

Relazione

Corso di strutture spaziali



Politecnico di Torino
Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
2021-2022

Professore: Alfonso Pagani

AUTORI

Emanuele Chiavetta s284049
Francesca Giacoma s291435
Luca Laguardia s291451
Marco Pepe s292837
Marco Perello s281630
Marco Restagno s288805
Paul Bichara s293887

Sommario

Le sollecitazioni indotte dai carichi meccanici e termici su una vela solare possono produrre deformazioni importanti della membrana riflettente. In questo progetto sono state eseguite analisi statiche in Patran Nastran al fine di valutare l'entità di tali tensioni e deformazioni. Per queste analisi si è deciso di scegliere come riferimento la sonda spaziale IKARUS, la prima ad aver eseguito con successo un viaggio interplanetario usando un sistema di propulsione a vela solare.

Indice

1	1. Stato dell'arte	6
1.1	La pressione di radiazione	7
1.1.1	Vantaggi e configurazioni	8
1.1.2	Clipper e quad sail	9
1.1.3	Vela circolare	9
1.1.4	Heliogyro	9
1.2	Materiali per le vele solari	10
1.3	Trend futuri	11
2	2. Requisiti e carichi	13
2.1	Requisiti e obiettivi della missione IKAROS	13
2.2	Carichi meccanici	13
2.3	Carichi termici	18
3	3. Strutture e meccanismi principali	19
3.1	Specifiche del velivolo	19
3.2	Configurazione e materiali	20
3.3	Meccanismo di dispiegamento della vela	21
3.4	Risultati degli esperimenti di dispiegamento di IKAROS	22
3.5	Determinazione e controllo dell'assetto	23
4	4. Analisi statica in Patran Nastran	25
4.1	Geometry	25
4.2	Meshing	25
4.3	Vincoli e Forze	26
4.4	Analisi e Risultati	27
4.5	Considerazioni e commenti finali	28

Elenco delle figure

2.1	Pressione della radiazione solare	14
2.2	Confronto fattori di scallop	15
2.3	Confronto fattori di scallop pretensionati	16
2.4	Forza sul corpo principale e vela sviluppata da un thruster plume	17
2.5	Plume flow model e source flow method	17
2.6	Plume impingement model e free molecule flow	17
2.7	Integrazione della forza di un thruster plume in un modello multi-particella	17
2.8	Confronto profili di temperatura	18
3.1	Specifiche di IKAROS	19
3.2	IKAROS Solar Sail	20
3.3	Materiali della membrana	20
3.4	Struttura multistrato di una cella solare a film sottile	21
3.5	Impacchettamento della vela solare	21
3.6	Sequenza di dispiegamento della vela	22
3.7	Configuazione di IKAROS prima del lancio	23
3.8	Reaction Control System	23
3.9	Pressione di vapore	24
4.1	Parametri geometrici e meccanici della vela	25
4.2	Modello geometrico della vela	26
4.3	Creazione della mesh	26
4.4	Dettagli di Incastro e asse di rotazione	27
4.5	Spostamenti nel caso di Analisi statica con velocità di rotazione pari a 1 RPM	27
4.6	Spostamenti nel caso di Analisi statica con Velocità di spin della vela pari ad 2 RPM	28
4.7	Spostamenti nel caso di analisi statica con Velocità di spin della vela pari a 5 RPM .	28
4.8	Componenti xy dello stress tensor nel caso di velocità di rotazione pari ad 1 RPM .	29
4.9	Componenti xy dello stress tensor nel caso di velocità di rotazione pari ad 2 RPM .	29
4.10	Componenti xy dello stress tensor nel caso di velocità di rotazione pari ad 5 RPM .	29

Elenco delle tabelle

2.1 Confronto inclinazione-pressione solare	14
2.2 Tensione a bordo vela	16

1. Stato dell'arte

L'idea che la radiazione solare possa produrre una qualche forma di pressione non è rivoluzionaria, ma circola da parecchio tempo. Già nel 1600, Johannes Kepler ha parlato di “vele tra le stelle”, teorizzando che le vele e le navi potessero essere adattate per “sfruttare le brezze celesti” e, anche se lui probabilmente non immaginava che queste brezze si sarebbero concretizzate nella luce del Sole, oggi sappiamo che esiste davvero il vento solare.

Le vele solari sono un sistema di propulsione spaziale il cui funzionamento non si basa sull'espulsione di un propellente ad alta velocità. La spinta è infatti generata dall'urto con i fotoni provenienti dal Sole, per mezzo di grandi membrane riflettenti.

Una sonda a vela solare, pur avendo una velocità iniziale molto più bassa di quella di una sonda normalmente alimentata a carburante, continuerà ad accelerare in modo permanente nel suo viaggio attraverso lo spazio, arrivando a raggiungere velocità inimmaginabili per le sonde normali. Ciò risulta possibile in quanto la spinta prodotta dalle vele solari è teoricamente illimitata nel tempo, e solo il deterioramento della superficie riflettente può degradarne le prestazioni. Questa caratteristica, oltre a renderle il sistema propulsivo ideale per le missioni caratterizzate da grandi ΔV , consentirà in futuro il compimento di missioni oggi impossibili con i motori tradizionali, come quelle che richiedono l'utilizzo prolungato di orbite non kepleriane.

Notevoli sono stati gli sforzi delle agenzie spaziali per testare e promuovere le vele solari come una tecnologia affidabile per future missioni. Menzioniamo il successo nel 2010 della missione IKAROS (Interplanetary Kite-Craft Accelerated by Radiation Of the Sun) condotta dalla giapponese JAXA. IKAROS è stato il primo satellite ad utilizzare le vele solari come sistema propulsivo principale e a compiere con esse un viaggio interplanetario che lo ha portato fino a Venere. Nel 2015 è stata invece la volta di LightSail 1, destinato solo a testare lo spiegamento della vela, seguito nel 2019 da LightSail 2, che utilizza la vela solare per mantenersi in orbita sopra la Terra.

Al giorno d'oggi, si contano numerose missioni di qualifica della tecnologia delle vele solari e molti progetti in via di sviluppo per il prossimo futuro, soprattutto per l'esplorazione del sistema solare esterno.

Rispetto ad altre tipologie di propulsione, la propulsione con vela solare, o propulsione fotonica, è unica nel suo genere per il processo di scambio di quantità di moto. Generalmente, la quantità di moto di uno spacecraft viene alterata utilizzando propellente attraverso un motore chimico o elettrico: una parte della massa dello spacecraft è sacrificata e il corpo principale guadagna una quantità di moto pari a quella persa dal propellente.

Un altro modo per scambiare quantità di moto è attraverso l'interazione con l'ambiente esterno, fonte di forze e coppie di disturbo sempre presenti e di ordini di grandezza inferiori rispetto alla forza generata dai thrusters. Gli spacecrafts capaci di scambiare quantità di moto con l'esterno includono vele solari, vele elettriche e vele magnetiche, ognuna delle quali presenta un meccanismo

di scambio differente: la vela solare presenta come fonte di spinta la radiazione solare, mentre la vela elettrica o magnetica si limita a riflettere le particelle cariche del vento solare usando il campo elettrico o magnetico.

La vela solare presenta un'analogia con quella marittima ma in ambiente spaziale il discorso si complica: veleggiare nello spazio comporta lo scambio di energia attraverso numerosi fenomeni ambientali, primo di tutti la gravità. Rispetto alle altre forze ambientali, quella dovuta alla pressione della radiazione solare incide maggiormente nel calcolo delle forze agenti su uno spacecraft, motivo per il quale una vela solare presenta un'elevata capacità di scambiare quantità di moto, superiore rispetto ad altre tipologie di propulsione a vela.

In aggiunta a ciò, nell'ambiente interplanetario le forze sviluppate dalla pressione dovuta alla radiazione solare sono stabili e con comportamenti prevedibili rispetto ad altri tipi di forze. Questo riduce l'incertezza sulla spinta delle vele solari, permettendo di sviluppare e seguire traiettorie affidabili.

Tutte queste caratteristiche concorrono all'unicità della vela solare rispetto a tutti gli altri tipi di vele per uso spaziale, specialmente per missioni interplanetarie.

1.1 La pressione di radiazione

La pressione di radiazione è dovuta alla quantità di moto di un fotone. Dalla legge di Plank un fotone trasporta un'energia:

$$E = vh \quad (1.1)$$

D'altra parte, Einstein per primo intuì che la massa di un oggetto è misura del suo contenuto di energia:

$$E^2 = (m_o c^2)^2 + (pc)^2 \quad (1.2)$$

dove m_o è la massa restante dell'oggetto e p la sua quantità di moto.

Il fotone ha massa nulla (m_o). Combinando le due relazioni (eq. 1.1 e 1.2) è possibile definire la quantità di moto trasportata dal singolo fotone:

$$p = \frac{hv}{c} \quad (1.3)$$

L'energia che attraversa una superficie normale alla radiazione incidente è data da:

$$dE = WAdt \quad (1.4)$$

Utilizzando la relazione precedente è possibile scrivere la variazione della quantità di moto come:

$$dp = \frac{dE}{c} \quad (1.5)$$

Si ricava così la pressione di radiazione P come:

$$P = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = W/c \quad (1.6)$$

dove W è il flusso radiativo.

La quantità di moto si trasferisce appena i fotoni solari tocca l'obiettivo, esercitando pressione sullo

stesso; il modulo di questa pressione dipende dalla percentuale della quantità di moto trasferita tra radiazione solare e oggettivo.

Malgrado la quantità di moto dei fotoni possa essere raccolta dalle vele solari per provvedere alla propulsione dello spacecraft, l'efficacia della propulsione delle vele diminuisce all'aumentare della distanza dal Sole con legge quadratica. La luminosità solare, potere radiativo della stella, è una costante ($L=3.84 \cdot 10^{26} W$), da cui il flusso radiativo o la quantità di energia solare che passa attraverso un'area unitaria in un secondo ad una distanza r dal sole si calcola come:

$$W(r) = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (1.7)$$

Tuttavia, il flusso radiativo a qualsiasi distanza è tipicamente descritto ,relativamente al flusso, al raggio orbitale medio terrestre:

$$W(r) = W(r_T) \left(\frac{r_T}{r} \right)^2 \quad (1.8)$$

La pressione massima dalla radiazione solare si determina a partire dall'espressione della pressione e da come i fotoni sono riflessi dall'oggetto, considerando una condizione per cui tutti i fotoni sono riflessi allora la pressione massima è doppia rispetto a quella calcolata prima

$$P_{max} = P = \frac{2W}{c} \quad (1.9)$$

1.1.1 Vantaggi e configurazioni

La spinta ottenibile con una vela solare, benché modesta, presenta il vantaggio che non richiede un generatore di potenza o un convertitore a bordo dello spacecraft, comportando una notevole riduzione di massa e peso. D'altra parte, l'utilizzo di vele solari ha come vantaggio l'utilizzo di superfici riflettenti di notevole dimensione.

Le dimensioni elevate delle vele, specchi grandi e ultraleggeri, comportano un problema di impacchettamento pre-lancio e di dispiegamento in orbita. Le vaste superfici membranali devono essere distese evitando un eventuale danneggiamento e, per avere un'efficienza maggiore, devono essere tenute piane applicando costantemente una tensione che mantenga la membrana il più piatta possibile.

Malgrado siano state proposte una moltitudine di forme e dimensioni delle vele, l'operazione principale rimane riflettere e reindirizzare la luce solare attraverso superfici o membrane riflettenti per creare forze o torsioni per controllare l'assetto o la posizione. La forma delle membrane della vela e delle strutture del supporto sono utilizzate per categorizzare la vela solare. In particolare, vele che utilizzano strutture per mantenere il loro dispiegamento sono dette vele rigide, mentre vele che non richiedono questo supporto sono dette vele non rigide.

I design delle vele rigide mantengono la forma delle membrane della vela connettendo i bordi delle membrane con supporti strutturali, anche se il modo in cui avviene la connessione e il numero di supporti varia da schema a schema. La membrana può essere attaccata ad uno o più punti del supporto rigido in base alle specifiche del singolo design. La struttura aggiuntiva fornita da queste configurazioni contribuisce a ridurre la flessibilità della membrana che, nella maggior parte dei casi, è vista come un disturbo. Per questi motivi, le vele rigide sono le più probabili da scegliere per uno sviluppo nel breve termine.

Per vele non rigide è la forza centrifuga del satellite che provvede la tensione necessaria a mantenere

le membrane tirate e dispiegate, per questo sono spesso riferite a satelliti rotanti stabilizzati con spin.

La vela solare è costituita da un mozzo centrale da cui è dispiegata la membrana.

Uno spacecraft rotante offre numerosi vantaggi rispetto ad uno con membrane dispiegate utilizzando strutture rigide. Il velivolo spaziale avrà un rapporto favorevole tra massa e superficie della membrana e sarà in grado di generare grandi accelerazioni. Inoltre, la membrana rotante avrà una piccola quantità di momento angolare che offrirà un grado di stabilizzazione dell'assetto perché i disturbi di assetto risulteranno in una precessione dell'asse di rotazione.

Altro vantaggio chiavo è che la loro rotazione consente di mediare qualsiasi degrado delle prestazioni della membrana della vela durante il periodo di rotazione: danni alla membrana che degraderebbero le proprietà ottiche e ridurrebbero le prestazioni della vela possono essere mitigati facendola filare. Inoltre, lo spiegamento di vele non rigide è relativamente semplice, ma le membrane sono più flessibili e questo presenta un effetto deleterio sul controllo dell'assetto. Il grande momento angolare del riflettore rotante richiederà anche uno sforzo di controllo aggiuntivo per il riorientamento.

Tra le configurazioni rigide si trovano clipper, quad sailer e la vela a farfalla, mentre tra le configurazioni non rigide spuntano solo due tipi di vele, cioè la vela circolare e l'heliogyro.

1.1.2 Clipper e quad sail

La configurazione a clipper richiede quattro longheroni ma potrebbe richiedere un sartame complesso per prevenire la deformazione del braccio a causa della tensione della membrana. D'altra parte, la quad sailer necessita solo due longheroni per le membrane del quadrante. Tuttavia, questo offre un'ulteriore autorità di controllo perché ogni zona può essere ruotata indipendentemente attraverso il movimento dei supporti per generare la coppia necessaria.

Questo tipo di vela ha un dispiegamento in orbita di non facile realizzazione e il controllo per il direzionamento della spinta non è semplice, a causa della grande inerzia. D'altra parte, la semplicità della forma facilita notevolmente costruzione e impacchettamento a terra.

1.1.3 Vela circolare

Nella vela circolare l'effetto centrifugo dovuto alla rapida rotazione permette di mantenere la superficie della vela piatta senza supporti aggiuntivi. La vela è composta da una serie di spicchi che formano una corona circolare con una parte centrale aperta di dimensioni di circa 10% della superficie totale.

La zona centrale non è completamente vuota, infatti al suo interno è inserito il corpo principale, collegato alla vela tramite tiranti che ancorano la vela e stabilizzano l'estremità del foro trasferendo coppie di torsione tra corpo centrale e vela. L'effetto della pressione della radiazione solare, a causa della massa concentrata al centro della vela, conferisce una curvatura alla vela stessa, che presenterà una leggera forma conica.

1.1.4 Heliogyro

L'heliogyro presenta membrane con grandi rapporti tra lunghezza e larghezza che ricordano le pale di un elicottero: le membrane non fanno parte di una superficie contigua ma sono divise in sottili strisce disposte simmetricamente attorno al mozzo centrale. Inoltre, ciascuna pala può essere ruotata attorno al proprio asse longitudinale mentre l'interno velivolo ruota attorno ad un asse

centrale.

Le lame sono appesantite all'estremità e fissate a tendini che aiutano a distribuire le forze centrifughe lungo una lama. La rotazione del sistema dispiega ciascuna pala in modo simile al meccanismo di distribuzione delle vele circolari; principale differenza tra queste due configurazioni è che le lame vengono srotolate invece che dispiegate.

La rotazione di ciascuna pala attorno al proprio asse longitudinale genera una coppia nel corpo che lo spacecraft può utilizzare per il controllo dell'assetto. A questo proposito, l'heliogyro è simile alla quad sail in cui la semplice rotazione di un quadrante della vela produce una coppia nel corpo.

Uno dei principali vantaggi di questo design è la facilità l'impacchettamento delle lame e il dispiegamento in orbita. D'altra parte, per avere prestazioni comprabili con altri modelli di vele, ciascuna lama deve essere molto lunga. Le grandi dimensioni della lama potrebbero portare effetti dinamici di flessione, curvatura e torsione della membrana a svolgere un ruolo molto più importante nelle prestazioni del velivolo spaziale.

1.2 Materiali per le vele solari

Per la realizzazione di una vela solare occorrono materiali estremamente leggeri, molto riflettenti e in grado di sopportare temperature elevate. Per questo motivo lo studio dei materiali impiegati è uno dei punti fondamentali al fine di migliorare le caratteristiche termo-ottiche e di resistenza.

L'elemento più importante di una vela solare è la sottile membrana che raccoglie la quantità di moto. La radiazione solare porta con sé un elevato numero di fotoni che colpisce la superficie riflettente producendo una pressione costante che incurva la membrana. Tuttavia, oltre all'alto flusso di fotoni, il Sole produce anche una serie di particelle cariche elettricamente molto variabili in velocità e densità.

La vela deve vivere in un ambiente come quello spaziale, che presenta molti disturbi esterni, tra questi quello più dimensionante nella scelta del materiale della membrana sono le particelle cariche provenienti dal Sole.

D'altra parte, la vela solare è esposta a differenti fattori ambientali che causano la degradazione del materiale. I fattori principali dell'ambiente spaziale che portano alla degradazione sono l'ambiente vuoto, le radiazioni UV e le particelle cariche prodotte dal Sole (principalmente elettroni, protoni e particelle α).

L'utilizzo di membrane polimeriche permette di ottenere densità areali idonee ai requisiti di missione, che una vela metallica potrebbe sviluppare diventando estremamente fragile, anche se la soluzione più ovvia è cercare una materiale estremamente sottile e altamente riflettente non affetto dal calore.

La struttura fondamentale della membrana della vela presenta una base su cui aderisce il rivestimento riflettente, dove la base è costituita da strati di polimeri mentre principalmente lo strato riflettente è un materiale metallico con alte caratteristiche riflettenti e alta temperatura di fusione. Il materiale della vela deve reggere carichi di flessione e trazione a cui sono sottoposti costantemente per tutta la durata della vita operativa dello spacecraft. Inoltre, deve permettere l'impacchettamento della vela stessa a terra. Infine, il rivestimento posteriore della membrana deve garantire una buona emissività per dissipare il calore assorbito dalla parte esposta al Sole.

Lo strato di polimero attualmente presenta largo utilizzo del Kapton e del Myvar: il primo è una pellicola poliimmide in grado di rimanere stabile in un range di temperature tra -269C e +400C, mentre il secondo (più comunemente noto come polietilene tereftalato - PET) è una resina termo-

plastica che si decompone alla temperatura di 340C.

Il materiale più utilizzato nella fabbricazione delle membrane delle vele è il Kapton a causa dell'alta resistenza a trazione, stabilità termica, buona resistenza ai raggi UV solari e maneggevolezza. Tuttavia, anche se attraente per le sue proprietà, le membrane disponibili commercialmente sono troppo spesse (circa $7.5\mu\text{m}$) per future applicazioni delle vele solari a cui è richiesto uno spessore di $1\text{-}2\mu\text{m}$.

Tuttavia, si stanno studiando nuovi polimeri in fibre di carbonio per incrementare la temperatura massima di utilizzo e la resistenza ai carichi rispetto ai materiali precedenti.

A tal riguardo, nel 2000 gli Energy Science Laboratories hanno sviluppato un nuovo materiale in fibra di carbonio con spessore duecento volte superiore a quello delle vele solari convenzionali ma talmente poroso da eguagliare il peso del materiale più sottile finora testato. La rigidità e la durata di questo materiale lo rendono significativamente più robusto delle pellicole in plastica progettate per le vele solari. Inoltre, il materiale può dispiegarsi da solo ed è in grado di sopportare temperature molto più alte.

1.3 Trend futuri

Benché le vele solari presentino opportunità attraenti per il futuro delle missioni spaziali, l'utilizzo di questo nuovo sistema propulsivo è costellato da sfide tecnologiche impegnative, tra cui lo sviluppo di strutture dispiegabili, membrane sottili e sistemi di controllo attivi. In aggiunta a queste, ci sono problemi secondari associati all'integrazione dei sistemi: l'occultamento della strumentazione da parte della vela, luce parassita riflessa dalla vela nei percorsi ottici dello strumento, vibrazione dei bracci della vela e cariche elettriche dal plasma del vento solare.

Uno dei nuovi concept che potrebbe essere sviluppato in futuro è l'integrazione di smart materials come fili di Nitinol all'interno dei bracci durante la produzione. Questo permetterebbe al profilo dei bracci di essere alterato attraverso il passaggio di una piccola corrente elettrica attraverso questi attuatori. Deformando i singoli bracci il centro di pressione della vela solare può essere spostato, generando coppie di controllo di assetto. Questo ha importanti vantaggi per la navigazione solare perché non sono necessari attuatori con elevata massa.

Altri concetti implicano l'integrazione di fibre ottiche all'interno dei bracci per misurarne deformazione e deflessione, le funzioni di rilevamento formerebbero un anello chiuso locale con gli attuatori in modo che la vela diventi una struttura intelligente distribuita che può orientarsi autonomamente rispetto al Sole.

Le vele solari offrono un vantaggio significativo per l'esplorazione spaziale ma non sono un generico sistema propulsivo adatto a qualsiasi missione. In particolare, l'utilizzo di una vela solare permette la riduzione del peso della struttura a terra e risparmio in termini di propellente al lancio. Sviluppando la tecnologia delle vele solari, in futuro potrebbe essere il sistema grazie al quale potremmo arrivare ai confini del sistema solare. Future missioni potrebbero prevedere il passaggio della sonda a 0.005 unità astronomiche affinché acceleri fino a 950 unità astronomiche al giorno, accelerazione troppo elevata per qualsiasi struttura e materiali conosciuti. Tuttavia, lanciando un pallone di berillio facendolo arrivare a 0.1 unità astronomiche dal Sole, è possibile accelerare la struttura affinché in 2 anni e mezzo essa arrivi al confine del sistema solare, posizione dove è possibile ora trovare le sonde Voyagers. Inoltre, in 6 anni e mezzo potrebbe essere in un punto particolare a 650 unità astronomiche dove guardando indietro è utilizzare il Sole come lente gravitazionale per altre stelle o sistemi. Dalla piega della luce a causa della lente gravitazionale è possibile ottenere immagini di altri pianeti con una risoluzione tale da osservare continenti sulla superficie di questi

mondi.

In una trentina di anni, continuando a questa velocità, si potrebbe arrivare nella parte interna della nube di Oort, che attualmente è molto lontana rispetto a qualsiasi nostra possibile sonda.

Ultimo programma futuristico è il breakthrough starshot che spera di lanciare grandi vele con sonde grandi come una moneta, possibile grazie alla miniaturizzazione dei sistemi, che verrebbero accelerate da laser presenti sulla Terra che garantiscono alla vela velocità circa 20/30% la velocità della luce in modo da arrivare ad altre stelle.

2. Requisiti e carichi

2.1 Requisiti e obiettivi della missione IKAROS

L'obiettivo generale della missione è stato quello di esplorare la tecnologia di "vela a energia solare" (*Solar Power Sail*) per la futura esplorazione dello spazio profondo, che combina la propulsione fotonica fornita dalla vela solare con la generazione di energia elettrica tramite celle solari flessibili a film sottile attaccate alla membrana della vela.

IKAROS è stata dunque una missione precursore per dimostrare le tecnologie chiave del concetto di vela a energia solare, che sono:

- il dispiegamento di una grande vela nello spazio;
- la generazione di energia elettrica per mezzo di sottili celle solari posizionate sulla membrana, in grado di fornire energia al payload e di alimentare, nel caso di propulsione ibrida, un motore ionico ad alto impulso specifico;
- la dimostrazione della tecnica di propulsione a fotoni, e quindi dell'accelerazione tramite radiazione solare riflessa dalla vela;
- la dimostrazione delle tecniche GNC (*Guidance, Navigation and Control*) a supporto della propulsione a vela solare, che include navigazione, determinazione dell'orbita in condizioni di accelerazione continua ma minuscola, e controllo della direzione di accelerazione per mantenere l'assetto del veicolo spaziale.

La missione comprende anche l'investigazione su aspetti dello spazio interplanetario, come il vento solare e la polvere cosmica.

2.2 Carichi meccanici

Uno tra i carichi principali è la pressione solare, come già discusso in precedenza, generata dall'urto dei fotoni. Questa pressione deflette la membrana della vela in modo rilevante e ciò fa ridurre l'efficienza della vela stessa, perché i punti della superficie della vela non sono esattamente perpendicolari ai raggi del Sole.

Per le vele solari è plausibile che anche carichi di piccola entità deflettano significativamente la membrana, avendo uno spessore ridotto (esse hanno una rigidezza flessionale molto bassa).

Va anche detto che la pressione solare varia a seconda dell'inclinazione dei raggi solari, come mostrato nella seguente tabella, di conseguenza si avrà una deflessione diversa:

Inclinazione	Pressione[Pa]
0 gradi	9.12
15 gradi	8.51
25 gradi	7.49
35 gradi	6.12

Tabella 2.1: Confronto inclinazione-pressione solare

La pressione solare agente sulla vela varia anche con la distanza dal sole; ad esempio la vela solare della missione Ikaros, nell'orbita di Venere era soggetta ad una pressione solare più elevata (quindi era sottoposta ad una maggiore deflessione), per il fatto che in quell'orbita la radiazione luminosa è più intensa, e si hanno più fotoni che urtano la superficie della vela. Viene riportato un grafico a destra che mostra la variazione della pressione solare in funzione della distanza dalla sorgente luminosa.

Da notare che in prossimità di Venere, la pressione solare è quasi doppia rispetto a quella della Terra, e nell'orbita di Mercurio è notevolmente più alta, pertanto tale legge è non lineare, e tende assumere un comportamento asintotico all'azzerarsi della distanza.

Si tenga anche presente che i valori di tale grafico sono riferiti ad una pressione solare massima, ovvero con raggi che incidono perpendicolarmente alla superficie della vela.

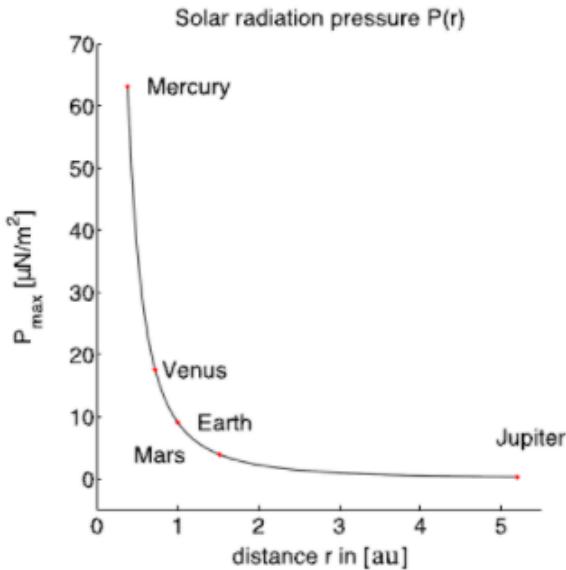


Figura 2.1: Pressione della radiazione solare

Si tenga anche presente che i valori di tale grafico sono riferiti ad una pressione solare massima, ovvero con raggi che incidono perpendicolarmente alla superficie della vela.

Per diminuire questo effetto di deflessione della vela in modo da rendere più efficace l'urto tra fotoni e vela si pretensiona la vela la membrana, ma ciò induce un effetto indesiderato che anch'esso contribuisce a diminuire l'efficienza della vela: le grinze. In letteratura viene consigliato di pretenzionare la vela nella parte centrale ad una tensione di 7KPa nella zona centrale, ottenendo così un buon compromesso tra deflessione della vela e grinze.

Un altro modo per attenuare il fenomeno delle grinze è usare le membrane con scallop, ovvero membrane sagomate che hanno un lato periferico curvo invece di retto. Questa modifica alla geometria

triangolare della membrana viene generalmente misurata attraverso il fattore di scallop, definito come la percentuale della membrana che rimane della vela dopo averla sagomata. L'inserimento di uno scallop è stato proposto anche per favorire il completo dispiegamento delle membrane. Qui di sotto vengono riportate delle immagini di quadranti rappresentate in abaqus con certi fattori di scallop.

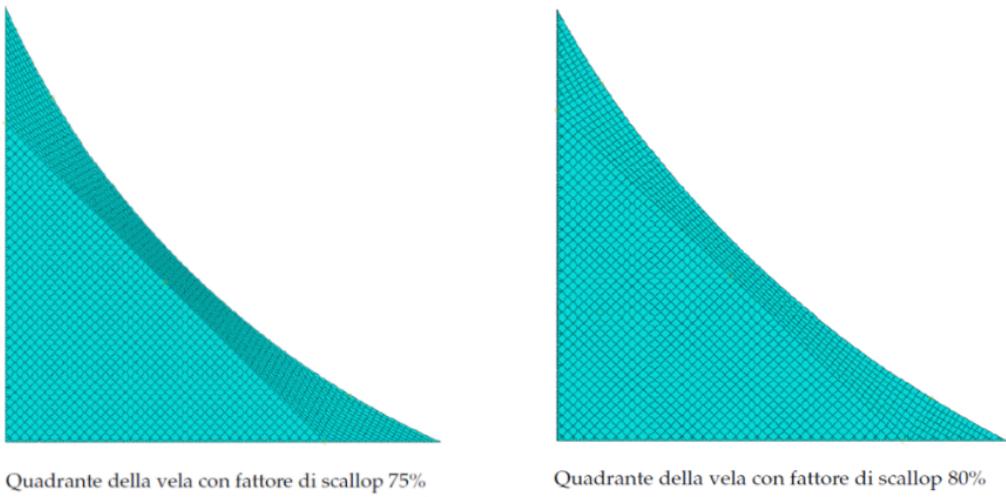
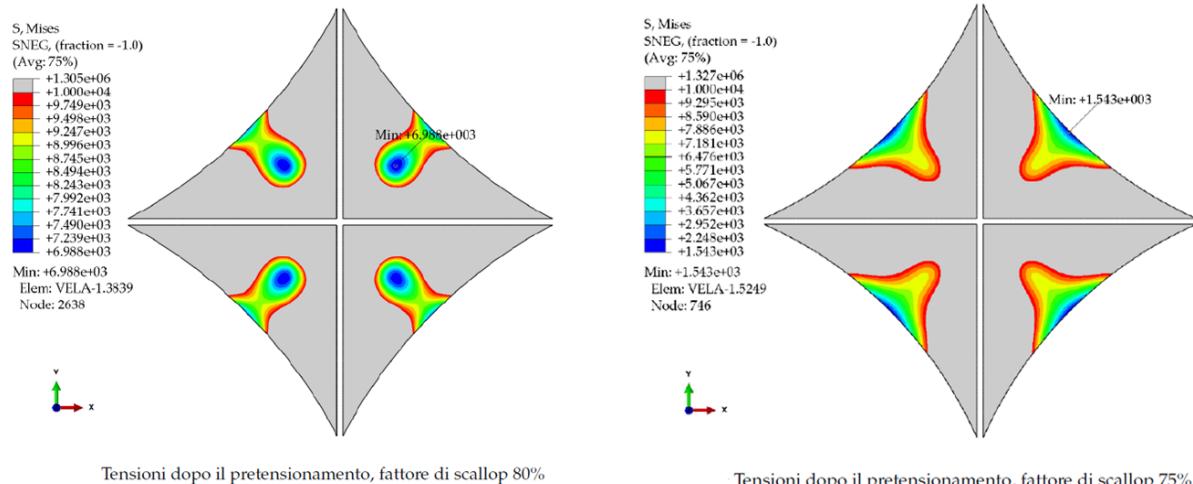
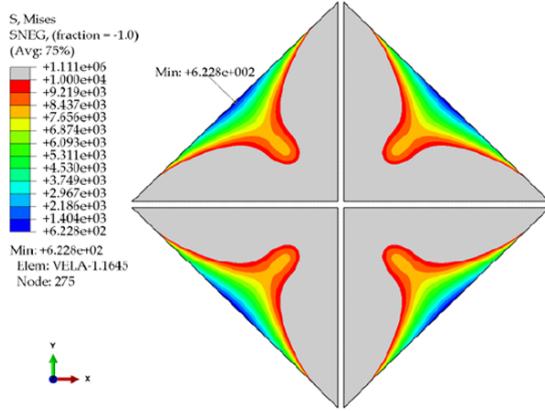


Figura 2.2: Confronto fattori di scallop

Vengono inoltre mostrate immagini relative allo stato tensionale di vele pretensionate con fattore di scallop all'80%, 75% e senza scallop (derivati da un'analisi FEM con abaqus di una vela 20x20).

Si nota osservando le immagini sottostanti che il campo di tensioni è differente nelle quattro configurazioni; in particolare si vede che nella configurazione con scallop al 75% e senza hanno un valor minimo di tensione ai bordi dei quadranti, mentre quella senza il minimo si trova all'interno del quadrante. Assieme alle immagini c'è anche una tabella con valori di tensioni al bordo.





Tensioni dopo il pretensionamento nella membrana senza scallop

Figura 2.3: Confronto fattori di scallop pretensionati

Configurazione	Tensione al bordo [kPa]
Scallop 75%	1.5
Scallop 80%	7
Senza scallop	0.6

Tabella 2.2: Tensione a bordo vela

Altro carico che sarebbe presente, ma di piccolissima entità rispetto a quello della radiazione luminosa, è quello del vento solare, ovvero quello dovuto all'urto delle particelle cariche che arrivano dal Sole che risulta essere 5000 volte inferiore a quest'ultima nell'orbita terrestre.

Oltre a questi carichi meccanici troviamo i carichi inerziali, o meglio quei carichi applicati per bilanciare una struttura non vincolata soggetta a forze esterne. Questi sono dovuti alle accelerazioni delle varie masse del veicolo, principalmente quelle del corpo principale dove ci sono gli elementi scientifici del payload, i quattro thruster con i serbatoi di propellente e i dispositivi per il dispiegamento. IKAROS ha payload extra sia scientifici che ingegneristici. Come payload scientifici, IKAROS ha un rilevatore di burst di raggi gamma e un rilevatore di polvere per valutare la distribuzione della polvere nel pianeta. Come missione di ingegneria, IKAROS ha un'apparecchiatura per il generatore di segnali acustici da testare.

- GAP (polarimetro a raffica di raggi gamma) per osservare la polarizzazione del lampo gamma (GRB) e determinare la direzione di GRB;
- ALADDIN (rivelatori di polvere ad ampia area disposti per crociere interplanetarie) per valutare la distribuzione della polvere nella regione dei pianeti interni mediante PVDF (Poly Vinylidene Di-Fluoride);
- missione VLBI per dimostrazione della tecnologia di determinazione dell'orbita DDOR (*Delta Differential Oneway Range*).

Essendoci i 4 thruster allocati sul corpo principale, e da come sono orientati, proiettano il getto sulla superficie della vela andando a determinare dei carichi meccanici e termici, inoltre questi danno forze di reazione che vengono scambiate tramite l'unione del corpo centrale-vela.

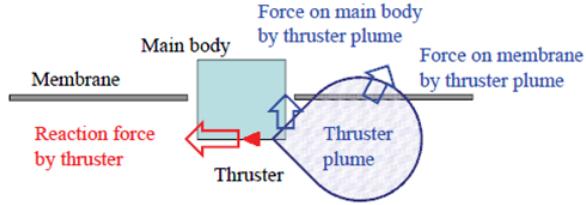


Figura 2.4: Forza sul corpo principale e vela sviluppata da un thruster plume

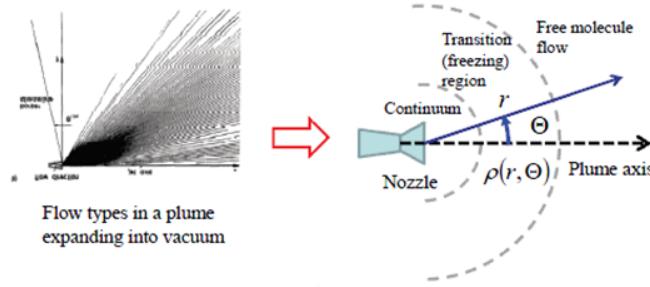


Figura 2.5: Plume flow model e source flow method

In queste immagini vengono mostrati dei modi di modellizzare il getto dei thruster, come il modello a flusso e il modello a incidenza. Si tenga presente che il flusso ha una componente parallela alla vela ed una incidente.

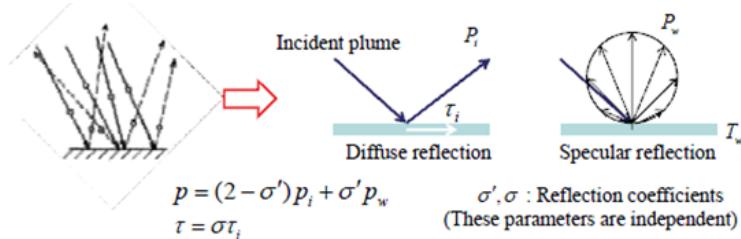


Figura 2.6: Plume impingement model e free molecule flow

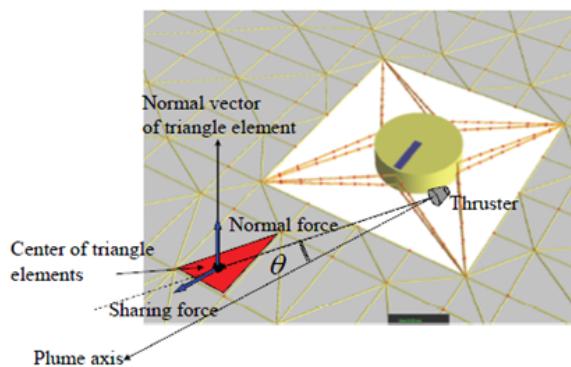


Figura 2.7: Integrazione della forza di un thruster plume in un modello multi-particella

La vela solare inoltre è soggetta anche a modi vibratori che possono essere causati da manovre o che sono presenti dopo il dispiegamento. Inoltre durante il dispiegamento, essendo la vela in esame una vela che spinnante che sfrutta la forza centrifuga per dispiegarsi, e quindi la vela è soggetta ad un carico di trazione insieme ai cavi diagonali con le massette sferiche. Tali modi vibratori possono essere nel piano o fuori dal piano; in particolare ci sono 3 modi fuori dal piano, ed uno è causato dal moto di nutazione della vela essendo uguale alla velocità di spin, gli altri due sono causati dal moto della vela.

2.3 Carichi termici

La vela solare essendo colpita da fotoni solari, è quindi investita da un flusso di calore, ma essendo la vela in uno stato deformato, in diversi punti della superficie si avrà un'incidenza dei raggi solari diversa e quindi anche ad una temperatura diversa, ovvero c'è un gradiente di temperatura che va a causare degli stress meccanici. Le deformazioni di questi stress meccanici non sono però simmetrici (diversamente da come accade per il solo carico di pressione) e ciò fa sì che si generino coppie di disturbo dovute al fatto che si sposta il centro di pressione della vela. Di seguito vengono mostrati dei profili di temperatura con diversa temperatura e fattore di scallop.

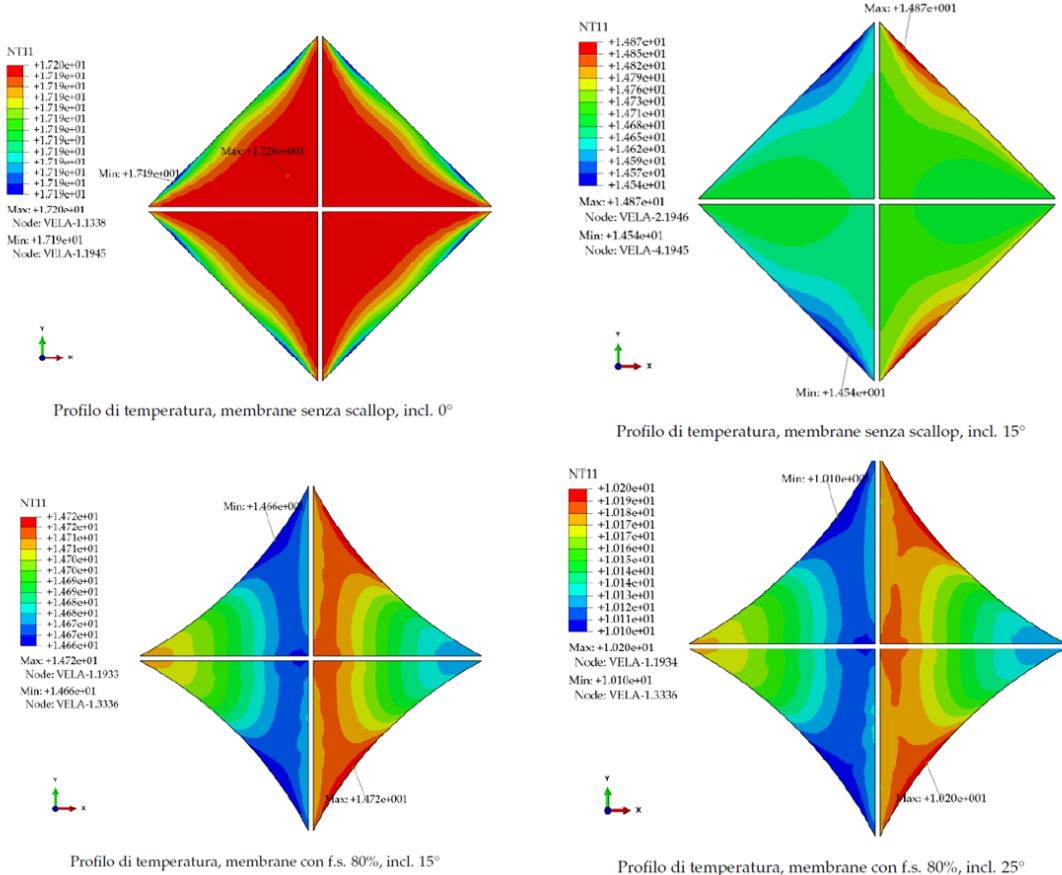


Figura 2.8: Confronto profili di temperatura

3. Strutture e meccanismi principali

3.1 Specifiche del velivolo

La sonda ha una massa di 307 kg ed è dotata di una vela solare rettangolare 14 m x 14 m, che pesa 16 kg con uno spessore minimo di 7,5m. L'assetto del veicolo è stabilizzato passivamente tramite spin. Inoltre la forza centrifuga correlata alla rotazione del veicolo spaziale è utilizzata per dispiegare e mantenere estesa la vela, permettendo di realizzare un meccanismo di supporto della stessa molto leggero e semplice, privo di membri rigidi. Le caratteristiche di *IKAROS* sono riassunte nel seguito.

Structure	S/C body: $\varphi 1.6 \times h 0.8$ m cylindrical Solar sail: 14 m x 14 m rectangular
Mass	Wet: 307 kg Dry: 287 kg Solar sail: 16 kg
Attitude	Spin stabilized <ul style="list-style-type: none">• Sun sensor• Earth angle measurement (by spin modulation on downlink RF)• 3 axis Gyro• Nutation dumper• Gas-liquid phase-equilibrium thruster (fuel: HFC-134A) 0.4N x 8 heads
Power	Body mount SAP 300 W
Comm.	X-band TT & C
Orbit determination	R & RR VLBI (experimental)
Solar sail support system	Deployment mechanism Solar sail-mount sensors <ul style="list-style-type: none">• Flexible solar array (FSA)• Reflectance control device (RCD)• Dust particle detector (ALDN)• Surface charge sensor• Temperature sensor• Tip acceleration sensor
Other payloads	Solar sail mission <ul style="list-style-type: none">• Onboard camera x 4• Deployable camera (DCAM) x 2 Optional mission <ul style="list-style-type: none">• X-band VLBI transmitter• GAMMA-ray burst polarimeter (GAP)

Figura 3.1: Specifiche di IKAROS

3.2 Configurazione e materiali

La vela è composta da quattro petali trapezoidali (Figura 3.2), collegati tra di loro da un 'ponte', formando la vela rettangolare. La vela e il corpo centrale sono collegati da 8 cavi (tether lines) e 4 imbracature flessibili (*harnesses*). Le masse di punta (*tip masses*) sono attaccate ai quattro angoli della vela (0,5 kg ciascuna, 2,0 kg in totale), che devono sostenere il dispiegamento e l'estensione della vela con la forza centrifuga. Un accelerometro è equipaggiato in una delle masse di punta per misurare la forza centrifuga durante e dopo il dispiegamento. In termini di materiali, la vela è fatta

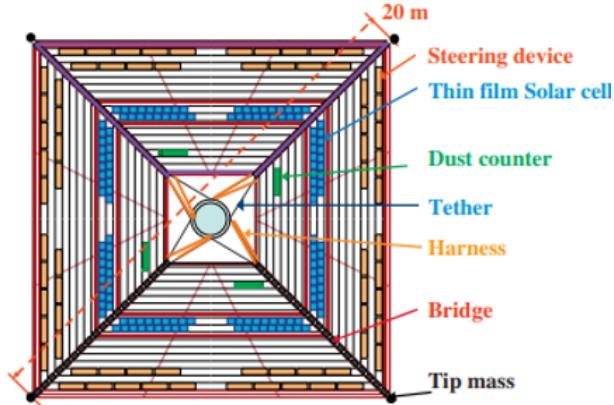


Figura 3.2: IKAROS Solar Sail

di due diversi tipi di poliammide, noti commercialmente come APICAL-AH e ISAS-TPH. Quest'ultima è una pellicola di recente sviluppo, con adesività termica e tollerante l'ambiente spaziale. Entrambe le pellicole hanno uno spessore di 7,5 mm (Fig.3.3).

	Polyimide1	Polyimide2
Material	APICAL-AH 7.5 PMDA/4,4'-ODA(株式会社アリカ製)	ISAS-TPI熱可塑性ポリイミド a-ODPA/4,4'-ODA(ISAS開発)
Chemical formula		
Elasticity	3.8 GPa	3.2 GPa
Breaking strength	263 MPa	132 MPa
Breaking elongation	74%	90%
Thickness [μm]	7.5–8.5	7.5–8.5
Area	154.28(m ²) (膜面の88.9%)	19.35(m ²) (膜面の11.1%)
Weight	1.643 kg	0.206 kg
Al deposition	80 nm	80 nm<

Figura 3.3: Materiali della membrana

La vela solare è dotata di diversi dispositivi, tra i quali:

- il *Flexible Solar Array* (FSA), un collettore di energia per la luce solare;
- il *Reflectivity Control Device* (RCD), un pannello stratificato flessibile in cui sono incapsulati i cristalli liquidi. Applicando una tensione elettrica, esso può cambiare la sua riflettanza ottica

(ON: riflessione speculare, OFF: riflessione diffusa), e sincronizzando l'RCD con la fase di rotazione, il veicolo spaziale può cambiare la direzione del suo asse di rotazione usando la pressione della radiazione solare (SRP) senza consumare combustibile;

- L'*Arrayed Large-area Dust detector for Interplanetary space* (ALDN) è un sensore composto da un film di polivinilidenfluoruro (PVDF) in grado rilevare le particelle di polvere spaziale che impattano sulla vela.

Le celle solari a film sottile sono composte dalla sovrapposizione di quattro strati come mostrato nella figura. Dall'alto verso il basso si ha: un film protettivo, una cella solare a film sottile, una cella solare a film sottile anti-deformazione e la vela solare, tutte incollate tramite una colla siliconica. Il film protettivo è una poliimmide ISAS trasparente di 7.5 m progettato per proteggere le celle solari a film sottile, le quali sono composte da uno strato di poliimmide e uno di a-SI.

La differente espansione termica nei materiali può causare una deformazione della struttura, per questo vengono attaccate due celle solari a facce opposte.

La vela di poliimmide, inoltre, permette di avere una adeguata dissipazione termica e prevenire anche un'eventuale rottura dovuta alle elevate temperature.

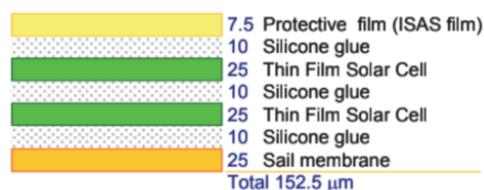


Figura 3.4: Struttura multistrato di una cella solare a film sottile

3.3 Meccanismo di dispiegamento della vela

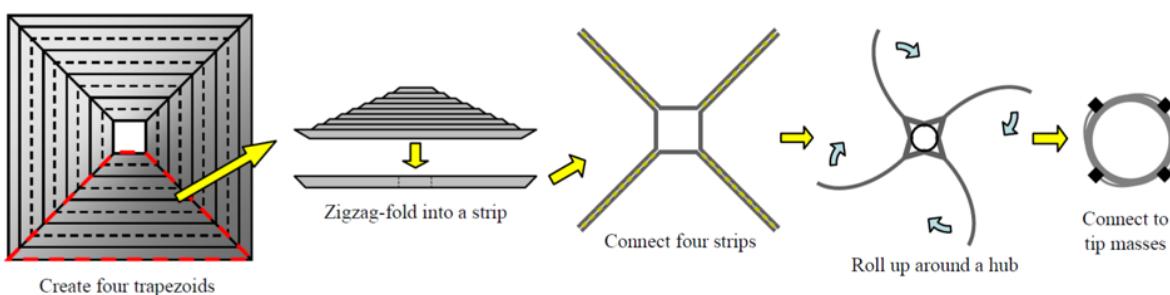


Figura 3.5: Impacchettamento della vela solare

Il metodo con cui la vela viene “impacchettata” è mostrato nella figura 3.5.

I quattro petali vengono piegati a zig-zag creando lunghe strisce che vengono collegate in modo da formare una specie di croce. Il centro della membrana viene collegato alla navicella mediante dei cavi e le strisce arrotolate attorno alla bobina cilindrica, ancorando le loro estremità alle quattro masse di punta.

La Figura 3.6 mostra la sequenza di spiegamento della vela solare, divisa in due fasi. La prima fase, che inizia con una lenta rotazione e il distaccamento delle quattro masse, consiste nell'estendere la vela in una "forma a croce". La velocità di estensione in questa fase è controllata da quattro rulli guida che si muovono lungo la superficie della vela. Così l'estensione avviene in modo completamente quasi statico, indipendentemente dalla flessibilità della vela. La seconda fase di dispiegamento consiste nell'estendere la vela fino alla forma rettangolare finale, e viene eseguita sbloccando i quattro rulli guida. Con questa azione, la vela viene estesa dinamicamente in pochi secondi dalla forza centrifuga. La velocità di rotazione prima di iniziare la prima fase è di 25 rpm, e la velocità di rotazione finale dopo la completa estensione è di 2,5 rpm.

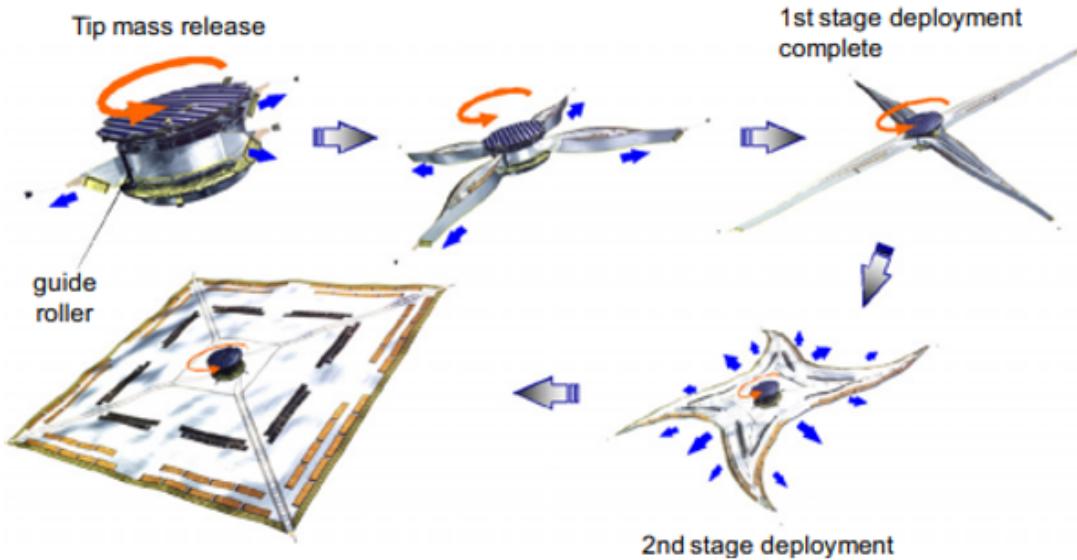


Figura 3.6: Sequenza di dispiegamento della vela

3.4 Risultati degli esperimenti di dispiegamento di IKAROS

La figura 3.7 mostra la configurazione di IKAROS prima del lancio. Lo spessore della membrana della vela arrotolata si adatta quasi alla larghezza della bobina. I quattro rulli guida mantengono la superficie della membrana in compressione per evitarne il cedimento causato dalle vibrazioni durante il lancio e le quattro masse di punta sono fissate alla navicella tramite un meccanismo che ne consente il successivo distaccamento.

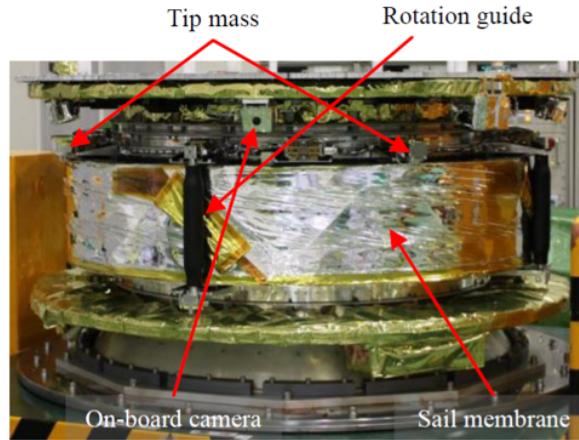


Figura 3.7: Configuazione di IKAROS prima del lancio

3.5 Determinazione e controllo dell'assetto

L'assetto di IKAROS è determinato dall'angolo del Sole e dall'angolo della Terra. Il controllo dell'assetto è eseguito principalmente tramite RCS (Reaction Control System). IKAROS è infatti dotato di 8 propulsori radiali a equilibrio di fase gas-liquido di nuova concezione, per la rotazione su/giù e il riorientamento dell'asse di rotazione (nessun propulsore assiale disponibile).

Il combustibile è immagazzinato nel serbatoio allo stato liquido, e viene emesso allo stato gassoso, prendendo vantaggio dalla pressione di vapore, come mostrato in Figura 3.8. HFC-134a è selezionato

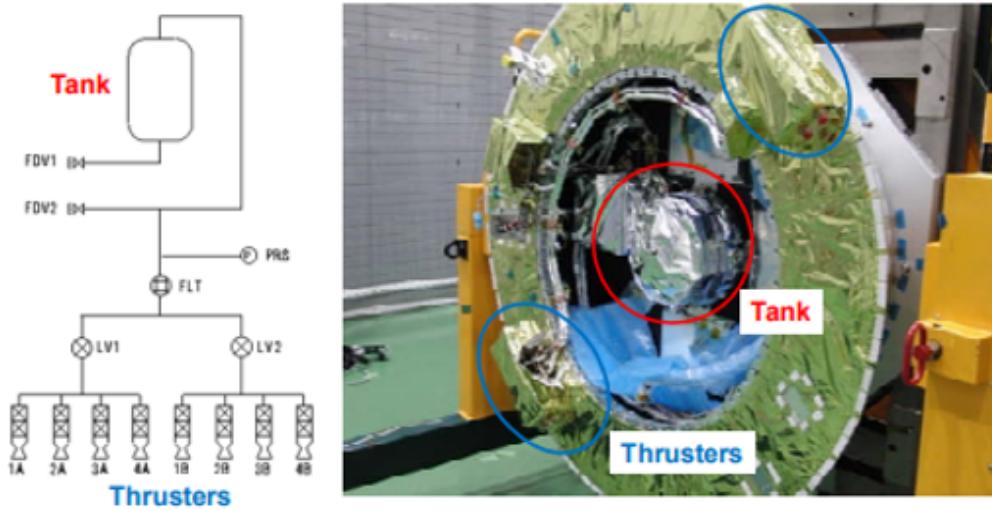


Figura 3.8: Reaction Control System

come combustibile, perché è non infiammabile e non velenoso.

Il livello di spinta è 0,4N e l'impulso specifico è 40s, ed entrambi dipendono dalla temperatura.

Il peso totale del combustibile è 20kg e l'impulso totale è 7000Ns.

Il serbatoio è riempito con schiuma metallica:

- per conservare il combustibile liquido nel serbatoio;
- per impedire al carburante di sbandare nel serbatoio;
- per aumentare la conduttività termica nel serbatoio.

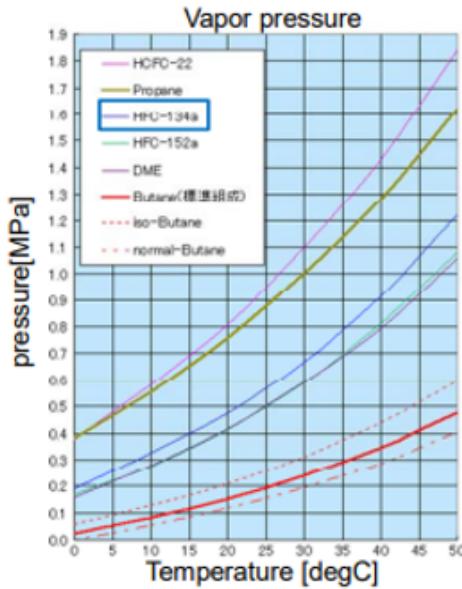


Figura 3.9: Pressione di vapore

L'RCD (*Reflectivity Control Device*) è un nuovo concetto adottato in IKAROS che fornisce un modo alternativo per cambiare l'orientamento dell'asse di rotazione.

72 fogli di RCD sono in grado di cambiare l'orientamento dell'asse di spin di 1 grado ad 1 AU con una velocità di rotazione di 1 rpm.

L'RCD è usato ampiamente per le manovre d'assetto al posto dell'RCS per risparmiare più carburante possibile.

4. Analisi statica in Patran Nastran

In questo capitolo si andrà a presentare l'analisi statica della vela dispiegata soggetta solo alla forza centrifuga generata dal moto di spin della vela stessa.

La realizzazione del modello e l'analisi sono state entrambe condotte in ambiente Patran-Nastran.

4.1 Geometry

La vela presenta le seguenti caratteristiche geometriche e meccaniche, alcune già presentate nei capitoli precedenti (fig.4.1). Attraverso la conoscenza di questi dati si va quindi a realizzare il

Geometria	Quadrata
Geometria foro interno	Quadrata
Lato Esterno [mm]	13560
Lato foro [mm]	3200
Spessore [μm]	7.5
Massa [kg]	~1.6
Area [m^2]	154
Materiale	Poliammide APICAL-AH 7.5
Modulo di Young [GPa]	3.8
Modulo di Poisson	0.33
Sigma di rottura [MPa]	263
Allungamento a rottura [%]	74

Figura 4.1: Parametri geometrici e meccanici della vela

modello geometrico della vela in Patran.

4.2 Meshing

Il passo successivo consiste nella realizzazione della mesh del modello.

Il fatto che sia presente un foro quadrato all'interno introduce delle forti discontinuità geometriche, le quali rendono la mesh difficilmente discretizzabile in elementi uguali.

Per questo motivo, considerando anche l'assenza di limitazioni stringenti in merito alle dimensioni dei singoli elementi, si è scelto di utilizzare il Mesher presente in Patran denominato come **Paver**. Il risultato ottenuto è mostrato in figura 4.3.

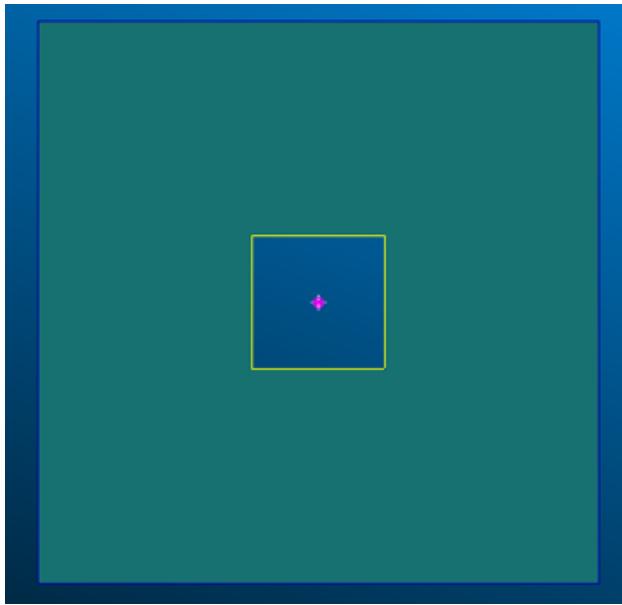


Figura 4.2: Modello geometrico della vela

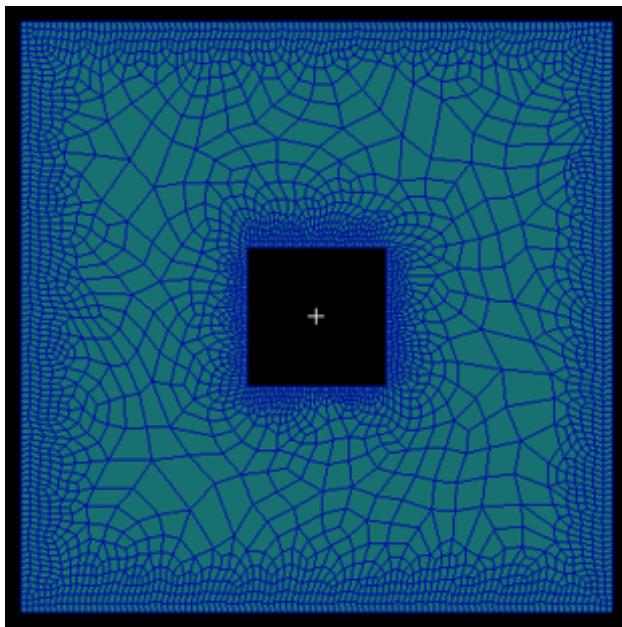


Figura 4.3: Creazione della mesh

4.3 Vincoli e Forze

Nella realtà la vela non è vincolata tuttavia, al fine di ottenere dei risultati dall'analisi statica, è necessario vincolarla in qualche modo.

La scelta migliore si è rivelata quella di vincolarla imponendo un incastro in corrispondenza dei nodi all'interfaccia tra vela e foro.

Per quanto riguarda le forze è stato creato un campo che simulasse la forza centrifuga effettivamente applicata ad ogni elementino della vela.

Il campo è stato creato imponendo una velocità di rotazione all'asse perpendicolare alla vela e

passante per il centro del foro. Sono stati analizzati i casi relativi a tre diverse velocità di rotazione, antiorarie e rispettivamente pari ad 1 RPM e 2 RPM e 5 RPM. In figura 4.4 è mostrato uno zoom sulla zona intorno al foro e sono messi in evidenza l'asse di rotazione del campo (in viola) e gli incastri (in azzurro).

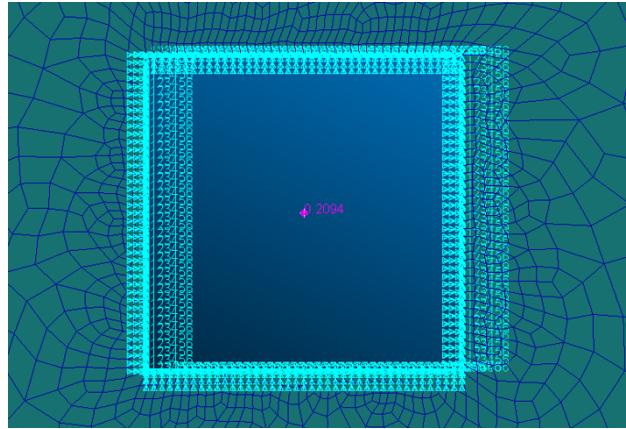


Figura 4.4: Dettagli di Incastro e asse di rotazione

4.4 Analisi e Risultati

Come detto inizialmente l'analisi è di tipo lineare statica(sol. 101). I risultati ottenuti in termini di spostamento sono mostrati di seguito:

- Velocità di Rotazione antioraria: 1 RPM(fig. 4.5)

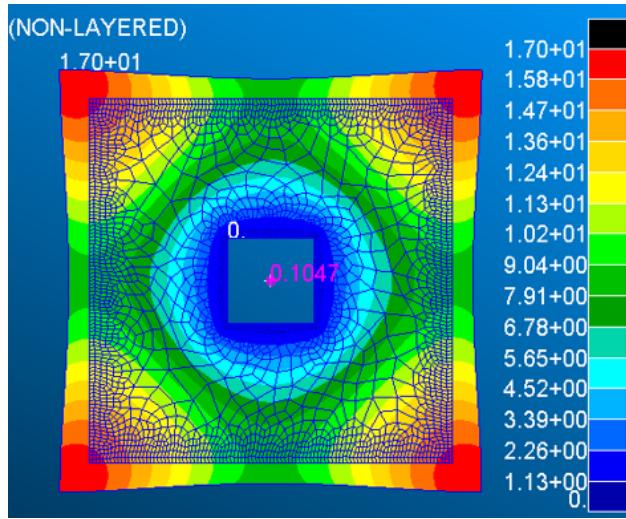


Figura 4.5: Spostamenti nel caso di Analisi statica con velocità di rotazione pari a 1 RPM

- Velocità di Rotazione antioraria pari a 2 RPM(fig. 4.6)
- Velocità di Rotazione antioraria pari a 5 RPM(fig.4.7)

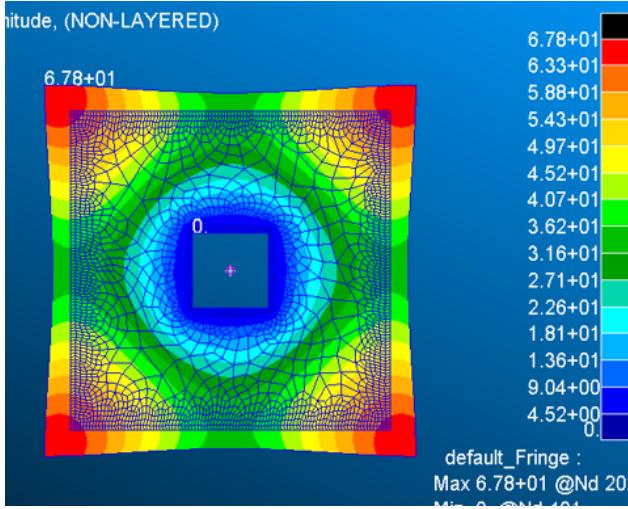


Figura 4.6: Spostamenti nel caso di Analisi statica con Velocità di spin della vela pari ad 2 RPM

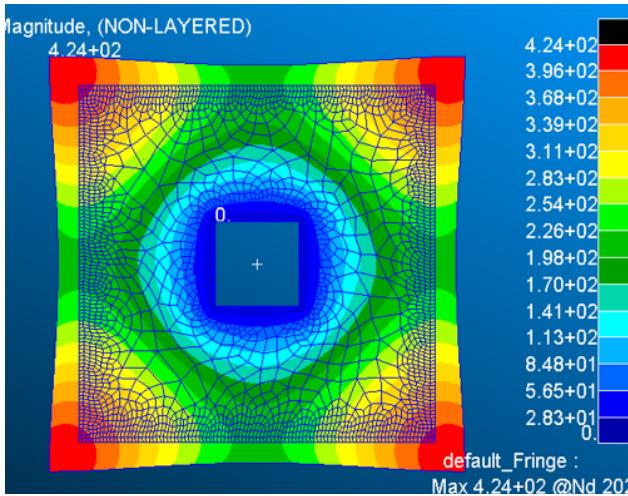


Figura 4.7: Spostamenti nel caso di analisi statica con Velocità di spin della vela pari a 5 RPM

Si riportano poi i risultati ottenuti in termini di Stress Tensor, componenti XY.

- Velocità di Rotazione antioraria pari ad 1 RPM(fig.4.8)
- Velocità di Rotazione antioraria pari ad 2 RPM(fig.4.9)
- Velocità di Rotazione antioraria pari ad 5 RPM(fig.4.10)

4.5 Considerazioni e commenti finali

Gli spostamenti appaiono qualitativamente in linea con quanto ci si aspetterebbe cioè sono tanto più grandi quanto più è grande la distanza dall'asse di rotazione. Gli elementi in corrispondenza delle estremità delle diagonali sono quindi quelli caratterizzati da spostamenti maggiori.

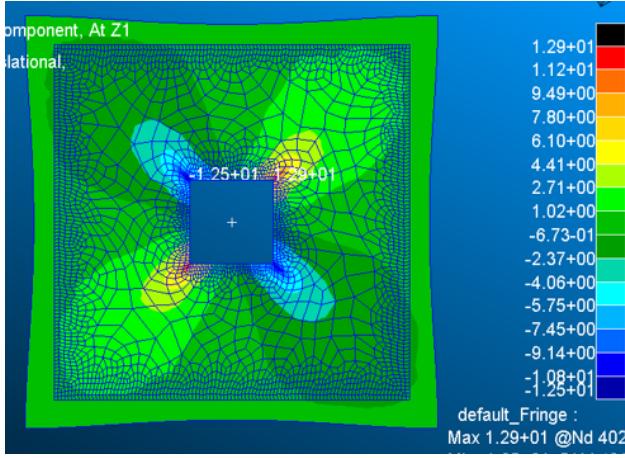


Figura 4.8: Componenti xy dello stress tensor nel caso di velocità di rotazione pari ad 1 RPM

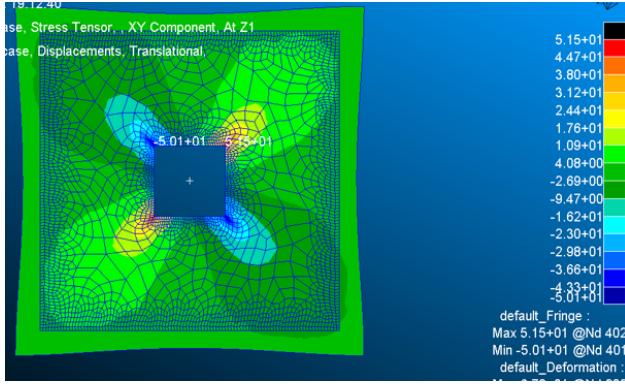


Figura 4.9: Componenti xy dello stress tensor nel caso di velocità di rotazione pari ad 2 RPM

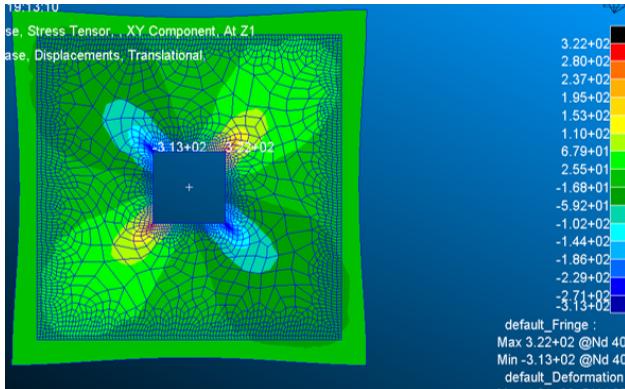


Figura 4.10: Componenti xy dello stress tensor nel caso di velocità di rotazione pari ad 5 RPM

L'entità degli spostamenti cresce con il quadrato della forza applicata e quindi della velocità di rotazione. Infatti, lo spostamento massimo in corrispondenza della velocità di 2 RPM è pari a 4 volte lo spostamento in relativo alla velocità di 1 RPM e di conseguenza lo spostamento massimo relativo alla velocità di 5 RPM è ben 25 volte più grande di quello relativo ad 1 RPM.

I valori degli spostamenti massimi sono seguenti:

- Caso 1 RPM: 17 mm;

- Caso 2 RPM: 67 mm;
- Caso 5 RPM: 424 mm.

Si può dedurre quindi che le velocità di rotazioni ammissibili per vele solari caratterizzati da spessori molto piccoli come quello della vela in esame, siano pari a poche unità di Ripetizioni per minuto anche se comunque l'allungamento a rottura del materiale con cui è realizzata la vela risulta essere piuttosto elevato.

La stessa relazione quadratica è mantenuta tra la velocità di rotazione e le tensioni in XY le quali, quest'ultime, crescono appunto con il quadrato della velocità. Risulta importante notare però, come possano essere considerati affidabili solo i risultati in termini di tensioni relativi a punti lontani dall'incastro il quale nella realtà non c'è e quindi nella zona limitrofa non si generano le tensioni che sono venute fuori dalla simulazione.

Noto che:

- La tensione di rottura è nota e pari a 263 Mpa;
- La tensione di snervamento non è fornita ma si può in prima battuta ipotizzare pari alla tensione in corrispondenza dello 0.2 % di deformazione e quindi pari a 7.6 Mpa;
- Le tensioni massime sono rispettivamente pari a 12.9 Mpa, 51.5 Mpa e 322 Mpa nei 3 casi.

Ipotizzando che un tale incastro sia effettivamente presente si possono fare le seguenti considerazioni:

- In tutti e 3 i casi in presenza di quell'incastro ed in assenza di rinforzi alcune zone della vela sono soggette a snervamento;
- In corrispondenza di una velocità di rotazione pari a 5 RPM la vela va incontro a rottura in corrispondenza degli spigoli del foro incastrati.

Si osserva inoltre dai risultati della simulazione che una coppia di spigoli sia soggetta a trazione mentre l'altra a compressione.

Alla luce del fatto che il risultato non cambia al variare del verso della velocità di rotazione, si ipotizza che la determinazione di quale coppia di spigoli sia soggetta a trazione dipenda, nel caso simulativo, da come sia realizzata la mesh (come nel caso in esame) o dalla presenza di "forze di disturbo" (non presenti in questo caso) aggiunte volontariamente per scegliere quale delle due diagonali sia tesa.

Nel caso reale invece, la presenza di imperfezioni nella vela o di forze esterne può determinare uno sbilanciamento nello stato di sollecitazione ed influenzare quindi quale sia la coppia di spigoli tesi e quale sia quella di spigoli compresi.