percorso

TRASFORMAZIONI REVERSIBILI

$$\boxed{L_{REV} = \int_V p\,dV}$$

$$\boxed{L = L_{REV} - L_w = \int_V p\,dV - L_w}$$

Si definisce REVERSIBILE una trasformazione che INVERTITA riporta il sistema termodinamico e l'ambiente esterno nelle medesime condizioni che si avevano prima della trasformazione diretta e inversa.



Trasformazione da 1 a 2 + Trasformazione da 2 a 1 = NON ho effetti totali sull'universo, non sono in grado di notare la differenza, non ne ho traccia

Trasformazione reversibile è una trasformazione che avviene secondo una successione infinita di stati di equilibrio. Ovvero una successione di stati per ciascuno dei quali sussiste l'equilibrio fra variabili di stato interne ed esterne al sistema

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 328

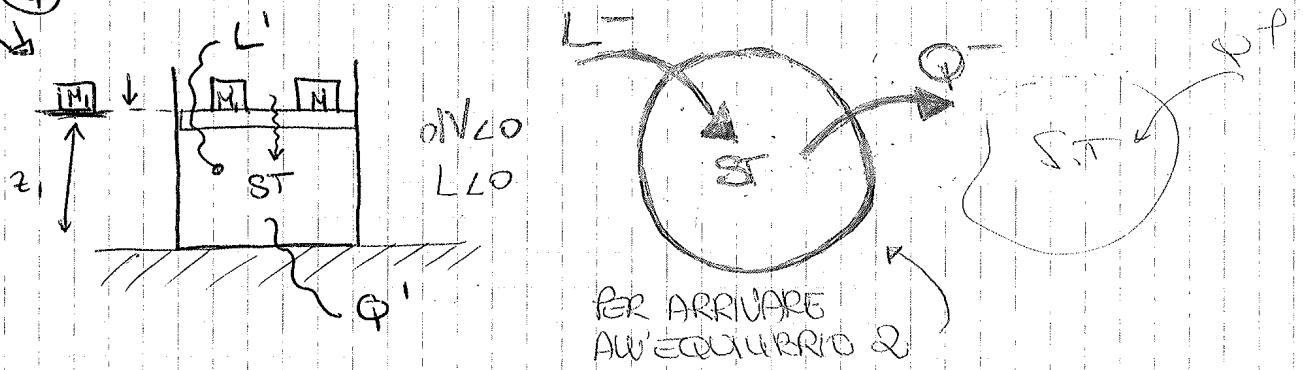
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 328

- metto alla stessa altezza z_1 una massa M_1 a fianco, e poi all'istante t_1 la sposto perpendicolarmente sul pistone (forza $\perp$ → spostamento perpendicolare → NO FORZA) quando M_1 è sul pistone ho una fase di NON EQUILIBRIO

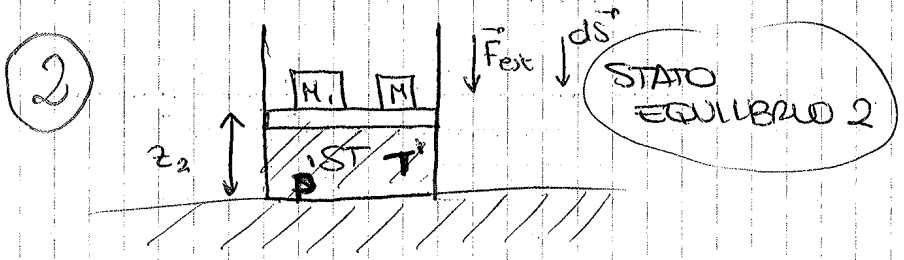
① EQUILIBRIO (Massa M)
② NON EQUILIBRIO (+ M_1)
③ PISTONE SCENDE
↙
colpisce il gas → scambio L' con esterno
- T aumenta
- p aumenta } ΔT con termostato
⇒ scambio calore Q'

④ SCAMBIO L' + SCAMBIO Q'

③+④



⑤ NUOVO EQUILIBRIO ⇒ SISTEMA HA SUBITO una TRASFORMAZIONE TERMODINAMICA



TRASFORMAZIONE TERMODINAMICA → da STATO di EQUILIBRIO 1 a STATO di EQUILIBRIO 2

→ TRASFORMAZIONE 1 → 2:

$$L' = \int_{\Delta z} \vec{F}_{est} \cdot d\vec{s} = -\int_{\Delta z} \underbrace{|\vec{F}_{est}|}_{(M_1+M)g} \, |d\vec{s}| \cos\theta_1 =$$

$$= -(M_1+M)g \cdot 1 \int \underbrace{|d\vec{s}|}_{(z_1-z_2)}$$

$$\boxed{L' = -(M_1+M)g(z_1-z_2)}$$ (perché lavoro ricevuto (−))

Q' = calore dovuto alla compressione (<0) + calore dovuto agli attriti (<0)

visibilità 90%

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 328

$$L'' = Mg\,(z_1 - z_2)$$

Q'' → calore assorbito dal sistema a causa dell'espansione (>0)

+

calore prodotto dagli attriti (<0)

$$\Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} |L'| > |L''| \\ |Q'| > |Q''| \end{array}}$$

PERDITA di CALORE UTILE

$$L' = -(M+M_1)\,g\,(z_1 - z_2)$$
$$L'' = (M)\,g\,(z_1 - z_2)$$

$$L' + L'' = -M_1 g\,(z_1 - z_2)$$ PERDITA di ENERGIA POTENZIALE

⇓

è pari alla perdita di energia potenziale della massa M_1 che passa da z_1 a z_2

per cui ① → ② → ① NON SONO TRASFORMAZIONI REVERSIBILI

→ SONO TRASFORMAZIONI GLOBALMENTE CICLICHE

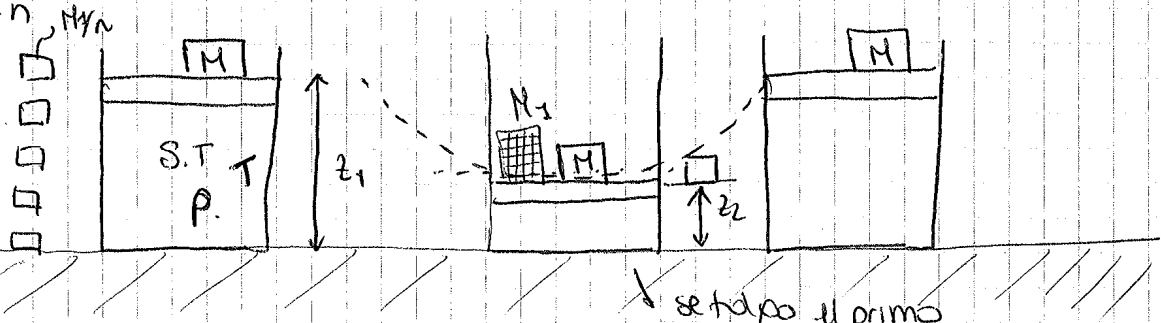
→ ma non sono TRASFORMAZIONI REVERSIBILI poiché l'universo non torna allo stato iniziale come testimoniato dalla massa M_1

⇒ Suppongo ora di spezzare l'esperimento in tanti pezzi

Suddivido M_1 in tante masse tutte uguali e pari a $\frac{M_1}{n}$

$n = n°$ masse

ciascuna massa si trova all'altezza del pistone dopo aver messo sul pistone la massa precedente sino all'altezza z_n



se tolgo il primo pesino $\frac{M_1}{n}$ esso si trova a z_2

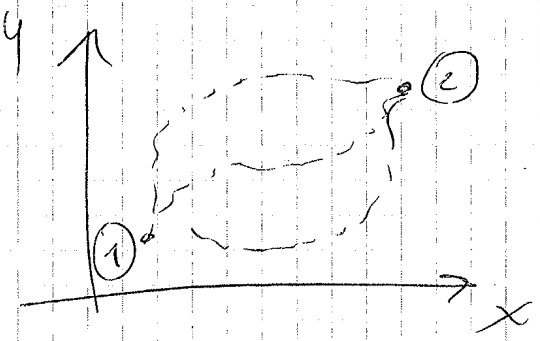
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 328

Se la trasf. è irreversibile non ho una successione di stati di equilibrio pertanto non è rappresentabile su un diagramma di stato.
Si possono rappresentare solo gli STATI INIZIALI e FINALI che normalmente sono di equilibrio

↓ stati intermedi non stati di equilibrio

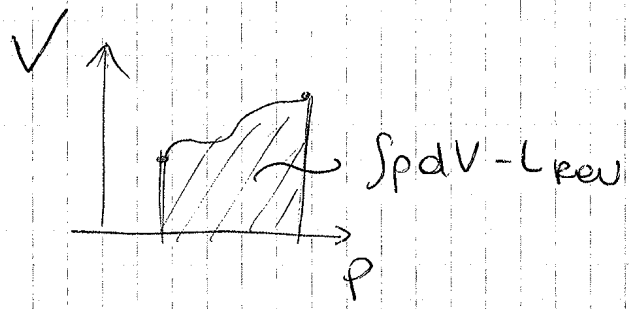
è convenzione usare una linea tratteggiata che può avere diverse forme xk non rappresenta nulla.



TRASF. IRREVERSIBILE

→ ecco perché su (p, V) posso rappresentare il lavoro solo se la TRASF. è REVERSIBILE.

cioè $\int p\,dV - L_{p\,REV}$



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 328

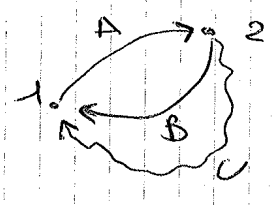
se $L = [J]$ e $Q = [J]$ dalla (1) se J viene espresso con unità coerenti $\Rightarrow$ $J = 1$

(2) $\boxed{\oint \delta Q = \oint \delta L}$ — 1° PRINCIPIO della TERMODINAMICA per TRASFORMAZIONI CICLICHE

$\hookrightarrow$ per trasformazioni cicliche

- Come trovo il 1° PRINCIPIO della Termodinamica per QUALSIASI TRASFORM.

A = trasformazione qualunque
B = trasformazione qualunque
C = qualunque trasformazione $\neq$ B



la somma delle trasformazioni A + B risulta una TRASFORMAZIONE CICLICA per cui posso applicare la (2)

$$\oint \delta Q = \oint \delta L$$

$$(X) \quad \underbrace{\int_{1A}^{2} \delta Q}_{\text{da 1 a 2 lungo A}} + \underbrace{\int_{2B}^{1} \delta Q}_{\text{da 2 a 1 lungo B}} = \int_{1A}^{2} \delta L + \int_{2B}^{1} \delta L$$

le trasformazioni $1 \xrightarrow{A} 2$ e $2 \xrightarrow{C} 1$ costituiscono (insieme) una TRASFORMAZIONE CICLICA $\Rightarrow$ posso applicare la (2)

$$\oint \delta Q = \oint \delta L$$

$$(Y) \quad \int_{1A}^{2} \delta Q + \int_{2C}^{1} \delta Q = \int_{1A}^{2} \delta L + \int_{2C}^{1} \delta L$$

$\Rightarrow$ sottraggo membro a membro da X la Y

$$X - Y \Rightarrow \quad \oint_{1A}^{2} \delta Q + \oint_{2B}^{1} \delta Q = \oint_{1A}^{2} \delta L + \oint_{2B}^{1} \delta L$$

$$- \oint_{1A}^{2} \delta Q + \oint_{2C}^{1} \delta Q = \oint_{1A}^{2} \delta L + \oint_{2C}^{1} \delta L$$

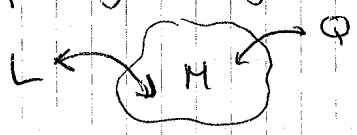
$$X - Y \Rightarrow \quad \cancel{\int_{1A}^{2} \delta Q} + \int_{2B}^{1} \delta Q - \cancel{\int_{1A}^{2} \delta Q} - \int_{2C}^{1} \delta Q = \cancel{\int_{1A}^{2} \delta L} + \int_{2B}^{1} \delta L - \cancel{\int_{1A}^{2} \delta L} - \int_{2C}^{1} \delta L$$

$$\int_{2B}^{1} \delta Q - \int_{2B}^{1} \delta L = \int_{2C}^{1} \delta Q - \int_{2C}^{1} \delta L \Rightarrow \boxed{\int_{2C}^{1} (\delta Q - \delta L) = \int_{2B}^{1} (\delta Q - \delta L)}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 328

Per ogni sistema termodinamico di massa M posso assegnare grandezze massiche per ogni sua grandezza, cioè riferita all'unità di massa del sistema.



$U \rightarrow u = \frac{U}{M}$ [J/kg]

grandezza [J] → U; grandezza massica → u

Allo stesso modo se il mio sistema scambia Q e L posso definire un lavoro massico l e calore massico q

$L[J] \rightarrow \boxed{l = \frac{L}{M}}$ [J/kg] LAVORO MASSICO

lavoro fatto sul o dal S.T per unità di massa

$Q[J] \longrightarrow \boxed{q = \frac{Q}{M}}$ [J/kg] CALORE MASSICO

RELAZIONI di USO FREQUENTE

$$\boxed{\begin{array}{ll} (1) & \delta Q - \delta L = dU + dE_c + dE_p \\ (2) & Q - L = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p \\ (3) & \delta q - \delta l = du + de_c + de_p \\ (4) & q - l = \Delta u + \Delta e_c + \Delta e_p \end{array}}$$

$$\boxed{\begin{array}{l} E_c = \frac{1}{2} m v^2 \\ E_p = M g h \end{array}}$$

$e_c = \frac{1}{2}\frac{Mv^2}{M} = \frac{1}{2}v^2$

$e_p = \frac{Mgh}{M} = gh$

(3) → trasformazione infinitesima e per unità di massa (M = 1 kg)

(4) → trasformazione finita e per unità di massa (M = 1 kg)

Moltiplicando per M la (3) e (4)

$$\delta Q - \delta L = dU + M\, d\left(\frac{\frac{M w^2}{2}}{M}\right) + Mg\, d\left(\frac{Mz}{M}\right)$$

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2} m w^2}$$

w = velocità

$$\delta Q - \delta L = dU + M\, d\left(\frac{w^2}{2}\right) + Mg\, dz$$

$d[f(x)] = f'(x)\, dx$

$$(1) \quad \delta Q - \delta L = dU + \underbrace{Mw\, dw}_{dE_c} + \underbrace{Mg\, dz}_{dE_p}$$

$$(2) \quad \delta q - \delta l = du + w\, dw + g\, dz$$

$U \rightarrow$ ENERGIA INTERNA [J]

$\boxed{u = \frac{U}{M}} \rightarrow$ ENERGIA INTERNA MASSICA [J/kg]

U dipende da E_c + E_p + livello di T + stato aggregazione materiale.

E_p → forze intermolecolari

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 328

OSSERVAZIONE (2)

$\oint \delta L = \oint \delta Q$ è un caso particolare di

$$\delta Q - \delta L = dE$$

Esprimo l'espressione per il caso particolare di una trasf. ciclica

$$\oint \delta Q - \oint \delta L = \underbrace{\oint dU}_{=0} + \underbrace{\oint M\omega\, d\omega}_{=0} + \underbrace{\oint Mg\, dz}_{=0}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\oint \delta Q = \oint \delta L}$$

DEFINIZIONE ASSIOMATICA (del 1° PRINCIPIO)

Esiste una grandezza di stato del sistema termodinamico la cui variazione durante una qualunque trasformazione termodinamica in assenza di variazione di E_c, di E_p e di ogni altra forma di energia del sistema termodinamico è pari alla differenza tra il calore Q globalmente scambiato dal S.T con l'esterno e il lavoro L globalmente scambiato dal S.T con l'esterno. A questa grandezza di stato si dà il nome di ENERGIA INTERNA.

$$\boxed{dU = \delta Q - \delta L}$$

Più in generale $dE = \delta Q - \delta L$

13/11/2013

1° P.T.

$$\boxed{\delta Q - \delta L = dU + dE_p + dE_c}$$ → validità generale:
- sistema chiuso → M
- sistema aperto → $\dot{m}$

il suo utilizzo è "più semplice" nel caso di sistemi chiusi

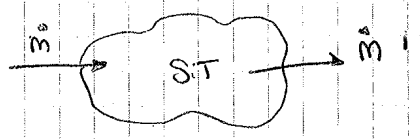
D.D. 1° PRINCIPIO S.T. APERTI

SISTEMI APERTI $\dot{m}, \dot{V}$

PORTATA IN MASSA $\dot{m}$

$$\boxed{\dot{m} = \frac{dm}{d\tau}} \left[\frac{Kg}{s}\right]$$

mi dice quò che entra ed esce dal mio s.t.



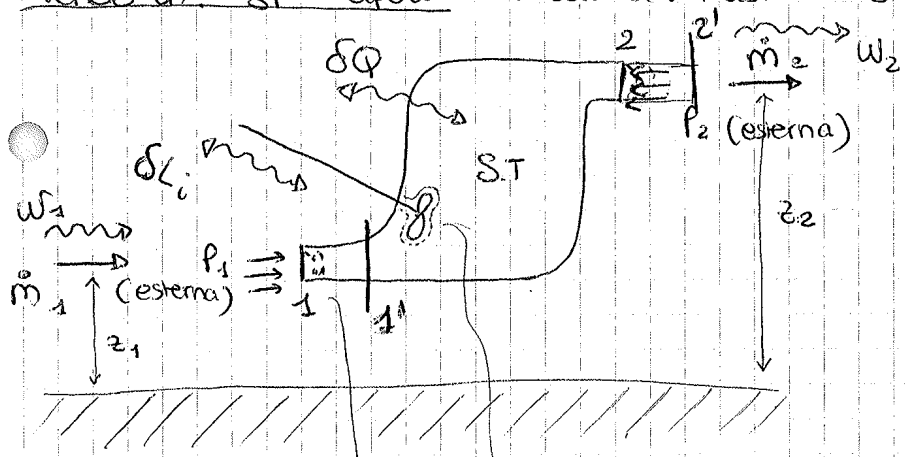
PORTATA VOLUMETRICA $\dot{V}$ (in volume)

$$\boxed{\dot{V} = \frac{dV}{d\tau}} \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 328

Prendo un ST aperto → scambia massa M e energia



- Suppongo di operare una trasformazione infinitesima (scambia δQ, δL_i)
- dL_i = è un lavoro scambiato da S.T ma potrebbe non essere l'unico

Turbina che effettua lavoro → le pale muovono e deformano la superficie di controllo

$$\boxed{\delta L = -\vec{F}_{est} \times d\vec{s}}$$

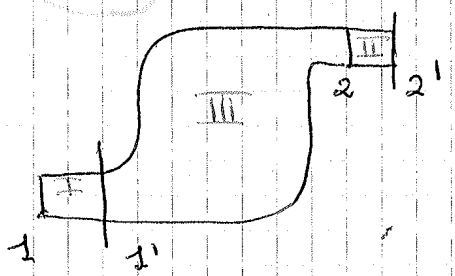
In 1 e 2, quando il fluido entra ed esce ho una pressione ⇒ quindi una forza che agisce e tende a deformare S.T., la superficie di controllo

(se reversibile $L = \int p\,dV$)
$L = L_{REV} - L_W$

- minimo 3 punti in cui S.T. scambia lavoro L
  - 1
  - 2
  - Turbina

All'istante τ il sistema termodinamico è compreso fra le sezioni 1 → 2 (ingresso → uscita)
↓
Trasformazione infinitesima ma durante il tempo $\delta\tau$
↓
All'istante $\tau + \delta\tau$ (alla fine) il S.T. si sarà "spostato" tra le sezioni 1' → 2'
↓
ho 3 volumi $\begin{bmatrix} 1 \to 1' \\ 1' \to 2 \\ 2 \to 2' \end{bmatrix}$

All'istante τ ho I + III (prima della trasformazione)
All'istante $\tau + \delta\tau$ ho III + II (dopo la trasformazione)



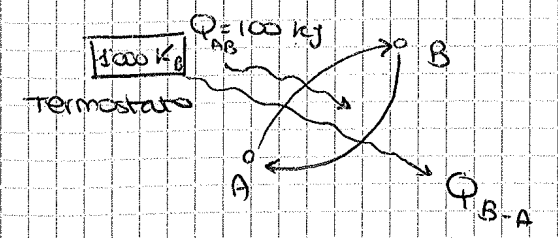
Il ST all'istante τ è costituito dalle parti (I + III); all'istante $\tau + \delta\tau$ è costituito dalle parti (III + II)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 328

1 (1.18) 4/12/2013

TRASFORMAZIONE IRREVERSIBILE



$\Delta U_{AB} = 50$ kJ

1

① $L_{A \to B}$

② $L_{B \to A}$

③ $Q_{B \to A}$

$\Delta S_{TOT} = 0{,}02$ kJ/K

- TRASFORMAZIONE A-B

$Q_{AB} - L_{AB} = \Delta U_{AB}$ EQ 1° PRINCIPIO

$100 \text{ kJ} - L_{AB} = 50 \text{ kJ} \Rightarrow L_{AB} = Q_{AB} - \Delta U_{AB}$

$L_{AB} = |Q_{AB}| - \Delta U_{AB} = 100 - 50 = 50$ kJ

$\boxed{L_{AB} = 50 \text{ kJ}}$

- TRASFORMAZIONE B-A

$Q_{BA} - L_{BA} = \Delta U_{BA}$ Non mi basta per risolvere il problema perché ho 2 incognite

$\downarrow$? $\downarrow$?

$\oint dU = 0$

Ho 2 sistemi termodinamici

ΔS è dato da ΔS di 2 oggetti

Termostato S.T.

$\Delta S_{TOT} = \Delta S_{termostato} + \Delta S_{ST}$

$\Delta S_{ST} = \emptyset$ perché la TRASF. evolve secondo un CICLO

$\oint dS = 0$

$\Delta S_{TOT} = \Delta S_{Term.}$ che è data da 2 contenuti

ΔS_T durante la TRASF AB ΔS_T durante la trasf BA

Poiché il termostato è internamente reversibile (CLAUSIUS o KELVIN-PLANK)

100 kJ S.T cede al termostato

$\Delta S_{TOT} = \Delta S_{T_{AB}} + \Delta S_{T_{BA}} = \frac{Q_{AB}}{T} + \frac{Q_{BA}}{T}$ ($Q_{AB} < 0$) quantità algebrica, non so il segno

$\Rightarrow \Delta S_{TOT} = -\frac{|Q_{AB}|}{T} + \frac{Q_{BA}}{T} \sim ?$

1000 K

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 328

Il calore latente è sempre molto grande sciogliendo e mettendo in gioco grandi quantità di energia.

GRAFICO

- Se non ho cambiamenti di stato $\boxed{Q_s = M c \Delta T}$ calore sensibile
- se ho passaggi di stato aggiungo al Q_s di riscaldamento

Q_L = calore latente $\Rightarrow \boxed{Q_L = M i_0}$ calore specifico di (fusione, condensazione ..)

PSICROMETRIA

PER L'ESAME LEGGO il TESTO! ESERCIZI SU MOLLER ⇒ usate il diagramma di Moller ⇒ calcolate le grandezze = casi semplici e devo fare i calcoli

USO
- DIAGRAMMA di MOLLER
- FORMULE

⇒ ma per diagramma qualunque siano i dati trovare il punto è facile se uso le formule alcuni calcoli sono semplici altri complicati perché $p_{vs}(T)$ non è dato come equazione ma come tabella

NOTA T è facile — viceversa è difficile

- $X = \frac{m_v}{m_a}$
- $\varphi = \frac{m_v}{m_a} \simeq \frac{p_v}{p_{vs}}$
- $X = 0{,}622 \frac{\varphi \cdot p_{vs}(T)}{p - \varphi\, p_{vs}(T)}$
- $h = 2'500\, X + (1 + 1{,}9\, X)\, T$

Con tabelle e diagramma di Moller $p_{vs}(20°C) = 2425$ Pa

$$X = 0{,}622 \cdot \frac{0{,}4 \cdot 2337}{101325 - 0{,}4 \cdot 2337} = 0{,}0058 \simeq 0{,}006$$

$$h = 2500 \cdot 0{,}0058 + (1 + 1{,}9 \cdot 0{,}0058) \cdot 20 = 34{,}7 \ kJ/kg$$

$T_R = 6°C$ (se la lattina è a 4°C $T < T_R$ allora si crea condensa all'esterno)

$$\varphi = \frac{p_v}{p_{vs}(T)} \qquad p_{vs}(T) = p_v$$

(1) applico $\varphi = \frac{p_v}{p_{vs}(T)} = \frac{p_v}{p_{vs}(20°C)}$ (T = 20°C, $p_{vs}(20°C)$ = 2'337)

$p_v = 0{,}4 \cdot 2337 = 934{,}8$ Pa

devo vedere a che T_R ho $p_{vs} = p_v$ — guardo tabella pressione di saturazione

$T_R \simeq 6°C$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 328

16/12/2013

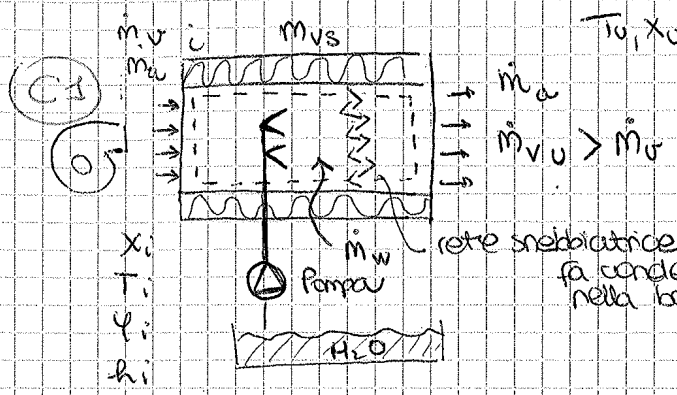
T_R = temperatura di rugiada

Se $T_{sup} \leq T_R$ allora la superficie sarà sede di condensa (superficiale) di vapore d'acqua

(C) UMIDIFICAZIONE

⇨ 80/85 % $\boxed{C1}$ PER SATURAZIONE ADIABATICA ⇒ TRASF. ISOENTALPICA (h = cost)

15/20 % $\boxed{C2}$ A VAPORE o A ULTRASUONI



acqua nebulizzata nella corrente d'aria mediante ugelli, aumento superficie contatto aria acqua → favorisco evaporazione

rete sgocciolatrice fa condensare l'acqua che ricade nella bacinella

⇒ Tramite pompa si nebulizza più acqua di quella che può evaporare, l'aria può accogliere al massimo una massa di m_v S ⇒ ma, mettendo più acqua le gocce che non evaporano ricadono mediante rete sgocciolatrice ⇒ ma in TAL MODO sono CERTA che ho l'ARIA in CONDIZIONI SATURE

↓

$\boxed{\varphi_u = 100\%}$ ⇨ SATURAZIONE ADIABATICA

(1) $\dot m_{ai} = \dot m_{au} = \dot m_a$

(2) $\dot m_{v\,ingresso} = \dot m_{v\,uscita}$

$$\dot m_{vi} + \dot m_w = \dot m_{vu}$$

$$\dot m_v = \dot m_a \cdot X$$

$$\dot m_a \cdot X_i + \dot m_w = \dot m_a \cdot X_u$$

$$\boxed{\dot m_w = \dot m_a (X_u - X_i)}$$

PORTATA IN MASSA di H_2O EVAPORATA

(3) $\cancel{\dot Q} - \cancel{\dot L_i} = \dot m_a \Delta h$

$\dot L_i = 0$ NON ho PARTI in MOVIMENTO ⇒ $\boxed{\dot m_a \cdot \Delta h = 0}$

$\dot Q = 0$ pareti isolate non ho scambio di calore

ma ho anche $\dot m_w$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 328

Per far evaporare l'acqua prendo 2'500 kJ per fare evaporare 1 kg di acqua → l'aria si raffredda poiché viene sottratta energia, cioè CALORE LATENTE, da essa per far evaporare l'acqua.

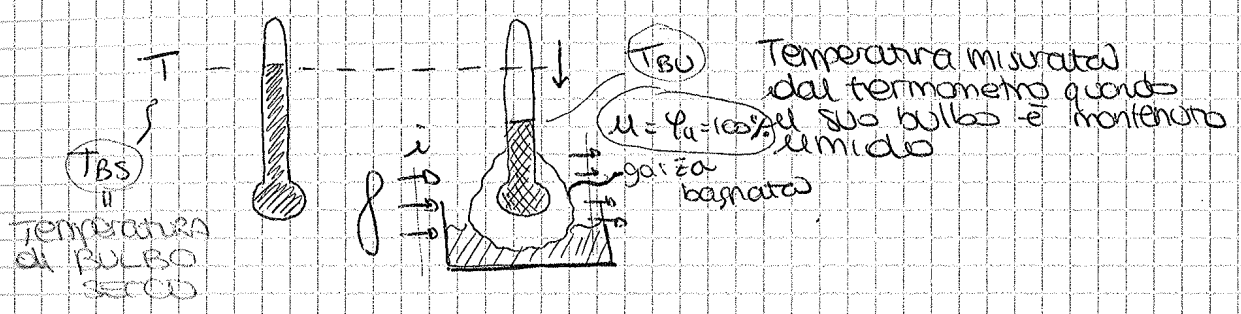
Il punto (u) è un punto a $\varphi = 100\%$ e ha una determinata temperatura $T_u = T_{BU}$ → TEMPERATURA di BULBO UMIDO

↓

è una temperatura importante

DERIVA da un ESPERIMENTO il NODO

Termometro che misura T della cucina, garza che rimane bagnata sempre, prendo un ventilatore generando un flusso d'aria contro la garza

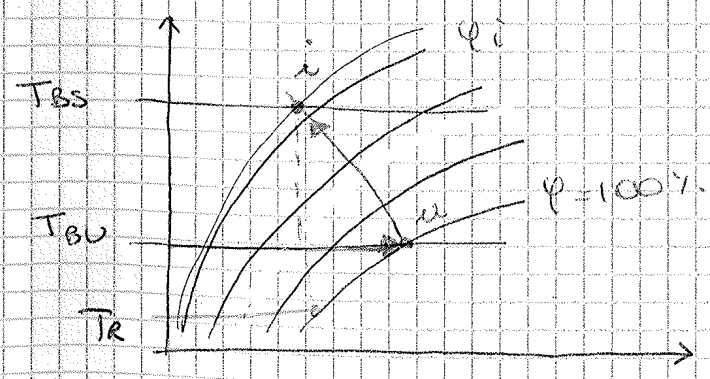


↓

[metodo più preciso per misurare l'umidità in un ambiente relativa]

↳ il materiale nel capello si "accorcia" con più umidità.

Diagramma di Mollier



Sapendo T_{BS} ($T_{ambiente}$) misurando con l'esperimento di prima T_{BU} ~~[illegible]~~ si salpa sulla (φ_i) mediante la isoentalpica da $\varphi = 100\%$

N.B. $T_{BU} \neq T_R$

$T_R < T_{BU}$

$T_R = T_{BU}$ in condizione di saturazione allora $T_R = T_{BU} = T_{BS}$ coincidono

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Se } \varphi_i = 100\% \Rightarrow T_{BS} = T_{BU} = T_R \\ \text{Se } \varphi_i < 100\% \Rightarrow T_{BS} > T_{BU} > T_R \end{array}}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 328

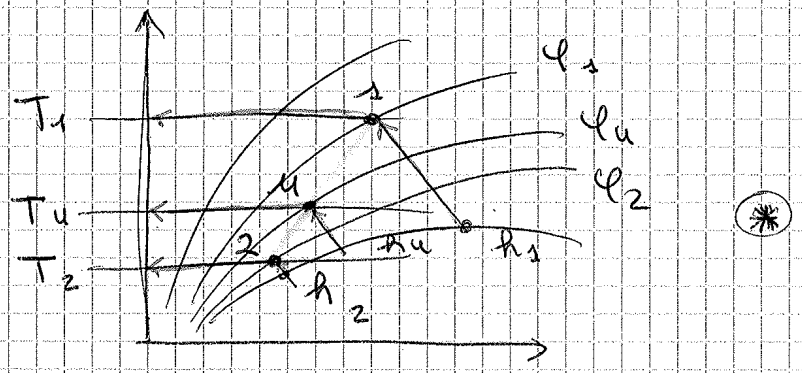
$$\boxed{h_u = \frac{\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_a h_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}}}$$

L'entalpia della miscela h_u è data dalla media pesata delle entalpie delle 2 correnti d'aria essendo pesi le rispettive portate in massa.

ATTENZIONE !!

In generale $\cancel{T_u = \frac{\dot{m}_{a1} T_1 + \dot{m}_{a2} T_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}}}$

USO IL DIAGRAMMA di MOLLIER!



Il punto che rappresenta lo stato termodinamico della miscela cade sulla congiungente 1-2 degli stati delle 2 correnti

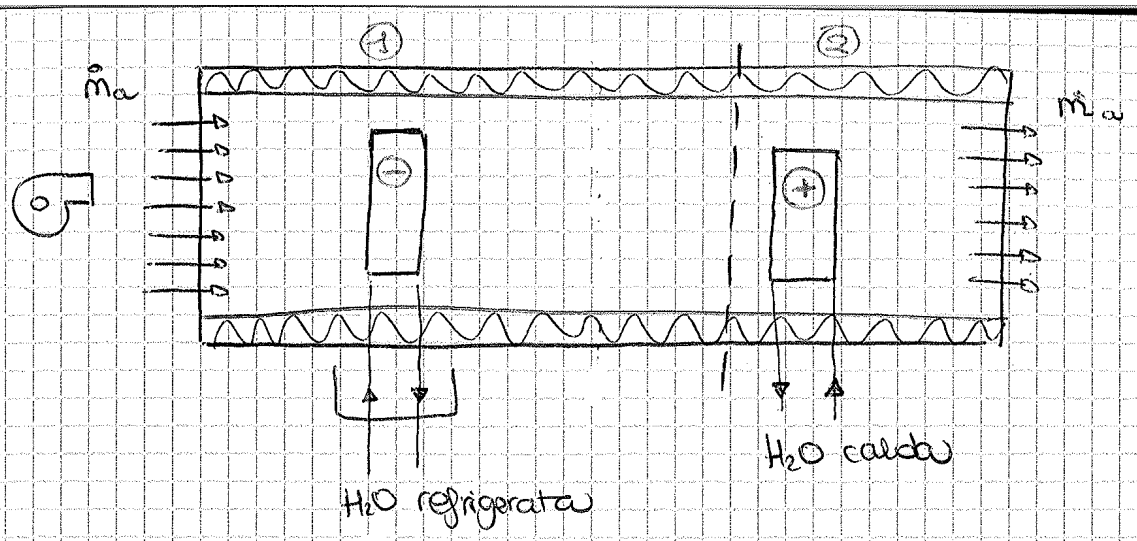
Il punto u taglia il segmento 1-2 secondo una proporzione detta "REGOLA della LEVA" cioè la lunghezza del segmento che sta dalla parte opposta rispetto a u è proporzionale alla portata di 2 analogamente vale il contrario per l'altro segmento

$$\boxed{\begin{aligned} \overline{u2} &\propto \dot{m}_{a1} \\ \overline{u1} &\propto \dot{m}_{a2} \end{aligned}}$$

- RAPPORTO COERENTE
- CADE SU CONGIUNGENTE 1-2

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 328



$$\boxed{\dot{Q}_r = \dot{m}\,\Delta h = \dot{m}_a (h_1 - h_e) + (\dot{m}_L h_L) < 0}$$

POTENZA BATTERIA di RAFFREDDAMENTO e DEUMIDIFICAZIONE

$= 0$ può essere spesso trascurato oppure $h_L \simeq c_{H_2O} T_1$

$$\boxed{\dot{Q}_{post} = \dot{m}_a (h_i - h_1) > 0}$$

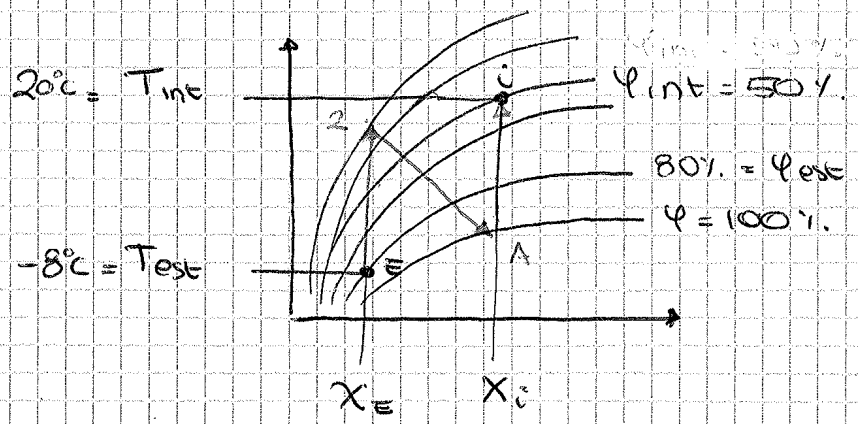
POTENZA BATTERIA di POST-RISCALDAMENTO

$$\boxed{\dot{m}_L = \dot{m}_a (X_E - X_1)}$$

PORTATA di H_2O CONDENSATA nella batteria (1)

TRASFORMAZIONE IDEALE INVERNALE

$T_{est} = -8\,°C$ $\varphi_{est} = 80\%$ | $T_{int} = 20\,°C$ $\varphi_{int} = 50\%$

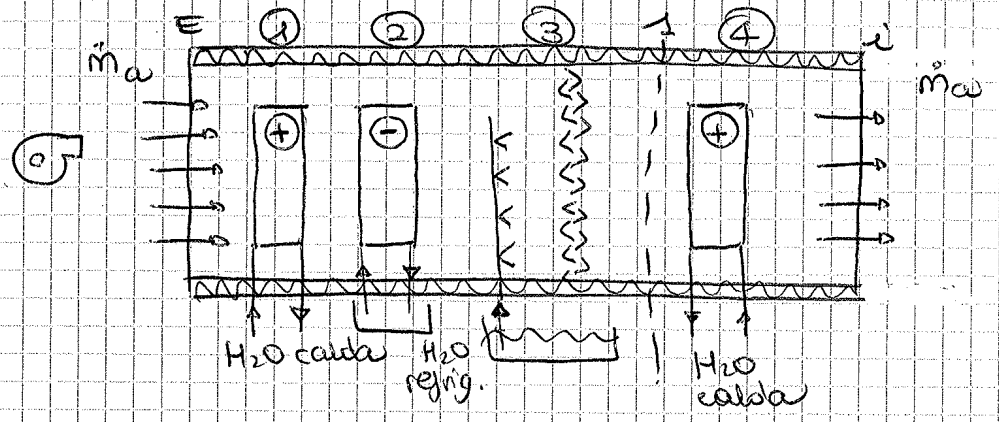


I grammi di vapore d'acqua sono pochi devo umidificare che significa TRASF ADIABATICA ISOENTALPICA che arriva al 100% ma io devo arrivare al 50%! Il punto deve scaldarsi fino ad arrivare al punto 2 al quale applicare una SATURAZIONE ADIABATICA

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 328

(N.B.) spesso si presentano nello stesso giorno differenze di temperatura per questo spesso nello stesso impianto ho apparecchi in modo da utilizzarlo tutto l'anno che copre le esigenze di controllo di manico annuale



1. BATTERIA per RAFFREDDAMENTO e DEUMIDIFICAZIONE
2. BATTERIA di POST-RISCALDAMENTO
3. SATURATORE ADIABATICO
4. BATTERIA di PRE-RISCALDAMENTO

- In ESTATE sono attivi 1 e 2 (e 3 e 4 sono OFF)
- In INVERNO sono attivi 4 e 3 e 2 (e 1 è OFF)

UNITÀ di TRATTAMENTO ARIA (UTA)
CENTRALE TRATTAMENTO ARIA (CTA)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 328

$$\frac{\dot{Q}}{A} \propto \frac{\Delta T}{\Delta s} \quad e \quad \boxed{\frac{\dot{Q}}{A} \propto \frac{dT}{ds}}$$

$\Delta s \to 0$ infinitesimo

$\frac{dT}{ds}$ = GRADIENTE di TEMPERATURA lungo S

Flusso termico aerico è sempre proporzionale al gradiente di temperatura lungo S

→ passando alle equazioni ho che

$$\boxed{\frac{\dot{Q}}{A} = \text{cost} \cdot \frac{dt}{ds}}$$

dipende dal tipo di MATERIALE

cost = λ ⇒ CONDUCIBILITÀ TERMICA del MATERIALE

$\left[\frac{W}{mK}\right]$ o $\left[\frac{W}{m°C}\right]$ sono equivalenti perché parlo di dt = DIFFERENZA di TEMPERATURA

SI

$$\cancel{\frac{\dot{Q}}{A} = \lambda \frac{dt}{ds}}$$

⇒ VIOLA 1 DEI PRINCIPI della TERMODINAMICA ⇒ VIOLA il 2° PRINCIPIO per il SEGNO!

⇓

POSTULATO di CLAUSIUS!

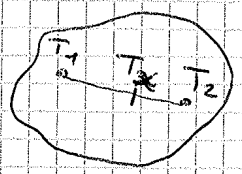
Perché il calore si sposta da T alta a T bassa!

⇓

$$\boxed{\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{dt}{ds}}$$

POSTULATO o (LEGGE) di FOURIER

non è mai stata contraddetta ma nemmeno provata! Quindi è solo un postulato o principio e non legge



Conoscendo T_1 e T_2 non posso però conoscere così T_x !!!

⇒

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 328

IPOTESI per RISOLVERE l'EQUAZIONE generale della CONDUZIONE

$\boxed{Hp}$

① REGIME STAZIONARIO

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$$

② Assenza di generazione interna di calore

$$q_i = 0$$

③ SISTEMA MONODIMENSIONALE:

le grandezze variano solamente lungo UNA DIREZIONE (x)

$$\nabla^2 T \Rightarrow \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0}$$

Quindi otterrei

$$\nabla^2 T + \cancel{\frac{q_i}{\lambda}} = \frac{1}{a}\cancel{\frac{\partial T}{\partial \tau}}$$

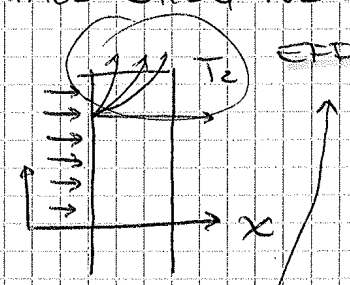
$$\nabla^2 T = 0$$

PER IL PRINCIPIO di FOURIER

la direzione di propagazione del flusso termico è sempre ⊥ alle superfici isotermiche → se ho una superficie bombata il flusso ha una direzione che varia da punto a punto → quindi il flusso avrebbe due componenti una su X e una su Y ⇒

NON AVREI PIÙ UN SISTEMA MONODIMENSIONALE

⇒ FUNZIONA se la LASTRA è uno STRATO PIANO di DIMENSIONI INFINITE A FACCE PARALLELE di UN MATERIALE OMOGENEO



EFFETTO di BORDO

⇒ Nei muri ho questo anche se le dimensioni non sono infinite perché lo spessore è sottile rispetto all'estensione, quindi ho solo un EFFETTO di BORDO diverso

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 328

$$\underbrace{\frac{\dot{Q}}{A}}_{\text{è indipendente da } x} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

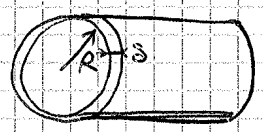
$$\boxed{\int_0^s \underbrace{\frac{1}{\lambda}\frac{\dot{Q}}{A}}_{\text{cost}} dx = \int_{T_1}^{T_2} -dT}$$

$$\frac{1}{\lambda}\frac{\dot{Q}}{A} \cdot s = -(T_2 - T_1)$$

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{\lambda A}{s}(T_1 - T_2) = -\frac{\lambda A \Delta T}{s}}$$

PARETE PIANA MONOSTRATO (e λ = cost)

Se avessi un recipiente cilindrico con spessore << raggio allora la curvatura è piccola e in approssimazione posso usare la formula



$R \gg s$

$\frac{\lambda}{s} = \frac{1}{R} = C$ = CONDUTTANZA TERMICA dello STRATO $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ o $\left[\frac{W}{m^2 \circ C}\right]$

$\frac{s}{\lambda} = R$ = RESISTENZA TERMICA dello STRATO $\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$ o $\left[\frac{m^2 C}{W}\right]$

$$\frac{d^2T}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{dT}{dx} = \text{cost} = b$$

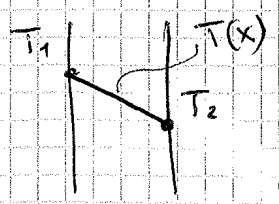
$$\int_0^x b\,dx = \int_{T_0}^{T(x)} dT \Rightarrow \boxed{T = bx + \text{cost}}$$

Quindi significa anche che

In uno STRATO PIANO OMOGENEO

$$\boxed{T = a + bx}$$

cioè la TEMPERATURA varia linearmente lungo lo spessore (lungo x).



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 328

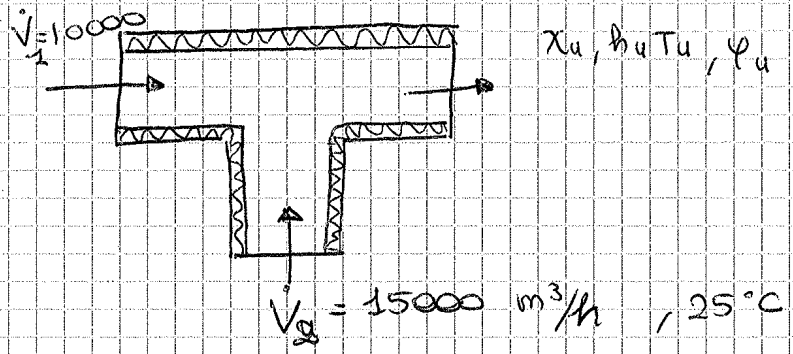
$h_1 = 58,4$ kJ/kg
$x_1 = 12,6$ g/kg
$h_2 = 43,4$ kJ/kg
$\varphi_2 = 100\%$

$x \cong 11$ g/kg

PORTATA di H_2O CONDENSATA

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (x_1 - x_2) = \frac{12000}{3600}(12,6-11)\cdot 10^{-3} = 5,3\cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

ES. 1.5



$p_{vs}(10°C) = 1227$ Pa

$p_{vs}(25°C) = 3166$ Pa

$$x_1 = 0,622 \frac{0,5\cdot 1227}{101325 - 0,5\cdot 1227} = 3,79\cdot 10^{-3} \text{ kg/kg}$$

$$x_2 = 0,622 \frac{0,75\cdot 3166}{101325 - 0,75\cdot 3166} = 0,0149 \frac{\text{kg}}{\text{kg}}$$

$$h_1 = 2500(3,79\cdot 10^{-3} + 1,9\cdot 3,79\cdot 10^{-3})\cdot 10 = 19,65 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_2 = 2500(0,0149) + (1 + 1,9\cdot 0,0149)\cdot 25 = 63,31 \text{ kJ/kg}$$

$$\sum \dot{m}_a \Delta h = 0 \rightarrow h_u = \frac{\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}}$$

Può essere fornita la PORTATA di MASSA
o <u>PORTATA VOLUMETRICA</u> ⇐ in genere data

$$\dot{m}_a = \rho \dot{V}$$

↑ ma ogni componente ha lo stesso valore per cui

ho $\dot{V} = \dot{V}_a = \dot{V}_v$ ⇒

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 328

A $\varphi_e = 75\%$ $T_e = 30°C$

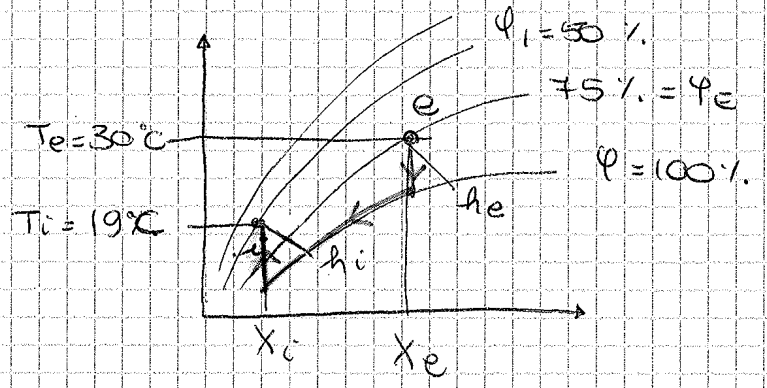
$\Downarrow$

$\varphi_i = 50\%$ $T_i = 19°C$

$V = 20'000\ m^3/h$ volume aria all'ora

$\left[\dot{Q}_r = ?\quad \dot{Q}_{post} = ?\quad \dot{m}_w = ?\right]$

CICLO ESTIVO

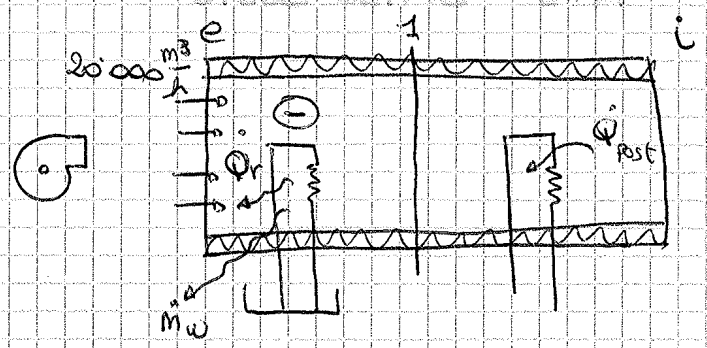


trovati (i) ed (e) leggo h_i, X_i e h_e, X_e

$x_i = 6{,}8\ g/kg$ $x_e = 20{,}2\ g/kg$

$h_i = 36{,}4\ kJ/kg$ $h_e = 81{,}9\ kJ/kg$

CICLO ESTIVO UTA



$$\dot{Q}_r = \dot{m}(h_1 - h_e) + \dot{m}_w h_w = \frac{1{,}2 \cdot 20'000}{3600} \cdot (25{,}5 - 81{,}9) + \dot{m}_w c_{H_2O} T_1$$

$c_{H_2O} = 4{,}186\ kJ/kg$

$T_1 = 8{,}3°C$

$$\dot{m}_w = \dot{m}_a (x_e - \overset{= x_1}{x_i}) = \frac{1{,}2 \cdot 20000}{3'600} (20{,}2 - 6{,}8)\, 10^{-3} = 0{,}08\ kg/s$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 328

Teorica

19/12/2013

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

$\lambda = \left[\frac{W}{mK}\right]$ in generale $\lambda = f(T)$ → temperatura

- λ assume valori molto diversi a seconda del materiale soggetto alla conduzione

ARIA → buon isolante termico. Il meccanismo di trasporto è dovuto all'energia cinetica

Esaminiamo l'aria ferma e immobile → OTTIMO ISOLANTE

CON ARIA → ho accanto alla CONDUZIONE ho la CONVEZIONE

Ma i materiali che ho sono eterogenei che posso approssimativamente considerare omogenei, sono materiali porosi che sfruttano l'aria come isolante termico intrappolandola in pori, spazi molto stretti.

→ Non è il materiale solido ma l'aria a fungere da isolante

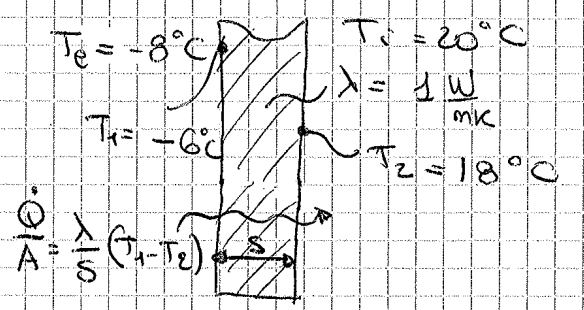
MATERIALI da COSTRUZIONE ISOLANTI sono quelli con $\boxed{\lambda < 0,12 \ \frac{W}{mK}}$ → capacità termica elevata

METALLI e BUONI CONDUTTORI → nuvola di elettroni liberi
CONDUTTORI TERMICI e ELETTRICI

Alluminio
Rame dissipa bene il calore conducendolo o trasportandolo lontano.

In generale	$\lambda \uparrow$	se	$\rho \uparrow$	
In generale	$\lambda \uparrow$	se	$T \uparrow$	nei materiali isolanti
	$\lambda \downarrow$	se	$T \uparrow$	nei metalli

PARETI MULTISTRATO



spessore
s?

→ s = 7 cm

→ $\frac{\dot{Q}}{A}$ ⇒ calcolo per effettuare calore maggiore ma così spreco soldi con un impianto grande ma devo costruirlo bene per limitare con provvedimenti passivi lo spreco di energia

CALDAIA PICCOLA EFFICIENTE che consuma POCO

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 328

$$\left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_1 = \left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_2 = \left(\frac{\dot{Q}}{A}\right)_3 = \frac{\dot{Q}}{A}$$

in REGIME STAZIONARIO è vero perché tanto calore entra quanto esce e quindi un riscaldamento o raffreddamento

$$\begin{cases} \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\lambda_1}{S_1}(T_1 - T_2) \\ \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\lambda_2}{S_2}(T_2 - T_3) \\ \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\lambda_3}{S_3}(T_3 - T_4) \end{cases}$$

(1) • ISOLO A 2° MEMBRO le DIFFERENZE di TEMPERATURA

(2) • SOMMA o SOTTRAGGO

(1)
$$\begin{cases} \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{S_1}{\lambda_1} = T_1 - T_2 & + \\ \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{S_2}{\lambda_2} = T_2 - T_3 & + \\ \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{S_3}{\lambda_3} = T_3 - T_4 & = \end{cases}$$

(2)

$$\frac{\dot{Q}}{A}\left(\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}\right) = T_1 - \cancel{T_2} + \cancel{T_2} - \cancel{T_3} + \cancel{T_3} - T_4$$

⇓

rimangono solo le T che conosco

$$\boxed{\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}}(T_1 - T_4)}$$

$\frac{\dot{Q}}{A}$ di PARETE MULTISTRATO

Per "n" STRATI

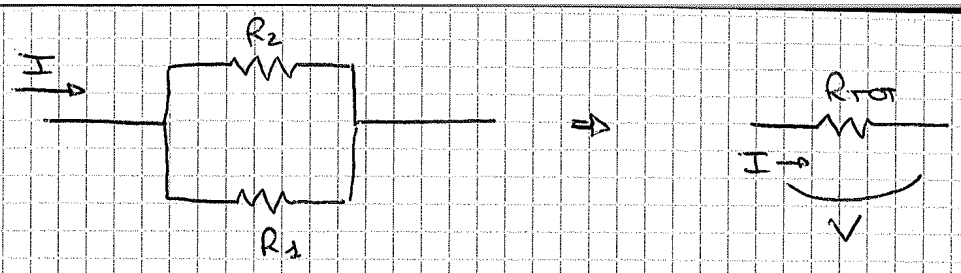
$$\boxed{\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{\lambda_i}}(T_1 - T_{n+1})}$$

$$\boxed{\sum_{i=1}^{n} \frac{S_i}{\lambda_i} = \sum_{i=1}^{n} R_i = R}$$ → RESISTENZA TERMICA della PARETE MULTISTRATO $\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$ $\left[\frac{m^2 \, °C}{W}\right]$

$$\boxed{R_i = \frac{S_i}{\lambda_i}}$$ RESISTENZA TERMICA della n-esima STRATO

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 328

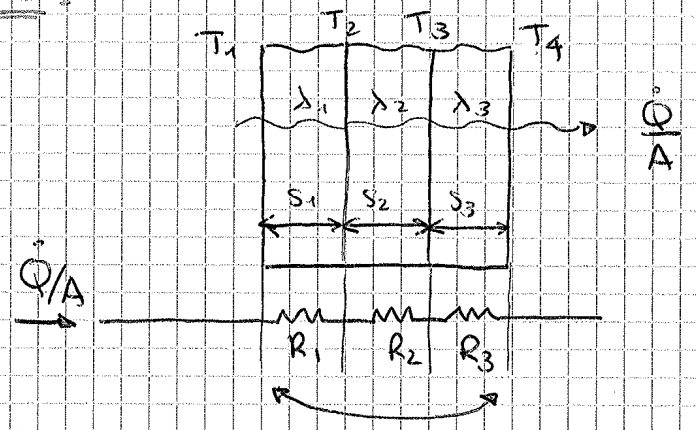
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 328



$$V = R_{TOT} \cdot I$$

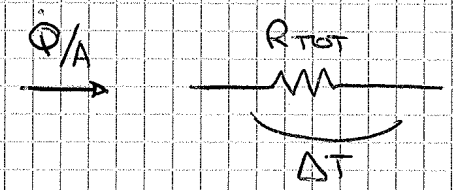
$$R_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

N.B.!



$$\Delta T = T_1 - T_4$$

$\Downarrow$



$$R_1 = \frac{S_1}{\lambda_1}$$

$$R_2 = \frac{S_2}{\lambda_2}$$

$$R_3 = \frac{S_3}{\lambda_3}$$

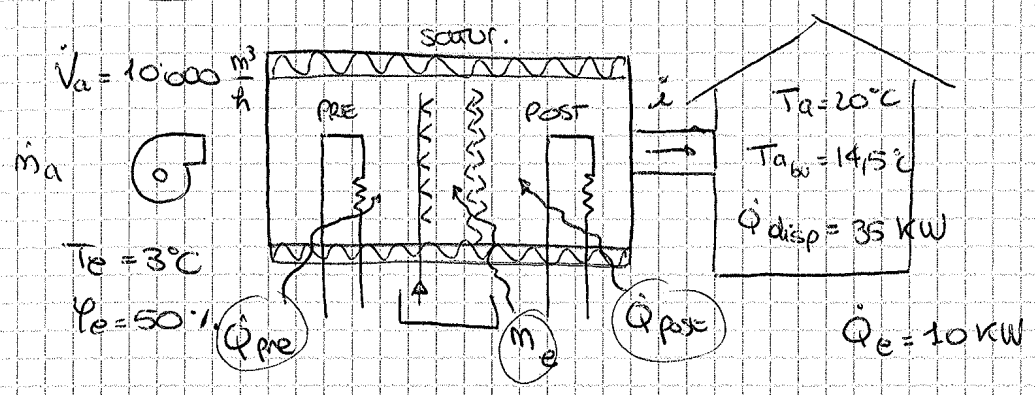
con
- $R_{TOT} = R_1 + R_2 + R_3$
- $R_{TOT} = \left(\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}\right)$
- $\Delta T = \left(\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}\right) \cdot \frac{\dot{Q}}{A}$
- $\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{1}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \frac{S_3}{\lambda_3}} \cdot \Delta T$
- $\boxed{\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{1}{R_{TOT}} \cdot \Delta T}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 328

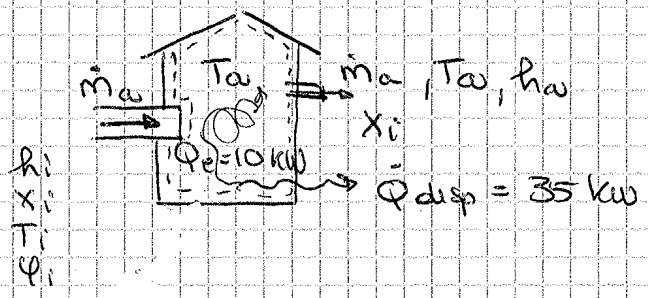
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 328

RISCALDAMENTO

T_{bu} = bulbo umido



$\dot{Q}_{pre}$? $\dot{Q}_{post}$ = ? $\dot{m}_e$ = ?

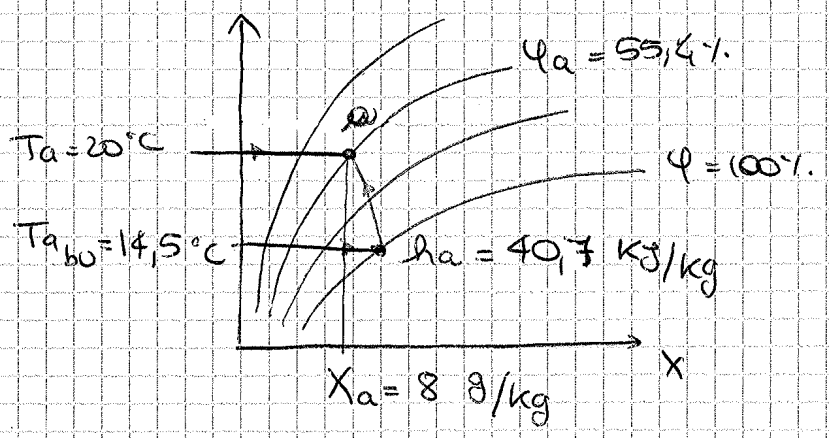


$$\dot{Q} - \cancel{\dot{L}_i}^{=0} = \dot{m}_a \Delta h = m_a (h_a - h_i)$$

$$|\dot{Q}_e| - |\dot{Q}_{disp}| = \dot{m}_a (h_a - h_i)$$

Da Mollier $\Rightarrow$ $T_a = 20°C$

$T_{a_{bu}} = 14,5°C$



$$\dot{m}_a = \rho_a \dot{V}_a = \frac{p_a}{R_a T_e} \cdot \frac{10000}{3600} \cong 3,4 \text{ kg/s}$$

R_a → 287, T_e → 3+273

p_a → $p - \varphi_e \cdot p_{vs}(T_e)$

p → 101325, φ_e → 0,5, $p_{vs}(T_e)$ → 758 Pa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 199 di 328

CONDUZIONE del CALORE

Come si misura λ ? ⇒ CONDUTTANZA in LASTRA PIANA

1.1

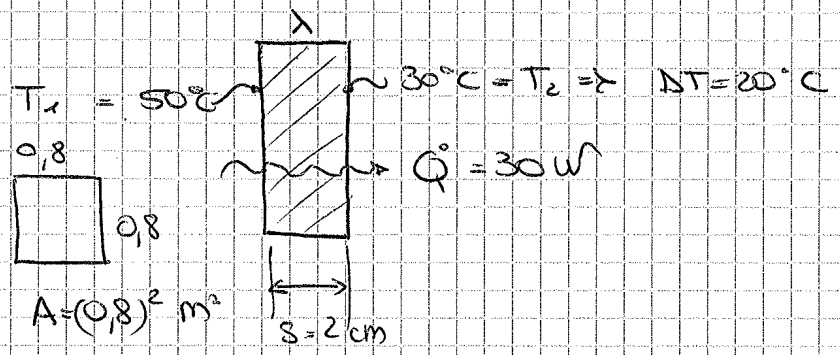
lastra di polistirolo schiacciata tra 2 piastre che si possono riscaldare a T diverse ⇒ $\Delta T = 20°C$

$T_1 = 50°C$ $T_2 = 30°C$

sistema a REGIME permanente in modo che le T non variano più.

Misurano il flusso termico $= 30\ W$

$0{,}8 \times 0{,}8\ m$ di pannelli $A = (0{,}8)^2\ m^2$

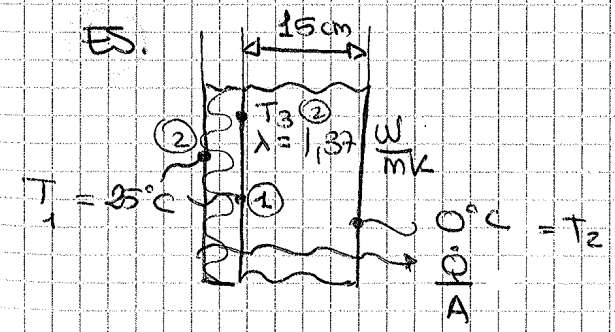


Applicando il PRINCIPIO di FOURIER

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\frac{\lambda}{\delta}\Delta T \qquad \lambda = -\frac{\delta\,\dot{Q}/A}{\Delta T} = \frac{2\cdot 10^{-2}\cdot 30/(0{,}8)^2}{20}$$

$$\lambda = 0{,}047\ \frac{W}{mK}$$

ES.



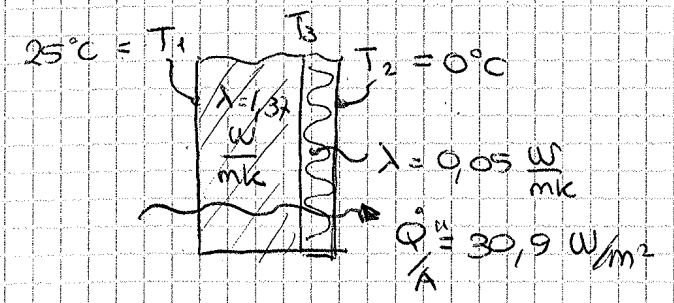
$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\frac{\lambda(T_2 - T_1)}{\delta}$$

① T_1 è nota

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -1{,}37 \cdot \frac{0-25}{15\cdot 10^{-2}} = 228{,}3\ \frac{W}{m^2}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 199 di 328

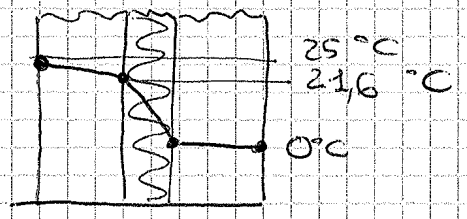
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 201 di 328



[la posizione di un isolante in una parete nel flusso termico è indifferente (a dx o sx o in mezzo) è uguale!]

CAMBIA LA DISTRIBUZIONE DI TEMPERATURA

$$T_3 = T_1 - \frac{\dot{Q}'/A \cdot s}{\lambda} = 25 - \frac{15 \cdot 10^{-2} \cdot 30,9}{1,37} = 21,6\,°C$$



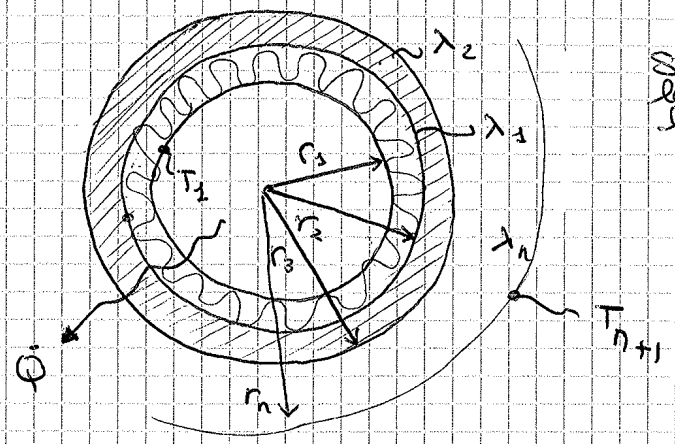
[Diventa importante la posizione dell'isolante ai fini della condensa]

PER LE TEMPERATURE APPROSSIMO FACENDO UN PESATO DA UNA PARTE E UNO DALL'ALTRA

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 201 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 203 di 328

STRATO CILINDRICO con MATERIALI DIVERSI



Simile al passaggio dalla lastra piana omogenea al lastra piana multistrato

geometria cilindrica multistrato

n = n° di strati

$$\boxed{\dot{Q} = \frac{2\pi L (T_1 - T_{n+1})}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)}}$$

Per lo strato piano (PARETE PIANA MULTISTRATO)

$$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{\sum \frac{S_i}{T_i}}$$

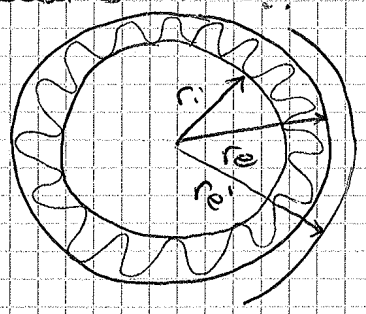
Nel caso di un singolo strato nella parete piana più aumenta lo spessore dello strato a parità di T_1 e T_2 più diminuisce il FLUSSO TERMICO

$\Downarrow$

$\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\lambda A}{S}(T_1 - T_2)$ ⇒ Per isolare meglio se aumento lo SPESSORE nello STRATO PIANO diminuisco lo SCAMBIO di CALORE ISOLO MEGLIO

STRATO CILINDRICO

Cosa succede??



Se aumento lo spessore di isolante da r_e a r_e'

⇒ non necessariamente modifico la situazione perché TUTTO DIPENDE dal RAPPORTO $\frac{r_e}{r_i}$

- PER STRATO PIANO

$R = \frac{S}{\lambda} \uparrow$ ma $A = cost$

- PER CILINDRO

$R = \frac{S}{\lambda} \uparrow$ ma $A \uparrow$

Non è detto che compensi l'aumento della superficie di scambio

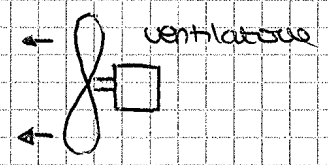
ESISTE UN RAGGIO CRITICO di di sotto del quale l'aumento dello spessore comporta un PEGGIORAMENTO

→ devo aumentare per uno spessore tale che $r > r_{critico}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 203 di 328

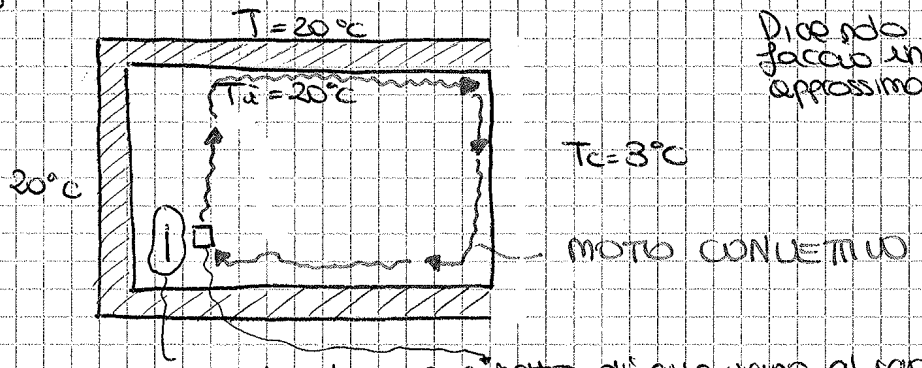
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 205 di 328

Il moto relativo può essere causato da una pompa o un ventilatore.



➡ L'aria si muove a causa di DIFFERENZE di TEMPERATURA

Stanza



Dicendo che la T_i = 20°C faccio una grande approssimazione

MOTO CONVETTIVO

prendendo un pacchetto di aria vicino al radiatore quest'aria, le molecole, si trovano a 40°C
Aumenta volume, diminuisce la densità ρ

ρ < minore della densità del fluido in cui è immerso

⇒ questo cubetto di aria galleggia e sale!
Riceve una spinta

Il suo posto viene occupato da un cubetto vicino con lo stesso calore. Il cubetto caldo che è salito si raffredda a contatto con superficie più esterna e il soffitto → il V diminuisce, ρ aumenta
il pacchetto è più pesante e scende

Trova il vetro si raffredda e accelera verso il pavimento spinto dalle altre particelle
ritornerà vicino al termosifone

⇒ VORTICE

L'aria si muove a causa degli scambi convettivi stessi

⇩

è necessaria la presenza di una grandezza senza la quale non avrei moti convettivi

PESO SPECIFICO = $\frac{N}{m^3}$

DENSITÀ = $\frac{kg}{m^3}$

FORZA di GRAVITÀ ⇒ ACCELERAZIONE di GRAVITÀ

(la forza tira più velocemente verso il basso l'acqua che me.)
→ galleggio

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 205 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 207 di 328

08/01/2013

Bassa velocità → moto laminare
Alta velocità → moto turbolento

NUMERO di REYNOLDS (Re) o (N_{RE})

$$\boxed{Re = \frac{\rho v D}{\mu}}$$

Numero adimensionale [-]

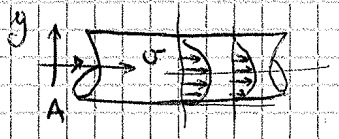
- ρ = densità [kg/m³]
- v = velocità media del fluido [m/s]
- D = grandezza caratteristica (nel condotto a sezione circolare $D \equiv \phi$) [m]
- (μ) = viscosità dinamica del fluido [kg/ms]

μ = VISCOSITÀ dinamica
Misura l'attrito all'interno dei vari strati che scorrono l'uno di fianco all'altro, sono gli SFORZI TANGENZIALI

(μ) = GRANDEZZA CARATTERISTICA del FLUIDO

$$\boxed{\tau = \mu \frac{dv_x}{dy}}$$

SFORZI TANGENZIALI [N/m²]

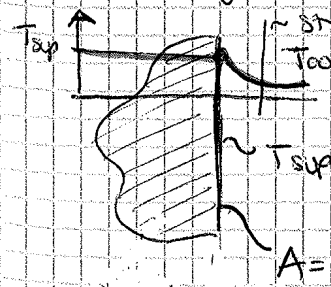


(1) Se $Re < 2'500 \div 3000$
⇓
MOTO LAMINARE

(2) Se $Re > 4000 \div$ ⇒ MOTO TURBOLENTO

CONVEZIONE
- NATURALE
  - LAMINARE
  - TURBOLENTO
- FORZATO
  - LAMINARE
  - TURBOLENTO

$$\dot{Q} = f(T_{sup} - T_{fluido})$$



~ TEMPERATURA di FLUIDO INDISTURBATO

A = superficie di contatto fluido-parete [m²]

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 207 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 209 di 328

TEOREMA di Buckingham o π

> Una relazione funzionale che lega tra loro n-variabili dipendenti e indipendenti, funzione (le variabili) di m-grandezze fondamentali può essere ridotta ad una relazione fra (n − m) parametri adimensionali

Nel nostro caso ho 7 variabili dipendenti e indipendenti

$n = 7$

le grandezze fondamentali da cui dipendono le grandezze h_c sono

LUNGHEZZA L, MASSA M, TEMPO τ, TEMPERATURA K

$m = 4$

$n - m = (7-4) = 3$ passo da 7 a 3 parametri adimensionali

GRUPPI ADIMENSIONALI

π_1, π_2, π_3

$$h_c = f(\lambda, \rho, c_p, v, D, \mu) \Longrightarrow \pi_1 = f(\pi_2, \pi_3)$$

$$\boxed{\pi_2 = Re = \frac{\rho v D}{\mu}} \quad [-]$$ Re = numero di Reynolds

$$\boxed{\pi_3 = Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}} \quad [-]$$ Pr = numero di Prandtl

$$\boxed{\pi_1 = Nu = \frac{h_c D}{\lambda}} \quad [-]$$ Nu = Numero di Nusselt

$$\boxed{Nu = f(Re, Pr)}$$ ⇒ determino la funzione variando Nusselt, Reynolds e Prandtl → trovo la funzione che le lega

Per esempio

Moto turbolento all'interno di condotti ⇒ TABELLE

$$\boxed{Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 209 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 211 di 328

FORZATO $Nu = A\, Re^m Pr^n$

NATURALE $\boxed{Nu = C(Gr \cdot Pr)^m = C\, Ra^m}$

Ra = NUMERO di RAYLERGH

$$\boxed{Ra = Gr \cdot Pr}$$

CAMPI di VALORI TIPICI per h_c

	LIBERA / NATURALE	FORZATO
ARIA	$2 \div 30\ W/m^2K$	$50 \div 1000\ W/m^2K$
H_2O	$100 \div 2500\ W/m^2K$	$300 \div 12000\ W/m^2K$

⇩

in generale h_c è maggiore

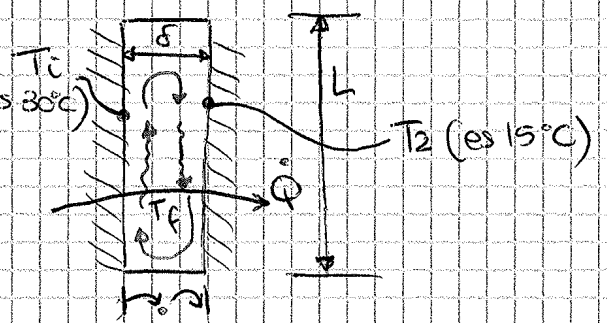
h_c di solito maggiore per i LIQUIDI

In aria scambio h_c, calore 10 volte minore di quello scambiato in acqua ⇒ in aria a 20°C sto bene, in acqua a 20°C congelo

h_c

AUTO	BASSA
• FORZATA	• NATURALE
• LIQUIDI	• GAS

INTERCAPEDINI D'ARIA



Nelle intercapedini uso le 2 temperature superficiali

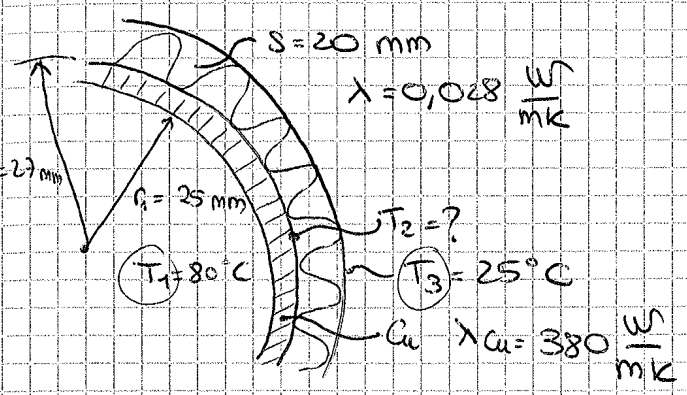
$$\dot{Q} = h_c A \cdot (T_1 - T_2)$$

$$\frac{h_c L}{\lambda} = Nu_s = C(Gr \cdot Pr)^n \left(\frac{L}{\delta}\right)^m \Rightarrow h_c = \frac{Nu\, \lambda}{L}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 211 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 213 di 328

1



$r_1 = 25$ mm
$r_2 = 27$ mm

1) $\frac{\dot{Q}}{L} = ?$

2) $T_2 = ?$

3) $R_{\text{TERMICA TOTALE}} = ?$

1) $$\frac{\dot{Q}}{L} = 2\pi L \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}}$$

$n = 2$ (Cu + isolante)

$$\frac{\dot{Q}}{L} = 2\pi \frac{T_1 - T_3}{\frac{1}{\lambda_{Cu}} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_3}{r_2}} = 2\pi \frac{80 - 25}{\frac{1}{380} \ln\left(\frac{27}{25}\right) + \frac{1}{0,028} \ln\left(\frac{47}{27}\right)} =$$

$$= 173,3 \ W/m$$

2) $T_2 = ?$

Una volta che conosco il flusso, quello che attraversa gli strati è sempre lo stesso.

PER IL SINGOLO STRATO DI RAME

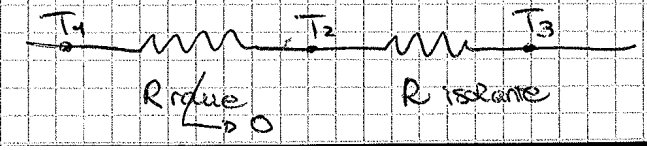
$$\frac{\dot{Q}}{L} = 2\pi \lambda_{Cu} \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\lambda_{Cu}} \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

incognita

$$T_2 = T_1 - \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{\dot{Q}}{L} \cdot \frac{1}{2\pi \lambda_{Cu}} = 80 - \ln \frac{27}{25} \cdot 173,3 \frac{1}{2\pi \cdot 380} =$$

$$79,99 \ °C$$

→ posso immaginarlo come due RESISTENZE IN SERIE



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 213 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 215 di 328

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{2260{,}8/3600}{1000 \cdot \frac{\pi (2{,}5 \cdot 10^{-2})^2}{4}} = 1{,}28 \ m/s$$

~> trasformo in kg/s

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{1000 \cdot 1{,}28 (2{,}5 \cdot 10^{-2})}{4{,}4 \cdot 10^{-4}} = 72727 > 2'500$$

(misure tipiche di un riscaldamento)

MOTO TURBOLENTO

c) $\boxed{Nu = A \, Re^m Pr^n}$

IL LIQUIDO (H_2O) SI RAFFREDDA!

$$Nu = \underline{0{,}023} \, Re^{0{,}8} \, Pr^{0{,}3}$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda} = \frac{4{,}4 \, 10^{-4} \cdot 4186}{0{,}63} = 2{,}92$$

$$Nu = 0{,}023 \, (72727)^{0{,}8} (2{,}92)^{0{,}3} = 245{,}9$$

$$Nu = \frac{h_c D}{\lambda} \Rightarrow \quad h_c = \frac{\lambda Nu}{D} = \frac{245{,}9 \cdot 0{,}63}{2{,}5 \cdot 10^{-2}} = 6195{,}9 \ \frac{W}{m^2 K}$$

$$\left(\dot{Q} = h_c A' (T_s - T_f) \right)$$

$\dot{Q} \rightarrow W$

analisi dimensionale

$$\dot{Q} = h_c A (T_s - T_f) = 6195{,}9 \cdot (2\pi r_i \cdot \cancel{L}^{\frac{2{,}5 \cdot 10^{-2}}{2}}) (38 - 65) =$$

$$13132{,}1 \ W/m$$

L'approssimazione sta nel considerare la T_{H_2O} costante dovrei applicare il 2° principio della Termodinamica

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 215 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 217 di 328

$h_c = 3,72 \frac{W}{m^2 K}$ essendo gas e scambio naturale h_c è basso (la stufa non scambia molto x convezione)

$\dot{Q} = h_c \cdot A (T_s - T_a) = 3,72 \cdot (2\pi r \cdot L) \cdot (60-20) =$

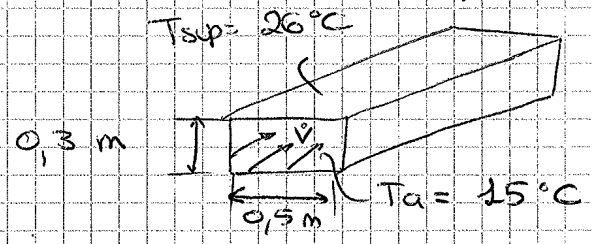
$= 3,72 \cdot [(2\pi \cdot 0,4) \cdot 1,6] \cdot 40 = 595,2 \, W$

↳ se cambia la forma cambia questo

LA STUFA SCAMBIA ANCHE PER IRRAGGIAMENTO!

$\dot{Q} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{irr.}$

2 Canale d'aria a sezione rettangolare



$\dot{V}_{aria} = 5400 \, m^3/h$

↳ portata

ARIA

$\lambda = 0,026 \, W/mK$

$\rho = 1,21 \, kg/m^3$

$\mu = 2 \cdot 10^{-5} \, kg/ms$

$c_p = 1000 \, J/kgK$

$\frac{\dot{Q}}{L} = ? \left[\frac{W}{m}\right]$ (come prima esercizio)

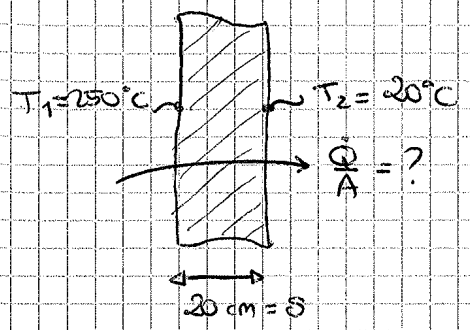
$D = D_{idraulico} = 4 \frac{A}{P} = 4 \cdot \frac{0,5 \cdot 0,3}{2 \cdot (0,5 + 0,3)}$

TURBOLENTO

SI RISCALDA $n = 0,4$

PER CASA

3 λ NON COSTANTE ma VARIA con T



$\lambda = 0,5 T + 0,3$

N.B. Ricordo che tutte le formule sono valide nelle ipotesi semplificative per cui sono state ricavate.

$\cancel{\frac{Q}{A} = \frac{\lambda (T_1 - T_2)}{\delta}}$ NO! questa formula era per lastra piana omogenea ma $\lambda = cost$ e regime stazionario

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 217 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 219 di 328

$$\lambda = aT + b = a\underbrace{\left(\frac{T_1+T_2}{2}\right)}_{T_{media\ parete}} + b = aT_m + b = \lambda_m$$

λ_m ≈ λ medio

(solo se λ varia linearmente)

POTREI USARE

$$\Rightarrow \boxed{\frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\lambda_m}{\delta}(T_1 - T_2)}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 219 di 328

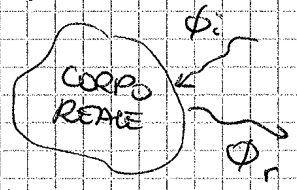
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 221 di 328

CORPO REALE

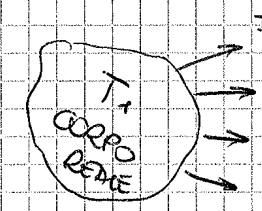
1] Ogni SOSTANZA REALE è caratterizzata dall'avere

- $\rho \neq 0$ (ogni sostanza è colorata ⇒ il verde lo vedo)
- ~~$\alpha = 1$~~ $\alpha + \rho = 1$ (gni sostanza opaca)
- $\alpha + \rho + \tau = 1$ (sostanza trasparente)

Qualunque sostanza reale rifletterà qualcosa



Calcolando il potere emissivo per un corpo a temperatura

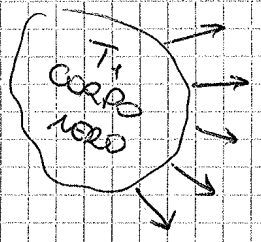


$E(\lambda) \Rightarrow$

$E_\lambda(T_1)$

A confronto con corpo nero alla medesima T_1, $E(\lambda)_{CN}$ (il corpo nero) è più efficiente alla medesima λ

$$E(\lambda)_{CN} > E(\lambda)_{CR}$$



$E_\lambda^{CN}(T_1)$

$$E_\lambda(T) < E_\lambda^{CN}(T)$$

(1) $$\boxed{\frac{E_\lambda(T)}{E_\lambda^{CN}(T)} = \varepsilon_\lambda \quad < 1}$$

$\boxed{[-]\ \varepsilon_\lambda}$ ⟹ EMISSIVITÀ DEL CORPO O DELLA SOSTANZA REALE

dipende da λ ← EMISSIVITÀ SPETTRALE

(1) Qualunque corpo emette meno del corpo nero a stessa λ e T.

2] Ogni sostanza emette come assorbe ogni radiazione elettromagnetica

TEOREMA di KIRCHOFF

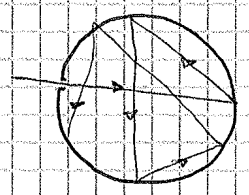
Emissività spettrale = coefficiente spettrale

[-] $$\boxed{\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda}$$ ⇒ vale ∀ sostanza in equilibrio termico

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 221 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 223 di 328

$\lambda_{MAX} \cdot T = cost$ RESTA LA STESSA per CORPO NERO e CORPO GRIGIO



SIMILE CORPO NERO
SFERA CAVA
con FORO PICCOLO per far entrare luce
ricoperta da strato NERO

Con buona approssimazione in una discreta percentuale di casi i materiali reali si comportano (in prima approssimazione) come corpi GRIGI

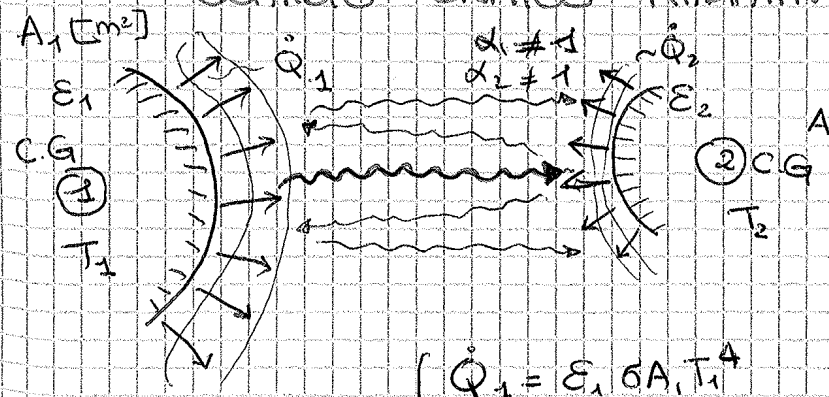
- LAMPADE A FLUORESCENZA (a gas) NON come CORPO GRIGIO
- In Illuminotecnica le lampade al neon emettono a bande ⇒ comportamento molto DIVERSO dal CORPO GRIGIO → punti molto illuminati e punti no.

- GAS ⇒ COMPORTAMENTO FORTEMENTE A BANDE (emettono e assorbono a bande) con ε_λ molto variabile da punto a punto.

- VETRO = comportamento NON DA CORPO GRIGIO
  e MATERIALI TRASPARENTI → sono trasparenti nel visibile ma nell'infrarosso il vetro è opaco

---

SCAMBIO TERMICO RADIATTIVO TRA 2 C.G (corpi grigi)



A = superficie
≡ = omogenea
T

$$\begin{cases} \dot{Q}_1 = \varepsilon_1 \sigma A_1 T_1^4 \\ \dot{Q}_2 = \varepsilon_2 \sigma A_2 T_2^4 \end{cases} \qquad \begin{cases} F_{12} = \dfrac{\dot{Q}_{1\to 2}}{\dot{Q}_1} \\ F_{21} = \dfrac{\dot{Q}_{2\to 1}}{\dot{Q}_2} \end{cases}$$

- Nel corpo nero ciò che è emesso da 1 è assorbito da 2 e viceversa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 223 di 328

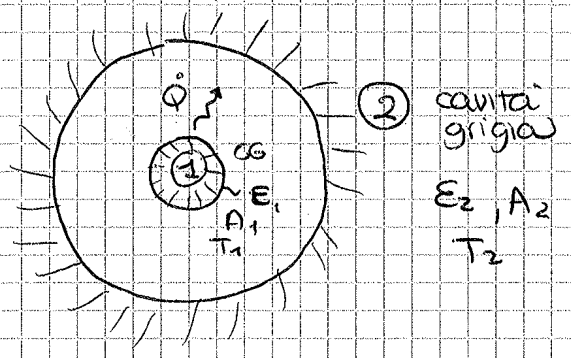
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 225 di 328

$$F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} - \cancel{1} + \cancel{1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \qquad \boxed{F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}}$$

(2) CASO PARTICOLARE

Corpo piccolo in cavità grande

$A_1 << A_2$



$$F_{12} = 1$$

$$F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

$$F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 + 1} = \varepsilon_1 \qquad \boxed{F_\varepsilon = \varepsilon_1}$$

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon_1 A_1 (T_2^4 - T_1^4)$$

$\Rightarrow$ la cavità si comporta come se fosse un corpo nero ($\varepsilon_2 = 1$)

- Quanto vale F_{21}?

UTILIZZANDO IL FATTORE DI RECIPROCITÀ

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \Rightarrow F_{21} = \frac{A_1}{A_2} \underbrace{F_{12}}_{1}$$

Dipendono tutte da ΔT!

- CONDUZIONE parete piana regime stazionario $f(\Delta T)$ $\longrightarrow$ $\dot{Q} = \frac{\lambda A}{\delta}(T_1 - T_2)$
- CONVEZIONE per. tutto $f(\Delta T)$ $\longrightarrow$ $\dot{Q} = h_c A (T_f - T_p)$ (ma più o meno dal ΔT perché ΔT influenza anche h_c)
- IRRAGGIAMENTO 2 corpi grigi $f(T_1^4, T_2^4)$ $\longrightarrow$ $\dot{Q} = \sigma F_\varepsilon A_1 (T_2^4 - T_1^4)$ [K!]

$\dot{Q} = h_r A (T_2 - T_1)$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 225 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 227 di 328

15/01/14

COEFF. h_r

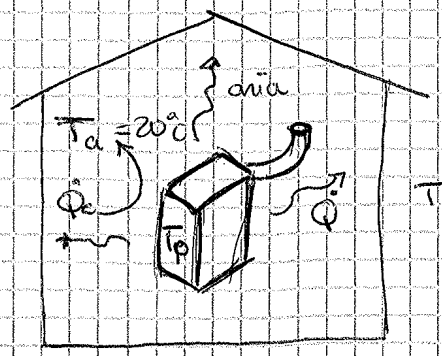
$\dot{Q} = h_r A (T_2 - T_1)$ [W]

$h_r = \sigma F_\varepsilon (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$

$h_r \simeq 4 \sigma F_\varepsilon T_m^3$ $\quad T_m = \frac{T_1 + T_2}{2}$ [K]

$\dot{Q} = \sigma A F_\varepsilon (T_2 \quad T_1$

SCAMBIO TERMICO fra UN CORPO e L'AMBIENTE



$T_a \simeq T_w$

$T_w = 18°C$ temperatura superfici

$$\dot{Q} = \dot{Q}_c + Q_{IRR} = h_c A (T_p - T_a) + \sigma A F_\varepsilon (T_p^4 - T_w^4) =$$

$$= h_c A (T_p - T_{a\,amb}) + h_r A (T_p - T_{w\,amb}) =$$

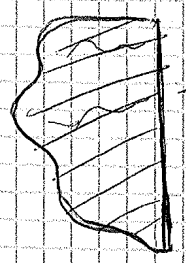
$$= (h_c + h_r) A (T_p - T_{amb})$$

$\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ $\boxed{h = h_c - h_r}$

COEFFICIENTE di SCAMBIO TERMICO LIMINARE

↓ tra superficie e aria su cui essa poggia

↓ tra superficie e ambiente su cui si affaccia



$\dot{Q}_c$ $\quad \dot{Q}_r$

$\dot{Q}_{liminare}$ = scambio termico liminare

$\Downarrow$

$(\dot{Q}_c + \dot{Q}_r)$

$$\boxed{\dot{Q} = h A (T - T_a)}$$

posso usare h senza passare da h_c e h_r

↓

SCAMBIO TERMICO LIMINARE

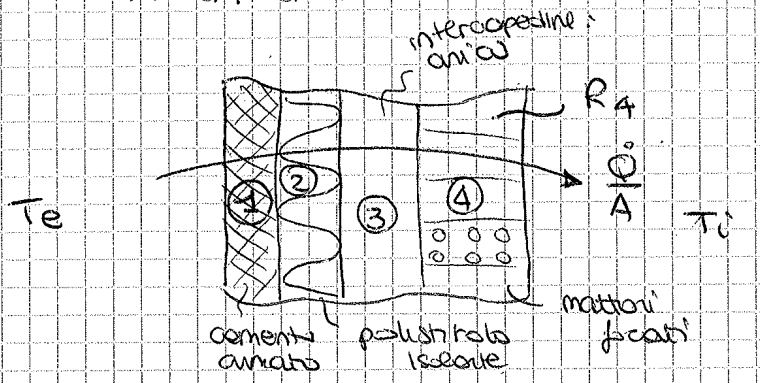
= somma tra scambio termico convettivo e scambio termico per radiazioni

N.B. Ho h e non h_c !!

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 227 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 229 di 328

ANALISI TERMICA di un COMPONENTE di INVOLUCRO OPACO



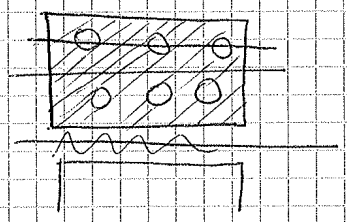
$$\frac{\dot{Q}}{A} = U(T_e - T_i)$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + R_3 + \frac{1}{h_e} + R_4}$$

Nell'intercapedine ho

Nell'aria ③ ho conduzione tra pareti e aria ma poi ho irraggiamento e dovrei fare una analisi dettagliata

$$R_3 = \frac{\Delta T^4}{\dot{Q}_e/A}$$



complicato il calcolo di R_4

$$\boxed{U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^{n} \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_{j=1}^{m} R_j + \frac{1}{h_e}}}$$

- UNI 10355 → norma dove è dato R_j
- PRODUTTORI → valori di R_j dato da produttore
- λ_i → TABELLE (UNI 10351)
- h_i, h_e → dipendono dalla configurazione

Ad esempio per pareti edilizie verticali la normativa

IT ⟹ $h_i = 8 \ W/m^2K$

$h_e = 23 \ W/m^2K$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 229 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 231 di 328

$$\begin{cases} \frac{\dot{Q}}{A} = h_e (T_e - T_{pe}) + \alpha I \\ \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{T_{pe} - T_i}{\sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i}} \end{cases}$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{1}{h_e} = T_e - T_{pe} + \frac{\alpha I}{h_e}$$

$$+ \frac{\dot{Q}}{A} \left(\sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} \right) = T_{pe} - T_i$$

$$= \frac{\dot{Q}}{A} \underbrace{\left(\sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right)}_{U^{-1}} = T_e - \cancel{T_{pe}} + \frac{\alpha I}{h_e} - T_i + \cancel{T_{pe}}$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} U^{-1} = (T_e - T_i) + \frac{\alpha I}{h_e} \quad * \qquad \frac{\dot{Q}}{A} \cancel{U^{-1}} = U (T_e - T_i) = U \Delta T$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \left[T_e + \underbrace{\frac{\alpha I}{h_e}} - T_i \right]$$

È UNA TEMPERATURA! QUINDI È SIMILE

$$\boxed{T_{s,a} = T_e + \frac{\alpha I}{h_e}}$$

TEMPERATURA SOLE-ARIA

$$\boxed{\frac{\dot{Q}}{A} = U (T_{s,a} - T_i)}$$

→ ho una relazione molto simile a quella in assenza di radiazione solare

$T_{s,a} \geq T_e$ (= se $I = \emptyset$)

CAMBIA SOLO ΔT! qui uso $T_{s,a}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 231 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 233 di 328

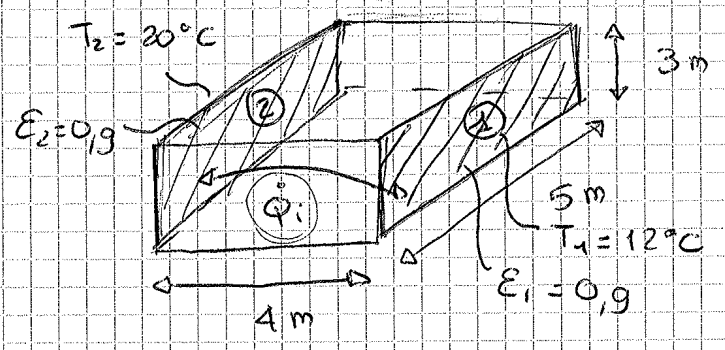
oppure

POTEVO CALCOLARE h da qui *

$$h = \frac{\dot{Q}}{A(T_s - T_a)} = \frac{1377,3}{4(60-20)} = 8,61 \ \frac{W}{m^2 K}$$

② IRRAGGIAMENTO

locale 4 x 5 x 3 → h , Flusso che le pareti verticali si scambiano



$\dot{Q}_i = ?$

SCAMBIO TERMICO TRA 2 CORPI GRIGI ma non ho caso particolare di 2 piani // vicini

$$\cancel{F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}}$$

$$\cancel{F_{12} = 1}$$

ma in questo caso $F_{12} \neq 1$

USO la FORMULA di SCAMBIO TERMICO

$$\dot{Q} = \sigma A F_\varepsilon (T_e^4 - T_i^4)$$

$$F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

2 OPZIONI

① $$F_{12} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos\beta_1 \cos\beta_2}{\pi r^2} \, dA_1 dA_2 = \ldots$$

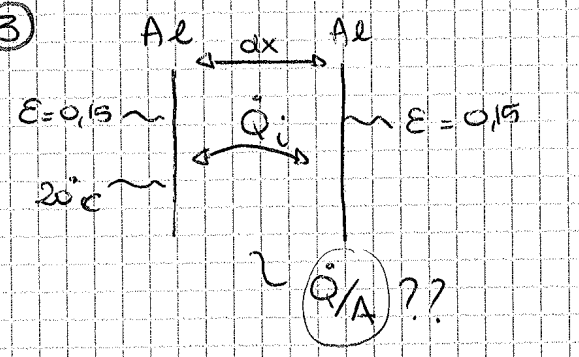
oppure

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 233 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 235 di 328

oppure impedisco la "vista" delle 2 pareti (non più //)
schermo tra le 2 superfici
= SCHERMO RADIATIVO

③



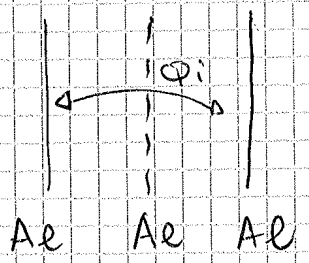
Infiniti perché vicini e //
CASO PARTICOLARE

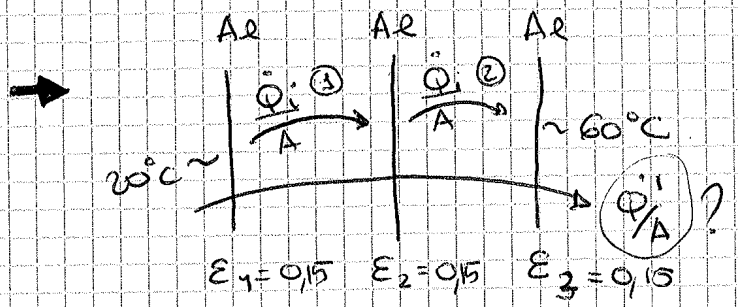
$$\dot{Q} = \sigma A F_\varepsilon (T_1^4 - T_2^4)$$

$$F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{1}{2 + \frac{1}{0,15} - 1} = 8,11 \cdot 10^{-2}$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 8,11 \cdot 10^{-2} \left[(60+273)^4 - (20+273)^4 \right] = 22,68 \ \frac{W}{m^2}$$

Riduco lo scambio RADIATIVO
⇒ PONGO UNO SCHERMO RADIATIVO





$$\text{ma} \quad \frac{\dot{Q}_i}{A} ① = \frac{\dot{Q}_i}{A} ② = \frac{\dot{Q}_i}{A}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 235 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 237 di 328

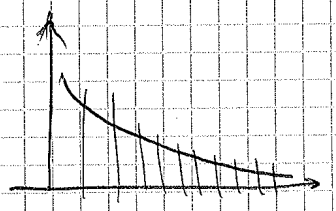
Mettendo 2 schermi, ripetendo i conti scopro che

$$\left(\frac{\dot{Q}'}{A}\right)_{n\ \text{schermi}} = \frac{(\dot{Q}/A)_{\text{senza schermi}}}{n+1}$$

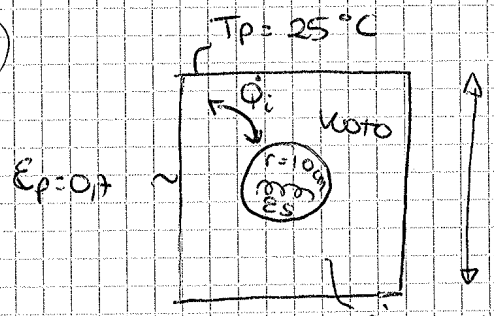
$n=1 \qquad \frac{\dot{Q}'}{A} = \frac{\dot{Q}}{2A}$

$n=2 \qquad \frac{\dot{Q}'}{A} = \frac{\dot{Q}}{3A}$

man mano che aumento gli schermi il miglioramento si "azzera" è asintotico $\longrightarrow 0$



(4)



$r = 10$ cm

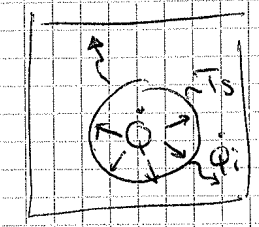
ε_s = sfera

$\varepsilon_s = 0{,}5$

p = pareti

$\frac{\dot{Q}}{V} = 400 \frac{kW}{m^2}$

$\frac{\dot{Q}}{V} = \dot{q}_i = 400 \frac{kW}{m^3}$



A condizioni stazionarie quando raggiunge T_s ho che tanto la sfera produce tanto scambia

$$\dot{Q}_i = \dot{Q} = \dot{q}_i \cdot V = \dot{q}_i \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 = 400 \cdot 10^3 \cdot \frac{4}{3}\pi (0{,}1)^3 = 1676\ W$$

Sono anche i Watt che la sfera scambia con la cavità

$$\frac{\dot{Q}_i}{\sigma F_\varepsilon A_s} = \sigma F_\varepsilon A_s (T_s^4 - T_p^4) \qquad T_s = \sqrt[4]{\frac{\dot{Q}_i}{\sigma F_\varepsilon A_s} + T_p^4}$$

$$F_\varepsilon = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon_s}{\varepsilon_s} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{A_s}{A_p}\cdot\frac{1-\varepsilon_p}{\varepsilon_p}}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 237 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 239 di 328

$$\boxed{(\tau + n\alpha) = g = TSET} \quad [-]$$

caratteristica del componente trasparente

TRASMITTANZA SOLARE

TOTAL SOLAR ENERGY TRANSMITTANCE

$$* \quad \frac{\dot{Q}}{A} = U(T_e - T_i) + gI$$

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{s_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_e}}$$

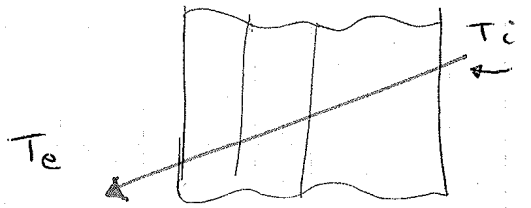
$$\boxed{g = \tau + n\alpha}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 239 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 241 di 328

$0,05 < U < 10$ massimo (più o meno)

Ma qui le T vanno così



Andamento MONOTONO
- DECRESCENTE (Inverno)
- CRESCENTE (Estate)

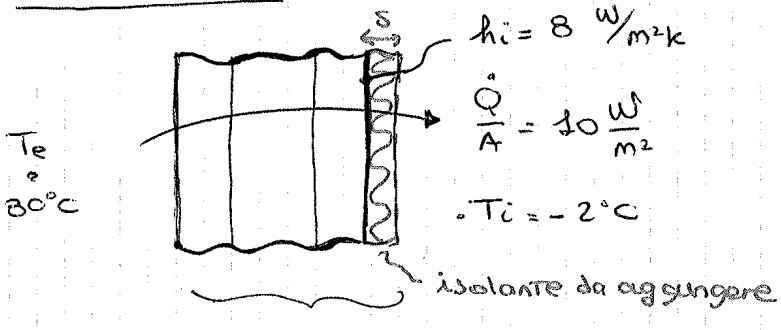
(Temperatura parete interna + caldo)

$T_i > T_e$ (Inverno)

---

(2) Parete che non so di cos' è fatta all' interno ma posso misurare $\dot{Q}/A$ con il TERMOFLUSSIMETRO

FAME



a) U?

b) T_{pi}

c) Quanto devo aggiungere di isolante esterno tale che $T_{pi}^* = T_{pi} - 1°C$

$\delta = ?$

a) $$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$ ma so anche che

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U \Delta T \rightarrow U = \frac{\dot{Q}/A}{\Delta T} = \frac{10}{32} = 0,31 \ W/m^2K$$

b) $$\frac{\dot{Q}}{A} = h_i (T_{pi} - T_i)$$

$$T_{pi} = T_i \underset{\times}{+} \frac{|\dot{Q}/A|}{h_i} = -2 + \frac{10}{8} =$$

Uso + perchè mi sposto verso T crescenti (interno è freddo ma la parete è più caldo)

$$T_{pi} = -0,75 \ °C$$

c) $$T_{pi}^* = T_{pi} - 1 = -1,75 \ °C$$

$$\frac{\dot{Q}}{A}^* = h_i \Delta T = h_i (T_{pi}^* - T_i)$$

Devo considerare NON PIÙ il FLUSSO DI PRIMA! DEVO RICALCOLARE $\dot{Q}/A$!

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 241 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 243 di 328

Se $I = 650\ W/m^2$

$$T_{se} = T_e + \frac{\alpha I}{h_e} = 30 + \frac{0{,}8 \cdot 650}{23} = 52{,}6\ °C$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} = U(T_{se} - T_i) = 0{,}31(52{,}6 - (-2)) = 17{,}5\ W/m^2$$

N.B.

$$\frac{\dot{Q}}{A} = h_e(T_e - T_{pe}) \Leftrightarrow \frac{\dot{Q}}{A} = h_e(T_{sa} - T_{pe})\ ?\ \text{SÌ}$$

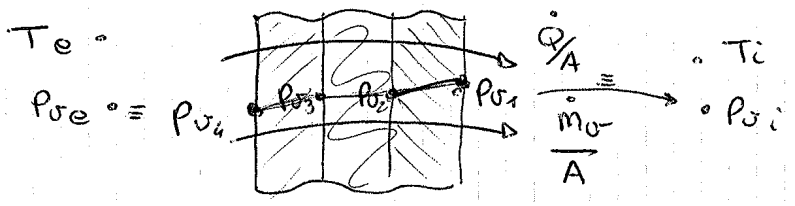
UGUALI

UNA CON IRRAGGIAMENTO SOLARE
L'ALTRA SENZA

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 243 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 245 di 328

PARETE MULTISTRATO



$$\frac{\dot{Q}}{A} = U(T_e - T_i)$$

$$\boxed{\frac{\dot{m}_v}{A} = M(P_{ve} - P_{vi})}$$

U = TRASMITTANZA $= \dfrac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$

M = PERMEANZA AL VAPORE $\left[\frac{kg}{s\, m^2\, Pa}\right]$

$$\boxed{M = \frac{1}{\cancel{\frac{1}{\beta_i}} + \sum \frac{s}{\delta} + \cancel{\frac{1}{\beta_e}}}} \quad \frac{1}{\beta_i}, \frac{1}{\beta_e} \to 0$$

$\frac{s}{\delta}$ = RESISTENZA AL VAPORE

⇨ VERIFICA CONDENSA INTERSTIZIALE

① $\frac{\dot{m}_v}{A} = M(P_{ve} - P_{vi})$

② ∀ STRATO SI APPLICA LA RELAZIONE $\frac{\dot{m}_v}{A} = \frac{\delta}{s}(P_{vi} - P_{vi+1})$ e si ricavano i vari P_{vi}.
Unica incognita è P_{vi+1}

③ SI VERIFICA SE $P_{vi} \gtrless P_{vs}(T_i)$ nello strato

- Ho una variazione lineare del vapore e posso tirare delle linee.
- Uso il DIAGRAMMA
- Posso METTERE LA BARRIERA AL VAPORE che ostacoli il PASSAGGIO ma ATTENZIONE! Se messa nel posto giusto risolve, sbagliato crea danni.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 245 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 247 di 328

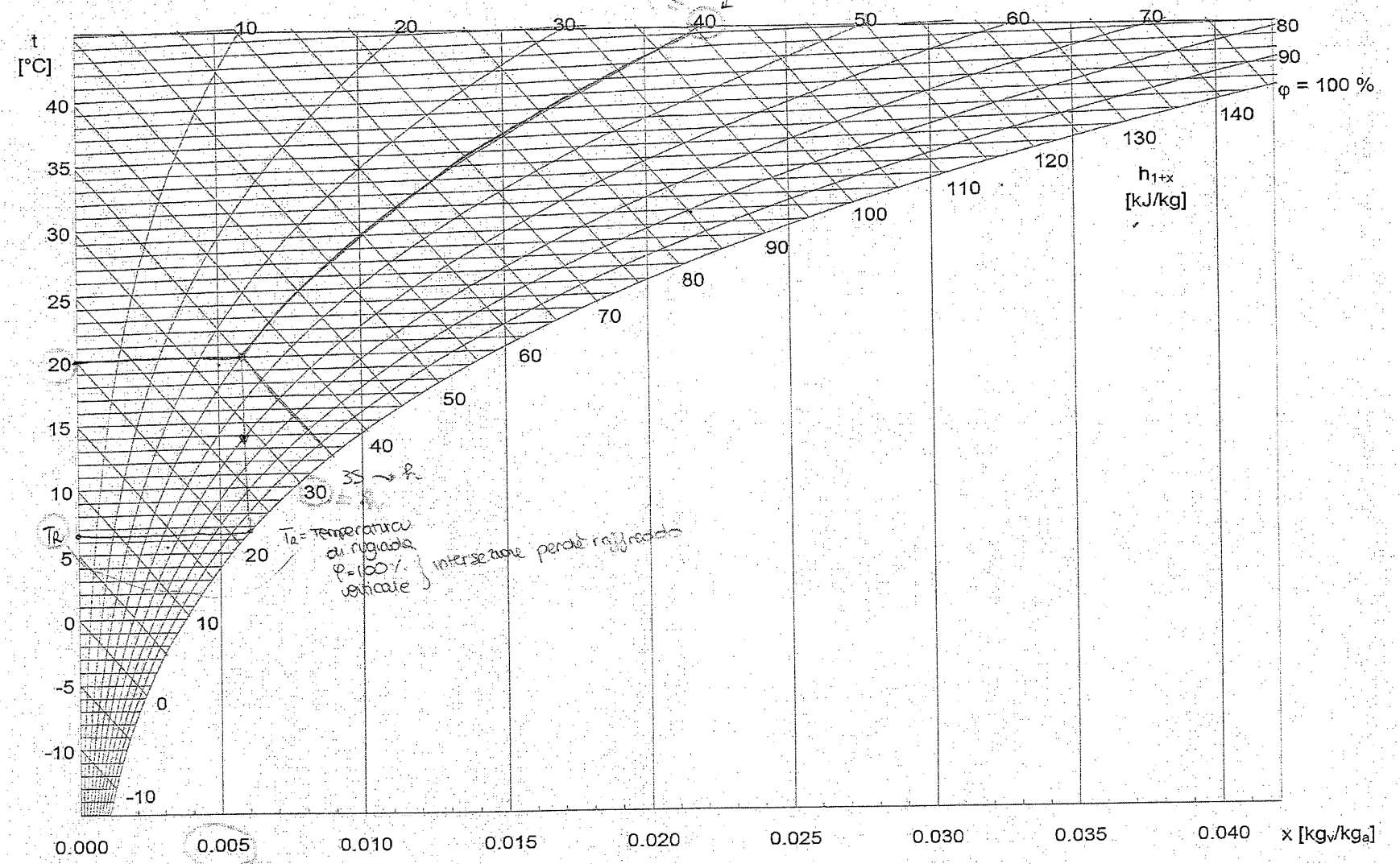
pressione di saturazione in funzione della temperatura (Pa)

θ in °C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
30	4241	4265	4289	4314	4339	4364	4389	4414	4439	4464
29	4003	4026	4050	4073	4097	4120	4144	4168	4192	4216
28	3778	3800	3822	3844	3867	3889	3912	3934	3957	3980
27	3563	3584	3605	3626	3648	3669	3691	3712	3734	3756
26	3359	3379	3399	3419	3440	3460	3480	3501	3522	3542
25	3166	3185	3204	3223	3242	3261	3281	3300	3320	3340
24	2982	3000	3018	3036	3055	3073	3091	3110	3128	3147
23	2808	2825	2842	2859	2876	2894	2911	2929	2947	2964
22	2642	2659	2675	2691	2708	2724	2741	2757	2774	2791
21	2486	2501	2516	2532	2547	2563	2579	2594	2610	2626
20	2337	2351	2366	2381	2395	2410	2425	2440	2455	2470
19	2196	2210	2224	2238	2252	2266	2280	2294	2308	2323
18	2063	2076	2089	2102	2115	2129	2142	2155	2169	2182
17	1937	1949	1961	1974	1986	1999	2012	2024	2037	2050
16	1817	1829	1841	1852	1864	1876	1888	1900	1912	1924
15	1704	1715	1726	1738	1749	1760	1771	1783	1794	1806
14	1598	1608	1619	1629	1640	1650	1661	1672	1683	1693
13	1497	1507	1517	1527	1537	1547	1557	1567	1577	1587
12	1402	1411	1420	1430	1439	1449	1458	1468	1477	1487
11	1312	1321	1330	1338	1347	1356	1365	1374	1383	1393
10	1227	1236	1244	1252	1261	1269	1278	1286	1295	1303
9	1147	1155	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1219
8	1072	1080	1087	1094	1102	1109	1117	1124	1132	1140
7	1001	1008	1015	1022	1029	1036	1043	1050	1058	1065
6	935	941	948	954	961	967	974	981	988	994
5	872	878	884	890	897	903	909	915	922	928
4	813	819	824	830	836	842	848	854	860	866
3	757	763	768	774	779	785	790	796	801	807
2	705	710	715	721	726	731	736	741	747	752
1	656	661	666	671	676	680	685	690	695	700
0	611	615	619	624	629	633	638	642	647	652
-1	562	567	571	576	581	586	591	596	601	605
-2	517	521	526	530	535	539	544	548	553	557
-3	475	479	484	488	492	496	500	504	509	513
-4	437	441	444	448	452	456	460	464	468	471
-5	401	405	408	412	415	419	422	426	430	433
-6	368	371	375	378	381	384	388	391	394	398
-7	338	341	344	347	350	353	356	359	362	365
-8	309	312	315	318	320	323	326	329	332	335
-9	283	286	288	291	294	296	299	301	304	307
-10	259	262	264	266	269	271	274	276	278	281
-11	237	239	241	244	246	248	250	252	255	257
-12	217	219	221	223	225	227	229	231	233	235
-13	198	200	202	203	205	207	209	211	213	215
-14	181	182	184	186	187	189	191	193	194	196
-15	165	166	168	169	171	173	174	176	177	179

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 247 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 249 di 328

DIAGRAMMA DI MOLLIER



Calcolare analiticamente e da diagramma di Mollier:

vedi quaderno 3 PSICROMETRIA esercizi dei 9/12 (1)

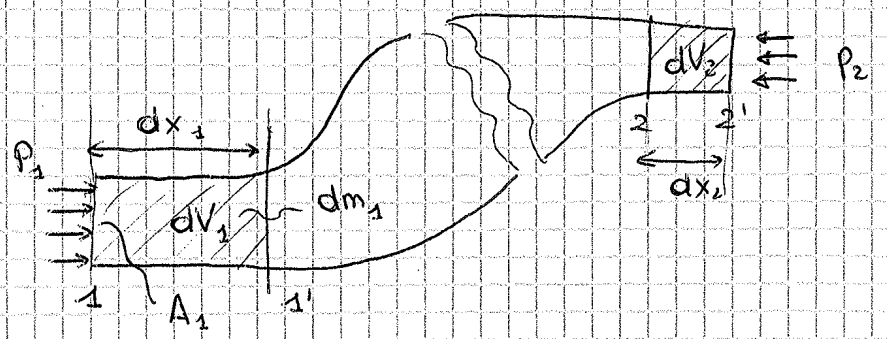
T [°C]	φ [%]	x [kg_v/kg_a]	h [kJ/kg]
20	40	0,006	35
20		0.012	
25	20	0,004	35
*	80	0.014	
*	50		30
*		0.006	45

* solo da diagramma di Mollier

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 249 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 251 di 328

$$\boxed{\begin{aligned} \delta L_i &= \dot{L}_i \cdot d\tau \\ \delta L &= \delta L_i + \delta L_{imm} + \delta L_{exp} \end{aligned}}$$



Applicando il LAVORO TERMODINAMICO

$$\delta L_{imm} = -\vec{F}_{est} \cdot d\vec{s}$$

$$\xrightarrow{d\vec{x}_1} \quad \xrightarrow{\vec{F}_{es}} \quad \sim \cos\theta = 1 \qquad |\vec{F}_{est}| = \overset{\text{esterna}}{p_1} A_1$$

$$\delta L_{immissione} = -p_1 \underbrace{A_1 \cdot dx_1}_{dV_1} = -p_1 dV_1$$

$$\delta L = \delta L_i + (-p_1 dV_1) + p_2 dV_2$$

$$\delta L_{exp} = -|\vec{F}_{est}| \, |dx| \cos\theta$$

$$\xleftarrow{\vec{F}_{est}} \quad \xrightarrow[dx_2]{} \quad \sim \cos\theta = -1$$

$$\delta L_{exp} = -p_2 \underbrace{A_2 \cdot dx_2 (-1)}_{dV_2} = +p_2 dV_2$$

$$\delta L = \dot{L}_i \cdot d\tau + (p_2 dV_2 - p_1 dV_1) =$$

$$v = \frac{V}{M}$$

$$= \dot{L}_i \, d\tau + (p_2 dm_2 v_2 - p_1 dm_1 v_1) =$$

$$\boxed{\delta L = \dot{L}_i \, d\tau + (p_2 \dot{m}_2 v_2 - p_1 \dot{m}_1 v_1) d\tau}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 251 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 253 di 328

CASO C

$$L_{REV} = \int_1^2 p\,dV = \int_1^2 \underbrace{p(V)}_{a+b\cdot V}\,dV = (X)$$

$$p = a + b\cdot V \qquad \begin{matrix} P_1 \rightarrow V_1 \\ P_2 \rightarrow V_2 \end{matrix} \quad \text{retta per 2 punti}$$

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \qquad \frac{P-P_1}{P_2-P_1} = \frac{V-V_1}{V_2-V_1}$$

$$\frac{p-3\cdot 10^5}{(10-3)\,10^5} = \frac{V-10}{3-10}$$

$$(X) = \int_1^2 (a+b\cdot V)\,dx = \int_1^2 a\,dV + \int_1^2 b\,V\,dV = a(V_2-V_1) + b\left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}\right) =$$

$$\Rightarrow p - 3\cdot 10^5 = \frac{\cancel{7}\cdot 10^5}{-\cancel{7}}(V-10)$$

$$p - 3\cdot 10^5 = -10^5 V + 10^6 \qquad p = \underbrace{(3\cdot 10^5 + 10^6)}_{a}\cdot \underbrace{10^5 V}_{b}$$

$$L_c = (3\cdot 10^5 + 10^6)(3-10) + (10^{-5})\left(\frac{9}{2} - \frac{100}{2}\right)$$

$$L_c = -4{,}55\cdot 10^6\ J = -4{,}55\ MJ$$

$$L_c = \text{Area} = \frac{(b+B)}{2}\cdot h = \frac{10\cdot 10^5 + 3\cdot 10^5}{2} = \overset{3-10}{V_2 - V_1} = \frac{(13\cdot 10^5)(-7)}{2} = -4{,}55\ MJ$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 253 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 255 di 328

S.T. → MACCHINA → CHIUSO

$$\underset{=0}{\cancel{Q}} - \underset{=0}{\cancel{L}} = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

TRASFORMAZIONE FINITA → macroscopiche variazioni

(L) 1 → 2 scambia lavoro termodinamico?

ho una FORZA APPLICATA e una DEFORMAZIONE?

(NO) $\boxed{L = 0}$

(Q) 1 → 2 scambia calore termodinamico?

ho differenza di TEMPERATURA?

(NO) $\boxed{Q = 0}$

[Anche se pinze, freni ... si scaldano e scambiano energia sono però INTERNI al S.T e non hanno il tempo di dissipare energia con l'ambiente esterno]

NON HO SCAMBI

(ΔU) 1 → 2 VARIA (SÌ) perché si scaldano i freni e la T della macchina è aumentata

(Ec) (SÌ)

(Ep) (SÌ)

$$\Delta U = -\Delta E_c - \Delta E_p = -M\left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right) - Mg(z_2 - z_1) =$$

$$-1000\left(\frac{0 - \left(1000 \cdot \frac{1000}{3600}\right)^2}{2}\right) - 1000 \cdot 9{,}81 \cdot (0 - 60 \sin 30°) \Rightarrow$$

$$\Delta U = 680\,720 \text{ J}$$

→ E_c e E_p viene dissipata incrementando U, questa energia interna viene inviata ai freni

- siccome $\Delta U \simeq C_F \cdot \Delta T_F \cdot M_F$ (freni)
- allora $\Delta T_F = \dfrac{\Delta U}{C_F \cdot M_F} = \dfrac{680720}{(0{,}468 \cdot 10^3)(3 \times 4)} = T_F - T_i$ (T_i → 10°C)

$$T_f = \frac{680\,720}{12 \cdot 0{,}468 \cdot 10^3} + 10°C = 131{,}2\ °C$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 255 di 328

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 257 di 328

I° PRINCIPIO SISTEMI APERTI

2013

$$\partial Q - \partial L = dU + dE_c + dE_p$$

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{d\tau}$$

$$\dot{L} = \frac{dL}{d\tau}$$

esatto

$$\partial Q = \dot{Q}\, d\tau \qquad \tau = \text{tempo}$$

$$\partial L = \dot{L}_i\, d\tau + (\dot{m}_2 p_2 v_2 - \dot{m}_1 p_1 v_1)\, d\tau$$

$$dU = (\dot{m}_2 u_2 - \dot{m}_1 u_1)\, d\tau$$

$$dE_c = \left(\dot{m}_2 \frac{w_2^2}{2} - \dot{m}_1 \frac{w_1^2}{2}\right) d\tau$$

$$dE_p = (\dot{m}_2 g z_2 - \dot{m}_1 g z_1)\, d\tau$$

$$\Uparrow$$

VALIDO PER QUALUNQUE REG

ENANTONE 11.25 mg/2ml Leuprorelina acetato
ENANTONE 3.75 mg/2ml Leuprorelina acetato

1) CASO: REGIME STAZIONARIO

$$\Downarrow$$

$$\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \qquad \text{(principio di conservazione della massa)}$$

PORTATA IN MASSA

Sostituendo

$$\dot{Q}\, d\tau - \dot{L}_i\, d\tau - \underbrace{\dot{m}\,(p_2 v_2 - p_1 v_1)\, d\tau}_{\text{porto a 2° membro}} = \dot{m}\,(u_2 - u_1)\, d\tau + \dot{m}\left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}\right) d\tau + \dot{m}\, g\,(z_2 - z_1)\, d\tau$$

$$\boxed{\dot{Q} - \dot{L}_i = \dot{m}\left[\underbrace{(u_2 + p_2 v_2)}_{\text{sez. 2}} - \underbrace{(u_1 + p_1 v_1)}_{\text{sez 1}} + \left(\frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}\right) + g(z_2 - z_1)\right]}$$

DEF

[Una grandezza che sia funzione di sole grandezze di stato del sistema è essa stessa una FUNZIONE di STATO]

$$A + B = (A + B) \qquad (A - B)$$

A: funzione di stato; B: f di stato; (A+B): funzione di stato; (A−B): f

2) $\boxed{H = U + pV}$ → ENTALPIA [J]

[J] [J] [J]

$$\boxed{h = \frac{H}{M} \qquad h = u + pv}$$

ENTALPIA MASSICA [J/kg]

DEF

[H è una misura del livello energetico di una portata di fluido]

↓

H assume lo stesso significato di U per i SISTEMI CHIUSI

sez. 2 ⇒ ENTALPIA MASSICA (h) del fluido in uscita

sez. 1 ⇒ ENTALPIA MASSICA (h) del fluido in entrata

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 257 di 328