

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

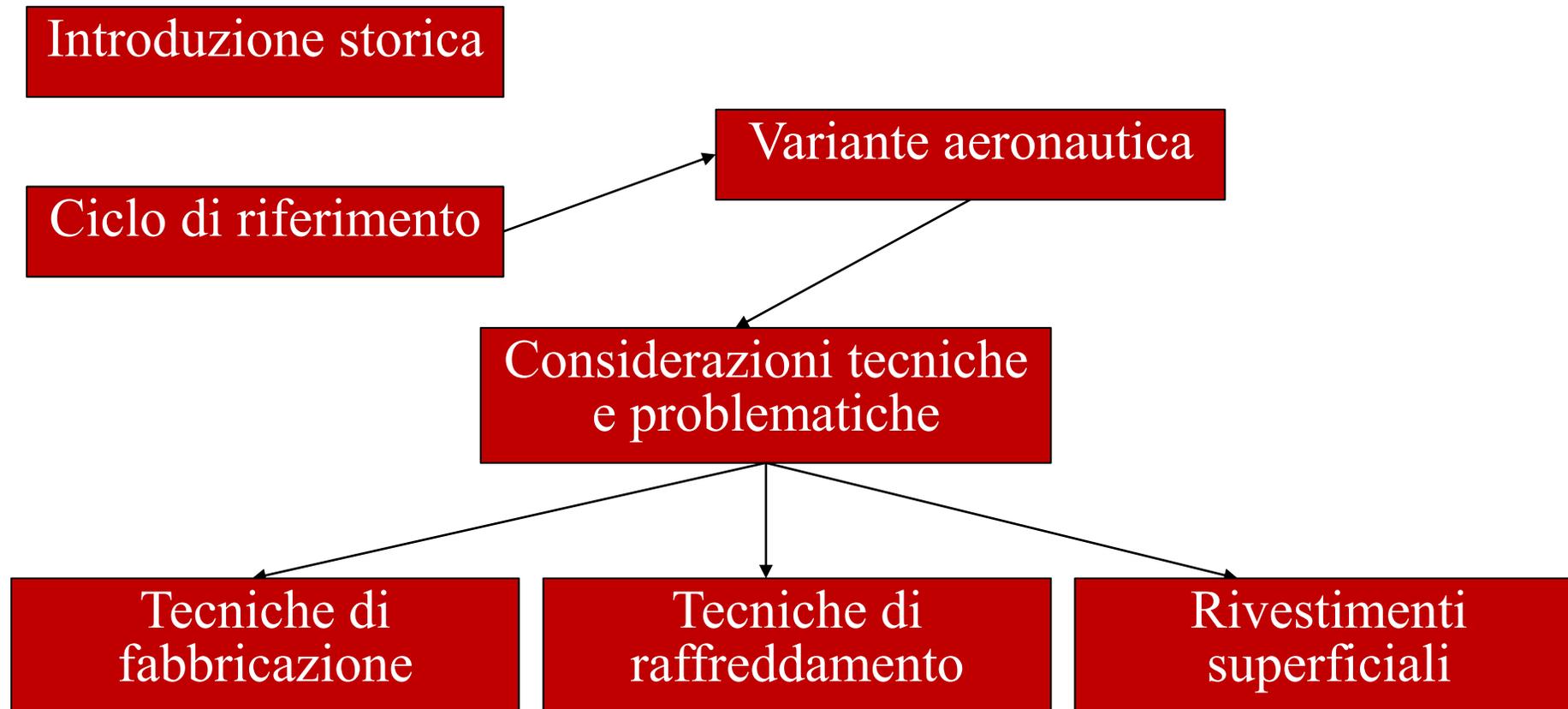
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Problemi termici nelle turbine dei
motori aeronautici»***

Tutor universitario: Prof. Pierfrancesco Brunello

Laureando: *Giacomo Zecchin*

Padova, 16/03/2022



- L'installazione di motori turbogetto su aerei rivoluzionò l'aeronautica
- 1943 primi voli di aerei da combattimento con motori turbogetto (Gloster Meteor , Messerschmitt Me 262)
- Performance ridotte ma grande margine di miglioramento
- 1952 entrata in servizio primo aereo commerciale a reazione (de Havilland Comet)



Fonte :[6]

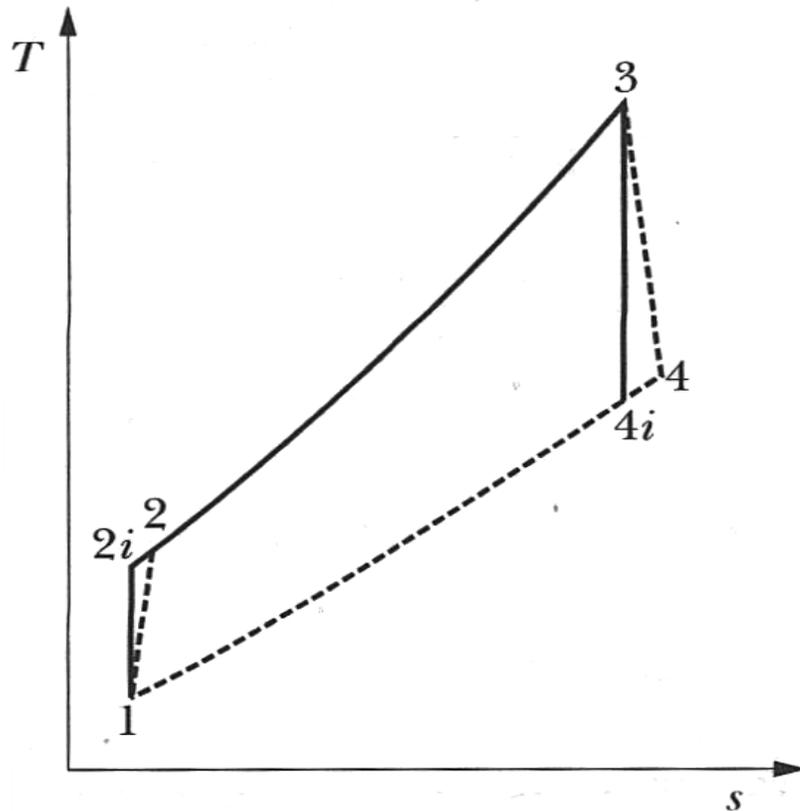


Fonte:[10]

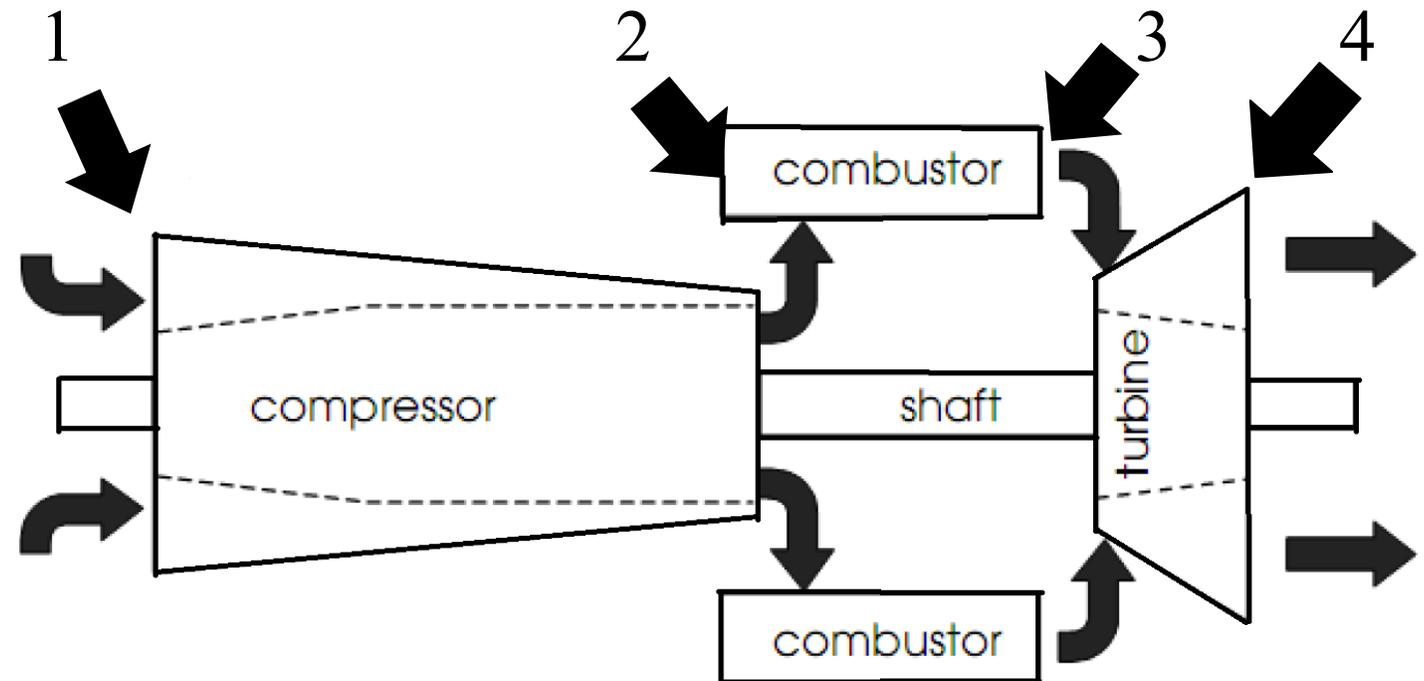


Fonte:[11]

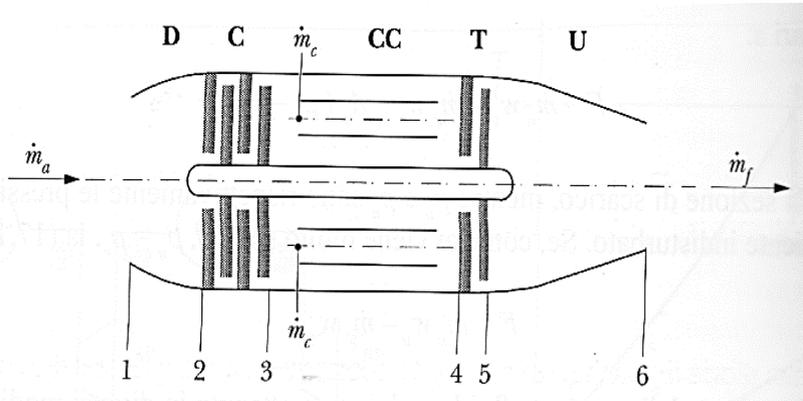
- Ciclo Joule formalizzato da Joule prima dell'invenzione delle turbine come variante del ciclo Rankine utilizzando l'aria al posto dell'acqua come fluido operativo
- Ciclo Brayton–Joule brevettato da Brayton nel 1872 per la produzione di potenza meccanica continuativa



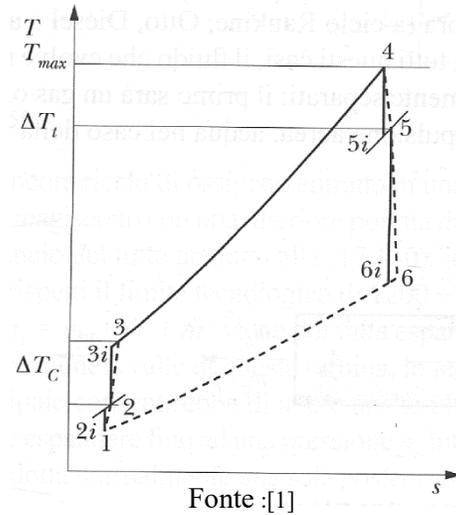
Fonte: [1]



Fonte: [2]



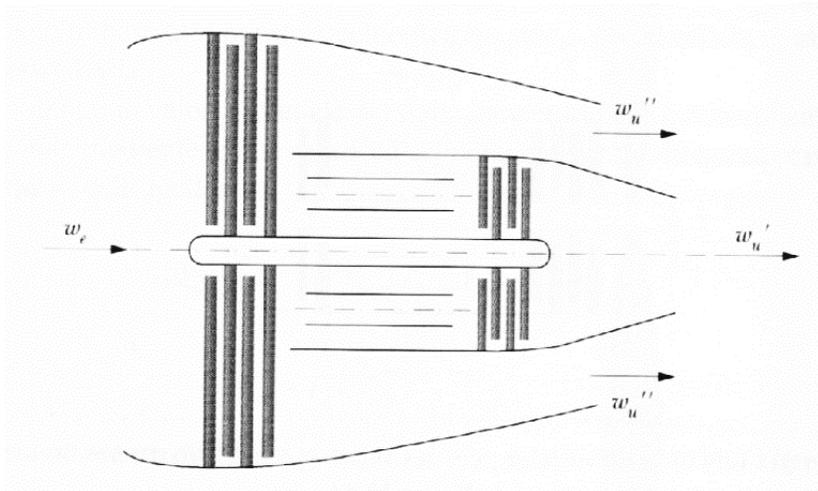
Fonte :[1]



Fonte :[1]

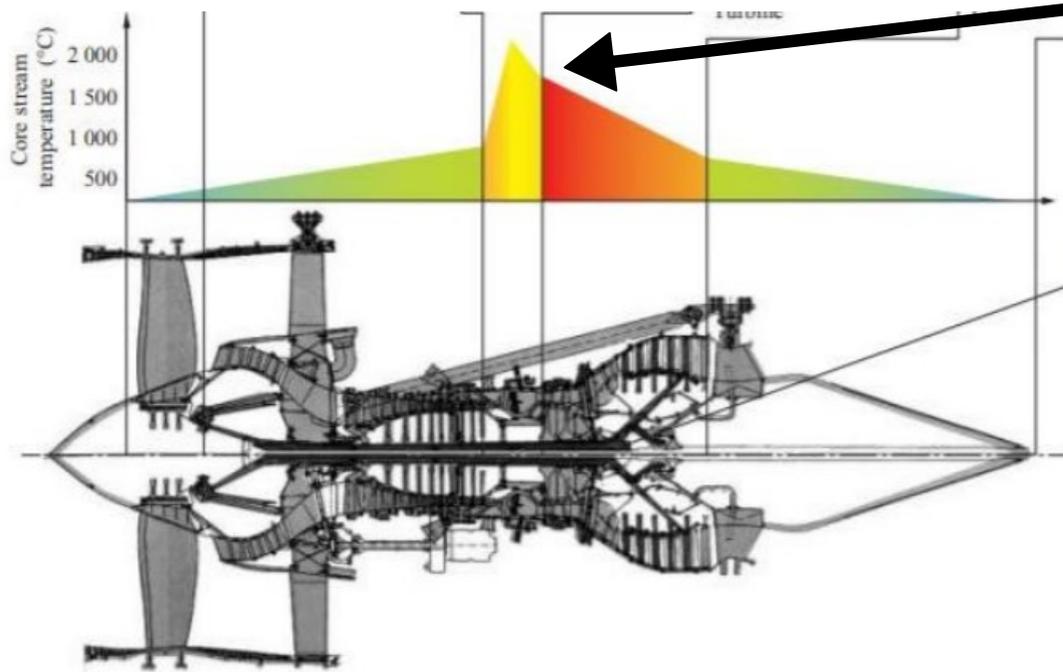
$$S = \dot{m}_f w_f - \dot{m}_a w_a$$

La variante turbofan è quella più utilizzata nei trasporti civili

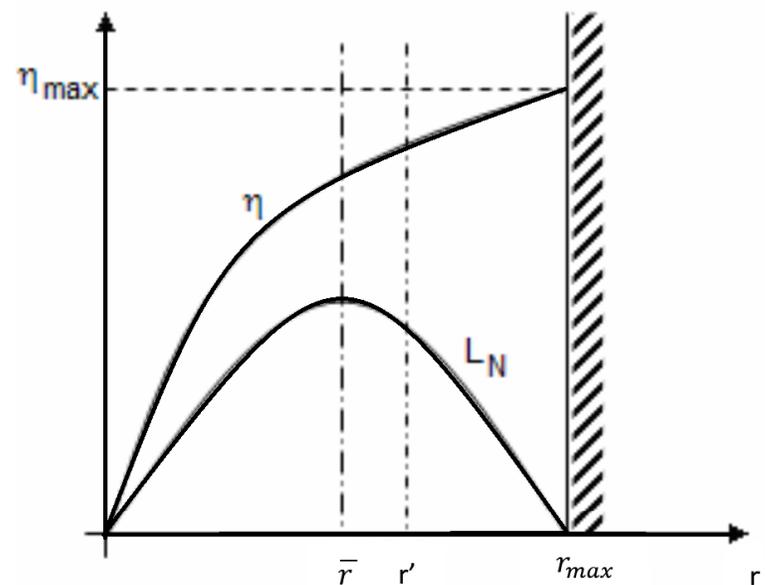


Fonte :[1]

$$S = \dot{m}_f w'_u + \dot{m}'_a w''_u - \dot{m}_e w_e$$



$T_{ingresso} \approx 1550 \text{ K}$



Fonte : [3]

Fonte : [4]

$$L_n = \eta \cdot Q = \dots = \left(1 - \frac{1}{r^{\frac{k-1}{k}}}\right) \cdot c_p T_2 \left(\frac{T_{ingresso}}{T_2} - r^{\frac{k-1}{k}}\right)$$

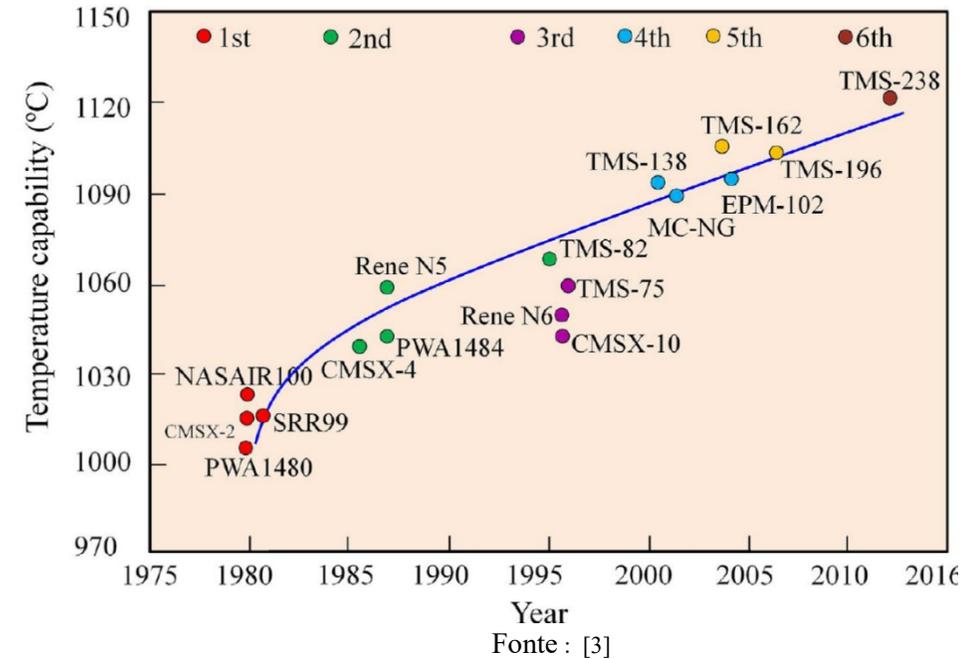
Fonte: [4]

Le palette devono presentare :

- Resistenza al creep;
- Resistenza all'ossidazione ad alta temperatura;
- Tenacità a frattura ;
- Resistenza a fatica termica ;
- Alta stabilità termica ;
- Bassa densità ;

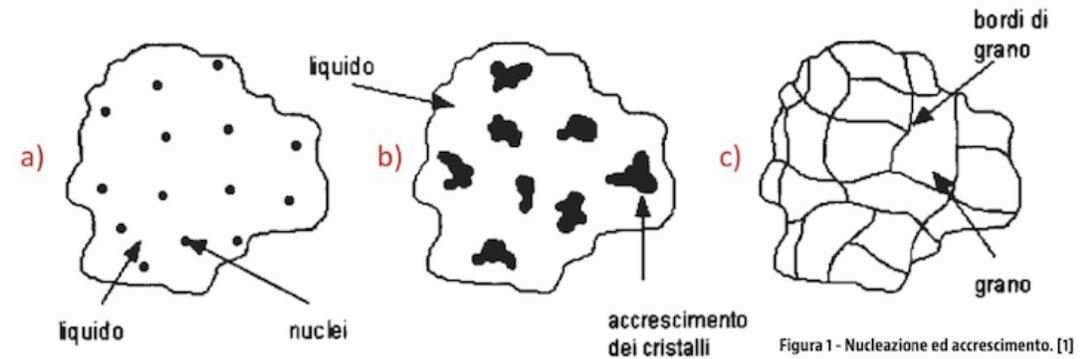
$$\frac{F_{cf}}{V} = \rho \omega^2 R$$

- Le superleghe a base di NiCr presentano gran parte di queste caratteristiche
- Vengono aggiunti elementi alliganti per migliorare alcune performance



❖ COLATURA CONVENZIONALE

- Semplicità e basso costo
- Scarsa resistenza allo scorrimento viscoso



Fonte: [5]

❖ SOLIDIFICAZIONE MONODIREZIONALE

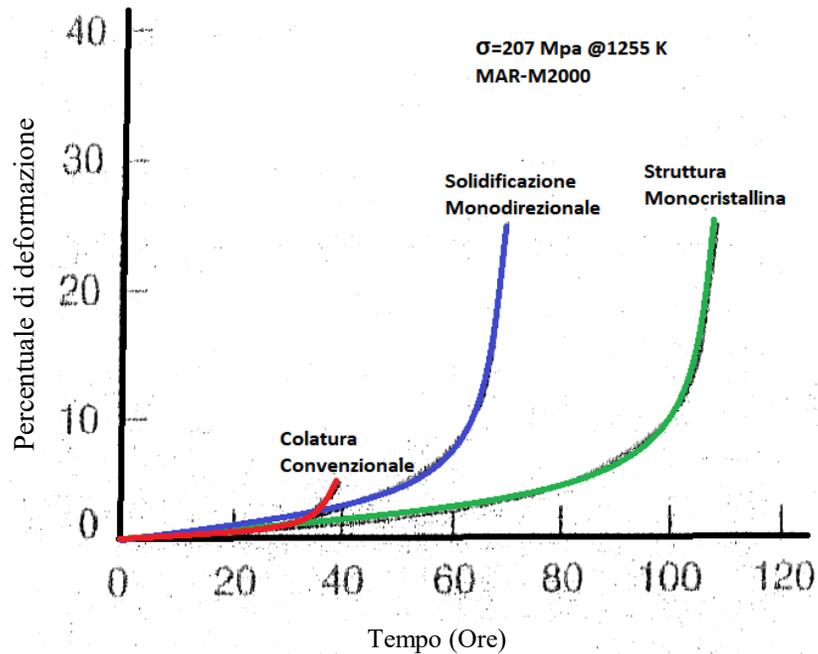
- I cristalli si solidificano lungo una direzione preferenziale
- Resistenza creep nettamente migliore



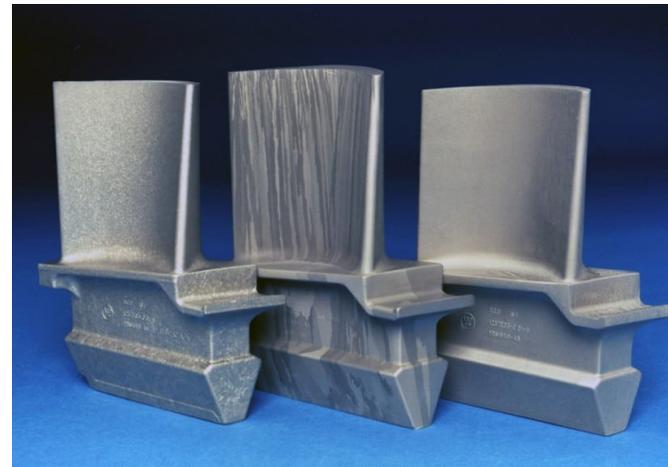
Fonte: [7]

❖ STRUTTURA MONOCRISTALLINA

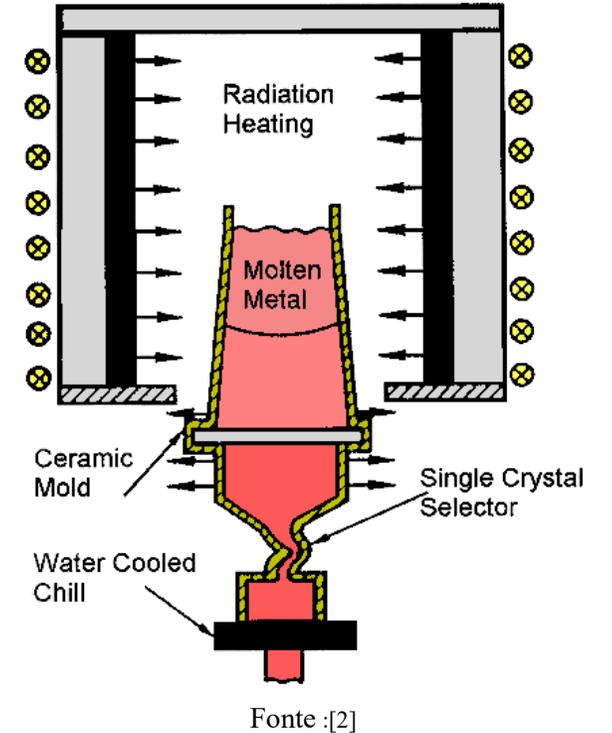
- Processo di fabbricazione più complesso dei tre
- La paletta risulta essere composta da un unico cristallo
- Resistenza al creep elevata



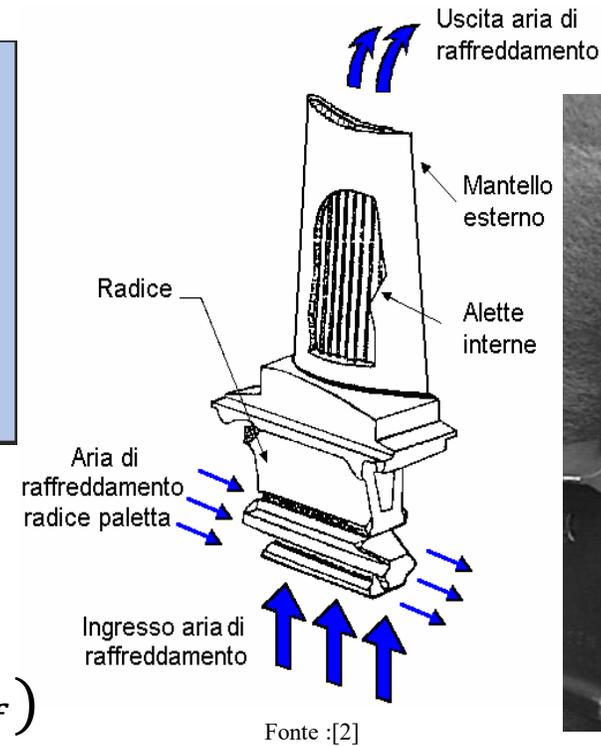
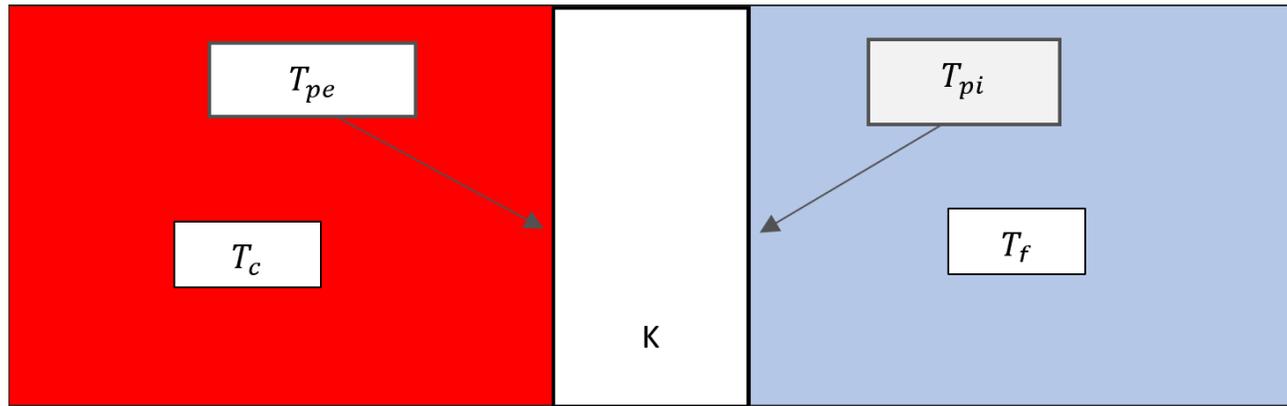
Fonte: [3]



Fonte: [2]

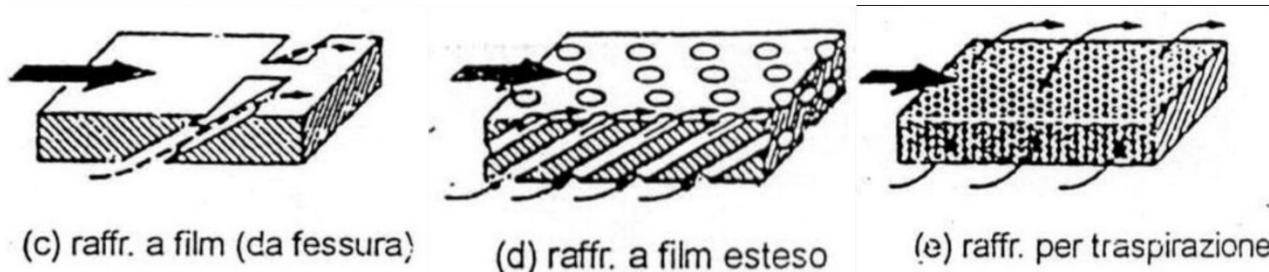


❖ RAFFREDDAMENTO CONVETTIVO FORZATO

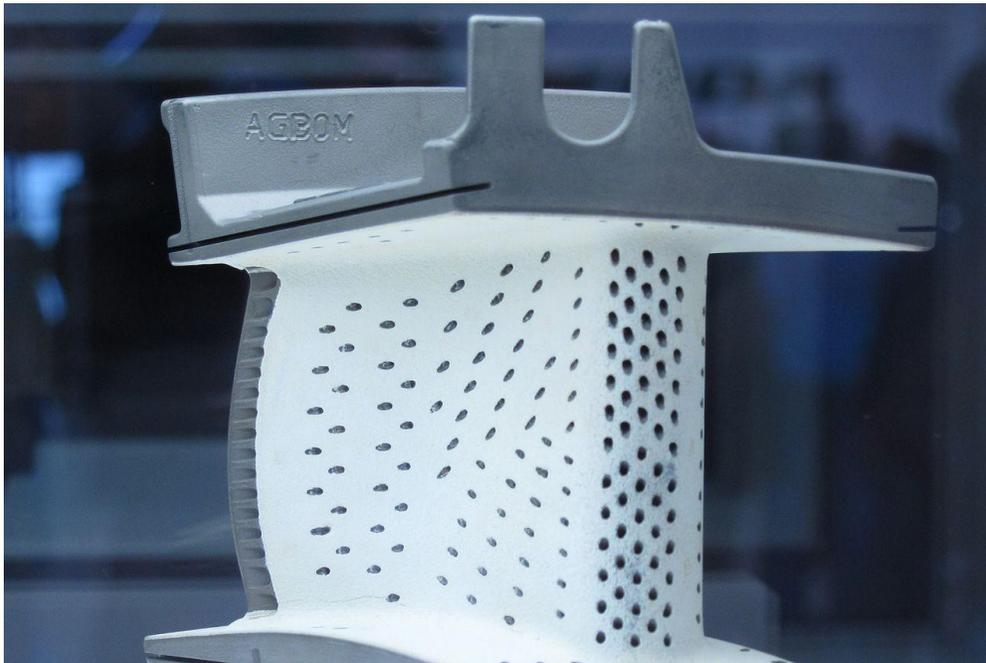


$$\frac{q}{A} = \alpha_e(T_c - T_{pe}) + K(T_{pe} - T_{pi}) + \alpha_i(T_{pi} - T_f)$$

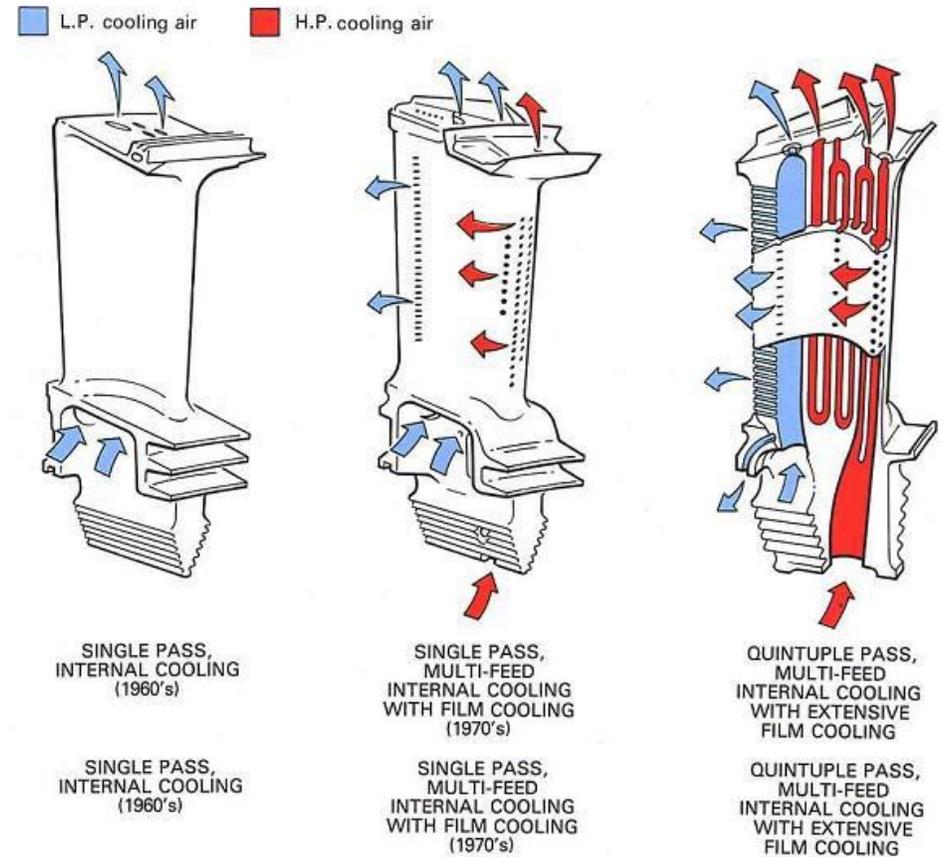
❖ RAFFREDDAMENTO A FILM



Fonte: [9]

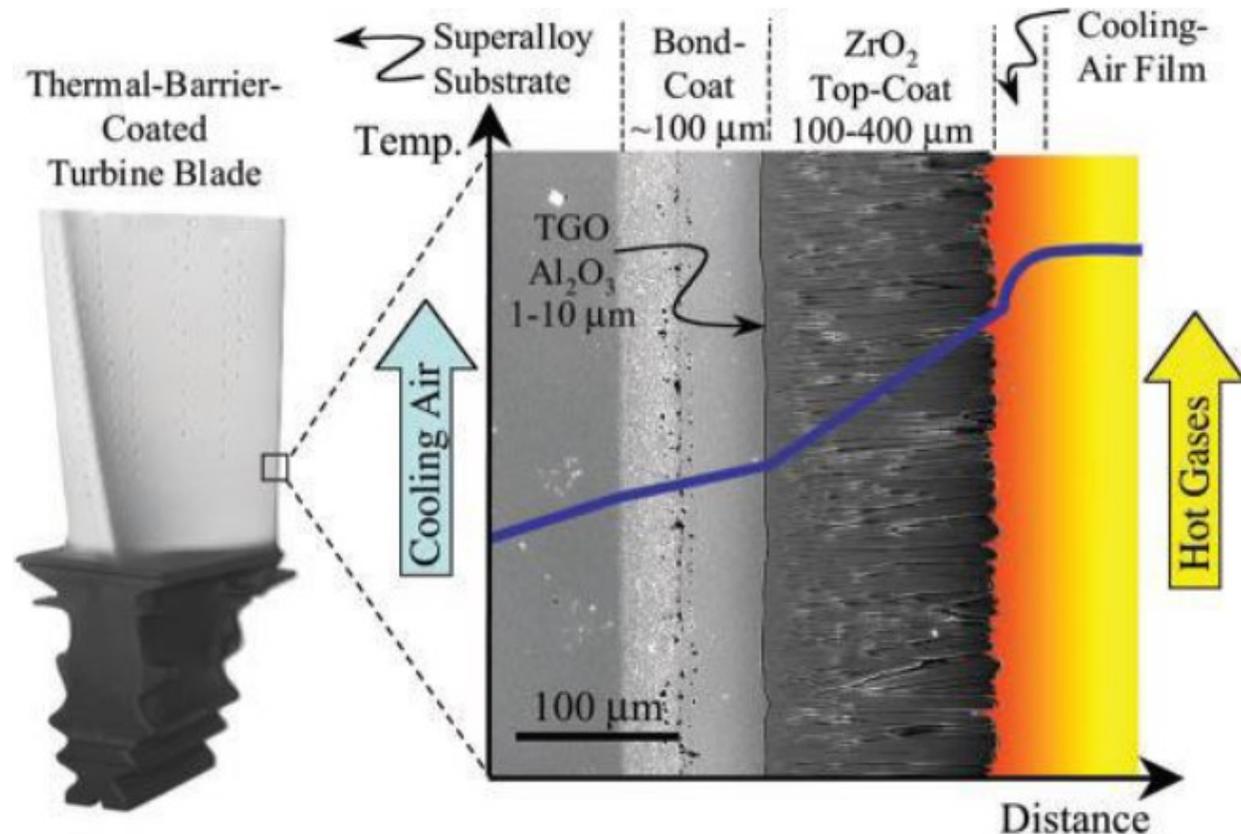


Fonte : [3]



Fonte :[2]

- Esistono stadi della turbina in cui il raffreddamento attivo da solo non è efficace
- Sono necessari rivestimenti isolanti specifici
- Prime applicazioni anni '50 per rivestimento camere di combustione
- Applicazioni odierne possono garantire sicurezza per temperature superficiali fino a 300K dalla temperatura di fusione del substrato strutturale



❖ SUBSTRATO METALLICO STRUTTURALE

- Garantisce integrità strutturale a tutto il sistema TBC
- Costituito in superlega a base di Ni Cr Co + elementi alliganti che migliorano proprietà specifiche
- Fabbricato tramite solidificazione monodirezionale o solidificazione monocristallina

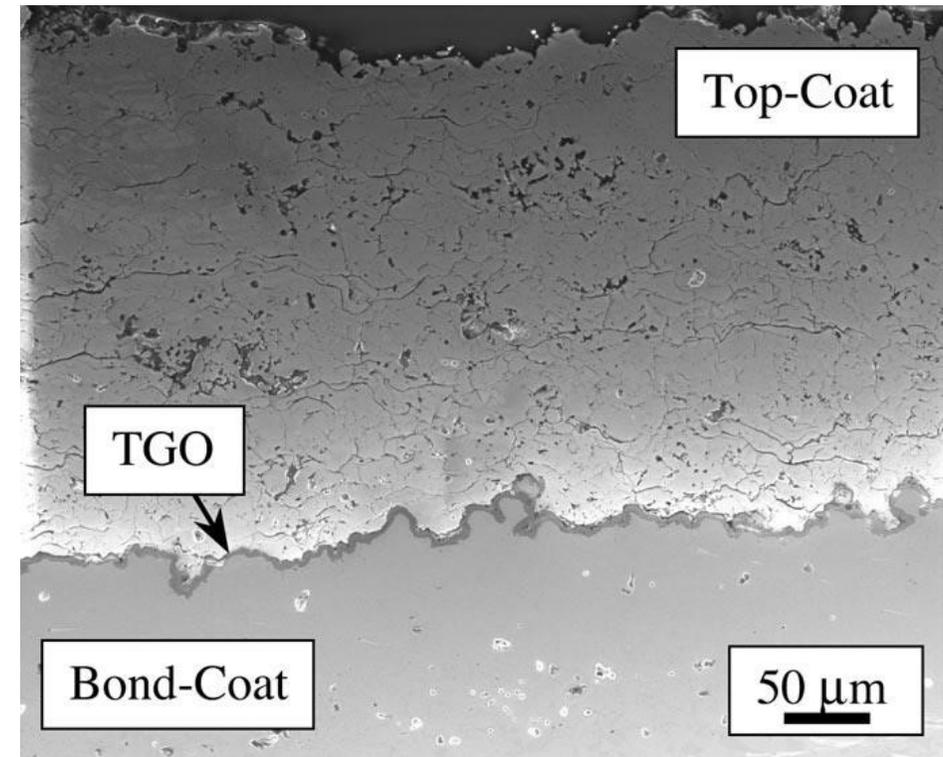
Lega	Cr	Ni	Co	Mo	W	Nb	Ti	Al	Fe	C	Altri
<i>Hastelloy B</i>	1.0 max	63.0	2.5 max	28.0	---	---	---	---	5.0	0.05	0.03 V
<i>Astroloy</i>	15.0	56.5	15.0	5.25	---	---	3.5	4.4	0.3	0.06	0.03 B, 0.06 Zr
<i>IN 100</i>	10.0	60.0	15.0	3.0	---	---	4.7	5.5	0.6	0.15	1.0 V, 0.06 Zr, 0.015 B
<i>René 80</i>	14.0	60.0	9.5	4.0	4.0	---	5.0	3.0	---	0.17	0.015 B, 0.03 Zr
<i>MAR-M2000</i>	12.0	69.8	---	4.5	---	2.0	1.0	5.9	---	---	4.4 Ta, 1.3 Hf, 0.01 B, 0.05 Zr

Fonte :[3]

❖ BOND COAT E THERMICALLY GROWN OXYDE (TGO)

- Strato di giunzione di spessore compreso tra i 75 μm e 150 μm
- Riduce sollecitazioni termomeccaniche
- Migliora l'adesione della barriera termica
- Protegge il substrato dalla corrosione e dall'ossidazione
- Composto da alluminuri

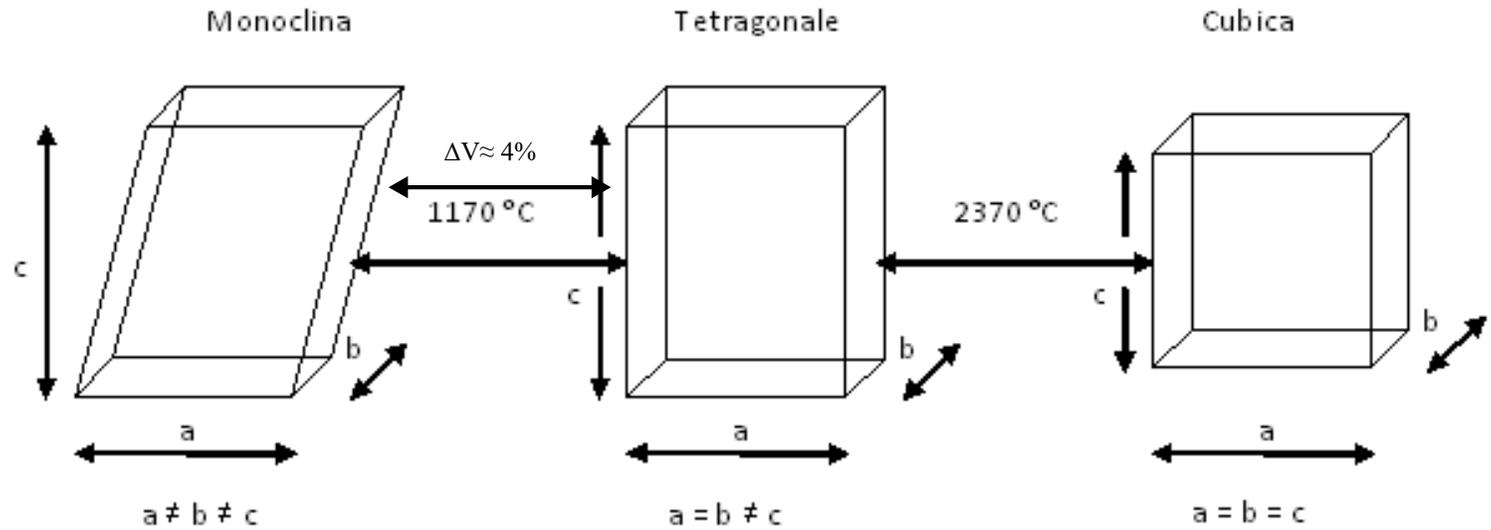
- Strato superficiale del bond coat in cui si ossida selettivamente l'alluminio
- Bassa diffusività degli ioni ossigeno provenienti dall'esterno
- Protegge il bond coat dall'ossidazione



Fonte :[2]

❖ RIVESTIMENTO CERAMICO

- Ha il compito di isolare termicamente i materiali sottostanti
- Alto punto di fusione
- Trasformazioni della struttura cristallina assenti
- Bassa conducibilità termica
- Stabilità chimica
- Espansioni termiche congruenti con lo strato sottostante
- Buona aderenza con il substrato metallico



Fonte :[4]



1. Pierfrancesco Brunello «Lezioni di fisica tecnica» EdiSES
2. Francesco Padoan Relazione finale «Studio di barriere termiche in materiale ceramico per pale di turbine» A.A. 2015/2016 Università degli studi di Padova
3. "Superleghe" Università degli studi di Roma Tor Vergata <https://didattica.uniroma2.it/files/scarica/insegnamento/185407-Materiali-Metallici-Per-Applicazioni-Speciali-Con-Laboratorio/73675-Superleghe>
<https://didattica.uniroma2.it/files/scarica/insegnamento/185407-Materiali-Metallici-Per-Applicazioni-Speciali-Con-Laboratorio/73675-Superleghe>
4. Diego Molinari Relazione finale «Studio di barriere termiche ceramiche» A.A 2010/2011 Università degli studi di Padova
5. <https://blog.eurolamec.it/index.php/2020/08/07/microstruttura-di-un-pressocolato/>
6. https://en.wikipedia.org/wiki/Gloster_Meteor
7. Romain Allusse « Réparation d'Aubage en Superalliage base Ni par LMD » https://dms.mat.minesparis.psl.eu/Promotions/Promo-2015-2016/160304-Romain_Allusse.pdf/
8. Tommaso Astarita "Propulsione Aerospaziale" Università di Napoli Federico II
http://wpage.unina.it/astarita/Corsi/PA_Piloti/2020_21/PA8%20Turb.pdf
9. Fabiola Quarta «Il raffreddamento delle pale di turbina» <https://slideplayer.it/slide/13949947/>
10. https://it.wikipedia.org/wiki/De_Havilland_DH.106_Comet
11. https://en.wikipedia.org/wiki/Messerschmitt_Me_262

GRAZIE PER L'ATTENZIONE