

# MODELLI CINETICI PER L'ANALISI DELLA DEGRADAZIONE DEI MATERIALI IN AMBIENTE SPAZIALE

**M. Palmisano Romano, P. d'Avanzo, M. Marchetti**

*Scuola di Ingegneria Aerospaziale - Università di Roma "La Sapienza"  
Via Eudossiana 18, 00184 Roma, Tel. 0644585800 / Fax. 0644585670  
e-mail: mario@aerorisc.ing.uniroma1.it*

## **Sommario**

Il lavoro analizza il comportamento strutturale di alcuni materiali utilizzati nelle strutture spaziali sottoposti all'azione dell'ossigeno atomico (OA). In particolare si quantifica la profondità dell'erosione attraverso l'utilizzo di un modello per la determinazione ambientale (SPENVIS), che è in grado di definire la densità dell'OA e l'andamento della fluenza nell'intero arco della missione. Le teorie fisiche alla base del modello citato sono assai complesse e la letteratura in proposito è limitata. Pertanto, allo scopo di chiarire i meccanismi di danneggiamento, viene qui presentato un modello di facile applicazione che studia la fase di collisione ed il relativo trasferimento di energia dall'atomo di ossigeno alla superficie del particolare materiale in esame. La struttura è pensata unidimensionale, le interazioni considerate sono semplificate ed il problema è risolto in forma chiusa con l'uso della meccanica newtoniana.

In sostanza, il lavoro qui svolto ha permesso di ottenere informazioni sull'efficienza di alcuni materiali in funzione del tempo di esposizione e quindi sulla misura di degrado dei materiali stessi, oltre ad illustrare i principali aspetti del trasferimento di energia in una collisione e dei relativi meccanismi di danneggiamento.

## **1. Introduzione**

L'ambiente spaziale è una combinazione complessa di molti elementi indipendenti tra loro, tra cui l'ossigeno atomico, la radiazione particellare (elettroni e protoni), il vuoto termico, i micrometeoriti, i detriti spaziali e alcune particelle contaminanti sono i più dannosi. La loro presenza varia con la posizione spaziale (quota, longitudine e latitudine) e temporale nell'orbita, con le stagioni e con il livello di attività solare.

Esso può causare danni di tipo ottico, termico e meccanico alle superfici esposte, incidendo in maniera molto seria soprattutto sulle prestazioni dei sistemi, inclusi il sistema di controllo termico, i pannelli solari, le antenne e gli strumenti ottici. La richiesta, poi, di un aumento delle dimensioni, della complessità e della vita operativa della struttura continua ad aggiungere difficoltà al funzionamento ottimale del complicato sistema di controllo termico. E' evidente, quindi, come le superfici esterne risultino essere un parametro critico per la

riuscita di missione [1]. Le proprietà termo-ottiche devono essere mantenute entro i limiti di progetto. La continua ricerca per il monitoraggio di queste proprietà è particolarmente importante per la nuova Stazione Spaziale Internazionale (ISS) [2] dove la manutenzione e le riparazioni costituiscono il maggior impegno di spesa per garantire, più a lungo possibile, la vita operativa della struttura.

Una delle più pressanti problematiche progettuali odierne in ambito spaziale riguarda la stabilità dei materiali, intesa come compatibilità all'ambiente operativo che continua a rappresentare un limite tecnologico vincolante per il raggiungimento della missione.

Le proprietà ottiche (assorbimento solare ed emissività termica) possono mutare a causa dell'effetto "sbiancamento" dovuto all'OA o all'effetto "bruciatura" causato dalle radiazioni UV. L'OA si forma dalla dissociazione molecolare dell'O<sub>2</sub> causata dalla radiazione solare ultravioletta (UV) che dissocia, appunto, le molecole dell'ossigeno in atomi di ossigeno liberi nella ionosfera. Questi atomi di ossigeno sono altamente "corrosivi" a contatto con la maggior parte dei materiali utilizzati per le costruzioni spaziali. In più, la velocità orbitale della struttura spaziale, di circa 8 Km/s, ha l'effetto [3] di esporre la stessa struttura ad un flusso di OA che possiede un'energia di circa 5 eV. La capacità di questi atomi di reagire con i materiali utilizzati aumenta notevolmente tramite l'effetto sinergico della radiazione solare UV, la quale eccita i legami molecolari, rendendo la reazione con l'OA, nota in questo caso come interazione OA+UV, più facile da innescare. I *film* polimerici possono essere erosi a livello superficiale [4] o degradati a causa dei continui cicli termici, generando nuove superfici non più protette e quindi più facilmente attaccabili dall'OA o dall'azione combinata OA+UV. Anche la conduttività elettrica di un materiale può essere influenzata dall'OA, con conseguente variazione del potenziale della struttura. La stessa resistenza delle strutture composite può degradare a causa dell'interazione che la stessa ha con l'OA. [5], [6].

La protezione assoluta dall'erosione dell'OA non è tecnicamente possibile e solo una protezione ottimizzata per una particolare missione può essere raggiunta, compreso un opportuno margine di funzionamento che tenga conto di eventuali variazioni dell'ambiente orbitale. Per questo si dovranno stabilire quali siano i livelli delle prestazioni "degradate" accettabili per il minimo funzionamento della struttura stessa [7-9]. Il grado della degradazione superficiale dell'OA è direttamente proporzionale alla sua fluenza che, a sua volta, è determinata da diversi fattori ambientali, perciò si verifica che i materiali ritenuti accettabili per una applicazione non possono essere utilizzabili per altre applicazioni. Ne consegue che piuttosto che stilare un elenco di materiali accettabili per i vari sottosistemi spaziali risulta più opportuno determinare gli insiemi delle varie circostanze operative ambientali che possono portare alla scelta di un materiale piuttosto che un altro.

In una recente classificazione NASA i margini di incertezza per la progettazione in ambiente spaziale possono essere raggruppati in tre categorie [10]. Nella prima a vengono inglobati tutte le variazioni nella definizione dell'ambiente e tutti gli effetti associati che hanno un basso grado di mutabilità. Questi dati formano la base statistica per le specifiche progettuali di tipo ambientale. La seconda contiene tutte quelle incertezze sia a livello di conoscenza ambientale sia a livello di effetti conseguenti sulla struttura durante le operazioni in volo. Questa categoria comprende anche tutte le inabilità di testare in maniera accurata le prestazioni della struttura a terra, mancando adeguati modelli di simulazione dell'ambiente orbitale naturale ed indotto. Nella terza categoria rientrano tutti quei margini di incertezza derivanti direttamente dalle scelte progettuali come l'uso di particolari tecnologie che non sono state ancora adeguatamente qualificate per l'ambiente in cui dovranno operare o come la richiesta di verificare particolari prestazioni attraverso analisi o similitudini. Risulta ovvio che i prodotti tecnologici dovranno accuratamente minimizzare i margini delle specifiche afferenti alla seconda e terza categoria di incertezze, in quanto eliminando queste incertezze si potrà o

aumentare il carico utile della missione o utilizzare veicoli di lancio più piccoli, con la conseguente diminuzione del costo complessivo della missione.

## 2. Analisi numerica della profondità dell'erosione causata dall'ossigeno atomico

Lo scopo è quello di descrivere, a livello numerico, l'atmosfera terrestre per un particolare profilo di missione e stimare l'erosione dei vari campioni di materiali scelti causata dall'interazione dell'OA con la struttura.

Nello specifico, si è utilizzato lo SPace ENVironment Information System (SPENVIS), un sistema che consiste in un set integrato di modelli dell'ambiente spaziale e che, grazie all'interfacciabilità con il "web" permette un accesso standardizzato ai modelli dell'ambiente e una facile utilizzazione degli stessi. Il simulatore, infatti, genera l'orbita scelta dall'utilizzatore, valuta efficacemente l'ambiente orbitale per la specifica missione, calcolando il numero di densità dell'ossigeno atomico, il flusso di particelle e la sua fluenza su di una superficie, e determina infine la profondità di erosione del materiale esposto all'ossigeno atomico. Data l'attualità e l'importanza dei problemi proposti, il sistema è costantemente aggiornato con nuovi modelli di simulazione o corretto in quelle parti dove presenta delle discontinuità sia derivabili dalla non conoscenza completa del fenomeno sia dalla difficoltà di rappresentarlo numericamente in una forma che più si avvicina alla realtà. Lo SPENVIS fa propri gli standard sull'ambiente spaziale dell'ECSS (European Cooperation for Space Standardization), iniziativa sviluppata per creare un insieme coerente di standard per progettazioni spaziali, standard in particolare l'ECSS-E-10-04 (System Engineering: Space Environment).

Gli input orbitali richiesti dal modello *Orbit generation* dello SPENVIS per la missione sono presentati in Tab.1.

Tab.1 - Dati del profilo di missione.

Inizio missione:	01/12/1998; 00.00 UT	fine missione:	30/11/1999, 23.59 UT
passo dell'analisi:	step giornalieri	assetto:	asse satel. // vettore vel.
semiasse maggiore:	6876 Km	Eccentricità	0.000248
	$T_{orb} = 5674,7 s$ , $h_m = 500 Km$		
Inclinazione iniz.:	0° (orbita equatoriale)	argom. Perig. in.:	180°
anomalia vera iniz.:	0°		

In particolare, il modello per la determinazione ambientale implementato nello SPENVIS all'interno dell'*atmosphere & ionosphere models* è l'MSISE-90 [12]. Questa versione, pubblicata nel 1995, è la versione migliorata dell'MSIS-86, in quanto tiene in considerazione i dati derivanti dai voli dello Space Shuttle e dalle missioni GOES5-6-7-8-9-10, Meteosat ISEE1-2, STRV-1b, MIR, CREES, AZUR, SAMPLEX, UARS e dai risultati ottenuti dei nuovi tipi di scatterometri.

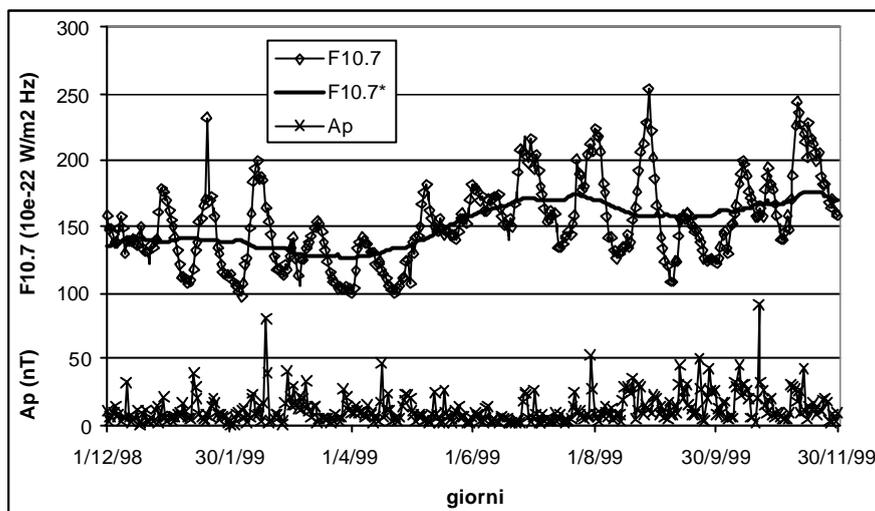
Il modello MSIS-86 (Mass Spectrometer Incoherent Scatter), presentato da Hedin nel 1987, rappresenta il più avanzato modello teorico-sperimentale per lo studio della temperatura e della densità della termosfera. Esso si basa sull'esperienza dei precedenti modelli ed è supportato da una grande quantità di dati acquisiti da razzi e da satelliti (OGO 6, San Marco 3, AEROS-A, AE-C, AE-D, AE-E, ESRO 4 e DE 2), ma soprattutto dall'uso di misure basate sulla tecnica della spettrometria di massa e la dispersione di raggi elettromagnetici incoerenti attraverso le stazioni radar di Millstone Hill, St. Santin, Arecibo, Jicamarca e Malvern.

Il modello di Hedin, pur riferendosi a quello di Jacchia, apporta delle modifiche rispetto al profilo delle temperature, introducendo la quota geopotenziale, e assegna nuovi parametri o

ne introduce degli altri ottenuti sulla base dei dati a disposizione. Utilizza il profilo di temperatura formulato da Bates, come funzione dell'altezza geopotenziale per la termosfera più alta e l'inverso del polinomio dell'altezza geopotenziale per la termosfera più bassa. La temperatura esosferica e le altre quantità chiave sono espresse in funzione dei parametri geografici, solari e magnetici. Questi profili di temperatura permettono, con un'esatta integrazione dell'equazione idrostatica per una massa costante, di determinare il profilo di densità, partendo da una densità specifica a 120 Km in funzione dei parametri geografici e solari/magnetici. Come input richiede l'anno, il giorno, l'ora universale (UT), la quota, la latitudine, la longitudine, il flusso solare  $F_{10.7}$  (giornaliero e mediato sul trimestre  $F_{10.7A}$ ), l'indice magnetico  $A_p$  (medio giornaliero o temporale delle 59 ore precedenti).

Gli andamenti degli indici geomagnetici per il particolare profilo di missione studiato, utilizzati come input nel modello, sono riportati in Fig. 1.

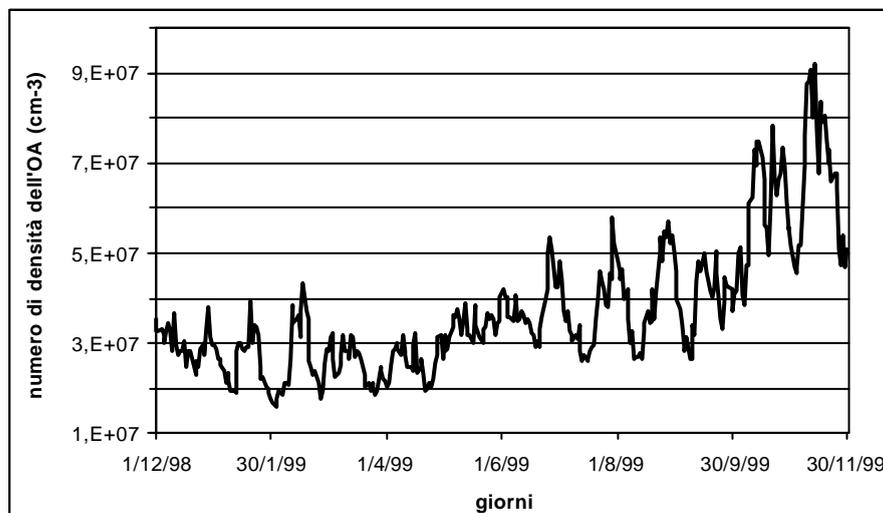
Fig. 1 - Andamento degli indici geomagnetici per il particolare profilo di missione studiato.



Come output base si ottengono il numero di densità dell'He, dell'O, dell' $N_2$ , dell' $O_2$ , dell'Ar, dell'H e dell'N, la densità di massa totale, la temperatura locale e quella esosferica.

Nel caso in specie, l'andamento conseguente al numero di densità dell'OA è riportato in Fig. 2.

Fig. 2 - Andamento del numero di densità dell'OA per il profilo di missione analizzato.



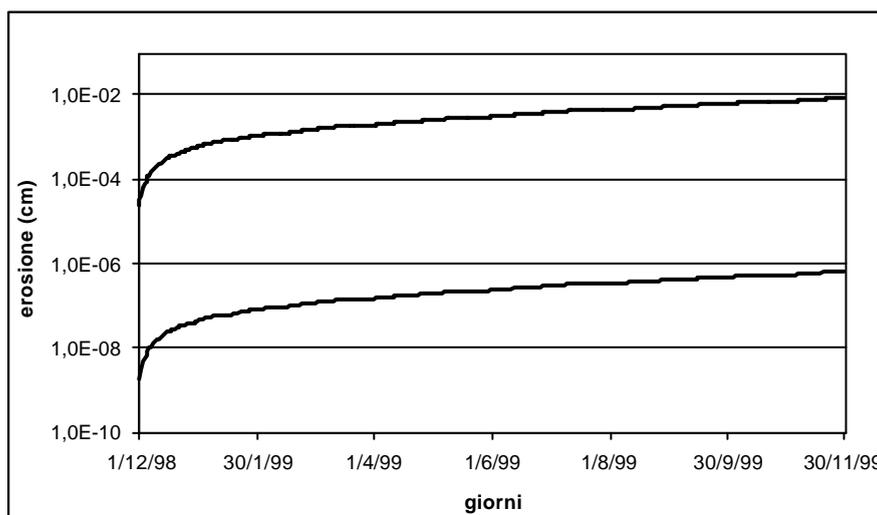
L'erosione viene assunta proporzionale alla fluenza, con parametro di proporzionalità rappresentato dalla reattività del materiale analizzato. La fluenza è definita, invece, come l'integrale nel tempo del flusso di particelle che incide la superficie, mentre il flusso sulla totalità della superficie esposta è il prodotto tra il numero della densità particellare e la velocità media delle stesse particelle. Nota la fluenza è possibile ottenere il grado di erosione del materiale esposto all'ambiente spaziale. Nell'analisi effettuata si sono confrontati alcuni tipi di materiali di rivestimento più utilizzati in campo spaziale per valutarne il diverso comportamento. Nella fattispecie si sono scelti i materiali riportati nella Tab. 2, con il proprio valore del grado di reattività (dall'analisi sono stati esclusi, per ovvi motivi, quei materiali che hanno un grado di reattività nullo se utilizzati singolarmente come il rame, l'oro, il nickel, il platino) e dell'erosione calcolata a fine vita operativa (EOL).

Tab. 2 - I materiali di rivestimento analizzati

Materiale	Reattività $10^{-24}(\text{cm}^3)$	Erosione EOL ( $\mu$ )
Aluminium (150 A)- coated Kapton	0.01	$8.31 \cdot 10^{-2}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (700 A) on Kapton H	$\leq 0.02$	0.166
Fluoropolymer - Teflon, FEP	0.037	0.308
Graphite epoxy - T800-Ep152	2.6	21.61
Mylar	3.4	28.26
Polyethelene	3.7	30.76
Polyimides - Kapton H	3	24.94
$\text{SiO}_2$ (650 A) on Kapton H	$< 0.0008$	$6.65 \cdot 10^{-3}$
Silicone DC1 - 27&5 - coated Kapton	$\leq 0.05$	0.416
Silver	10.5	87.28
Tedlar	3.2	26.60
$\text{TiO}_2$ (1000 A)	0.0067	$5.57 \cdot 10^{-2}$

Nella Fig. 3 sono riportati i limiti entro i quali sono compresi gli andamenti della profondità dell'erosione dei vari materiali sopra riportati durante tutto l'intero arco della missione.

Fig. 3 - Andamento della profondità dell'erosione durante la missione.



## 4. Collisione dell'ossigeno atomico con una superficie a reticolo cristallino

Lo studio presente è incentrato sulla regola di conservazione dell'energia nella teoria delle collisioni tra un atomo di gas ed una superficie solida, ampiamente discussa da Lennard Jones ed i suoi collaboratori nella loro formulazione della teoria di meccanica quantistica delle collisioni, [13-16]. Gran parte della letteratura sperimentale su questo argomento si rivela equivocabile a causa della difficoltà di distinzione tra una collisione anelastica con riflessione ed un assorbimento seguito da una più tardiva rievaporazione, [17].

Mediante l'applicazione di un semplice modello si mostrerà come una certa quantità (in senso microscopico) di energia può essere trasferita da un gas ad una superficie solida. Nella teoria della meccanica quantistica il problema può essere affrontato in due maniere differenti; è possibile linearizzare l'interazione degli ordini alti della teoria delle perturbazioni, oppure usare l'interazione totale di basso ordine. Sia l'una che l'altra procedura conducono ad equazioni molto complicate dove gli aspetti essenziali si perdono dietro dettagli matematici. Questa complicità può essere evitata con l'uso di un modello strettamente classico. Naturalmente dall'applicazione della teoria newtoniana non si otterranno risultati quantitativamente corretti, tuttavia l'equivalente di molti microprocessi risulta essere di risoluzione più agevole e permette di individuare più facilmente gli aspetti fisici del problema. La discussione è limitata al caso unidimensionale; ciò rende ancor più insoddisfacente la soluzione dal punto di vista quantitativo, anche se la semplicità matematica di risoluzione ottenuta è sorprendente.

Quando un atomo di gas urta contro una superficie solida, esso fa un lavoro di compressione. L'energia prodotta può essere restituita all'atomo di gas, dando luogo ad una collisione elastica, altrimenti essa si propaga lontano dall'impatto come un'onda sonora. L'energia trasportata dall'onda sonora è permanentemente trasferita e non può essere ceduta nuovamente all'atomo. In una collisione sufficientemente lenta, l'energia di compressione è perciò dissipata così velocemente come è prodotta. In questo modo l'atomo di gas può anche essere portato ad una completa quiete: esso è allora completamente assorbito. In realtà un'ulteriore distinzione andrebbe fatta tra le collisioni dove l'atomo di gas viene anelaticamente riflesso e quelle dove l'assorbimento può essere seguito da una successiva rievaporazione, tuttavia, come già accennato, risulta molto difficile definire precisamente questa distinzione.

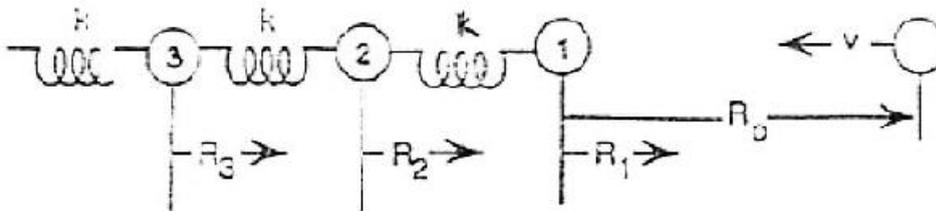
### 4.1 Un modello cinetico: descrizione

Un osservatore, posto su una sonda ad una quota di 300 km, misura un flusso medio di  $10^{15}/cm^2s$  atomi di ossigeno che si avvicinano con una velocità relativa di circa 8 km/s, cui corrisponde un'energia cinetica relativa di 5 eV. La superficie esposta a questo flusso ne risulta danneggiata. Il livello di erosione dipende, oltre che dal tempo di esposizione, dalle caratteristiche intrinseche dei materiali interessati. In un suo recente lavoro, Baird [18] mostra che un atomo colpito della superficie diventa, o no, chimicamente attivo a secondo del carattere direzionale dei suoi legami con gli altri atomi nel solido. Una regione inerte è caratterizzata da legami tangenziali deboli, la superficie danneggiata appare semplicemente ruvida. Al contrario, se i legami tangenziali sono forti, come per una regione chimicamente attiva, l'erosione della superficie è rappresentata da un'area rugosa.

Gli atomi di un solido, che si mantengono ad una temperatura inferiore a 1000 K, hanno un'energia che non supera le poche centinaia di meV. Quindi, in una collisione con un atomo di ossigeno che si muove con un'energia cinetica relativa di circa 5 eV, gli atomi di un solido si possono considerare in quiete nella loro posizione di equilibrio. Inoltre si può pensare che

l'atomo di ossigeno collide con un singolo atomo della superficie; si possono trascurare, infatti, gli effetti di diffrazione quantistica nella diffusione degli atomi ossigeno poiché la loro lunghezza d'onda di De Broglie ( $\beta \text{ pm}$ ) a  $5 \text{ eV}$  è molto minore della tipica distanza ( $100 \text{ pm}$ ) interatomica in un solido [19].

Fig. 4 - Schema del modello



Nel modello illustrato la collisione ha luogo lungo una linea retta ed il solido è rappresentato da un reticolo cristallino ad una dimensione, (cfr. Fig. 4), qualsiasi altro legame tangenziale di un atomo con gli altri è ignorato. Il reticolo è semi-infinito, gli atomi che vi appartengono sono identici ed hanno massa  $m$ . Il primo atomo (posto alla fine della catena) rappresenta la superficie del solido, mentre gli altri ( $j=2, 3, \dots$ ) ne rappresentano la massa. Le posizioni di equilibrio di ciascun atomo sono fissate e lo spostamento del  $j$ -mo atomo dall'equilibrio è indicato con  $R_j$ . ( $j=1, 2, 3, \dots$ ) e misurato nel verso positivo di  $R$ . In particolare  $R_1$  localizza il primo atomo del solido rispetto alla sua posizione a riposo. Si considerano unicamente le interazioni esercitate nelle immediate vicinanze; esse vengono espresse mediante una forza di costante elastica  $k$ , la stessa per ogni legame nella catena. L'atomo di ossigeno ha massa  $M$  e si muove con velocità  $v$  verso la superficie del solido; la sua posizione, relativa alla posizione di equilibrio dell'atomo alla fine della catena, è indicata con  $R_0$ . Esso interagisce, in accordo ad un'energia potenziale,  $V(R_0 - R_1)$ , con il primo atomo del solido. Tutte queste ipotesi permettono di scrivere le equazioni newtoniane del moto del sistema "OA+solido" nel modo seguente:

$$M \frac{d^2 R_0}{dt^2} = F \quad (1)$$

$$M \frac{d^2 R_1}{dt^2} = -F - k(R_1 - R_2) \quad (2)$$

$$M \frac{d^2 R_j}{dt^2} = -k(R_j - R_{j-1}) - k(R_j - R_{j+1}) \quad j = 2, 3, \dots \quad (3)$$

e le condizioni iniziali risultano essere:

$$R_j(0^-) = 0 \quad (4)$$

$$\left( \frac{dR_0}{dt} \right)_{0^-} = -v \quad (5)$$

$$\left( \frac{dR_j}{dt} \right)_{0^-} = 0 \quad j = 1, 2, \dots \quad (6)$$

dove  $t = 0^-$  corrisponde all'istante immediatamente prima della collisione. In generale  $F$  deriva dall'energia potenziale interatomica che risulta essere fortemente repulsiva a breve distanza e debolmente attrattiva a lunga distanza [20]. La componente attrattiva della forza serve ad accelerare l'atomo di ossigeno verso la superficie del solido ed è usualmente molto minore di 5 eV, perciò può essere trascurata. La componente repulsiva, al contrario, aumenta rapidamente mentre la distanza tra i due atomi diminuisce. Per questa ragione la collisione è assimilabile a quella che avviene fra due sfere rigide, e la forza può essere rappresentata dalla:

$$F = \frac{\partial V(R_o - R_1)}{\partial R_o} = I\mathbf{d}(t) \quad (7)$$

dove  $I$  è l'impulso liberato nella collisione e  $\mathbf{d}$  è la funzione di Dirac. Sostituendo la (7) nella (1), integrando e usando la (5), si ottiene la velocità post-collisione dell'atomo O:

$$\frac{dR_o}{dt} = -v + \frac{I}{M} \quad \text{con } t \geq 0^+ \quad (8)$$

$t = 0^+$  rappresenta l'istante immediatamente dopo la collisione. Grazie all'uso di un metodo di generazione di funzioni suggerito da Rubin [21] è possibile disaccoppiare ed integrare [22] le rimanenti equazioni del moto, (2) e (3), fornendo, per l'accelerazione relativa, la relazione:

$$\frac{d^2(R_o - R_1)}{dt^2} = \frac{F(t)}{m_r} - \frac{2}{m} \int_0^t \frac{J_2[2\mathbf{w}(t - \mathbf{I})]}{(t - \mathbf{I})} F(\mathbf{I}) d\mathbf{I} \quad (9)$$

dove  $\mathbf{w} = (k/m)^{1/2}$  è la frequenza angolare di vibrazione di un legame,  $m_r$  è la massa ridotta:

$$m_r = \frac{mM}{m + M} \quad (10)$$

e  $J_n(x)$  è la funzione di Bessel di prima specie e d'ordine  $n$ , [23].

Considerando la (5) e la (6), sostituendo la (7) nella (9) ed integrando, si ottiene:

$$\frac{d(R_o - R_1)}{dt} = -v + \frac{I}{M} + \frac{2I}{m} \frac{J_1(\mathbf{t})}{\mathbf{t}} \quad (11)$$

dove si è posto

$$\int_0^{\mathbf{t}} \frac{J_2(\mathbf{I})}{\mathbf{I}} d\mathbf{I} = \frac{1}{2} - \frac{J_1(\mathbf{t})}{\mathbf{t}} \quad (12)$$

relazione che si prova facilmente sfruttando le espressioni delle funzioni di Bessel e  $\mathbf{t} = 2\mathbf{w}t$ , detta tempo ridotto è una variabile adimensionale.

Combinando la (8) e la (11) si ottiene la:

$$\frac{dR_1}{dt} = -\left(\frac{2I}{m}\right) \frac{J_1(\mathbf{t})}{\mathbf{t}} \quad \text{con } \mathbf{t} \geq 0^+ \quad (13)$$

che da la velocità post-collisione del primo atomo della catena.

Grazie alla trasformata di Laplace, di variabile  $\mathbf{s}$ , della funzione  $J_n(\mathbf{t})/\mathbf{t}$ ,  $\left\{n[\mathbf{s}+(\mathbf{s}^2+1)^{1/2}]\right\}^{-1}$

ed al teorema del valore iniziale [24], si dimostra che:  $J_1(\mathbf{t})/\mathbf{t} = 1/2$  con  $\mathbf{t} = 0^+$ , cioè immediatamente dopo la collisione. A questo punto la (13) diventa:

$$\left(\frac{dR_1}{dt}\right)_{0^+} = -\frac{I}{m} \quad (14)$$

Poiché a  $\tau = 0^+$ , nessuna delle ‘molle’ è compressa e solo l'atomo finale della catena ( $j=1$ ) ha velocità non nulla, la quantità di moto trasferita nella collisione è pari a  $-I$ . Dalla legge di conservazione dell'energia:

$$\frac{M}{2}\left(\frac{dR_o}{dt}\right)_{0^-}^2 = \frac{M}{2}\left(\frac{dR_o}{dt}\right)_{0^+}^2 + \frac{m}{2}\left(\frac{dR_1}{dt}\right)_{0^+}^2 \quad (15)$$

e tramite le espressioni (5), (8) e (14) si trova che:

$$I = 2m_r v \quad (16)$$

e quindi tramite le (10), (16) la (8) diventa:

$$\frac{dR_o}{dt} = -\frac{(M-m)}{(M+m)}v \quad \text{con} \quad t > 0^+ \quad (17)$$

dunque il segno della velocità post-collisione dell'atomo di ossigeno dipende dalla grandezza delle masse in gioco,  $m$  ed  $M$ . L'energia  $\Delta E$  trasferita nella collisione è rappresentata dal secondo termine a destra della (15), usando la (14) e la (16) tale termine diventa:

$$\Delta E = \frac{4Mm}{(M+m)^2} E \quad (18)$$

essendo  $E = \frac{1}{2}Mv^2$  l'energia dell'atomo di ossigeno prima della collisione.

L'energia di eccitazione immagazzinata nel primo legame nel solido,  $H$ :

$$H = \frac{m}{2}\left(\frac{dR_1}{dt}\right)^2 + \frac{k}{2}(R_1 - R_2) \quad (19)$$

Se il reticolo fosse incompressibile  $R_1(t)$ -  $R_2(t)$  sarebbe costante nel tempo e la collisione risulterebbe binaria elastica; in tal caso non vi sarebbe alcun trasferimento di energia. Ma il solido è compressibile e risponderà alla forza esercitata su di esso dall'atomo di ossigeno. La risposta sarà rappresentata da onde viaggianti nel solido (reticolo oscillante). Le condizioni iniziali espresse nelle (4) e (6) permettono di esprimere  $R_1(t)$ -  $R_2(t)$  come [22]:

$$R_1 - R_2 = -\frac{2}{k} \int_0^{\mathbf{I}} \frac{J_2[2\mathbf{w}(t - \mathbf{I})]}{(t - \mathbf{I})} F(\mathbf{I}) d\mathbf{I} \quad (20)$$

mediante la (7), la precedente diviene:

$$R_1 - R_2 = -\left(\frac{4I\mathbf{w}}{k}\right) \frac{J_2(\mathbf{t})}{\mathbf{t}} \quad (21)$$

$H$  assumerà, pertanto, la forma:

$$\Delta E = \frac{4Mm}{(M + m)^2} E \quad (22)$$

Dunque è proporzionale a  $\Delta E$ . Il coefficiente di proporzionalità è, comunque, una funzione decrescente del tempo perché l'energia si disperde fuori dal legame e si propaga all'interno del corpo solido.

## 4.2 Applicazione del modello e discussione

Si osservi che il modello proposto è applicabile unicamente a materiali dotati di struttura a reticolo cristallino. Il motivo, di quanto appena affermato, risiede nel fatto che le forze di legame, qui rappresentate come forze elastiche, non possono essere determinate se non è definito o comunque calcolabile il modulo medio di elasticità,  $e$ , del materiale. Se  $l$  rappresenta la lunghezza del legame risulta, infatti, che  $k$ ,  $e$  ed  $l$  sono tra loro dipendenti secondo la relazione:  $k = el$ .

Il campione di valutazione è costituito da nove materiali di interesse le cui caratteristiche principali sono riportate nella Tab. 3.

Tab. 3 - I materiali di interesse analizzati

Materiale	Massa ( $amu=1.6606 \cdot 10^{-27} Kg$ )	C. elastica ( $J/m^2$ )	M.medio el ( $psi=6894.76N/m^2$ )	F. angolare ( $rad/s$ )
Alluminio (Al)	26.981540	19.739698	$10^7$	$2.0989610 \cdot 10^{13}$
Argento (Ag)	107.86800	21.913891	$11 \cdot 10^6$	$1.1060657 \cdot 10^{13}$
Ferro (Fe)	55.847000	49.633102	$29 \cdot 10^6$	$2.3134135 \cdot 10^{13}$
Molibdeno (Mo)	95.940000	88.307879	$47 \cdot 10^6$	$2.3543301 \cdot 10^{13}$
Nichel (Ni)	56.700000	51.536952	$3 \cdot 10^7$	$2.3395661 \cdot 10^{13}$
Oro (Au)	196.96650	23.066806	$11.6 \cdot 10^6$	$8.3977903 \cdot 10^{12}$
Platino (Pt)	195.09000	51.119130	$27 \cdot 10^6$	$1.2561506 \cdot 10^{13}$
Rame (Cu)	63.546000	28.196810	$16 \cdot 10^6$	$1.6346447 \cdot 10^{13}$
Silicone (Si)	28.085500	25.943051	$16 \cdot 10^6$	$2.3585057 \cdot 10^{13}$

I risultati ottenuti mostrano che il modello è fortemente dipendente dalla massa. Secondo la (18), la massima energia trasferita al solido,  $\Delta E_{max}$ , si ha quando la massa  $m$  dell'atomo del solido colpito dall'atomo di ossigeno è uguale alla massa di quest'ultimo,  $M$ . Concordemente la (17) mostra che per  $M = m$  la velocità dell'atomo di ossigeno dopo la collisione è nulla. Mentre se l'atomo incidente è più leggero di quello colpito, cioè  $m/M > 1$ , dopo la collisione l'atomo di ossigeno tende ad allontanarsi dalla superficie,  $v_{OA} > 0$ ; altrimenti per  $m/M < 1$ , la

velocità post-collisione dell'atomo di ossigeno è negativa,  $v_{OA} < 0$ , ed esso prosegue il suo viaggio all'interno del solido. In completo accordo a quanto discusso l'energia trasferita al solido durante la collisione aumenta se diminuisce il rapporto  $m/M$ . In effetti un atomo di gas pesante è più facilmente intrappolato di uno leggero.

L'atomo di superficie, benché inizialmente a riposo, dopo la collisione arretra all'interno del solido. La sua velocità è data dalla (13). Il suo andamento, al variare del tempo adimensionale  $t$  e normalizzato rispetto al valore della velocità nell'istante iniziale successivo alla collisione,  $-I/m$ , è riportato in Fig. - 5, per l'alluminio l'argento e il platino. Per gli stessi materiali la Fig. - 6 mostra l'andamento dell'energia di eccitazione dopo la collisione normalizzata rispetto all'energia trasmessa,  $H/DE$ .

Fig. 5 – Velocità dell'atomo colpito

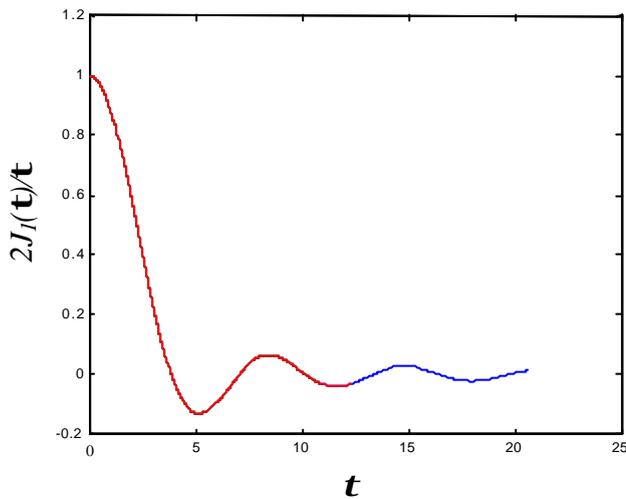
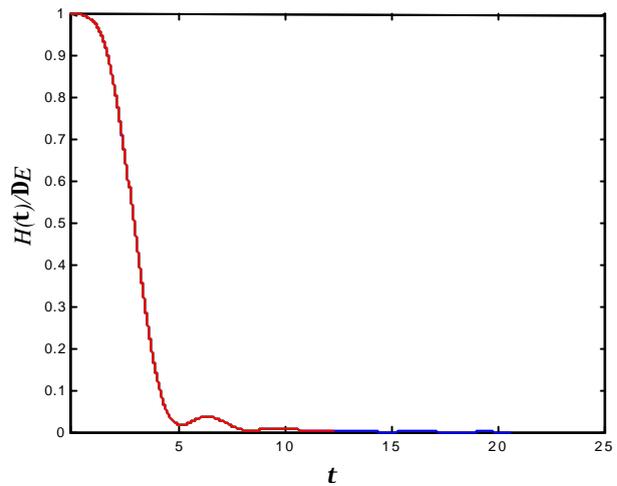
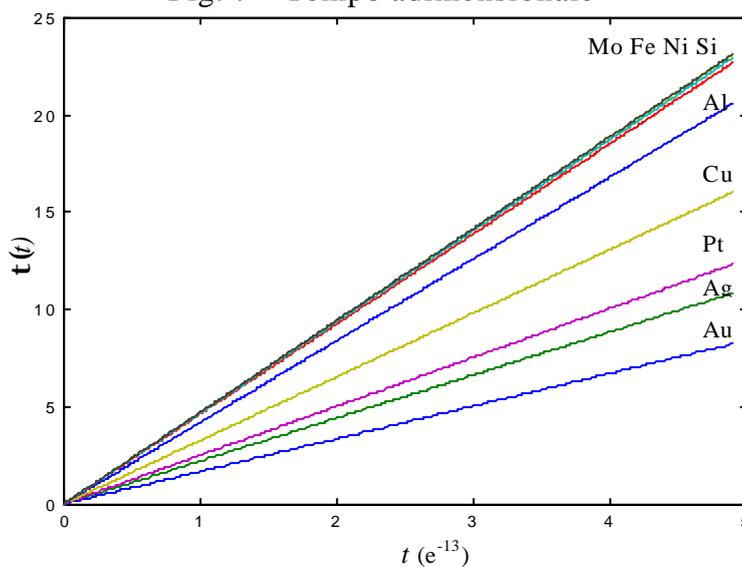


Fig. 6 – Energia di eccitazione



All'istante  $t = t = 0^+$ , l'energia dell'atomo colpito è totalmente cinetica; successivamente, acquista anche una componente di energia potenziale, mantenendosi così fino a  $t \cong 3.831$ , quando l'atomo colpito raggiunge il suo primo punto di velocità nulla ed essa è diminuita

Fig. 7 – Tempo adimensionale



almeno del 20 % del suo valore iniziale, mentre l'energia persa si è propagata all'interno del solido. Durante questa fase di compressione, mentre la maggior parte dell'energia trasmessa alla collisione viene dissipata, le forze armoniche sono fortemente repulsive e riproducono, sotto questo aspetto, il reale potenziale interatomico del solido. Il tempo scala, in cui l'energia persa si propaga, dipende dalla frequenza angolare di vibrazione del legame che nel presente modello può essere rappresentato da una molla. Per tutti e tre i materiali considerati in figura risulta

$t = 2\omega = 3.831$ , dunque il tempo scala necessario a raggiungere il primo punto di velocità nulla è assai breve e vale  $t_{Al}=91 \cdot 10^{-15}s$ ,  $t_{Ag}=173 \cdot 10^{-15}s$ ,  $t_{Pt}=152 \cdot 10^{-15}s$ . Perciò per ogni fissato materiale il tempo di dissipazione dell'energia è maggiore quanto è minore la velocità angolare di vibrazione del legame. Per chiarire meglio questo concetto in Fig. 7 è mostrato l'andamento del tempo adimensionale, in funzione del tempo scala, per tutti i materiali utilizzati. E' evidente che le rette,  $t = t(t)$ , di maggior pendenza corrispondono a materiali caratterizzati da frequenze angolari di legame più elevate.

#### 4. Conclusioni

Negli ultimi dieci anni si sono sviluppate molte missioni scientifiche finalizzate a raccogliere raccogliere quante più informazioni specifiche in merito alla compatibilità ambientale dei materiali utilizzati nelle diverse missioni spaziali. Grazie a queste missioni si sono potuti catalogare e classificare in maniera più realistica gli effetti ambientali, difficilmente simulabili, in maniera accurata, solo con metodi sperimentali o con modelli numerici. Anzi proprio le informazioni ottenute *in situ* continuano a dare nuova linfa alle prove di laboratorio e alle simulazioni numeriche che solo così possono ottenere una giusta e quanto mai reale validazione. In questo ambito, comprendere meglio il meccanismo di erosione non è un problema di facile soluzione a causa delle troppe variabili che vi intervengono e che complicano il fenomeno sia dal punto di vista cinetico sia dal punto di vista chimico. Grazie al sempre maggiore sviluppo dei materiali compositi, la casistica del problema si è allargata ancor più. Si deve rammentare anche che ogni missione trova un ambiente che non sarà mai uguale a quello di un'altra missione, per cui sarà necessario standardizzare anche i risultati, per poterli comparare ed estrarne un comportamento di massima. Questa diversità influisce anche sul grado di reattività riscontrato da uno stesso materiale.

Il lavoro qui svolto ha permesso di ottenere informazioni sull'efficienza, in orbita LEO, di alcuni materiali in funzione del tempo di esposizione, dando così informazioni utili sugli ordini di grandezza dell'erosione sui campioni esposti all'ambiente spaziale.

Nella formulazione del modello sono state fatte approssimazioni fondamentali: il modello è unidimensionale, viene applicata la meccanica classica e le interazioni non rappresentano effettivamente la realtà. Pertanto i risultati non possono essere quantitativamente corretti; tuttavia l'aspetto qualitativo, che ne risulta, sembra essere plausibile. L'errore introdotto dall'uso della meccanica newtoniana non è facilmente stimabile ma non dovrebbe essere eccessivo, eccezion fatta per masse molto leggere. La principale funzione del reticolo cristallino, sembra essere quella di sottrarre energia e quantità di moto all'atomo incidente. E' importante sottolineare che il fenomeno di collisione innesca una serie di onde nel solido e che queste possono propagarsi lontano dal punto di impatto con velocità finita. Quest'ultima proprietà risulta valida anche per reticoli di dimensioni superiori a quella lineare. La brevità del tempo scala, necessario a dissipare l'energia, è essenzialmente dovuta al fatto che nel modello lineare tutti i legami che uniscono gli atomi nel piano parallelo alla superficie sono ignorati. Se tutti i legami tangenziali fossero considerati, l'atomo colpito tratterrebbe una quantità superiore dell'energia iniziale trasferita nella collisione.

Oggetto di prossimi studi saranno modelli di dimensioni superiori all'unità, e modelli validi per solidi non caratterizzati da reticolo cristallino.

Un altro obiettivo importante è costituito dal comprendere come si può raccordare e legare il meccanismo di creazione dell'ossigeno atomico alla sua azione danneggiatrice. Ad esempio si potrebbe cercare di migliorare i risultati delle prove di fluorescenza per ottimizzare il modello cinetico di rilevazione del danno ottico dovuto all'azione accoppiata dell'ossigeno atomico con

le radiazioni solari ed affinare la determinazione sperimentale della sezione di assorbimento del danno.

## Ringraziamenti

Gli autori desiderano rivolgere un particolare ringraziamento a D. Heynderickx, SPENVIS project manager, per la cortese disponibilità e collaborazione.

## Bibliografia

1. Teichman L.A., Slemp W.S., Witte W.G.Jr., "Evaluation of Selected Thermal Control Coatings for Long-Life", NASA TM-4319, January 1992.
2. Dever J.A., Rutledge S.K., Hasegawa M.M., Reed C.K., "Evaluation of Low Earth Orbit Environmental Effects on International Space Station Thermal Control Materials", International Conference on Protection of Materials in a Space Environment, Toronto, Canada, 1998, NASA TM-208500.
3. Dooling D., Finckenor M.M., "Material Selection Guidelines to Limit Atomic Oxygen Effects on Spacecraft Surfaces", NASA TP-209260, June 1999.
4. Iskanderova Z.A., Kleiman J.I., Gudimenko Y. Tennyson R.C., "Influence of Content and Structure of Hydrocarbon Polymers on Erosion by Atomic Oxygen", *Journal of Spacecraft & Rockets*, vol. 32, 5, 1995.
5. Rutledge S.K., Banks B.A., "Atomic Oxygen Texturing of Polymers and Carbons", 11th International Conference on Surface Modification Technologies, Paris, France, September, 1997, NASA TM-107521.
6. de Groh K.K., Smith D.C., "Investigation of Teflon FEP Embrittlement on Spacecraft in Low Earth Orbit", NASA TM-113153.
7. Banks B.A., Rutledge S.K., "Low Earth Orbital Atomic Oxygen Simulation for Materials Durability Evaluation", *Proceeding of Fourth European Symposium on Spacecraft Materials in Space Environment*, CERT, Toulouse, Sept., 1988.
8. Banks B.A., Rutledge S.K., Merrow J.E., Brady J.A., "Atomic Oxygen Effects on Materials", *Proceeding of NASA/SDIO Joint Workshop on Space Environmental Effects*, Hampton, VA, 28-30 June, 1988.
9. Silverman E.M., "Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide", Contract NAS1-19291, March 1995.
10. Brewer D.A., Mior J.L., "Recent Results of NASA's Space Environments and Effects Program", IAF-98-I.5.06, 49th International Astronautical Congress, Melbourne, Australia, 1998.
11. SPENVIS - SPace ENVironment Information System, "help" on line, 1999.
12. Hedin A.E., "Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere", *Journal of Geophysich Research*, 96, 1159, 1991.
13. J. E. Lennard-Jones and C. Starchan, *Proc. Roy. Soc.*, A150, 422, London, 1935.
14. J. E. Lennard-Jones and A. F. Devonshire, *Proc. Roy. Soc.*, A156, 6, London, 1936.
15. A. F. Devonshire, *Proc. Roy. Soc.*, A158, 269, London, 1937.
16. C. Starchan, *Proc. Roy. Soc.*, A158, 591, London, 1937.
17. S. Wexler, *Revs. Modern Phys.*, 10, 402, 1958.
18. Baird J. K., "Low Earth Orbit Atomic Oxygen Erosion of Polymer Surfaces", *Journal of Spacecraft & Rockets*, 35, 1, 1998.
19. I. Blokhinstev, "Principles of Quantum Mechanics, I ed, Allyn and Bacon, Boston, MA, 1964, p.312.

20. P. Silvestroni, "Fondamenti di chimica", Eredi V. Veschi, Roma, 1986.
21. R. Rubin, "Statistical Dynamics of Simple cubic Lattices, Model for the Study of Brownian Motion", *Journal of Mathematical Physics*, 1, 4, 1960, pp.309-321.
22. R. W. Zwanzig, "Collision of a Gas Atom with a cold surface", *Journal of Chemical Physics*, 32, 4, 1960, pp.1173-1177.
23. Abramowitz and Stegun, "Handbook of Mathematical Functions", NBS 55, National Institute of Standard Technology, Gaithersburg, MD, 1984.
24. Robertz and Kaufman, "Tables of Laplace Transforms", 1st ed., Saunders, Philadelphia, PA, 1966.