



Dipartimento di Ingegneria  
Civile e Meccanica  
UNIVERSITÀ DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

# Le aeronavi: principi di funzionamento e le tecnologie nel loro sviluppo storico

Nicola Bonora



# Gli aeromobili

---

- Un aeromobile è una macchina costruita dall'uomo che **si sostiene e si può spostare nell'aria** consentendo il trasporto di persone o cose **all'interno dell'atmosfera terrestre**.
- Gli aeromobili la cui sustentazione è in maggior parte dovuta a reazioni di tipo statico sono chiamati **aerostati**,
- Quelli che si sostentano a mezzo di azioni prevalentemente aerodinamiche sono chiamati **aerodine**.



# Aerodine: più pesanti dell'aria

## A sustentazione aerodinamica

### Ad ala fissa

- Aliante



- Aeroplano



- Aquilone



### Ad ala rotante

- Elicottero



- Autogiro



- Elicoplano



## A sustentazione diretta

### Motore a razzo o turboreattore

- Missili



- Piattaforme volanti

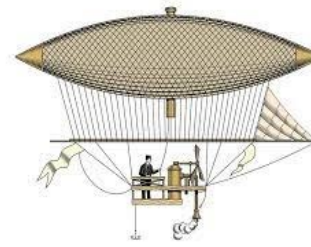


## A sustentazione mista

- VTOL



# Aerostati: più leggeri dell'aria



## AEROSTATI

Velivolo che vola o fluttua per azione di un gas galleggiante

### PALLONI

Senza propulsore che vanno alla deriva senza guida



#### LIBERO

(UNTETHERED)

Libero di galleggiare



#### VINCOLATO

(TETHERED)

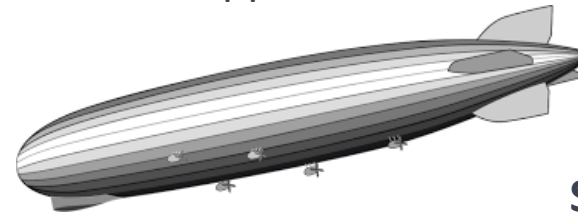
Ormeggiato al suolo



### DIRIGIBILI

Aerostati con sistema di guida

**RIGIDO**  
Zeppelin



**FLOSCIO**  
Blimps



**SEMI-RIGIDO**  
Norge

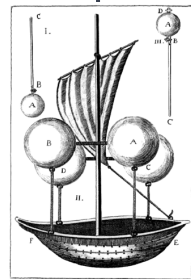


# Storia



Archimede di Siracusa

250 a.c.



Francesco Lana de Terzi

*"fabricare una nave, che camini sostenuta sopra l'aria a remi, et a veli"*

1670



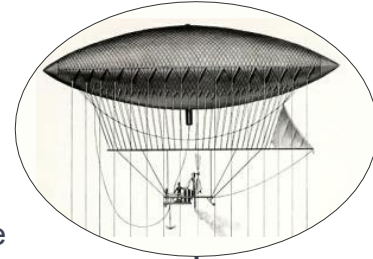
Joseph e Jacques Montgolfier

1782



Jean-Pierre Blanchard

1785



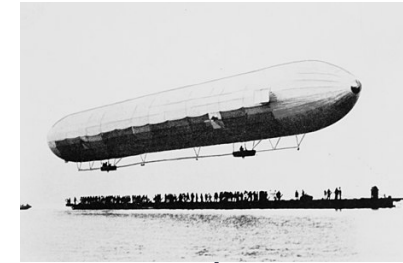
Henri Giffard

1852



Dupuy de Lome  
Dirigibile: 36m , 29m larg., 14m diam.

1870



Primo Zeppelin rigido L=128 m

1900

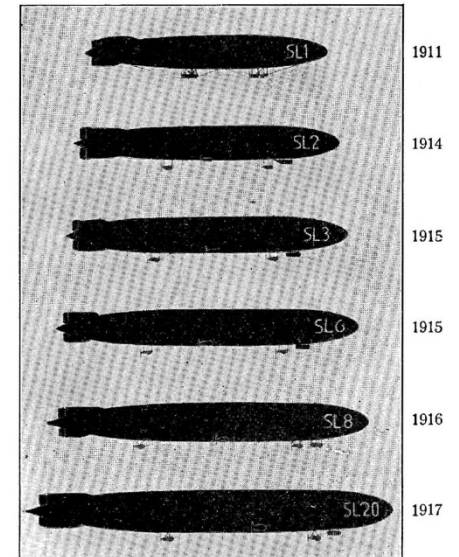


Fig. 4. Schattenriffe der Typschiffe des Luftfahrzeugbaus Schütte-Lanz.

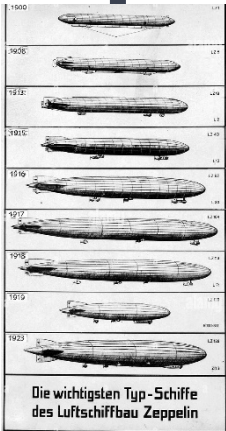
1920



# Storia

1900

**GERMANIA**  
Zeppelin  
rigido

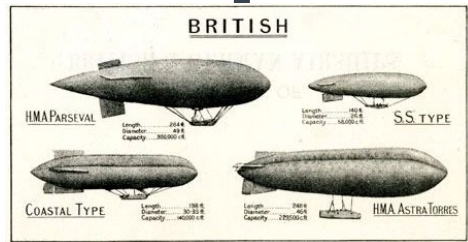


1937

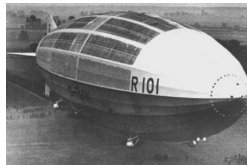


LZ 129 Hindenburg  
L=237 m

**REGNO UNITO**  
Semi rigidi e  
non rigidi



1930



R101  
L=237 m

**STATI UNITI**

Rigidi

- Metallo (ZMC-2)
- Tessuto (Los Angeles, Akron class)

1940

Semi-rigidi (O-1)



1960

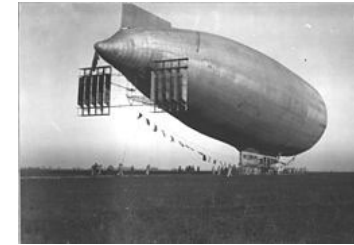
Non-rigidi

**ITALIA**

Semi-rigidi  
Dirigibili Forlanini

Norge  
Italia

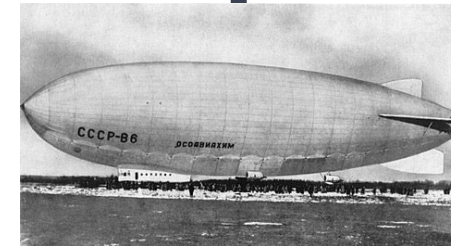
1930



**USSR**

Semi rigidi e non  
rigidi

1938



SSSR-V6 L=237 m

1950



# Principi di funzionamento

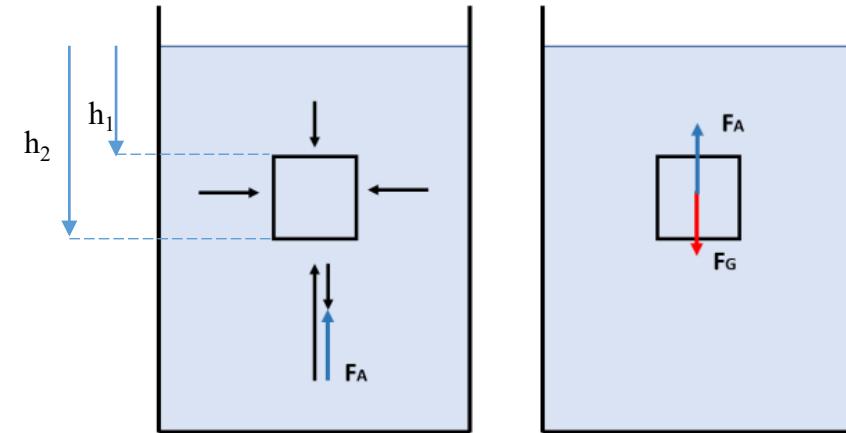
- **Principio di Archimede:** la forza di galleggiamento esercitata su di un corpo immerso in un fluido è uguale al peso del volume del fluido occupato dal corpo.

- La pressione esercitata da una colonna di fluido:

$$p = p_0 + \rho gh$$

$$F = \rho ghA = \rho gV$$

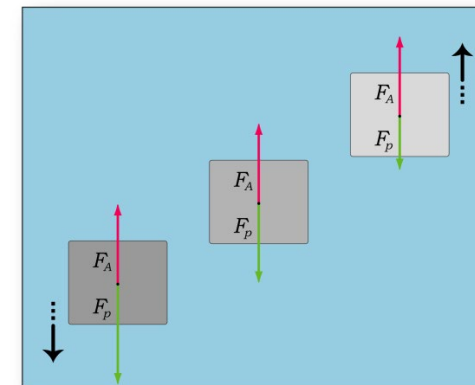
- Se immaginiamo che il corpo immerso sia fatto dello stesso «fluido» si comprende subito come la forza esercitata sulla faccia inferiore sia maggiore.
- Le parti laterali subiscono pressioni uguali e contrarie.
- L'unica forza in gioco, dovuta alla pressione, è quella che deriva dalla differenza tra pressione sulla faccia inferiore e sulla faccia superiore del corpo «fatto dello stesso fluido»
- Per mantenere l'equilibrio è necessario, però, che questa spinta sia uguale alla forza peso del corpo fatto di fluido.



$$F_A = \rho_f gV$$

$$F_p = \rho_s gV$$

$$F_B = F_A - F_p = (\rho_f - \rho_s) gV$$



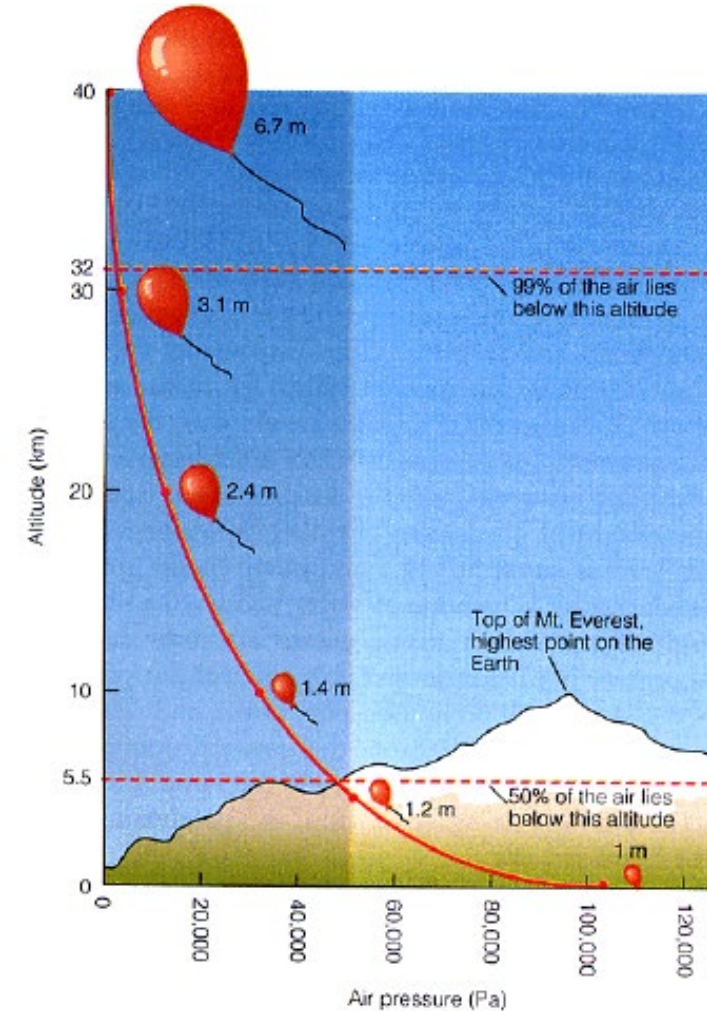
# Principi di funzionamento

- **Principio di Archimede:** *la forza di galleggiamento esercitata su di un corpo immerso in un fluido è uguale al peso del volume del fluido occupato dal corpo.*
- Le considerazioni fatte per i liquidi valgono anche per i **gas**, con una importante differenza:
  - a differenza dei liquidi, **la densità nei gas non è costante**, ma è funzione della **pressione e temperatura** secondo la seguente espressione, derivata dalla legge dei gas perfetti:

$$\rho_{gas} = \frac{pM}{RT}$$

$M$  massa molecolare,  $R$  costante universale dei gas.

- Poiché nell'atmosfera, la pressione diminuisce con la quota, anche la densità dell'aria è una **funzione decrescente** della quota:  $\rho = \rho(z)$ .
- Una mongolfiera con  $\rho_f < \rho_s$  salirà fino ad una quota a cui la densità dell'aria calda interna è uguale a quella dell'aria esterna





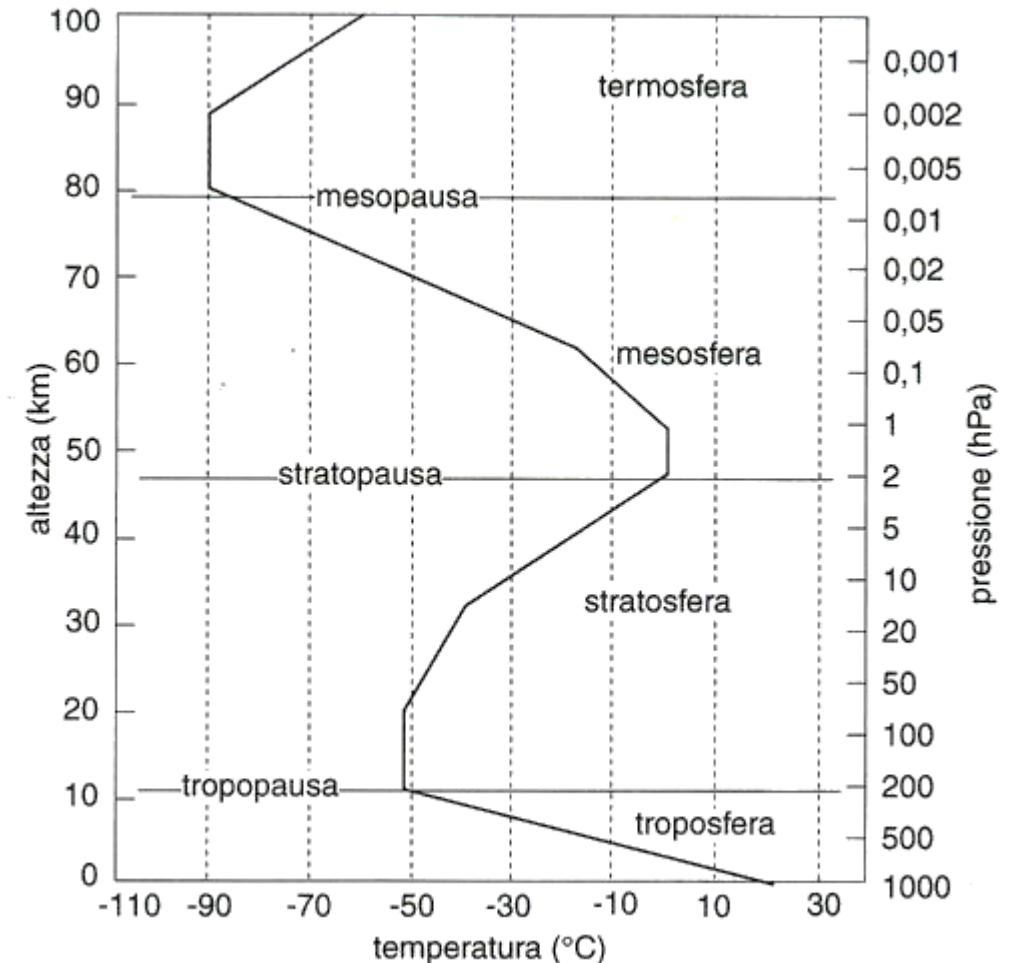
# Principi di funzionamento

- **Principio di Archimede:** la forza di galleggiamento esercitata su di un corpo immerso in un fluido è uguale al peso del volume del fluido occupato dal corpo.
- Le considerazioni fatte per i liquidi valgono anche per i **gas**, con una importante differenza:
  - a differenza dei liquidi, **la densità nei gas non è costante**, ma è funzione della **pressione e temperatura** secondo la seguente espressione, derivata dalla legge dei gas perfetti:

$$\rho_{gas} = \frac{pM}{RT}$$

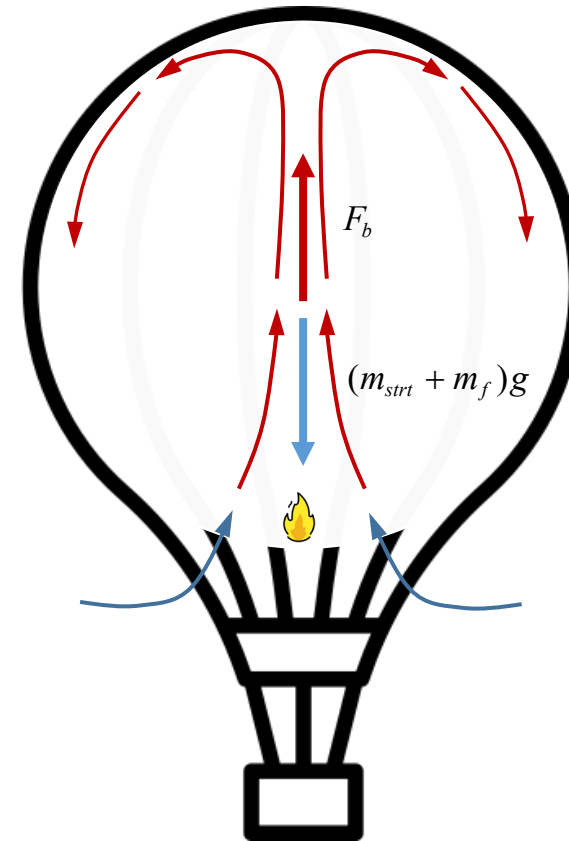
$M$  massa molecolare,  $R$  costante universale dei gas.

- Poiché nell'atmosfera, la pressione diminuisce con la quota, anche la densità dell'aria è una **funzione decrescente** della quota:  $\rho = \rho(z)$ .
- Una mongolfiera con  $\rho_f < \rho_s$  salirà fino ad una quota a cui la densità dell'aria calda interna è uguale a quella dell'aria esterna



# Principi di funzionamento

- Pertanto è possibile sollevare un corpo se si riesce a realizzare un volume tale che la densità media risulti essere inferiore a quella del fluido che lo circonda: ad esempio riscaldando il gas.
- O in alternativa usando gas più leggeri dell'aria:
  - Idrogeno
  - Elio
  - Neon
  - Ammoniaca
  - Metano
  - Gas da carbone



# Principi di funzionamento

- Pertanto è possibile sollevare un corpo se si riesce a realizzare un volume tale che la densità media risulti essere inferiore a quella del fluido che lo circonda: ad esempio riscaldando il gas.
- O in alternativa usando gas più leggeri dell'aria:
  - Idrogeno
  - Elio
  - Neon
  - Ammoniaca
  - Metano
  - Gas da carbone

$$F_B = (\gamma_G - \gamma_A)V - P$$

Sostanza	$\gamma_G$	$\gamma_G / \gamma_A$	$S = \gamma_A - \gamma_G$
	N/m <sup>3</sup>		
Idrogeno	0.882	0.0695	11.800
Elio	1.750	0.1380	10.932
Metano	7.032	0.5545	5.651
Neon	8.832	0.6963	3.850
Azoto	12.262	0.9674	0.415
Ossigeno	14.018	1.1052	-1.335
Argon	17.471	1.3775	-4.788
CO <sub>2</sub>	19.393	1.5229	-6.711
Propano	19.812	1.5622	-7.1299
Ozono	21.033	1.6585	-8.3503



# Elio o idrogeno

- Il primo gas ad essere stato utilizzato è l'**idrogeno**, nonostante fossero note le problematiche legate all'infiammabilità.
- L'**elio** è raro e poco disponibile in molte parti del mondo con l'eccezione degli USA. Questo spiega perché raramente l'elio fosse utilizzato raramente negli altri paesi.
- Tuttavia la tecnologia di estrazione massiva dell'elio è stata sviluppata solo dopo la seconda guerra mondiale.
- Tutte le aeronavi realizzate successivamente al 1960 hanno utilizzato l'elio come gas di sollevamento.



# Configurazioni strutturali

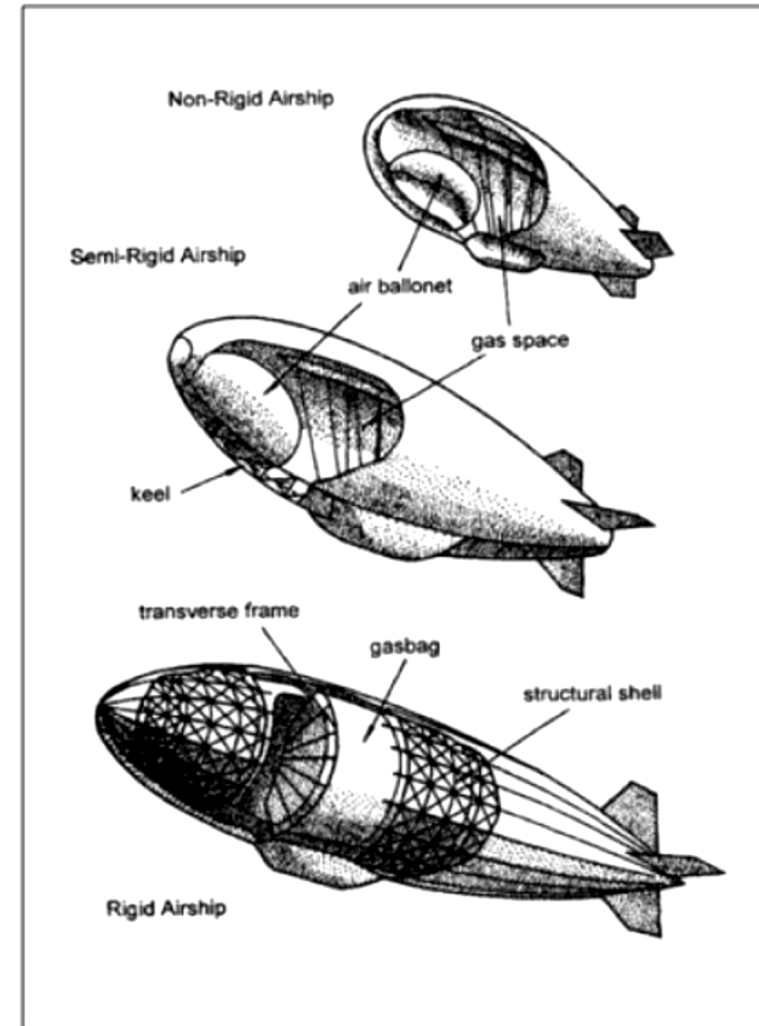
Il dirigibile è fondamentalmente un pallone con un mezzo di propulsione

Per realizzare un mezzo efficiente è necessario che l'involucro sia di forma snella in modo da ridurre la resistenza aerodinamica, migliorare il controllo e sia in grado di sostenere carichi aggiuntivi imposti dalle forze aerodinamiche e dai propulsori.

**Aeronave non-rigida.** La forma aerodinamica viene mantenuta attraverso un **involucro leggermente sovrappressurizzato** che deve essere abbastanza resistente e spesso. Richiede anche di avere pallonetti (**ballonet**) riempiti d'aria per permettere l'espansione del gas di sollevamento e per mantenere la stessa sovrappressione al variare della temperatura ambiente e dell'altitudine.

**Aeronave rigida.** Un dirigibile rigido è un dirigibile che utilizza una struttura completamente rigida per mantenere la forma aerodinamica. Le celle a gas sono immagazzinate all'interno della struttura, e la struttura è realizzata da un altro tipo di materiale, il che significa che ci sono due diversi tipi di materiale: celle contenenti gas e la skin. In questo caso non c'è bisogno di ballonet, perché la struttura mantiene la forma. Offre anche punti multipli di attacco per i motori e il carico, e permette di trasportare carichi più pesanti.

**Aeronave semirigida.** Un dirigibile semirigido è una via di mezzo tra un dirigibile e un dirigibile rigido. Esso utilizza ancora l'involucro sovrappressurizzato e i pallonetti d'aria, ha una struttura a chiglia ma solo sul fondo.



# Configurazioni strutturali

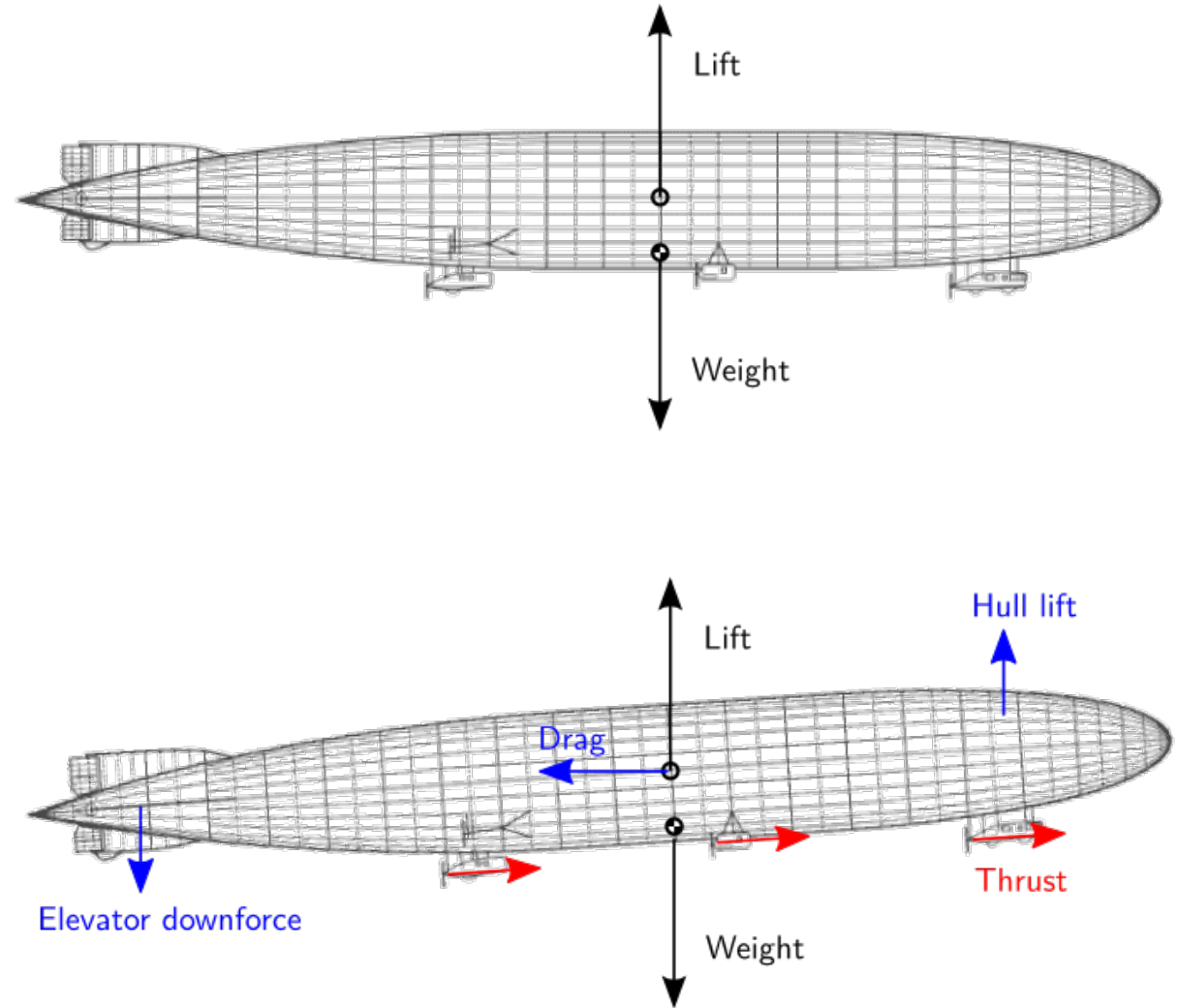
Nei dirigibili il centro di portanza è al di sopra del centro di massa, in quanto i motori e la gondola sono tradizionalmente montati nella parte inferiore: questo fornisce un'elevata stabilità al beccheggio.

Durante il volo la massa e la portanza non rimangono costanti (riscaldamento e conseguente espansione del gas, peso umidità sul rivestimento, consumo combustibile, etc.)

Per rimanere alla quota desiderata. L'aeronave deve compensare ogni sbilanciamento creando una portanza dinamica.

Con il beccheggio si può ottenere fino al 10% di incremento della portanza. Questo può essere ottenuto con l'inclinazione delle superfici orizzontali posteriori

Nei dirigibili non-rigidi o semi-rigidi, il beccheggio e la quota sono controllati dai ballonet



# Configurazioni strutturali

Nei dirigibili il centro di portanza è al di sopra del centro di massa, in quanto i motori e la gondola sono tradizionalmente montati nella parte inferiore: questo fornisce un'elevata stabilità al beccheggio.

Durante il volo la massa e la portanza non rimangono costanti (riscaldamento e conseguente espansione del gas, peso umidità sul rivestimento, consumo combustibile, etc.)

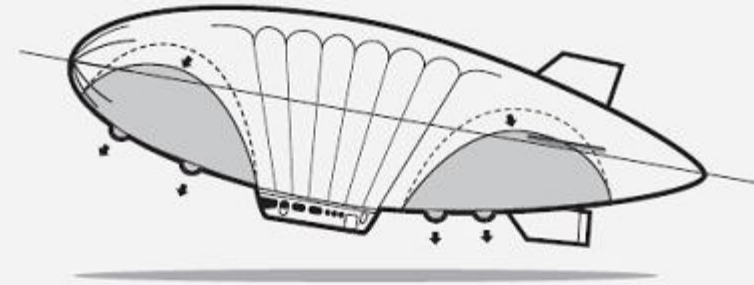
Per rimanere alla quota desiderata. L'aeronave deve compensare ogni sbilanciamento creando una portanza dinamica.

Con il beccheggio si può ottenere fino al 10% di incremento della portanza. Questo può essere ottenuto con l'inclinazione delle superfici orizzontali posteriori

Nei dirigibili non-rigidi o semi-rigidi, il beccheggio e la quota sono controllati dai ballonets

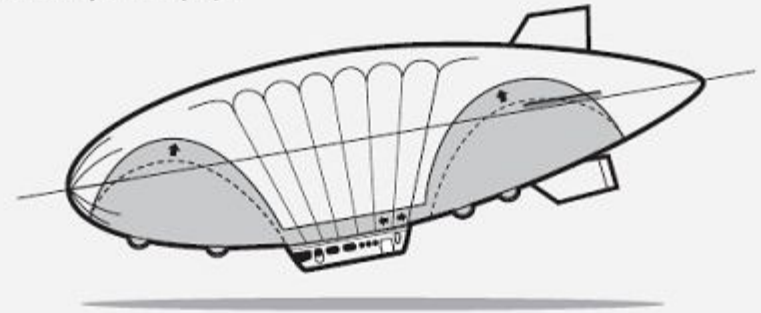
## Climbing (Helium expands)

The ballonets valves release air, (air denoted by shaded area).



## Descending (Helium contracts)

The air is driven back into the ballonets through the air ducts by motorized pumps.



# Aeronavi non rigide: materiali e proprietà desiderabili

---

## • Involucro

- Elevata resistenza (condiziona la dimensione massima)
- Elevato rapporto resistenza/peso per minimizzare il peso dell'involucro
- Resistenza all'azione ambientale (temperatura, umidità, luce ultravioletta)
- Elevata resistenza allo strappo
- Bassa permeabilità (perdita di gas)
- Ottima giuntabilità
- Alta resistenza allo scorrimento viscoso (creep)

## Ballonet

- Bassa permeabilità all'aria e al gas
- Buona flessibilità e resistenza all'abrasione
- Basso peso





# Aeronavi non rigide: materiali e proprietà desiderabili

## • Involucro a base di fibre naturali

- I materiali utilizzati per gli involucri sino alla seconda guerra mondiale furono esclusivamente tessuti (cotone) utilizzato in più strati impregnati di con gomma naturale.
- Per contenere la permeabilità era necessario sottoporre il tessuto a più bagni (più pesante) e sigillare con paraffina la superficie interna dell'involucro ed entrambe del ballonet.
- Giunzione: principalmente per cucitura integrato con adesione per processo di cura.
- Questi materiali erano caratterizzati da una scarsa resistenza: un multistrato di cotone poteva avere una resistenza a trazione di 1.4 kg/mm.
- A causa della suscettibilità agli effetti ambientali era necessario utilizzare coefficienti di sicurezza elevati e di solito le vite operative erano brevi.
- La bassa resistenza delle fibre naturali limitava la dimensione delle aeronavi non rigide a circa 8,500 m<sup>3</sup>.



### *Patrie*

Crew: 4  
Length: 60 m  
Diameter: 10.5 m  
Volume: 3,300 m<sup>3</sup>  
Useful lift: 1,260 kg  
Maximum speed: 48 km/h  
Cruising speed: 42 km/h  
Range: 450 km  
Endurance: 10 hours  
Ballonet volume: 670 m<sup>3</sup>



# Aeronavi rigide

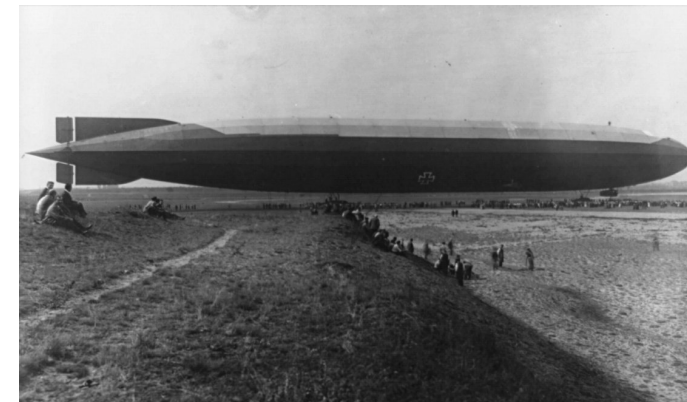
---

- **Involucro**

- Fino al 1926, il materiale utilizzato per gli involucri rigido è stato il **compensato**.
- I dirigibili Schütte-Lanz furono realizzati in legno e compensato incollati fino al 1918.
- Buona resistenza in trazione e compressione
- Scarsa resistenza all'acqua e all'umidità.



*Compensato usato nei dirigibili rigidi inglesi classe R31  
(Scottish National Museum of Flight)*

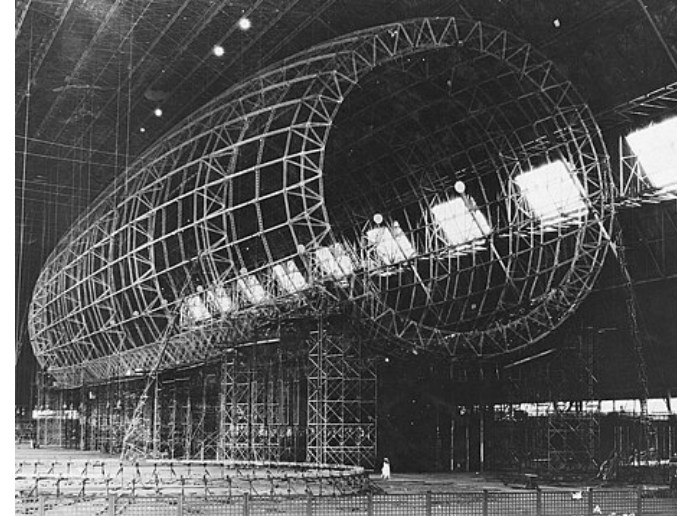


# Aeronavi rigide

---

- **Involucro**

- Altre soluzioni: struttura in alluminio e rivestimento in tela trattata.



*Telaio dello Zeppelin-Goodyear Akron in fase di assemblaggio, 1930*

- Esempio: Zeppelin



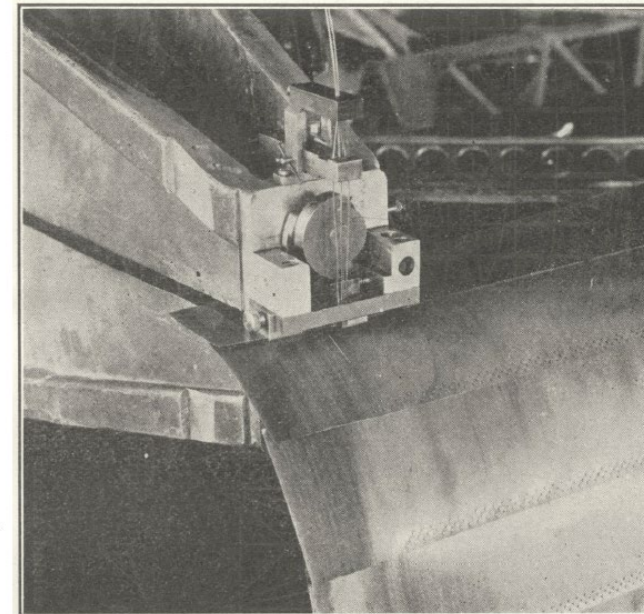
# Aeronavi rigide

---

- **Involucro**

- Nel 1926 viene consolidata la tecnologia per l'uso dell'alluminio al posto del composito (metalclad): pannelli di alluminio con spessore di 2 mm giuntati con rivettatura.

- Es: ZMC-2 (Marina degli Stati Uniti)

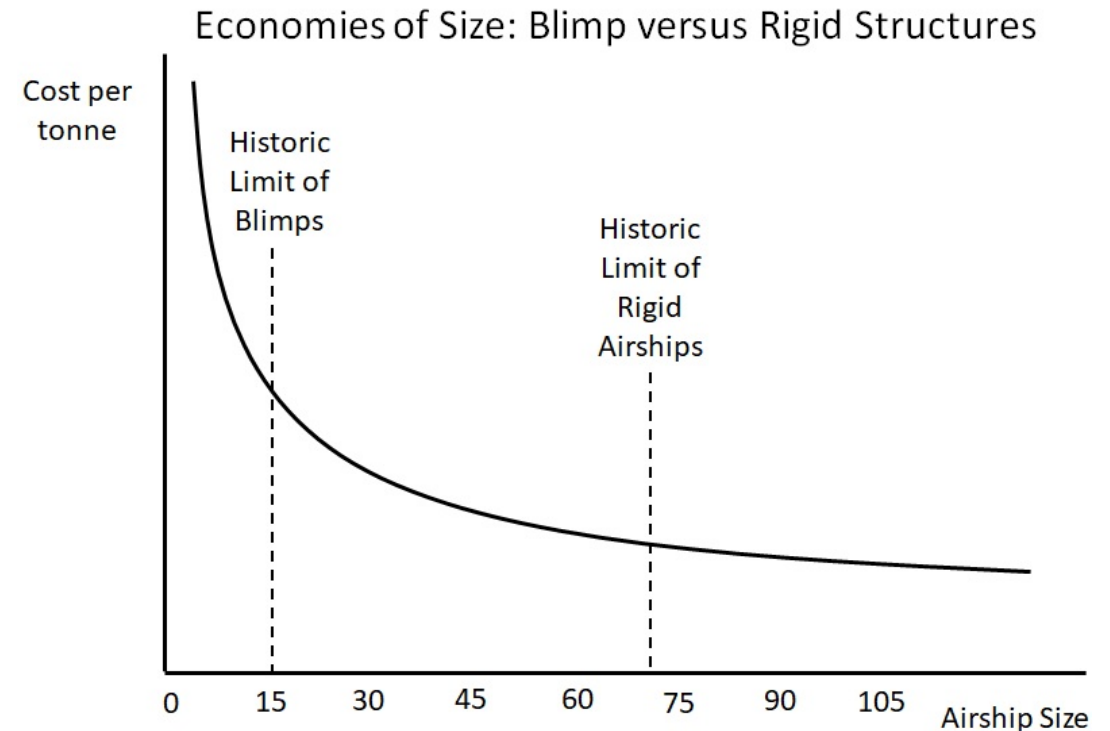


**FIG. 12—AUTOMATIC RIVETING MACHINE IN OPERATION**  
This Machine Will Drive over 5000 Rivets per Hr. and Do the Work Better than It Can Be Done by Hand



# Aeronavi: *più grande è, e meglio è.*

- I benefici economici delle dimensioni si presentano in due forme:
  - Il costo marginale del capitale per costruire un dirigibile leggermente più grande è relativamente basso: passare da un dirigibile rigido da 15 tonnellate a un modello da 30 tonnellate potrebbe costare solo il 25% in più.
  - Economia nelle operazioni. La resistenza di un dirigibile, e quindi il suo consumo di carburante, aumenta con il **quadrato della dimensione**, mentre il carico utile aumenta più velocemente del **cubo**, quindi l'efficienza del carburante migliora nettamente.
  - Maggiore stabilità con le dimensioni. Il **costo operativo per tonnellata/km** scende man mano che un dirigibile diventa più grande.

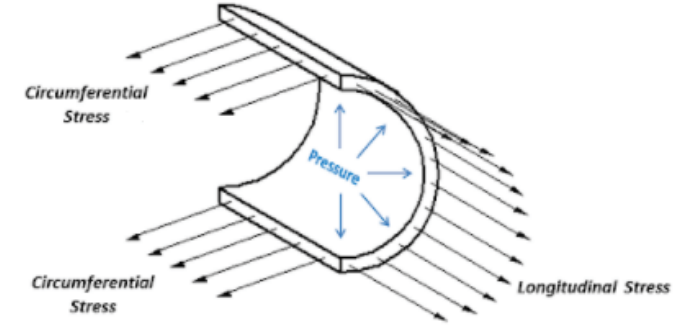


# Aeronavi: *più grande è, e meglio è.*

- I dirigibili non-rigidi sono affetti da una problematica di scala particolare che deriva dal modo in cui lo **sforzo circonferenziale** influenza la resistenza dei materiali richiesti per gli involucri.
- Lo sforzo circonferenziale agisce sulla parete di un recipiente contenente un fluido.

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{p_i D_i - p_e D_e}{2t} = (p_i - p_e) \frac{\bar{D}}{2t}$$

- L'origine del termine deriva dalle botti di legno a doghe che erano tenute insieme da cerchi di metallo. Man mano che si costruivano botti e tini più grandi con diametri maggiori, la resistenza dei cerchi doveva essere aumentata in proporzione al diametro.
- In un dirigibile non rigido, il gas vuole formare una bolla. Di conseguenza, **la maggior parte della tensione circonferenziale si localizza sui lati del dirigibile.**

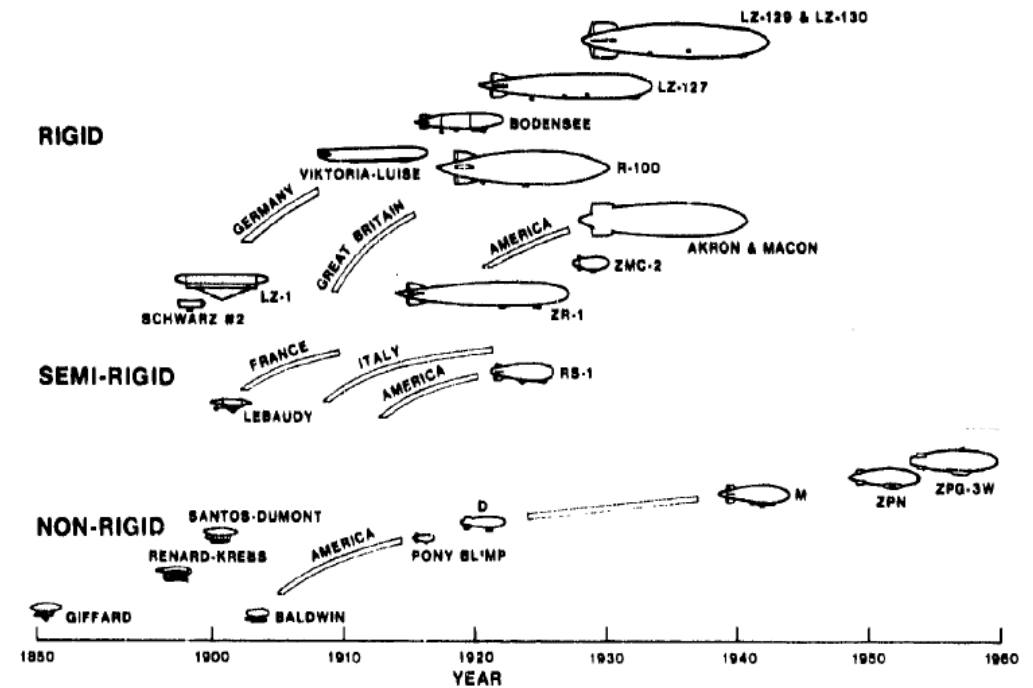


- In un dirigibile ci deve essere una differenza significativa tra la pressione interna e la pressione esterna sul dirigibile.
- **Lo sforzo aumenta con il diametro** e l'involucro del dirigibile deve essere reso più spesso/forte per resistere alle forze che cercano di staccarlo.
- Con l'aumentare del diametro e dello spessore richiesto aumenta il peso e si riduce il carico utile.



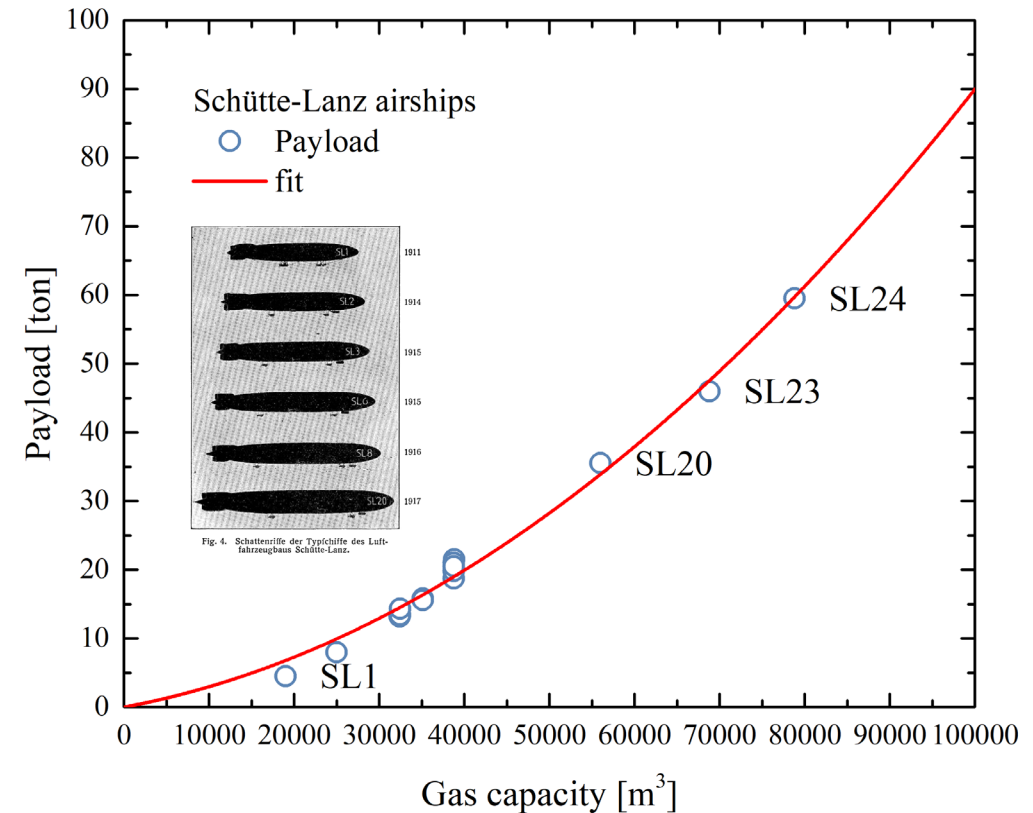
# Aeronavi: *più grande è, e meglio è.*

- Supponendo che la resistenza sia una funzione dello spessore delle pareti, **il peso dell'involucro** scala approssimativamente con il **cubo della dimensione**
- Anche la **portanza lorda** scala con il **cubo della dimensione**, e non supera di molto il peso.
- Di conseguenza, **i dirigibili non-rigidi non hanno la tendenza a diventare significativamente più efficienti man mano che diventano più grandi.**
- Gli involucri più pesanti sono anche più difficili da fabbricare (materiali più rigidi) e più difficili da trasportare per il montaggio del dirigibile.
- Al fine di ridurre la resistenza dei materiali necessari per un dirigibile di diametro maggiore, sono stati creati disegni di catamarani che hanno due o tre lobi.



# Aeronavi: *più grande è, e meglio è.*

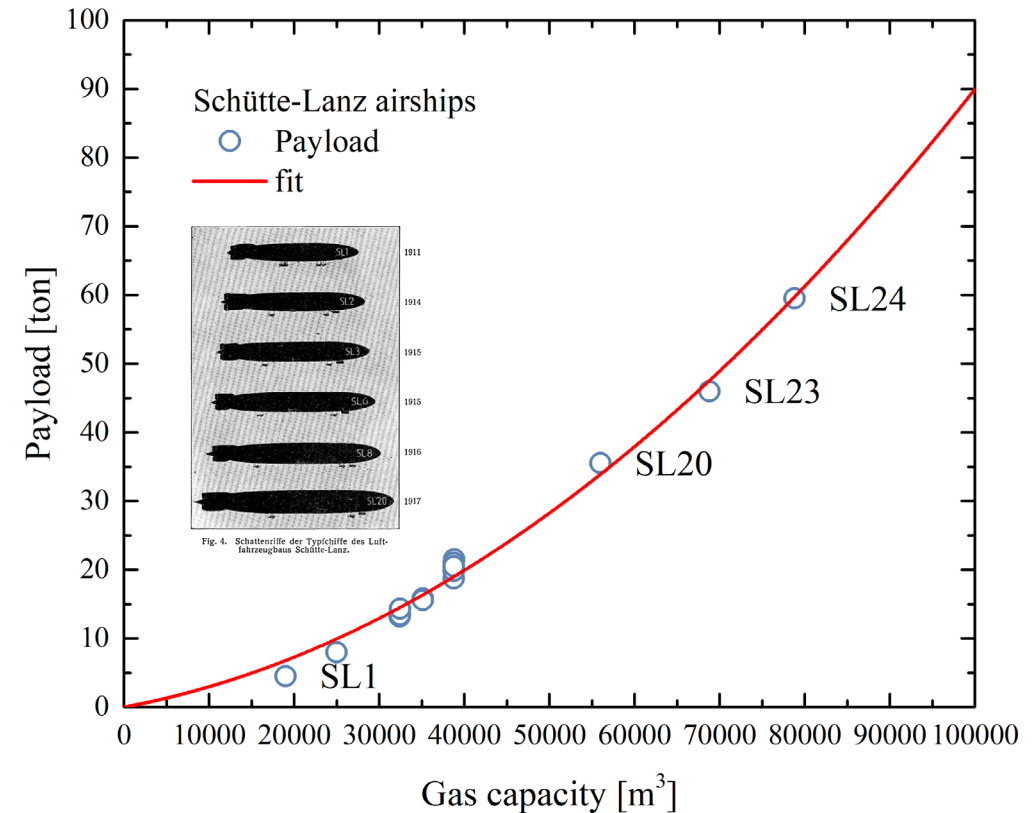
- Al contrario, i **dirigibili rigidi** godono di drammatici guadagni di efficienza man mano che aumentano
- **La portanza di un dirigibile rigido aumenta con il cubo della sua dimensione**, superando di gran lunga **il peso** del telaio del dirigibile, che **aumenta con il quadrato** della sua dimensione.
- In un dirigibile rigido, **lo sforzo circonferenziale è irrilevante** perché il gas di sollevamento è contenuto in una serie di celle di gas all'interno dello scafo che non sono pressurizzate.
- Lo svantaggio di un dirigibile rigido era che costruire una struttura a telaio 3D abbastanza forte da resistere a tutte le forze attese in volo era difficile e, soprattutto, pesante.
- Prima della guerra, gli ingegneri dei dirigibili dovevano dipendere dall'osservazione e dai calcoli con le regole approssimate per calcolare le concentrazioni di stress.
- Non sorprende che la causa di molti incidenti di dirigibili rigidi di quest'epoca fossero causati da cedimenti strutturali.



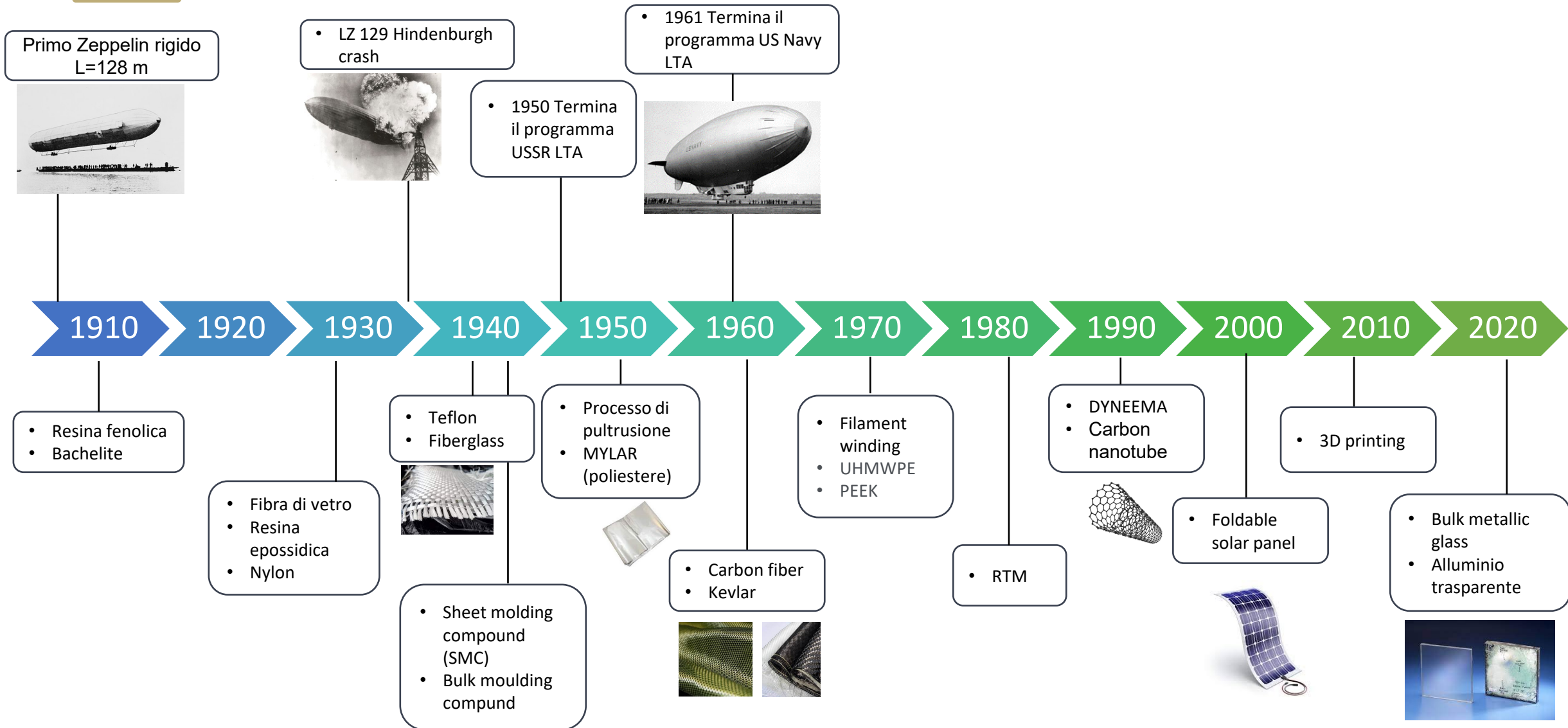


# Aeronavi: *più grande è, e meglio è.*

- Esempi di incidenti causati direttamente o indirettamente da cedimenti strutturali sono il Roma, R-38, R-101, USS Macon, USS Shenandoah e molti altri.
- I miglioramenti nella tecnologia dei materiali più leggeri e più resistenti consentono oggi di eliminare i problemi strutturali dei dirigibili rigidi
- L'ultimo dei giganteschi dirigibili rigidi ha cessato le operazioni prima **dell'invenzione dell'estensimetro** nel 1938.
- Oggi è possibile ottenere misure precise per determinare lo stato di sollecitazione.
- Le dimensioni gigantesche dei dirigibili rigidi significano che le gallerie del vento ordinarie non erano in grado di rappresentare le macro forze che operano su quella scala, cosa oggi prevedibile con calcolo fluidodinamico.
- Nessuno sa quale sia il limite superiore delle dimensioni dei dirigibili rigidi da carico.



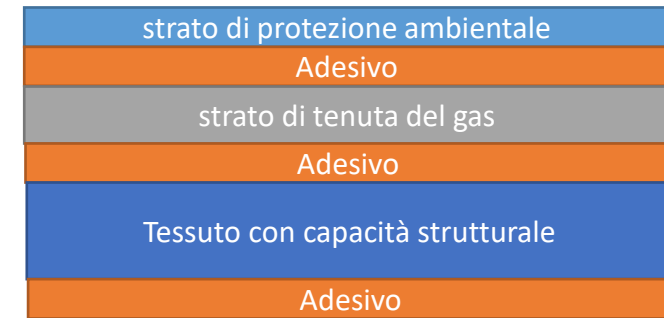
# Potenzialità offerte dai nuovi materiali



# Potenzialità offerte dai nuovi materiali

- L'introduzione di tessuti sintetici consente un incremento significativo di resistenza a minor peso
- Vista la bassa resistenza agli agenti atmosferici, questi tessuti vengono di solito impregnati con poliuretano
- Con questo tipo di tessuti è stata eliminato il processo di cucitura e la giunzione avviene per butt-joint integrato con straps consentendo di ottenere un tessuto di grandi dimensioni con uguale resistenza nella direzione di trama e ordito.
- L'idea del materiale composito ha guidato lo sviluppo di materiali specificamente concepiti per applicazioni delle moderne aeronavi (Skyship).
- I materiali per l'involucro devono possedere resistenza, stabilità geometrica e idrolitica. Il poliestere rimane tra i più performanti.
- I materiali compositi (fibra di carbonio) rappresentano una valida soluzione per la realizzazione delle strutture interne che possono essere ottimizzate anche in ottica additive.
- Potenziali sviluppo: compositi multifunzionali.

	COTONE	NYLON	POLYESTERE
Peso specifico	1.5	1.14	1.39
Resistenza a trazione [GPa]	0.4-0.55	0.8	1.0
Modulo elastico GPa	0.1	5	12



## THE DIRIGIBLE IS DEAD!

by LIEUT.-COL. KARL S. AXTATER  
and RICHARD G. HUBLER



The disasters that wrecked the Navy's huge "Akron" and the "Macon" (above) spelled doom for U. S. dirigibles.

***A lighter-than-air pioneer writes his farewell  
to the blimps and tells why he believes the air-  
plane will continue to have aviation to itself.***

**Dicembre 1940**



# Conclusioni

**Exhibit 3.**

## General Characteristics of Airships Under Consideration by DoD

Mission	Operating Altitude	Airship Type	Altitude (Feet)	Endurance or Range	Status of Technology	Characteristics
ISR	Low Altitude	Conventional	Up to about 20,000	100 to 300 hours	One system currently operating; others under construction	Relatively mature technology
		Hybrid	Up to about 20,000	500 hours	Technology demonstrations ongoing	Uses static lift from helium, aerodynamic lift from the shape of the envelope, and vectored thrust to stay aloft
	High Altitude	Conventional	65,000 to 75,000	Greater than 400 hours	Technology demonstrations ongoing	Very large envelope volume to sustain lift
		Payload-Return	65,000 to 75,000	100 to 300 hours	Technology demonstrations ongoing	Payload is detachable and returns to point of origin; airship is single-use
Airlift	Low Altitude	Hybrid	9,000 to 12,000	Hundreds to thousands of miles, depending on design	Technology demonstrations ongoing	Uses static lift from helium, aerodynamic lift from the shape of the envelope, and vectored thrust to stay aloft

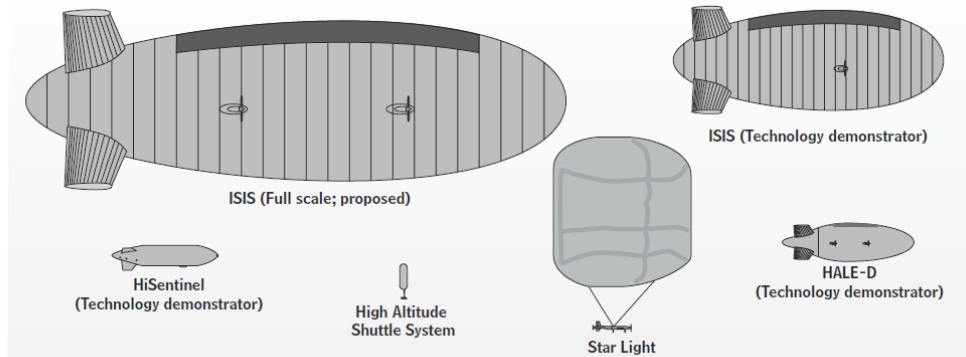
Source: Congressional Budget Office.

Note: DoD = Department of Defense; ISR = intelligence, surveillance, and reconnaissance.

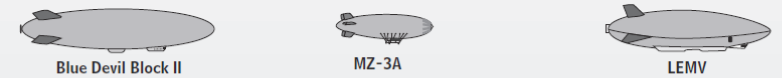
**Exhibit 1.**

## Illustrations of Airships

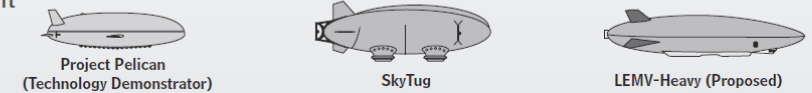
### High-Altitude ISR



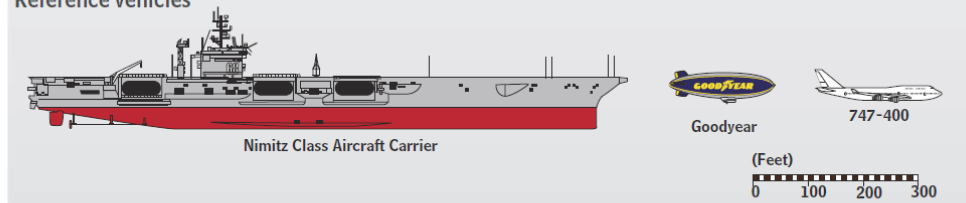
### Low-Altitude ISR



### Airlift



### Reference Vehicles



Source: Congressional Budget Office based on data provided by manufacturers.

Note: ISR = intelligence, surveillance, and reconnaissance; ISIS = Integrated Sensor Is the Structure; HALE-D = High-Altitude Long-Endurance Demonstrator; LEMV = Long-Endurance Multi-Intelligence Vehicle.

BO



# Conclusioni

---

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

