

ANALISI MECCANICHE

5.1 Introduzione

Questo capitolo contiene la descrizione del modello agli elementi finiti (**FEM**) usato per l'analisi strutturale delle due configurazioni dell'EPSA.

Vengono anche descritti i risultati ottenuti e mostrato come questi siano in accordo con quanto stabilito dai requisiti posti dal CNES.

Scopo delle analisi FEM è quello di dare una descrizione matematica del comportamento meccanico della struttura reale in oggetto.

Qui si può solo dire che il metodo degli elementi finiti consiste in un procedimento di discretizzazione di un mezzo continuo (intendendo uno o più corpi solidi collegati tra loro o campi continui) e nella soluzione delle relazioni matematiche che descrivono le proprietà fisiche delle varie parti e le loro reciproche interazioni, con tecniche di calcolo numerico.

Il modello matematico è quindi l'insieme delle equazioni relative alla geometria, ai materiali, alle proprietà fisiche e alle condizioni al contorno tipiche del sistema in studio, schematizzato secondo il metodo degli elementi finiti.

L'obiettivo è quello di arrivare a scrivere le relazioni costitutive che legano gli sforzi agli spostamenti per un numero sufficientemente alto di punti significativi della struttura detti **nodi**; gli spostamenti nodali intesi sia come traslazioni che come rotazioni dei nodi, sono le incognite del problema.

Gli sforzi vengono calcolati dopo aver derivato gli spostamenti.

L'insieme di più nodi e delle relazioni che intercorrono tra essi costituisce l'**elemento finito**, che può essere considerato come l'unità base di scomposizione del corpo ¹.

¹ Nel caso di un'asta o di una molla i nodi sono le due estremità; l'elemento asta sarà quindi descritto da due nodi e un certo numero di equazioni costitutive (lineari o no) dipendenti dal numero di gradi di libertà considerati.

Esistono vari tipi di elementi finiti che variano per configurazione spaziale (1D, 2D, 3D), numero di nodi, tipi di sollecitazioni che possono trasmettere, relazioni matematiche che le descrivono (rigidezza, linearità,...).

La scelta del tipo e del numero di elementi è uno degli aspetti fondamentali dell'analisi FEM, da essa dipende la bontà dell'approssimazione; aumentando la densità degli elementi si migliora la precisione ma aumenta anche il tempo di calcolo necessario per ottenere il risultato.

Tra queste necessità divergenti deve costantemente mediare il progettista.

L'uso delle tecniche di analisi FEM, originariamente sviluppate per il calcolo strutturale, e del software specifico che le implementa, permette oggi la soluzione di problemi strutturali, di trasmissione del calore, fluidodinamici, magnetici o una combinazione di essi, altrimenti non risolvibili per via manuale o analitica.

Nella terminologia tipica dei programmi di calcolo FEM si parla di **modellazione** (e di **modello**) per intendere il processo di generazione dei nodi e degli elementi che rappresentano il volume spaziale e la connettività del corpo reale.

Più in generale *questo* modello comprende tutti i nodi, gli elementi, le proprietà del materiale, le condizioni al contorno e altre caratteristiche del problema specifico usate per descrivere il sistema reale.

Va inoltre fatta distinzione tra la rappresentazione grafica degli elementi e dei nodi del modello, detta **mesh**, e quella della geometria (volumi, superfici); i punti di quest'ultima non corrispondono necessariamente con quelli della mesh.

I software professionali, in genere, permettono di ottenere il modello derivandolo dalla geometria (**modellazione solida**), che può essere il risultato di una progettazione CAD, o direttamente tramite la disposizione dei nodi nei punti critici e la definizione manuale delle loro connessioni² (**modellazione diretta**).

Per la generazione della mesh degli EPSA si è usato il programma "Ansys 6.1" mentre le analisi vere e proprie sono state effettuate come da specifica con "MSC Nastran".

² La legge di variazione delle caratteristiche di sollecitazione all'interno di un corpo sollecitato non è nota a priori.

Nell'analisi FEM viene approssimata con funzioni lineari, polinomiali ma anche esponenziali e trigonometriche, che interpolano i nodi nei quali è stata discretizzata la struttura.

Dal teorema di Weierstrass discende che maggiore è il grado del polinomio approssimante minore sarà l'errore, come pure nel caso di aumento del numero dei nodi.

È evidente che in entrambi i casi si complicano i problemi di calcolo con conseguente aumento dei tempi di elaborazione.

Le **connessioni** tra i nodi sono le funzioni approssimanti che definiscono l'elemento.

5.2 Specifiche della modellazione meccanica

Nell'ambito del progetto Microscope è prevista la realizzazione di un unico modello matematico di tutto il satellite in modo da poterne studiare il comportamento meccanico globale.

In vista di questo obiettivo tutti i modelli numerici dei vari sotto-componenti dovranno essere compatibili con la versione 70.5 di Nastran e rispettare una serie di convenzioni, poste sia per facilitare l'analisi dei risultati che per permettere l'integrazione finale.

5.2.1 Unità di misura

Le unità di misura adottate sono quelle del sistema internazionale (SI) e quelle da esse derivate:

unità di massa	Chilogrammi (Kg)
unità di lunghezza	metri (m)
unità di tempo	Secondi (s)
unità di temperatura	Kelvin (K)
unità di forza	Newton (N)
unità di pressione	Pascal (Pa)
unità della frequenza	Hertz (Hz)

Tabella 5.1–Unità di misura

5.2.2 Esigenze di numerazione

Al fine di garantire la completa compatibilità di tutti i modelli, la numerazione³ di:

- Nodi,
- Elementi,
- Sistemi di coordinate di riferimento,
- Materiali,
- Proprietà degli elementi,
- Masse concentrate,

³ In realtà la numerazione si applica a quelle che in Nastran sono dette Card; si tratta delle proprietà specificate per gli elementi, i nodi etc.

dovrà essere unica e contenuta nei campi di numerazione previsti (si riporta la parte di tabella che specifica l'intervallo di numeri ammesso per gli EPSA).

Nom de l'Équipement	Code de l'équipement	Numéro du repère principal	Plage valable pour la numérotation des cartes	
			ID min	ID max
EPSA 1 (-Xs +Ys)	EPS1	2 700 001	2 700 001	2 749 999
EPSA 2 (+Xs -Ys)	EPS2	2 750 001	2 750 001	2 799 999
EPSA 3 (-Xs -Ys)	EPS3	2 800 001	2 800 001	2 849 999
EPSA 4 (+Xs +Ys)	EPS4	2 850 001	2 850 001	2 899 999

Tabella 5.2- Intervalli di numerazione

Poiché l'intervallo è composto da 49998 numeri, ne deriva un limite massimo al numero degli elementi utilizzabili per la costruzione del modello.

5.2.3 Sistemi di riferimento

Ciascun sottosistema dovrà essere definito rispetto al proprio sistema di riferimento principale; eventuali sistemi di riferimento locali saranno definiti in rapporto ad esso.

Il sistema principale utilizzato nella costruzione del modello è quello [X,Y,Z]_{epsa} definito nel paragrafo 3.2.

5.2.4 Lista dei parametri N astran utilizzabili

Potranno essere impiegati solo alcuni tipi di proprietà (Card, vedi nota 3) per gli elementi Nastran, tra quelli disponibili nelle librerie.

Nodi	GRID, SPOIN
Elementi 1D	CBAR, CROD, CBEAM
Elementi 2D	CTRIA3, CQUAD4
Elementi 3D	CHEXA, CPENTA, CTETRA10
Masse concentrate	CONM2, MASS2
Elementi rigidi	RBE2, RBE3, RBAR, MPC
Elementi d'interfaccia	CELASI, CEALAS2
Parametri Nastran	PARAM,AUTOSPC,YES (PARAM,SPCGEN,1 PARAM,PRGPST,YES)
Condizioni al contorno	SPC, SPC1, SPCD, SPCADD

Tabella 5.3- Proprietà degli elementi N astran

5.25 Modellazione delle masse

Nella modellazione delle masse bisognerà tener conto dei seguenti aspetti:

- Nei campi di definizione dei materiali bisognerà sempre indicare le reali densità del materiale che si vuole rappresentare.
- Componenti aggiuntive senza funzionalità di tipo strutturale possono essere schematizzate con masse concentrate. Per quelle di massa maggiore si dovranno specificare i valori dei momenti d'inerzia (e usare elementi CONM2).

5.26 Interfacce

La posizione e il numero dei nodi utilizzati per realizzare l'interfaccia tra gli EPSA e il satellite sono definiti dall'intersezione tra il piano d'interfaccia e l'asse delle viti di fissaggio.

Il collegamento col satellite avverrà poi con elementi rigidi, tra i nodi della due interfacce, in modo da poter calcolare le reazioni d'interfaccia.

La posizione dei nodi d'interfaccia sarà data con quattro cifre decimali.

5.3 Criteri per l'accettazione del modello

Per i modelli numerici dei sottoelementi di Microscope sono previste alcune verifiche atte ad assicurarne la consistenza matematica.

I criteri per l'accettazione, descritti nei paragrafi seguenti, dovranno essere soddisfatti.

5.3.1 Verifica statica

La verifica statica sarà effettuata applicando una accelerazione di $1g$ ($9.81m/s^2$) lungo i tre assi di riferimento del satellite.

Gli EPSA saranno fissati rigidamente alla loro interfaccia.

La somma delle forze d'interfaccia (R_i) lungo ogni asse dovrà essere uguale, con un margine dello 1%, al prodotto tra $1g$ e la massa (M) calcolata da Nastran.

$$R_i = Mg$$

5.3.2 Verifica dinamica

I nodi d'interfaccia dell'EPSA dovranno essere collegati rigidamente tra loro, in modo da costituire un telaio rigido.

L'analisi modale dovrà essere condotta con vincoli nulli ("analisi free-free"), in modo da determinare sei modi rigidi, i primi sei modi di vibrazione e le masse effettive associate ai modi di vibrazione almeno fino a 600Hz.

Nel modello non devono essere presenti meccanismi.

L'energia di deformazione dei modi rigidi e il termine di condizionamento dovranno essere:

Energia di deformazione $< 10^3$ J

5.4 Descrizione del modello 2TC

Ogni EPSA è formato dai seguenti sottogruppi principali:

- I due Thruster Assembly,
- Le strutture di supporto dei TA e della PPCU,
- Il neutralizzatore,
- La PPCU.

I TA sono stati progettati per essere unità completamente indipendenti e un modello FEM per lo studio dello stato di sollecitazione e del comportamento dinamico del singolo TA è già stato sviluppato presso il Centrosazio.

Gli oltre 157 sotto particolari compatti che compongono i TA hanno richiesto, per la loro modellazione, un elevato numero di elementi tridimensionali⁴.

In questa sede si è fatto ricorso a quei risultati per schematizzare la presenza dei Thrusters nella “mesh” degli EPSA.

Si assume che ogni TA agisca come un corpo rigido⁵ trasmettendo, sulla struttura di supporto, carichi inerziali; per ciò è stato “modellato” come una massa concentrata, con le stesse caratteristiche inerziali del TA, calcolate in base al modello CAD e riportate in Tabella 5.4.

Questa scelta ha inoltre permesso, anche tenendo conto delle particolarità di una struttura composta prevalentemente da piastre, di costruire un modello uniforme dal punto di vista degli elementi utilizzati e “leggero” dal punto di vista del calcolo.

Si è infatti potuto evitare l’uso di elementi tridimensionali, che oltre a comportare un maggior numero di nodi, con conseguente aumento del tempo di calcolo, avrebbero costretto a risolvere i problemi di continuità delle caratteristiche di sollecitazione nei punti di contatto con gli elementi bidimensionali di tipo SHELL, che come si vedrà, sono stati impiegati nella schematizzazione delle piastre.

L’elemento puntiforme utilizzato è il MASS21; questi elementi sono costituiti da un unico nodo avente sei gradi di libertà al quale è possibile associare le cosiddette “Real Constants” consistenti in informazioni sulla massa (eventualmente definita specificamente per ogni direzione) e sulle caratteristiche inerziali.

⁴ Sono elementi i cui nodi non appartengono tutti allo stesso piano; in genere hanno forma di tetraedro o di parallelepipedo.

⁵ Questa ipotesi poggia sui risultati delle analisi fatte nel corso dello sviluppo del progetto dei Thruster Assembly, al Centrosazio.

Per tutti i componenti trattati come masse puntiformi è stato usato questo tipo di elemento.

La Tabella 5.4 riporta le caratteristiche dei TA, usate nella definizione delle Real Constants degli elementi MASS21 che li schematizzano.

Massa e Momenti Principali d'inerzia dei TA	
Massa (Kg)	0.56
Momento Principale I_{XX} (Kg×m ²)	0.00028474265
Momento Principale I_{YY} (Kg×m ²)	0.00037347974
Momento Principale I_{ZZ} (Kg×m ²)	0.0004811038

Tabella 5.4– Caratteristiche inerziali dei TA 2TC

La “modellazione” del neutralizzatore non presenta particolari complicazioni in quanto è un corpo compatto di piccole dimensioni.

Anch'esso agisce come fosse un corpo rigido ed è rappresentato da una massa concentrata connessa ai nodi delle zone d'interfaccia con elementi rigidi.

Tutte le piastre delle strutture di supporto sono state schematizzate con elementi bidimensionali di tipo SHELL63.

Si tratta di elementi 2D a quattro nodi con sei gradi di libertà per nodo, che possono essere caricati sia sul loro piano che in quello perpendicolare, caratterizzati da un comportamento sia flessionale che membranale.

Gli elementi SHELL sono detti bidimensionali perché i nodi e le connessioni appartengono allo stesso piano; in realtà è possibile definire uno spessore dell'elemento e quindi tener conto delle variazioni di spessore delle piastre.

In ogni caso approssimando una struttura tridimensionale con una bidimensionale si commettono errori geometrici.

Nelle figure seguenti sono mostrate le variazioni di spessore della mesh dell'EPSA 2TC, ovviamente assegnate in base allo spessore caratteristico delle piastre (a colori diversi corrispondono spessori diversi).

Poiché, al fine di calcolare una soluzione conservativa, il piano della mesh coincide col contorno esterno delle strutture di supporto, la geometria del modello FEM può risultare localmente più voluminosa di quella della struttura reale se si considerano gli spessori degli elementi.

Per altre piastre, in genere quelle interne o quelle di supporto dei moduli, per le quali è richiesto un piazzamento molto preciso, la mesh giace nel piano medio dello spessore reale.

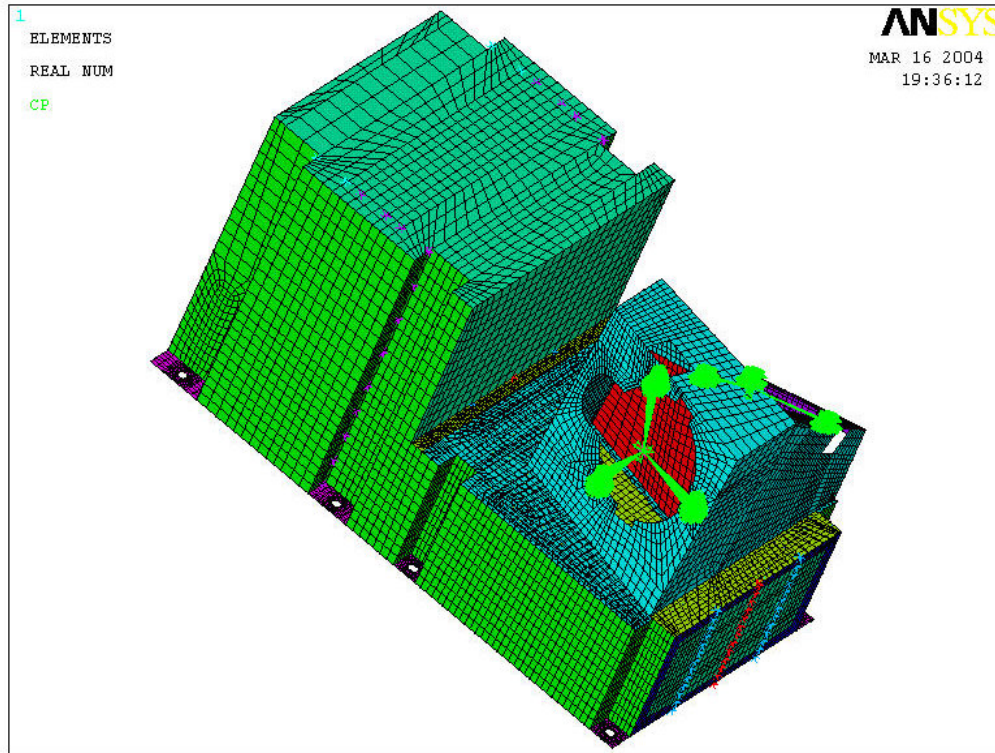


Figura 5.1- Mesh e spessori EPSA 2TC

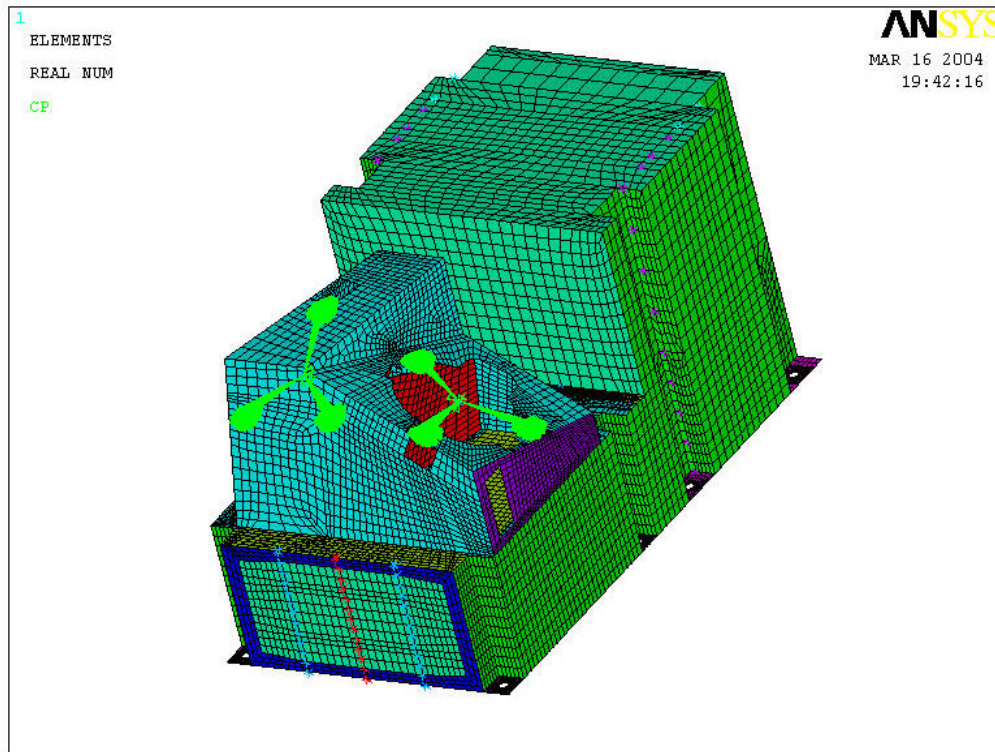


Figura 5.2- Mesh e spessori EPSA 2TC

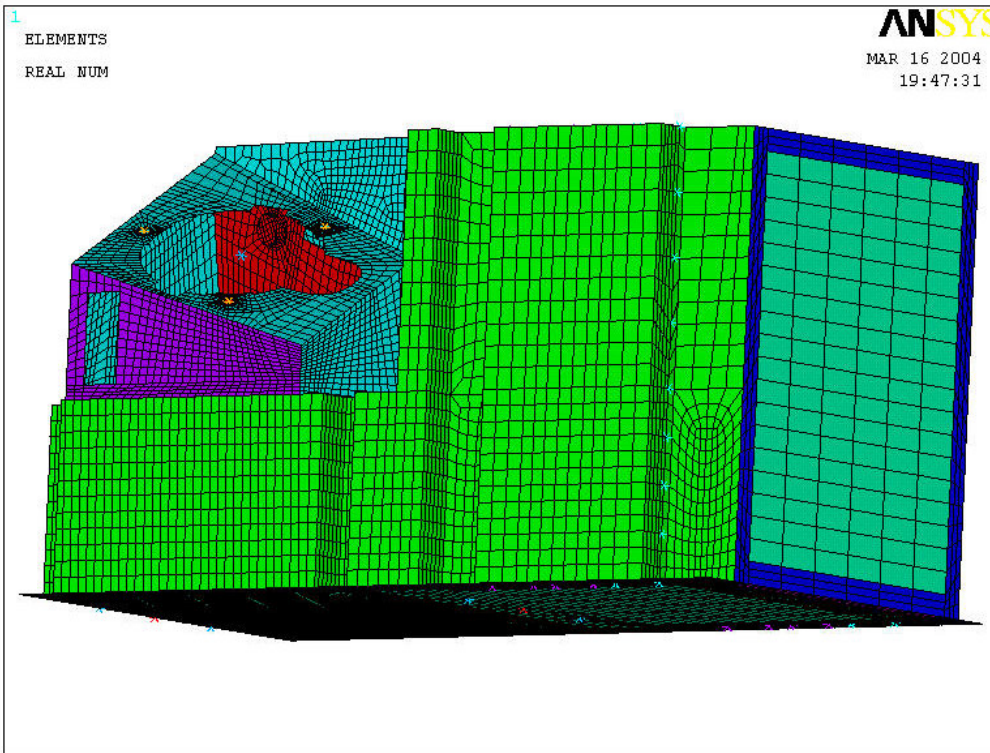


Figura 5.3- Mesh e spessori EPSA 2TC

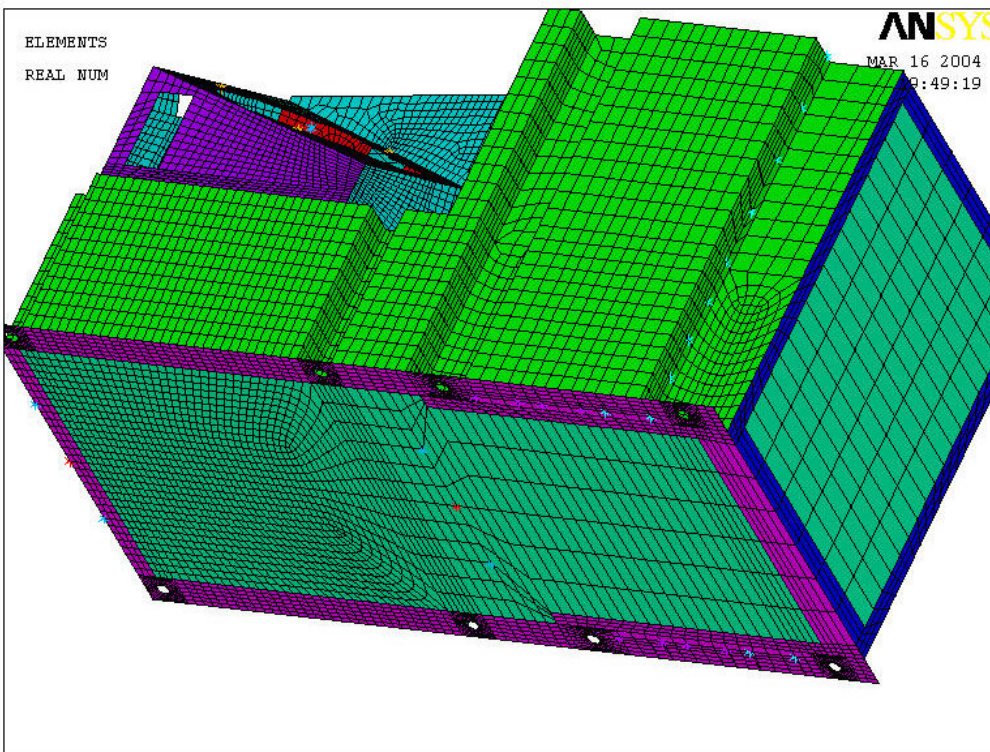


Figura 5.4- Mesh e spessori EPSA 2TC

Tutte le piastre della struttura di supporto della configurazione 2TC sono in lega d'alluminio (Al 6061-T6); le sue caratteristiche fisiche sono riportate nella seguente tabella in accordo con le MIL-HDBK-5G.

Material	σ_{iv} [MPa]	σ_{iu} [MPa]	E [GPa]	G [GPa]	ν	ρ [kg/ m ³]
Al6061-T6	227	255	68.3	(¹)	0.33	2713
⁽¹⁾ $G=E/(2(1+\nu))$						

Tabella 5.5- Proprietà dell'alluminio Al6061-T6

Per quanto riguarda le schede della PPCU e dell'elettronica in generale, va' invece detto che, in mancanza di informazioni più precise, è stato necessario fare forti assunzioni semplificative circa il loro comportamento meccanico; in ogni caso le ipotesi fatte sono sempre state quelle ritenute più conservative.

La scheda madre, che in realtà è fissata sulla base della struttura di supporto della PPCU in prossimità degli spigoli, in maniera tale da non influenzare il comportamento flessionale della piastra base o la rigidità complessiva dell'EPSA, è sostituita, nel modello FEM, da una massa concentrata connessa con elementi rigidi ai punti d'interfaccia.

Le altre schede elettroniche della PPCU (le due DPIA, la PPIA, due HVE, l'HVA) sono simulate con una distribuzione di masse concentrate⁶ poste in corrispondenza delle superfici di fissaggio in modo che la massa totale della scheda venga divisa tra tutti i nodi.

Un approccio simile a quello della scheda madre, e cioè l'uso di collegamenti rigidi, avrebbe comportato l'introduzione di una serie fittizia di vincoli di rigidità con conseguente aumento della rigidità complessiva dell'EPSA.

Il modello più adatto a descrivere la situazione reale sta nel mezzo tra questi due casi estremi, ma comporta la conoscenza del comportamento meccanico delle schede, in questo caso non disponibile.

Ulteriori assunzioni alla base della schematizzazione di elementi minori sono:

- Le giunzioni saldate sono state trattate come zone di continuità del materiale, anche in virtù dei ridotti spessori, e ottenute collegando rigidamente tra loro i nodi corrispondenti;

⁶ L'alternativa di "spalmare" le schede lungo le aree d'interfaccia è impedita dalla specifica che vieta l'uso di densità non proprie dei materiali usati.

- Il collegamento tra la struttura di supporto dei TA e quella della PPCU, avviene tramite un percorso di viti abbastanza fitto da poter ammettere il collegamento tra tutti i nodi in comune tra le interfacce dei due elementi;
- Viti e bulloni sono schematizzati con masse concentrate, connesse con elementi rigidi ai nodi delle aree intorno ai fori, in cui si esercita la pressione del collegamento;
- Si è trascurata la presenza di altre piccole masse, come quelle di cavi, rondelle, ecc.

Poiché è esplicitamente richiesto l'uso di Nastran per l'analisi del modello è stato necessario convertire la base di dati Ansys in un formato compatibile.

Gli elementi usati sono quindi i "PLATE", "MASS" e "RIGID" con le "Cards" permesse dalle specifiche (par.6.2.4) per un totale di 19323 elementi e 17563 nodi come riassunto nella Tabella 5.6 e nella Tabella 5.7.

Type element	Number of element
PLATE	17123
MASS	196
RIGID	2004
Total	19323

Tabella 5.6- Elementi del modello Nastran

Utilized Nastran Cards	
Nodes	GRID
Elements 2D	CTRIA3, CQUAD4
Lumped masses	CONM2
Rigid elements	RBE2
Nastran parameters	PARAM AUTOSPC,YES (with PARAM.PRGPST,YES)
Boundary Conditions	SPC

Tabella 5.7- Cards usate nel modello Nastran

Gli elementi PLATE corrispondono ai SHELL; anch'essi hanno quattro nodi con sei gradi di libertà ciascuno e possono simulare sia un comportamento membranale che uno di tipo piastra permettendo azioni sia di taglio che di flessione.

Analogamente i MASS sostituiscono i MASS21; nella tabella seguente sono riportate le definizioni di tutti gli elementi MASS usati.

Parts / MASS elements quantity	Unitary Mass [kg] ⁽¹⁾	Total Mass [kg] ⁽¹⁾	Unit. I ₁ [Kgm ²]	Unit. I ₂ [Kgm ²]	Unit. I ₃ [Kgm ²]
TA / 2	5,6E-01	1,12E+00	2,8474E-04	3,7348E-04	4,8110E-04
TA bolts / 6	3,8E-03	1,71E-03	=	=	=
Neutralizer / 1	1,00E-01	1,00E-01	=	=	=
Motherboard/1	2,00E-01	2,00E-01	=	=	=
DPIA / 72	5,56E-03	4,00E-01	=	=	=
PPIA / 36	1,389E-02	5,00E-01	=	=	=
HVE / 52	1,52E-02	7,90E-01	=	=	=
HVA / 26	1,473E-02	3,83E-01	=	=	=

Tabella 5.8– Parti simulate con elementi MASS

L'elemento RIGID è definito da un gruppo di nodi tutti costretti ad avere gli stessi spostamenti⁷ del nodo principale detto "master"; in pratica è una condizione di rigidità.

Gli elementi massa sono collegati al resto della struttura da elementi RIGID.

Elementi rigidi di lunghezza nulla sono usati anche per collegare le piastre tra loro lungo le linee di saldatura (nodo per nodo).

Questo si è reso necessario per rendere possibile la corretta conversione del data base Ansys in formato Nastran; altrimenti non sarebbe stato possibile il superamento dei criteri di accettazione.

Tra i due software esiste infatti una differenza sulle convenzioni riguardanti i sistemi di riferimento locali degli elementi non compensabile diversamente.

Questa operazione ha comportato che il numero di elementi rigidi aumentasse notevolmente fino agli oltre 2000 della Tabella 5.6.

Le figure seguenti mostrano alcune viste della mesh definitiva dell'EPSA e qualche dettaglio.

I punti bianchi sul contenitore dell'elettronica sono i nodi delle schede della PPCU.

⁷ L'elemento RIGID può vincolare da uno a sei dei gradi di libertà di un nodo (tre traslazioni e tre rotazioni) a quelli corrispondenti del master.

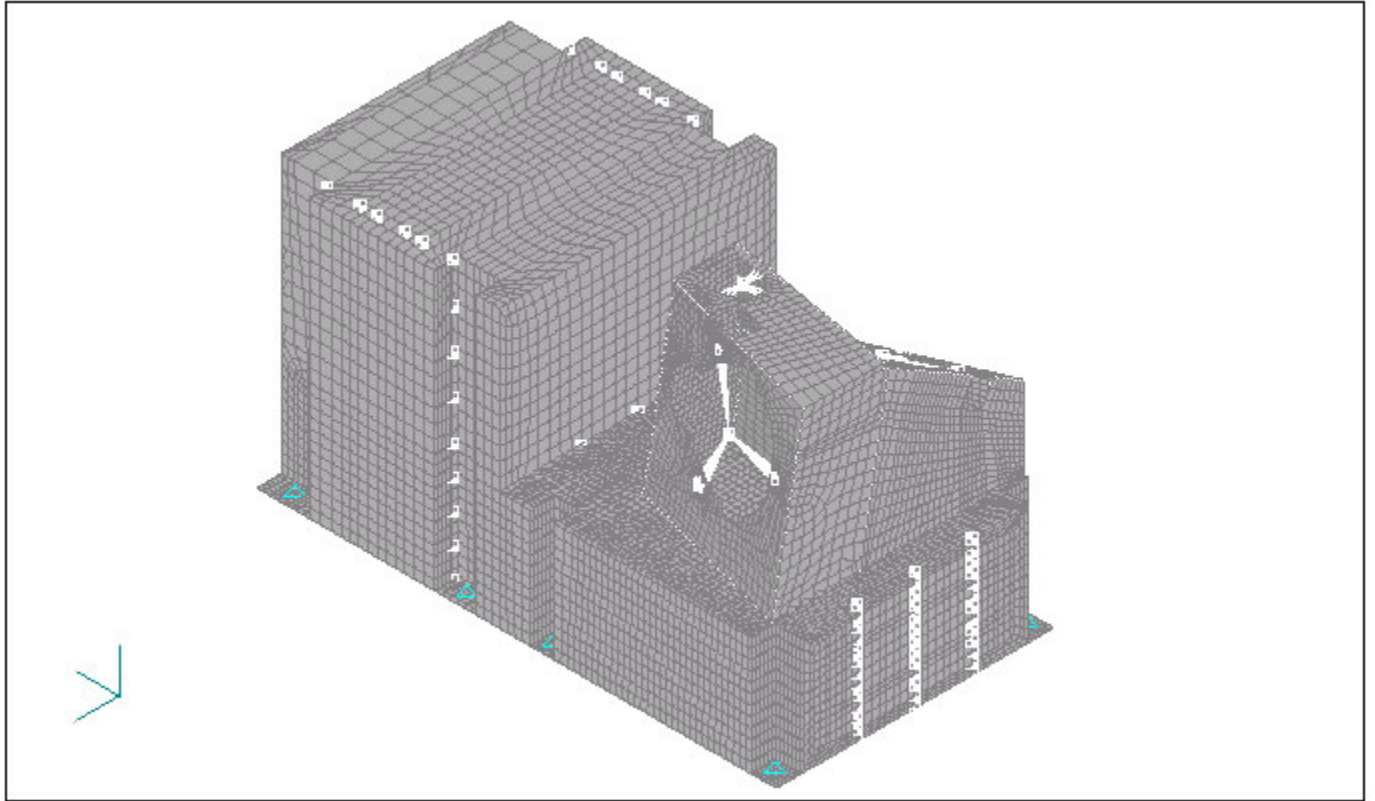


Figura 5.5- Modello FEM dell'EPSA 2TC

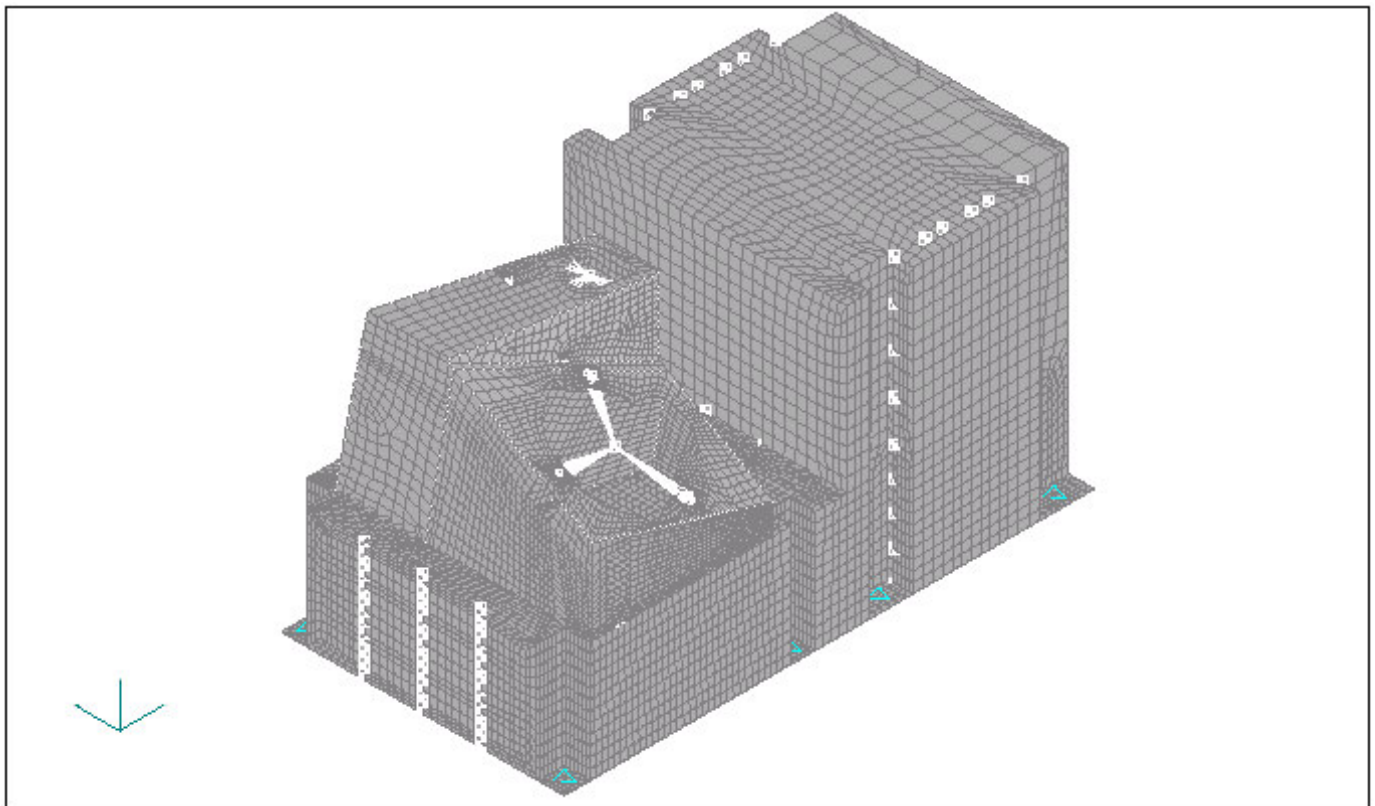


Figura 5.6- Modello FEM dell'EPSA 2TC

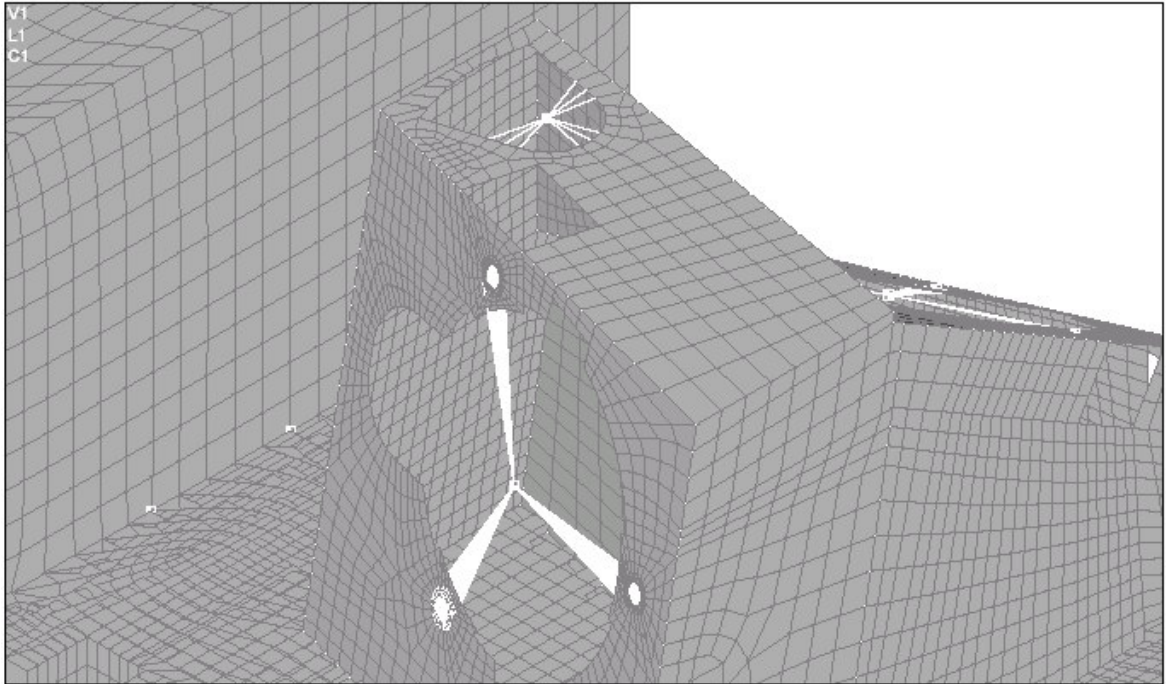


Figura 5.7- Modello FEM dell'EPSA 2TC: masse del TA e del neutralizzatore

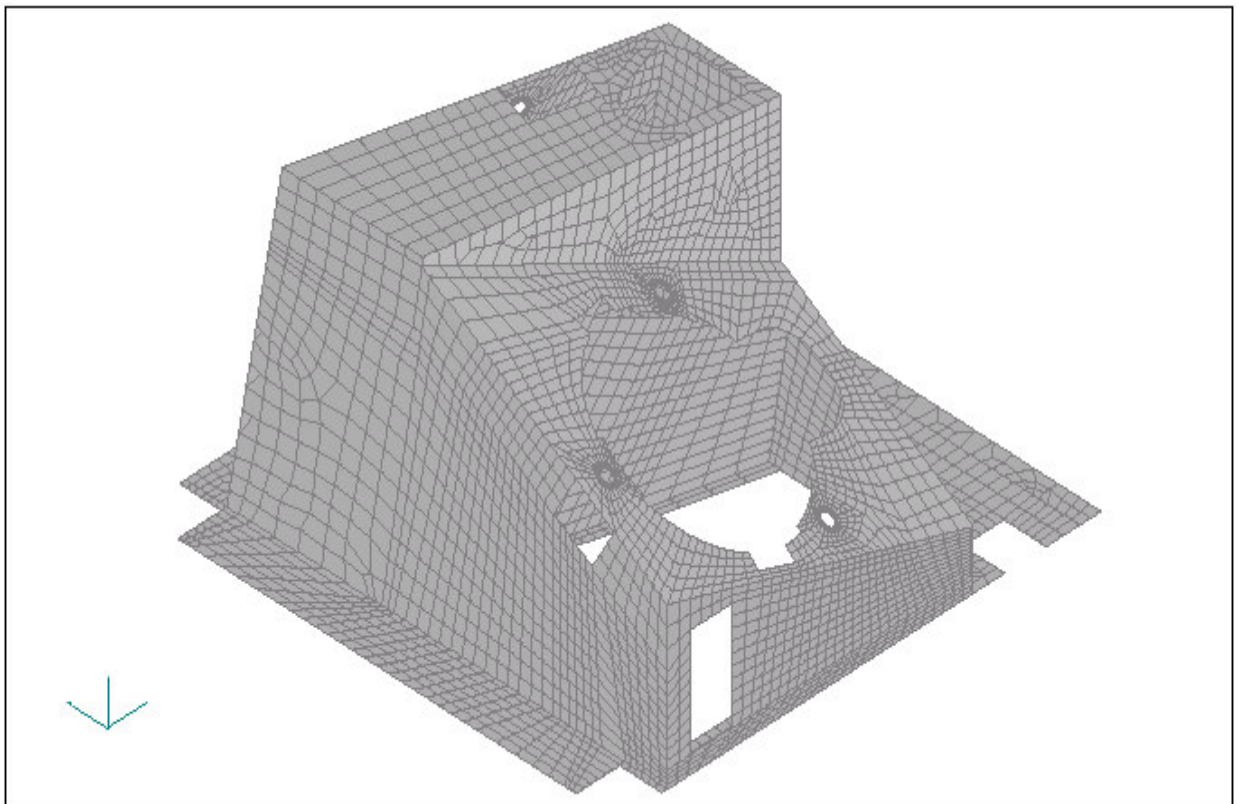


Figura 5.8- Modello FEM della struttura dei TA dell'EPSA 2TC

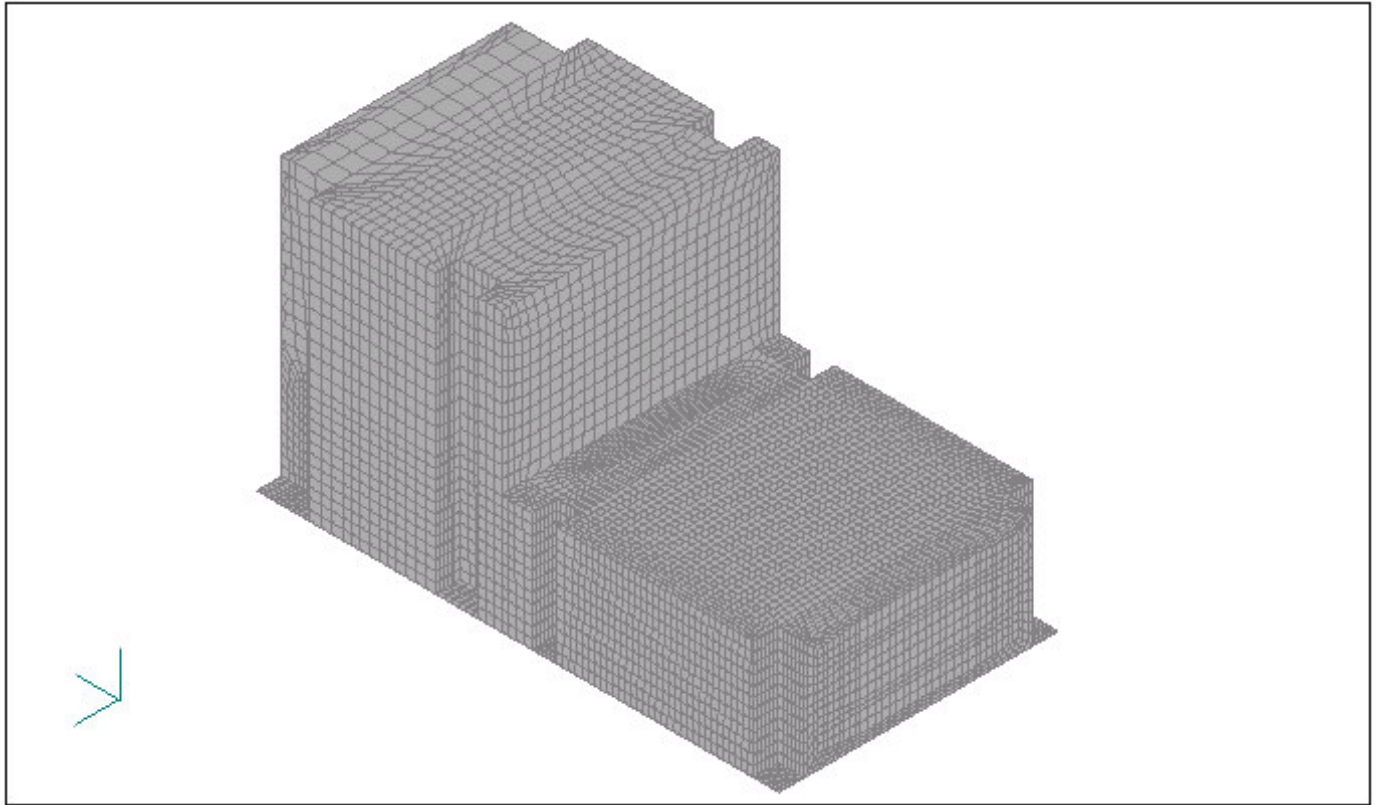


Figura 5.9- Modello FEM della struttura della PPCU dell'EPSA 2TC

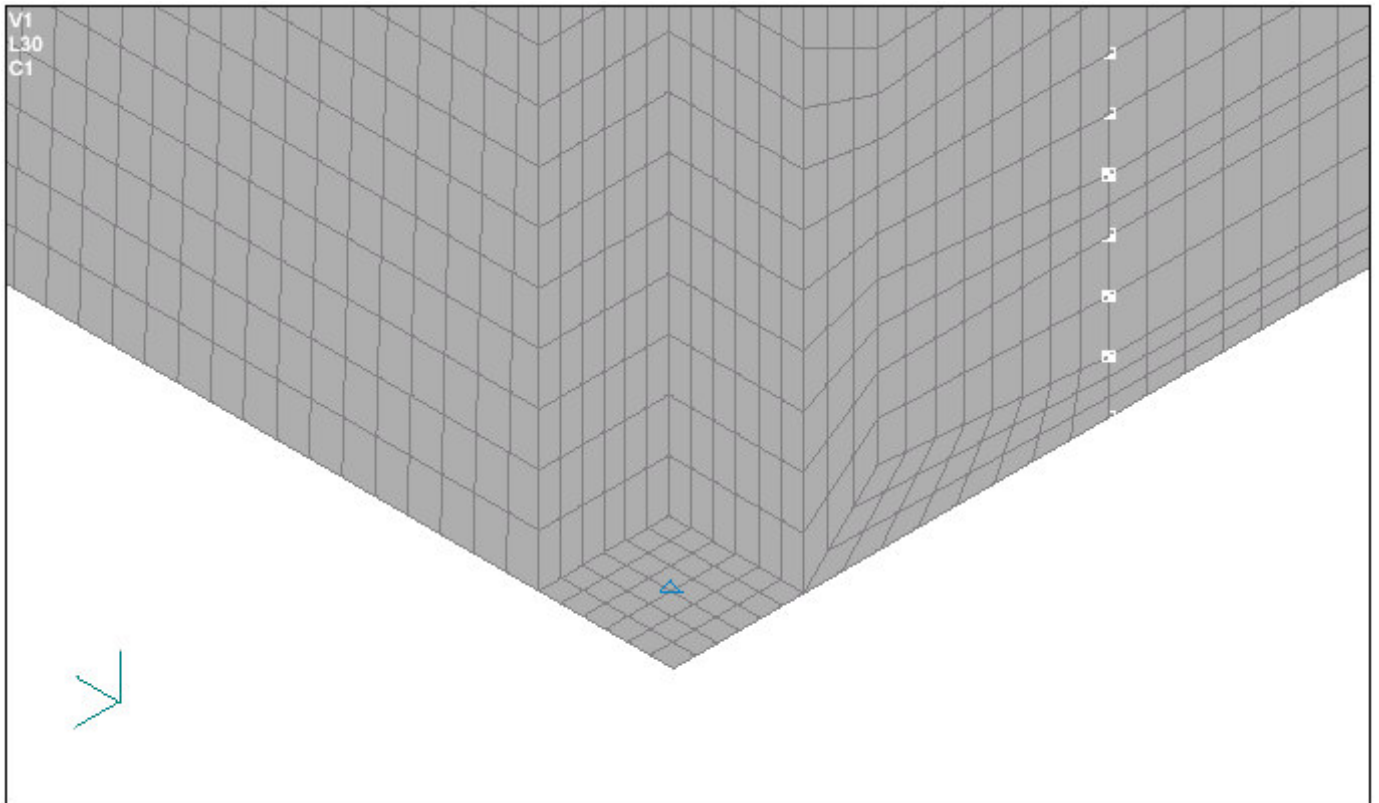


Figura 5.10- Modello FEM dell'EPSA 2TC: particolare dell'interfaccia col satellite

5.5 Verifiche del modello 2TC

Le variabili che intercorrono nella definizione del modello FEM di una struttura complessa, sono troppe per permettere lo sviluppo di una procedura automatizzata capace di evidenziare tutti gli eventuali errori.

Le schematizzazioni alla base della modellazione non possono essere verificate a priori, mentre gli errori di costruzione del modello possono essere corretti solo con una attenta revisione di tutti i suoi dettagli.

Lo scopo delle procedure di verifica è quello di assicurare che il modello sia coerente dal punto di vista matematico e che non contenga errori grossolani.

Oltre alle verifiche imposte dalle specifiche sono stati effettuati i cosiddetti “Preprocessor Checks” consistenti nell’esame visuale, nella verifica degli elementi e nella verifica delle proprietà ponderali.

L’esame visuale permette la verifica della forma e delle dimensioni generali dell’oggetto, nonché, grazie alle interfacce grafiche dei programmi, di varie proprietà degli elementi, come le caratteristiche dei materiali, l’andamento degli spessori, l’orientamento dei sistemi di riferimento locali.

La verifica degli elementi è in genere eseguita automaticamente e dà informazioni su quantità come il rapporto di forma o gli angoli caratteristici degli elementi stessi.

La presenza di elementi deformi non è necessariamente un problema ma oltre certi limiti può impedire la soluzione dell’analisi.

La modellazione FEM e le ipotesi fatte comportano inevitabilmente un errore nella distribuzione delle masse e nelle relative proprietà inerziali delle strutture.

Le tabelle seguenti riassumono i valori della massa, la posizione del centro di gravità e il tensore d’inerzia rispetto al sistema dell’EPSA, per i modelli CAD e FEM:

MASS (Kg)		
5.796		
CENTRE OF GRAVITY (m) WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
0.0746163	0.14060	0.0791628
MOMENTS OF INERTIA TENSOR AT COG WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
$\begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.9615e - 02 & -1.9126e - 04 & -2.4032e - 04 \\ -1.9126e - 04 & 2.7407e - 02 & -1.17071e - 04 \\ -2.4032e - 04 & -1.17071e - 04 & 6.0939e - 02 \end{pmatrix} \cdot Kg \cdot m^2$		

Tabella 5.9– Proprietà del modello CAD 2TC

MASS (Kg)		
5.801		
CENTRE OF GRAVITY (m) WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
0.07211412	0.139346	0.0797476
MOMENTS OF INERTIA TENSOR AT COG WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
$\begin{pmatrix} I_{XX} & I_{XY} & I_{XZ} \\ I_{YX} & I_{YY} & I_{YZ} \\ I_{ZX} & I_{ZY} & I_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6.72371e-02 & -1.736e-03 & 1.3922e-05 \\ -1.736e-03 & 3.21158e-02 & 1.22576e-04 \\ 1.3922e-05 & 1.22576e-04 & 6.84574e-02 \end{pmatrix} \cdot \text{Kg} \cdot \text{m}^2$		

Tabella 5.10 – Proprietà del modello FEM 2TC

La differenza nel tensore d'inerzia è in larga parte attribuibile alle assunzioni fatte riguardo le schede dell'elettronica; si ritiene comunque, che per gli scopi di una analisi preliminare, tali differenze siano accettabili.

5.6 Verifiche matematiche del modello 2TC

Come richiesto dalle specifiche sono state eseguite verifiche statiche e dinamiche.

Il sistema di riferimento usato per la rappresentazione dei risultati è quello dell'EPSA: [X,Y,Z]_{EPSA}.

5.6.1 Verifica statica (1g check)

Con il modello rigidamente fissato alla sua interfaccia si è applicata una accelerazione di 1g lungo ognuno dei tre assi di riferimento del satellite.

La somma delle forze di reazione all'interfaccia, lungo gli assi di riferimento dell'EPSA, è stata confrontata con la massa del modello calcolata da Nastran moltiplicata per 1g.

La massa calcolata da Nastran è pari a 5.801 Kg; mentre nelle tabelle seguenti sono riportati i valori calcolati delle reazioni d'interfaccia e il risultato del confronto.

TYPE LOAD	T1 [N]	T2 [N]	T3 [N]	R1 [Nm]	R2 [Nm]	R3 [Nm]
FX	-56,9099	----	----	----	-0,4162	3,8057
FY	----	-56,9099	----	4,8951	----	0,0000
FZ	----	----	-56,9099	-8,2869	0,0000	----
MX	----	----	----	0,0000	----	----
MY	----	----	----	----	-0,0166	----
MZ	----	----	----	----	----	0,0189
TOTALS	-56,9099	-56,9099	-56,9099	-3,3918	-0,4328	3,8246

Tabella 5.11- Reazioni d'interfaccia

Resultant	Total value [N]	Model mass-g [N]	Margin %
FX	-56,9099	56,9097	0,00035
FY	-56,9099	56,9097	0,00035
FZ	-56,9099	56,9097	0,00035

Tabella 5.12- Risultati della verifica statica

Poiché è ammesso un margine dello 1% il modello rispetta le richieste delle specifiche tecniche.

5.6.2 Verifica dinamica

Dopo aver svincolato il modello (vincoli nulli) i suoi nodi d'interfaccia sono stati collegati tra loro con elementi rigidi⁸; a questo punto è stata eseguita un'analisi modale ("free-free modal analysis") per determinare:

- Sei modi rigidi di vibrazione,
- L'assenza di meccanismi,
- Le masse effettive dei modi di vibrazione fino ai 1000 HZ.

I risultati sono dati nelle tabelle seguenti:

Mode no.	Frequency (Hz)	TX	TY	TZ
1	4,82E-04	1,2387E+00	6,9933E-02	6,0647E-01
2	4,14E-04	3,3494E+00	3,1148E-02	8,2090E-01
3	3,26E-04	5,7278E-01	3,0835E-01	3,7127E-03
4	3,11E-04	6,2601E-01	1,8054E-01	6,3856E-01
5	1,54E-04	1,2911E-02	2,4490E-01	3,6373E+00
6	2,89E-04	1,3833E-03	4,9663E+00	9,4248E-02
7	5,09E+02	8,2804E-26	2,6071E-26	1,3814E-27
8	5,83E+02	5,0724E-28	1,1310E-26	7,0330E-27
9	6,21E+02	1,5506E-27	6,6885E-27	2,3033E-26
10	6,72E+02	4,8585E-29	5,7802E-27	1,9211E-27
11	7,74E+02	6,8524E-26	3,2624E-26	2,5179E-26
12	8,64E+02	9,7665E-26	6,4348E-24	7,2519E-25
13	8,78E+02	4,2110E-25	1,9541E-24	8,1479E-27
14	8,93E+02	5,3528E-25	1,8055E-24	1,3698E-25
15	9,07E+02	1,3969E-24	1,3423E-24	1,8746E-24
16	9,33E+02	2,8007E-25	1,7374E-24	2,5760E-24
17	9,57E+02	2,2240E-24	5,2843E-24	1,0374E-27
18	1,01E+03	1,4789E-24	6,6039E-25	2,7281E-24
19	1,04E+03	6,2352E-28	1,5061E-26	5,9196E-25
20	1,05E+03	2,4334E-24	3,8644E-25	2,1159E-24
TOTAL		5,8012E+00	5,8012E+00	5,8012E+00

Tabella 5.13- Massa effettiva per le traslazioni, con vincoli nulli

⁸ Equivale a montare la struttura su un telaio rigido.

Mode no.	Frequency (Hz)	RX	RY	RZ
1	4,82E-04	1,8320E-02	1,3881E-03	7,9390E-02
2	4,14E-04	3,5106E-02	4,9706E-02	7,2458E-02
3	3,26E-04	3,4108E-02	2,8174E-03	4,3887E-05
4	3,11E-04	1,1214E-03	1,6534E-03	1,2391E-02
5	1,54E-04	5,3143E-02	6,1886E-05	4,3015E-03
6	2,89E-04	2,9305E-05	3,6183E-05	1,3474E-03
7	5,09E+02	3,7501E-06	2,0234E-10	1,3581E-05
8	5,83E+02	7,5192E-07	5,2625E-04	4,0407E-03
9	6,21E+02	1,0115E-03	2,5881E-03	3,1822E-03
10	6,72E+02	6,8972E-07	4,4673E-06	1,8675E-04
11	7,74E+02	1,3203E-04	9,2880E-04	3,8494E-06
12	8,64E+02	3,7682E-08	1,4462E-05	6,3061E-07
13	8,78E+02	1,1394E-03	4,1912E-04	2,1298E-04
14	8,93E+02	1,6565E-04	3,6090E-04	1,3752E-04
15	9,07E+02	4,4310E-04	4,6778E-04	3,0864E-04
16	9,33E+02	1,3989E-04	1,2654E-04	1,3473E-04
17	9,57E+02	6,4906E-06	3,1480E-07	1,1622E-05
18	1,01E+03	1,1154E-04	1,7439E-03	5,4417E-05
19	1,04E+03	7,6118E-07	1,3409E-04	9,1321E-06
20	1,05E+03	2,7807E-05	1,3390E-04	1,0269E-05
TOTAL		1,4501E-01	6,3112E-02	1,7824E-01

Tabella 5.14- Massa effettiva per le rotazioni, con vincoli nulli

Poiché sei frequenze naturali proprie sono minori 10^3 Hz, si deduce che siano quelle associate ai moti rigidi della struttura svincolata; mentre il fatto che siano solo sei esclude la presenza di cinatismi associati ad altri gradi di libertà interni.

I cosiddetti “ground checks” sull’energia di deformazione residua sono stati fatti su tutti i set di nodi e sono di seguito riportati:

Residual Strain Energy relative to Stiffness Matrix Reduction at [Joule]				
Direction	G Set	N Set	N+AUTOSPC Set	F Set
1	1,6432E-05	1,9682E-05	1,9682E-05	1,9682E-05
2	1,1489E-06	3,0049E-06	3,0049E-06	3,0049E-06
3	3,0426E-07	1,5558E-06	1,5558E-06	1,5558E-06
4	2,6192E-07	3,2775E-07	1,4201E-02	1,4201E-02
5	2,5938E-07	3,5184E-07	3,2305E-07	3,2305E-07
6	5,4939E-07	6,0461E-07	5,7396E-07	5,7396E-07

Tabella 5.15- Energia di deformazione residua

Con essi è possibile escludere la presenza di vincoli non desiderati nel modello: applicando un atto di moto ad una struttura non completamente svincolata si introdurrebbero deformazioni alle quali è associata una certa energia.

Essendo, in questo caso, i vincoli nulli si attendono valori pressoché nulli dell’energia di deformazione.

Il massimo valore ammesso è pari a 10^{-3} J

Come evidenziato nella tabella, questo limite è superato in due casi; ma vista la sua bassa entità si ritiene accettabile per gli scopi della presente analisi.

In conclusione si ritiene che il modello soddisfi anche le verifiche dinamiche.

5.7 Risultati dell'analisi modale 2TC

Scopo dell'analisi modale è la determinazione delle caratteristiche del comportamento vibrazionale di una struttura, cioè delle sue frequenze naturali di vibrazione e della forma assunta nella conseguente deformazione.

Un modo naturale di vibrazione si ha quando ogni punto della struttura compie un moto armonico attorno ad un punto di equilibrio statico.

In questa condizione tutti i punti passano per la propria posizione di equilibrio e raggiungono gli estremi dello spostamento nello stesso istante.

La frequenza con cui si verifica un moto armonico di un corpo è detta **frequenza propria o naturale del sistema** e la particolare configurazione degli spostamenti associati ad essa è detta **modo proprio**.

I parametri fisici della struttura che ne determinano le caratteristiche vibrazionali sono principalmente tre:

- La distribuzione delle masse e i momenti d'inerzia della struttura;
- Il modo in cui la struttura assorbe e riflette i carichi;
- Le condizioni al contorno e di vincolo della struttura.

Ognuno di questi parametri può variare considerevolmente durante la vita operativa di una struttura; anche per questa ragione è comunque necessario verificare i risultati dell'analisi numerica con metodi sperimentali.

L'analisi modale è stata effettuata fissando rigidamente l'EPSA alla sua interfaccia col satellite.

Questa condizione al contorno si traduce, nell'analisi FEM, con l'applicazione di un vincolo di spostamento nullo ai nodi d'interfaccia (nulli tutti i gradi di libertà del nodo); in particolare è stato applicato ai nodi situati nell'intersezione tra l'asse delle viti di fissaggio e il piano d'interfaccia col satellite.

Nelle tabelle seguenti sono riportate le prime venti frequenze proprie e le corrispondenti masse effettive sia per le traslazioni (Tabella 5.16) che le rotazioni (Tabella 5.17).

Il sistema di riferimento usato è quello principale dell'EPSA.

La richiesta era che la minor frequenza naturale di vibrazione, fosse superiore ai 400 Hz; infatti per ragioni che verranno meglio dette nel paragrafo sui risultati

delle analisi statiche, fino a questi valori di frequenza i carichi casuali, cui saranno sottoposti gli EPSA durante il lancio, potrebbero raggiungere la massima intensità.

In questo modo si vogliono evitare fenomeni di accoppiamento e risonanza.

Come risulta dalle tabelle la prima frequenza è di oltre 495 Hz quindi la richiesta è soddisfatta.

Si può concludere che la struttura è sufficientemente rigida per gli scopi previsti.

Nelle pagine 94 e 95 sono riportate alcune immagini che mostrano i modi di vibrazione delle due strutture.

Per le frequenze più basse la PPCU è quasi indipendente dalla struttura dei TA, infatti il primo (Figura 5.11 e Figura 5.12) e il secondo modo di vibrazione, rispettivamente corrispondenti a 495.10 Hz e 515.96 Hz, sono prevalentemente associati alla deformazione del "Top cover +X1".

La deformazione nel secondo caso è sorprendentemente simile a quella del primo (anche per questo non viene una figura specifica per questo caso).

Il terzo, che si verifica a 563.74 Hz (Figura 5.13 e Figura 5.14), è invece principalmente legato allo spostamento di un TA attorno a due dei suoi punti d'attacco.

Per frequenze più elevate diventa difficile identificare comportamenti prevalenti.

Andisi meccaniche

Mode no.	Frequency (Hz)	TX (kg)	TY (kg)	TZ (kg)
1	495,10	3,1059E-01	2,8645E-01	3,6101E-01
2	515,96	1,2961E-02	3,5412E-01	4,9449E-01
3	563,74	1,8686E-01	9,9640E-02	5,6900E-01
4	646,93	1,2188E-01	9,0168E-01	2,0246E-01
5	692,95	4,3569E-02	4,2482E-01	6,1677E-01
6	771,19	1,4657E-03	1,4714E-01	5,2860E-01
7	820,36	1,6566E-01	8,1434E-01	2,1007E-01
8	835,91	6,6684E-01	2,4208E-01	3,9618E-01
9	863,83	6,7200E-05	7,1307E-04	3,6124E-02
10	881,03	7,8668E-03	3,5594E-04	1,1760E-03
11	890,40	3,7500E-01	5,8965E-02	1,0291E-01
12	913,44	1,8905E-01	2,3471E-01	2,9124E-02
13	942,00	9,7115E-02	9,9130E-05	5,4166E-03
14	958,65	9,5536E-03	1,7054E-02	3,5957E-05
15	1041,12	6,4121E-03	2,5872E-04	1,9179E-03
16	1047,40	1,2921E-02	3,8864E-03	7,5573E-03
17	1057,02	2,5158E-01	1,6950E-02	9,3273E-04
18	1065,46	9,0053E-02	5,3347E-03	9,1132E-02
19	1119,72	1,4476E-01	6,2268E-05	4,4530E-02
20	1153,81	7,2665E-04	7,4861E-08	2,7200E-04

Tabella 5.16– Masse effettive per le traslazioni

Mode no.	Frequency (Hz)	RX (kg·m ²)	RY (kg·m ²)	RZ (kg·m ²)
1	495,10	7,5396E-04	3,2283E-03	2,6812E-03
2	515,96	1,2484E-03	1,0035E-03	7,5417E-04
3	563,74	2,5664E-03	1,1774E-04	1,1988E-03
4	646,93	1,4156E-03	2,2506E-03	1,5472E-03
5	692,95	6,9555E-03	4,5265E-03	1,5096E-03
6	771,19	1,3232E-02	6,8438E-03	4,6764E-04
7	820,36	1,1121E-02	2,6676E-03	2,4481E-02
8	835,91	2,5051E-02	1,1218E-03	2,2822E-02
9	863,83	3,9009E-03	5,6283E-04	1,1202E-05
10	881,03	1,3233E-05	7,6069E-08	2,6406E-05
11	890,40	1,4254E-02	4,8907E-03	1,2992E-03
12	913,44	5,8623E-03	8,1671E-04	3,8166E-03
13	942,00	1,0696E-04	3,9652E-05	1,8920E-04
14	958,65	2,4991E-06	2,3882E-05	1,0917E-03
15	1041,12	3,9113E-07	5,8810E-05	6,4670E-05
16	1047,40	1,1298E-04	2,0396E-04	1,1033E-05
17	1057,02	1,4560E-05	1,5609E-03	1,2722E-02
18	1065,46	1,2284E-03	7,9995E-04	8,3885E-07
19	1119,72	1,1513E-03	1,0065E-04	6,7277E-04
20	1153,81	1,8391E-06	1,6394E-05	1,2265E-07

Tabella 5.17- Masse effettive per le rotazioni

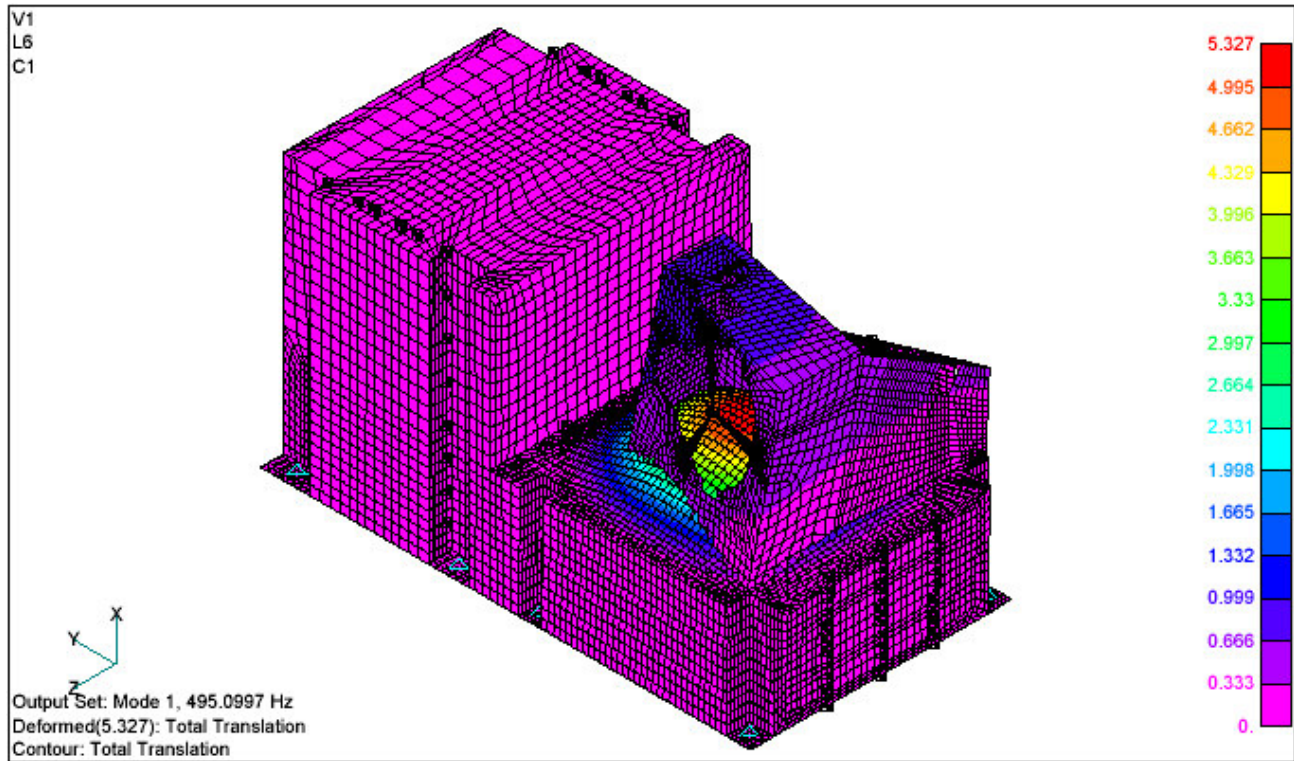


Figura 5.11- Modo proprio associato alla 1^a frequenza propria di vibrazione

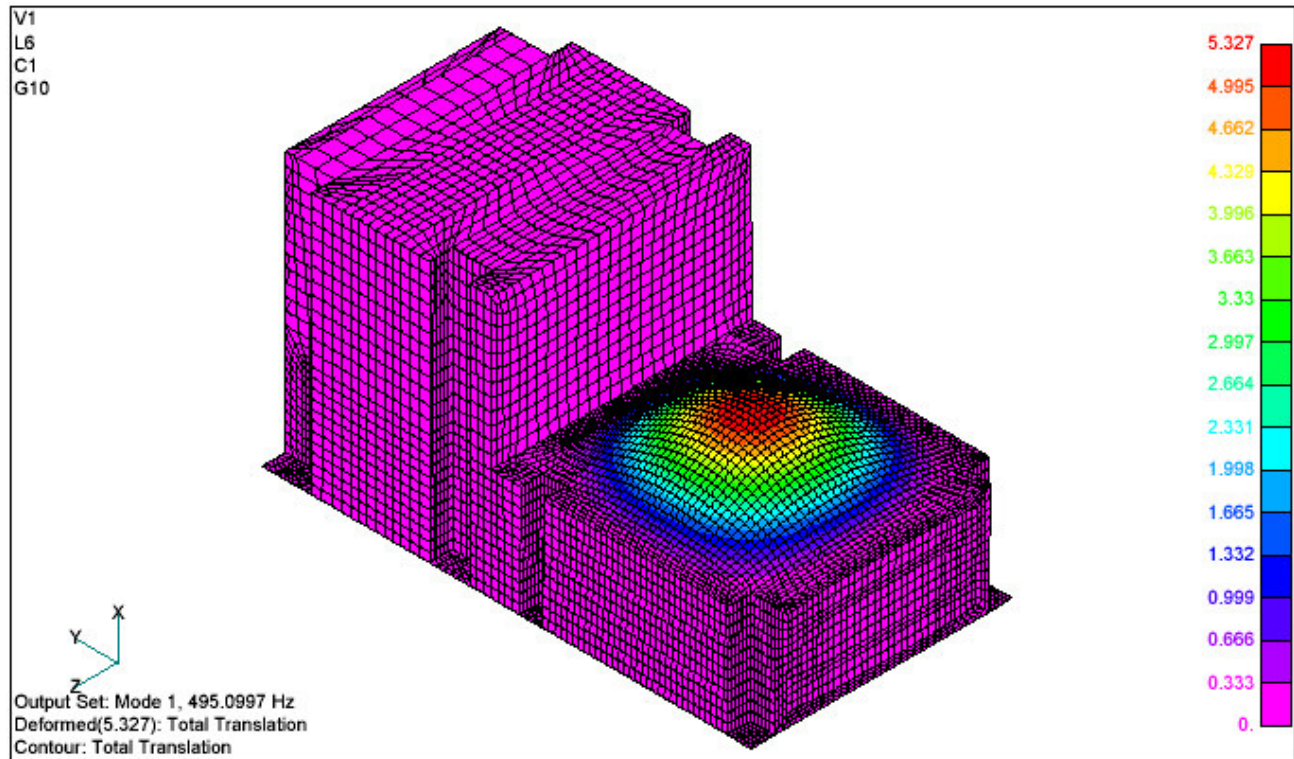


Figura 5.12- Modo proprio associato alla 1^a frequenza propria di vibrazione

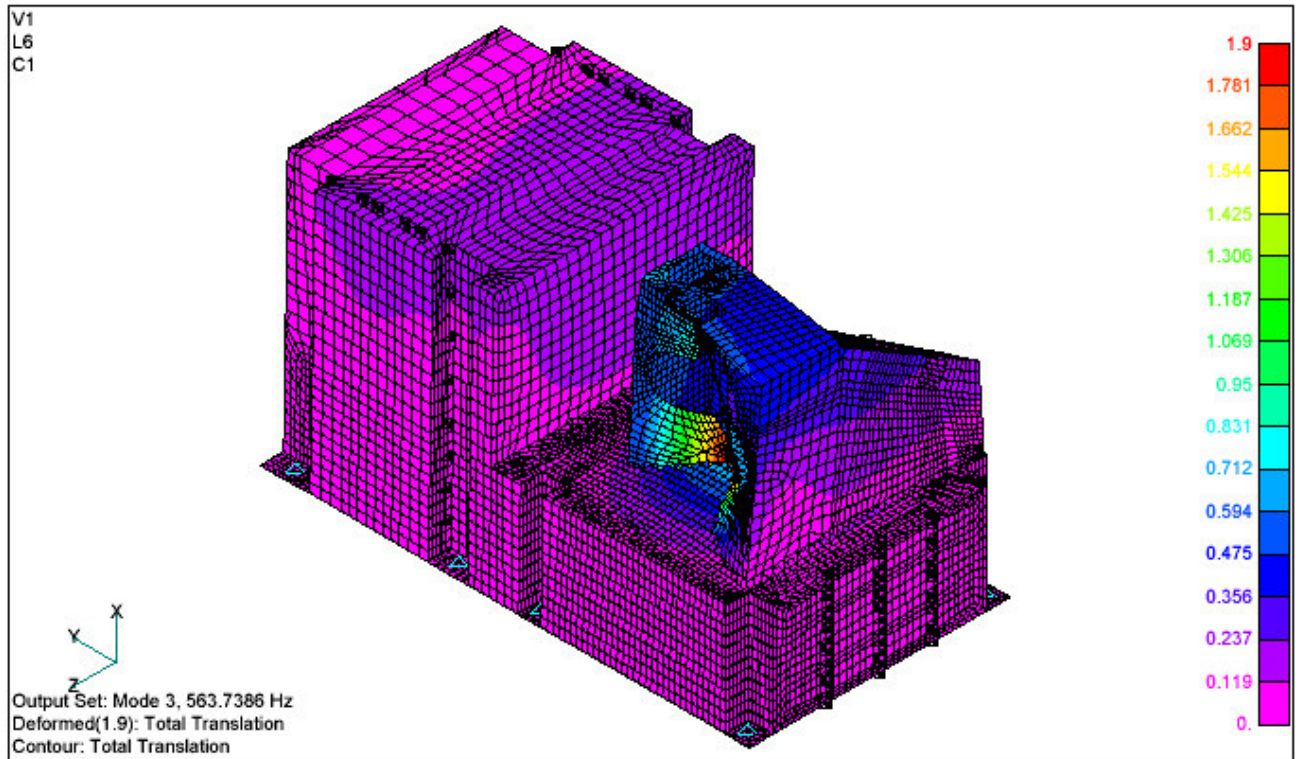
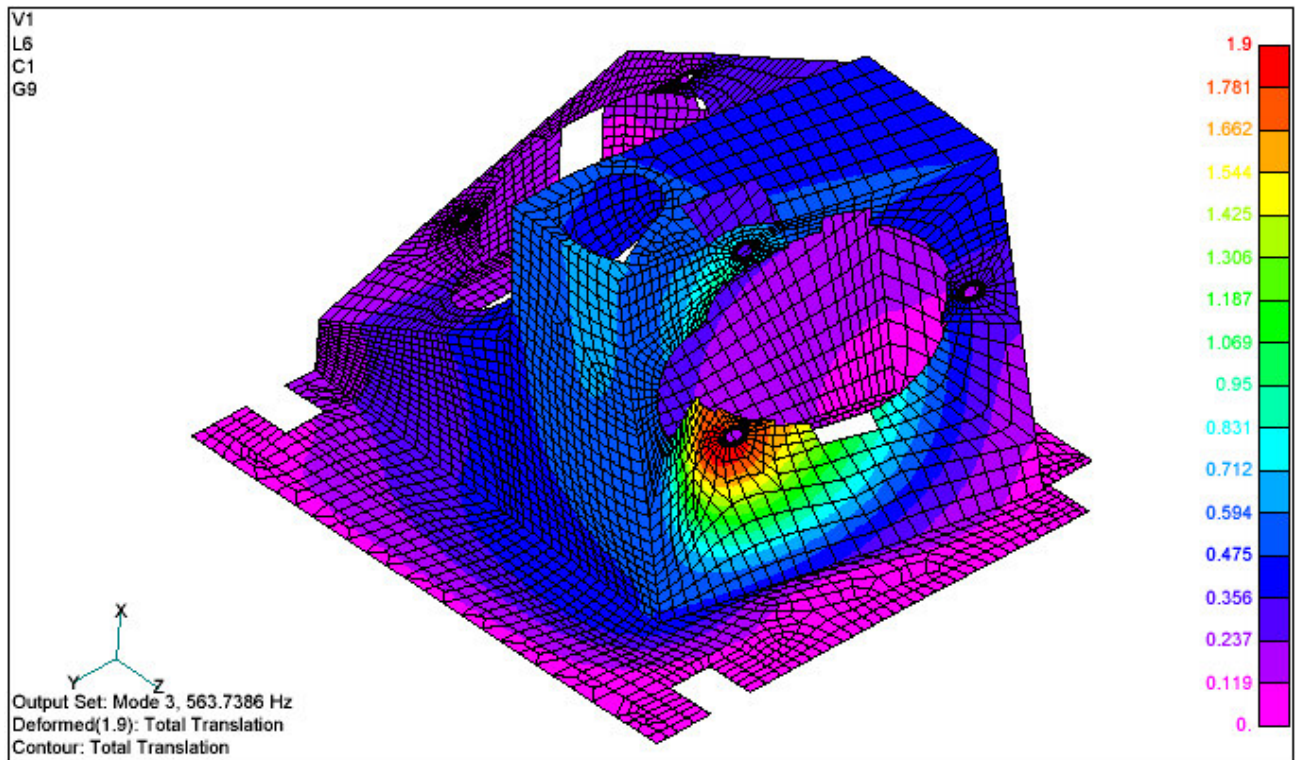


Figura 5.13- Modo proprio associato alla 3^a frequenza propria di vibrazione



**Figura 5.14- Modo proprio associato alla 3^a frequenza propria di vibrazione
(particolare della struttura di supporto dei TA)**

5.8 Risultati delle analisi statiche 2TC

Anche queste analisi sono state condotte fissando rigidamente l'EPSA all'interfaccia col satellite, tramite vincoli di spostamento nullo posti ai nodi d'interfaccia.

Per le caratteristiche del materiale si è fatto riferimento a quelle riportate nella Tabella 5.5 di pagina 81.

In accordo con quanto previsto dalle linee guida per la progettazione meccanica sviluppate dell'ESA e contenute nel documento "ECSS-E-30 Part 2A", alle tensioni sono stati applicati i seguenti fattori di sicurezza:

Fattore di sicurezza per il carico di snervamento	$FOS_y = 1.25$
Fattore di sicurezza per il carico ultimo	$FOS_u = 1.5$

Tabella 5.18 – Fattori di sicurezza

Per tutte le analisi è stato poi verificato che fossero positivi i **margini di sicurezza** definiti dalle formule:

$$MOS_y = \frac{\sigma_{ty}}{\sigma \cdot FOS_y} - 1 \quad MOS_u = \frac{\sigma_{tu}}{\sigma \cdot FOS_u} - 1$$

dove σ è la tensione calcolata, σ_{ty} la tensione di snervamento e σ_{tu} la tensione di rottura del materiale.

5.8.1 Carichi quasi statici e carichi dovuti a vibrazioni casuali

Nell'analisi strutturale è essenziale definire una distribuzione dei carichi il più realistica possibile e disporre di tecniche di calcolo capaci di darne una adeguata descrizione matematica.

Il satellite *Microscope* sarà messo in orbita, dal cosmodromo di Baikonur, con un lanciatore sovietico **Dnepr** (derivato dal missile balistico intercontinentale **SS-18 Satan**) e sperimenterà le sollecitazioni maggiori durante la fase di lancio.

I carichi vengono in genere definiti in termini di accelerazioni agenti lungo le direzioni del sistema di riferimento e sono misurati in multipli della accelerazione di gravità **g**.

Misurazioni su lanci precedenti mostrano che i carichi, contenuti nell'ogiva del *Dnepr*, subiscono il rumore, dovuto all'attrito con l'atmosfera e alle vibrazioni indotte dai motori durante l'accensione e la salita, prevalentemente nel campo di

frequenze compreso tra 20 Hz e 2000 Hz; cioè che le sollecitazioni vibrazionali più “energetiche” hanno frequenze comprese in quel campo.

È possibile che durante il lancio le varie parti del satellite, in particolare quelle più piccole, entrino in risonanza con le vibrazioni acustiche e meccaniche delle strutture del lanciatore.

Si rende quindi necessario l’uso di una procedura che possa accoppiare i carichi vibrazionali con quelli a bassa frequenza e statici agenti durante le operazioni di lancio.

Sulla base dei dati raccolti è previsto che gli EPSA debbano resistere a carichi quasi statici di ± 30 g lungo i loro assi di riferimento e che i carichi variabili casualmente tra i 20 e i 2000 Hz abbiano la **densità spettrale di potenza**⁹ definita in Tabella 5.19 e schematizzata in Figura 5.15.

Random Frequency [Hz]	Qualification PSD [g^2/Hz]	Acceptance PSD [g^2/Hz]
20-100	+3 db/oct	+3 db/oct
100-400	0,379*	0,243**
400-2000	-3 db/oct	-3 db/oct
Duration	2,5 min/axis	1 min/axis
* $0,1 \cdot (M+20)/(M+1)$		** $0,064 \cdot (M+20)/(M+1)$
with M equal to EPSA Mass in Kg		

Tabella 5.19– PSD delle vibrazioni casuali (2TC)

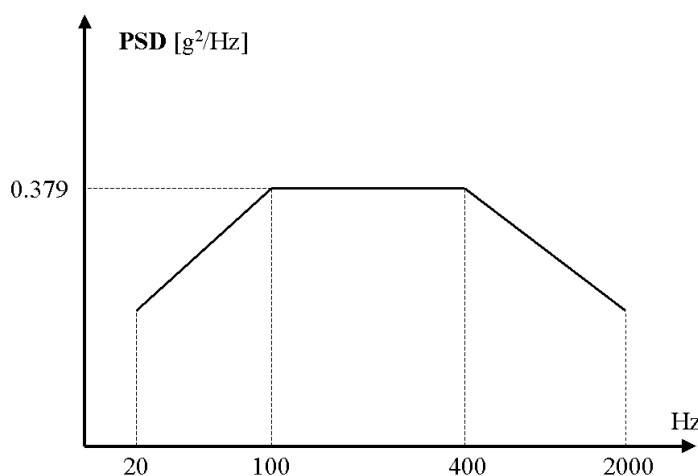


Figura 5.15– Andamento della PSD (2TC)

⁹ La Power spectral density o PSD in genere è misurata in g^2/Hz anziché in W/Kg .

In queste analisi, per determinare le condizioni di carico, è stato applicato il metodo di **Miles**, [5], che permette di combinare contemporaneamente le azioni dovuta ai carichi quasi statici con quelle dovute alle vibrazioni casuali.

Considerando le combinazioni dei carichi, applicati sia nei versi positivi che negativi degli assi del sistema di riferimento $[X,Y,Z]_{EPSA}$, si hanno i 24 casi di carico definiti nella Tabella 5.20:

Load Case	X_{EPSA}	Y_{EPSA}	Z_{EPSA}
LC 1-8	$\pm(QSL_X^2 + RVLFX^2)^{1/2}$	$\pm QSL_Y$	$\pm QSL_Z$
LC 9-16	$\pm QSL_X$	$\pm(QSL_Y^2 + RVLFY^2)^{1/2}$	$\pm QSL_Z$
LC 17-24	$\pm QSL_X$	$\pm QSL_Y$	$\pm(QSL_Z^2 + RVLfZ^2)^{1/2}$

Tabella 5.20– Schema delle combinazioni dei carichi

dove i $QSL_{(x,y,z)}$ indicano i carichi quasi statici (Quasi Static Loads) mentre i $RVLf_{(x,y,z)}$ rappresentano i **fattori dei carichi delle vibrazioni casuali** (Random Vibrations Load Factors) per la direzione indicata dal pedice; il segno di "±" indica che devono essere presi, alternativamente, positivi e negativi.

I fattori dei carichi delle vibrazioni casuali sono stati calcolati con la seguente procedura:

1. Con l'analisi modale sono state calcolate le masse effettive traslazionali associate ai primi 40 modi propri di vibrazione (le prime 20 sono in Tabella 5.16);
2. Il Random Vibrations Load Factor per ogni modo è stato calcolato con la relazione di Miles:

$$RVLf_i = 3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot Q \cdot f_i \cdot PSD_i}$$

dove Q è il fattore di amplificazione (assunto pari a 10 per l'assenza di dati sperimentali), f_i l'i-esima frequenza di vibrazione.

PSD_i è l'i-esima densità spettrale di potenza letta¹⁰ nella Tabella 5.20 o nel corrispondente diagramma.

Il valore esatto della PSD corrispondente alla frequenza f_i , nel caso in cui si fosse trovato in un tratto della curva con pendenza "P", è stato interpolato con la relazione:

$PSD_i = PSD_1 (f_i/f_1)^{.3322P}$, dove il pedice 1 si riferisce alla più bassa frequenza di cui è nota la PSD;

¹⁰ Si fa riferimento al valore di qualifica.

3. I vari $RVL F_i$ sono stati poi moltiplicati per le corrispondenti masse effettive $EFFM_i$ e divisi per la massa totale, ottenendo per ogni direzione un'accelerazione normalizzata:

$$RVL F_{mw} = \frac{RVL F_i \cdot EFFM_i}{M};$$

4. Infine per ogni direzione è stata calcolato il fattore dei carichi delle vibrazioni casuali $RVL F_{(X,Y,Z)}$ con la relazione:

$$RVL F_{(x,y,z)} = \sqrt{\sum_i^n RVL F_{MW}^2} .$$

I valori ottenuti per le $RVL F_{(X,Y,Z)}$ sono riportati in Tabella 5.21.

Random Vibrations Load Factor	Value [g's]
$RVL F_{XEPSA}$	144,8
$RVL F_{YEPSA}$	67,85
$RVL F_{ZEPSA}$	58,43

Tabella 5.21– Fattori di carico delle vibrazioni casuali

In base alla Tabella 5.20 si determinano i 24 casi di carico, che sono tutti elencati nella Tabella 5.23.

A questo punto è stato possibile valutare lo stato di tensione nelle strutture di supporto dell'EPSA, eseguendo con Nastran una serie di analisi statiche.

Come richiesto dalle specifiche del progetto, l'interfaccia tra la struttura e il satellite è stata modellata con un singolo nodo e un vincolo rigido.

Questo schema introduce una forte semplificazione della situazione reale (in cui le reazioni d'interfaccia si distribuiscono su una regione maggiore e sono ulteriormente ridotte dalla deformazione dell'interfaccia stessa del satellite) e produce valori locali delle tensioni troppo elevati.

Per questa ragione sono stati esclusi gli sforzi nella struttura di supporto della PPCU in corrispondenza dell'interfaccia.

Per ognuno dei 24 casi è stato verificato che il margine di sicurezza fosse positivo; i più piccoli margini di sicurezza sia per la struttura di supporto dei TA che della PPCU sono riportati nella Tabella 5.22:

Part	Max. Von Mises Stress Value (MPa)	LC (see Table 6.4)	Material	Allowable Stress Values		Applied FoS		Minimum MoS	
				σ_{ty} (MPa)	σ_{tu} (MPa)	FoS _y	FoS _u	MoS _y	MoS _u
TA Support Structure	131,88	06	Al6061-T6	227	255	1,25	1,5	0,38	0,29
PPCU Structure	78,29 ⁽¹⁾	02	Al6061-T6	227	255	1,25	1,5	1,32	1,17

Tabella 5.22 – Risultati dell’analisi quasi-statica.

Come si può vedere (anche dalle figure da pagina 102 a pagina 103), la struttura di supporto dell’EPSA 2TC soddisfa i requisiti di resistenza meccanica ai carichi quasi statici e alle vibrazioni casuali posti delle specifiche di progetto.

Andisi meccaniche

Load Condition	X _{EPSA} [g's]	Y _{EPSA} [g's]	Z _{EPSA} [g's]
LC1	+147,87	+30	+30
LC2	+147,87	+30	-30
LC3	+147,87	-30	+30
LC4	-147,87	+30	+30
LC5	+147,87	-30	-30
LC6	-147,87	+30	-30
LC7	-147,87	-30	+30
LC8	-147,87	-30	-30
LC9	+30	+74,19	+30
LC10	+30	+74,19	-30
LC11	+30	-74,19	+30
LC12	-30	+74,19	+30
LC13	+30	-74,19	-30
LC14	-30	+74,19	-30
LC15	-30	-74,19	+30
LC16	-30	-74,19	-30
LC17	+30	+30	+65,68
LC18	+30	+30	-65,68
LC19	+30	-30	+65,68
LC20	-30	+30	+65,68
LC21	+30	-30	-65,68
LC22	-30	+30	-65,68
LC23	-30	-30	+65,68
LC24	-30	-30	-65,68

Tabella 5.23– Situazioni di carico

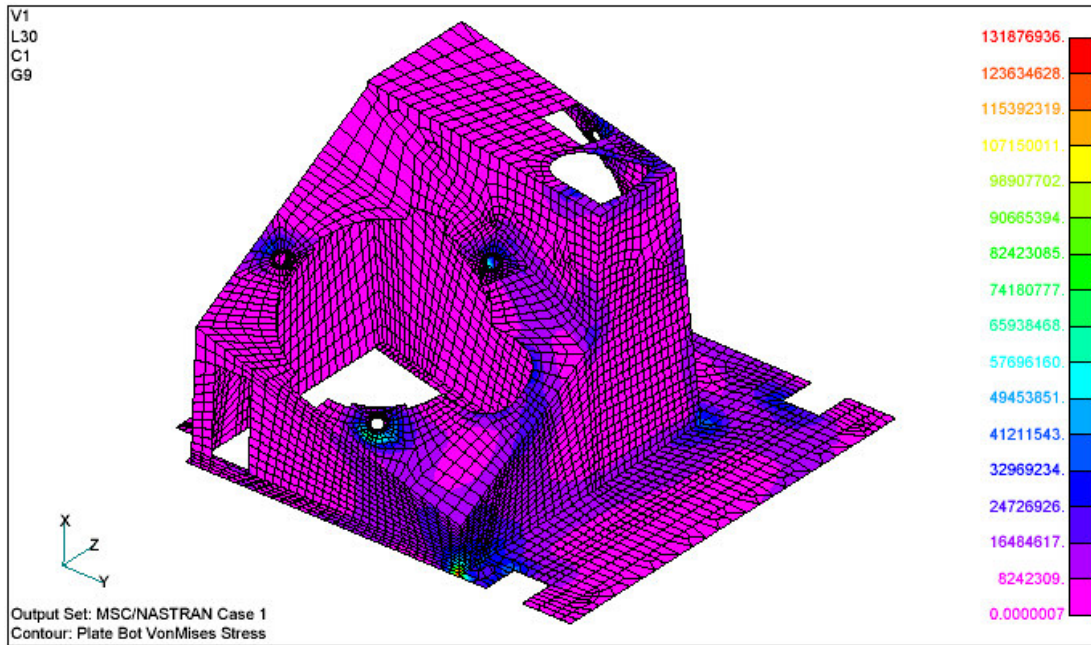


Figura 5.16- Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 2TC. Caso LC6 (tensioni in Pa)

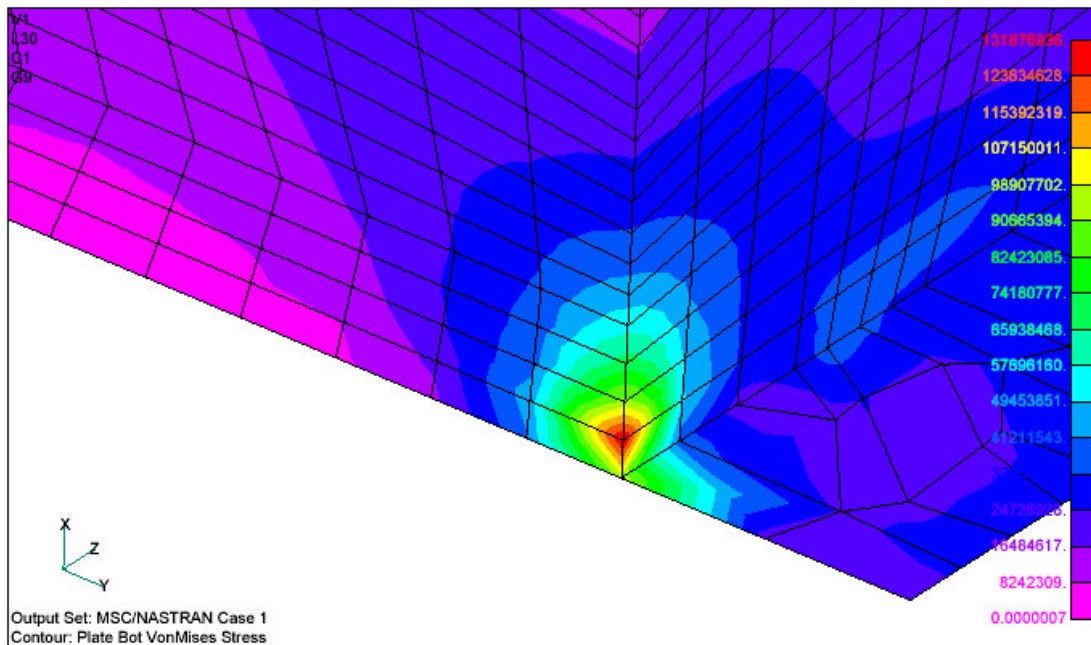


Figura 5.17- Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 2TC. Caso LC6 (tensioni in Pa)

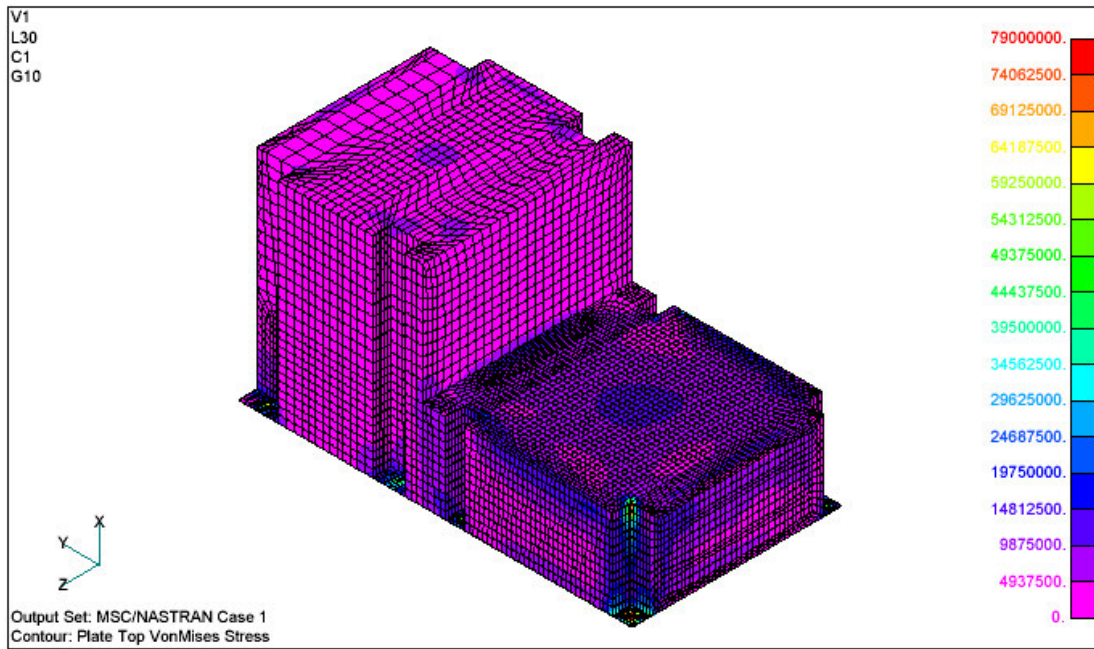


Figura 5.18- Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 2TC. Caso LC2 (tensioni in Pa)

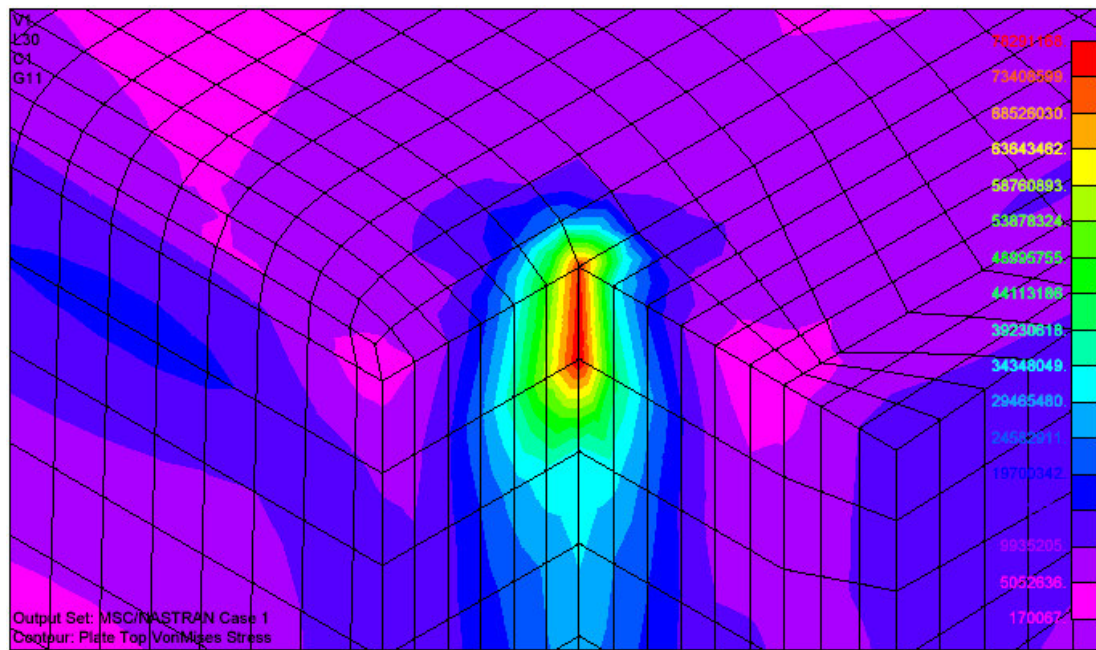


Figura 5.19- Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 2TC. Caso LC2 (tensioni in Pa)

5.9 Descrizione del modello 3TC

Ogni EPSA è formato dai seguenti sottogruppi principali:

- I due Thruster Assembly;
- Le strutture di supporto dei TA e della PPCU;
- Il neutralizzatore;
- La PPCU.

La struttura di supporto dei TA è a sua volta composta dai seguenti componenti principali:

- La Struttura saldata,
- Tre schermi superiori,
- Lo schermo laterale,
- Lo schermo interno,
- Gli angolari di supporto.

Le ipotesi di base e lo schema generale della modellazione seguono quanto fatto per la configurazione 2TC; qui si ricorderanno solo gli aspetti più importanti, mentre si rimanda a quella sezione per gli altri dettagli.

Si assume, anche in questo caso, che ogni TA agisca come un corpo rigido che trasmette, sulla struttura di supporto, carichi inerziali; perciò è stato “modellato” come una massa concentrata, con le stesse caratteristiche inerziali del TA, calcolate in base al modello CAD e riportate in Tabella 5.24.

Massa e Momenti Principali d'Inerzia dei TA	
Massa (Kg)	0.602
Momento Principale I_{xx} (Kg×m ²)	0.00029644502
Momento Principale I_{yy} (Kg×m ²)	0.00054927686
Momento Principale I_{zz} (Kg×m ²)	0.00065779658

Tabella 5.24- Caratteristiche inerziali dei TA 3TC

I TA sono stati progettati, presso il Centrosazio, per essere unità completamente indipendenti; l'ipotesi appena fatta sulla loro modellazione, si basa sui risultati già ottenuti in quella sede tramite analisi su modelli FEM del singolo TA ed esperimenti.

L'elemento puntiforme utilizzato è il MASS21; questi elementi sono costituiti da un unico nodo avente sei gradi di libertà al quale è possibile associare informazioni (le cosiddette "Real Constants) sulla massa, eventualmente definita specificatamente per ogni direzione, e sulle caratteristiche inerziali (in Tabella 5.24 ci sono le grandezze usate nella definizione delle Real Constants dei TA, schematizzati con elementi MASS21).

Per tutti i componenti trattati come masse puntiformi è stato usato questo tipo di elemento.

La "modellazione" del neutralizzatore non presenta particolari complicazioni in quanto è un corpo compatto di piccole dimensioni.

Anch'esso agisce come fosse un corpo rigido ed è rappresentato da una massa concentrata connessa ai nodi delle zone d'interfaccia con elementi rigidi.

Tutte le piastre delle strutture di supporto, i tre schermi superiori, lo schermo laterale, quello interno e gli angolari sono schematizzati con elementi bidimensionali di tipo SHELL63.

Si tratta di elementi 2D a quattro nodi con sei gradi di libertà per nodo, che possono essere caricati sia sul proprio piano che in quello perpendicolare, caratterizzati da un comportamento sia flessionale che membranale.

Gli elementi SHELL sono detti bidimensionali perché i nodi e le loro connessioni appartengono allo stesso piano; in realtà è possibile definire uno spessore dell'elemento e quindi tener conto delle variazioni di spessore delle piastre.

Nelle figure da pagina 107 a pagina 108 sono mostrate le variazioni di spessore della mesh dell'EPSA 3TC, ovviamente assegnate in base allo spessore medio delle piastre (a colori diversi corrispondono spessori diversi).

In ogni caso approssimando una struttura tridimensionale con una bidimensionale si commettono errori geometrici.

Poiché, al fine di calcolare una soluzione conservativa, il piano della mesh coincide col contorno esterno delle strutture di supporto, la geometria del modello FEM può risultare localmente più voluminosa di quella della struttura reale se si considerano gli spessori degli elementi.

Per altre piastre, in genere quelle interne o quelle di supporto dei moduli per le quali è richiesto un piazzamento molto preciso, la mesh giace nel piano medio dello spessore reale.

Le caratteristiche fisiche dei materiali impiegati sono state assegnate in accordo con le MIL-HDBK-5G e riportate nella Tabella 5.25.

Material	σ_{ty} [MPa]	σ_{tu} [MPa]	E [GPa]	G [GPa]	ν	ρ [kg/ m ³]
Al7075-T73	386	455	71.7	(¹)	0.33	2796
Al6061-T6	227	255	68.3	(¹)	0.33	2713
AISI304	215	505	200.0	(¹)	0.29	8000
⁽¹⁾ $G=E/(2(1+\nu))$						

Tabella 5.25 - Proprietà dei materiali

La struttura saldata e lo schermo laterale sono in lega d'alluminio AL 6061-T6, gli schermi superiori e lo schermo interno sono in AL 7075-T73 gli angolari in acciaio AISI 304¹¹.

Tutte le piastre della struttura di supporto della PPCU sono in lega d'alluminio AL 6061-T6.

Le schede elettroniche di questa configurazione, di cui si richiama la disposizione nella Figura 5.20, sono state modellate con gli stessi criteri della configurazione 2TC.

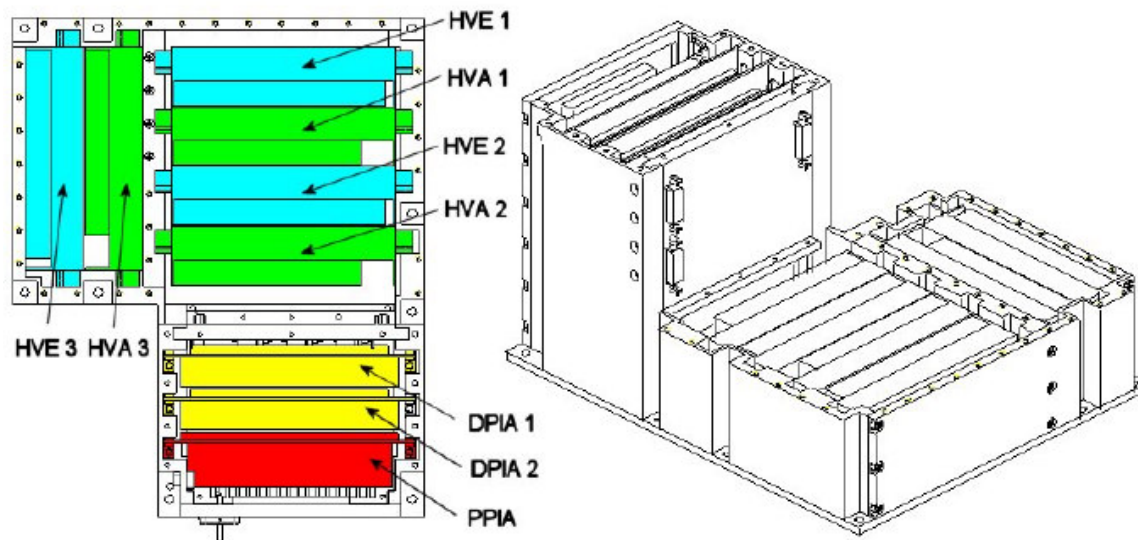


Figura 5.20 - Posizione delle schede nella PPCU

In particolare la scheda madre, che in realtà è fissata sulla base della struttura di supporto della PPCU in prossimità degli spigoli in maniera tale da non influenzare il comportamento flessionale della piastra base o la rigidità complessiva dell'EPSA, è sostituita, nel modello FEM, da una massa concentrata connessa con elementi rigidi ai punti d'interfaccia.

¹¹ Le analisi hanno mostrato che non c'è una reale necessità di avere componenti in AL 7075-T73. Nella successiva fase di progetto sarebbe preferibile l'uso del solo AL 6061-T6 per tutti gli elementi del supporto dei TA.

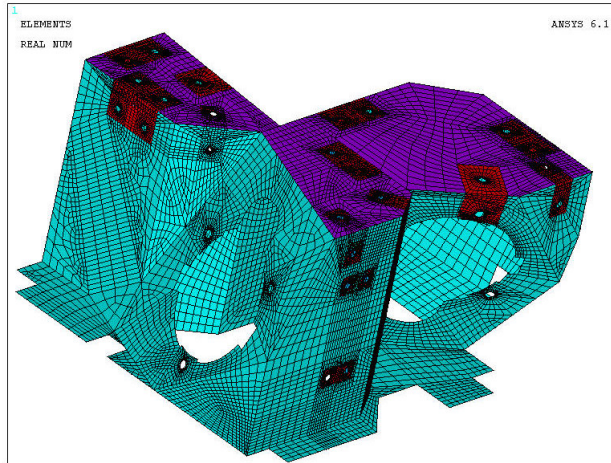


Figura 5.21- Spessori della mesh dell'EPSA 3TC

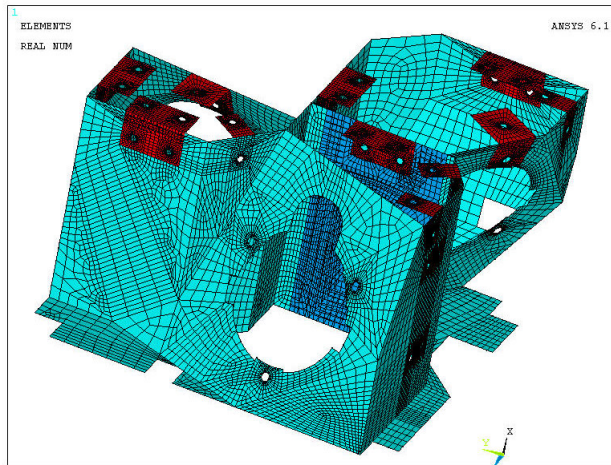


Figura 5.22- Spessori della mesh dell'EPSA 3TC

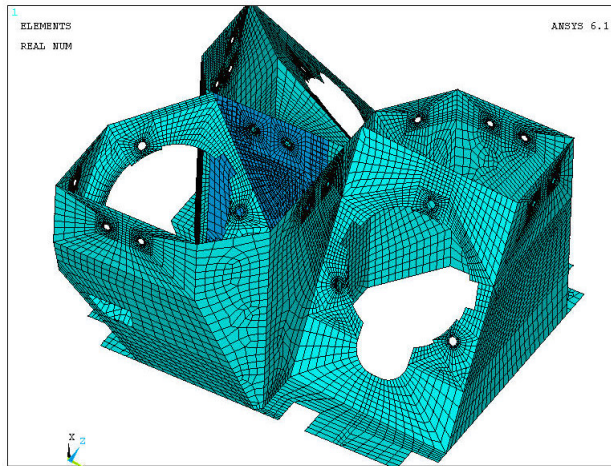


Figura 5.23- Spessori della mesh dell'EPSA 3TC

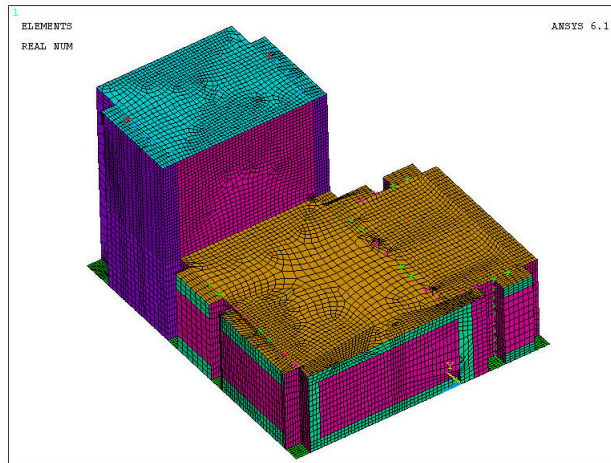


Figura 5.24 - Spessori della mesh dell'EPSA 3TC

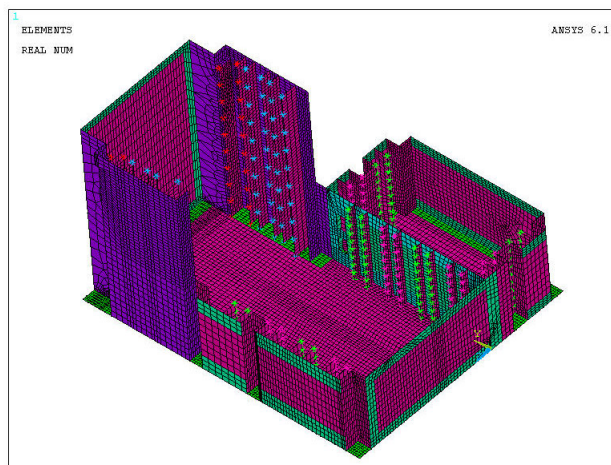


Figura 5.25 - Spessori della mesh dell'EPSA 3TC

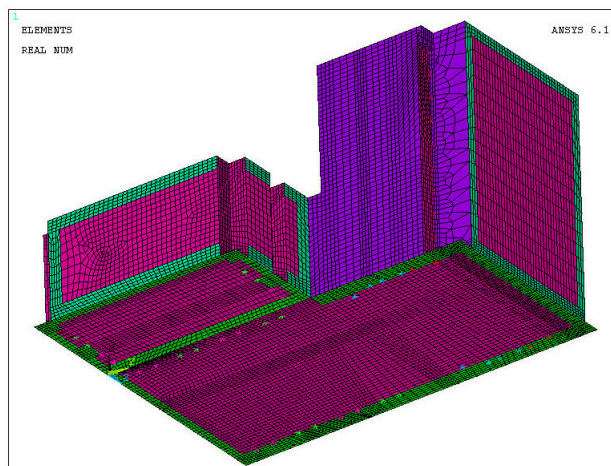


Figura 5.26 - Spessori della mesh dell'EPSA 3TC

Mentre tutte le altre schede elettroniche della PPCU sono simulate con una distribuzione di masse concentrate¹² poste in corrispondenza delle superfici di fissaggio, in modo che la massa totale della scheda venga divisa tra tutti i nodi.

In questo caso l'uso di collegamenti rigidi, avrebbe comportato l'introduzione di una serie fittizia di vincoli di rigidità con conseguente aumento della rigidità complessiva dell'EPSA.

Per la successiva fase di sviluppo del progetto sarebbe auspicabile una miglior conoscenza delle caratteristiche meccaniche di questi componenti.

Ulteriori assunzioni alla base della schematizzazione di elementi minori sono:

- Le giunzioni saldate sono state trattate come zone di continuità del materiale, anche in virtù dei ridotti spessori, e ottenute collegando rigidamente tra loro i nodi corrispondenti;
- Il collegamento tra la struttura di supporto dei TA e quella della PPCU, avviene tramite un percorso di viti abbastanza fitto da poter ammettere il collegamento tra tutti i nodi in comune tra le interfacce dei due elementi;
- Negli altri casi, viti e bulloni sono schematizzati con masse concentrate, connesse, con elementi rigidi, ai nodi delle aree intorno ai fori, in cui si esercita la pressione del collegamento;
- Si è trascurata la presenza di altre piccole masse, come quelle di cavi, rondelle, ecc.

Poiché è esplicitamente richiesto l'uso di Nastran per l'analisi del modello è stato necessario convertire la base di dati Ansys in un formato compatibile.

Anche in questo caso la conversione è stata fatta usando solo elementi con caratteristiche permesse dalle specifiche tecniche.

Le tabelle seguenti riassumono le caratteristiche principali del modello e si rimanda al paragrafo "5.4 Descrizione del modello 2TC" per la loro descrizione.

Come risulta dalla Tabella 5.26 è stato superato per questa configurazione il limite massimo di 49998 elementi.

Type element	Number of element
PLATE	50485
MASS	365
RIGID	3397
Total	54247

Tabella 5.26 - Elementi del modello Nastran

¹² L'alternativa di "spalmare" le schede lungo le aree d'interfaccia è impedita dalla specifica che vieta l'uso di densità non proprie dei materiali usati.

Utilized Nastran Cards	
Nodes	GRID
Elements 2D	CTRIA3, CQUAD4
Lumped masses	CONM2
Rigid elements	RBE2
Nastran parameters	PARAM AUTOSPC,YES (with PARAM,PRGPST,YES)
Boundary Conditions	SPC

Tabella 5.27 - Cards usate nel modello Nastran

Anche in questa configurazione è stato necessario usare elementi rigidi di lunghezza nulla per collegare tra loro le piastre della struttura di supporto dei TA, lungo le linee di saldatura (nodo per nodo).

Questo è reso necessario da una diversità, tra i due programmi, nella definizione dei sistemi di riferimento locale degli elementi.

La semplice conversione automatica del “data base” Ansys non avrebbe permesso il corretto superamento dei criteri di accettazione, previsti per il modello Nastran.

Questo giustifica la presenza di oltre 3000 elementi di questo tipo nella Tabella 5.26.

La Tabella 5.28 elenca tutti i componenti approssimati con elementi MASS e le loro caratteristiche.

Parts / MASS elements quantity	Unitary Mass [kg] ⁽¹⁾	Total Mass [kg] ⁽¹⁾	Unit. I ₁ [Kgm ²]	Unit. I ₂ [Kgm ²]	Unit. I ₃ [Kgm ²]
TA / 3	602,2E-01	1,807E+00	2,9645E-04	5,4928E-04	6,578E-04
Neutralizer / 1	1,00E-01	1,00E-01	=	=	=
Motherboard/1	2,5E-01	2,5E-01	=	=	=
DPIA / 80	6,25E-03	5,00E-01	=	=	=
PPIA / 40	1,5E-02	6,00E-01	=	=	=
HVE / 120	9,615E-03	1,154E+00	=	=	=
HVA / 120	9,79E-03	1,174E+00	=	=	=

Tabella 5.28 – Caratteristiche di tutti gli elementi MASS usati

Le figure seguenti mostrano alcune viste della mesh definitiva dell'EPSA3TC e qualche dettaglio.

I punti bianchi sul contenitore dell'elettronica sono i nodi delle schede della PCPU.

In Figura 5.32 si può anche notare il collegamento rigido tra i TA e il loro supporto.

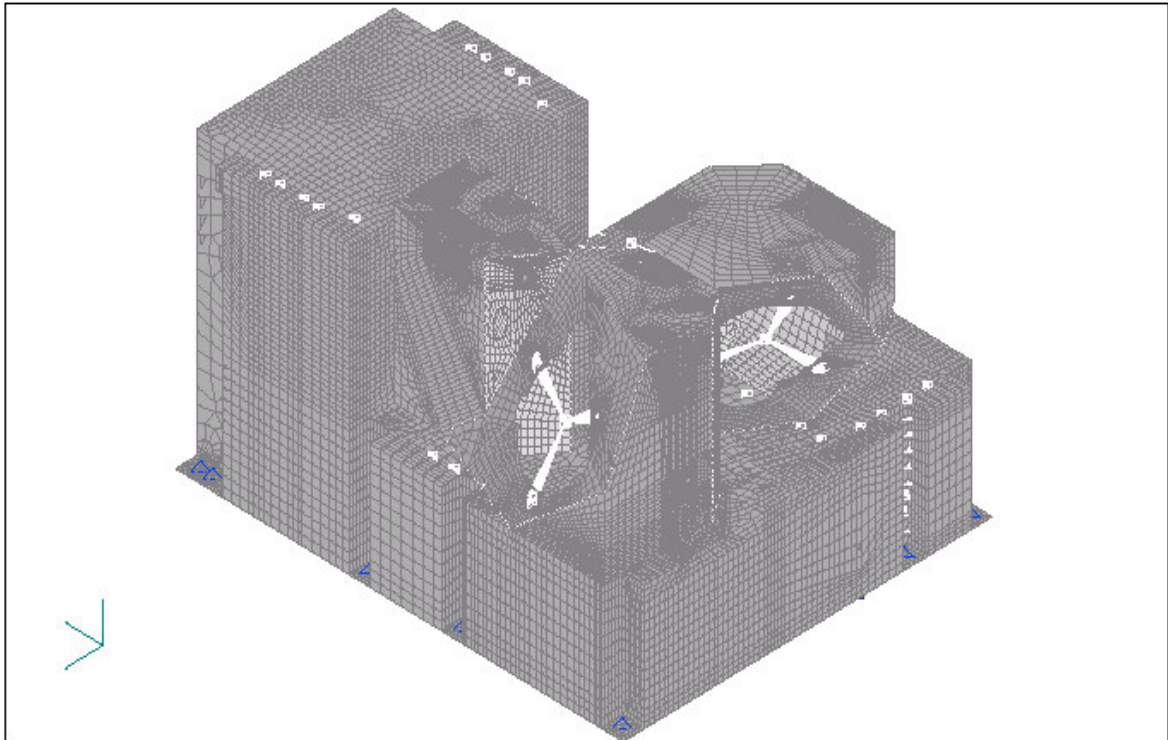


Figura 5.27 - Modello FEM dell'EPSA 3TC

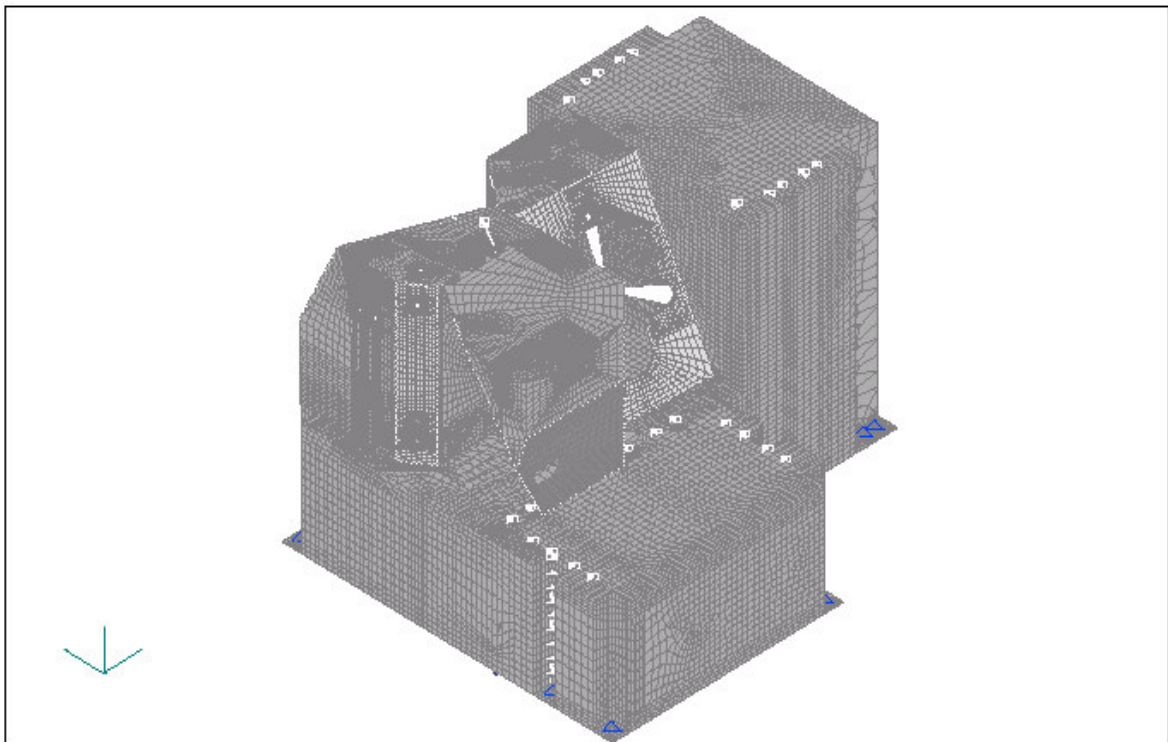


Figura 5.28 - Modello FEM dell'EPSA 3TC

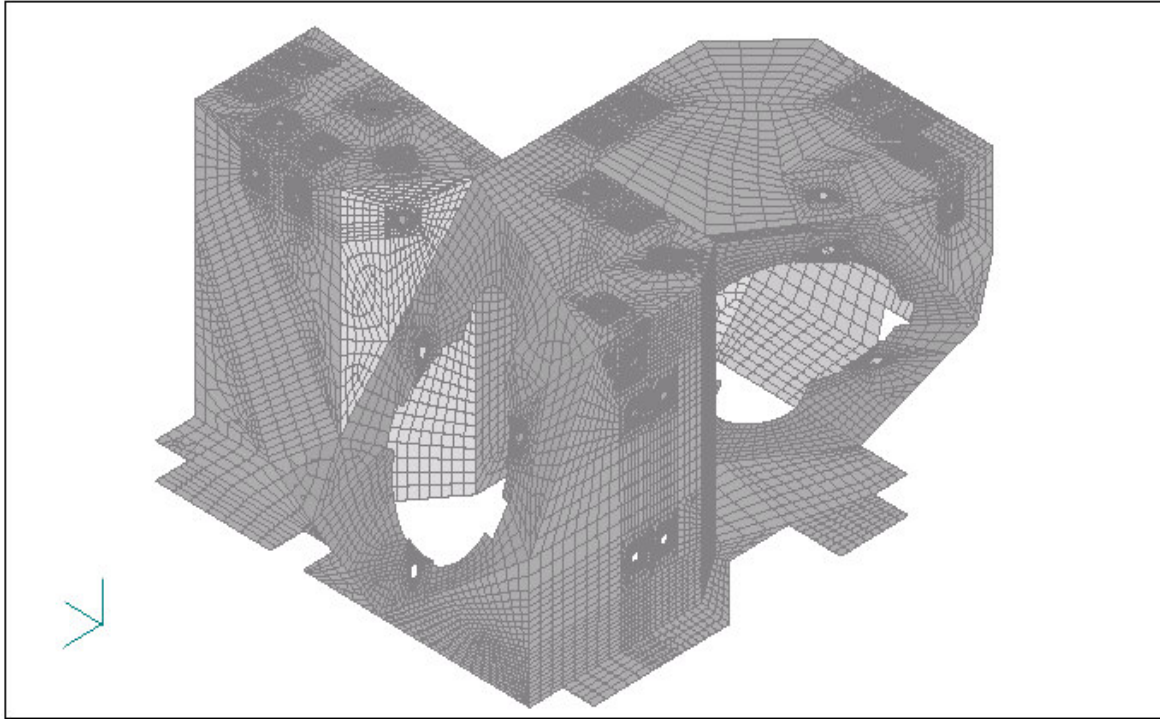


Figura 5.29- Modello FEM della struttura dei TA (3TC)

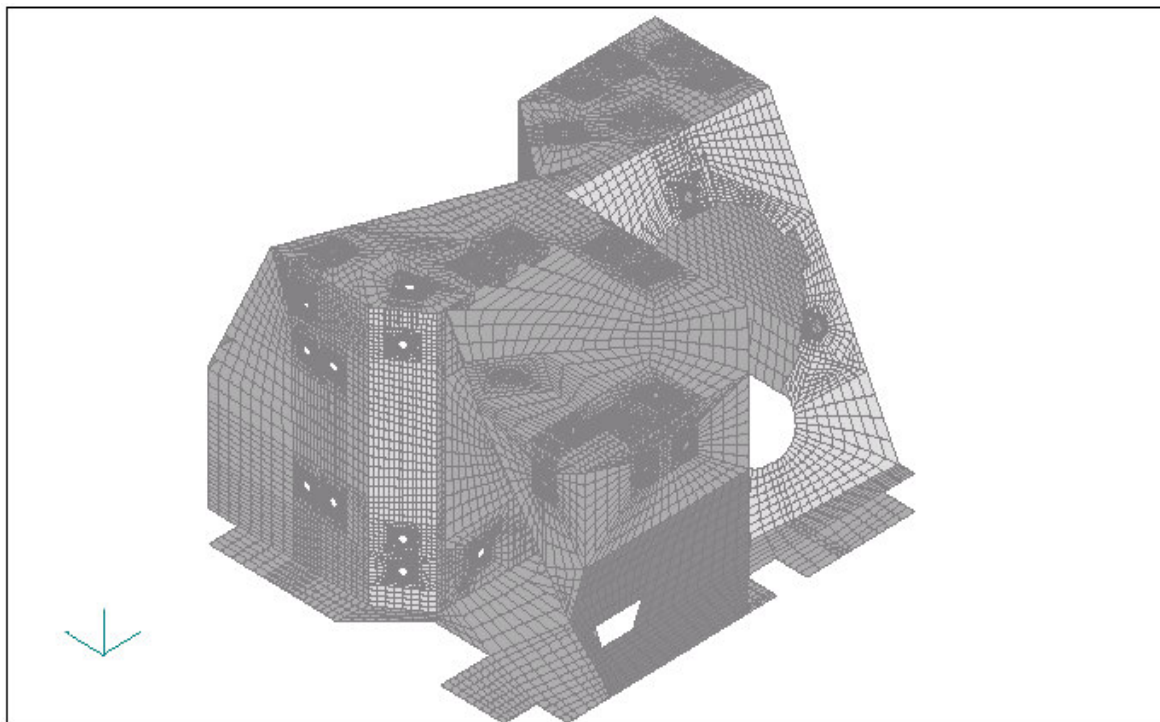


Figura 5.30- Modello FEM della struttura dei TA (3TC)

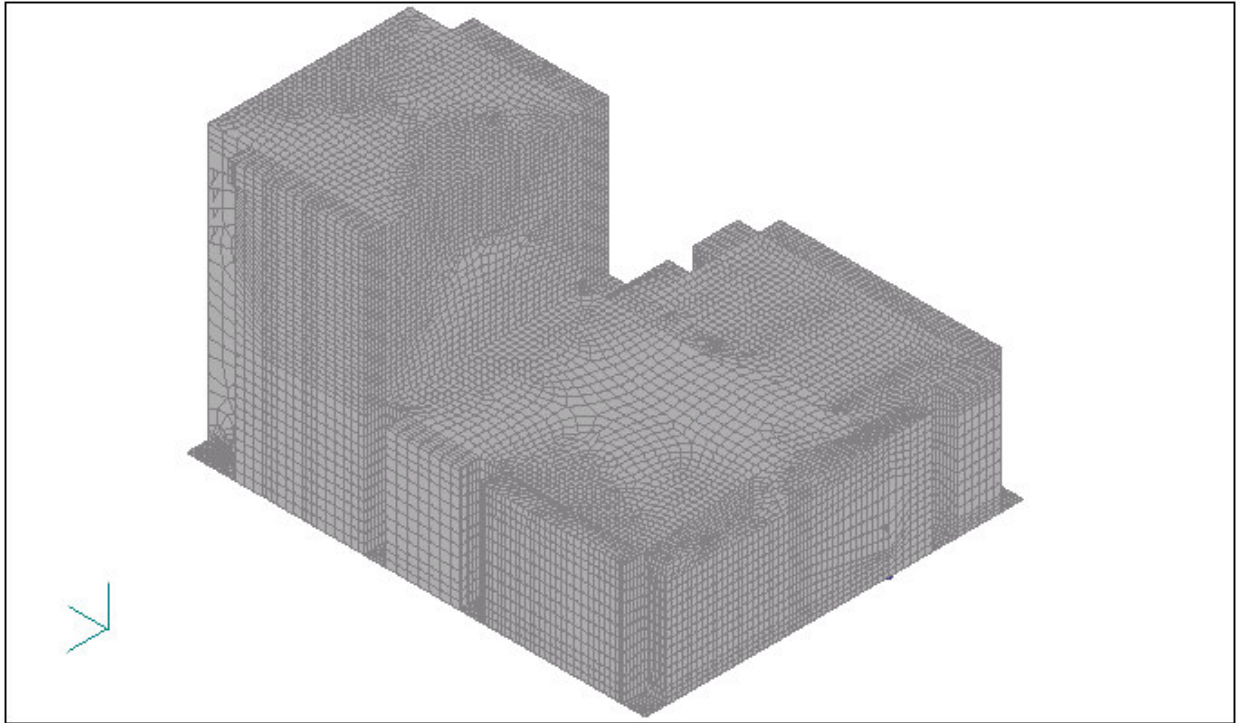


Figura 5.31- Modello FEM della struttura della PPCU (3TC)

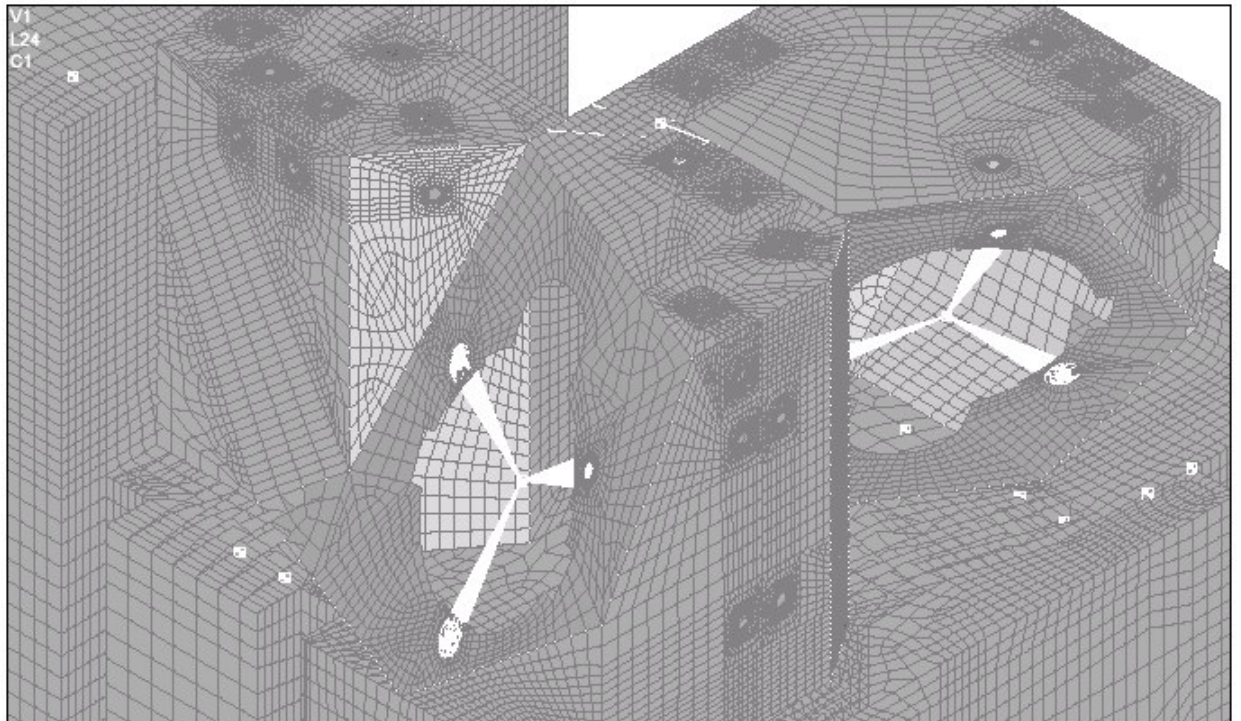


Figura 5.32- Dettaglio dei TA

5.10 Verifiche del modello 3TC

Anche in questo caso oltre alle verifiche imposte dalle specifiche sono stati effettuati i cosiddetti “Preprocessor Checks” consistenti nell’esame visuale, nella verifica degli elementi e nella verifica delle proprietà ponderali.

Lo scopo delle procedure di verifica è quello di assicurare che il modello sia coerente dal punto di vista matematico e che non contenga errori grossolani.

Sul significato delle verifiche si è già detto nel corrispondente paragrafo del modello 2TC e ad esso si rimanda (paragrafo “**5.5 Verifiche del modello 2TC**” pagina 87).

L’esame visuale permette la verifica della forma e delle dimensioni generali dell’oggetto, mentre la verifica degli elementi dà informazioni su quantità come il rapporto di forma o gli angoli caratteristici degli elementi stessi.

Per quanto concerne la verifica delle proprietà ponderali si ricorda che la modellazione FEM e le ipotesi fatte comportano inevitabilmente un errore nella distribuzione delle masse e nelle relative proprietà inerziali delle strutture.

Le tabelle seguenti riassumono i valori della massa, la posizione del centro di gravità e il tensore d’inerzia rispetto al sistema dell’EPSA, per i modelli CAD e FEM.

MASS (Kg)		
9.598		
CENTRE OF GRAVITY (m) WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
0.0823	0.1294	0.0584
MOMENTS OF INERTIA TENSOR AT COG WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
$\begin{pmatrix} I_{XX} & I_{XY} & I_{XZ} \\ I_{YX} & I_{YY} & I_{YZ} \\ I_{ZX} & I_{ZY} & I_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.0314e-01 & -3.863e-04 & -6.5355e-03 \\ -3.863e-04 & 6.7347e-02 & -9.60722e-04 \\ -6.5355e-03 & -9.60722e-04 & 9.6379e-02 \end{pmatrix} \cdot \text{Kg} \cdot \text{m}^2$		

Tabella 5.29- Proprietà del modello CAD 3TC

MASS (Kg)		
9.048		
CENTRE OF GRAVITY (m) WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
0.00813648	0.125747	0.060999
MOMENTS OF INERTIA TENSOR AT COG WITH RESPECT TO X _{EPSA} Y _{EPSA} Z _{EPSA}		
$\begin{pmatrix} I_{XX} & I_{XY} & I_{XZ} \\ I_{YX} & I_{YY} & I_{YZ} \\ I_{ZX} & I_{ZY} & I_{ZZ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.12431e-01 & -1.174e-03 & 5.1826e-03 \\ -1.174e-03 & 7.5875e-02 & 8.4045e-03 \\ 5.1826e-03 & 8.4045e-03 & 1.00658e-01 \end{pmatrix} \cdot \text{Kg} \cdot \text{m}^2$		

Tabella 5.30- Proprietà del modello FEM 3TC

La differenza nel tensore d'inerzia è in larga parte attribuibile alle assunzioni fatte riguardo le schede dell'elettronica; si ritiene comunque, che per gli scopi di una analisi preliminare, tali ipotesi siano accettabili.

5.11 Verifiche matematiche del modello 3TC

Il sistema di riferimento usato per la rappresentazione dei risultati è quello dell'EPSA: $[X,Y,Z]_{EPSA}$.

5.11.1 Verifica statica (1g check)

Con il modello rigidamente fissato alla sua interfaccia si è applicata una accelerazione di 1g lungo ognuno dei tre assi di riferimento del satellite.

La somma delle forze di reazione all'interfaccia, lungo gli assi di riferimento dell'EPSA, è stata confrontata con la massa del modello calcolata da Nastran moltiplicata per 1g.

La massa calcolata da Nastran è pari a 9.048 Kg; mentre nelle tabelle seguenti sono riportati i valori calcolati delle reazioni d'interfaccia e il risultato del confronto.

TYPE LOAD	T1 [N]	T2 [N]	T3 [N]	R1 [Nm]	R2 [Nm]	R3 [Nm]
FX	-8,8766E+01	----	----	----	1,9169E+00	3,9355E+00
FY	----	-8,8766E+01	----	5,3152E+00	----	0,0000E+00
FZ	----	----	-8,8766E+01	-1,1142E+01	0,0000E+00	----
MX	----	----	----	4,1634E-20	----	----
MY	----	----	----	----	-2,9326E-02	----
MZ	----	----	----	----	----	4,0861E-03
TOTALS	-8,8766E+01	-8,8766E+01	-8,8766E+01	-5,8272E+00	1,8876E+00	3,9396E+00

Tabella 5.31- Reazioni d'interfaccia

Resultant	Total value [N]	Model mass·g [N]	Margin %
FX	-8,8766E+01	8,8766E+01	3,06E-06
FY	-8,8766E+01	8,8766E+01	3,06E-06
FZ	-8,8766E+01	8,8766E+01	3,06E-06

Tabella 5.32- Risultati della verifica statica

Poiché è ammesso un margine dello 1%, il modello rispetta le richieste delle specifiche tecniche.

5.11.2 Verifica dinamica

Dopo aver svincolato il modello (vincoli nulli) i suoi nodi d'interfaccia sono stati collegati tra loro con elementi rigidi¹³; a questo punto è stata eseguita un'analisi modale ("free-free modal analysis") per determinare:

- Sei modi rigidi di vibrazione,
- L'assenza di meccanismi,
- Le masse effettive dei modi di vibrazione fino ai 1000 HZ.

I risultati sono dati nella Tabella 5.34 e nella Tabella 5.35, che sono riportate a pagina 117.

Per il significato di queste verifiche e l'interpretazione dei valori contenuti nelle tabelle, si rimanda a quanto detto a proposito della precedente configurazione.

Anche in questo caso si riconoscono solo sei modi rigidi e nessun cinematismo.

I cosiddetti "ground checks" sull'energia di deformazione residua sono stati fatti su tutti i set di nodi e sono di seguito riportati:

Residual Strain Energy relative to Stiffness Matrix Reduction at [Joule]				
Direction	G Set	N Set	N+AUTOSPC Set	F Set
1	1,1945E-05	1,4349E-05	1,4349E-05	1,4349E-05
2	2,0493E-05	2,2037E-05	2,2037E-05	2,2037E-05
3	1,6166E-05	1,1108E-05	1,1108E-05	1,1108E-05
4	9,8976E-08	3,4481E-08	2,2084E-08	2,2084E-08
5	5,7674E-07	4,1114E-07	6,9189E-03	6,9189E-03
6	1,1112E-06	1,2408E-06	1,8858E-03	1,8858E-03

Tabella 5.33- Energia di deformazione residua

I valori evidenziati in grigio, eccedono il massimo ammesso 10^{-3} Joule.

Data la bassa entità del superamento del limite, si è ritenuto che il modello FEM della configurazione 3TC fosse soddisfacente; o che almeno lo fosse per le esigenze della fase preliminare del progetto.

Quindi anche questa serie di verifiche è stata considerata superata.

¹³ Equivale a montare la struttura su un telaio rigido.

Andisi meccaniche

Mode no.	Frequency (Hz)	TX	TY	TZ
1	5,0361E-04	8,1720E-01	9,7166E-01	2,5814E-01
2	2,9970E-04	3,7534E+00	2,4736E+00	2,6298E-02
3	2,3868E-04	9,2425E-02	1,4330E+00	3,8191E+00
4	7,2103E-05	9,1014E-04	2,4587E+00	2,6534E-01
5	4,3430E-04	4,3712E+00	1,3175E+00	2,2847E-01
6	4,8340E-04	1,3436E-02	3,9407E-01	4,4512E+00
7	4,3719E+02	2,9774E-28	8,3911E-29	1,1645E-25
8	5,3909E+02	3,2359E-26	1,9294E-25	2,3885E-25
9	5,4120E+02	8,9064E-29	4,1420E-26	2,0944E-26
10	6,1768E+02	1,3468E-25	6,3181E-25	8,1085E-25
11	6,9695E+02	1,8530E-26	2,1125E-26	2,5855E-28
12	7,0889E+02	1,2899E-26	3,9455E-25	2,1710E-25
13	7,2585E+02	2,3140E-26	1,7001E-25	4,4642E-26
14	7,4086E+02	9,4583E-26	4,9016E-25	3,5046E-25
15	7,9282E+02	3,3321E-26	6,5808E-25	8,2332E-26
TOTAL		9,0485E+00	9,0485E+00	9,0485E+00

Tabella 5.34- Massa effettiva per le traslazioni

Mode no.	Frequency (Hz)	RX	RY	RZ
1	5,0361E-04	4,8106E-11	1,8237E-02	1,1036E-01
2	2,9970E-04	4,8767E-03	2,6736E-03	3,4115E-02
3	2,3868E-04	3,4948E-02	1,6601E-06	1,7499E-02
4	7,2103E-05	4,4563E-02	1,1128E-05	2,3198E-03
5	4,3430E-04	1,1220E-02	8,3291E-03	2,0988E-02
6	4,8340E-04	3,9235E-02	5,6925E-02	6,0512E-03
7	4,3719E+02	7,9872E-08	8,0516E-06	7,8758E-09
8	5,3909E+02	9,1019E-04	1,7382E-05	1,8281E-05
9	5,4120E+02	1,1866E-05	3,8745E-05	2,1282E-06
10	6,1768E+02	7,9431E-04	1,4521E-05	4,0184E-03
11	6,9695E+02	3,3230E-04	5,6950E-04	6,6206E-05
12	7,0889E+02	4,2777E-07	2,3145E-05	1,4909E-04
13	7,2585E+02	1,4083E-03	6,4038E-04	1,6455E-04
14	7,4086E+02	4,3419E-03	2,4179E-03	2,5465E-04
15	7,9282E+02	1,2218E-03	3,1514E-05	1,7707E-03
TOTAL		1,4386E-01	8,9939E-02	1,9778E-01

Tabella 5.35- Massa effettiva per le rotazioni

5.12 Risultati dell'analisi modale 3TC

L'analisi modale è stata effettuata fissando rigidamente l'EPSA alla sua interfaccia col satellite; come richiesto alle specifiche.

Questa condizione al contorno si traduce, nell'analisi FEM, nell'applicazione di un vincolo di spostamento nullo ai nodi d'interfaccia (nulli tutti i gradi di libertà del nodo); in particolare è stato applicato ai nodi situati nell'intersezione tra l'asse delle viti di fissaggio e il piano d'interfaccia col satellite.

Nelle tabelle seguenti sono riportate le prime venti frequenze proprie e le corrispondenti masse effettive sia per le traslazioni che le rotazioni.

Il sistema di riferimento usato è quello principale dell'EPSA.

Era richiesto che il primo modo proprio di vibrazione si manifestasse oltre i 400 Hz; come risulta dalle tabelle questa condizione è soddisfatta.

Si può quindi concludere che la struttura degli EPSA è sufficientemente rigida per gli scopi previsti.

I modi propri con frequenza inferiore a 600 Hz sono illustrati nelle figure da pagina 120 a pagina 123.

La prima frequenza naturale (436.5 Hz) è associata allo spostamento dello schermo interno della struttura di supporto dei TA, Figura 5.33.

La seconda (497.64 Hz) provoca la vibrazione di un TA e ancora dello schermo interno della struttura di supporto dei TA, Figura 5.34 e Figura 5.35.

La terza (504.59 Hz) determina un modo di vibrazione più complesso che coinvolge la vibrazione di un lato della struttura di supporto dei TA e dello schermo interno, Figura 5.36 e Figura 5.37.

Alla quarta (538.86 Hz) sono associate deformazioni del "Top Cover X1" del supporto della PPCU, Figura 5.38.

Infine la quinta (592.09 Hz) comporta oscillazioni della struttura di supporto TA, Figura 5.39 e Figura 5.40.

Andisi meccaniche

Mode no.	Frequency (Hz)	TX (kg)	TY (kg)	TZ (kg)
1	4,3650E+02	6,5260E-04	1,4282E-03	6,3024E-02
2	4,9764E+02	1,9393E-01	1,6473E-01	1,6621E+00
3	5,0459E+02	5,0604E-01	1,7443E+00	1,5797E+00
4	5,3886E+02	8,2532E-02	5,0430E-02	4,9614E-06
5	5,9209E+02	1,1010E-01	2,5025E-01	2,4630E+00
6	6,6193E+02	1,3473E+00	1,3566E-01	1,3499E-01
7	6,9248E+02	1,3016E-01	7,6342E-03	2,3309E-02
8	7,0940E+02	4,2092E-02	6,4156E-01	1,2864E-02
9	7,1961E+02	2,9971E-02	1,0926E-01	3,6646E-02
10	7,3553E+02	6,8635E-04	2,0609E-01	4,3803E-03
11	7,6570E+02	1,0798E-01	5,6452E-04	2,6492E-04
12	8,0509E+02	2,0991E-01	9,0005E-03	4,8864E-02
13	8,4287E+02	8,3559E-01	1,0079E+00	1,0641E-02
14	8,7614E+02	1,9500E-01	9,6993E-04	2,8584E-03
15	8,7834E+02	1,4700E-02	6,6222E-03	4,7801E-03
16	9,2521E+02	1,2298E+00	9,5606E-01	6,3733E-04
17	9,3913E+02	9,0559E-03	3,2191E-03	5,1054E-04
18	9,4083E+02	7,6722E-03	2,0881E-02	1,2698E-03
19	9,8047E+02	6,2188E-03	8,9471E-03	9,4420E-04
20	9,8311E+02	1,5805E-01	5,9666E-02	2,8392E-03

Tabella 5.36- Masse effettive per le traslazioni

Mode no.	Frequency (Hz)	RX (kg·m ²)	RY (kg·m ²)	RZ (kg·m ²)
1	4,3650E+02	3,1764E-04	4,6523E-04	8,1825E-07
2	4,9764E+02	4,6079E-03	6,5046E-03	7,7135E-04
3	5,0459E+02	8,8823E-03	9,2343E-03	5,1619E-03
4	5,3886E+02	1,6295E-05	4,1657E-04	2,2963E-03
5	5,9209E+02	3,1937E-02	1,8548E-02	4,3271E-03
6	6,6193E+02	1,8743E-02	2,6537E-03	2,0154E-03
7	6,9248E+02	5,3166E-03	3,5793E-03	2,1621E-03
8	7,0940E+02	1,5246E-07	6,0166E-04	5,3333E-03
9	7,1961E+02	1,3089E-02	1,5602E-03	2,3103E-03
10	7,3553E+02	2,8761E-03	3,3476E-04	4,4336E-03
11	7,6570E+02	8,3058E-03	7,1779E-05	4,8694E-03
12	8,0509E+02	4,3282E-03	8,9794E-04	1,3535E-04
13	8,4287E+02	2,1743E-04	5,0395E-05	4,9764E-02
14	8,7614E+02	1,0905E-04	5,1559E-04	8,1787E-03
15	8,7834E+02	6,9422E-05	5,8648E-04	5,6219E-06
16	9,2521E+02	3,6705E-05	1,0370E-03	2,1487E-02
17	9,3913E+02	1,3880E-05	4,2386E-05	3,2571E-05
18	9,4083E+02	3,3950E-07	6,2695E-07	1,0559E-03
19	9,8047E+02	9,9372E-06	1,5977E-04	6,9539E-04
20	9,8311E+02	5,6835E-05	5,1025E-04	1,3485E-03

Tabella 5.37- Masse effettive per le rotazioni

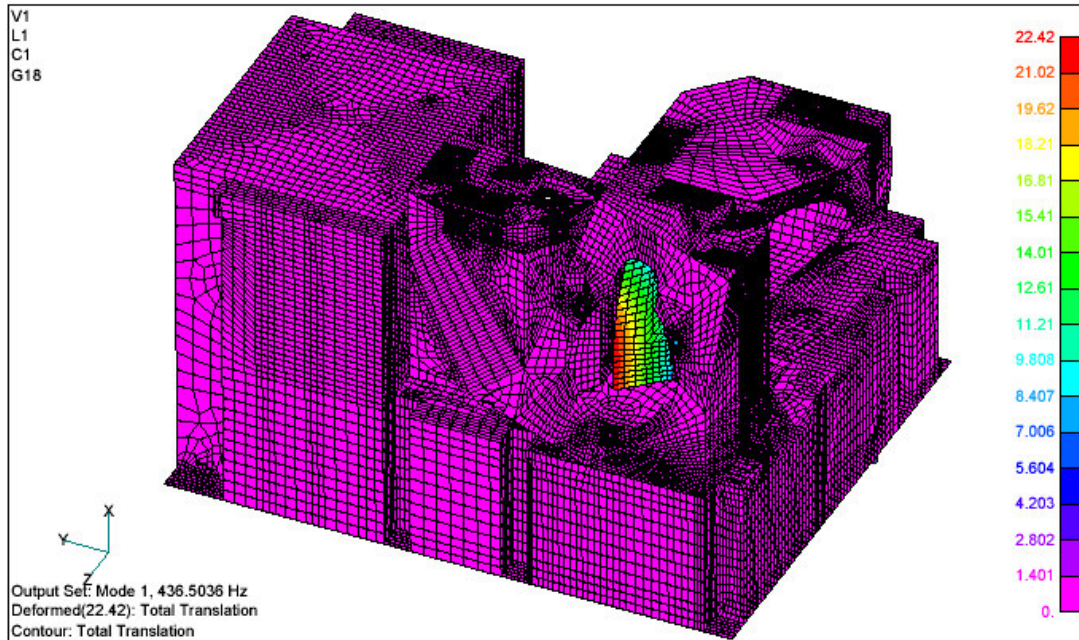


Figura 5.33- Modo proprio associato alla 1^a frequenza di vibrazione

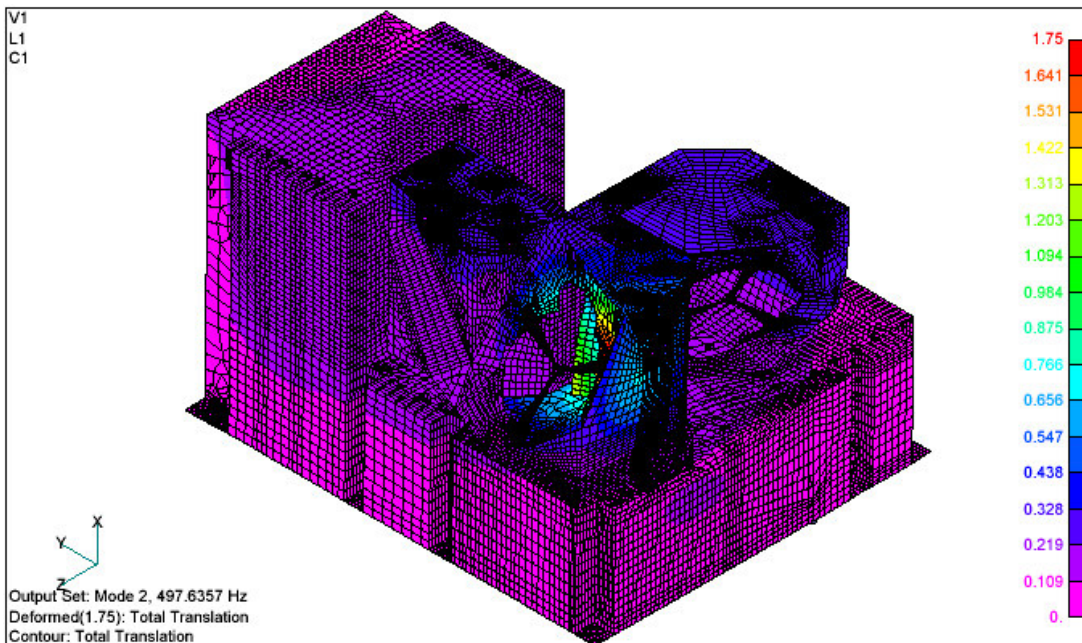


Figura 5.34- Modo proprio associato alla 2^a frequenza di vibrazione

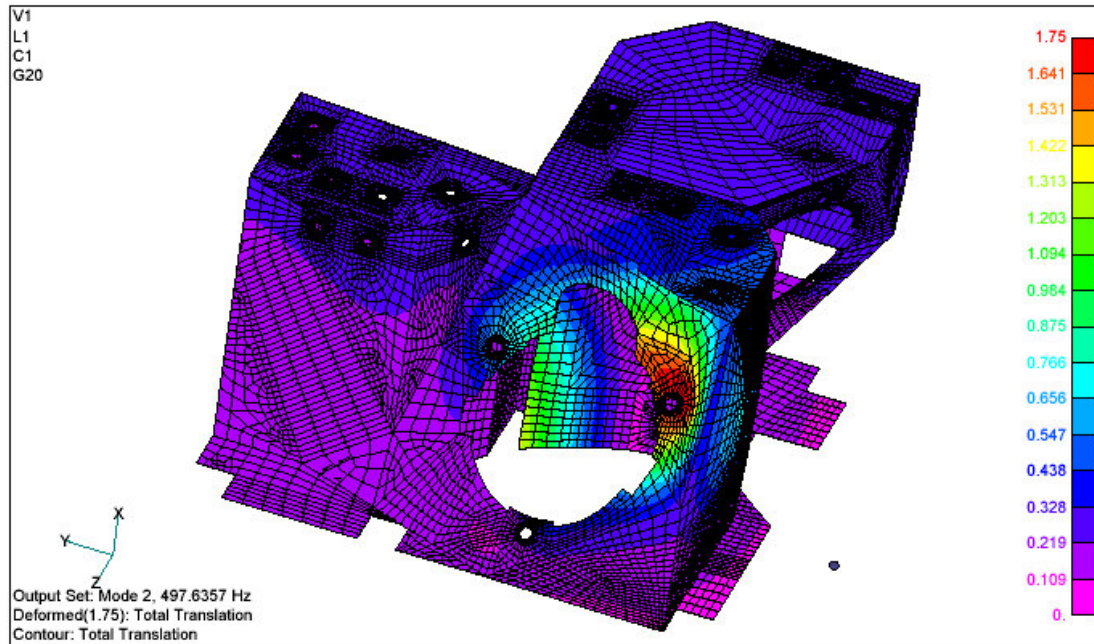


Figura 5.35- Modo proprio associato alla 2ª frequenza di vibrazione

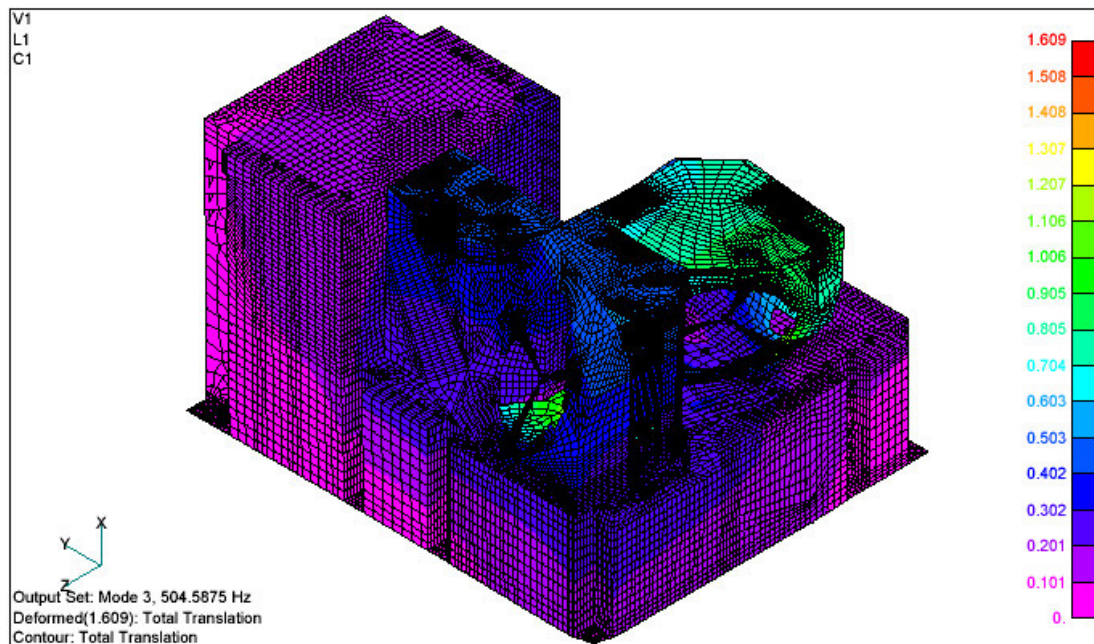


Figura 5.36- Modo proprio associato alla 3ª frequenza di vibrazione

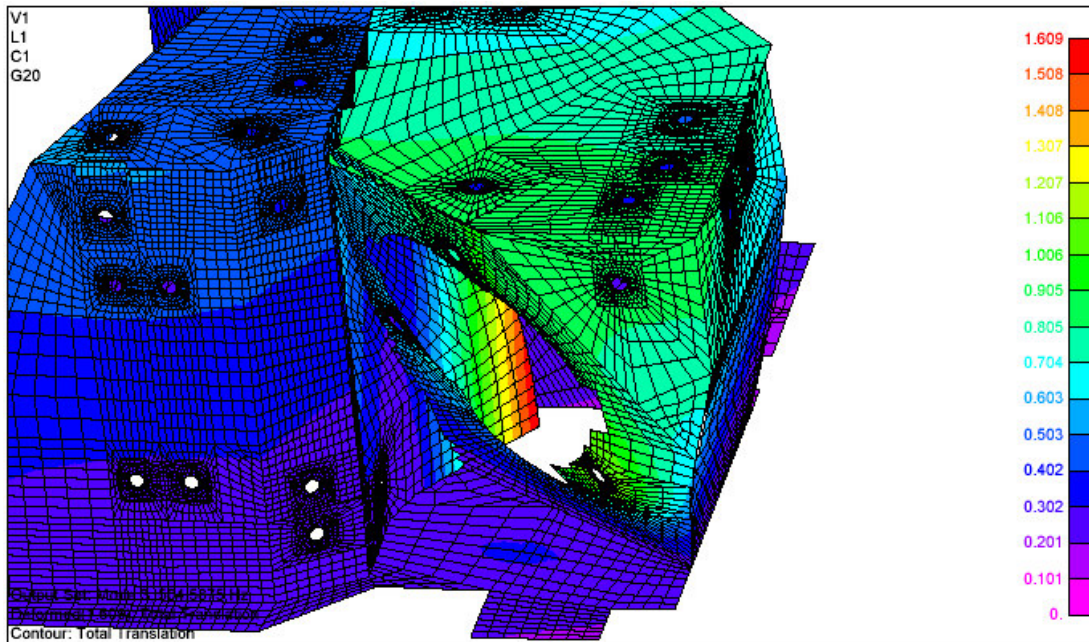


Figura 5.37- Modo proprio associato alla 3^a frequenza di vibrazione

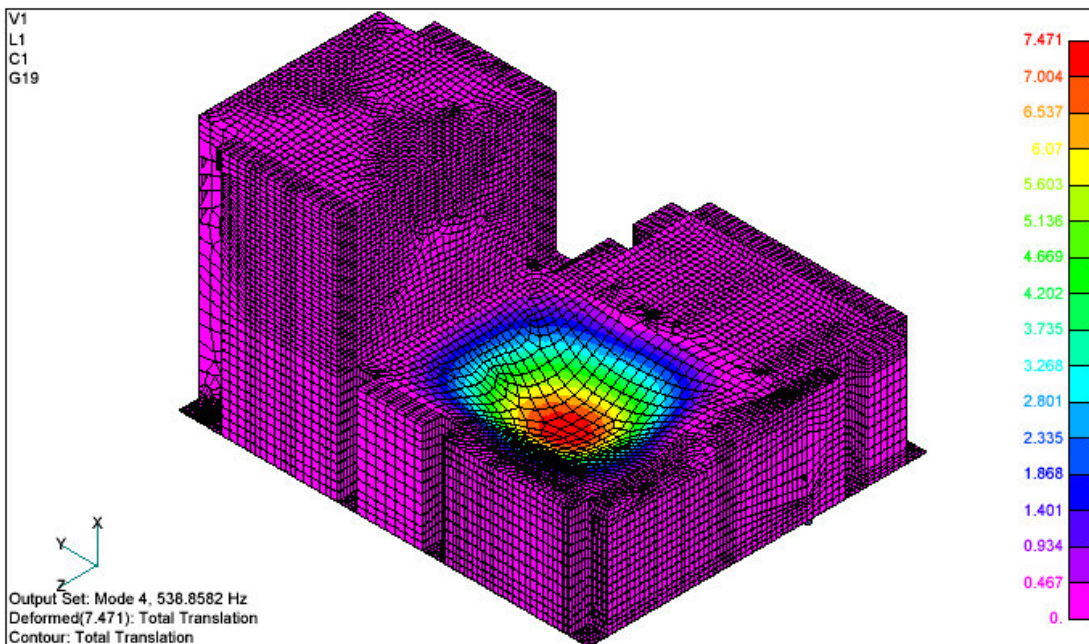


Figura 5.38- Modo proprio associato alla 4^a frequenza di vibrazione

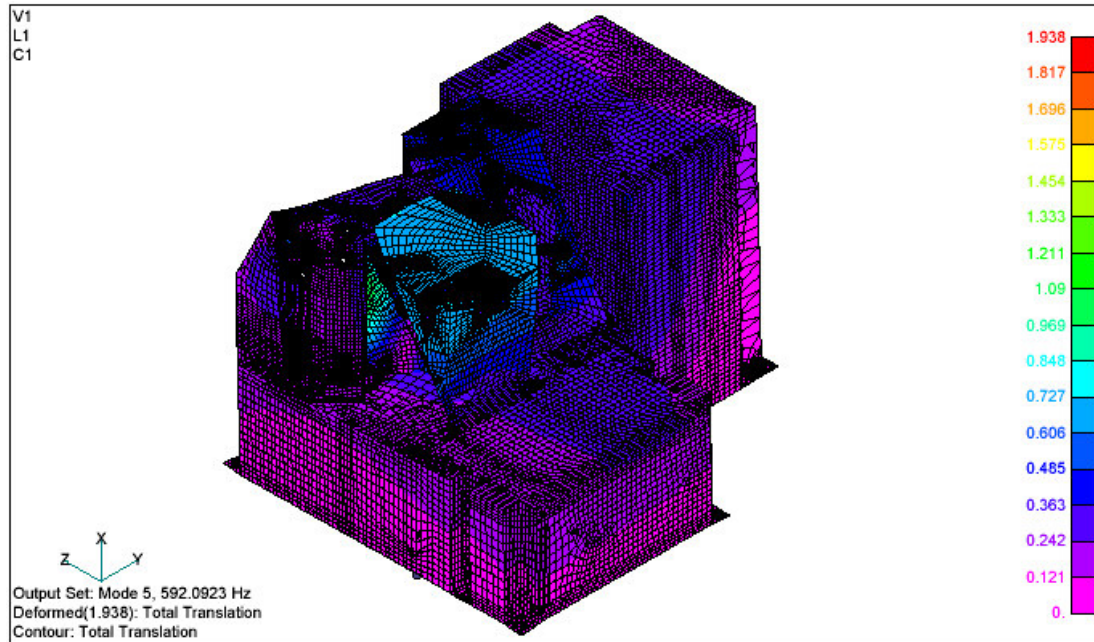


Figura 5.39- Modo proprio associato alla 5ª frequenza di vibrazione

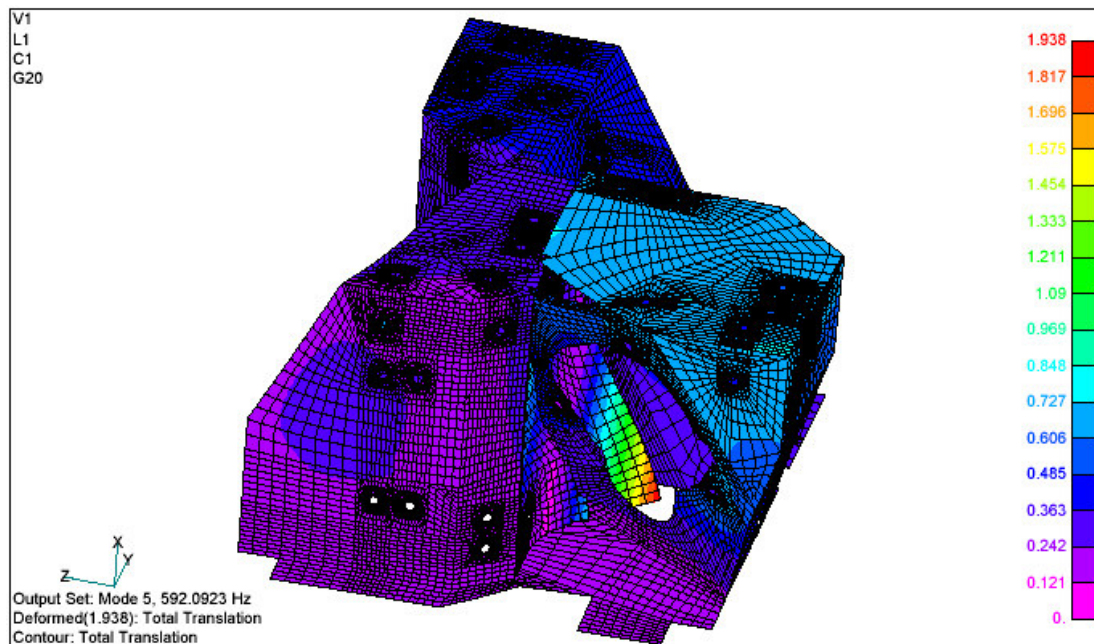


Figura 5.40- Modo proprio associato alla 5ª frequenza di vibrazione

5.13 Risultati delle analisi statiche 3TC

Anche queste analisi sono state condotte fissando rigidamente l'EPSA all'interfaccia col satellite, tramite vincoli di spostamento nullo posti ai nodi d'interfaccia.

Per le caratteristiche del materiale si è fatto riferimento a quelle riportate nella seguente tabella:

Material	σ_{ty} [MPa]	σ_{tu} [MPa]	E [GPa]	G [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]
Al7075-T73	386	455	71.7	(¹)	0.33	2796
Al6061-T6	227	255	68.3	(¹)	0.33	2713
AISI304	215	505	200.0	(¹)	0.29	8000
⁽¹⁾ G=E/(2(1+ ν))						

Tabella 5.38- Proprietà dei materiali

In accordo con quanto previsto dalle linee guida per la progettazione meccanica sviluppate dell'ESA e contenute nel documento "ECSS-E-30 Part 2A", alle tensioni sono stati applicati i seguenti fattori di sicurezza:

Fattore di sicurezza per il carico di snervamento	FOS _y = 1.25
Fattore di sicurezza per il carico ultimo	FOS _u = 1.5

Tabella 5.39- Fattori di sicurezza

Per tutte le analisi è stato poi verificato che fossero positivi i **margini di sicurezza** definiti dalle formule:

$$MOS_y = \frac{\sigma_{ty}}{\sigma \cdot FOS_y} - 1 \quad MOS_u = \frac{\sigma_{tu}}{\sigma \cdot FOS_u} - 1$$

dove σ è la tensione calcolata, σ_{ty} la tensione di snervamento e σ_{tu} la tensione di rottura del materiale.

5.13.1 Carichi quasi statici e carichi dovuti a vibrazioni casuali

Come già fatto per la configurazione 2TC, la analisi statiche sono state condotte secondo il metodo di Miles, [5], che permette di combinare contemporaneamente le azioni dovuta ai carichi quasi statici con quelle dovute alle vibrazioni casuali.

Si ritiene comunque utile riportare integralmente la procedura adottata, invece che limitarsi alla sola descrizione dei risultati ottenuti.

In base ai dati raccolti, sulle gravose condizioni di lancio cui saranno sottoposti gli EPSA, è previsto che debbano resistere a carichi quasi statici di $\pm 30\text{ g}$ lungo i loro assi di riferimento e che i carichi variabili casualmente tra i 20 e i 2000 Hz abbiano la **densità spettrale di potenza**¹⁴ definita in Tabella 5.40 e schematizzata in Figura 5.41.

Random Frequency [Hz]	Qualification PSD [g^2/Hz]	Acceptance PSD [g^2/Hz]
20-100	+3 db/oct	+3 db/oct
100-400	0,279*	0,179**
400-2000	-3 db/oct	-3 db/oct
Duration	2,5 min/axis	1 min/axis
* $0,1 \cdot (M+20)/(M+1)$ ** $0,064 \cdot (M+20)/(M+1)$ with M equal to EPSA Mass in Kg		

Tabella 5.40– PSD delle vibrazioni casuali (3TC)

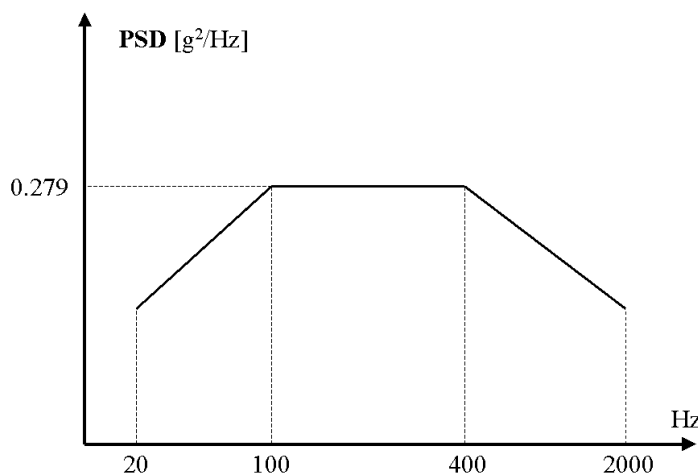


Figura 5.41- Andamento della PSD (3TC)

¹⁴ La Power spectral density o PSD in genere è misurata in g^2/Hz anziché in W/Kg .

Relativamente all'andamento della PSD il metodo di Miles implica che vengano calcolati per ogni direzione i **fattori dei carichi delle vibrazioni casuali** ($RVL F_{(x,y,z)}$).

Questo è stato fatto con la seguente procedura:

1. Con l'analisi modale sono state calcolate le masse effettive traslazionali associate ai primi 40 modi propri di vibrazione (le prime 20 sono riportate in Tabella 5.36);
2. Il Random Vibrations Load Factor per ogni modo è stato calcolato con la relazione di Miles:

$$RVL F_i = 3 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot Q \cdot f_i \cdot PSD_i}$$

dove Q è il fattore di amplificazione (assunto pari a 10 per l'assenza di dati sperimentali), f_i l' i -esima frequenza di vibrazione.

PSD_i è l' i -esima densità spettrale di potenza letta nella Tabella 5.40 o nel corrispondente diagramma.

Il valore esatto della PSD corrispondente alla frequenza f_i , nel caso in cui si fosse trovato in un tratto della curva con pendenza "P", è stato interpolato con la relazione:

$PSD_i = PSD_1 (f_i/f_1)^{0,3322P}$, dove il pedice 1 si riferisce alla più bassa frequenza di cui è nota la PSD;

3. I vari $RVL F_i$ sono stati poi moltiplicati per le corrispondenti masse effettive $EFFM_i$ e divisi per la massa totale, ottenendo per ogni direzione un'accelerazione normalizzata:

$$RVL F_{mw} = \frac{RVL F_i \cdot EFFM_i}{M};$$

4. Infine per ogni direzione è stata calcolato il fattore dei carichi delle vibrazioni casuali $RVL F_{(x,y,z)}$ con la relazione:

$$RVL F_{(x,y,z)} = \sqrt{\sum_i^n RVL F_{MW}^2}.$$

I valori ottenuti per le $RVL F_{(x,y,z)}$ sono riportati in Tabella 5.41.

Random Vibrations Load Factor	Value [g's]
$RVL F_{XEPSA}$	61,96
$RVL F_{YEPSA}$	60,62
$RVL F_{ZEPSA}$	86,68

Tabella 5.41- Fattori di carico delle vibrazioni casuali

Combinando i fattori di carico dovuti alle vibrazioni casuali con i carichi quasi statici, secondo lo schema della Tabella 5.42, dove i $QSL_{(x,y,z)}$ indicano i carichi quasi statici (Quasi Static Loads), si ottengono 24 situazioni di carico.

Load Case	X_{EPSA}	Y_{EPSA}	Z_{EPSA}
LC 1-8	$\pm(QSL_X^2 + RVLFX^2)^{1/2}$	$\pm QSL_Y$	$\pm QSL_Z$
LC 9-16	$\pm QSL_X$	$\pm(QSL_Y^2 + RVLFY^2)^{1/2}$	$\pm QSL_Z$
LC 17-24	$\pm QSL_X$	$\pm QSL_Y$	$\pm(QSL_Z^2 + RVLFZ^2)^{1/2}$

Tabella 5.42- Schema delle combinazioni dei carichi

La Tabella 5.43 elenca i 24 casi di carico statico, cui è stato sottoposto il modello.

Lo stato di tensione nelle strutture di supporto dell'EPSA è stato valutato, come richiesto dalle specifiche del progetto, modellando l'interfaccia tra la struttura e il satellite con un singolo nodo e un vincolo rigido.

Load Condition	X_{EPSA} [g's]	Y_{EPSA} [g's]	Z_{EPSA} [g's]
LC1	+68,84	+30	+30
LC2	+68,84	+30	-30
LC3	+68,84	-30	+30
LC4	-68,84	+30	+30
LC5	+68,84	-30	-30
LC6	-68,84	+30	-30
LC7	-68,84	-30	+30
LC8	-68,84	-30	-30
LC9	+30	+67,64	+30
LC10	+30	+67,64	-30
LC11	+30	-67,64	+30
LC12	-30	+67,64	+30
LC13	30	-67,64	-30
LC14	-30	+67,64	-30
LC15	-30	-67,64	+30
LC16	-30	-67,64	-30
LC17	+30	+30	+91,73
LC18	+30	+30	-91,73
LC19	+30	-30	+91,73
LC20	-30	+30	+91,73
LC21	+30	-30	-91,73
LC22	-30	+30	-91,73
LC23	-30	-30	+91,73
LC24	-30	-30	-91,73

Tabella 5.43- Situazioni di carico

Questo schema introduce una forte semplificazione della situazione reale (in cui le reazioni d'interfaccia si distribuiscono su una regione maggiore e sono ulteriormente ridotte dalla deformazione dell'interfaccia stessa del satellite) e produce valori locali delle tensioni troppo elevati.

Per questa ragione sono stati esclusi gli sforzi nella struttura di supporto della PPCU in corrispondenza dell'interfaccia.

Per ognuno dei 24 casi è stato verificato che il margine di sicurezza fosse positivo; i più piccoli margini di sicurezza sia per la struttura di supporto dei TA che della PPCU sono riportati nella Tabella 5.44.

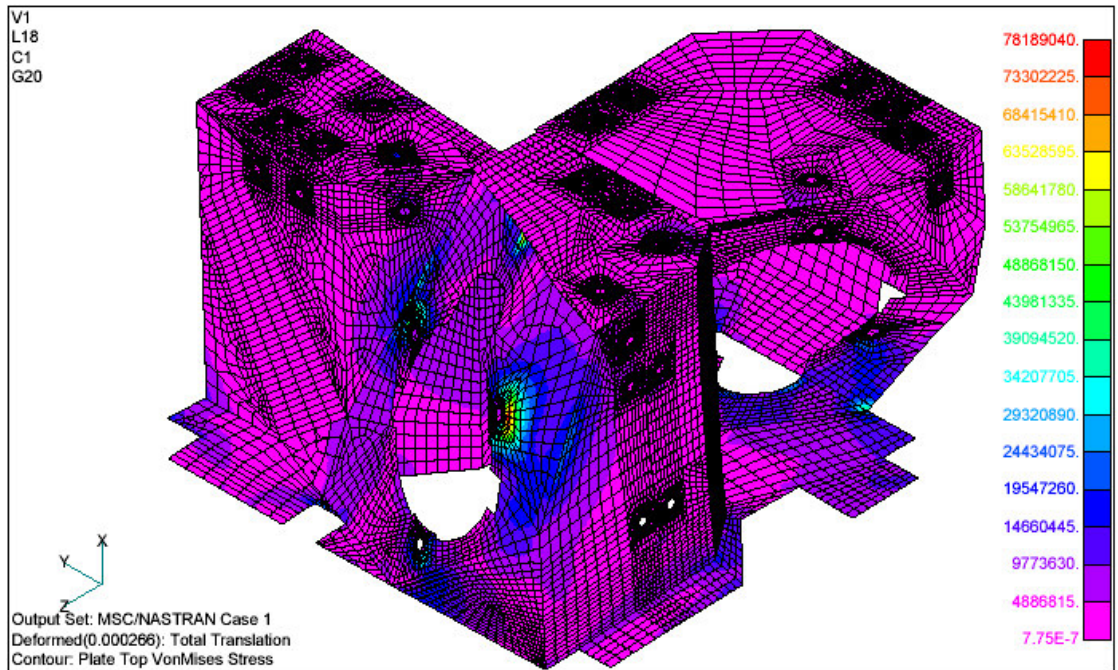
Come si può vedere, nella tabella, la struttura di supporto dell'EPSA 2TC soddisfa i requisiti di resistenza meccanica ai carichi quasi statici e alle vibrazioni casuali posti dalle specifiche di progetto.

Part	Max. Von Mises Stress Value (MPa)	LC (see Table 6.4)	Material	Allowable Stress Values		Applied FoS		Minimum MoS	
				σ_{iv} (MPa)	σ_{tu} (MPa)	FoS _y	FoS _u	MoS _y	MoS _u
TA Support Structure	78,19	17	Al6061-T6	227	255	1,25	1,5	1,32	1,17
PPCU Structure	150 ⁽¹⁾	18	Al6061-T6	227	255	1,25	1,5	0,21	0,13

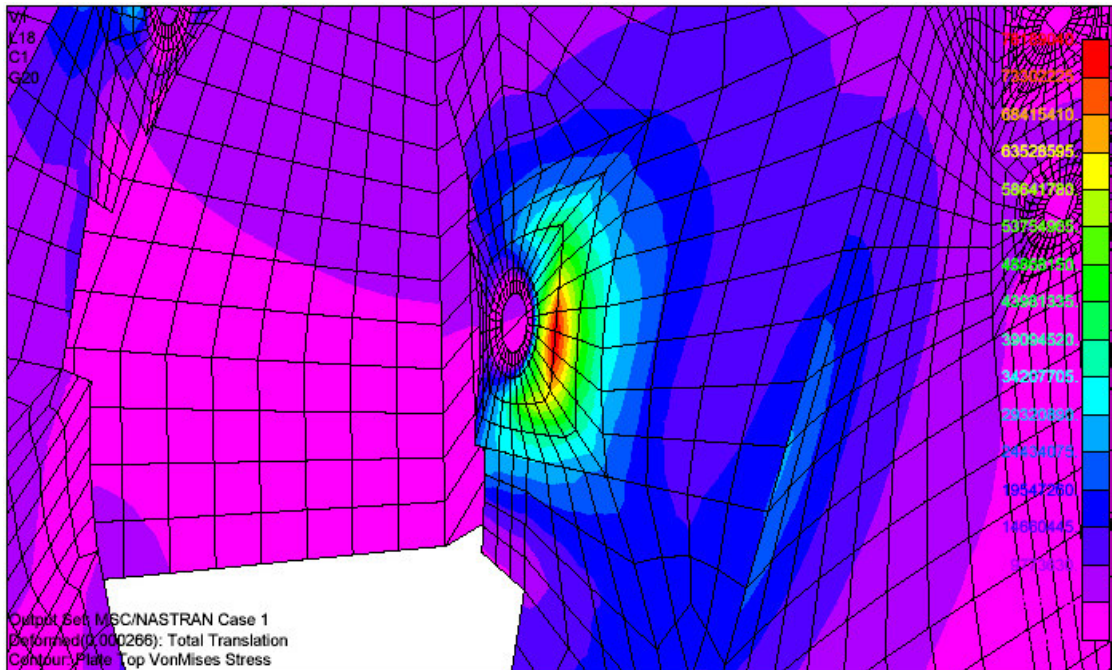
Tabella 5.44 - Risultati dell'analisi quasi-statica.

I punti in cui si verificano le peggiori condizioni di corico, sono mostrate nelle figure delle pagine successive.

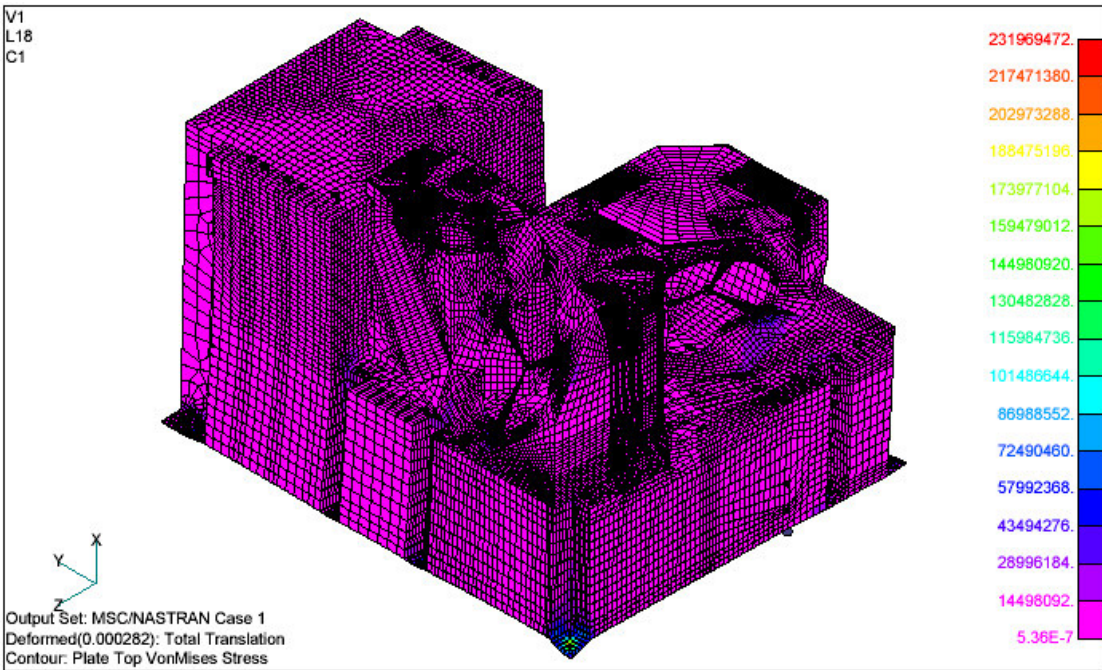
In conclusione questa analisi mostra come la struttura di supporto dell'EPSA 3TC soddisfa le specifiche di Microscope per i carichi quasi statici e per quelli delle vibrazioni casuali.



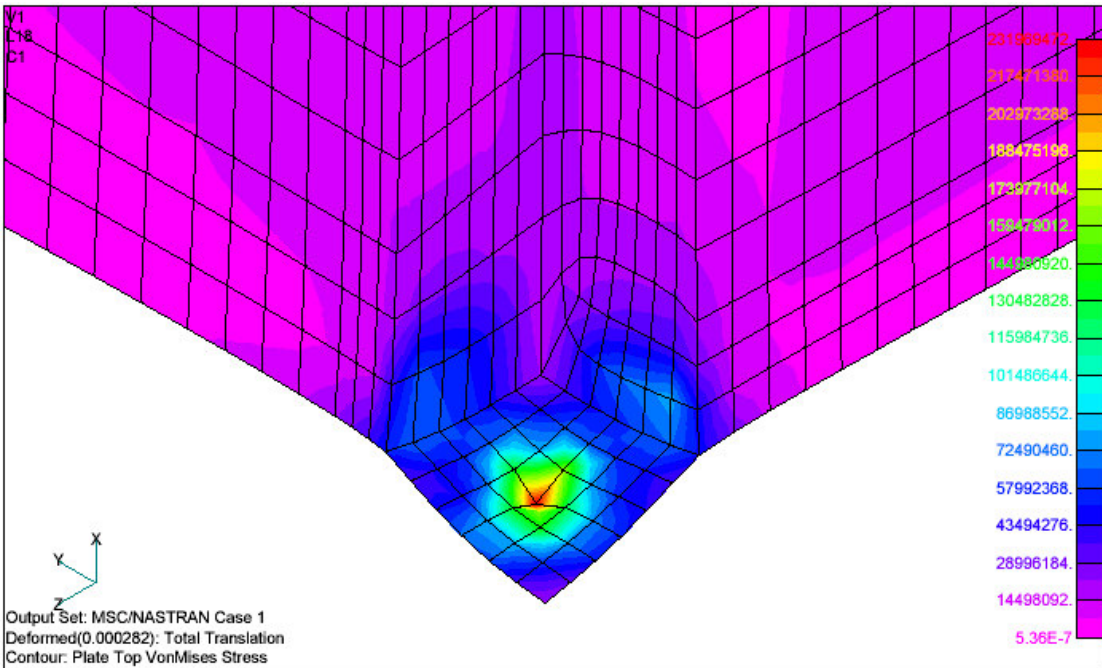
**Figura 5.42- Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 3TC.
Caso LC17 (tensioni in Pa)**



**Figura 5.43- Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 3TC.
Caso LC17 (tensioni in Pa)**



**Figura 5.44 - Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 3TC.
Caso LC18 (tensioni in Pa)**



**Figura 5.45 - Distribuzione delle tensioni di Von Mises per la configurazione 3TC.
Caso LC18 (tensioni in Pa)**

5.14 Bibliografia

- [1] G.Belingardi, Il metodo degli elementi finiti nella progettazione meccanica, Libreria editrice universitaria Levrotto & Bella, Torino, 1995.
- [2] CNES, "Specification de modelisation mecanique appliquee au µsatellite Microscope", MIC-NT-S-1-ST-76-CNS, 2002.
- [3] Alan E. Stockwell, "A Verification Procedure for MSC/NASTRAN Finite Element Models", NASA, 1995.
- [4] ESA, "Mechanical - Part 2 Structural", ECSS-E-30 Part2A, 2000.
- [5] NASA, Payload Flight Equipment Requirements and Guidelines for Safety-Critical Structures, SSP-52005B.
- [6] ALTA S.R.L., Development of Integrated Field Emission Electric Propulsion (FEEP) Cluster Systems – Cluster EM Static Analysis Report, ALTA/CL/EA-01, issue 1, 2003.
- [7] ALTA S.R.L., Development of Integrated Field Emission Electric Propulsion (FEEP) Cluster Systems – Cluster EM Modal Analysis Report, ALTA/CL/EA-03, issue 1, 2003.
- [8] ALTA S.R.L., "Criticality to shock environment of EPSA components", ALTA/MS/TN-13, 2003.
- [9] Tom Irvine, Power spectral density units: [G^2 / Hz], Vibrationdata.com Publications, 2000.
- [10] T. Irvine, An Introduction to Spectral Functions, Vibrationdata.com Publications, 1998.
- [11] T. Irvine, Integration of the Power Spectral Density Function, Vibrationdata.com Publications, 2000.
- [12] DNEPR User's Guide, Kosmotras, <http://www.kosmotras.ru>, 2001.
- [13] Indirizzo internet: <http://www.equipment-reliability.com>
- [14] Indirizzo internet: <http://www.vibrationandshock.com>
- [15] Indirizzo internet: <http://www.ingegneriastrutturale.it>

