

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Regolite, il futuro delle costruzioni
sulla Luna»***

Tutor universitario: Prof. Roberta Bertani

Laureando: *Francesco Finotti*

Padova, 24/03/2023

- 1. INTRODUZIONE**
- 2. PROBLEMATICHE**
- 3. INTRODUZIONE AI MATERIALI**
- 4. METODOLOGIE PER LA PRODUZIONE**
- 5. ANALISI DELLE PRESTAZIONI**
- 6. CONCLUSIONI**

➤ **TARGET**

Possibilità di produrre materiali atti alla costruzione di strutture sulla superficie lunare direttamente **in situ**, grazie alla **Regolite**.

➤ **MOTIVAZIONI**

- Le missioni di lunga durata saranno sempre più numerose nel prossimo futuro.
- La Luna è un ambiente decisamente avverso.
- Il costo del trasporto di materiali dalla Terra alla Luna è estremamente elevato.
- La Regolite ha delle ottime proprietà schermanti (l'assenza di atmosfera sulla luna rende le radiazioni solari, e non, molto pericolose per i tessuti organici).

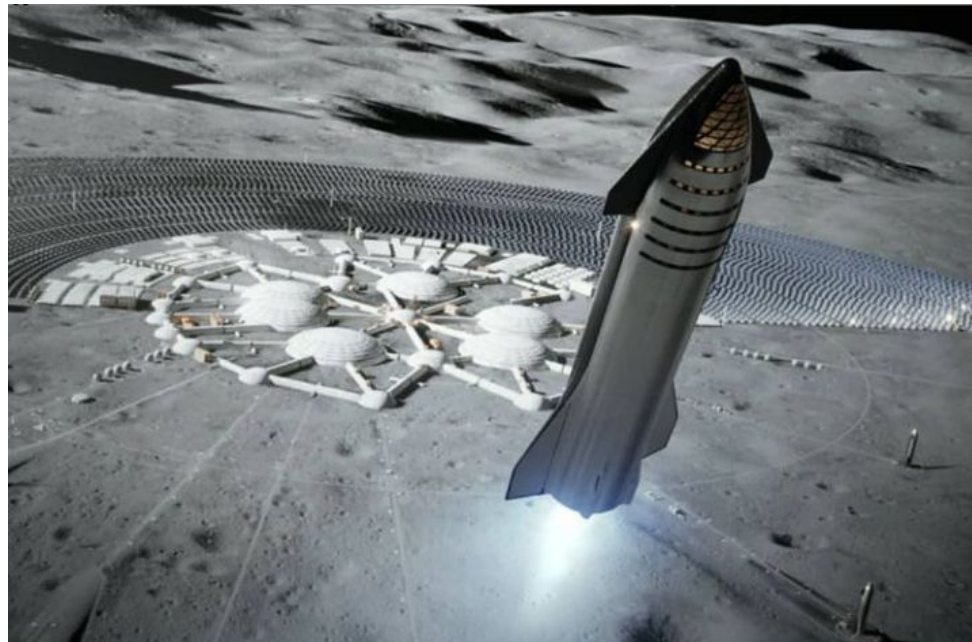


Alti costi di trasporto e bisogno di proteggere gli equipaggi dalle radiazioni.

Al giorno d'oggi il costo per il trasporto di una libbra di materiale su un'orbita terrestre è di circa 10.000\$.

Grazie ad alcune compagnie in grado di "riciclare" i propri vettori, il costo di trasporto di una libbra di materiale è diminuito; ciò nonostante resta comunque molto elevato.

L'obiettivo della NASA è quello di ridurre i costi per il trasporto dei materiali nello spazio fino a centinaia di dollari per libbra entro i prossimi 15 anni e di ridurli ulteriormente a decine di dollari per libbra entro i prossimi 30.



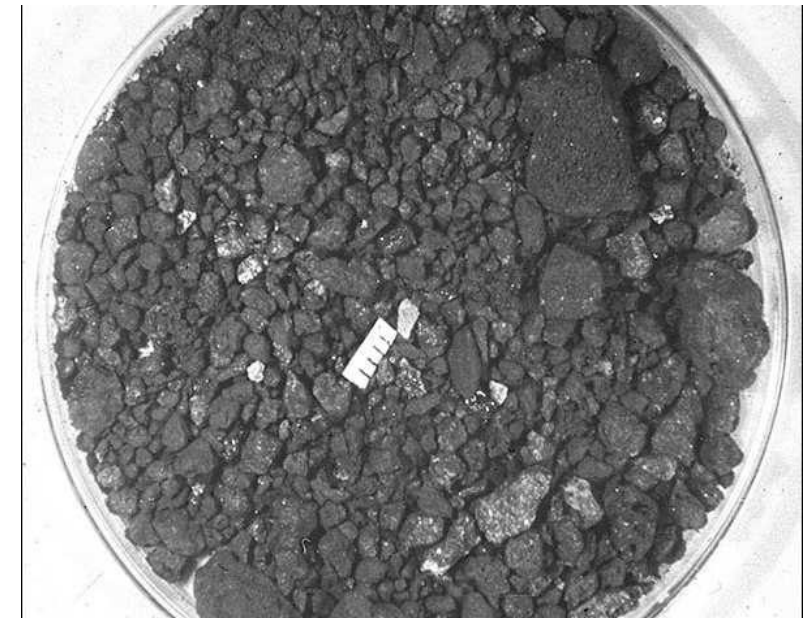
La Regolite lunare è l'**insieme** eterogeneo di **sedimenti, polveri e frammenti** di materiali che ricoprono la superficie del nostro satellite roccioso.

La Regolite è di colore grigiastro e la sua composizione varia al variare del sito considerato, ma i minerali più abbondanti sono i seguenti:

Olivina	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
Pirosseno	$(\text{Ca,Mg,Fe})\text{SiO}_3$
Plagioclasio	$(\text{Ca,Na})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

La Luna non possiede un'atmosfera in grado di distruggere i meteoriti, quindi la formazione della regolite avviene per lo più a seguito dell'impatto di questi con la superficie lunare, con conseguente frammentazione di grandi rocce in detriti di dimensioni sempre più piccole.

Si tratta di un processo graduale nel tempo, che porta alla generazione di svariati strati con differenti proprietà.



L'impossibilità di condurre analisi di laboratorio su campioni effettivi di regolite ha portato alla creazione di diversi materiali artificiali, chiamati **simulanti**, che tendono a riprodurre caratteristiche fisiche e chimiche.

Per la produzione dei simulanti di regolite vengono usati soprattutto dei materiali composti da ossidi, come:

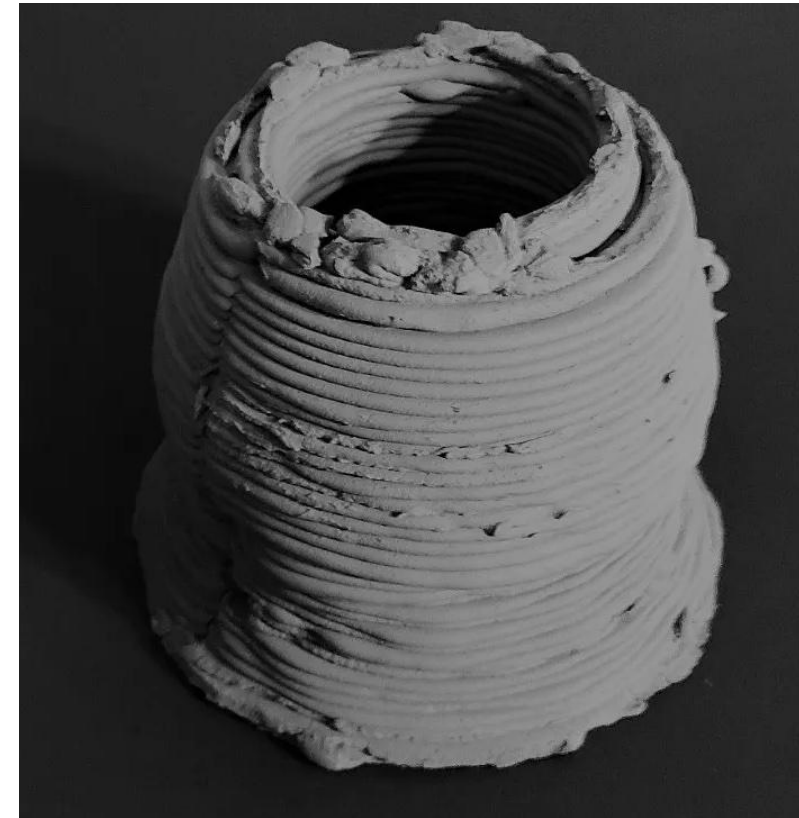
Ossido	% peso (media)
Diossido di silicio (SiO_2)	42.95
Ossido di alluminio (Al_2O_3)	14.53
Ossido di ferro III (Fe_2O_3)	11.50
Ossido di calcio (CaO)	9.11

I **geopolimeri** sono leganti cementizi inorganici prodotti dalla reazione polimerica tra un precursore ricco di alluminosilicati e una soluzione di attivatori.

Si tratta quindi di un gel che può essere utilizzato per incapsulare aggregati fini e grossolani, producendo vero e proprio calcestruzzo.

Requisiti di composizione: il rapporto tra la **silice (Si)** e l'**alluminio (Al)** deve essere compreso tra 1:1 e 1:3.

Il **calcestruzzo geopolimerico** prodotto sulla superficie lunare può essere prodotto per il **98%** in peso dalla **regolite in situ**.



Le fibre di basalto sono fibre molto sottili di basalto, una roccia vulcanica composta per lo più da plagioclasti, pirosseni e olivine, ha quindi la stessa composizione della regolite lunare e pertanto potrebbe essere prodotto in situ.

Utilizzo: si potrebbe impiegare come rinforzo strutturale.

Le fibre basaltiche sono:

- molto stabili;
- resistenti alle alte temperature;
- a bassa conducibilità termica ed elettrica;
- resistenti;
- facili da lavorare;
- disponibili in grande quantità sulla luna.



La **produzione additiva** è un processo industriale che consente di fabbricare oggetti in 3D partendo da file digitali (modelli computerizzati).

Con questo tipo di processo si potrebbero creare infrastrutture di vario genere direttamente sulla superficie lunare, senza dover trasportare i materiali per la costruzione direttamente dalla Terra.

La produzione additiva in generale gode di alcune proprietà interessanti:

- elementi su misura e/o personalizzati;
- possibilità di geometrie complesse;
- il numero di elementi di un assemblaggio può essere ridotto, andandolo a riprogettare come un singolo componente più complesso.



Particolarmente promettente è il concetto di **Contour Crafting**, che utilizza lo zolfo trovato nella regolite come legante per la miscela estrusa.

Questo metodo offre ottimi vantaggi:

- **Energia applicata senza sprechi**
- **Elimina la necessità di effettuare grandi scavi**

Nel 2013, l'ESA ha selezionato il processo **D-Shape** di Enrico Dini per sviluppare il concetto di costruzione additiva di una base lunare utilizzando una miscela di simulante basaltico di regolite lunare e ossido di magnesio (MgO).

Questa tecnica consiste in una sorta di struttura di 6m x 6m che si sposta lungo la verticale per depositare strato su strato una determinata sostanza.

Nel caso in questione la sostanza sarebbe un geopolimero costituito da regolite lunare chiaramente.



© Enrico Dini, 2013

In un approccio dedicato al coinvolgimento di pochi o nessun materiale importato dalla Terra sono emerse alcune problematiche:

- L'acqua verrà principalmente usata per necessità primarie e supporto vitale
- Potrebbe essere necessario preselezionare e quantificare il legante prima che venga rimescolato con regolite per ottenere prodotti finiti coerenti.
- Lo scavo della regolite in ambienti planetari è una grande sfida ingegneristica.

Le seguenti strutture sono candidate per la costruzione 3D additiva con regolite:

- Piattaforme di atterraggio/lancio
- Pareti/strutture antiesplorazione
- Strade di accesso asfaltate
- Hangar per deposito di veicoli spaziali e attrezzature
- Habitat schermati per gli esseri umani
- Pannelli di schermatura contro le radiazioni per veicoli spaziali

Gli effetti della schermatura possono essere visti “plottando” la distribuzione dell’assorbimento di energia in differenti parti dell’habitat lunare per una particolare “energia protonica”.

Si è giunti alla conclusione che lo spessore della schermatura è di piccola importanza per protoni con energie superiori a 1 GeV.

I criteri usati per valutare le capacità di schermatura degli oggetti in regolite sono:

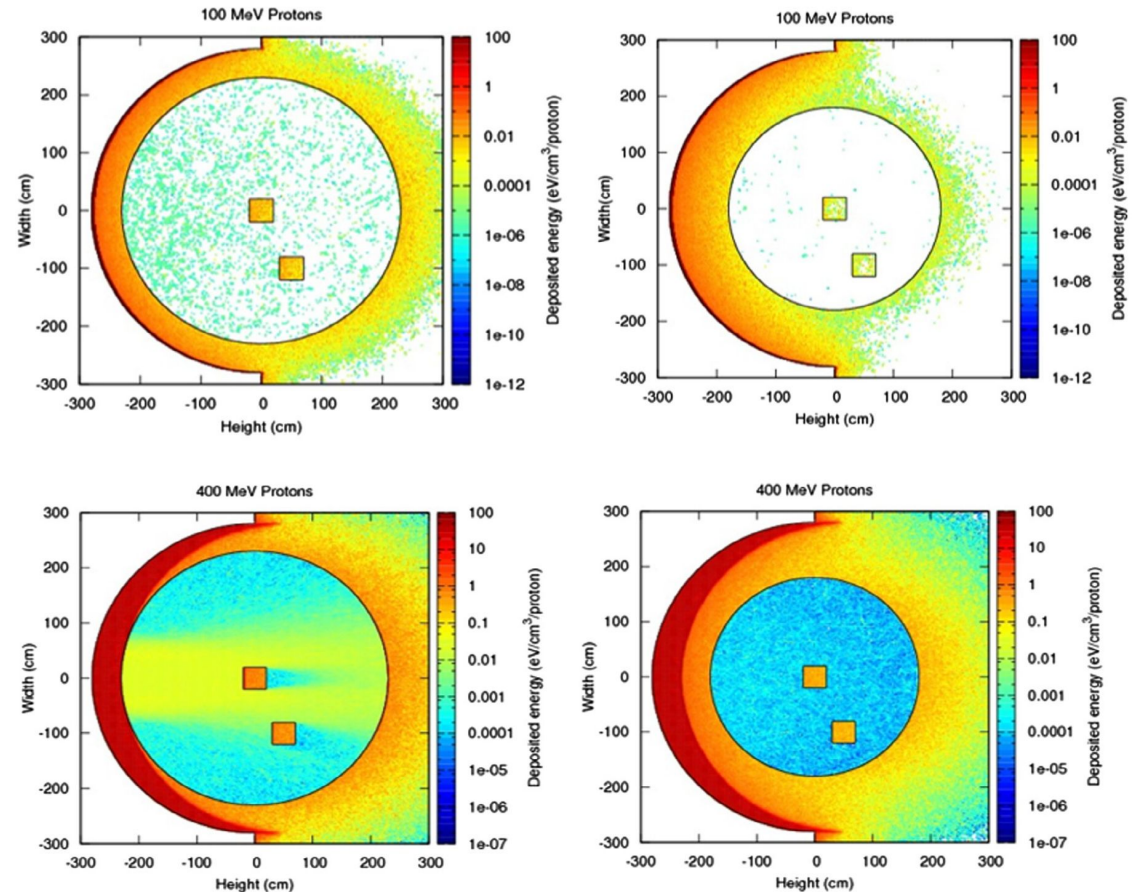
- Il limite di **dose equivalente annua** per tutto il corpo del lavoratore (cioè del soggetto sotto esame) esposto alle radiazioni: 5 cSv, 5 rem
- Limite di **dose per 30 giorni negli organi che producono il sangue in orbita terrestre bassa**: 25 cSv, 25 rem

Simulazione di **protoni monocromatici incidenti** sulla schermatura dell'habitat lunare:

- Con 50 cm di spessore è come se la piastra in regolite diventasse trasparente per protoni a 400 MeV
- Diventa ancora più inefficace per protoni con energie superiori a 1 GeV

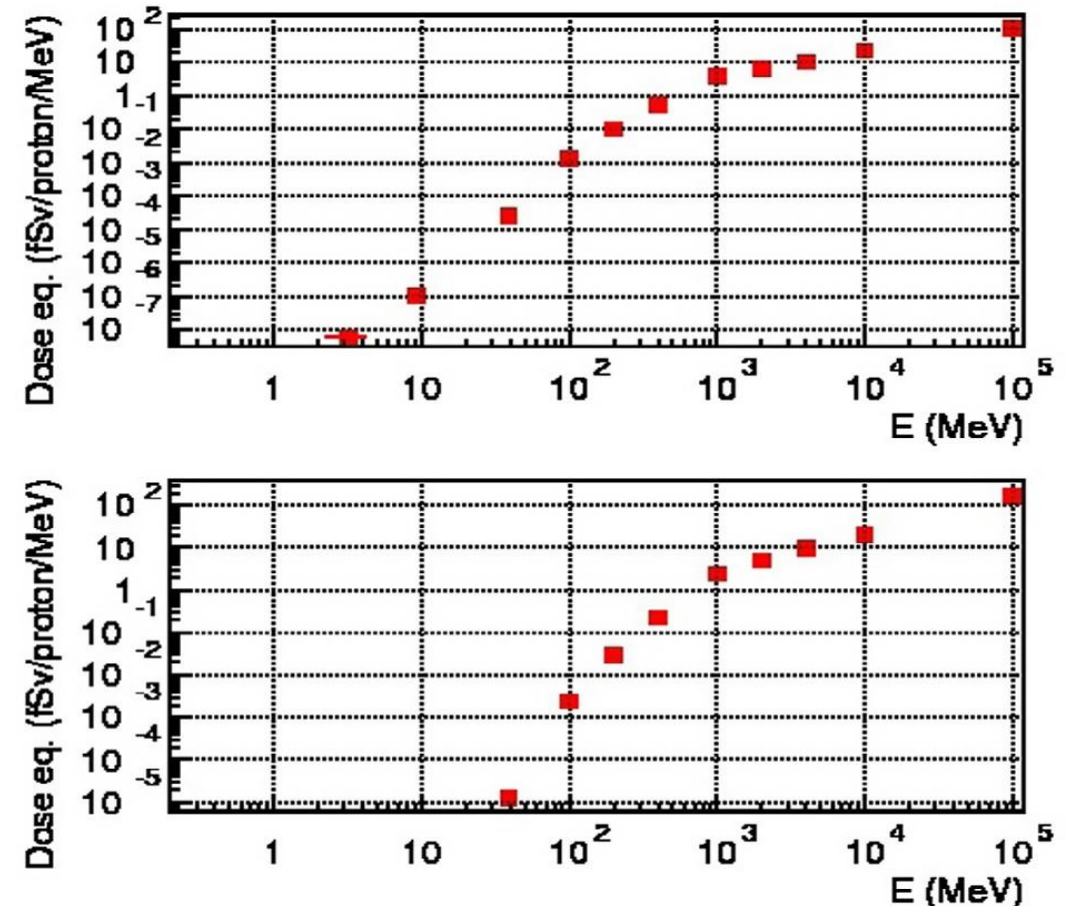
I “box” mostrano le possibili posizioni dei membri dell'equipaggio.

Il materiale usato in questi test è stato scelto in modo da emulare il più possibile i tessuti organici umani.



2) Mettiamo adesso in relazione le **dosi di radiazione assorbite** e le quantità di **dosi equivalenti** nei tessuti umani:

- Per protoni con energie superiori a 400 MeV le dosi assorbite sono pressoché indipendenti dalla posizione.
- Per un'adeguata protezione dai solar flares è sufficiente una schermatura con spessore di 50 cm.
- **Tasso di accumulo:**
 - paragonabile a quello del lavoratore esposto alle radiazioni (per un soggiorno di 12 mesi)
 - molto inferiore al limite di dose di 30 giorni per gli astronauti in LEO terrestre.



- ❖ Abbiamo visto la possibilità di produrre un legante geopolimerico partendo dalla regolite lunare (presente in abbondanza sul sito in questione);
- ❖ L'utilizzo di varie tecniche di stampa 3D è un'opzione concreta e molto interessante;
- ❖ Le proprietà della regolite le consentono di essere un ottimo candidato come materiale per la produzione del legante geopolimerico, sia dal punto di vista strutturale, sia dal punto di vista della capacità di schermatura dalle radiazioni;
- ❖ Un habitat costruito con regolite consentirebbe una prolungata, nonché sicura, permanenza sulla superficie lunare;
- ❖ Questa tipologia di approccio consentirebbe di abbattere notevolmente i costi di una missione prolungata (il costo di trasporto del materiale sarebbe drasticamente ridotto).

Robert P. Mueller, “Construction with regolith”, CLASS / SSERVI / FSI, 2017

Robert P. Mueller, Laurent Sibille, Paul E. Hintze, Thomas C. Lippitt, James G. Mantovani, Matthew W. Nugent, Ivan I. Townsend, Additive Construction using Basalt Regolith Fines, NASA Technical Reports Server (NTRS), 2014

Arnhof M., Pilehvar S., Kjøniksen A.-L., Cheibas I., Basalt fibre reinforced geopolymer made from lunar regolith simulant, 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (*EUCASS*), 2019

Maxim Isachenkov *, Svyatoslav Chugunov, Iskander Akhatov, Igor Shishkovsky Regolith-based additive manufacturing for sustainable development of lunar infrastructure – An overview, *Acta Astronautica*, 2021

<https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/astp.html>

<https://d-shape.com>