

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«I materiali ablativi applicati ai
sistemi di protezione termica»***

Tutor universitario: Prof.ssa Roberta Bertani

Laureando: *Giulio Zanotto Bellini*

Padova, 17/03/2023

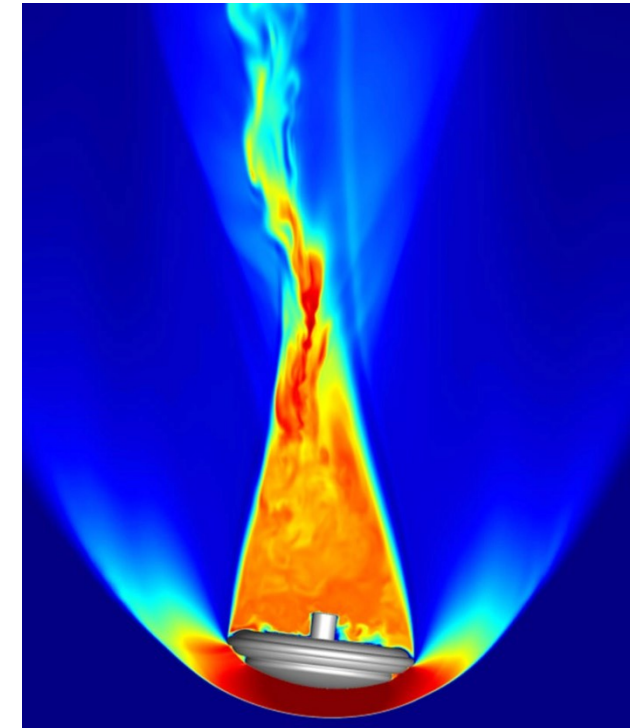
Nel mio elaborato tratterò di come i materiali ablativi siano utilizzati come sistemi di protezione termica per il rientro in atmosfera. Dopo aver dato alcune definizioni generali di scudo termico e di materiale ablativo, andrò a mostrare i processi che permettono a questi materiali di essere così efficienti in questo ambito.

Cercherò quindi di fornire una panoramica sull'utilizzo dei materiali ablativi e andrò poi a classificarli, portando esempi dei principali utilizzi.

Gli scudi spaziali termici (TPS) sono sistemi di protezione utilizzati in velivoli, razzi e satelliti per mantenere la temperatura degli elementi strutturali entro il limite di corretto funzionamento.

Devono avere determinate caratteristiche:

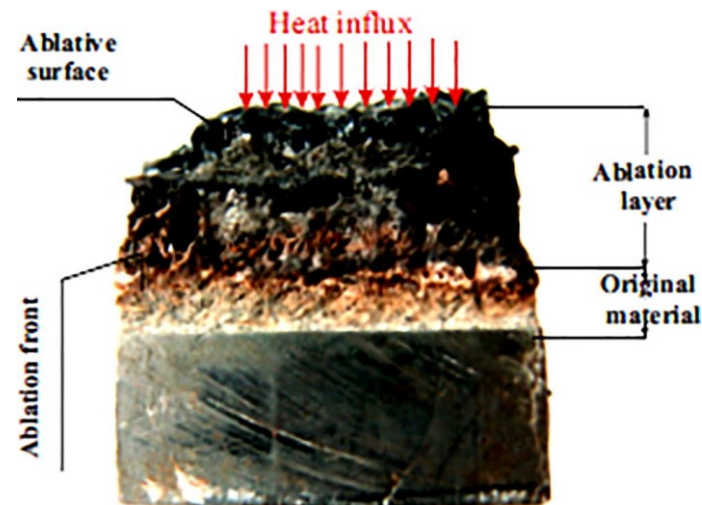
- dissipare l'energia accumulata durante il rientro in atmosfera o il lancio;
- proteggere la struttura interna e mantenere i materiali entro i limiti ammessi di temperatura;
- resistere ad erosione, ossidazione, attacco e sollecitazioni vibrazionali e meccaniche;
- avere bassa densità e costi adeguati alla missione.



Analisi termica di un flusso incidente

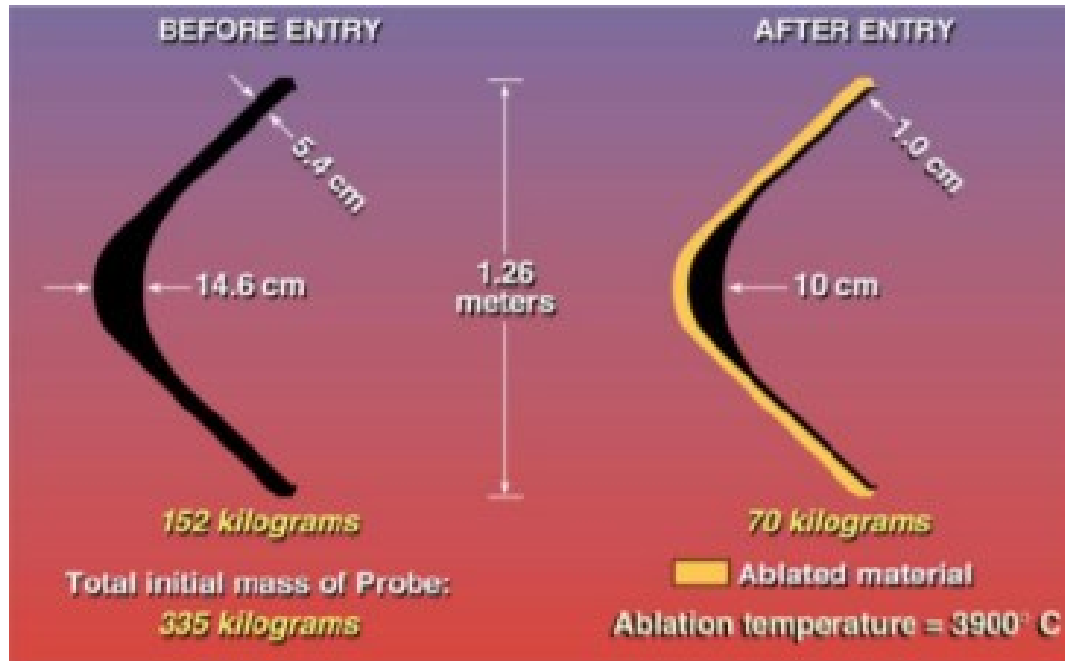
Si definiscono materiali ablativi quei materiali che dissipano l'energia termica incidente grazie a cambiamenti di fase e reazioni endotermiche.

L'elevata energia assorbita da questo processo riduce il flusso di calore che la struttura del nostro velivolo andrà a sopportare.



Campione di materiale ablativo
soggetto al processo di ablazione

I materiali ablativi sono caratterizzati da un alto punto di fusione/sublimazione, elevato calore specifico e calore latente di fusione/vaporizzazione, bassa conducibilità termica, buona resistenza meccanica (alle sollecitazioni).



Ablazione su uno scudo termico

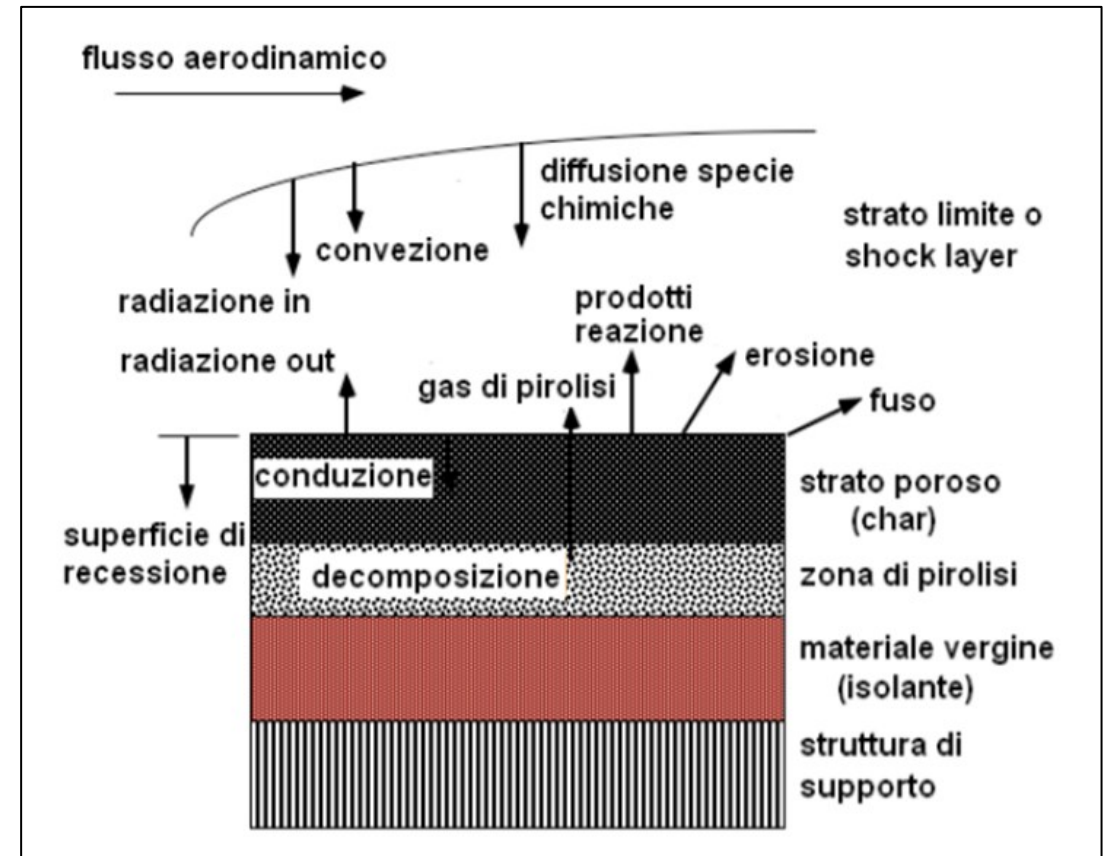
Lo scudo termico in materiale ablativo consiste in uno spessore di materiale diviso principalmente in due parti:

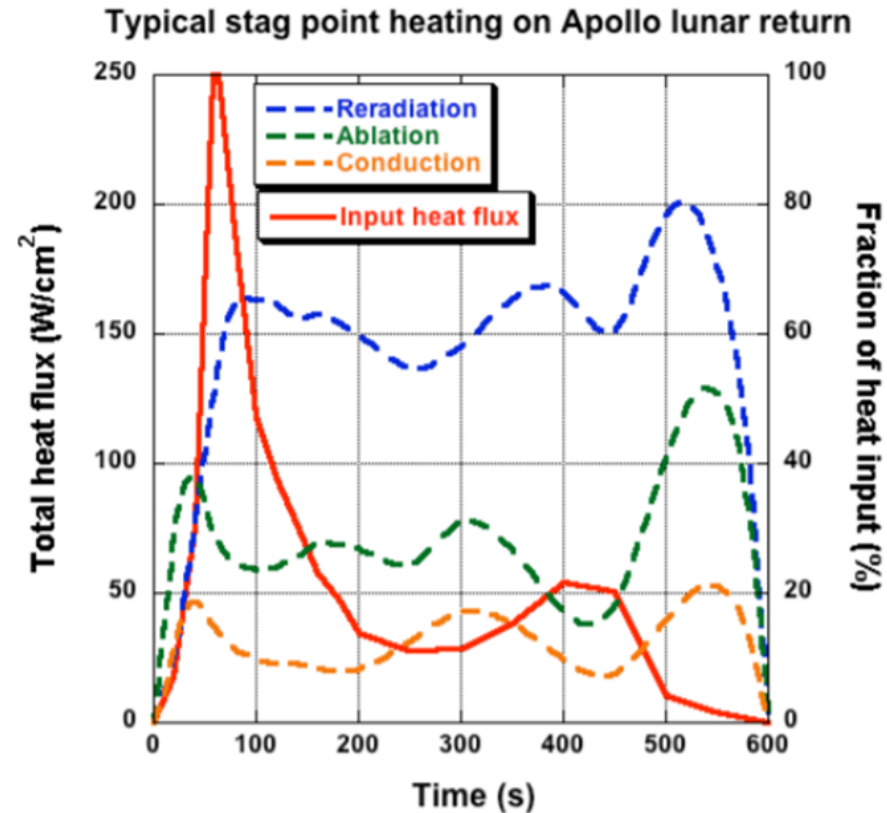
la **parte più esterna**, che andrà incontro al processo di ablazione,

e una **parte più interna**, che non subisce (o in minima parte) degradazione termica, avendo principalmente funzione di isolamento.

Il processo di ablazione termica si articola in vari passaggi:

- *rapido aumento di temperatura superficiale;*
- *conduzione e accumulo di calore nel materiale sotto la superficie;*
- *aumento di temperatura che innesca la pirolisi della matrice polimerica (degradazione chimica con formazione di uno strato di carbone poroso e rilascio di sostanze volatili quali gas di decomposizione e/o evaporazione (processo endotermico che dissipa calore). I gas rimangono intrappolati fino a che sale la pressione e aumenta la porosità del materiale fino ad uscire);*
- *traspirazione dei gas attraverso il char;*
- *assorbimento di energia termica da parte del flusso di gas in uscita e creazione, per la sua elevata pressione, di un boundary layer che scherma il flusso in entrata.*





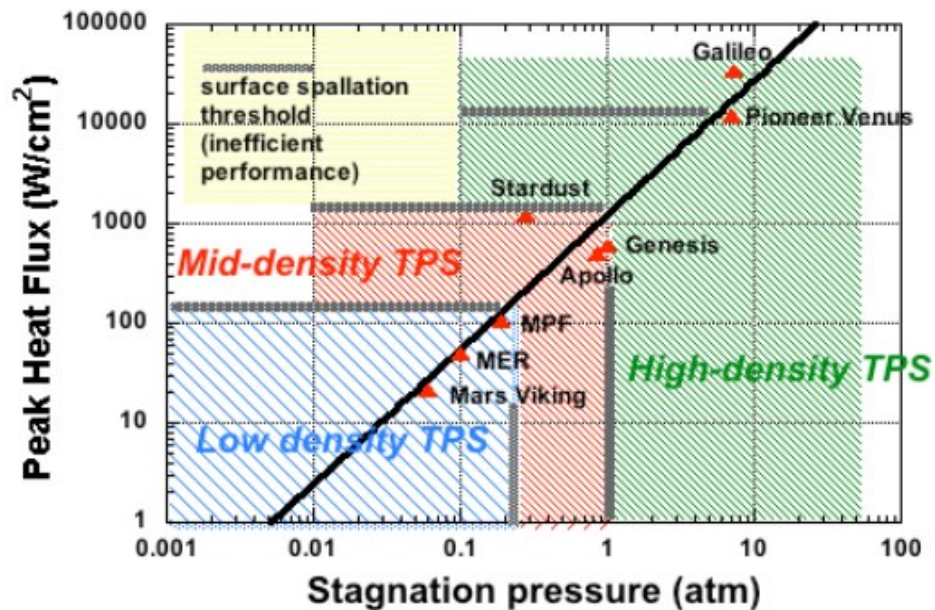
L'energia viene smaltita principalmente in 3 modi:

- La ri-emissione (riflessione) data dalla superficie consuma circa tra il 60 e l'80% dell'energia.
- Il processo di ablazione consuma dal 20 al 40% dell'energia.
- La restante parte (solitamente <10%) viene trasmessa verso la parte interna, costituita da materiali isolanti.

Per rendere un materiali ablativo realmente efficiente si deve cercare di minimizzare la conduzione di calore dentro al veicolo (1) e al tempo stesso di minimizzare il rapporto massa/rischio (2).

1. Si deve avere un calore condotto che sia abbastanza basso da garantire la sicurezza e la funzionalità.
2. Si deve minimizzare la massa, mantenendo però le performance richieste. Bisogna tener conto del fatto che ablativi ad alta densità, più pesanti, hanno (solitamente) proprietà ablative migliori, mentre ablativi a bassa densità si comportano più da isolanti.

Sono stati sviluppati numerosi tipi di materiali ablativi, classificabili in base alla loro densità e alla criticità dell'ambiente in cui lavorano in condizioni ottimali.

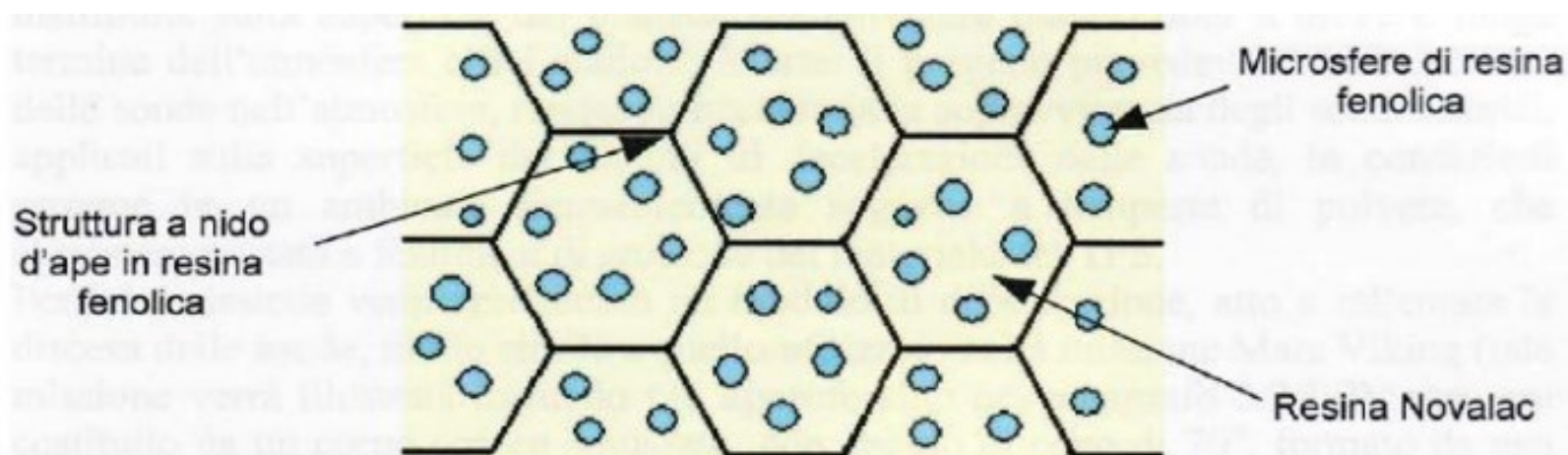


Si dividono in ablativi per:

- bassi flussi termici (0-200 W/cm²)
- flussi termici intermedi (200-1100 W/cm²)
- elevati flussi termici (oltre 1100 W/cm²)

Gli **ablativi per bassi flussi termici** sono costituiti solitamente da una matrice polimerica con aggiunta di particelle e fibre di rinforzo.

Il loro impiego è limitato a flussi non superiori ai 200 W/cm^2 e a temperature inferiori ai 1700°C .



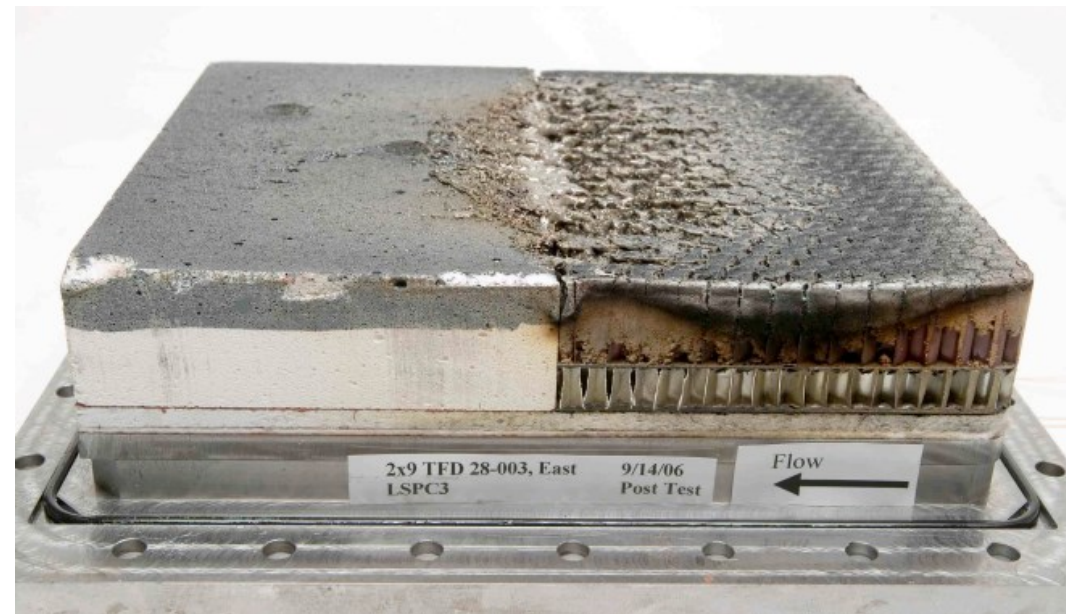
Struttura dell'ablativo per bassi flussi Avcoat-5026

Il più importante ablativo per bassi flussi termici è lo *SLA-561V*, utilizzato in quasi tutte le missioni fin qui tentate per l'ingresso nell'atmosfera marziana (estremamente rarefatta).

È composto da una struttura fenolica a celle a nido d'ape riempite con silicone che conferisce miglioramenti prestazionali, soprattutto agli shock termomeccanici e alle vibrazioni.

Ha bassa densità e bassa conducibilità termica.

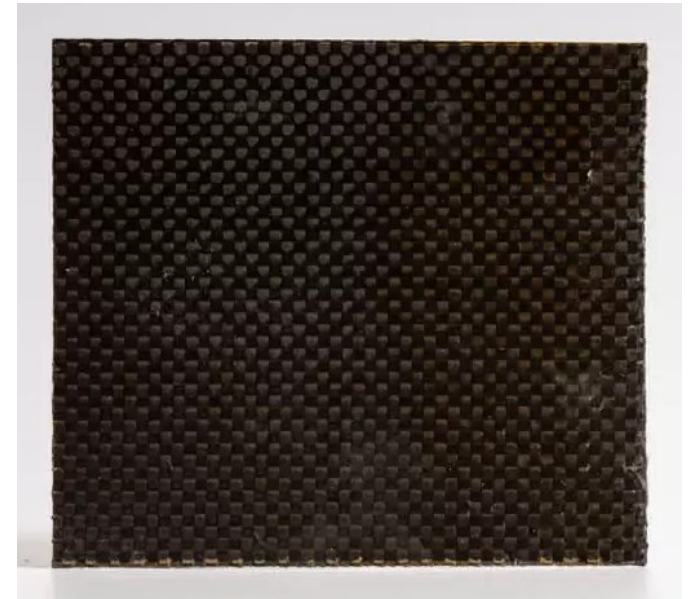
Immagine post-test di un campione di *SLA-561V*



Il principale **ablattivo per flussi termici intermedi** (200-1100 W/cm²) è il *carbonio fenolico*.

È costituito da strati di tessuto in fibra di carbonio impregnati con resina fenolica che, durante il rientro, decompone, formando una schiuma carboniosa, la quale solidifica dando origine ad uno strato carbonioso poroso, con ottime proprietà isolanti.

Presenta una densità maggiore rispetto ai materiali ablativi per bassi flussi: ciò lo rende adatto a resistere a flussi di più alta intensità, ma al tempo stesso penalizza il funzionamento per flussi più deboli.



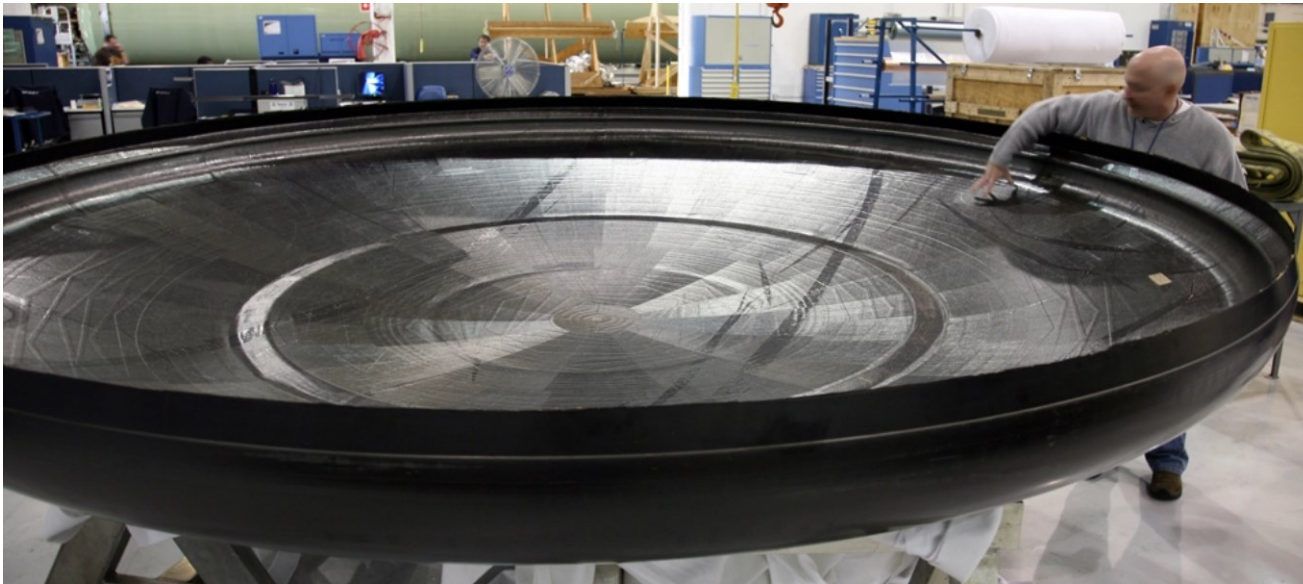
Campione di carbonio fenolico

Problema

Aumento della densità → aumento della conducibilità termica del materiale e, se i flussi termici che sollecitano la struttura non sono tali da indurre il processo di ablazione, si ha un aumento notevole della temperatura interna e il fallimento del TPS.

Gli **ablativi per elevati flussi termici** sono studiati per lavorare con flussi oltre i 1100 W/cm^2 .

Questi ablativi sono solitamente in *composito C/C*, capace di dissipare elevate quantità di calore e che presenta una temperatura di ablazione molto elevata, in quanto ha bisogno di molta energia per rompere i forti legami che lo costituiscono.

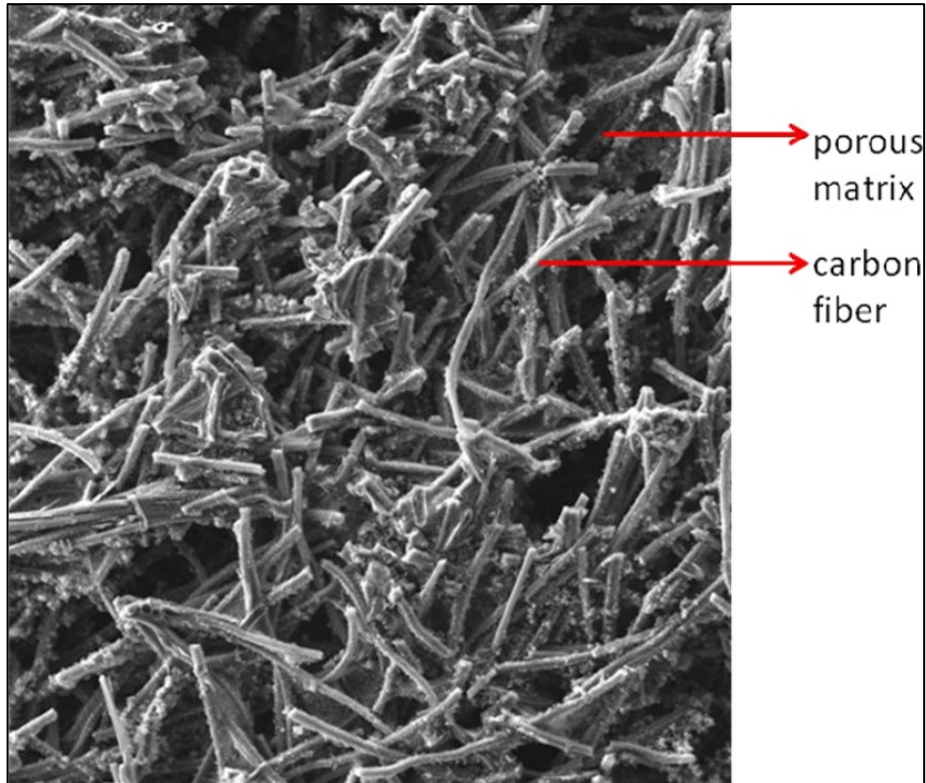


Struttura di scudo
termico in composito C/C

Questa tipologia di materiale presenta quindi un minor grado di ablazione e possono essere sfruttati per tempi più lunghi; sono costituiti da fibre di carbonio (o grafite) immerse in una matrice di carbonio (o grafite).

Essi presentano una densità relativamente bassa ed una resistenza meccanica a trazione e compressione molto elevata.

I compositi C/C possono avere geometrie di impacchettamento diverse a seconda delle direzioni in cui sono intrecciate le fibre di carbonio, in funzione della necessità di ottenere un miglioramento delle proprietà meccaniche lungo una determinata direzione.



Per ambienti estremamente critici sono stati sviluppati i *Lightweight Ceramic Ablators* (LCA), materiali a bassissima densità, tra gli 0.1 e i 0.35 g/cm³, che resistono fino a temperature di circa 2700°C.

Questi materiali sono costituiti da una base in fibra di carbonio o di silice rivestita con un sottile strato di resina polimerica. I principali sono il PICA e il SIRCA.

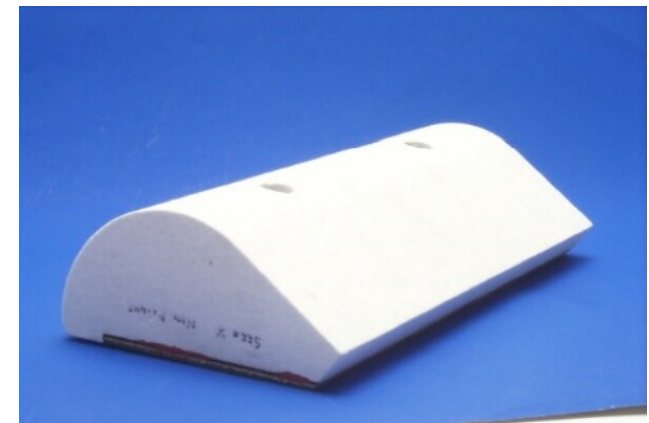
PICA (*Phenolic Impregnated Carbon Ablator*)

- Viene applicato come una sorta di “coperta” fatta di mattonelle.
- Presenta una densità molto bassa, circa $0,27 \text{ g/cm}^3$.
- È l’ablativo che risulta più efficace a temperature/flussi di calore (fino a 1200 W/cm^2) maggiori per via della sua molto bassa conducibilità termica.



SIRCA (*Silicone Impregnated Reuseable Ceramic Ablator*)

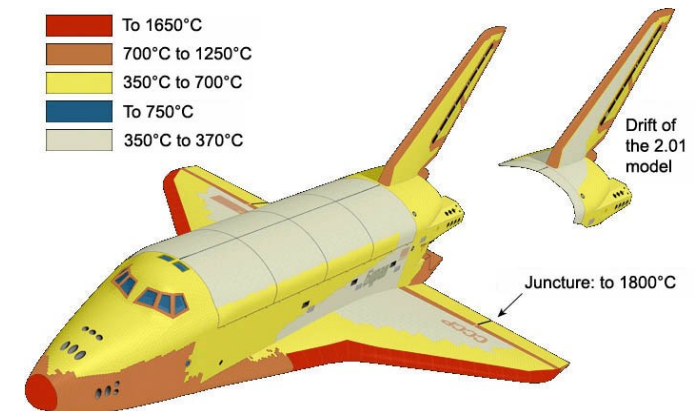
- È un materiale monolitico e isolante che si presta molto bene al processo di ablazione.
- È l’unico materiale che può essere fabbricato in qualunque forma e applicato direttamente al veicolo.
- Per temperature inferiori a 1000°F (circa 540°C) è riutilizzabile.



Si hanno varie possibilità di scelta di materiali ablativi da usare come sistemi di protezione termica: definita la missione, e quindi il range di condizioni operative, si cerca il materiale che presenti una miglior risposta ai flussi e alle sollecitazioni previste.

Una scelta poco precisa può portare a masse più (o meno) elevate dello scudo, con conseguente variazione carico disponibile per il payload, e/o a raggiungere temperature che compromettano le funzionalità di payload e strumentazioni.

Si deve quindi tener conto di massa e prestazioni del materiale sulla base degli input di missione, quali flusso termico incidente, pressione di lavoro e calore condotto internamente ammissibile.



Obinna Uyanna, Hamidreza Najafi, in *Acta Astronautica*, volume 176 p.341-356, November 2020.

<https://www.sciencedirect.com/journal/acta-astronautica>

José Meseguer, Isabel Pérez-Grande, Angel Sanz-Andrés, *Spacecraft Thermal Control*, 2012.

<https://www.sciencedirect.com/book/9781845699963/spacecraft-thermal-control>

Joseph H. Koo, Jon Langston, *Nanomaterials in Rocket Propulsion Systems*, 2019.

<https://www.sciencedirect.com/book/9780128139080/nanomaterials-in-rocket-propulsion-systems>

Maurizio Natali, Jose Maria Kenny, Luigi Torre, in *Progress in Materials Science*, volume 84 p.192-275, December 2016.

<https://www.sciencedirect.com/journal/progress-in-materials-science>

Steven A. Sepka, Robert S. Kornienko, Chris A. Radbourne, *Testing of SLA-561V in NASA-Ames' Turbulent Flow Duct With Augmented Radiative Heating*, Giugno 2010.

<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20100033684/downloads/20100033684.pdf>

Albert Huang, *Thermal Protection Materials Branch*, Maggio 2019.

<https://www.nasa.gov/centers/ames/thermal-protection-materials/tps-materials-development/low-density-ablators.html>