



INFORMATICA MUSICALE

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
DIPARTIMENTO DI MATEMATICA E INFORMATICA
LAUREA TRIENNALE IN INFORMATICA
A.A. 2018/19
Prof. Filippo L.M. Milotta

ID PROGETTO: 1B

TITOLO PROGETTO: Man VS Sound

AUTORE 1: Lo Presti Davide

AUTORE 2: Spitaleri Andrea

Indice

1. Obiettivi del progetto	2
1.1 Introdurre la barriera del suono	2
1.1.1 Cos'è e come si genera	2
1.1.2 La corsa storica al superamento della barriera	3
1.1.3 Gli effetti collaterali generati una volta superata	3
1.2 Analizzare la barriera del suono su altri pianeti	3
2. Riferimenti Bibliografici	6
2.1 https://www.fisicisenzapalestra.com/dubbi-esistenziali/verso-il-muro-del-suono-e-oltre-cose-il-boom-sonico/	6
2.2 https://it.wikipedia.org/wiki/Numero_di_Mach	6
2.3 https://it.wikipedia.org/wiki/Boom_sonico	6
2.4 https://it.wikipedia.org/wiki/Muro_del_suono	6
3. Argomenti Teorici Trattati	7
3.1 Storia del superamento della barriera del suono	7
3.2 Numero di Mach	8
3.3 Velocità del suono e comprimibilità del mezzo	8
3.4 Legge dell'inverso del quadrato	9
3.5 Effetto doppler	9

1. Obiettivi del progetto

Inizialmente vogliamo, dopo aver introdotto cos'è la barriera del suono, parlare della corsa al superamento della suddetta e i problemi ingegneristici incontrati nel farlo. Quindi il perché le nazioni volessero superarla, come lo hanno fatto e i problemi riscontrati al superamento o raggiungimento della stessa.

Successivamente studieremo come potrebbe cambiare su altri pianeti e i problemi dovuti alla differente atmosfera.

1.1 Introdurre la barriera del suono

1.1.1 Cos'è e come si genera

La barriera del suono è un problema riscontrato quando si viaggia ad una velocità tale da raggiungere la resistenza massima di un fluido (nel caso più comune, l'aria, con velocità pari a 1200 km/h circa) e i corpi che si "scontrano" con essa devono riuscire a contrastarla nel migliore dei modi. Infatti, quando un corpo si muove all'interno di un fluido trasmette una serie di urti meccanici i quali provocano dei disturbi che rallentano il mezzo, questi disturbi dipendono da pressione, temperatura e densità del fluido.

La velocità del suono nell'aria si può calcolare come: $v(T) = (331,45 + (0,62 * T))$ m/s con T la temperatura misurata in °C, 331,45 la velocità del suono a 0°C e 0,62 coefficiente di proporzionalità lineare che relaziona temperatura e velocità.

Quando un corpo si muove alla stessa velocità del suono, va incontro ad una fortissima resistenza causata dall'accumularsi delle onde sonore davanti al suddetto corpo, le quali fanno aumentare la pressione. Questa viene chiamata barriera del suono, o muro del suono, poiché negli anni della Seconda guerra mondiale, i velivoli sembravano scontrarsi con un muro invisibile.

Al superamento di questo "muro" si genera un boom sonico, il quale si propaga in maniera conica, all'interno del cono di Mach e quindi è possibile sentirlo solo dopo il passaggio del corpo, e mai prima o nello stesso momento, questo perché le onde sonore sono più lente del corpo. Il boom sonico produce un fortissimo boato, infatti è proibito viaggiare a tale velocità su zone abitate, tuttavia l'intensità del rumore è sempre vittima della legge dell'inverso del quadrato poiché le onde generate si propagano ugualmente in maniera sferica.

1.1.2 La corsa storica al superamento della barriera

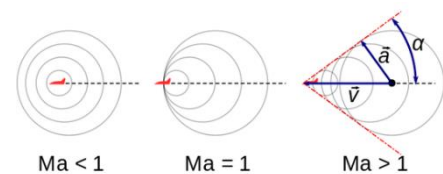
Storicamente è stata la frusta il primo oggetto creato dall'uomo in grado di superare la velocità del suono, poiché la sua estremità rompe la barriera del suono generando uno schiocco, il quale non è altro che il boom sonico.

Già a partire dagli anni '40, si inizia a diffondere il concetto popolare di "muro del suono", cioè di una barriera immaginaria forse impossibile da superare, in grado di distruggere gli aerei e rendere impossibile viaggiare più veloci del suono. Durante la Seconda Guerra Mondiale molti piloti sostennero di aver superato quella barriera, senza però alcuna prova.

Sono stati poi gli studi dell'immediato dopoguerra ad aver portato buoni risultati e alla scoperta di varie tecniche utili allo scopo. Di ciò ne parleremo più avanti nel punto 3.1.

1.1.3 Gli effetti collaterali generati una volta superata

Quando un corpo si muove ad una certa velocità in un fluido, il suo comportamento cambia al variare del suo regime. I vari regimi sono delimitati dal numero di Mach, cioè il rapporto tra la velocità del corpo e quella del suono, e le principali sono: regime **subsonico** per $Ma \ll 1$, regime **transonico** per $Ma \approx 1$ e regime **supersonico** per $Ma > 1$.



Il regime più critico è quello transonico dove un velivolo ha il flusso a monte supersonico e a valle subsonico, ciò comporta la resistenza massima, le vibrazioni delle superfici aerodinamiche e l'inversione di comandi. Viene chiamato anche numero di Mach critico, a questo regime il velivolo tende ad assumere un assetto in picchiata che lo fa precipitare (ciò prima dell'adozione dei dive flap) causato dall'arretramento del fuoco del profilo all'avvicinarsi del regime transonico, il fuoco del profilo è il punto di applicazione della portanza che si sposterà sempre più indietro con l'aumentare della velocità.

1.2 Analizzare la barriera del suono su altri pianeti

Lo scopo di questo paragrafo è quello di tentare di capire cosa di quello che finora abbiamo visto cambierebbe fuori dal sistema Pianeta Terra, ed in particolare negli altri pianeti del Sistema Solare.

La velocità c_s del suono risulta legata alla variazione di pressione sonora Δp e alla variazione di densità $\Delta \rho$ del mezzo dalla relazione $c_s = (\Delta p / \Delta \rho)^{0.5}$, ma sappiamo che nell'aria, almeno sulla Terra, la velocità del suono è di 331 m/s (1 191,60 km/h) a 0 °C e di 343,8 m/s (1 237,68 km/h) a 20 °C. Usando delle approssimazioni, la velocità si può calcolare in funzione della temperatura, ovvero varia secondo la legge $a(T) = (331,45 + (0,62 * T))$ m/s con T la temperatura misurata in °C.

Supponiamo inizialmente, per semplicità, di dover utilizzare la stessa legge, per calcolare la velocità sugli altri corpi celesti:

Mercurio ---> $c_s = (331,45 + (0,62 * 167)) = 435 \text{ m/s} = 1\,566 \text{ km/h}$

Venere ---> $c_s = (331,45 + (0,62 * 464)) = 619 \text{ m/s} = 2\,228 \text{ km/h}$

Marte ---> $c_s = (331,45 + (0,62 * (-5))) = 328 \text{ m/s} = 1\,180 \text{ km/h}$

Giove ---> $c_s = (331,45 + (0,62 * (-121))) = 256 \text{ m/s} = 922 \text{ km/h}$

Saturno ---> $c_s = (331,45 + (0,62 * (-130))) = 251 \text{ m/s} = 903 \text{ km/h}$

Urano ---> $c_s = (331,45 + (0,62 * (-205))) = 204 \text{ m/s} = 734 \text{ km/h}$

Nettuno ---> $c_s = (331,45 + (0,62 * (-220))) = 195 \text{ m/s} = 702 \text{ km/h}$

Ora cerchiamo di analizzare la velocità del suono con la sua formula originaria, e non quella semplificata per l'aria terrestre, comparandola all'atmosfera presenti negli altri pianeti.

Supponendo che i gas siano perfetti (quindi $pV = nRT$), la formula in questione è la seguente: $c_s = \sqrt{\gamma \bar{R} T}$ dove c_s è la velocità del suono, γ è il coefficiente di dilatazione adiabatica calcolato come il rapporto tra calore specifico a pressione costante e calore specifico a volume costante (il quale è un numero adimensionale), \bar{R} è la costante del gas per unità di massa calcolata come il rapporto tra la costante del gas ideale ($8,314 \frac{J}{mol K}$) e la massa molecolare (espressa in $\frac{g}{mol}$), T è la temperatura assoluta (espressa in K).

Facendo un'analisi dimensionale infatti troviamo una velocità

$$\sqrt{\gamma \frac{R}{M} T} \Rightarrow \sqrt{\frac{\frac{J}{mol K}}{\frac{g}{mol}} k} \Rightarrow \sqrt{\frac{J}{g}} \Rightarrow \sqrt{\frac{Kg (\frac{m}{s})^2}{g}} \Rightarrow \sqrt{(\frac{m}{s})^2 10^3} \Rightarrow \frac{m}{s} \sqrt{10^3}$$

Ora procediamo a calcolare le varie velocità del suono presenti su altri pianeti e di conseguenza la velocità di un corpo per raggiungere la barriera del suono.

Su Internet abbiamo cercato la composizione chimica dell'atmosfera dei pianeti, la loro temperatura media così da poter trovare le varie componenti.

Su Mercurio, l'atmosfera è quasi inesistente, ma notiamo che è composta principalmente da ossigeno molecolare, quindi troviamo: $\gamma = 1,4$ e $\bar{R} = \frac{8,314}{32} = 0,26 \frac{J}{g K}$. La T mediamente è sui 440 K, quindi avremmo una velocità del suono pari a circa **400 m/s** (1 440 Km/h).

Su Venere abbiamo prevalentemente anidride carbonica e la sua temperatura media è 737 K, quindi $\gamma = 1,33$ e $\bar{R} = \frac{8,314}{44} = 0,19 \frac{J}{g K}$ con $c_s = \mathbf{431,6 m/s}$ (1 553,6 Km/h).

Su Marte abbiamo prevalentemente anidride carbonica e la sua temperatura media è 210 K, quindi $\gamma = 1,33$ e $\bar{R} = \frac{8,314}{44} = 0,19 \frac{J}{g K}$ con $c_s = \mathbf{230,4 m/s}$ (829,4 Km/h).

Su Giove abbiamo prevalentemente idrogeno molecolare e la sua temperatura media è 152 K, quindi $\gamma = 1,4$ e $\bar{R} = \frac{8,314}{2} = 4,16 \frac{J}{g K}$ con $c_s = \mathbf{940,9 m/s}$ (3 387 Km/h).

Su Saturno abbiamo prevalentemente idrogeno molecolare e la sua temperatura media è 143 K, quindi $\gamma = 1,4$ e $\bar{R} = \frac{8,314}{2} = 4,16 \frac{J}{g K}$ con $c_s = \mathbf{912,6 m/s}$ (3 285,3 Km/h).

Su Urano abbiamo prevalentemente idrogeno molecolare e la sua temperatura media è 68 K, quindi $\gamma = 1,4$ e $\bar{R} = \frac{8,314}{2} = 4,16 \frac{J}{g K}$ con $c_s = \mathbf{629,3 m/s}$ (2 265,5 Km/h).

Su Nettuno abbiamo prevalentemente idrogeno molecolare e la sua temperatura media è 53 K, quindi $\gamma = 1,4$ e $\bar{R} = \frac{8,314}{2} = 4,16 \frac{J}{g K}$ con $c_s = \mathbf{555,5 m/s}$ (2 000 Km/h).

Come possiamo notare, le velocità calcolate ora sono molto diverse rispetto a quelle calcolate prima, questo perché ogni pianeta ha una composizione chimica molto diversa da quella terrestre e la formula $a(T) = (331,45 + (0,62 * T))$ è una formula empirica trovata per studiare la c_s facilmente sulla Terra.

Soprattutto abbiamo notato che i pianeti gassosi hanno una velocità del suono molto più grande, pur avendo una temperatura media molto più bassa. Inoltre, nel nostro pianeta la velocità del suono è tra le più basse dell'intero Sistema Solare, arrivando penultimo, distanziandosi di circa 102,9 m/s dall'ultimo (Marte) e 66,7 m/s dal terzultimo (Mercurio).

Pianeta	Formula empirica	Formula corretta
Mercurio	435 m/s	400 m/s
Venere	619 m/s	431,6 m/s
Terra	<u>333,3 m/s</u>	<u>333,3 m/s</u>
Marte	328 m/s	230,4 m/s
Giove	256 m/s	940,9 m/s
Saturno	251 m/s	912,6 m/s
Urano	204 m/s	629,3 m/s
Nettuno	195 m/s	555,5 m/s

2. Riferimenti Bibliografici

2.1 <https://www.fisicisenzapalestra.com/dubbi-esistenziali/verso-il-muro-del-suono-e-oltre-cose-il-boom-sonico/>

Quest'articolo ci dà una visione generale riguardo le cause del "boom sonico", le onde d'urto generate dagli aerei e la velocità del suono, lo abbiamo preso in considerazione per avere una visione più ampia per poi approfondire con Wikipedia.

2.2 [https://it.wikipedia.org/wiki/Numero di Mach](https://it.wikipedia.org/wiki/Numero_di_Mach)

Nella pagina di Wikipedia, sono state reperite informazioni sul numero di Mach e ciò che ne consegue, ovvero le caratteristiche dei vari regimi al variare di Ma.

2.3 https://it.wikipedia.org/wiki/Boom_sonico

Quest'altra pagina di Wikipedia è molto chiara a proposito delle onde sonore e del cono di Mach che si viene a formare in seguito al boom sonico.

2.4 [https://it.wikipedia.org/wiki/Muro del suono](https://it.wikipedia.org/wiki/Muro_del_suono)

Quest'altra pagina è parecchio esaustiva riguardo l'intera storia della barriera del suono e tutti i tentativi di superarla, dopo i problemi iniziali, inoltre spiega cos'è e accenna i problemi al raggiungimento.

3. Argomenti Teorici Trattati

3.1 Storia del superamento della barriera del suono

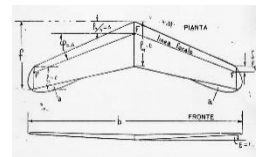
All'inizio degli anni '40, quando gli aerei scendevano in picchiata per i bombardamenti, si scontravano con dei "muri invisibili" che, in alcuni casi, li portavano ad esplodere (da qui la denominazione muro del suono). Ciò accadeva poiché non avevano un'aerodinamicità tale da poter superare agilmente la resistenza provocata dalle particelle d'aria a quelle velocità, pur avendo la potenza per raggiungere tale velocità. A quei tempi non si comprendevano a pieno questi fenomeni, ma notarono problemi come: drastico abbassamento delle prestazioni delle eliche, inversione dei comandi, difficoltà nella richiamata dalla picchiata e strutture non in grado a reggere quella pressione.



Nel 1942 il Ministero dell'Aviazione del Regno Unito avviò un progetto top-secret per sviluppare il primo aereo al mondo capace di superare la velocità del suono. Il progetto consisteva nello studio e nella realizzazione di un aereo a reazione: il Miles M.52, in grado di raggiungere i 1 600 km/h (417 m/s) in 1 minuto e 30 secondi.

Furono trovate soluzioni adottate tuttora, come motori a getto e la più importante di tutte: l'adozione di stabilizzatori orizzontali (*dive flap*) a superficie completamente mobile, in grado di fornire una maggiore capacità di controllo per contrastare la tendenza ad assumere un assetto picchiato (mach tuck, dall'inglese piega di mach).

Nell'immediato dopoguerra, le informazioni acquisite dagli studi tedeschi portarono a adottare ulteriori tecniche utili a ridurre la resistenza aerodinamica quali l'ala a freccia.



Nel 1947, utilizzando un aereo-razzo Bell XS-1 il pilota Charles Yeager diventò il primo uomo a volare più veloce del suono con volo livellato (cioè alla stessa quota, senza scendere in picchiata), un anno più tardi, anche il Miles M.52 raggiunse la velocità di mach 1,5.



Nel 1961 un Douglas DC-8, un aereo di linea, rompe il muro del suono a Mach 1,012 (660 mph) mentre era in crociera.



Nel 1997 il pilota Andy Green diventò la prima persona a superare il muro del suono in un veicolo a terra, con il ThrustSSC (Super Sonic Car - auto supersonica).

L'avvenimento più recente è il superamento del muro del suono senza veicoli, ma semplicemente cadendo da un'altezza di 39 045 m, ciò è stato fatto dal paracadutista Felix Baumgartner, nel 2012, raggiungendo una velocità di 1 342,8 km/h quindi Ma 1,25.



3.2 Numero di Mach

Mach	Km/h
0	0
1	1226
2	2451,2
3	3675,4
4	4900,5
5	6125,3
6	7350,1
7	8575,4
8	9800,2
9	11.025,3
10	12.250,1

In fluidodinamica ed in particolare in tutte le applicazioni aeronautiche è ormai uso misurare la velocità dell'aria relativa all'aeromobile in una scala di Mach. Il nome deriva dagli studi del fisico e filosofo austriaco Ernst Mach. Questa scala è basata sul **numero di Mach** (Ma), ovvero un numero adimensionale definito come il rapporto tra la velocità di un oggetto in moto in un fluido (come l'aria) e la velocità del suono nel fluido considerato, quest'ultima calcolata come la radice quadrata del prodotto di tre fattori, ovvero il coefficiente adiabatico, la costante specifica del gas e la temperatura assoluta. Nel gergo aeronautico, Mach 1 significa viaggiare ad una velocità pari a quella del suono, Mach 2 al doppio di quella velocità e così via. Il moto attorno ai corpi può essere classificato in diverse condizioni a cui corrispondono diversi comportamenti fluidodinamici, a seconda del numero di Mach locale. Per Ma minore di 0.3, abbiamo un regime subsonico

incomprimibile, e il regime rimane subsonico finché non si raggiunge la condizione di $Ma = 1$ (muro del suono), in cui ci troviamo nel regime sonico. A regime subsonico l'aria si oppone al moto per attrito, e può generare forze idrodinamiche come la portanza che sorregge gli aerei. A regime transonico, ovvero per Ma uguale a circa 1, coesistono zone di regime subsonico e zone di regime supersonico, ed inoltre appaiono nuovi fenomeni idrodinamici, come il formarsi di nuvole di condensazione, o lo strozzamento del flusso. Per Ma compreso tra 1.2 e 3 si parla di regime supersonico, i termini non lineari nell'equazione delle onde diventano importanti e non più trascurabili, di conseguenza non si può più applicare il principio di sovrapposizione, ed inoltre iniziano ad apparire le onde di shock, con proprietà differenti dalle onde sonore. Per Ma compreso tra 3 e 5 gli effetti termodinamici sulla compressione dell'aria diventano rilevanti: il velivolo scambia calore con l'aria. Per Ma maggiore di 5 arriviamo al regime ipersonico dove l'elevata temperatura arriva a modificare lo stato di aggregazione dell'aria.

3.3 Velocità del suono e comprimibilità del mezzo

La velocità del suono dipende da vari fattori, come la densità, la pressione, la temperatura del fluido ed altre sue caratteristiche, tra le quali la **comprimibilità** del mezzo in cui viaggia. Questo perché meno il mezzo è comprimibile, prima l'energia riesce a trasferirsi dentro di esso. Una relazione che si può usare è $c_s = (E/\rho)^{0.5}$, in cui E è il modulo di comprimibilità del mezzo ed è dell'ordine di 10^9 per i liquidi, e ρ la sua densità. Come esempio di calcolo indicativo della velocità del suono in un solido, assumendo per il ferro una densità di 7.86 kg/dm^3 e un modulo di elasticità $E = 206\,000\,000 \text{ N/m}^2$, si ricava $c_s = 5\,120 \text{ m/s}$. Nel caso dei gas, se si assume un comportamento ideale, possiamo porre $E = \gamma p$, dove γ è il rapporto tra i calori specifici caratteristici del gas e p è la pressione a cui si trova.

Materiali	Velocità del suono [m/s]
Aria	343
Acqua	1484
Ghiaccio (a 0 °C)	3980
Vetro	5770
Acciaio	5900
Alluminio	6300
Piombo	2160
Titanio	6100
PVC (morbido)	80
PVC (duro)	1 700
Calcestruzzo	3 100
Faggio	3 300
Granito	6 200
Peridotite	7 700
Sabbia (asciutta)	10-300

3.4 Legge dell'inverso del quadrato

Ci si chiede come mai un **aereo possa fare un rumore e generare uno spostamento d'aria molto violento**. Il **boom sonico** è il suono prodotto dal cono di Mach generato dalle onde d'urto create da un oggetto (ad esempio un aereo) che si muove in un fluido, con velocità superiore alla velocità del suono. Nel caso dell'aereo, il fluido è l'aria nella quale è sospeso. Nonostante l'onda d'urto sia fortissima, ovviamente essa si propagherà in forma sferica dalla sorgente, con una diminuzione dell'intensità sonora secondo la legge dell'inverso del quadrato: la potenza del suono per unità di area (intensità sonora) diminuirà proporzionalmente al quadrato del raggio.

3.5 Effetto doppler

$$f = \left(\frac{v - v_r}{v - v_s} \right) f_0$$

Sappiamo che se due corpi C_1 e C_2 viaggiano a due velocità diverse v_1 e v_2 , la velocità di C_1 percepita da C_2 non sarà v_2 ma dipenderà anche da v_1 , ovvero da una componente relativa. Di conseguenza anche la frequenza percepita dal ricevitore sarà diversa e questo fenomeno prende il nome di **Effetto Doppler**.

Se il denominatore si dovesse azzerare, cioè se $v = v_s$, la sorgente segue l'onda sonora emettendo oscillazioni sovrapposte che giungeranno tutte in una volta al ricevitore. È proprio questa la causa del bang supersonico. È come se una persona volesse consegnare dei pacchi ad un'altra persona ed invece di appoggiarli su un nastro trasportatore uno alla volta rimanendo fermo, li appoggia muovendosi alla stessa velocità del nastro. Il secondo pacco verrà appoggiato esattamente sul primo e così via, quindi la seconda persona riceverà i pacchi "tutti in una volta". Se alla prima persona sostituiamo un aereo che viaggia alla velocità del suono (e che il suono generi l'onda sonora) e alla seconda persona sostituiamo un ascoltatore in grado di ricevere l'onda generata, allora quest'ultimo riceverà tutte le onde di pressione nello stesso istante e sentirà un forte "bang".