

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI  
BOLOGNA**

---

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA**

*DIPARTIMENTO DI FISICA*

**TESI DI LAUREA**

in

**INGEGNERIZZAZIONE DI PRODOTTO**

**Analisi termo-strutturale di parte di un apparato sperimentale  
per esperimenti di fisica**

**CANDIDATO**  
Marcello Soffiatti

**RELATORE:**  
Chiar.mo Prof. Mauro Bruno

**CORRELATORI**  
Chiar.mo Prof. Alfredo Liverani  
Ing. Daniela Francia  
Ing. Marco Guerzoni

Anno Accademico 2010/2011  
Sessione I



# Indice

|   |    |
|---|----|
| 1. Introduzione.....  | 3  |
| Rivelazione dei neutroni.....                                 | 4  |
| Apparato di rivelazione.....                                  | 4  |
| Telescopio.....   | 5  |
| 2.. Strumenti di calcolo.....                                 | 7  |
| Metodo degli elementi finiti.....                             | 7  |
| Software utilizzato.....                                      | 8  |
| 3. Analisi statica strutturale.....                           | 10 |
| Contatti tra le varie parti.....                              | 11 |
| Pinball region.....   | 14 |
| Comportamento simmetrico e asimmetrico.....                   | 15 |
| 4. Generazione della mesh.....                                | 17 |
| Complessivi: tecniche generali di generazione della mesh..... | 17 |
| Tecnica della mesh comune o globale.....                      | 17 |
| Tecnica della mesh nodo a nodo.....                           | 18 |
| Mesh nodo-a-superficie e superficie-a-superficie.....         | 20 |
| Ansys: metodi impiegati per generare la mesh.....             | 21 |
| Qualità della mesh.....                                       | 22 |
| 5. F.A.Z.I.A. : Analisi strutturale di un singolo blocco..... | 26 |
| Pulizia e semplificazione della geometria originale.....      | 26 |
| Sezione anteriore comprendente i quattro moduli.....          | 31 |
| Materiali e proprietà.....                                    | 31 |
| Mesh.....   | 32 |
| Vincoli e carichi.....  | 32 |
| Risultati.....  | 33 |
| Sezione anteriore: vincolo aggiuntivo.....                    | 36 |
| Mesh.....   | 36 |
| Risultati.....  | 37 |
| Sezione anteriore: influenza della qualità della mesh.....    | 40 |
| Risultati.....  | 41 |
| Sezione posteriore: un solo supporto – primo caso.....        | 43 |
| Punto di massa.....   | 43 |
| Materiali e proprietà.....                                    | 44 |
| Mesh.....   | 44 |
| Vincoli e carichi.....  | 44 |
| Risultati.....  | 45 |
| Sezione posteriore: un solo supporto – secondo caso.....      | 48 |
| Risultati.....  | 48 |
| Sezione posteriore: caso reale.....                           | 50 |
| Materiali.....  | 50 |
| Mesh.....   | 51 |
| Vincoli.....  | 51 |
| Risultati.....  | 51 |
| Sezione posteriore: posizioni a 45°.....                      | 53 |
| Blocco inclinato a +45°.....                                  | 53 |
| Risultati.....  | 53 |
| Blocco inclinato a -45°.....                                  | 55 |
| Risultati.....  | 56 |

|  |    |
|--|----|
| 6. F.A.Z.I.A: Analisi termica di un singolo blocco.....                    | 59 |
| Ansys Workbench: problema stazionario di scambio termico in un solido..... | 59 |
| Conduktività termica.....  | 60 |
| Carichi termici.....   | 61 |
| Condizioni al contorno termiche.....                                       | 61 |
| Realizzazione del modello.....   | 62 |
| Materiali e proprietà.....   | 63 |
| Mesh.....  | 64 |
| Condizioni al contorno e carichi termici.....                              | 64 |
| Risultati.....   | 65 |
| 7. F.A.Z.I.A. : Combinazione dell'analisi termica e strutturale.....       | 68 |
| Materiali e proprietà.....   | 68 |
| Mesh.....  | 68 |
| Vincoli e carichi.....   | 69 |
| Risultati.....   | 70 |
| 8. Conclusioni.....  | 75 |
| Appendice – Corrispondenza dati sperimentali e modello termico.....        | 77 |
| Bibliografia.....  | 80 |

# 1. Introduzione

Il lavoro descritto in questa tesi è stato svolto nell'ambito della collaborazione NUCL-EX/FAZIA tra il gruppo dell'Università e la sezione dell'INFN di Bologna.

Si tratta di un'analisi agli elementi finiti, FEA (Finite Element Analysis), per valutare lo stato tensionale e deformativo di una porzione di uno strumento di rivelazione di particelle prodotte in esperimenti di fisica nucleare.

Infatti nell'aprile 2006 è nata la collaborazione internazionale FAZIA tra Italia, Francia, Spagna, Polonia per la ricerca e lo sviluppo di rivelatori di nuova generazione che abbiano prestazioni di risoluzione ed identificazione delle particelle cariche molto superiori a quelle degli apparati esistenti, in modo da poter essere utilizzati per esperimenti con fasci instabili, prodotti dagli acceleratori che sono in corso di progettazione e costruzione come FAIR presso il GSI di Darmstadt (Germania), Spiral II presso Ganil di Caen (Francia) e SPES presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

Il sistema di rivelazione adatto a questo tipo di indagini deve permettere di ottenere informazioni nel più ampio intervallo possibile sulla carica e la massa di tutti i frammenti emessi nelle reazioni studiate.

Gli apparati esistenti hanno alcune caratteristiche che li rendono inadeguati per misure significative con questi nuovi acceleratori. In particolare:

1. la loro trasportabilità è in genere difficoltosa poiché non sono stati progettati con questa prospettiva, necessaria per poter sfruttare al meglio le opportunità offerte in futuro dalle varie sedi;
2. eventuali accoppiamenti con rivelatori per neutroni sono impossibili, non essendo stati previsti all'epoca della costruzione;
3. i rivelatori e l'elettronica non sono stati progettati per ottenere le prestazioni migliori possibili con i diversi metodi di identificazione in massa e carica. L'elettronica utilizzata è ormai obsoleta e le prestazioni sono lontane da quelle oggi ottenibili con l'elettronica digitale.

Il progetto FAZIA prevede la realizzazione di un apparato con le caratteristiche più avanzate al momento attuale, che sia trasportabile in modo da poter essere utilizzato in diversi laboratori e che preveda un'ottimizzazione dei materiali e del loro impiego per permettere misure future con apparati per la misura dei neutroni.

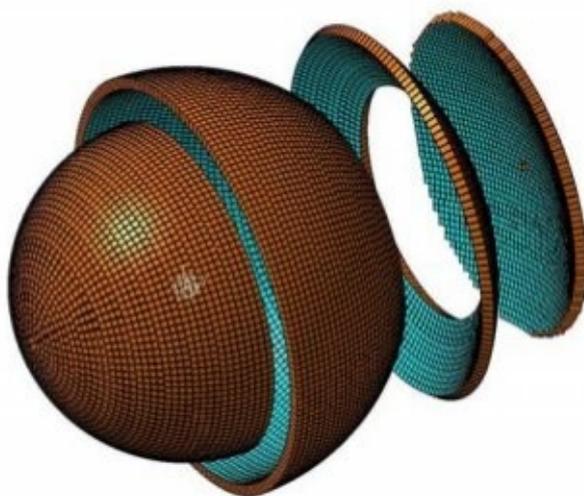
## ***Rivelazione dei neutroni***

Il neutrone è una particella massiva che gioca un ruolo fondamentale nello studio delle interazioni nucleari. Si tratta della controparte neutra del protone nel doppietto nucleonico e non essendo carica, non risente dell'interazione Coulombiana. Per questo motivo è in grado di percorrere svariati centimetri all'interno di un materiale senza subire alcuna interazione e riesce a penetrare all'interno di un nucleo atomico con un'energia minore di un elettronvolt. È quindi in grado già a queste basse energie di dare luogo a reazioni nucleari.

La rivelazione di questo tipo di particella, e la schermatura da essa, presenta quindi non poche difficoltà sperimentali. Ad esempio saranno necessari dei rivelatori di dimensioni molto maggiori di quelle tipiche nel caso di particelle cariche.

## ***Apparato di rivelazione***

L'apparato di rivelazione completo dovrebbe comprendere circa 600-700 blocchi, disposti come nella seguente figura. Ognuno di essi è composto da 4 moduli, a loro volta includenti 4 telescopi, per un totale di circa 10000 telescopi.



Disposizione finale dei rivelatori

Ogni blocco comprende la meccanica di fissaggio ed orientamento, l'elettronica per la prima elaborazione dei segnali ed il sistema di raffreddamento di quest'ultima.

## Telescopio

Nelle collisioni fra ioni pesanti, dalle basse energie a quelle intermedie, è necessaria l'identificazione della maggior parte dei prodotti di reazione per ricostruirne al meglio la sorgente di emissione ed il meccanismo di produzione. L'identificazione in carica e massa con risoluzione energetica dell'ordine del percento dei prodotti di reazione carichi, dalle particelle leggere ai frammenti più pesanti, è un'ottima soluzione che permette con metodi calorimetrici, ovvero metodi di conservazione dell'energia fra lo stato iniziale e finale, di ricostruire le sorgenti di emissione. Questo però è vero per sistemi leggeri o medio pesanti. Quando si cominciano a formare nuclei pesanti, dove il numero di neutroni è importante, i canali di decadimento che coinvolgono radiazione neutra divengono sempre più predominanti ed avere informazioni sulla molteplicità neutronica e/o sulla loro spettroscopia diviene pertanto sostanziale. Occorre tener presente che l'interazione è sempre di tipo nucleare tra il neutrone incidente ed i nuclei del materiale assorbente. Come conseguenza si possono avere l'assorbimento parziale dell'energia del fascio di neutroni o una semplice deviazione dalla traiettoria di incidenza, con conseguente perdita di energia. In questa maniera anche un fascio di neutroni viene assorbito e ridotto di intensità. Questo processo, che comporta anche una riduzione della loro velocità media, prende il nome di moderazione. Inoltre, dato che le sezioni d'urto di questi processi sono spesso dominate da una o più risonanze dove la probabilità d'assorbimento diventa molto grande, e che al di fuori di esse la sezione d'urto cala al crescere della velocità delle particelle in maniera inversamente proporzionale, più il neutrone è moderato e maggiore diventa la probabilità di assorbimento.

A differenza della radiazione elettromagnetica, la maggior parte dei processi di assorbimento neutronici comporta l'emissione di particelle cariche massive ed è su questo tipo di conversione che si basano molti rivelatori.

Per quanto riguarda le particelle cariche emesse nelle reazioni nucleari, si prevede l'identificazione delle particelle emesse nelle reazioni nucleari mediante la tecnica  $\Delta E$ -E. L'apparato sperimentale per questo tipo di misura è costituito da un modulo (*Figura 2*) di 4 telescopi formati ognuno da 2 rivelatori al silicio, rispettivamente di spessore 300 [ $\mu\text{m}$ ] e 500 [ $\mu\text{m}$ ], anteposti ad uno scintillatore CsI(Tl).

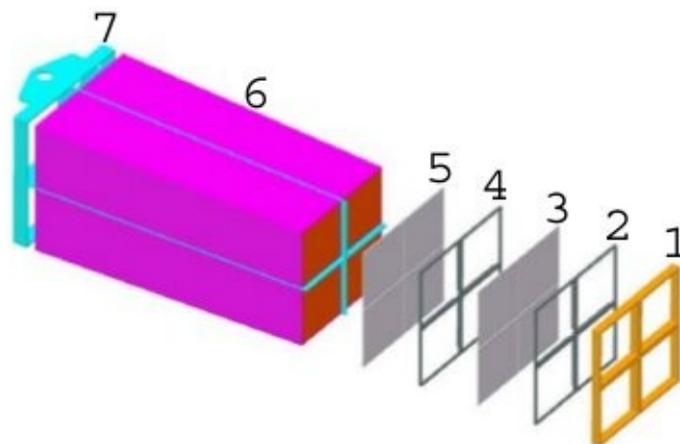
Lo spessore del primo rivelatore al silicio è stato scelto perchè potesse essere sufficientemente sottile e con una buona risoluzione in energia (circa 0.3%) da poter essere utilizzato con la tecnica di identificazione  $\Delta E$ -E mantenendo i costi contenuti.

Il secondo da 500 [ $\mu\text{m}$ ] invece è adeguatamente spesso per poter fermare un gran numero di

frammenti emessi nella reazione, utilizzando ancora basse tensioni di rivelazione.

Infine la scelta nell'impiegare lo scintillatore a stato solido come terzo stadio risiede nei diversi motivi che lo rendono uno dei rivelatori più diffusi negli apparati di identificazione di particelle in esperimenti di fisica nucleare. Il primo consiste nella facilità con la quale è possibile ottenere dei cristalli con la forma voluta in modo da potersi adattare a qualunque geometria dell'apparato sperimentale. Il secondo motivo è che è possibile avere rivelatori di spessori tali da poter frenare i prodotti della reazione sia a bassa energia che alle energie più elevate per la fisica nucleare. Infine, e ciò è fondamentale dato l'elevato numero di telescopi da impiegare, il costo relativamente basso, molto minore dei rivelatori al silicio. Rispetto a questi ultimi poi è anche molto inferiore il danneggiamento dovuto alle radiazioni incidenti. Esso ha il compito di individuare quelle particelle leggere e molto energetiche che riescono a superare i primi due stadi di rivelatori al silicio.

In conclusione il telescopio nel suo complesso deve essere in grado di fermare al suo interno, in un qualunque suo stadio, tutte le particelle ed i frammenti emessi in una reazione per poterli identificare isotopicamente, ovvero determinarne la massa e la carica.



*Figura 2: parte terminale del singolo blocco composta da 4 telescopi. - 1) assorbitore in ottone; 2) distanziale; 3) rivelatori al silicio da 300 [μm]; 4) distanziale; 5) rivelatori al silicio da 500 [μm]; 6) scintillatori CsI (Tl); 7) struttura meccanica di sostegno.*

In questa tesi si discute un'analisi strutturale e termica agli elementi finiti realizzata simulando un singolo blocco dell'intero apparato.

In particolare nei capitoli successivi verranno descritti quali sono i punti fondamentali di tale metodologia di calcolo e il programma software impiegato.

In seguito saranno quindi riportati i modelli analizzati con le corrispondenti semplificazioni e risultati.

## **2.. Strumenti di calcolo**

### ***Metodo degli elementi finiti***

Il metodo degli elementi finiti (MEF) è uno degli strumenti più versatili, efficaci ed affidabili per la soluzione approssimata di una o di un sistema di equazioni alle derivate parziali (EDP). Infatti quando la geometria o il dominio sul quale si vuole risolvere un determinato problema non è molto semplice, la risoluzione analitica delle EDP risulta molto difficile o addirittura impossibile. Con il MEF invece si realizza una discretizzazione del dominio di definizione delle EDP che vengono risolte con metodi numerici all'interno di ogni elemento finito. Questi sono collegati tra loro in punti particolari, detti *nodi*, che possono essere i vertici degli elementi, in punti interni o sui lati.

Si deve notare che benchè i parametri incogniti del problema siano in genere funzioni continue, con l'utilizzo delle tecniche numeriche essi vengono sostituiti da parametri discreti, calcolati nei nodi degli elementi. Per questo motivo si fa ricorso a principi variazionali che permettono di ricavare un'equazione integrale con cui algebrizzare il sistema.

Nei problemi di meccanica del continuo vi sono numerosi principi variazionali, tra cui i più diffusi sono il principio del minimo dell'energia potenziale e quello del minimo dell'energia complementare.

Il primo permette di ottenere la formulazione variazionale che determina la rigidità di un sistema, ovvero la relazione forze-spostamenti. Esso afferma che tra tutti i campi di spostamento ammissibili, quello che soddisfa le condizioni di equilibrio rende l'energia potenziale del sistema stazionaria e minima.

Il secondo permette di ottenere una formulazione variazionale che determina la flessibilità di un sistema, ovvero la relazione spostamenti-forze. Esso afferma che tra tutti gli stati tensionali che soddisfano le condizioni di equilibrio all'interno del sistema e le tensioni imposte sul contorno, lo stato di tensione che soddisfa anche le relazioni tensione-spostamento all'interno e gli spostamenti imposti sul bordo rende stazionaria e minima l'energia complementare. Questo principio permette di calcolare in modo più accurato le tensioni e quindi è più attraente rispetto al primo, più preciso invece per quanto riguarda gli spostamenti. Tuttavia può essere agevolmente impiegato solo per strutture staticamente determinate ed è per questo motivo che l'analisi di un problema con l'equazione di flessibilità risulta più complessa che con il metodo degli spostamenti.

Inoltre il metodo degli spostamenti e dell'energia potenziale permette a parità di numero di elementi di eseguire un minor numero di operazioni per ottenere la soluzione ed è per questa ragione che rimane il più utilizzato.

Riassumendo i passaggi fondamentali del FEM sono:

1. Approssimazione del parametro incognito all'interno dell'elemento. Esempi di tale parametro possono essere gli spostamenti, le temperature, le tensioni, ecc;
2. approssimazione del parametro sull'intero dominio, ottenuta come somma delle approssimazioni fatte in ogni elemento;
3. stazionarietà del funzionale del sistema per raggiungere la soluzione di equilibrio;
4. il funzionale del sistema viene calcolato come somma dei funzionali di ogni singolo elemento;
5. stazionarietà del funzionale del singolo elemento.

### **Software utilizzato**

I pacchetti software impiegati per quest'analisi sono due:

1. ProEngineer Wildfire 4.0 come modellatore solido per la creazione e modifica dei disegni e dei modelli tridimensionali dei componenti da esaminare;
2. Ansys Workbench 13.0 per le simulazioni col FEM

In particolare il secondo è un ambiente per eseguire vari tipi di simulazioni utilizzando un risolutore matematico proprietario.

Si ricorda infatti che lo scopo ultimo di ogni analisi è valutare la risposta del sistema in esame ad un certo tipo di eccitazione o sollecitazione. Inoltre è da tener presente che si simula un sistema approssimato: al CAD infatti si realizza un modello virtuale che è un'idealizzazione di quello fisico reale; di questo se ne effettua la suddivisione in elementi finiti generando la cosiddetta *mesh* o maglia, al fine di avere un modello matematico a cui applicare le equazioni descrittive del problema fisico e risolverle.

L'affidabilità delle risposte dipende quindi da diversi fattori. Tra questi la bontà con cui il modello fisico viene rappresentato e le ipotesi che vengono fatte. Ipotesi che possono riguardare il comportamento dei materiali impiegati, il tipo di contatto tra i vari corpi, ecc. Oppure vi è

l'accuratezza numerica determinata invece dalla qualità della mesh generata.

Ogni analisi si sviluppa secondo 4 fasi fondamentali:

- 1. Decisioni preliminari:** si deve decidere che tipo di analisi effettuare tra le varie possibilità offerte da Ansys. Ad esempio vi sono analisi di tipo strutturale, modale, per valutare il transitorio termico e la risposta a regime, analisi elettromagnetiche e fluidodinamiche, statiche o dinamiche, ecc. Inoltre bisogna già definire se si effettuerà una valutazione di una singola componente o di un intero complessivo, se è sufficiente avere un modello, e quindi una simulazione, bidimensionale o tridimensionale.
- 2. Preprocessing:** è la fase più delicata in cui si importa la geometria del modello e la si modifica per la particolare analisi scelta. Si definiscono le varie proprietà dei materiali che si attribuiscono alle varie componenti. Nel caso di un complessivo si determinano come le varie parti devono interagire le une con le altre. Si genera la mesh, definendo cioè come realizzare la suddivisione in elementi finiti. Si applicano i vincoli ed i carichi al modello. Si impostano le condizioni preliminari dell'analisi, con che tipo di risolutore eseguirla e quali risultati si vogliono visualizzare.
- 3. Risoluzione del modello matematico**
- 4. Postprocessing:** in questa fase si controllano i risultati dell'analisi e la loro qualità, gli eventuali messaggi di errore che identificano i problemi che non hanno permesso di portare a termine con successo la simulazione, i parametri che denotano l'accuratezza della soluzione presentata.

Se dal quarto punto risulta necessario effettuare una modifica delle impostazioni o del modello, si ripete la procedura fino ad ottenere una simulazione con risultati soddisfacenti.

### 3. Analisi statica strutturale

Il problema strutturale coinvolge una serie di parametri, che nel caso isoterma sono i vettori di tensione  $\boldsymbol{\sigma}$ , deformazione  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , degli spostamenti  $\boldsymbol{\Delta}$ , e il vettore  $\mathbf{b}$  delle forze di massa. Gli spostamenti avranno valori assegnati  $\Delta_a$  su una parte  $S_\Delta$  del contorno del sistema, mentre su un'altra parte  $S_P$  sono assegnati i carichi  $\mathbf{P}$ . Per questo problema la meccanica del continuo ci dice che debbono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

- Compatibilità

-Equazione deformazione-spostamento: in un caso bidimensionale nel piano  $xy$ , indicando con  $u$  gli spostamenti lungo  $x$  e con  $v$  quelli lungo  $y$  si ha

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \mathbf{S} \boldsymbol{\Delta}$$

essendo  $\mathbf{S}$  la matrice delle derivate prime.

-Condizione essenziale sulla porzione di contorno  $S_\Delta$  :

$$\boldsymbol{\Delta} = \Delta_a$$

- Equilibrio

-Equazione di equilibrio indefinita:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \end{bmatrix} = 0 \rightarrow \mathbf{S}^T \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0}$$

-Condizione naturale in cui le tensioni interne acquistano in prossimità del contorno valori tali da equilibrare le forze esterne su  $S_P$

$$l \sigma_x + m \tau_{xy} = p_x$$

$$m \sigma_y + l \tau_{xy} = p_y$$

dove  $p_x, p_y$  sono le componenti di  $\mathbf{P}$  e  $l, m$  i coseni direttori della normale di  $\mathbf{P}$ . Questo sistema può essere riscritto in modo compatto

$$\mathbf{t}=\mathbf{P}$$

dove  $\mathbf{t}$  è il particolare valore delle tensioni sul bordo e che deve essere uguale a quello impostato.

- Equazione costitutiva del materiale

Si esprime la tensione in funzione della deformazione tramite la legge di Hooke in assenza di effetti termici

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\epsilon}$$

dove  $\mathbf{D}$  è la matrice di rigidità del materiale elastico.

Applicando il MEF attraverso i suoi 5 passaggi fondamentali descritti nel capitolo precedente, si ottiene l'equazione di equilibrio del singolo elemento:

$$[\mathbf{K}]\{\Delta\}=\{\mathbf{F}\}$$

dove

- $[\mathbf{K}]$  è la matrice di rigidità dell'elemento. È considerata costante, assumendo un comportamento elastico e lineare del materiale e considerando solo piccole deformazioni.
- $\{\mathbf{F}\}$  è il vettore dei carichi applicati in modo statico, ovvero non viene presa in considerazione alcuna loro variazione nel tempo. Si trascurano inoltre anche tutti gli effetti inerziali dovute a masse o a smorzatori.
- $\{\Delta\}$  è il vettore degli spostamenti.

Per ottenere l'equivalente espressione per l'intera struttura è necessario procedere all'assemblaggio, ovvero alla composizione degli elementi finiti gli uni con gli altri per formare quel modello matematico completo da risolvere una volta impostate le condizioni essenziali. Calcolati gli spostamenti infatti, è possibile risalire alle deformazioni e alle tensioni come parametri indipendenti. Questa procedura è realizzata in maniera automatica dal software durante la fase di pre-processing in base alle decisioni dell'utente.

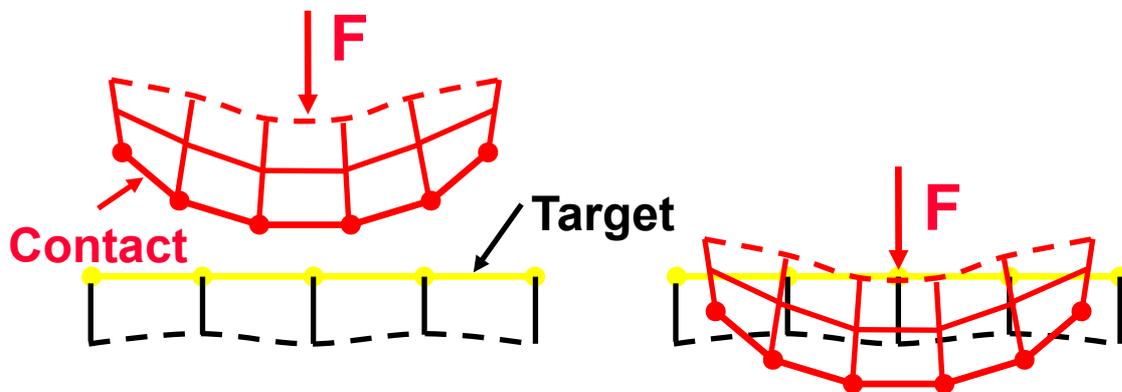
### ***Contatti tra le varie parti***

Quando nel modello sono presenti diverse parti, è necessario definire che tipo di relazione esiste tra di esse. Ciò si ottiene con le zone di contatto. Nelle analisi strutturali esse forniscono un mezzo di trasferimento del carico tra le parti a contatto, mentre in quelle termiche permettono il passaggio del calore tra di esse.

Infatti quando due superfici separate si toccano in modo da divenire mutualmente tangenti, si dice che sono entrate in contatto. Nel senso fisico comune, tali superfici presentano le seguenti caratteristiche: non si compenetrano, si possono trasmettere forze normali di compressione e forze tangenziali d'attrito e non si trasmettono in genere forze normali di trazione, ovvero sono libere di separarsi e allontanarsi l'una dall'altra.

Il contatto realizza il cambiamento del suo stato in modo non lineare. Per questo motivo la rigidità del sistema dipende da tale stato, sia che le superfici si tocchino o si separino.

Dato che i corpi fisici a contatto non si compenetrano, il software deve stabilire una relazione tra le due superfici per prevenire il passaggio dell'una attraverso l'altra durante l'analisi. Quando questo avviene, si dice che il programma ha imposto la compatibilità del contatto. Viceversa quando questo non avviene si verifica la compenetrazione delle due superfici.



Per fare questo Ansys prevede diverse formulazioni.

In questa tesi tutti i corpi a contatto sono stati considerati perfettamente accoppiati, in modo che le rispettive superfici non potessero né separarsi, né scorrere le une sulle altre, compatibilmente con le piccole deformazioni ammesse nelle analisi. Ansys denota questa tipologia di contatto come *Bonded* e ne modella il comportamento con vari algoritmi tra cui quello utilizzato, *Pure Penalty*, impostato normalmente.

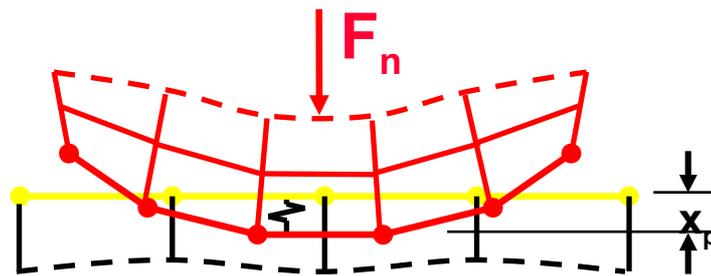
Questo è il metodo più semplice per modellare un vincolo, ma anche il meno preciso qualora interessi particolarmente valutare l'effettivo andamento delle varie grandezze dipendenti da esso. In altre parole è il meno indicato per lo studio del contatto vero e proprio: spostamento dei vari punti, pressioni di contatto, deformazioni plastiche e snervamenti locali del materiale, ecc. L'idea di base è quella di sostituire alla descrizione di un certo comportamento, l'espressione di una forza che provi a mantenere soddisfatto il vincolo: ad esempio si può pensare a mantenere fisso in una posizione un

punto, o due punti accoppiati, immaginando che ad esso sia associata una molla fittizia avente una rigidità tale da applicare una forza che soddisfi questa condizione.

Il vincolo del contatto viene modellato con la seguente formulazione:

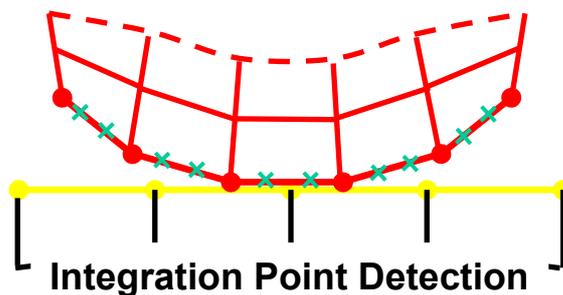
$$F_{normale} = K_{normale} x_{penetrazione}$$

dove per una forza normale  $F_{normale}$  vi è il concetto di rigidità del contatto  $K_{normale}$ . Maggiore è tale rigidità e minore è la penetrazione  $x_{penetrazione}$ , come mostrato nella figura seguente.

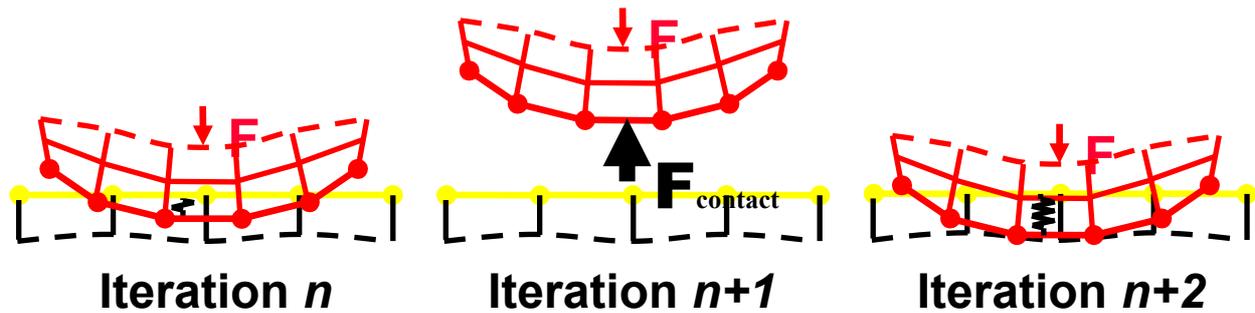


Idealmente per un valore infinito di  $K_{normale}$  si otterrebbe penetrazione nulla. Questo però non è possibile con i metodi di tipo pure penalty a causa delle difficoltà numeriche nel gestire tali valori di rigidità. Tuttavia, fintanto che  $x_{penetrazione}$  rimane piccolo o trascurabile, i risultati che si ottengono saranno accurati.

Per individuare con maggior precisione le superfici di contatto questo metodo utilizza dei *punti di identificazione* tra i nodi degli elementi finiti.



Il parametro più importante è quindi la rigidità del contatto  $K_{normale}$  in quanto influenza sia l'accuratezza dei risultati che la convergenza della soluzione. Infatti un suo valore elevato può migliorare la precisione, ma il problema giungerà a convergenza con maggior difficoltà. Inoltre un suo valore eccessivo può avere come effetto un rimbalzamento delle superfici l'una attraverso l'altra.



Esso viene comunque impostato automaticamente dal programma durante la simulazione. L'utente può decidere di immettere un “Fattore della rigidità normale” che è un moltiplicatore del valore calcolato dal codice. Quindi minore è tale fattore, minore è la rigidità del contatto. I valori attribuiti normalmente per tale fattore sono:

- 10 per un contatto di tipo *Bonded* e *No Separation*
- 1 per tutte le altre tipologie

In generale per tutti i problemi dominati da sforzi di compressione, idrostatici o di volume è consigliabile selezionare l'opzione “ Controllata dal Programma” o impostare il valore del fattore di moltiplicazione pari a 1. Nei problemi dominati da sforzi flettenti invece si può far variare tale valore da 0.01 a 0.1, diminuendolo se l'analisi non raggiunge la convergenza.

### Pinball region

Per differenziare correttamente il contatto tra gli stati “aperto-superfici distanti” e “aperto-superfici vicine”, si utilizza un parametro denominato *Pinball Region*. Può essere immaginato come una sfera centrata su ogni *punto di individuazione* della superficie, citato in precedenza.

Ogni contatto prevede una coppia di superfici: una viene delineata dal programma come la superficie del contatto e l'altra come superficie obiettivo. Per ogni nodo della superficie obiettivo che cade all'interno di tale sfera, Ansys Workbench valuterà con maggior precisione la relazione dei punti di individuazione ad esso più prossimi in modo da individuare se vi sarà o meno la realizzazione di un contatto tra le superfici. Viceversa i nodi della superficie obiettivo che non rientrano all'interno della *Pinball Region* non saranno valutati con tale accuratezza.

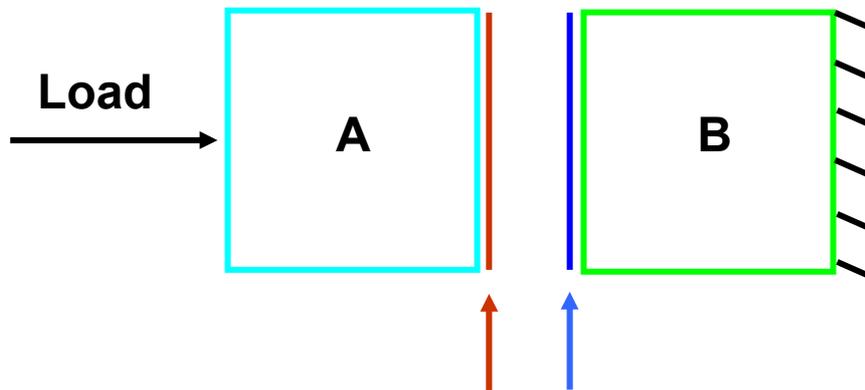
Tale parametro fornisce un'efficienza computazionale nel calcolo dei contatti in quanto separa nettamente le superfici “vicine” e “lontane”, determina la quantità di gioco disponibile tra i contatti di tipo *Bonded*, e dove si verifica e con che entità una compenetrazione all'inizio della simulazione.

Per controllare la dimensione di tale regione in ogni punto di individuazione vi sono 3 opzioni:

1. Controllata dal programma (impostazione di base): la dimensione della *Pinball Region* viene calcolata dal programma in base al tipo ed alla dimensione dell'elemento finito delle superfici;
2. Valore autodeterminato: in questo caso la dimensione della sfera viene uguagliata al valore della *Tolleranza* immesso all'interno delle *impostazioni dei contatti*. Questo assicura che le coppie di contatti generate automaticamente dal programma abbiano un raggio della sfera che racchiuda i giochi esistenti tra la superficie di contatto ed obiettivo. Inoltre questa è la miglior opzione nel caso di superfici nelle regioni individuate in modo automatico che siano ad una distanza maggiore del valore della *Pinball* controllato dal programma e quindi non vengano riconosciute come accoppiate all'inizio dell'analisi;
3. Raggio: l'utente può inserire manualmente il valore da assegnare al raggio della sfera.

### Comportamento simmetrico e asimmetrico

La designazione della superficie contatto e della superficie obiettivo è molto importante. Gli elementi della superficie di contatto possono essere visualizzati come una “pelle” che riveste le regioni dove esso avverrà. Ansys permette di farlo manualmente o comunque di controllare le definizioni fatte in modo automatico associando per ogni coppia un colore diverso alle due superfici.



L'impostazione predefinita è quella di un comportamento *simmetrico* per ogni contatto impostato. Ciò significa che la superficie contatto è vincolata a non penetrare in quella obiettivo e viceversa.

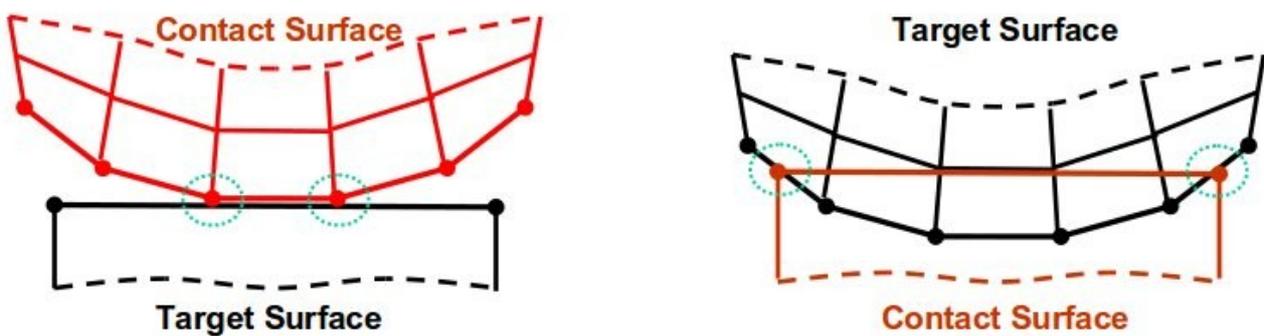
Nella tesi è stato scelto questo tipo di comportamento perché è compatibile con l'algoritmo *Pure Penalty* selezionato e perché è facile da impostare per tutti i contatti essendo l'opzione predefinita. Lo svantaggio è che richiede un maggior costo computazionale del metodo asimmetrico perché i

risultati vengono calcolati e riportati per entrambe le superfici. Questo lo rende poco preciso nell'indagine del singolo contatto vero e proprio: infatti ad esempio, la pressione specifica calcolata, essendo riportata su entrambe le superfici ha un valore dimezzato rispetto a quello reale.

Con il comportamento *asimmetrico* o *auto-asimmetrico* invece, solo la superficie contatto è vincolata dal non penetrare in quella obiettivo. Questo ovviamente non significa che quest'ultima non possa entrare nella prima.

**N.B.** Si ricorda che se si utilizza il metodo *Pure Penalty* per modellare il contatto, anche con questo comportamento, si avrà sempre una leggera compenetrazione.

Inoltre occorre porre particolare attenzione nella definizione dei due tipi di superfici che possono essere invertite involontariamente e portare a risultati errati. Dato infatti che i nodi della superficie di contatto non possono compenetrare quelli della superficie obiettivo, è importante come vengono definite queste ultime, come mostrato nella seguente figura.



Nell'immagine di sinistra la mesh superiore rossa è quella di contatto. I suoi nodi non possono attraversare la superficie obiettivo e quindi il contatto è definito correttamente.

Nell'immagine di destra la mesh rossa inferiore è quella di contatto e quella superiore è quella obiettivo. Dato che sono i nodi della prima a non poter penetrare nella seconda, in questo caso si ha una notevole compenetrazione effettiva.

Nonostante questa attenzione da avere nella designazione delle superfici, che si traduce in effetti in un maggior controllo dei contatti e delle interazioni tra i corpi simulati, il comportamento asimmetrico è più preciso e permette una più facile e diretta interpretazione dei risultati che vengono riportati solo sulla superficie contatto.

## 4. Generazione della mesh

Sia per la simulazione di corpi solidi (F.E.A. ovvero Analisi agli Elementi Finiti) che fluidi (CFD ovvero Dinamica dei Fluidi Computazionale), il programma effettua dei calcoli su delle regioni discrete all'interno del dominio.

Lo scopo della mesh infatti è quello di scomporre il dominio della soluzione in un numero appropriato di sotto-domini, gli elementi finiti, al fine di ottenere risultati accurati.

Due parametri importanti per la mesh sono:

- **Dettaglio:** si deve decidere che grado di dettaglio geometrico è necessario nel modello al fine di riprodurre la fisica di quest'ultimo. Bisogna fare attenzione tuttavia che introdurre un eccessivo grado di dettaglio aumenterà considerevolmente lo sforzo richiesto per svolgere l'analisi;
- **Finezza:** in che aree ci sono i maggiori gradienti di tensioni o flussi termici? Saranno queste zone che richiederanno un maggior densità di elementi finiti e quindi una mesh più fine.

Per ottenere una mesh efficiente occorre tener presente che un maggior numero di elementi richiederà molte più risorse computazionali sia in termini di memoria, che in termini di tempo di calcolo. Si deve quindi bilanciare opportunamente la sua generazione per ottenere un'analisi affidabile in base alle risorse a propria disposizione.

### ***Complessivi: tecniche generali di generazione della mesh***

Le analisi dei complessivi sono tra le problematiche più complesse per predire come si comporterà una struttura composta da molti componenti. Grazie all'automazione di tecniche collaudate, gli ingegneri possono verificare i benefici che si ottengono da esse. Tuttavia, l'utente deve comprendere le capacità, i limiti ed i rischi insiti in ogni metodo.

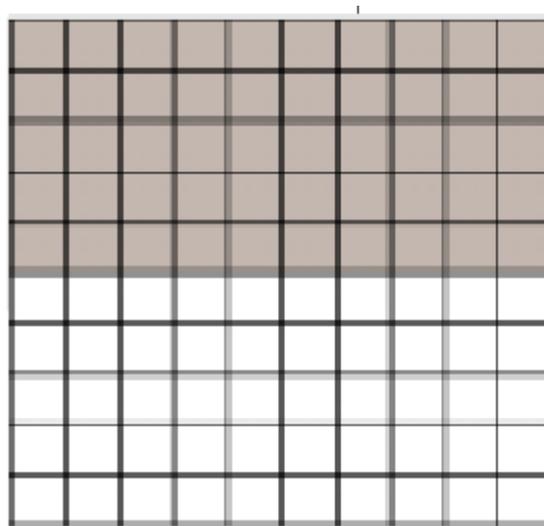
### **Tecnica della mesh comune o globale**

La forma più basilare di analisi di un complessivo si ottiene attraverso la “mesh comune o globale” per simulare una geometria perfettamente *Bonded*. Questa tecnica di suddivisione in elementi finiti, prende la geometria del complessivo e produce un'unica mesh attraverso tutta l'intera struttura, assegnando diversi materiali alle diverse parti che la costituiscono. Questa metodologia è opportuna per quei complessivi in cui le parti si dovrebbero comportare come se fossero perfettamente collegate e fisse le une alle altre.

Nonostante si ottengano dei risultati ragionevoli in tali casi, l'utente deve essere consapevole dei suoi limiti: dato che questa tecnica di generazione della mesh diventa molto pesante per modelli molto elaborati, essa offre pochi vantaggi nelle analisi di complessivi realistici.

Questi ultimi infatti hanno in genere delle parti in movimento, mentre il metodo della mesh comune assume che tutte le parti siano rigidamente fissate le une alle altre. Non si tiene in alcuna considerazione l'interazione tra le varie componenti perchè la mesh comune tratta l'intero complessivo come un'unica grande componente. Analogamente, non vengono considerati nemmeno i comportamenti non lineari delle parti individuali.

In breve, a meno che non si assuma che le varie parti del complessivo siano perfettamente collegate tra loro, si otterranno dei risultati ambigui o completamente errati. In genere infatti, la tecnica della mesh globale individua delle aree di tensione o deformazione che non sono accurate a causa della scarsa valutazione del movimento delle singole parti.



**La tecnica dell'analisi con mesh comune usa una maglia continua attraverso l'intero complessivo, convertendolo in un'unica grande parte con diversi materiali. L'accuratezza per le singole componenti viene persa per mantenere la mesh costante.**

### **Tecnica della mesh nodo a nodo**

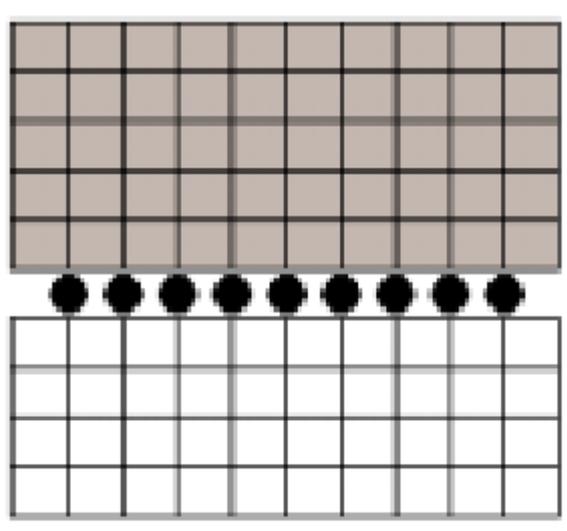
Procedendo nella sequenza delle varie metodologie di generazione delle mesh per le analisi dei complessivi, quella successiva è la mesh nodo a nodo, anche nota come “mesh dei giochi”.

La principale differenza con la mesh comune è la considerazione basilare dell'interazione tra le parti. Essenzialmente, la mesh nodo a nodo di un complessivo simula il contatto tra le varie parti

grazie a degli elementi di contatto. Considerando una mesh comune, tali elementi sono inseriti tra le parti aventi diversi materiali. Questa tecnica impone degli stretti requisiti per la generazione della mesh per l'intero complessivo, spesso a spese dell'accuratezza per la singola parte. In effetti, nel caso di molte componenti come nei modelli realistici, la generazione della maglia può non avere successo. Questo metodo assume che la precisione per l'intero complessivo debba essere maggiore rispetto a quella delle parti individuali.

Tuttavia, nonostante sia possibile considerare un certo movimento tra le varie componenti, vi sono dei seri limiti riguardo e oltre la generazione della mesh. Per utilizzare gli elementi nodo-a-nodo infatti occorre innanzitutto conoscere dove posizionarli. Ciò può essere molto complicato in modelli con molte parti dotate di un movimento proprio. In aggiunta, questo tipo di problemi di contatto di solito permette solo un piccolo scorrimento relativo tra le superfici degli elementi di contatto delle varie parti, anche in caso di non linearità geometriche.

In definitiva, anche se si riesce ad ipotizzare accuratamente quali parti delle varie componenti possano venire in contatto, bisogna limitarsi a problemi in cui i nodi delle singole parti si allineano perfettamente, lo scorrimento relativo è trascurabile, e la deformazione o la rotazione delle parti rimangono piccole. E comunque la convergenza alla soluzione è molto lenta, e talvolta insufficiente per risultati accurati.

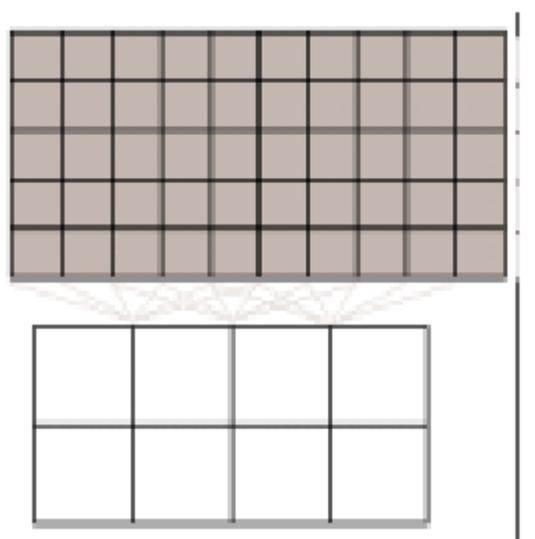


**Le tecnica della mesh nodo a nodo richiede la conoscenza della posizione in cui le parti giungeranno a contatto prima di eseguire l'analisi. Questa tecnica non permette il movimento delle parti sulla base delle condizioni reali applicate al modello.**

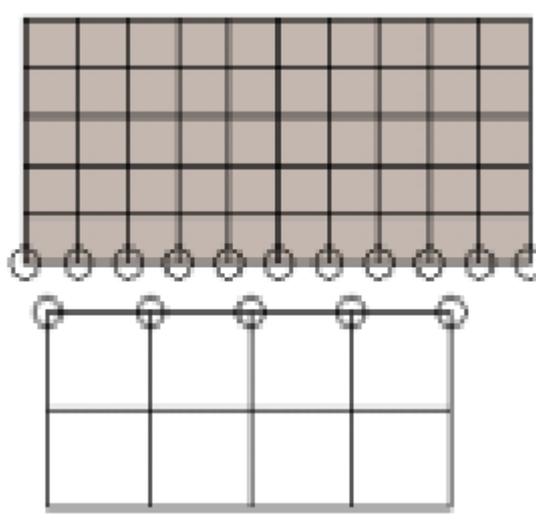
## **Mesh nodo-a-superficie e superficie-a-superficie**

Per realizzare un'analisi dinamica di un complessivo bisogna impiegare delle tecniche avanzate. Una di queste è il metodo “nodo-a-superficie”. La principale differenza col metodo precedente consiste nella possibilità di tener conto di larghe deformazioni e scorrimenti tra le parti, senza conoscere a priori l'esatta posizione delle regioni di contatto tra le parti. Inoltre la mesh “nodo-a-superficie” elimina la necessità di avere una mesh compatibile attraverso le parti contigue. In genere viene impiegata per simulare il contatto di punti su di una superficie.

Un'altra tecnica, ancora più avanzata, è quella “superficie-a-superficie”. Essa tiene conto delle interazioni tra le parti in modo realistico utilizzando sia elementi di contatto “da comportamento rigido a flessibile”, che “da comportamento flessibile a flessibile” per modellare i vari componenti. Tali elementi utilizzano una superficie di contatto e una obiettivo per definire una coppia di superfici di contatto. Una volta che si è formata, è possibile simulare in modo realistico e dinamico l'interazione tra le varie parti di un complessivo.



**La tecnica nodo-a-superficie permette alle parti del complessivo di muoversi realisticamente. Consente inoltre la generazione di una mesh di dimensione variabile per ogni singola parte per la valutazione di risultati su ogni specifica componente.**



**La tecnica superficie-a-superficie fornisce i risultati migliori. Permette di risolvere il modello sia con la condizione “da rigido a flessibile” che “da flessibile a flessibile” imposta alle superfici. Anche qui la mesh può essere ottimizzata per ogni parte per ottenere i suoi risultati specifici.**

### ***Ansys: metodi impiegati per generare la mesh***

In questa tesi si è generata la mesh per l'intero modello usando il metodo automatico proposto dal software. Grazie alle modalità di definizione delle regioni di contatto descritte nel terzo capitolo, tale metodo presenta infatti tratti in comune con tutti quelli generali appena descritti.

Infatti, il complessivo analizzato è costituito da parti connesse le une alle altre secondo un contatto di tipo *Bonded*, ognuna con il suo materiale e le relative proprietà; inoltre sono consentite solo piccole deformazioni in quanto si è in campo elastico, prevedendo comunque dei comportamenti geometricamente non lineari a causa del limitato spessore di alcune di esse.

In particolare nel programma, questo metodo *Automatico* alterna la generazione della mesh tra quella *Tetraedrica (Patch Conforming)* e quella *Sweep*, a seconda che vi siano o meno dei corpi estrudibili per quest'ultimo caso. In questo modo tutti i corpi che appartengono ad una stessa parte avranno una mesh conforme, ovvero gli elementi finiti di due corpi sono esattamente collegati tra loro in corrispondenza dei nodi, e non ad esempio a metà di un lato. Con una mesh conforme i risultati dell'analisi sono sicuramente migliori.

In Ansys sono disponibili due diversi algoritmi per generare la mesh con elementi finiti tetraedrici:

- *Patch Conforming*: si genera inizialmente una mesh superficiale tramite algoritmi di *Delaunay* o di *Fronte di Superficie avanzato* che rispetteranno, come impostazione

predefinita, tutte le superfici e gli spigoli presenti nella geometria del modello. Successivamente da questa viene creata una mesh volumetrica con un algoritmo basato su *TGRID Tetra*.

- *Patch Independent*: si genera una mesh volumetrica che viene proiettata verso il bordo per ottenere una mesh di superficie. Le facce e gli spigoli non verranno necessariamente rispettati a meno che i carichi e le condizioni al contorno non lo impongano. Questo metodo permette una maggior tolleranza di modelli CAD di bassa qualità ed è basato su l'algoritmo *ICEM CFD Tetra*.

Il metodo *Sweep* invece viene applicato automaticamente, o in modo selettivo, a tutti i corpi estrudibili. Questi ultimi sono i corpi che presentano una dimensione molto maggiore rispetto alle altre due.

## Qualità della mesh

La mesh è l'elemento cruciale per realizzare un'analisi affidabile e ottenere quindi risultati attendibili. E' quindi importante valutarne la qualità.

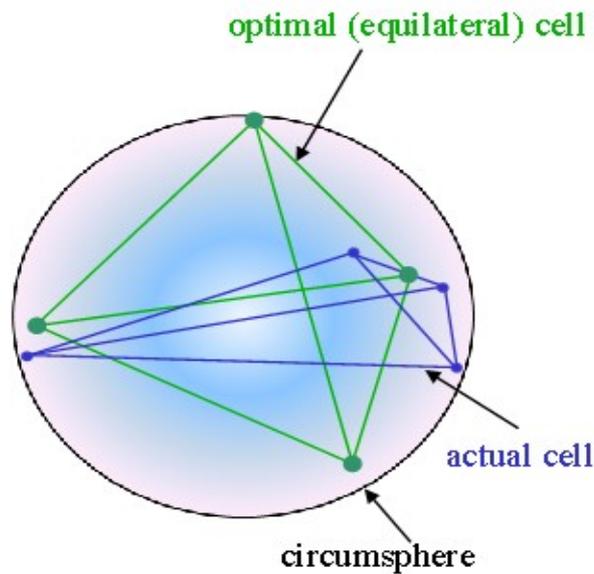
I diversi metodi di generazione e risolutori del modello matematico che si realizza con essa, richiedono differenti requisiti riguardo la sua qualità. In Workbench i due parametri fondamentali sono:

- Distorsione degli elementi (Skewness)
- Aspetto degli elementi (Aspect Ratio)

La prima viene valutata secondo due metodi:

1. In base alla distorsione dell'elemento rispetto ad uno analogo equilatero. Il suo valore si calcola attraverso la formula:

$$Distorsione = \frac{Dimensione\ elemento\ ottimale - Dimensione\ elemento\ attuale}{Dimensione\ elemento\ ottimale}$$

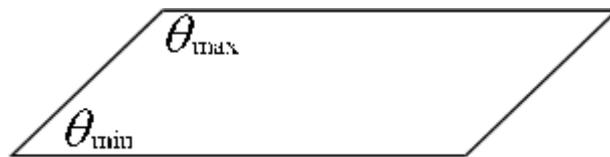


Si applica agli elementi finiti triangolari per le mesh bidimensionali e a quelli tetraedrici per le maglie tridimensionali.

2. In base alla deviazione da un Angolo Normalizzato secondo l'espressione:

$$Distorsione = \max \left[ \frac{\theta_{max} - \theta_e}{180^\circ - \theta_{max}}, \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right]$$

dove  $\theta_e$  è l'angolo equilatero dell'elemento di riferimento:  $60^\circ$  per quelli triangolari e tetraedrici,  $90^\circ$  per quelli quadrati ed esaedrici. Questo metodo è utilizzato principalmente per prismi e le piramidi che sono quegli elementi che servono a collegare i tetraedri agli esaedri (o i triangoli ai quadrati) nella mesh.



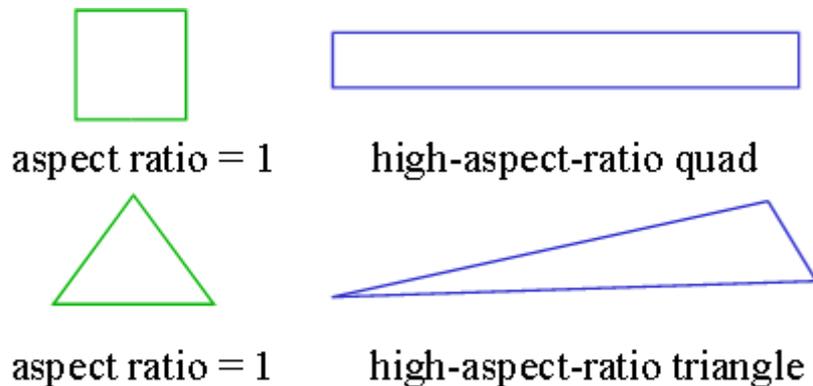
Questo parametro permette di distinguere una mesh di scarsa qualità da una eccellente variando il suo valore rispettivamente da uno a zero.



|           |           |           |            |           |              |
|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|--------------|
| 0-0.25    | 0.25-0.50 | 0.50-0.80 | 0.80-0.95  | 0.95-0.98 | 0.98-1.00    |
| Excellent | very good | good      | acceptable | bad       | Unacceptable |

Se un elemento ha una distorsione pari ad uno, può divenire un elemento degenerare: ad esempio se è un quadrato, due dei suoi lati possono allinearsi e far sì che si trasformi in un triangolo, o addirittura presentare una concavità. Nel modello matematico che ne deriva, si otterranno delle matrici non definite e quindi non sarà possibile portare a buon fine la simulazione, o i risultati che si otterranno saranno poco significativi.

L'*Aspect Ratio* invece viene valutato come una funzione del rapporto tra il lato maggiore e quello minore dell'elemento. Esso è pari ad uno per un elemento coincidente con quello equilatero di riferimento.



Per evitare di ottenere una mesh di scarsa qualità si possono effettuare le seguenti operazioni:

- eliminare dal modello tutte le componenti o particolari non essenziali al fine della simulazione onde evitare un aumento inutile del numero di elementi finiti (in particolare del numero dei nodi e di conseguenza nel numero di gradi di libertà e di equazioni da risolvere), del tempo di calcolo e dei possibili conflitti nel passaggio tra un componente e quello contiguo;

- pulire il più possibile la geometria, evitando spigoli vivi e sostituendoli con smussi o ampi raccordi;
- utilizzare al massimo le simmetrie presentate dal modello, in modo da ridurre le equazioni totali del sistema;
- ridurre le dimensioni degli elementi, evitando per quanto possibile di avere componenti sottili modellati con un solo elemento nello spessore. Si ricorda infatti che i valori calcolati all'interno degli elementi sono interpolati a partire da quelli valutati correttamente ai nodi e quindi avere un solo elemento nello spessore potrebbe portare ad una valutazione errata dei risultati sottostimando un possibile gradiente presente;
- utilizzare funzioni avanzate di realizzazione della mesh che tengano conto della curvatura e della vicinanza dei vari elementi di spessori diversi in modo da infittire automaticamente la maglia;
- eseguire manualmente un infittimento della mesh nelle zone dove si ritiene vi saranno i maggiori gradienti.

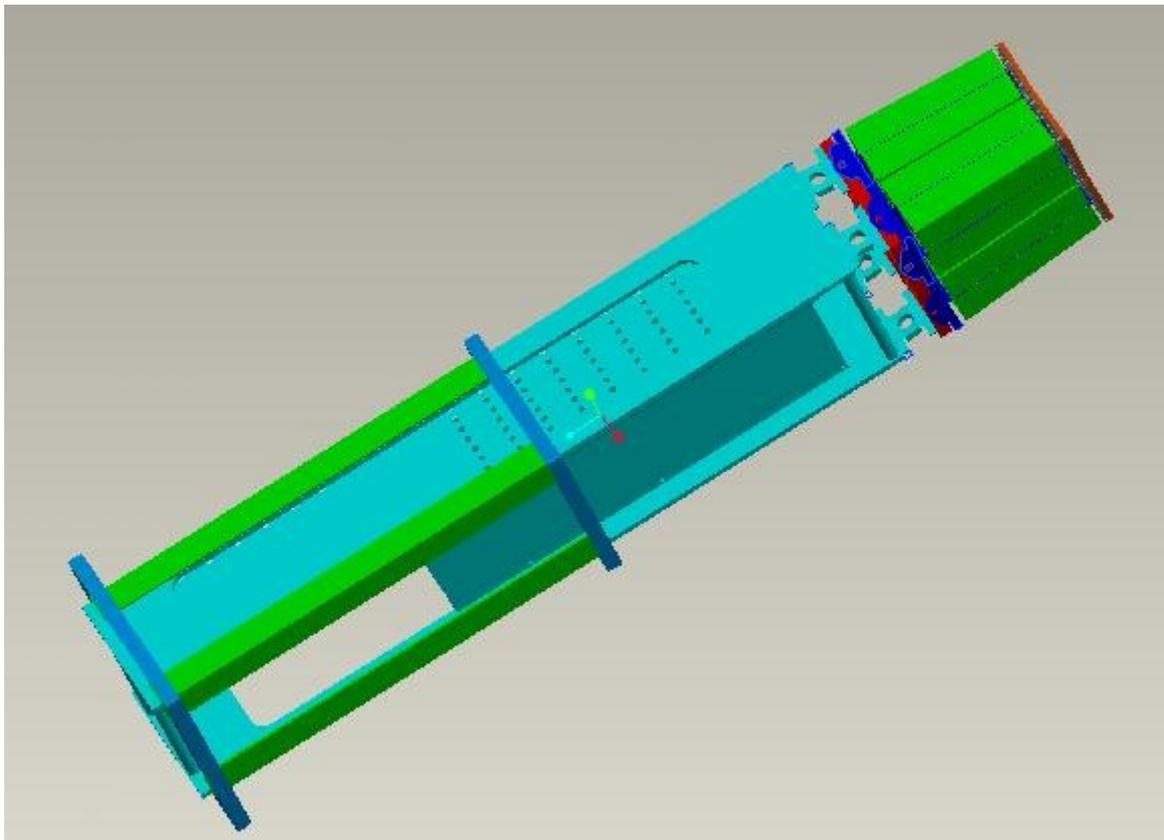
## 5. F.A.Z.I.A. : Analisi strutturale di un singolo blocco

Si prende in considerazione ora un singolo blocco dell'intero apparato FAZIA per la rivelazione di particelle in esperimenti di fisica nucleare.

Lo scopo è quello di valutarne lo stato tensionale, deformativo e l'inflessione che si raggiunge caricando il modello con la sola forza peso. Inoltre si vogliono determinare le differenze nei risultati in corrispondenza di diversi tipi di vincolamento per individuare quale fornisce il comportamento più idoneo negli esperimenti di fisica.

### ***Pulizia e semplificazione della geometria originale***

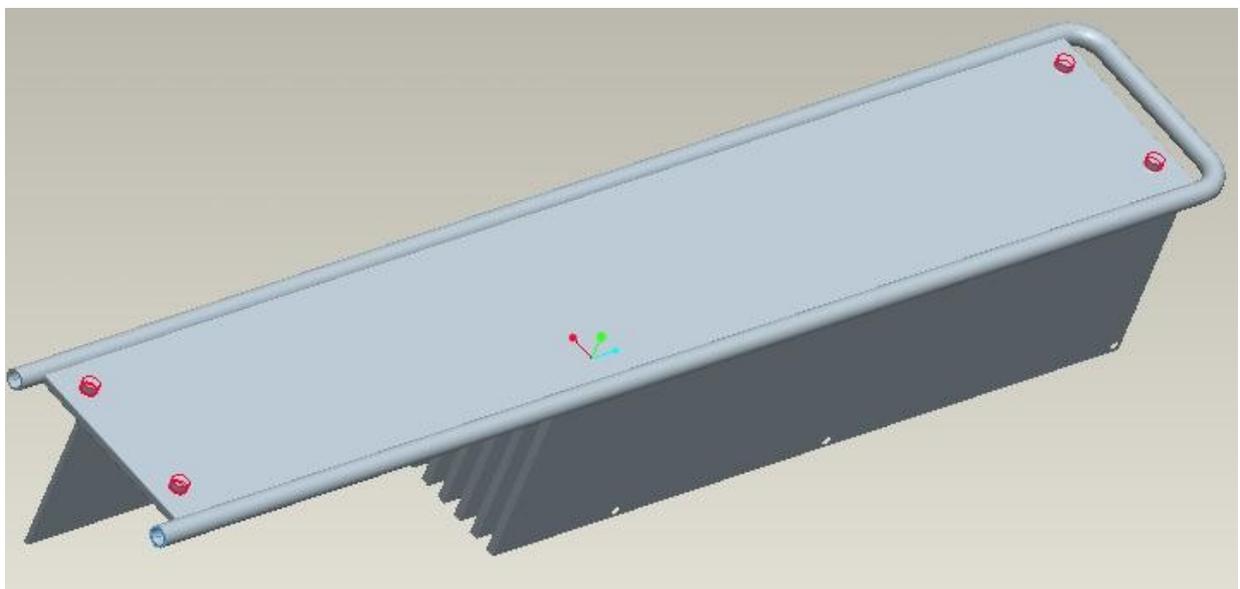
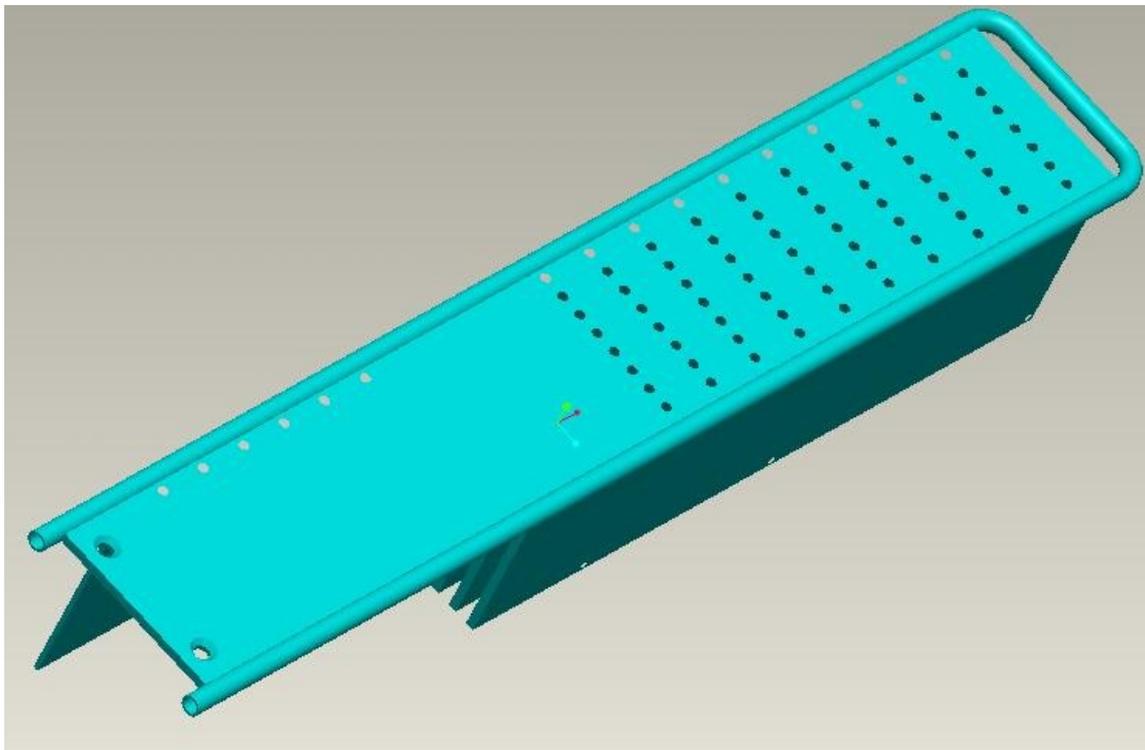
Al fine di ottenere la migliore mesh possibile con le risorse a disposizione e per ridurre le parti indispensabili alla simulazione, si sono effettuati tramite il software CAD ProEngineer delle modifiche al disegno iniziale.



**FAZIA singolo blocco: disegno originale.**

In particolare dal corpo dissipatore si sono eliminati i fori sulla piastra superiore e sulle alette, si sono eliminati i bulloni che lo collegano alla struttura portante circostante e li si sono sostituiti con un contatto di tipo *Bonded* per consentire il corretto trasferimento del carico. Inoltre, dato il

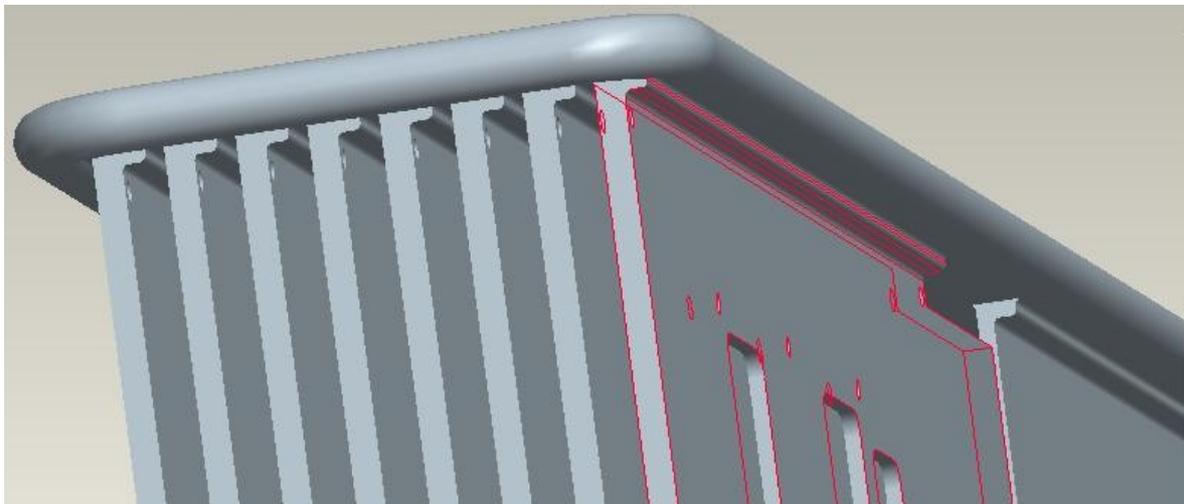
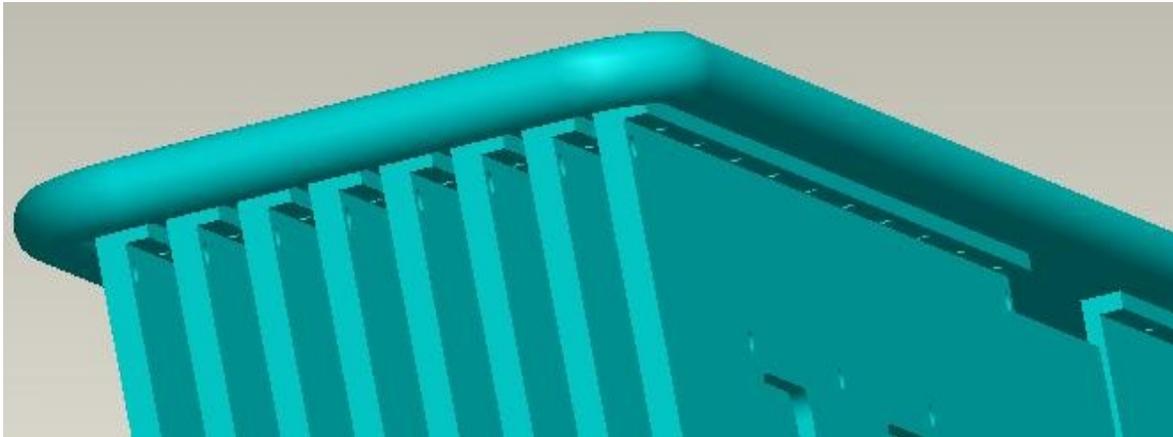
piccolissimo spessore e massa volumica, si sono trascurate tutte le schede elettroniche con i relativi componenti installate su di esso, ritenendo il loro contributo al peso complessivo della struttura superfluo.



**FAZIA corpo dissipatore: rimozione dei fori sulla piastra superiore e sostituzione dei bulloni di collegamento con protusioni cilindriche allo scopo di definire il contatto e il trasferimento di carico.**

Inoltre si sono realizzati dei raccordi nei punti di attacco delle alette alla piastra superiore. Infatti a

causa degli spigoli vivi ad angolo retto, nel passaggio da un corpo all'altro la generazione della mesh fallisce. Con i raccordi si promuove un passaggio più graduale tra le varie parti e la qualità della maglia migliora.

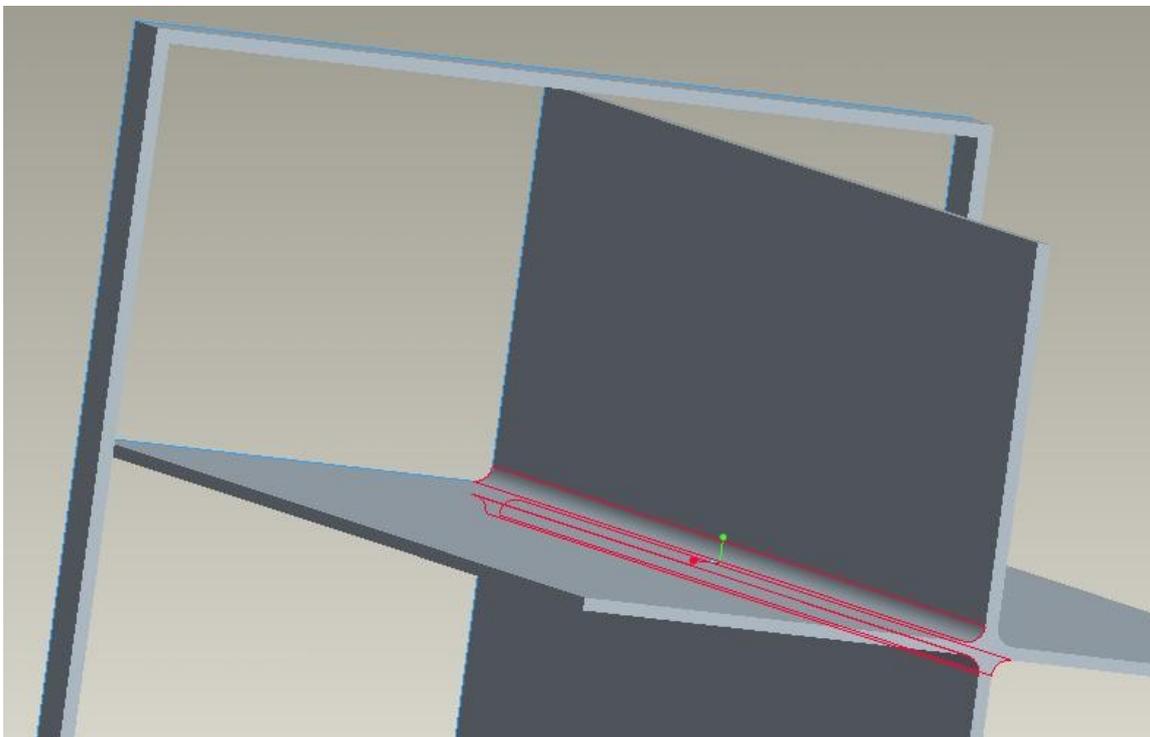
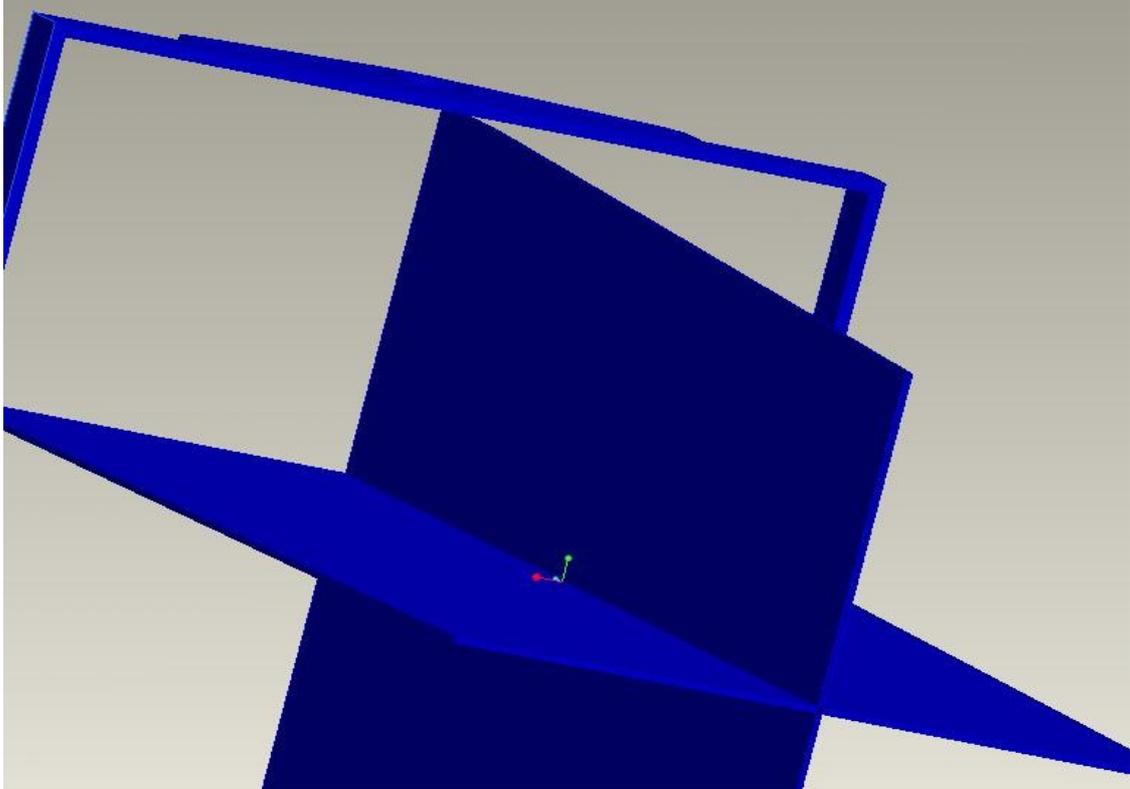


**FAZIA blocco dissipatore: sostituzione degli spigoli vivi con raccordi nel passaggio dalle alette alla piastra superiore.**

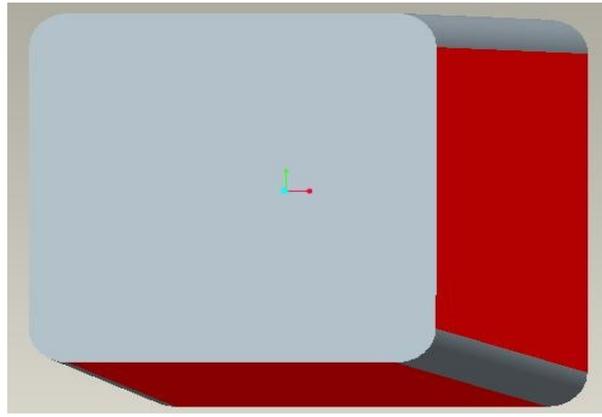
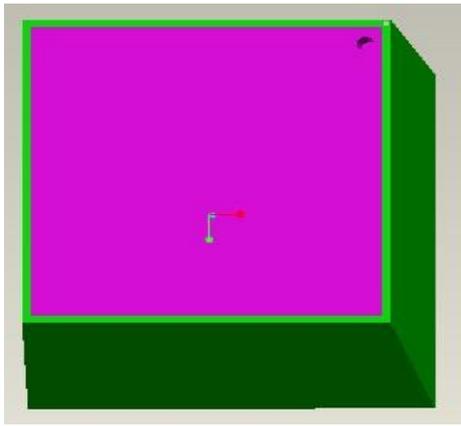
Altre parti che si sono trascurate nella simulazione a causa delle loro piccole dimensioni, sono stati i rivelatori al silicio da 300 e 500 [μm] con i relativi distanziali.

Come si può vedere nella figura illustrante l'intero blocco, i quattro moduli hanno ciascuno un angolo specifico al fine di orientarsi correttamente verso il centro della sfera, durante il montaggio finale dell'intero apparato di rivelazione. Questo particolare non influisce sui risultati dell'analisi, ma piuttosto sulla definizione dei vincoli dei vari moduli. Si è deciso quindi di semplificare questo dettaglio rendendoli tutti paralleli tra loro.

Anche per ogni singolo telescopio e per il corrispondente supporto, il cui spessore è di soli 0.74 [mm], si sono realizzati dei raccordi per permettere una corretta formazione della mesh. Si è posta particolare attenzione nel fare in modo che il raccordo del telescopio fosse maggiore di quello del supporto in modo da garantire l'effettivo contatto tra le facce piane dei due componenti.

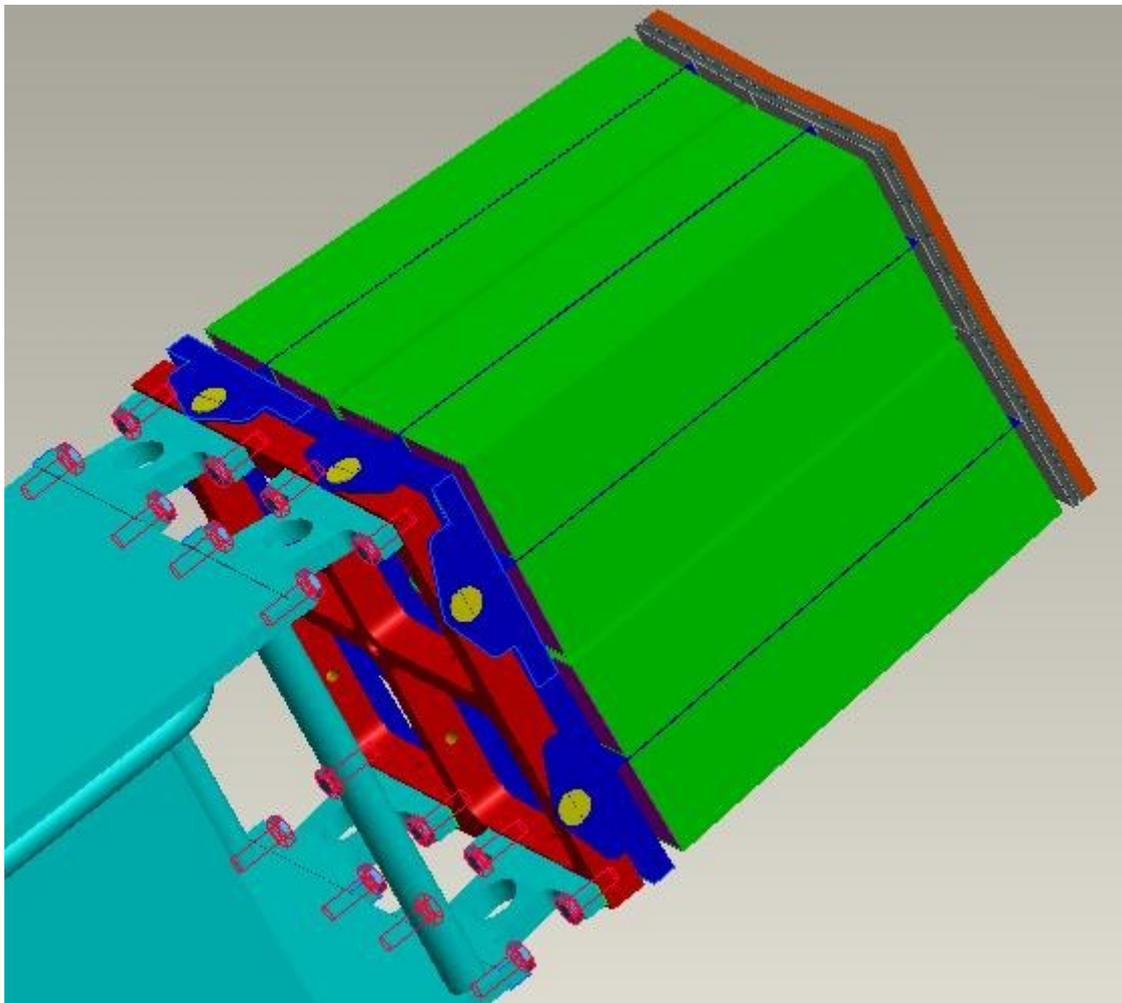


**FAZIA supporto telescopi: realizzazione raccordi.**



### **FAZIA telescopio: realizzazione raccordi.**

Infine come per il blocco dissipatore, si sono eliminati tutti i collegamenti bullonati e li si sono sostituiti da contatti perfetti e fissi di tipo *Bonded*.



**FAZIA collegamento sezione anteriore con supporto meccanico posteriore: le viti evidenziate in rosso e giallo sono state eliminate dal modello.**

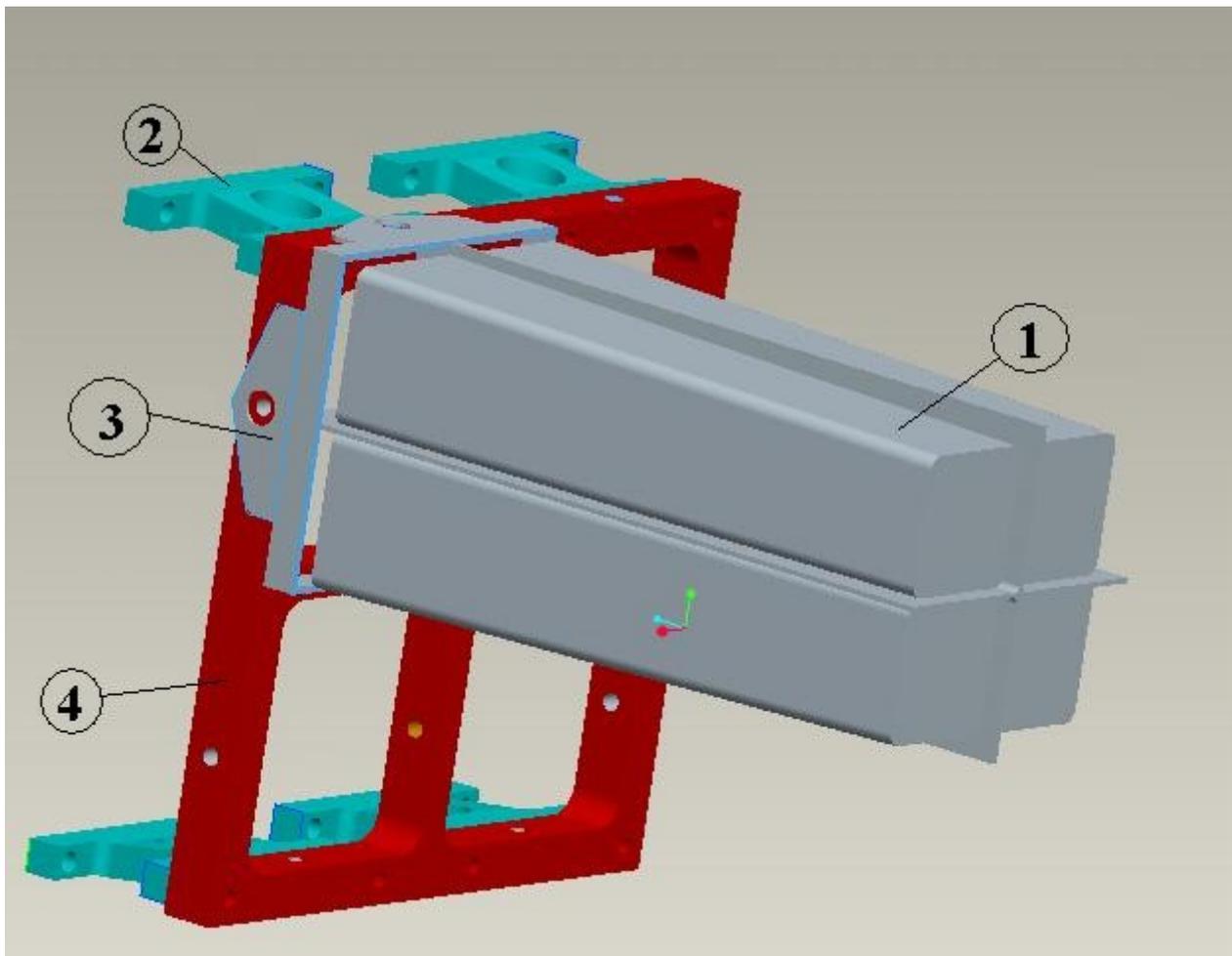
### **Sezione anteriore comprendente i quattro moduli**

Data l'elevata differenza di spessore tra la sezione anteriore e il supporto meccanico posteriore dell'intero blocco, si sono riscontrati dei problemi nella generazione di una mesh globale per la struttura complessiva. Si è quindi deciso di analizzarla in due tronconi: uno anteriore comprendente i quattro moduli ed i sedici telescopi, ed una posteriore costituita dalla struttura meccanica di sostegno e collegamento e dal dissipatore di calore.

Si passa ora a descrivere i parametri utilizzati per la simulazione e a riportarne i risultati.

### **Materiali e proprietà**

Si è assunto che tutti i materiali si comportassero in modo perfettamente isotropo e fossero omogenei. Le proprietà importanti ai fini della simulazione sono riportate nella seguente tabella.



**FAZIA sezione anteriore con un singolo modulo: 1) telescopio; 2) piastrina di collegamento con la sezione posteriore; 3) supporto telescopi; 4) telaio moduli.**

| Componente                | Materiale            | $\rho \left[ \frac{Kg}{dm^3} \right]$ | $E [MPa]$ | $\nu$ |
|---------------------------|----------------------|---------------------------------------|-----------|-------|
| Telescopio                | Ioduro di Cesio      | 4,510                                 | 5300      | 0,214 |
| Piastrina di collegamento | Alluminio Al 7075-T6 | 2,804                                 | 71700     | 0,33  |
| Supporto telescopi        | Fibra di carbonio    | 1,600                                 | 70000     | 0,1   |
| Telaio moduli             | Alluminio Al 7075-T6 | 2,804                                 | 71700     | 0,33  |

## Mesh

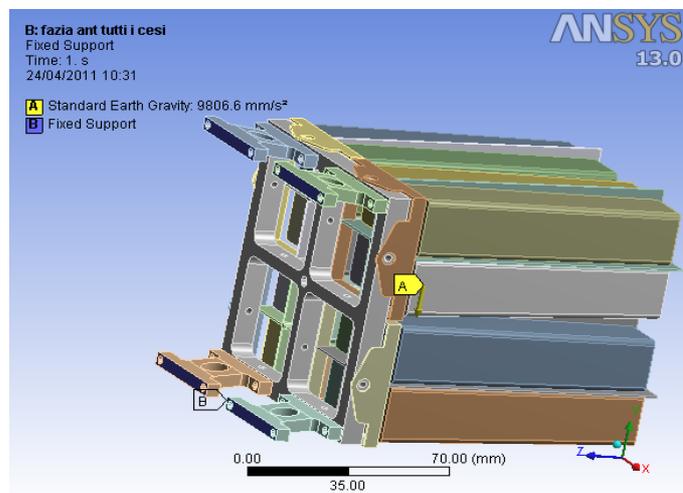
Si è generata la mesh in modo *Automatico*, facendola gestire al software completamente. Dato che l'algoritmo la crea in maniera casuale rispettando solo i limiti imposti dalla geometria, ogni mesh è leggermente diversa dalle altre e pertanto la disposizione dei singoli elementi finiti e dei loro nodi varia ad ogni sua generazione.

In questo caso si è scelta una maglia dalla dimensione *media* degli elementi. La distorsione media che ne è risultata vale 0.5396 con una deviazione standard di 0.2583, per cui ricade nelle mesh di buona qualità.

## Vincoli e carichi

Si è assunto di essere nella condizione peggiorativa, schematizzabile come una trave incastrata sottoposta al peso proprio.

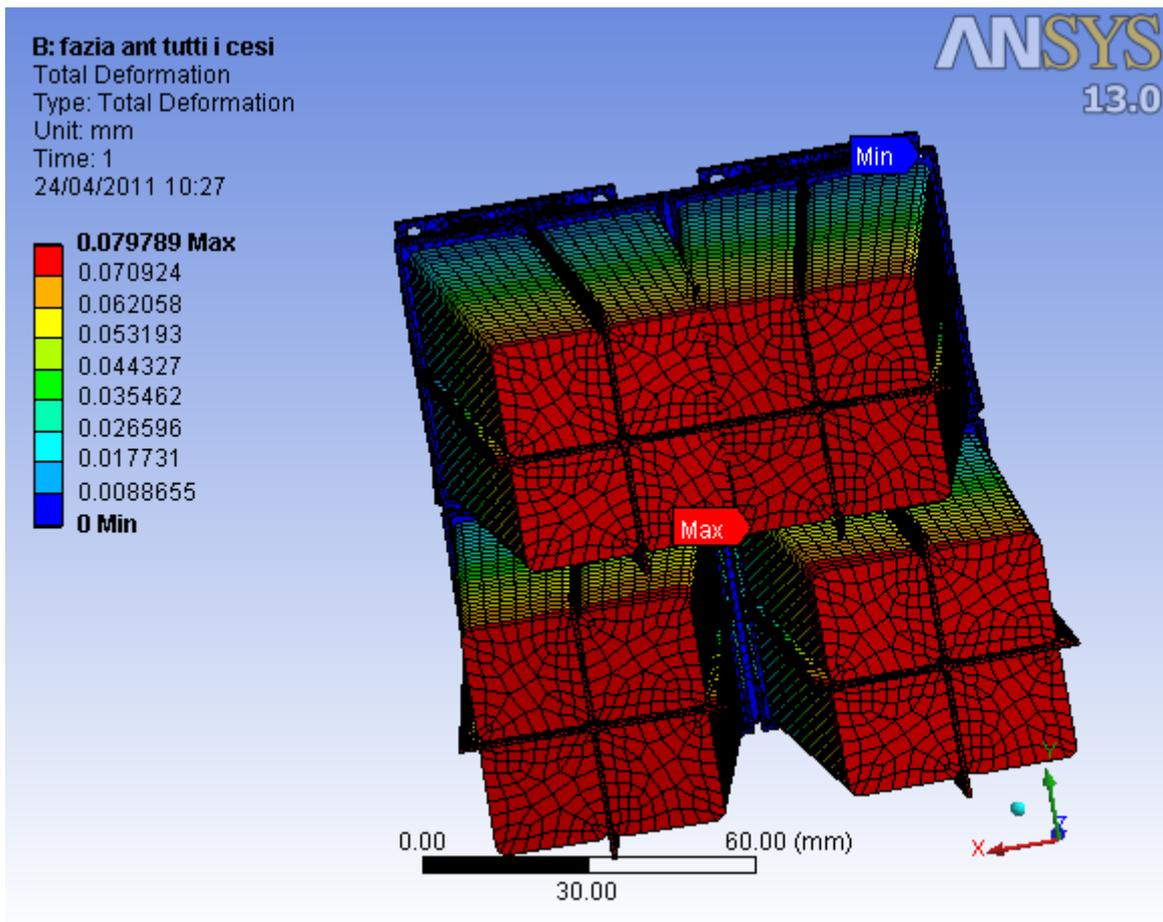
I vincoli quindi si sono tradotti in un incastro perfetto applicato alle superfici terminali delle quattro piastrine di collegamento, mentre i carichi in un vettore rappresentante la forza peso applicato automaticamente a tutti i corpi del modello.



Gli incastrati sono rappresentati con il colore blu e l'etichetta *B* nell'immagine precedente, mentre la forza peso con il vettore giallo e la lettera *A*. Il software in realtà applica l'accelerazione gravitazionale secondo il vettore impostato, la quale agendo sui corpi di massa specificata nelle proprietà dei materiali, si traduce nella forza peso corrispondente.

## Risultati

In seguito si riportano i risultati di questa simulazione visualizzando in particolare gli spostamenti dei vari elementi, la loro deformazione e le tensioni che ne nascono.

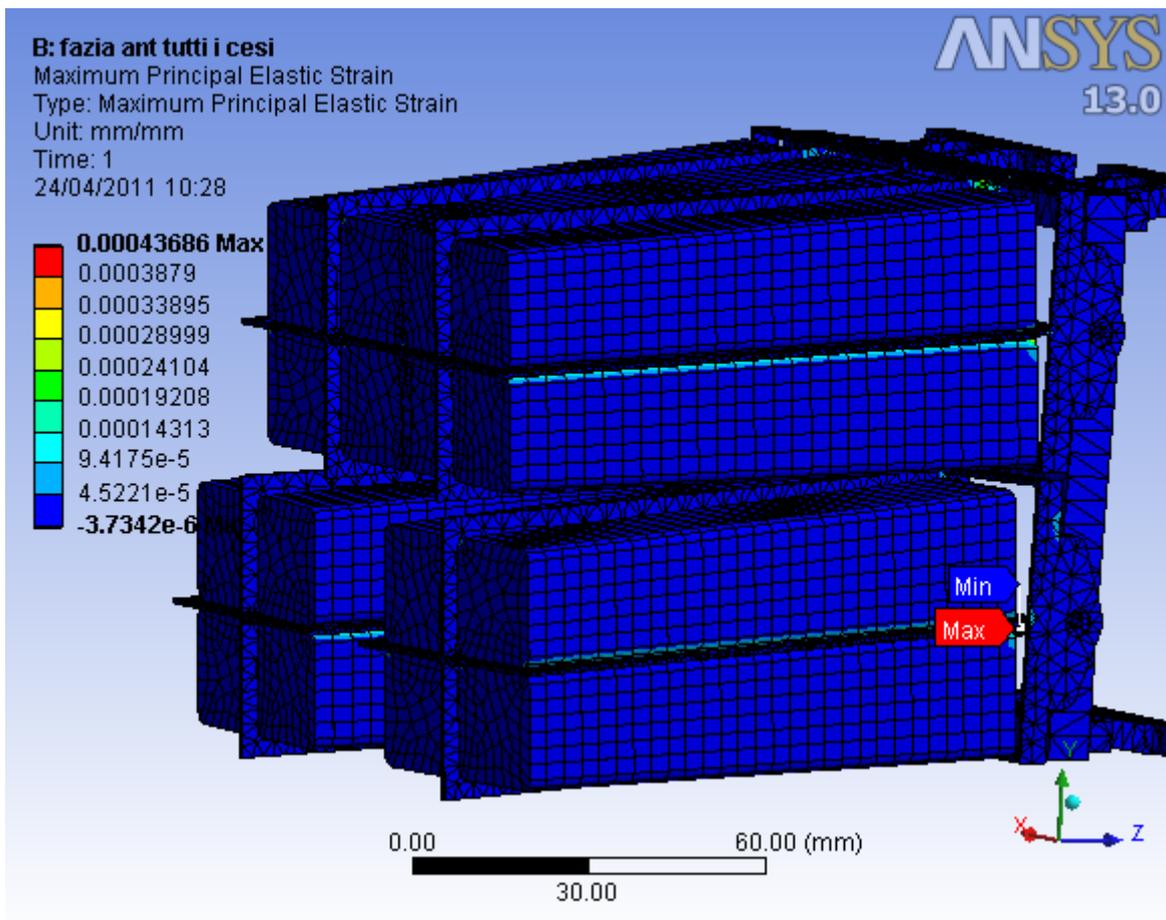


Questa immagine evidenzia in modo molto amplificato, gli spostamenti dei vari punti del modello. I valori riportati nella legenda a fianco corrispondono alle entità effettive calcolate nella simulazione.

Si verifica immediatamente che il valore nullo lo si ha in corrispondenza del vincolo posteriore, mentre il massimo all'estremità della “trave incastrata”.

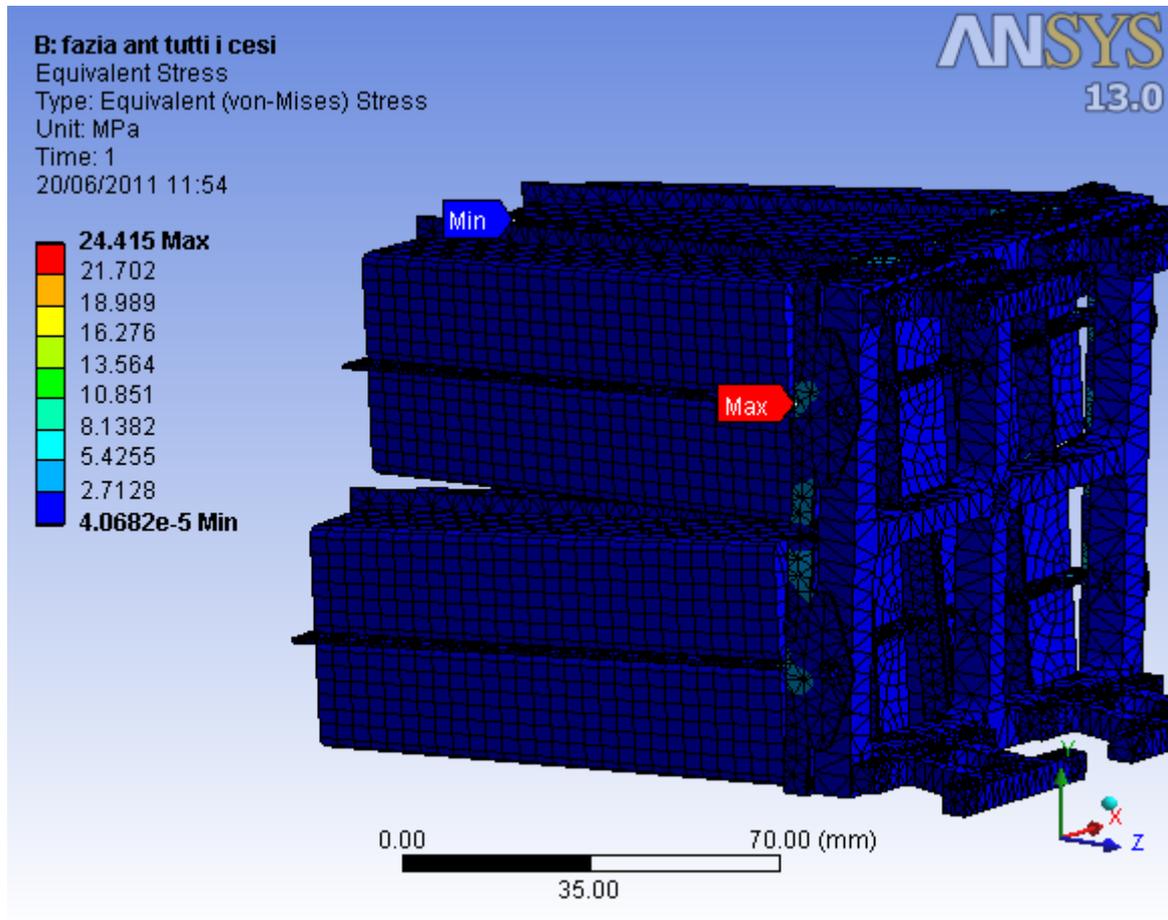
Quello che si nota è una tendenza dei due moduli superiori ad avvicinarsi, a differenza di quelli inferiori che tendono a distanziarsi. Ciò è dovuto al tipo di connessione esistente tra i diversi elementi del modello.

In particolare i supporti per i telescopi sono collegati al telaio dei moduli attraverso due viti i cui fori sono visibili nell'immagine dei vincoli e dei carichi. Il loro effetto è stato simulato attraverso il contatto perfetto delle rispettive superfici affacciate. Questo fa in modo da rendere vincolati tre dei quattro vertici del supporto al telaio; il quarto più interno non si trova a contatto con la superficie periferica di quest'ultimo e rimane pertanto libero di muoversi nello spazio. Ecco spiegato il motivo dello spostamento così accentuato ed opposto dei moduli: quelli superiori presentano un vertice libero in basso, mentre quelli inferiori lo presentano in alto. Sotto l'effetto della forza peso i primi si spostano verso la parte posteriore del modello provocando l'avvicinamento dei moduli, mentre i secondi si spostano in avanti, determinandone l'allontanamento.



In quest'immagine si notano i punti in cui si ha il picco della massima deformazione principale, sia di trazione che di compressione, di questo modello. I punti più critici si trovano in corrispondenza del collegamento tra la parte frontale del supporto dei telescopi e la “mensola” dove questi ultimi vengono montati effettivamente. Ciò coincide con quanto ci si aspetta essendo questa la zona di incastro di una struttura soggetta fondamentalmente a momento flettente.

Le corrispondenti tensioni sono riportate di seguito. In particolare si è scelto di visualizzare la tensione equivalente calcolata secondo il metodo di Von Mises in modo da individuare immediatamente dove si raggiungono i massimi valori di tutte le componenti di tensione presenti.

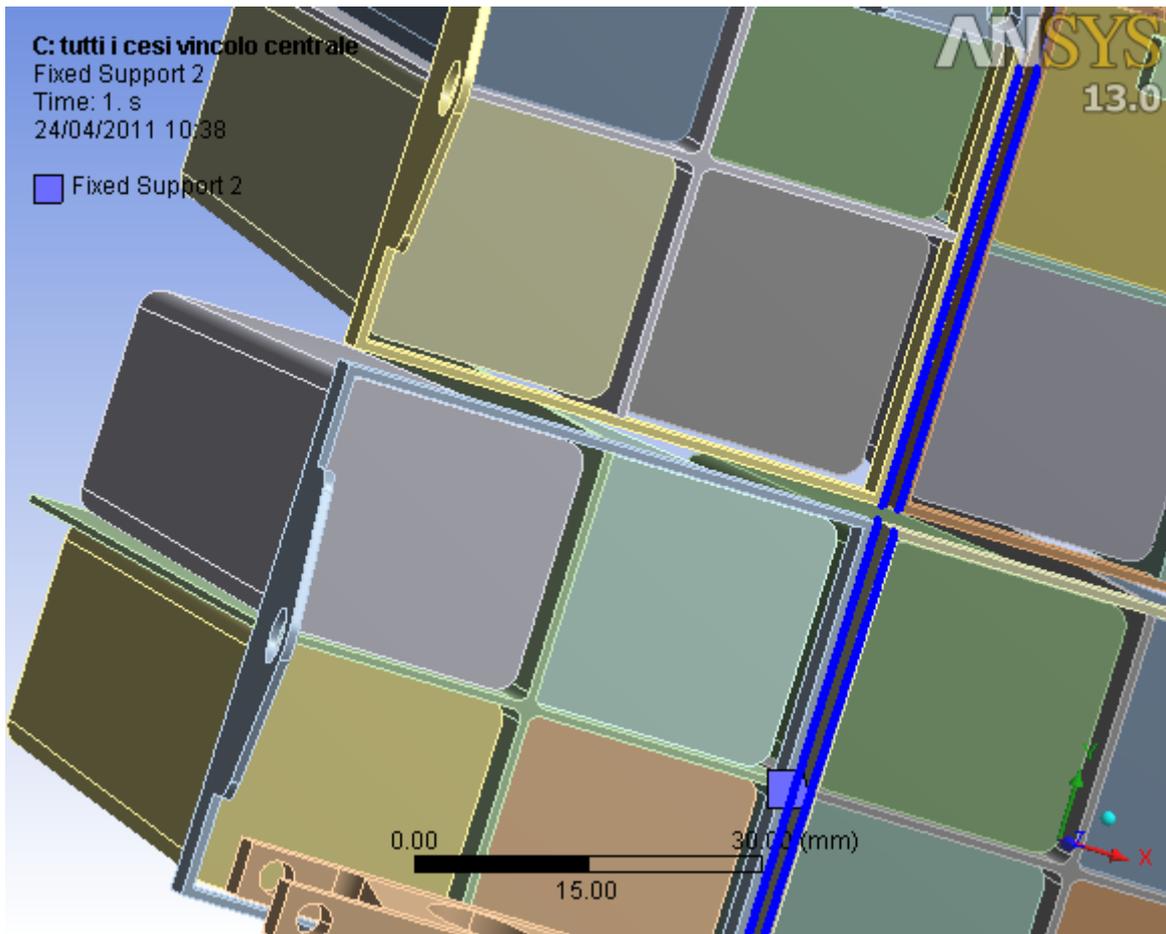


Le tensioni che si raggiungono anche nei punti più critici sono comunque sempre in campo elastico e ben al di sotto del limite di snervamento della fibra di carbonio impiegata.

## Sezione anteriore: vincolo aggiuntivo

Dai risultati della precedente simulazione si è evidenziato come fosse necessario modificare il disegno di questa sezione in modo da fornirle un ulteriore vincolo. Conseguentemente si è deciso di simulare tale supporto nella zona centrale del telaio dei moduli per eliminare il moto rigido dei loro quattro vertici interni.

Si è quindi applicato un incastro perfetto ai loro spigoli interni.



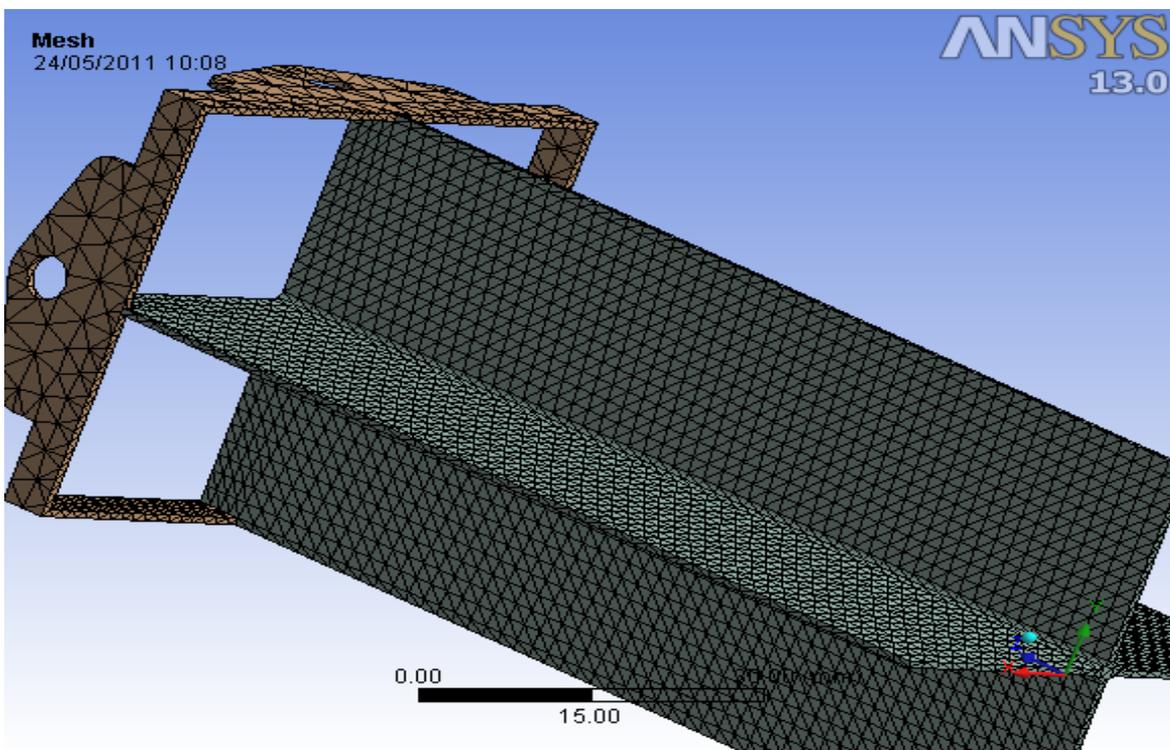
I vincoli aggiuntivi sono stati evidenziati in blu e dall'etichetta *Fixed Support 2*.

## Mesh

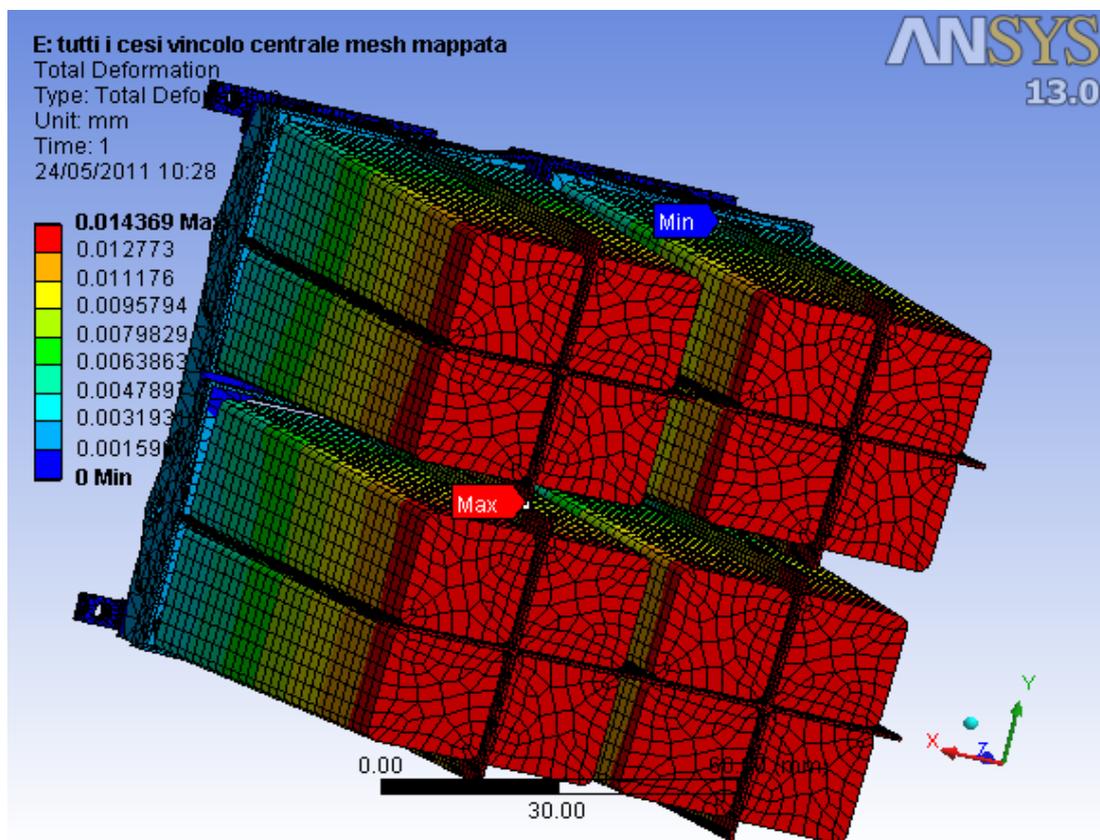
Si è posta inoltre una maggiore attenzione nella generazione della mesh. In particolare nei supporti dei telescopi si è fatto in modo da ottenere elementi ben allineati e della stessa dimensione tramite una *Mapped Face Meshing*, ovvero una mesh di superficie di caratteristiche opportune. Dato il piccolo spessore infatti, si è cercato di ridurre al minimo l'errore dovuto alla simulazione con elementi finiti aventi una loro rigidità intrinseca, ottenendo quindi una struttura più rigida di

quella reale.

In questo modo si è ottenuta una mesh con una distorsione media degli elementi pari a 0.5582 ed una deviazione standard di 0.185.

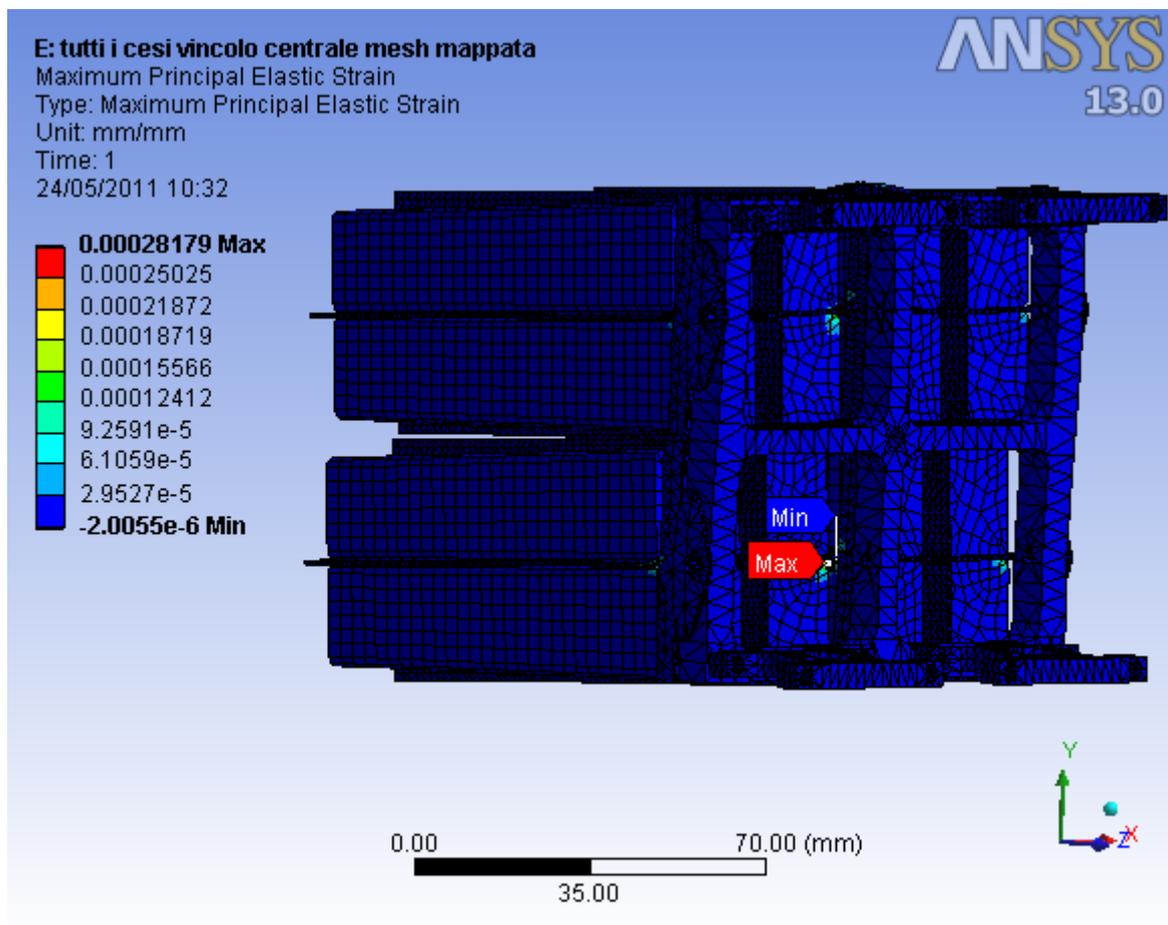


## Risultati

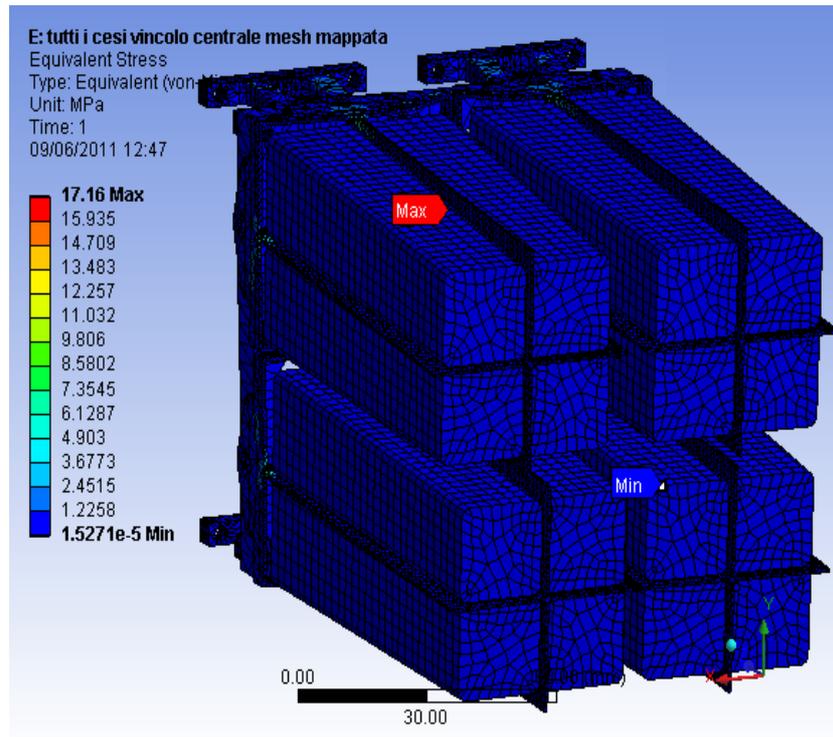


Nonostante l'elevata amplificazione della scala, ora i quattro moduli rimangono visibilmente fermi e presentano lo stesso comportamento. Si può notare ancora una leggera differenza tra i moduli superiori e quelli inferiori, dovuta in questo caso ad una curvatura della lamina centrale di ogni supporto, e a come si deformano le zone in corrispondenza del nuovo incastro. Inoltre anche il valore della freccia massima è diminuito notevolmente, passando da 0.0797 [mm] a 0.0143 [mm].

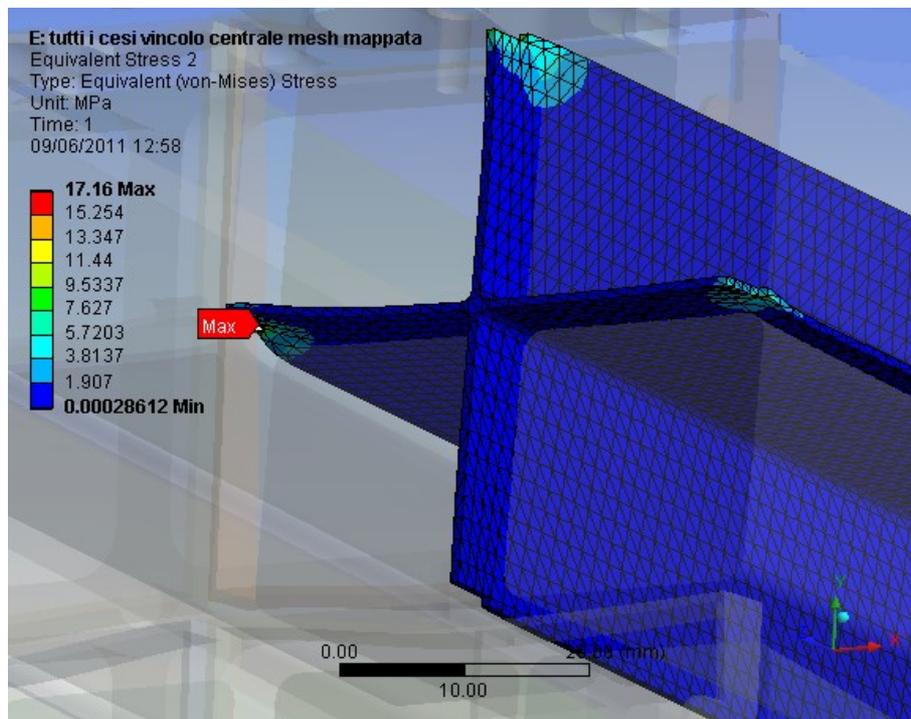
Per quanto riguarda le deformazioni e le tensioni si riscontra che i punti in qui si hanno i picchi maggiori sono gli stessi, ma che i valori sono anche in questo caso diminuiti, come si può vedere nelle immagini seguenti.



Per quanto riguarda le tensioni si è fatto riferimento alla tensione equivalente calcolata secondo il metodo di Von Mises.

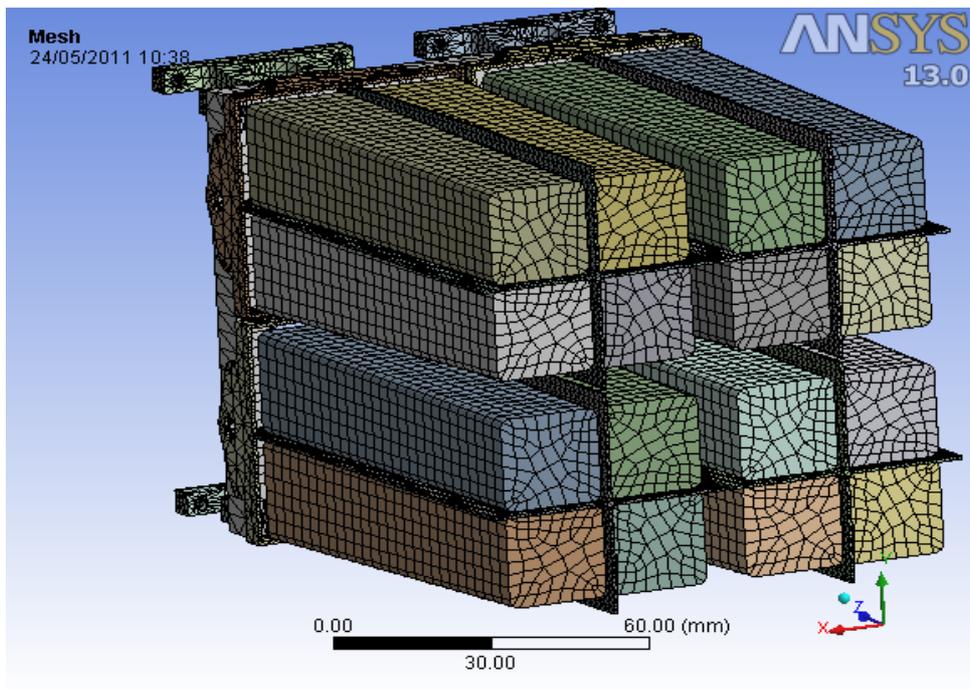
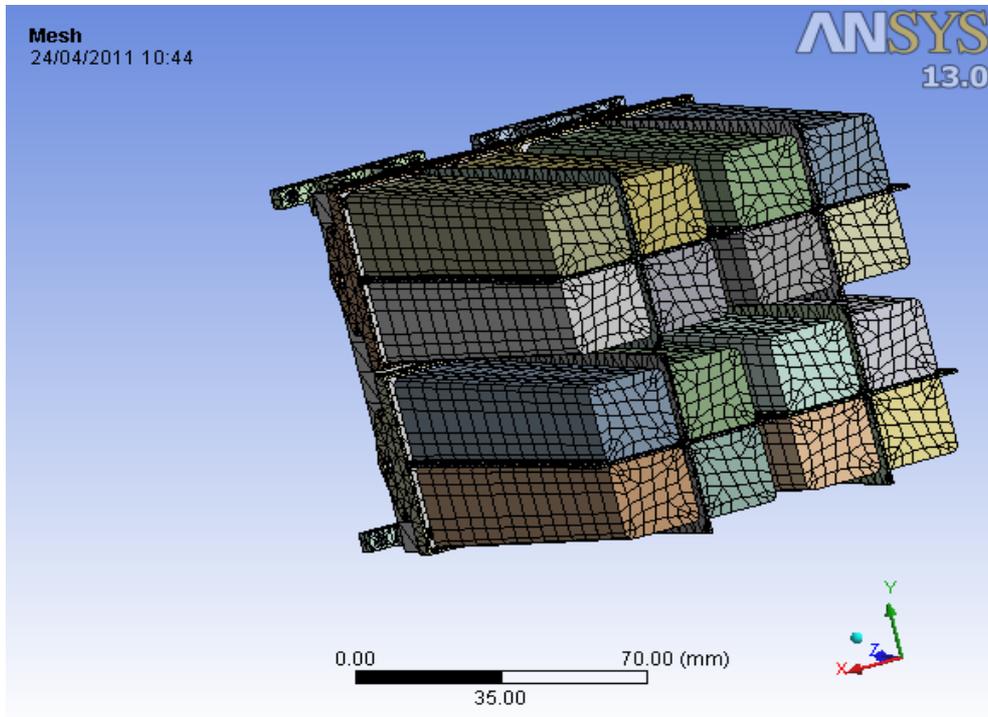


Il picco, di 17.16 [Mpa], lo si ha in corrispondenza dell'attacco del supporto degli scintillatori con la struttura di sostegno a causa della piccola superficie di contatto.



### Sezione anteriore: influenza della qualità della mesh

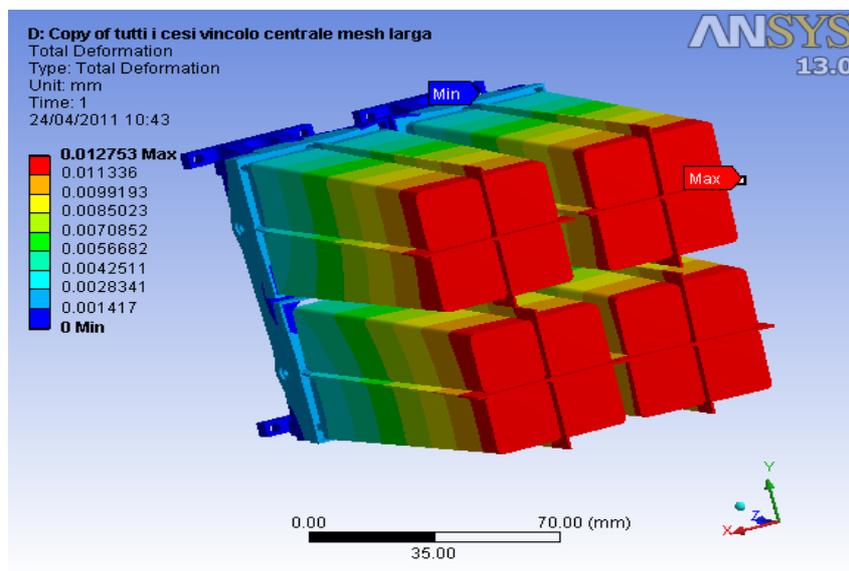
Per far notare la differenza nei risultati tra mesh di diversa qualità, si ripropone l'ultima simulazione con una mesh a maglia larga e se ne confrontano le soluzioni.



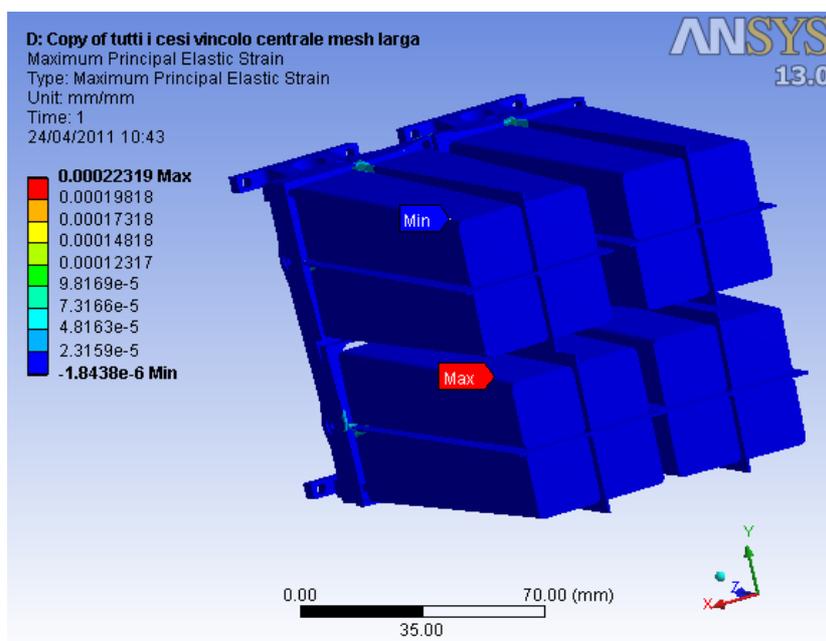
La prima immagine si riferisce alla mesh grossolana, mentre la seconda a quella a maglia media usata in precedenza.

In particolare il valore della distorsione media degli elementi per la maglia grossolana è di 0.6457 con deviazione standard di 0.2698.

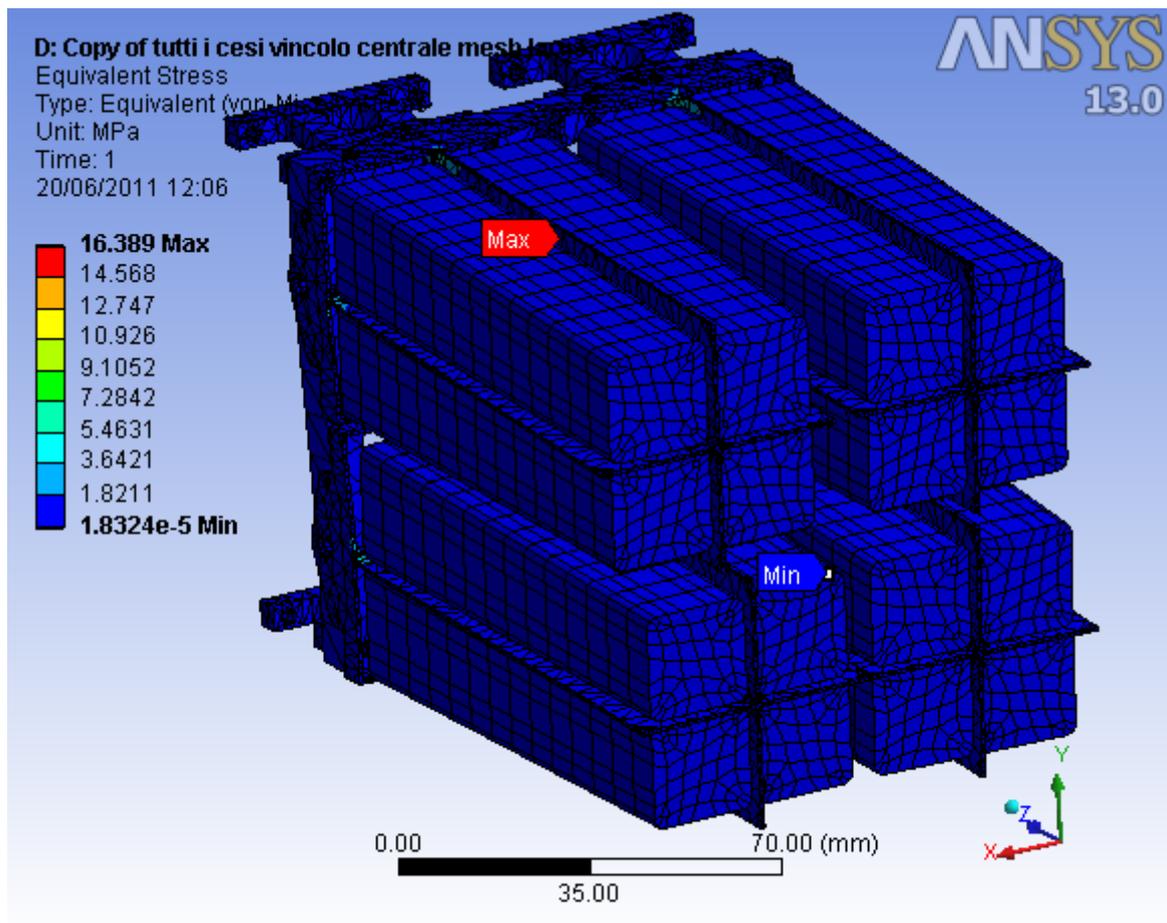
## Risultati



Il valore massimo dello spostamento passa da 0.014369 [mm] a 0.012753 [mm] con una sottostima, e quindi un aumento della rigidità della struttura, del 12.67%.



Il valore massimo della massima deformazione principale passa da 0.00028179 a 0.00022319 con una sottostima del 26.25%.

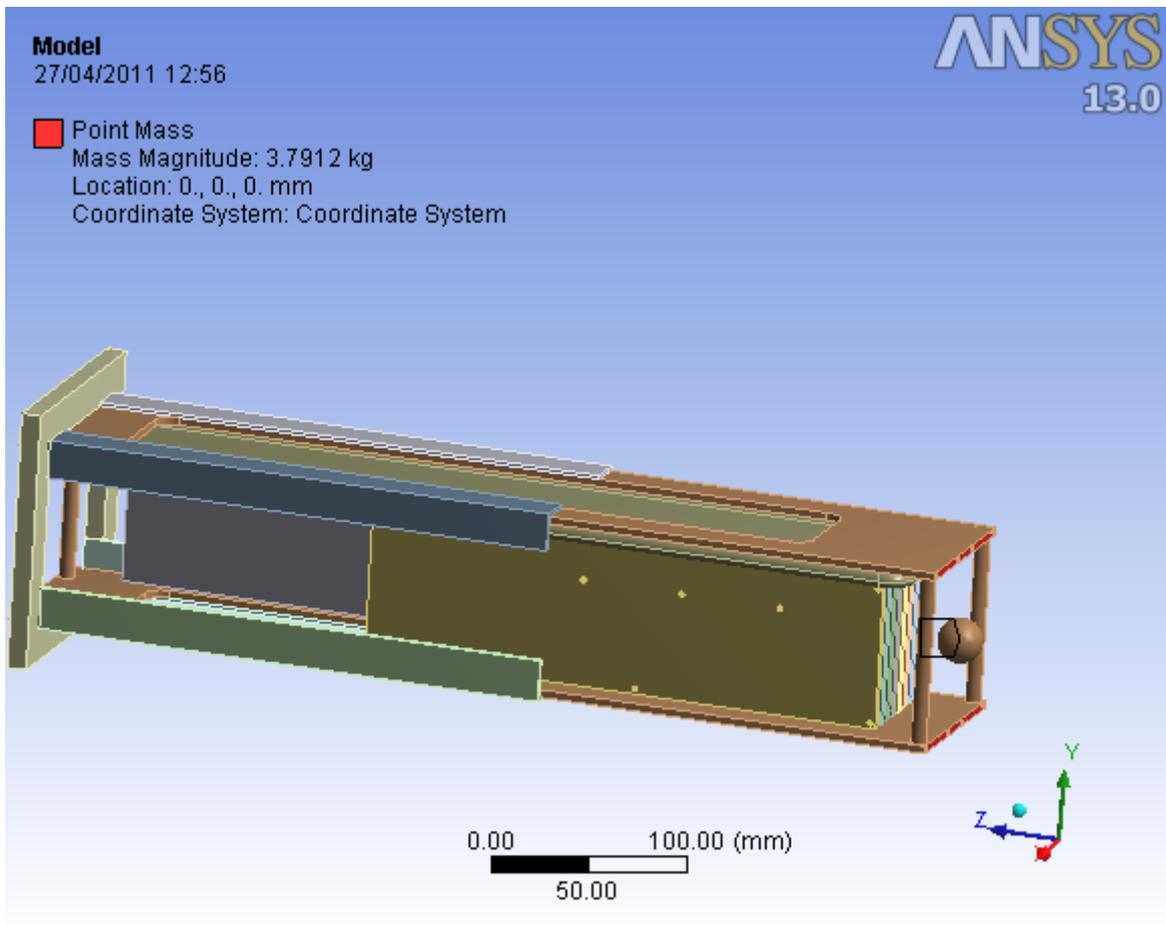


Infine il valore massimo della tensione equivalente passa da 17.16 [MPa] a 16.389 [MPa] con una sottostima del 4.7%.

Si vede quindi come sia meglio effettuare le simulazioni con la mesh migliore possibile al fine di ottenere risultati attendibili e una struttura con una rigidità più vicina a quella che avrà in realtà.

### Sezione posteriore: un solo supporto – primo caso

La sezione posteriore è formata dal supporto meccanico dell'intero blocco e dal corpo sul quale verranno montati i componenti elettronici per una prima elaborazione dei segnali e che dovrà provvedere al loro raffreddamento.



### Punto di massa

Per tenere conto della sezione anteriore e in particolare del suo peso, si sfrutta un'opzione offerta da Ansys: inserire un punto di massa.

Esso è collegato alle superfici rosse visibili in figura senza alcuna rigidezza e quindi le sollecitazioni tra la sezione posteriore e anteriore non possono essere trasmesse. Tuttavia può essere soggetta all'accelerazione gravitazionale e quindi permette di tenere conto dell'effetto del peso dei quattro moduli e delle strutture circostanti aventi una massa complessiva di 3.79 [kg] come si nota nell'immagine.

## Materiali e proprietà

Gli unici due materiali impiegati in questo modello sono l'alluminio Al 7075-T6 usato anche nel modello precedente, ed una lega di rame isotropa ed omogenea per la piastra superiore del dissipatore di calore avente le seguenti proprietà:

- $\rho = 8.3 \left[ \frac{Kg}{dm^3} \right]$
- $E = 110000 \text{ [MPa]}$
- $\nu = 0.34$

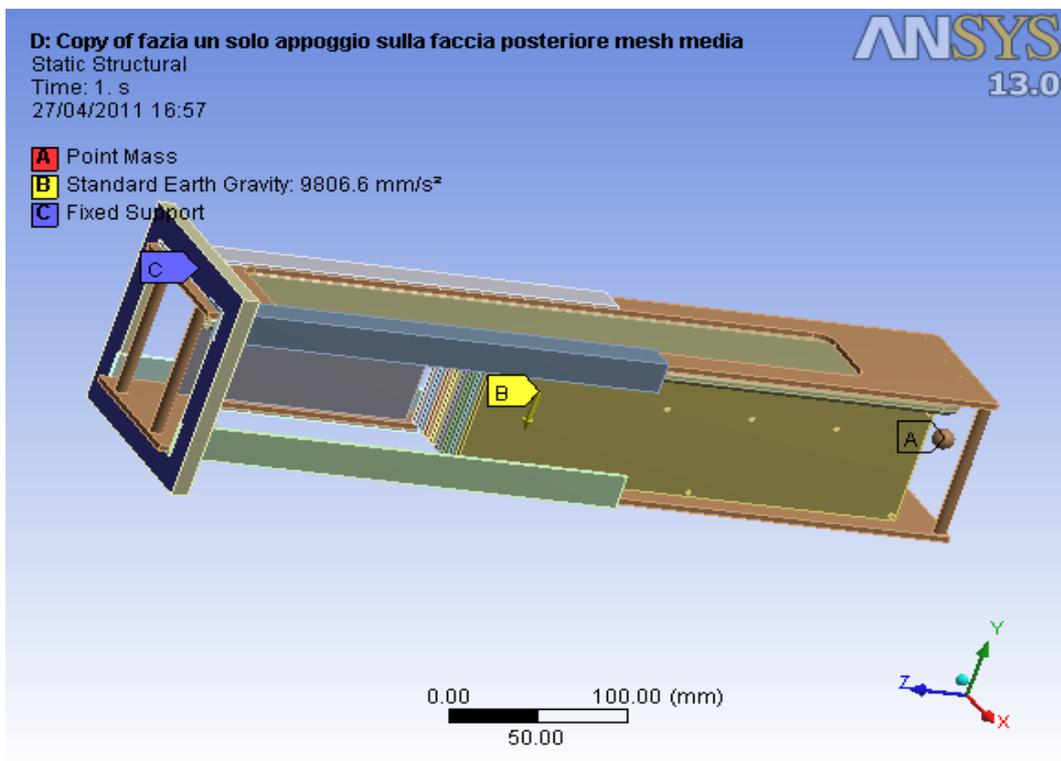
## Mesh

La mesh utilizzata è sempre quella *Automatica* con finezza media.

La distorsione media degli elementi risulta essere pari a 0.6844 con una deviazione standard di 0.2399.

## Vincoli e carichi

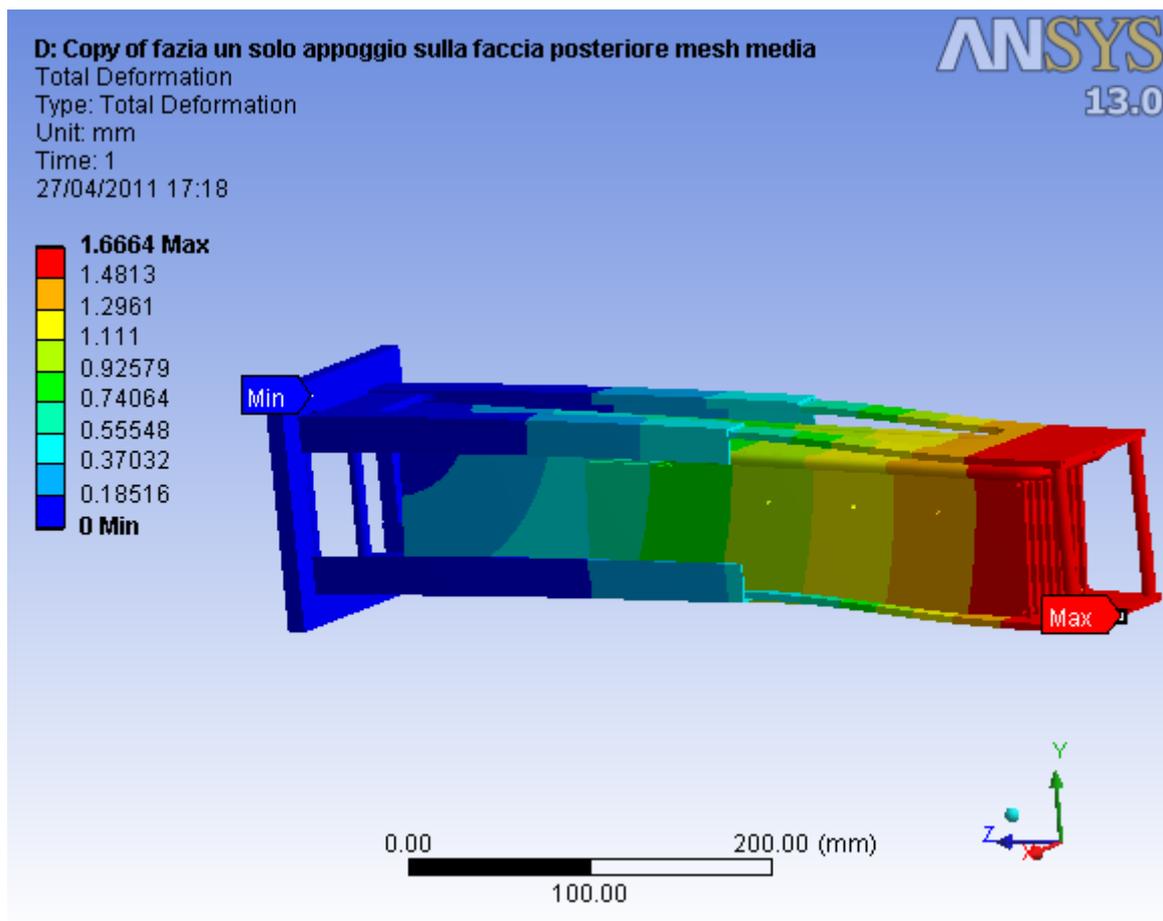
Mentre il carico consiste sempre dalla forza peso applicata a tutti i corpi del modello, il vincolo consiste in un incastro perfetto applicato alla faccia posteriore del supporto meccanico, come evidente nella figura seguente.



Si è supposto di essere sempre nella condizione peggiore assimilabile ad una trave incastrata all'estremità e soggetta al peso proprio.

## Risultati

Si riportano al solito gli andamenti ed i valori relativi allo spostamento dei punti, le deformazioni e le tensioni. Queste ultime si riferiscono sempre alla massima tra le tensioni/deformazioni principali.



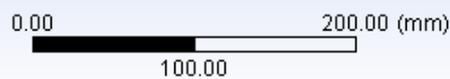
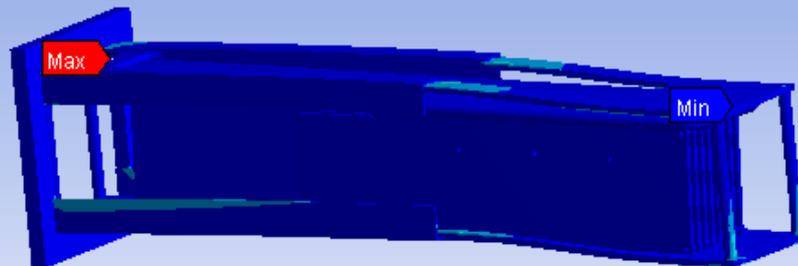
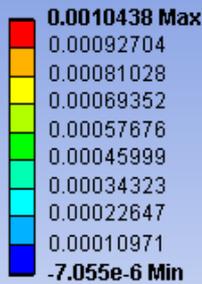
Correttamente il massimo spostamento lo si ha all'estremità non vincolata, mentre nel vincolo risulta nullo.

La massima deformazione elastica principale raggiunge il picco di trazione in corrispondenza degli attacchi del dissipatore con il corpo meccanico.

**D: Copy of fazia un solo appoggio sulla faccia posteriore mesh media**

Maximum Principal Elastic Strain  
Type: Maximum Principal Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
27/04/2011 17:18

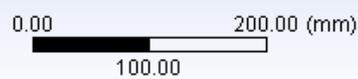
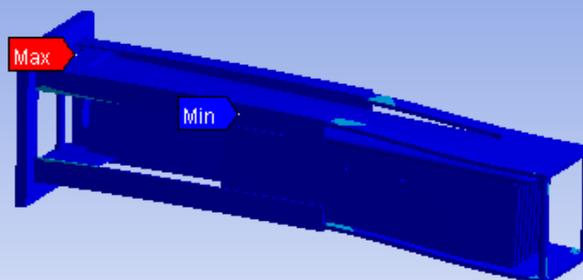
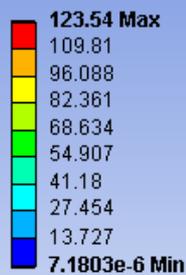
**ANSYS**  
13.0



**D: Copy of fazia un solo appoggio sulla faccia posteriore**

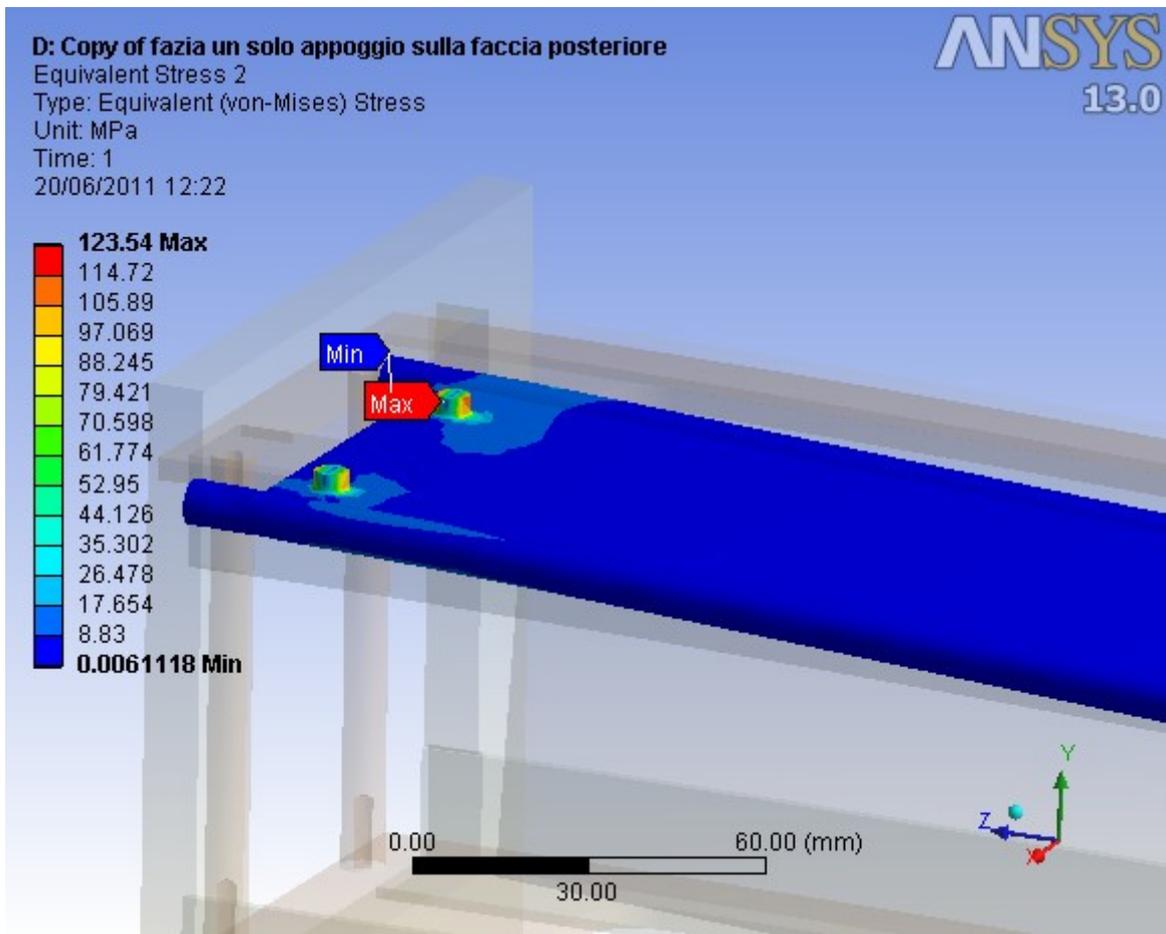
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
20/06/2011 12:21

**ANSYS**  
13.0



Analogamente anche le massima tensione di trazione si trova in questi punti.

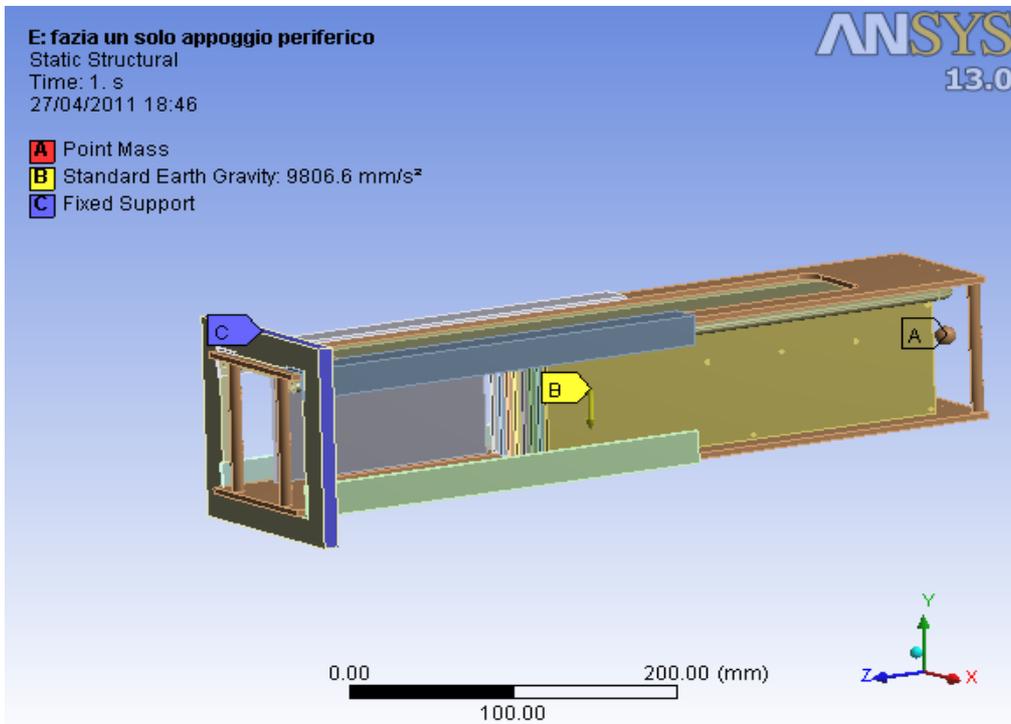
Nascondendo il supporto meccanico, si nota in dettaglio i picchi di tensione sugli attacchi del dissipatore termico.



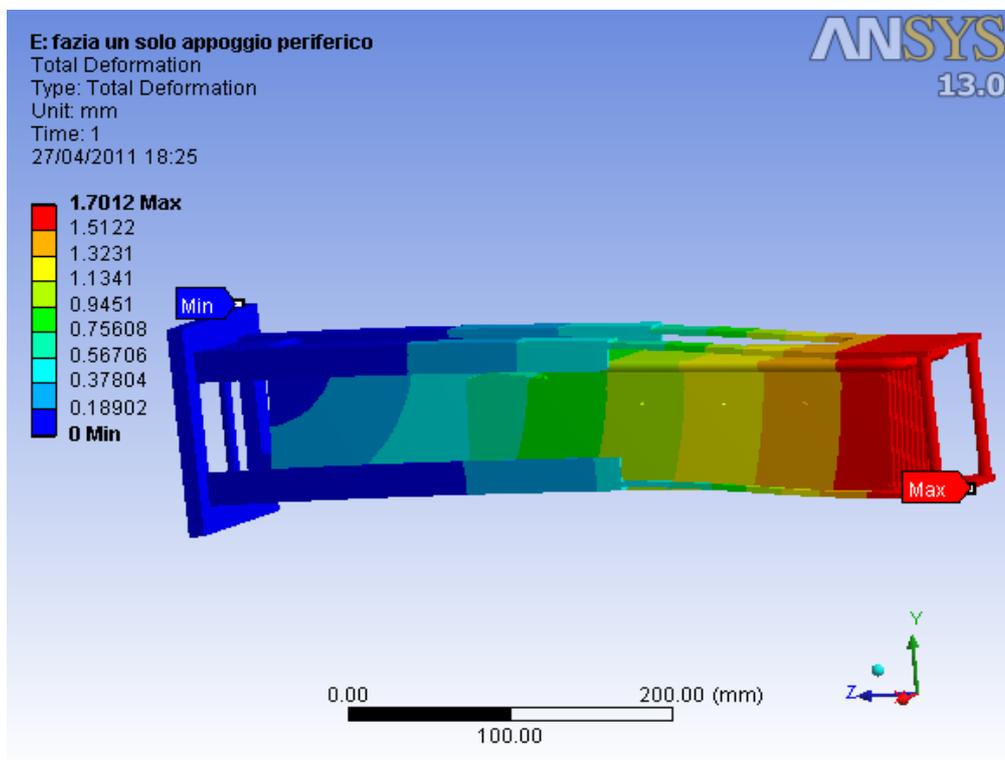
Dato che nella realtà questi punti collegano il dissipatore di calore con il supporto meccanico grazie a dei bulloni, saranno da monitorare accuratamente. Tuttavia il massimo valore della massima tensione principale è molto al di sotto del limite di snervamento dell'alluminio per cui anche un valore di 140.46 [MPa] non preoccupa circa una deformabilità permanente del componente. Questo vale anche se i valori di tensione dovessero essere maggiori a causa delle approssimazioni fatte e alla mesh generata, in quanto si ritiene di rimanere comunque all'interno del campo elastico del materiale nonostante questi errori relativi insiti nella semplificazione della simulazione.

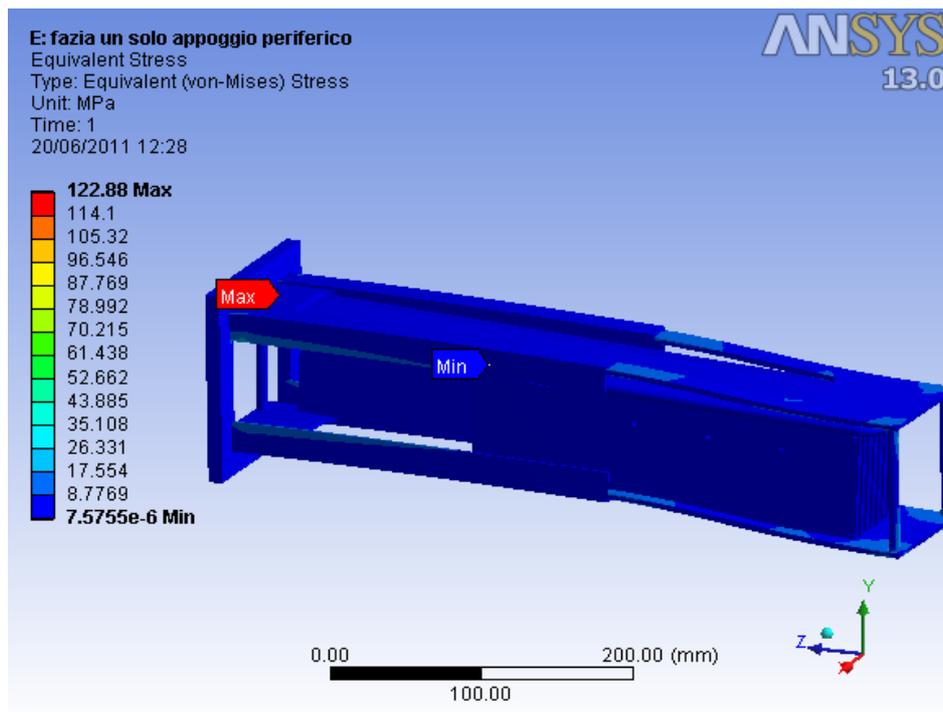
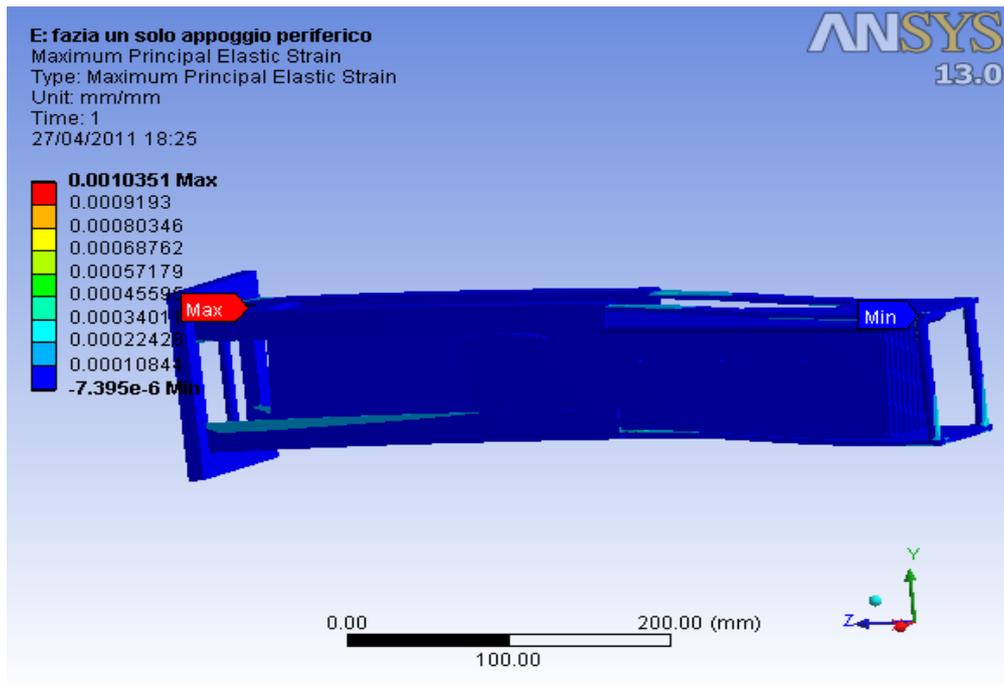
## Sezione posteriore: un solo supporto – secondo caso

Lasciando inalterati la mesh, i materiali ed il carico, in questo secondo caso si è imposto che il vincolo fosse applicato lungo la superficie periferica del supporto posteriore, come illustrato nella seguente immagine.



## Risultati





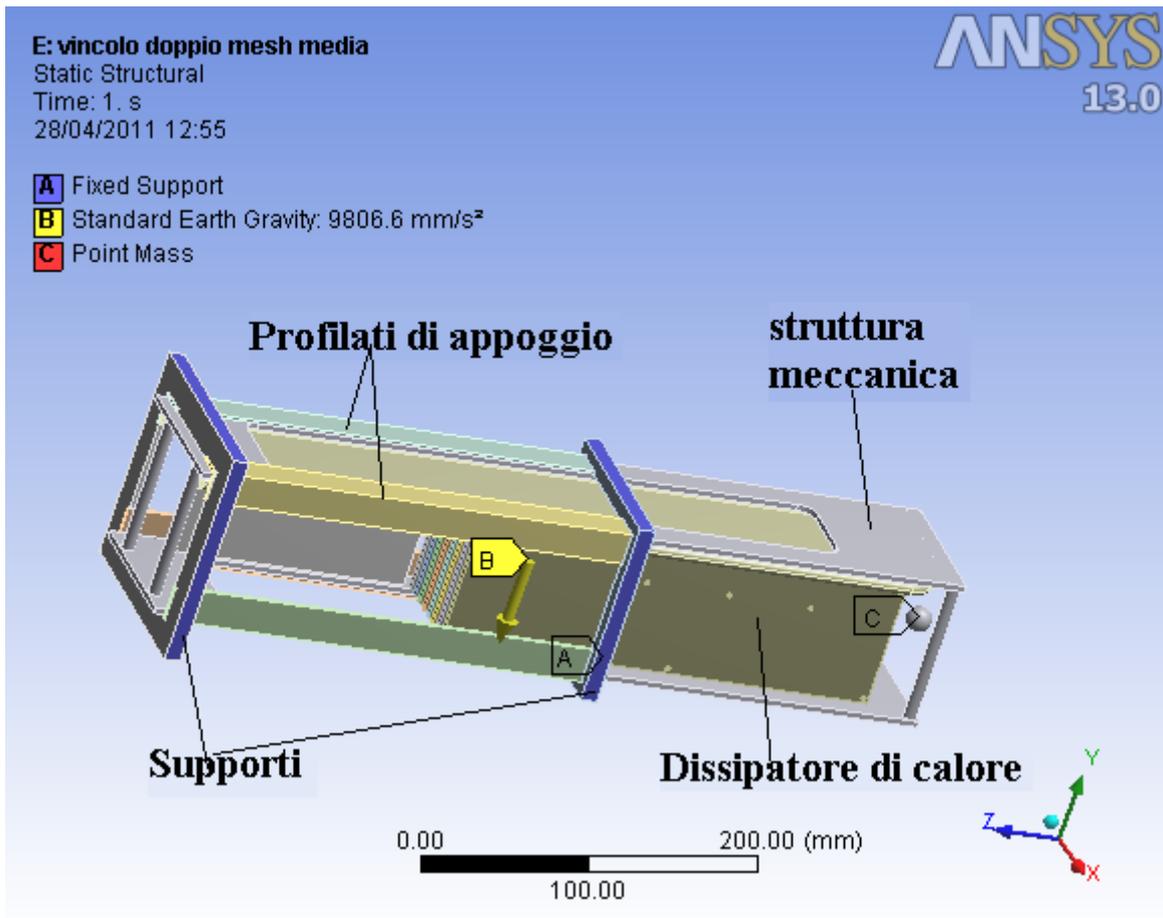
Le differenze percentuali nei due modelli sono rispettivamente di:

- spostamenti 2.046%
- massima deformazione principale 0.84%
- tensione equivalente 0.537%

Quindi i due modelli possono essere considerati equivalenti, e la modellazione del vincolo nei due modi non influisce significativamente sui risultati finali.

### **Sezione posteriore: caso reale**

Come si è visto nelle immagini iniziali, l'intero blocco avrà due supporti e non uno solo. Si ripete la simulazione con questo nuovo vincolo, i cui risultati sono quelli significativi per valutare l'inflessione del complessivo. Questo risultato è quello che più interessa negli esperimenti di fisica in quanto denota il comportamento della struttura nel montaggio finale.



### **Materiali**

Tutti i corpi individuati nella precedente figura sono realizzati in alluminio, modellato con le proprietà della lega Al 7075-T6. Unica eccezione è la piastra superiore del dissipatore che è in rame, avente le proprietà precedentemente elencate.

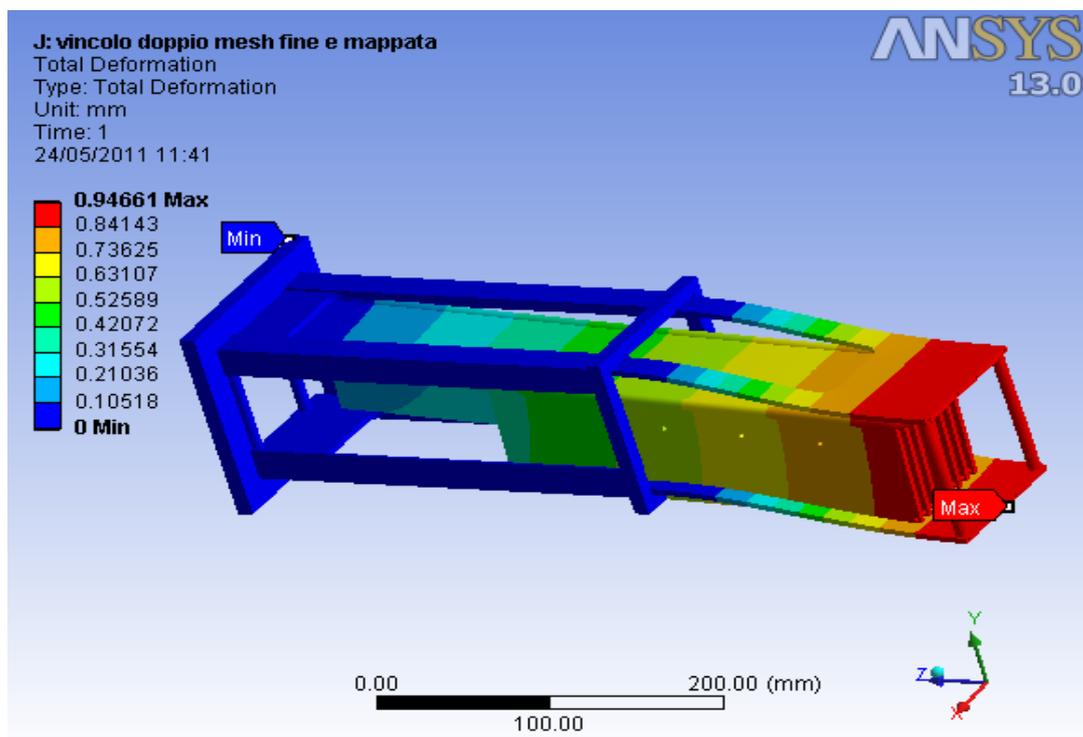
## Mesh

Utilizzando sempre una mesh *Automatica* di dimensione fine in combinazione con una *Mapped Face Meshing* sulle superfici idonee con tale metodo, si ottengono una distorsione media degli elementi pari a 0.5766 ed una deviazione standard pari a 0.2463.

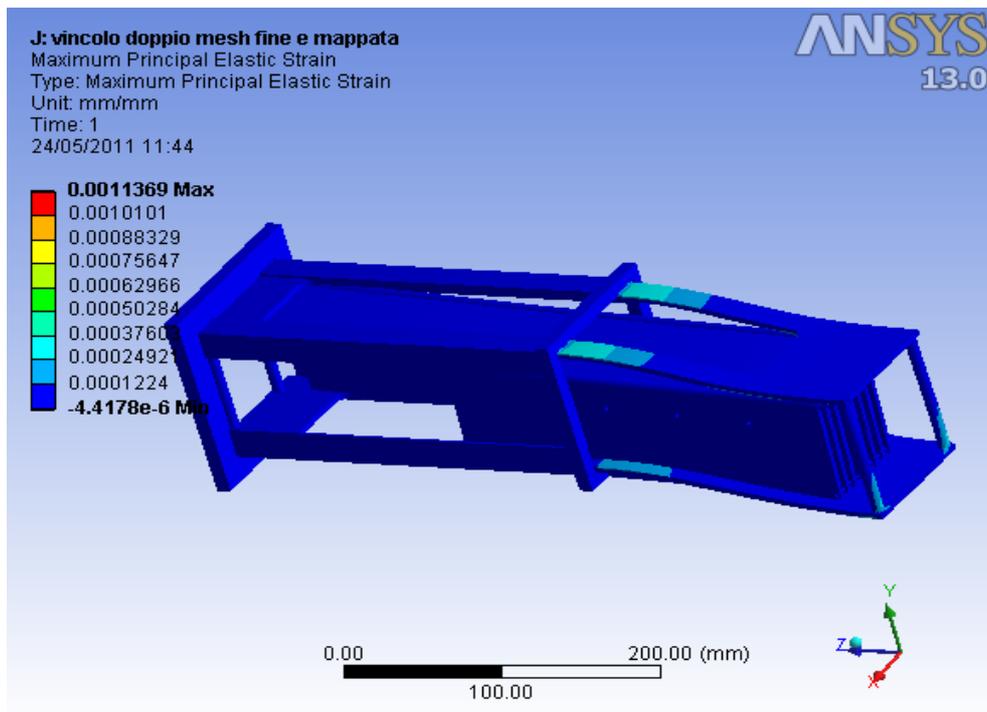
## Vincoli

Come si vede dall'immagine, si sono applicati degli incastri perfetti ad entrambi i supporti lungo la loro superficie periferica.

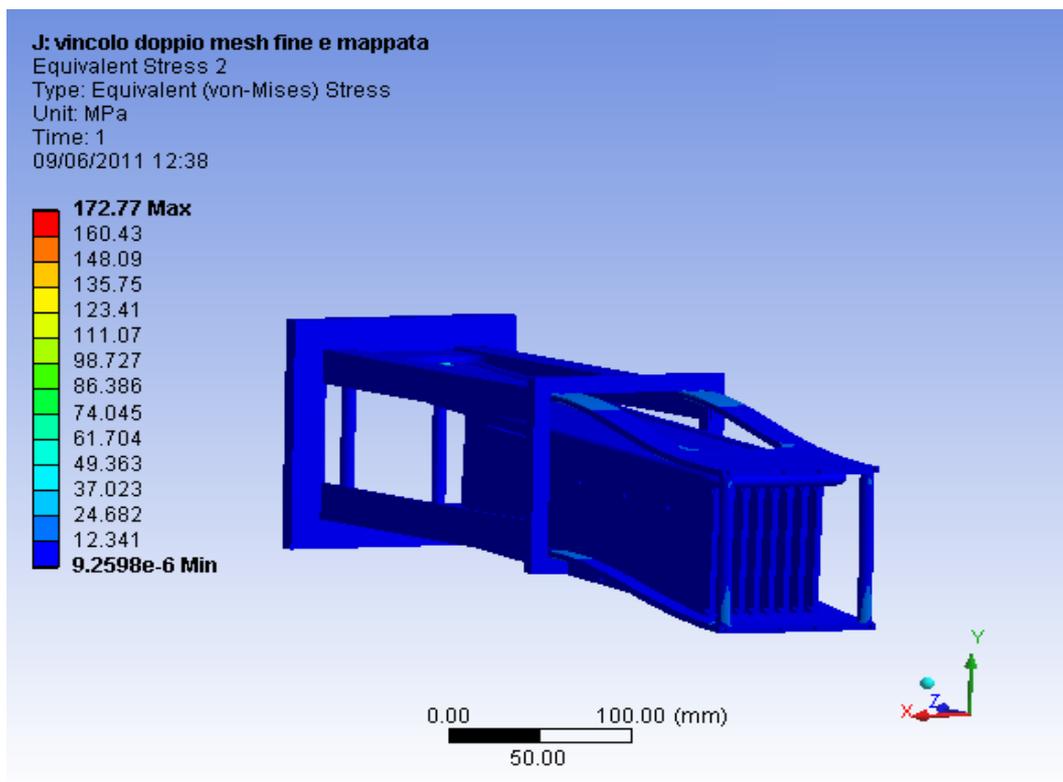
## Risultati



Gli spostamenti evidentemente si riducono notevolmente rispetto al caso studiato con un singolo supporto.



E lo stesso andamento lo presentano sia le deformazioni che le tensioni.



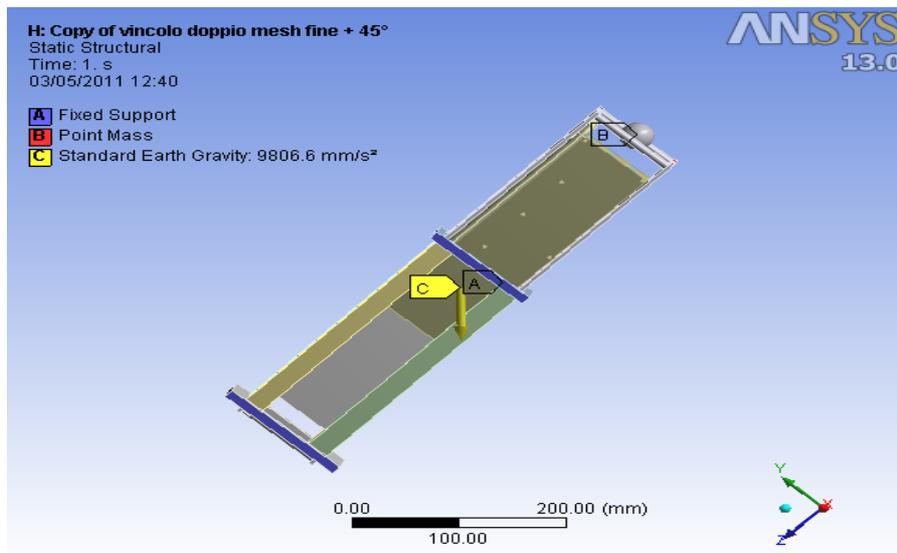
Il picco della tensione equivalente lo si ha in corrispondenza dell'attacco delle lamine di alluminio alla piastra superiore del dissipatore di rame. Si tratta tuttavia di una zona molto ristretta che

evidenzia un problema nella generazione della mesh, e quindi si tratta di un valore non significativo al fine dell'analisi. Il componente è sostanzialmente scarico.

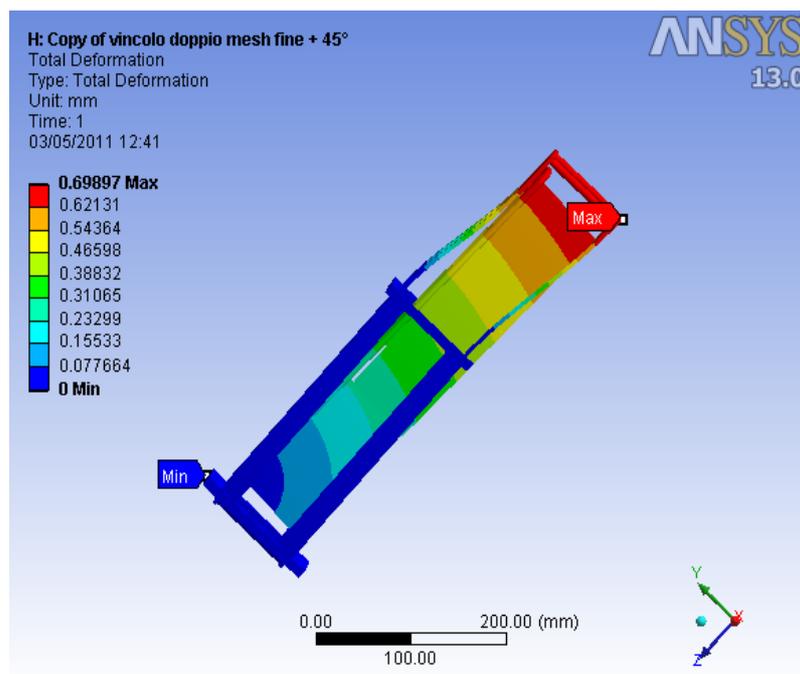
### Sezione posteriore: posizioni a 45°

Si sono voluti confrontare i risultati calcolati per la condizione peggiore vista, con quelli relativi a blocchi che si troveranno montati con un angolo di  $\pm 45^\circ$  rispetto ad essa.

### Blocco inclinato a +45°

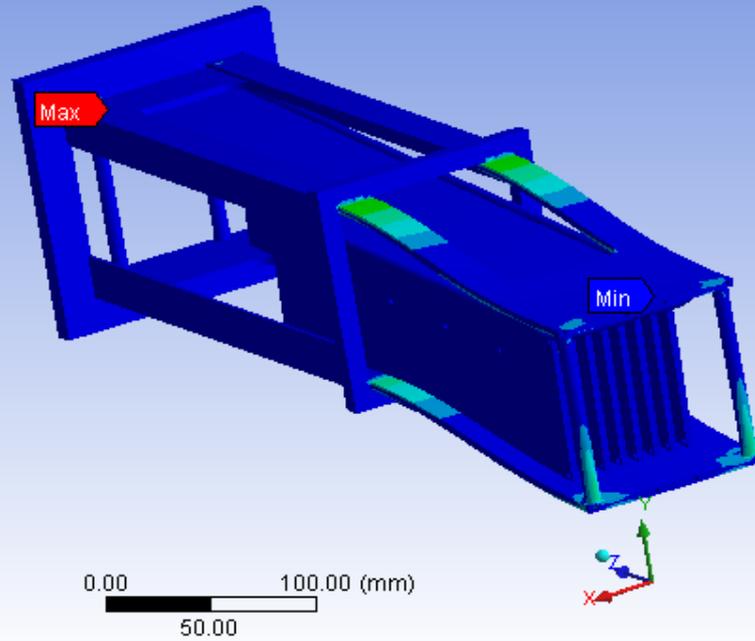
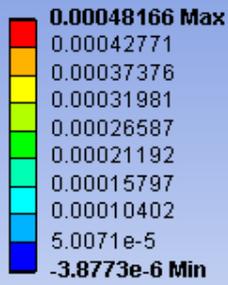


### Risultati



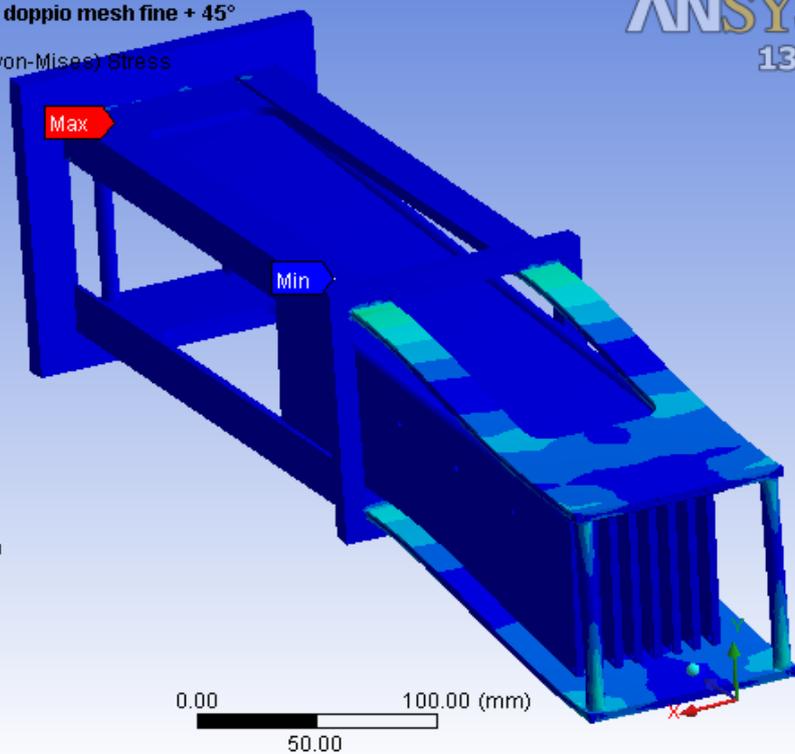
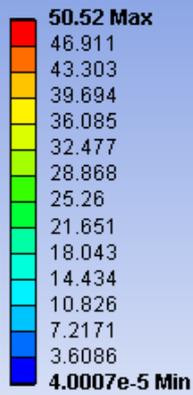
**H: Copy of vincolo doppio mesh fine + 45°**  
Maximum Principal Elastic Strain  
Type: Maximum Principal Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
03/05/2011 12:41

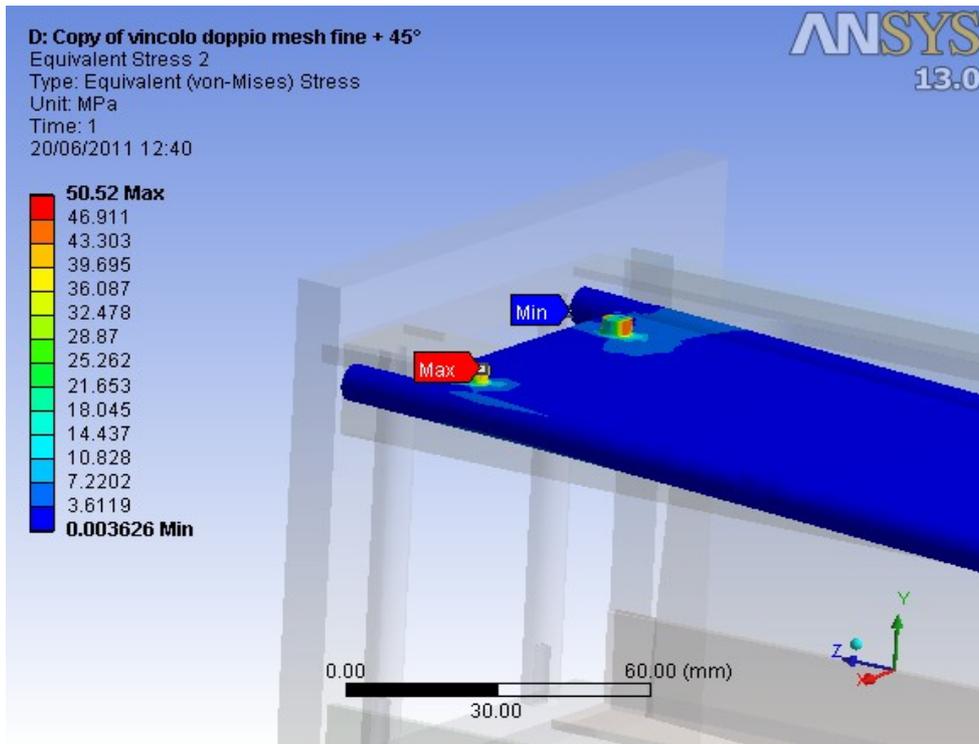
**ANSYS**  
13.0



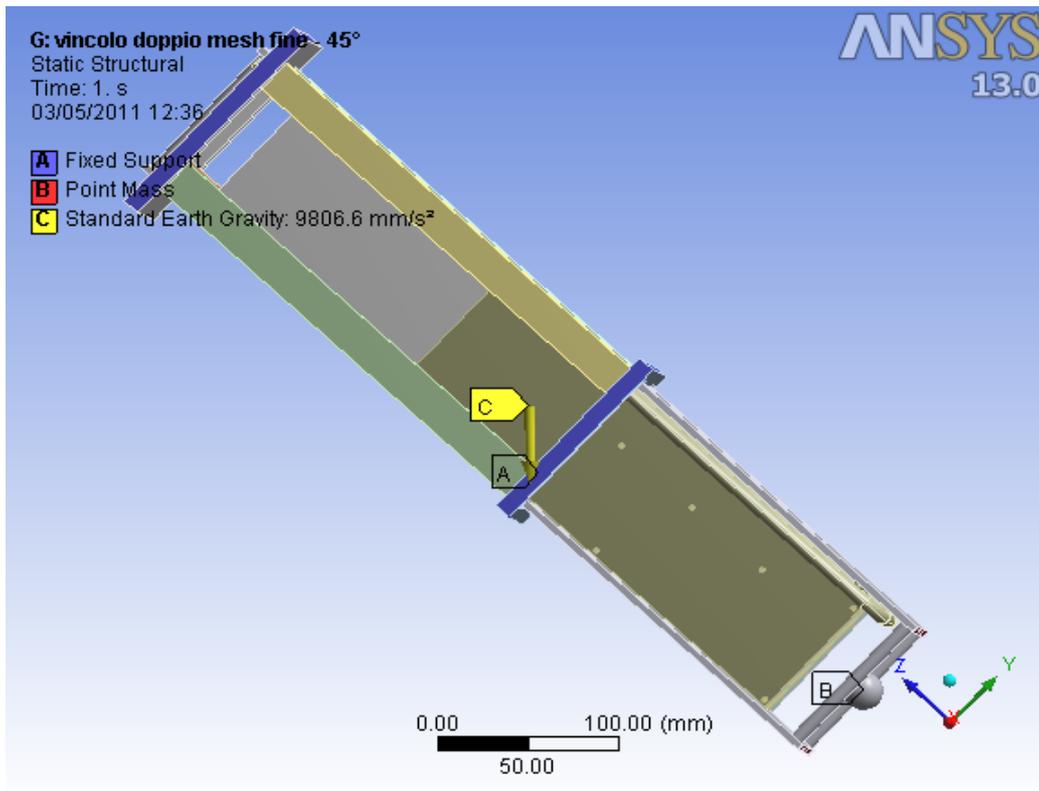
**D: Copy of vincolo doppio mesh fine + 45°**  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
20/06/2011 12:33

**ANSYS**  
13.0

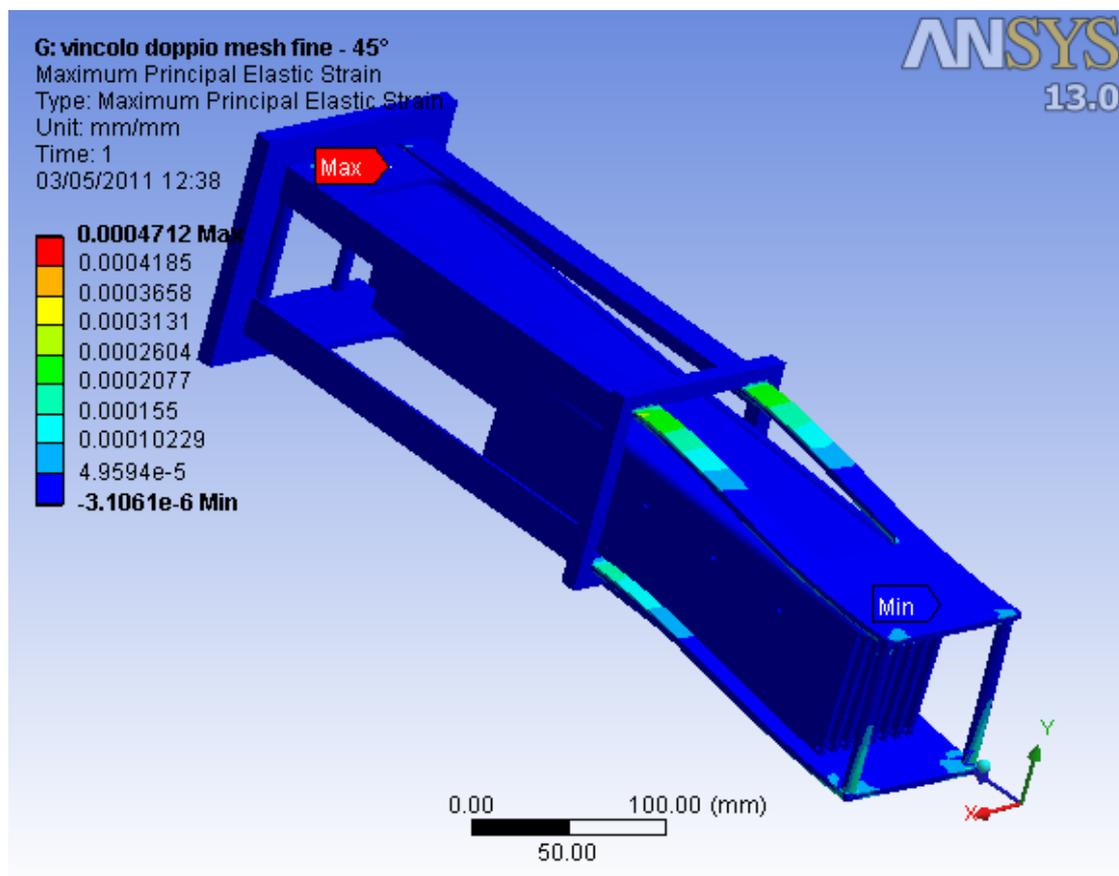
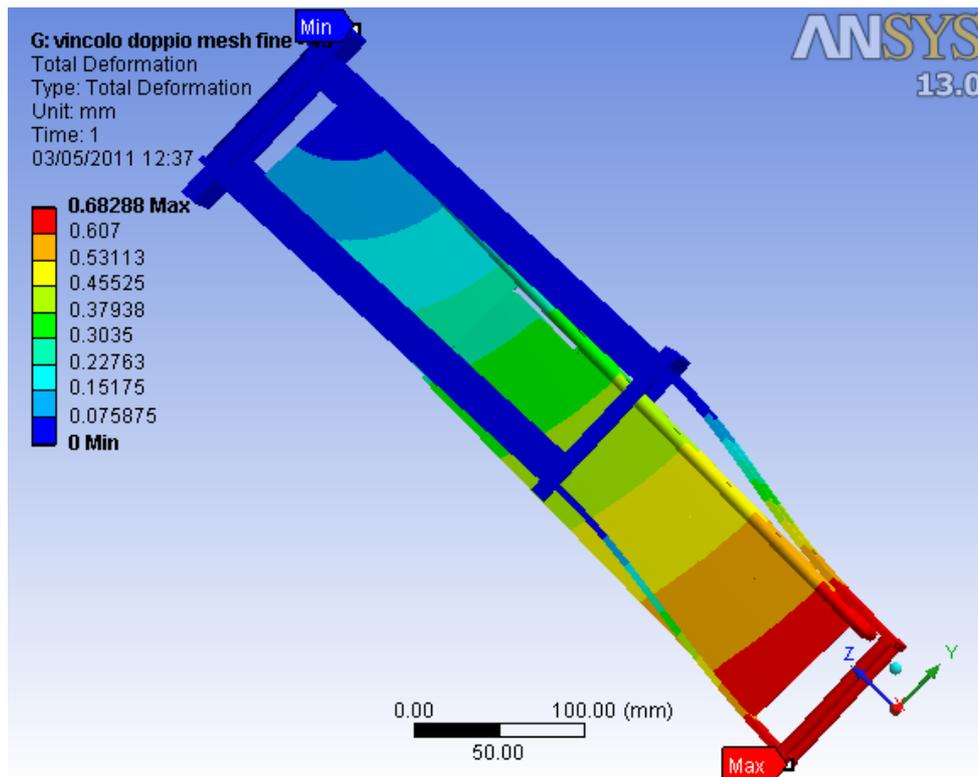


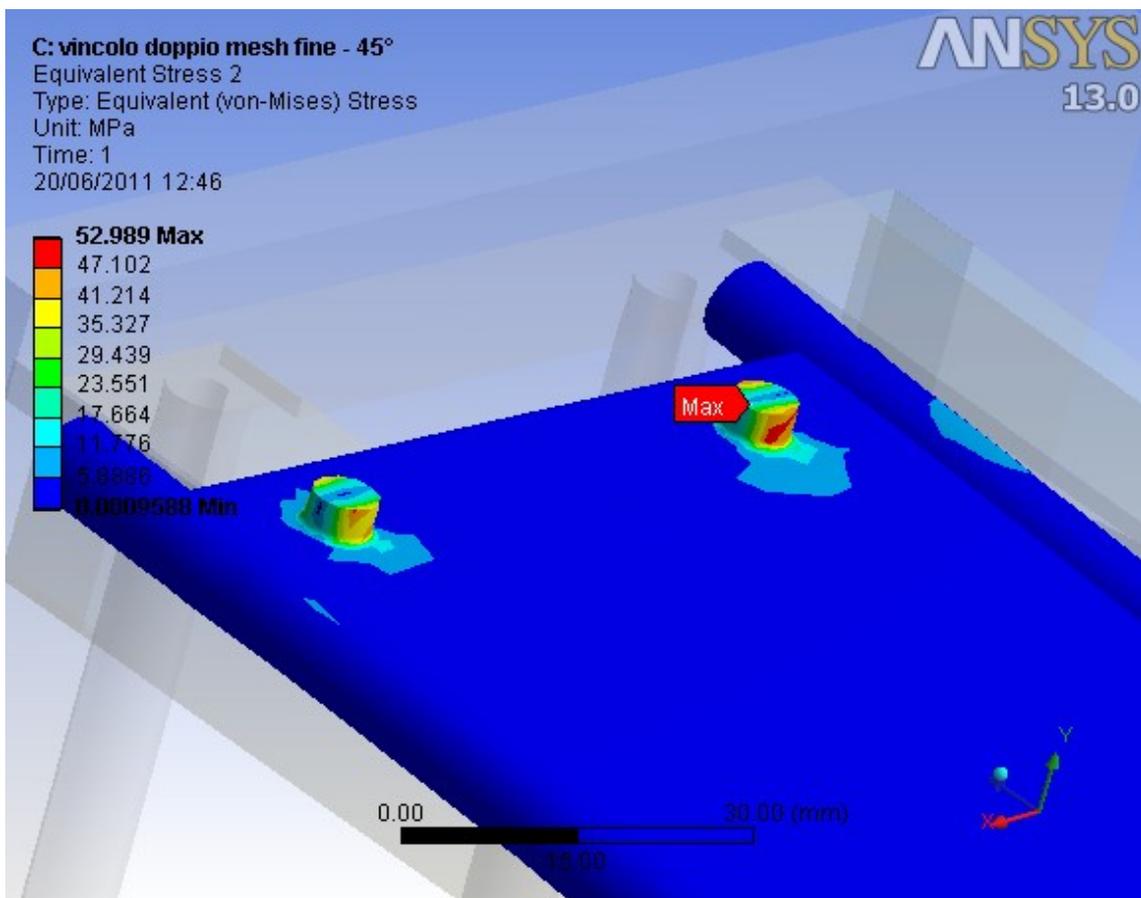
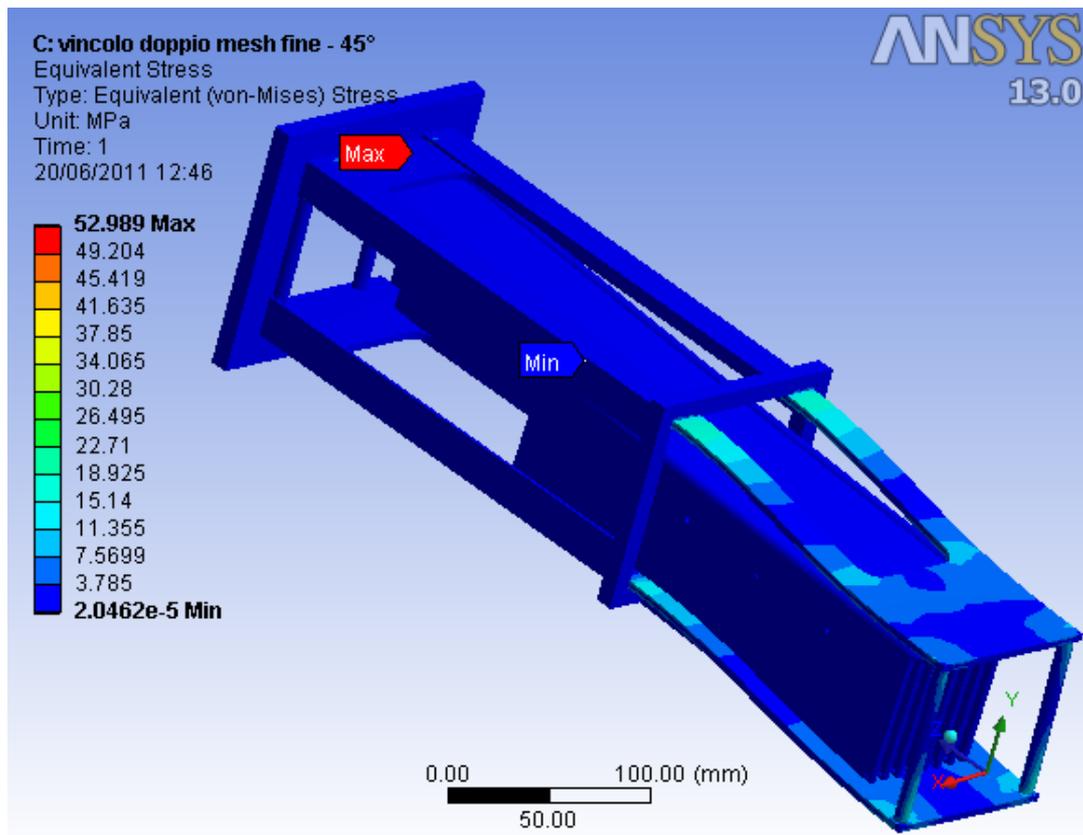


**Blocco inclinato a -45°**



# Risultati





Come è possibile notare gli spostamenti massimi diminuiscono, così come le deformazioni e le tensioni. Queste ultime raggiungono sempre il loro apice nella zona di attacco del dissipatore di calore con la struttura meccanica.

Di conseguenza, bisogna prendere in considerazione questa flessione variabile all'atto del montaggio ai fini di mantenere tutti i rivelatori puntati verso il centro della sfera.



$$[K(T)]\{T\}=\{Q(T)\}$$

dove le parentesi quadre indicano una matrice e quelle graffe un vettore.

In un'analisi stazionaria si assumono le seguenti ipotesi:

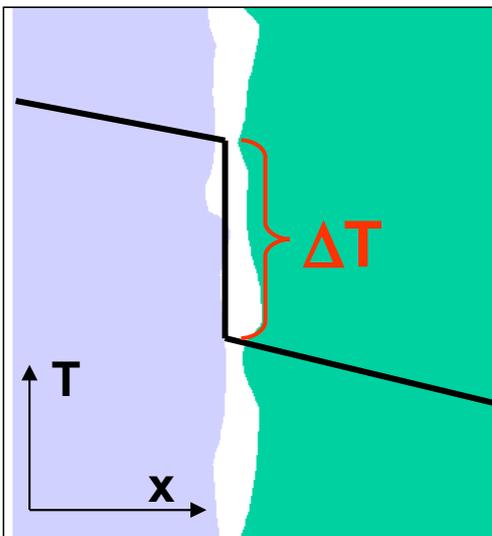
- si trascurano tutti gli effetti transitori;
- la matrice di conducibilità  $[K]$  può essere costante o funzione della temperatura;
- il vettore dei carichi termici  $\{Q\}$  può essere costante o funzione della temperatura.

## Conducibilità termica

Di norma viene assunto che vi sia una perfetta trasmissione termica tra due superfici a contatto, ovvero non si presenti nessun salto di temperatura all'interfaccia tra i due corpi.

Esso potrebbe infatti avvenire per diversi motivi:

- diversa planarità della superfici;
- rugosità della superficie;
- presenza di ossidi;
- presenza di un fluido intrappolato;
- temperatura di parete fissata;
- uso di un lubrificante grasso;
- ecc.



La quantità di calore che attraversa l'interfaccia di due corpi a contatto è definita dal flusso di calore  $q$ :

$$q = TCC (T_{\text{obiettivo}} - T_{\text{sorgente}})$$

dove  $T_{\text{sorgente}}$  è la temperatura di un nodo di contatto del primo corpo che viene detto sorgente, mentre  $T_{\text{obiettivo}}$  è la temperatura del nodo corrispondente del secondo corpo detto obiettivo.

Di norma TCC, conducibilità termica del contatto, viene impostata ad un valore molto alto sulla

base del materiale con la maggior conducibilità termica nel modello e alla diagonale del cubo circoscritto all'intero complessivo:

$$TCC = KCC_{max} * 10000 / diagonale$$

In questo modo si assicura una trasmissione perfetta del calore tra le parti.

In alternativa è possibile inserire manualmente il valore da assegnare a TCC per ogni regione di contatto, oppure ricavarne il valore da quello di resistenza termica di contatto quando è noto, invertendo quest'ultimo e dividendolo per l'area di contatto.

Inoltre la trasmissione del calore avviene soltanto tra i corpi che sono perfettamente a contatto tra loro. La definizione di tali contatti segue le stesse regole e procedure di formazione elencate in precedenza nei paragrafi dell'analisi strutturale.

## Carichi termici

I vari tipi di carichi termici che è possibile applicare sono:

- **potenza termica:** può essere applicata ad un vertice, uno spigolo o ad una superficie ed il valore assegnato si distribuisce equamente nel caso di una selezione multipla dei punti di applicazione. Dimensionalmente risulta essere un'energia nell'unità di tempo (W nel Sistema Internazionale).
- **Isolamento termico perfetto:** corrisponde ad una potenza termica nulla ed è utilizzabile per rimuovere quelle superfici da condizioni al contorno non desiderate;
- **Flusso di calore:** può essere applicato solamente alle superfici, o ai bordi in una geometria bidimensionale. Ha le dimensioni di un'energia nell'unità di tempo e di superficie ( $\frac{W}{m^2}$  nel Sistema Internazionale);
- **Generazione interna di calore:** può essere applicato solamente ai corpi solidi e ha le dimensioni di un'energia nell'unità di tempo e di volume ( $\frac{W}{m^3}$  nel Sistema Internazionale).

È importante notare che un valore positivo di queste quantità introdurrà calore al sistema considerato.

## Condizioni al contorno termiche

Almeno una condizione al contorno termica deve essere presente per evitare il corrispondente termico di un moto di corpo rigido. Inoltre, come riportato in precedenza, un carico termico di isolamento perfetto sovrascriverà la condizione al contorno. Le opzioni disponibili in Ansys sono:

- **Temperatura assegnata:** assegna un determinato valore di temperatura ai vertici, ai bordi, alle superfici o ai corpi. Non dovrebbe essere applicata alle superfici che hanno già un altro tipo di carico termico o di vincolo. Si ricorda inoltre che la temperatura è il grado di libertà per cui si risolve il problema termico.

- **Convezione:** può essere applicata solamente alle superfici (ai bordi in un'analisi bidimensionale). Anch'essa non dovrebbe essere applicata alle superfici che hanno già un altro tipo di carico termico o di vincolo. La convezione  $q$  viene definita attraverso un coefficiente  $h$  dello strato di fluido che scorre sulla superficie, dall'area  $A$  di quest'ultima, e dalla differenza tra le temperature di parete e quella ambiente:  $q = h A (T_{superficie} - T_{ambiente})$ . L'utente deve inserire i valori per  $h$  e  $T_{ambiente}$ . Inoltre il coefficiente  $h$  dello strato di fluido può essere costante o dipendente dalla temperatura, potendo ricavarlo dalla libreria di Ansys o definirlo manualmente descrivendone l'andamento attraverso dati in una tabella.
- **Irraggiamento:** applicato alle superfici o ai bordi nelle analisi bidimensionali.

$$Q_{IRR} = \sigma \epsilon F A (T_{superficie}^4 - T_{ambiente}^4)$$

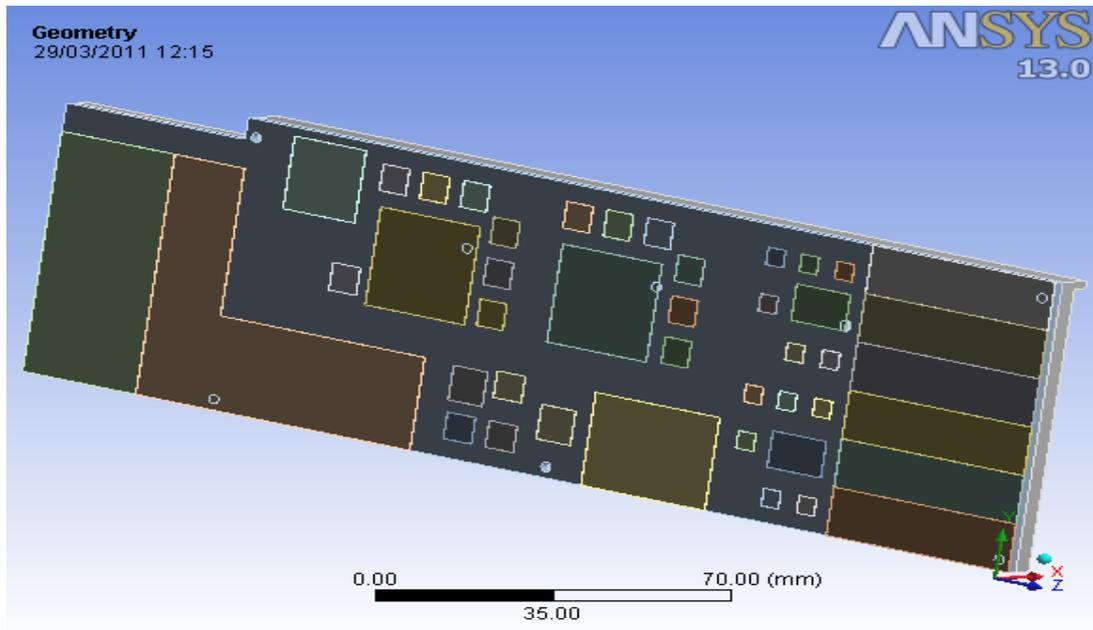
dove

- $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzman settata automaticamente in funzione del sistema di misura adottato;
- $\epsilon$  è l'emissività del corpo;
- $A$  è la superficie irraggiante;
- $F$  è il fattore di forma.

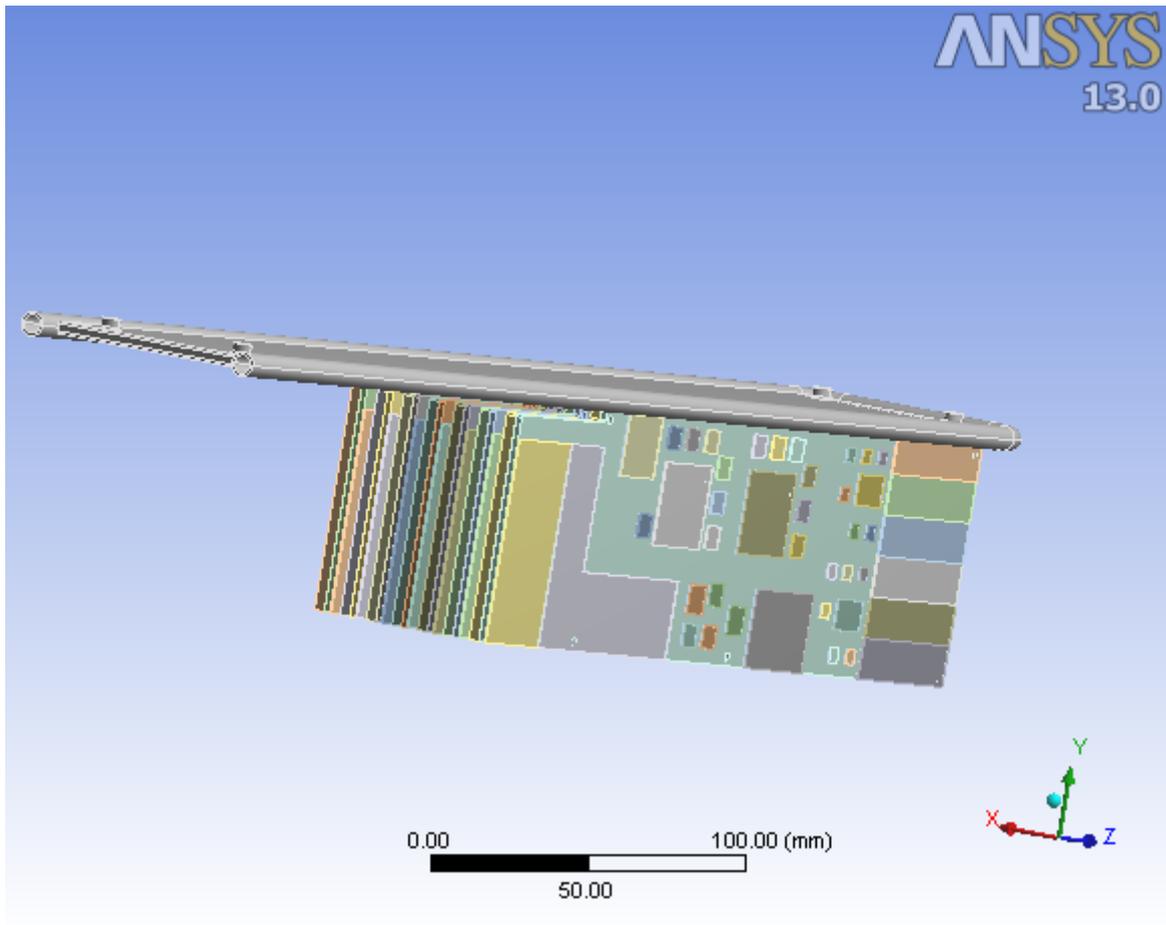
Fornisce solo l'irraggiamento verso l'ambiente e non tra le superfici: il fattore di forma è assunto pari a 1.

### **Realizzazione del modello**

Sulla base del layout di massima, si è realizzato il seguente modello di scheda con componenti elettronici montata su una lamina del dissipatore di calore.



La si è quindi applicata a tutte le schede dello scambiatore di calore.



## Materiali e proprietà

I materiali considerati in questo modello sono:

- il rame della piastra superiore del dissipatore
- la lega di alluminio Al 7075-T6 delle piastre del dissipatore
- la resina FR-4 delle schede elettroniche
- i componenti sono stati considerati in silicio
- un'adesivo termoconduttivo che collega la scheda stampata alla piastra di alluminio di supporto.

Tutti questi materiali sono stati considerati isotropi dal punti di vista della trasmissività termica ed i valori delle loro conducibilità termica sono riportati nella tabella seguente.

| Materiale  | Conducibilità termica $K [ \frac{W}{m K} ]$ |
|------------|---|
| Rame       | 401   |
| Al 7075-T6 | 160   |

|                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Fr-4                              | 13.5          |
| Silicio                           | 163           |
| Adesivo termoconduttivo SE4486 CV | 1.53 (a 25°C) |

Questi valori sono stati ricavati dalla letteratura tecnica e dai lavori indicati nella bibliografia e si è ritenuto rimanessero costanti al variare della temperatura.

## Mesh

Utilizzando una combinazione di mesh *Automatica* con dimensione fine degli elementi, e con metodo *Sweep*, si è ottenuta una maglia con distorsione media degli elementi pari a 0.574 e una dispersione pari 0.289.

## Condizioni al contorno e carichi termici

Dato che l'apparato lavorerà in vuoto, non è stata considerata alcuna convezione con le sue pareti esterne. Per le temperature in gioco inoltre si è trascurato anche l'irraggiamento.

Inoltre, si è imposto che la temperatura ambiente fosse pari a 25 [°C]. Dato che solo le lamine di alluminio sono avvitate con la piastra di rame, si è imposto solo tra queste due parti un contatto per il passaggio del calore. Tra la scheda elettronica e il rame, e tra la colla e il rame tale contatto non sussiste e quindi la trasmissione del calore non avviene.

Per evitare l'analogo termico di un moto di corpo rigido, è necessario specificare almeno un vincolo. Nelle prove sperimentali riportate in *Appendice* viene fatta circolare dell'acqua all'interno del canale della piastra in rame del dissipatore, in modo da trasportare il calore all'esterno. Facendo

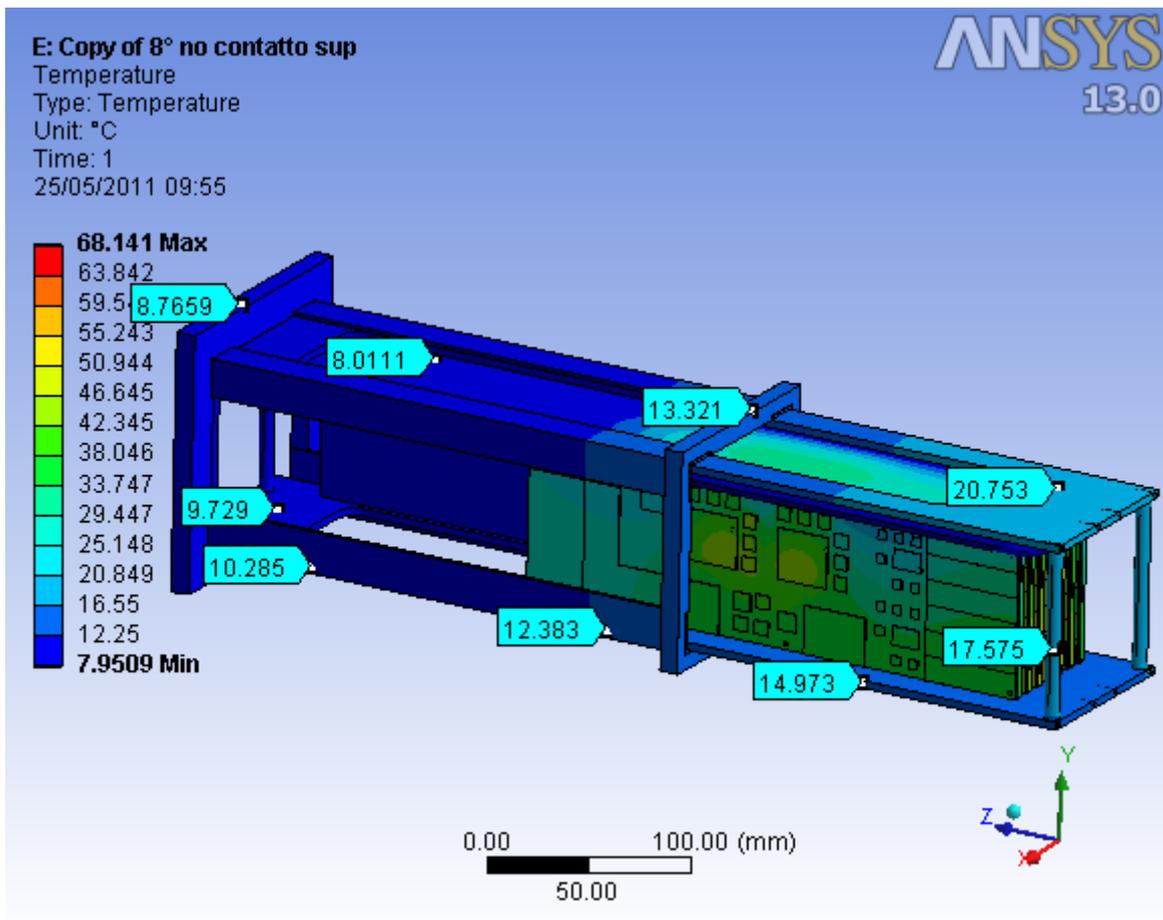
riferimento alla portata massima di  $1,1 \frac{l}{min}$ , ad una temperatura d'ingresso dell'acqua di

$T_i=7[°C]$  e di uscita pari a  $T_u=9[°C]$ , si è imposto che le pareti interne di tale canale fossero mantenute a 8 [°C].

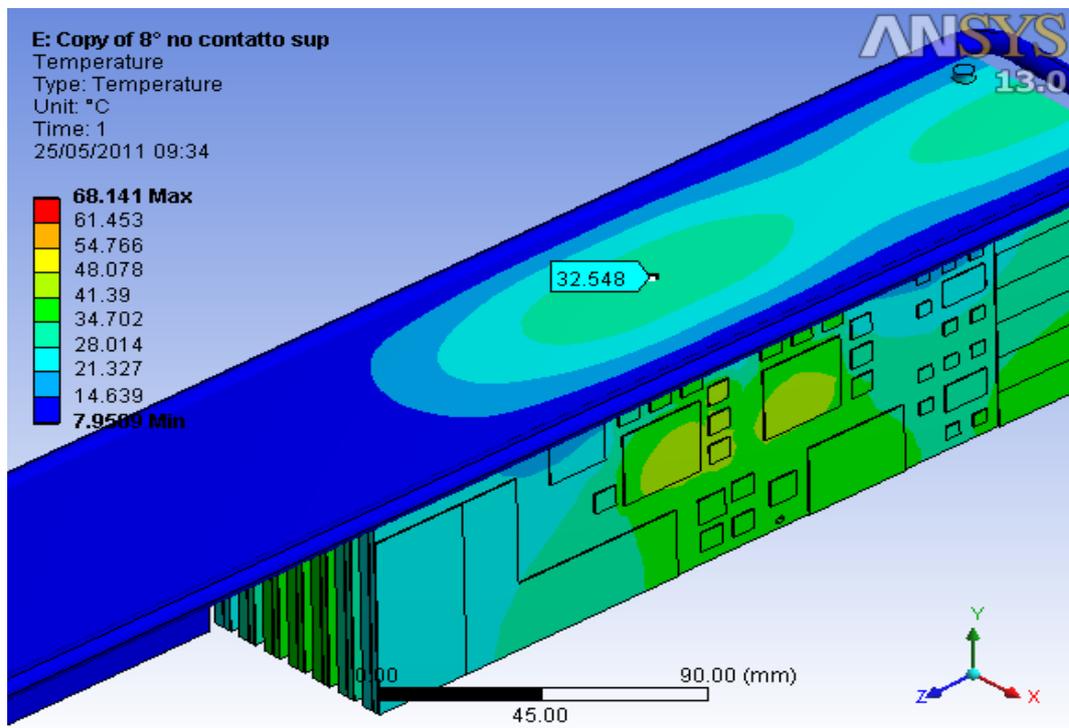
Per quanto riguarda i carichi termici invece, si è considerato che i componenti elettronici generassero calore durante il funzionamento. Si è quindi applicato ad ognuno di essi una generazione interna di calore, partendo dal layout di primo tentativo e modificandolo in modo da avvicinarsi il più possibile ai dati rilevati durante le prove sperimentali.

## Risultati

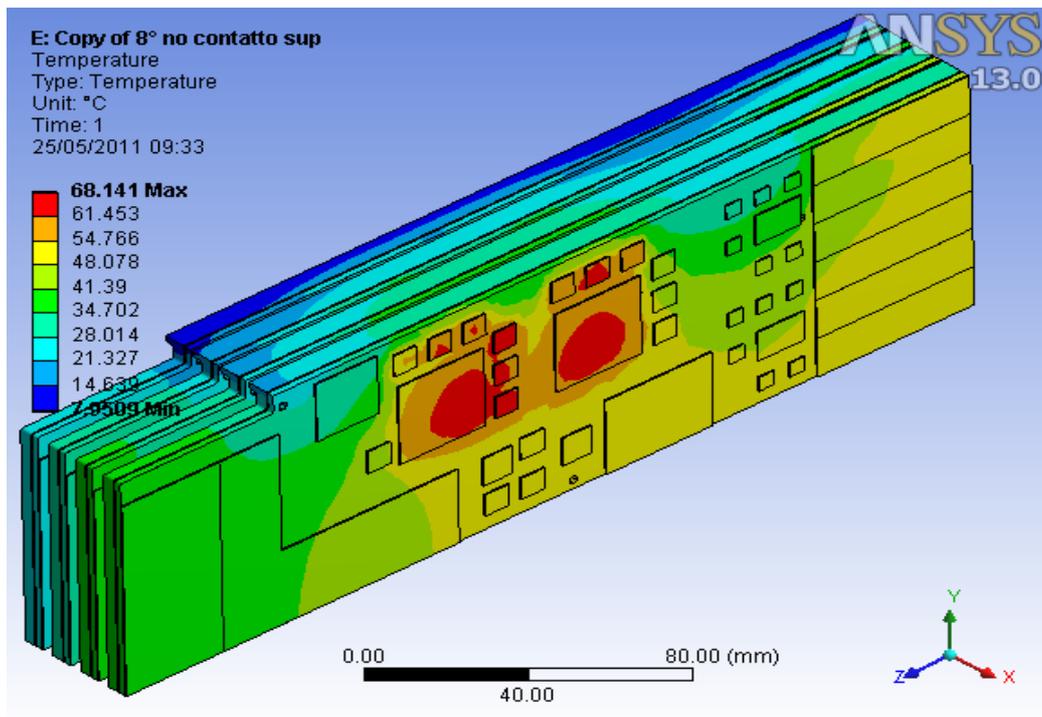
I risultati cercati sono le temperature che si sviluppano nelle varie parti del modello a causa del funzionamento dei componenti elettronici. Una volta verificata la corrispondenza con i dati sperimentali, è stato infatti possibile impiegarle come carico termico aggiuntivo ad una successiva analisi statica del blocco.



Come è possibile notare, la maggior parte della struttura meccanica posteriore non è influenzata dall'aumento di temperatura delle schede e si mantiene a circa 8 [°C] come le pareti in cui viene fatta circolare l'acqua. Tuttavia la parte anteriore più vicina alle schede risente della trasmissione del calore e vi è un passaggio di quest'ultimo dalla zona superiore a quella inferiore. Si ricorda infatti che questo modello è stato costruito pensando il blocco dissipatore collegato alla struttura meccanica solo nella parte superiore, attraverso quattro viti.



Dato che la temperatura viene abbassata dall'acqua nella zona periferica della piastra in rame, al centro di essa si raggiunge un picco pari a 32.548 [°C] in corrispondenza della zona in cui si raggiunge la massima temperatura anche nelle schede.



Per questo motivo le schede centrali smaltiscono meno efficacemente il calore e raggiungono il massimo di 68.141 [°C]. Il calore viene infatti trasmesso alla piastra superiore dalle lamine di alluminio sul quale sono montate le schede per mezzo della colla. La superficie di queste ultime non ha nessun contatto con il rame e quindi, per il programma non vi è conduzione.

## 7. F.A.Z.I.A. : Combinazione dell'analisi termica e strutturale

Come accennato nel capitolo precedente, si è sfruttato il campo di temperature ricavato dall'analisi termica a regime per introdurre un carico termico nel modello meccanico strutturale e valutare l'effetto combinato dell'aumento di temperatura con la forza peso sulla sua deformazione e sul suo stato tensionale.

Si è considerata sempre la sezione posteriore dell'intero blocco, in quanto maggiormente affetta dall'effetto termico rispetto alla parte anteriore con i telescopi.

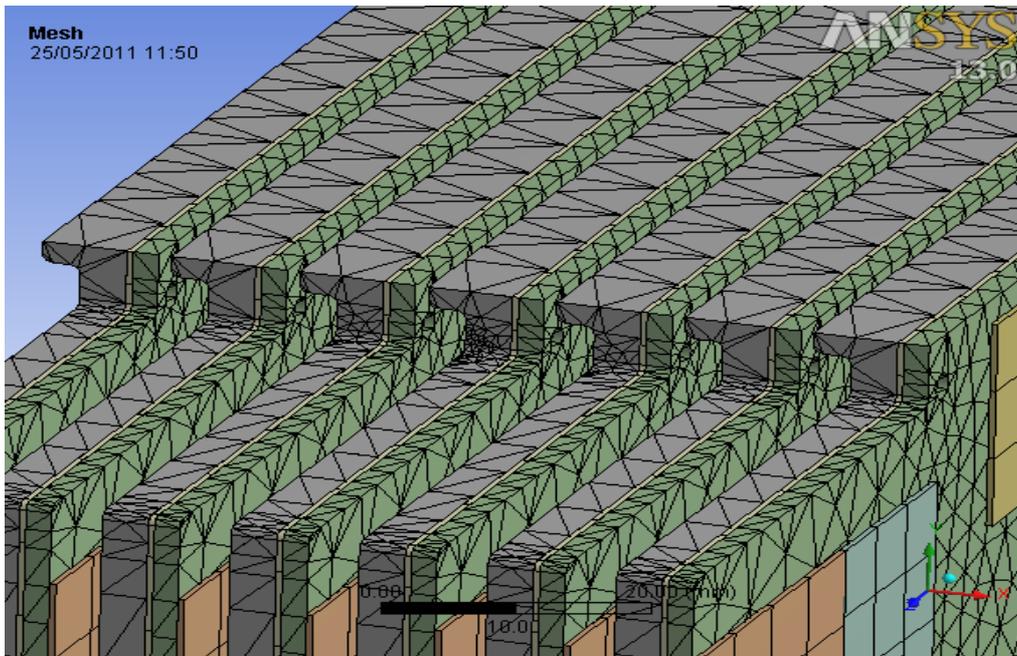
### Materiali e proprietà

I materiali impiegati in questo modello sono gli stessi della simulazione strutturale e termica. Alle loro proprietà specificate in precedenza, si deve aggiungere il coefficiente di espansione termica e i valori del modulo di Young e di Poisson per lo strato adesivo, la scheda elettronica e i componenti in silicio. Tali dati sono riassunti nella tabella seguente.

| Materiale                           | E [MPa]         | G [MPa]        | $\nu$             | $\alpha \left[ \frac{\mu m}{m^{\circ} C} \right]$ |
|-------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------|---|
| Rame                                | 110000          | 41045          | 0.34              | 17  |
| Al 7075-T6                          | 71700           | 26955          | 0.33              | 23.4  |
| Adesivo termococonduttivo SE4486 CV | 3.5             | 1.3462         | 0.3               | 124   |
| Silicio                             | 162550          | 66455          | 0.225             | 2.6   |
| FR-4 (ortotropico)                  | 1600 (lungo x)  | 199 (piano xy) | 0.1425 (piano xy) | 15  |
|                                     | 22400 (lungo y) | 199 (piano yz) | 0.1425 (piano yz) | 15  |
|                                     | 22400 (lungo z) | 630 (piano xz) | 0.02 (piano xz)   | 11  |

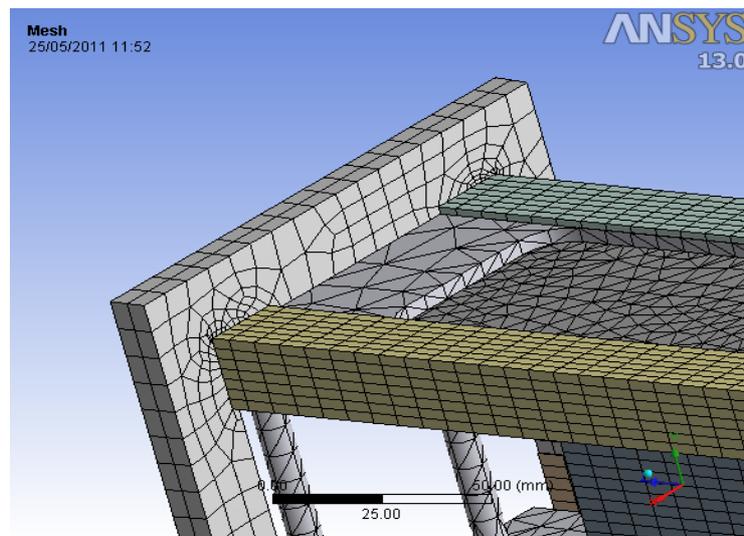
### Mesh

Si è utilizzata sempre una mesh *Automatica* con dimensione fine degli elementi in combinazione con lo *Sweep Method*. Tuttavia, dato l'aumento di complessità dovuto alla combinazione di due simulazioni, si è effettuato un infittimento della mesh delle schede. Il loro spessore è di soli 2 [mm] infatti e si è quindi fatto in modo di avere più elementi nello spessore per ottenere un miglior risultato riguardo alla flessione dovuta alle diverse dilatazioni termiche dei materiali ad essa collegati.



Inoltre si è effettuato un infittimento delle lastre di alluminio centrali soggette alle maggiori temperature, come mostrato in figura in corrispondenza del raccordo.

La stessa cosa si è realizzata in corrispondenza del supporto posteriore, come mostrato nell'immagine seguente.



In questo modo si è ottenuta una mesh con una distorsione media degli elementi pari a 0.55069 ed una deviazione standard pari a 0.240.

### **Vincoli e carichi**

Le condizioni di vincolamento sono le stesse dell'analisi strutturale effettuata in precedenza: due incastri perfetti sulla superficie laterale dei due supporti meccanici.

I carichi invece sono costituiti dalla forza peso, e dalle temperature importate.

La deformazione termica infatti viene calcolata nel seguente modo:

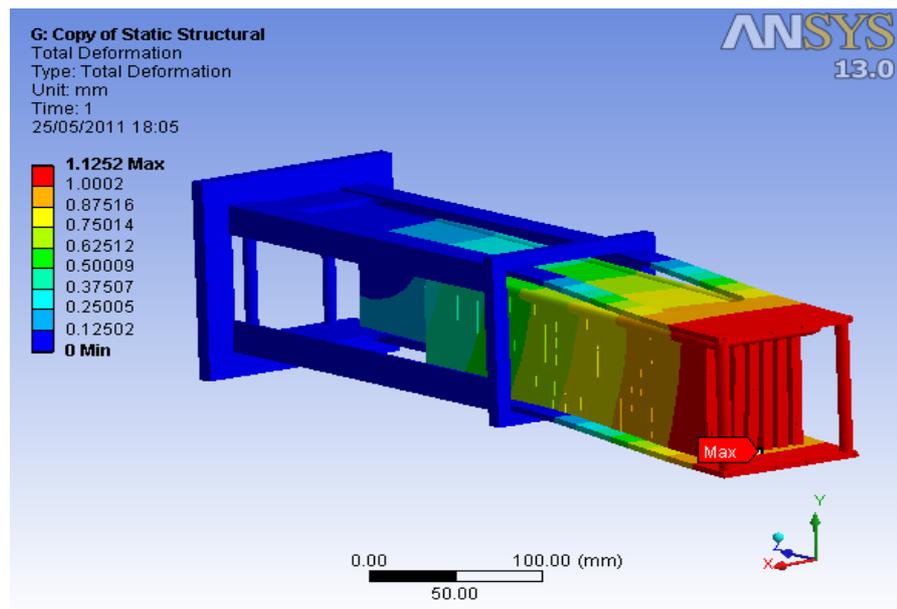
$$\epsilon_t^x = \epsilon_t^y = \epsilon_t^z = \alpha (T - T_{amb}) \quad \text{dove}$$

- $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica isotropo
- $T$  è la temperatura applicata al corpo, e quindi in questo caso importata dalla simulazione termica
- $T_{amb}$  è la temperatura di riferimento dell'ambiente circostante ed imposta pari a 25 [°C]

## Risultati

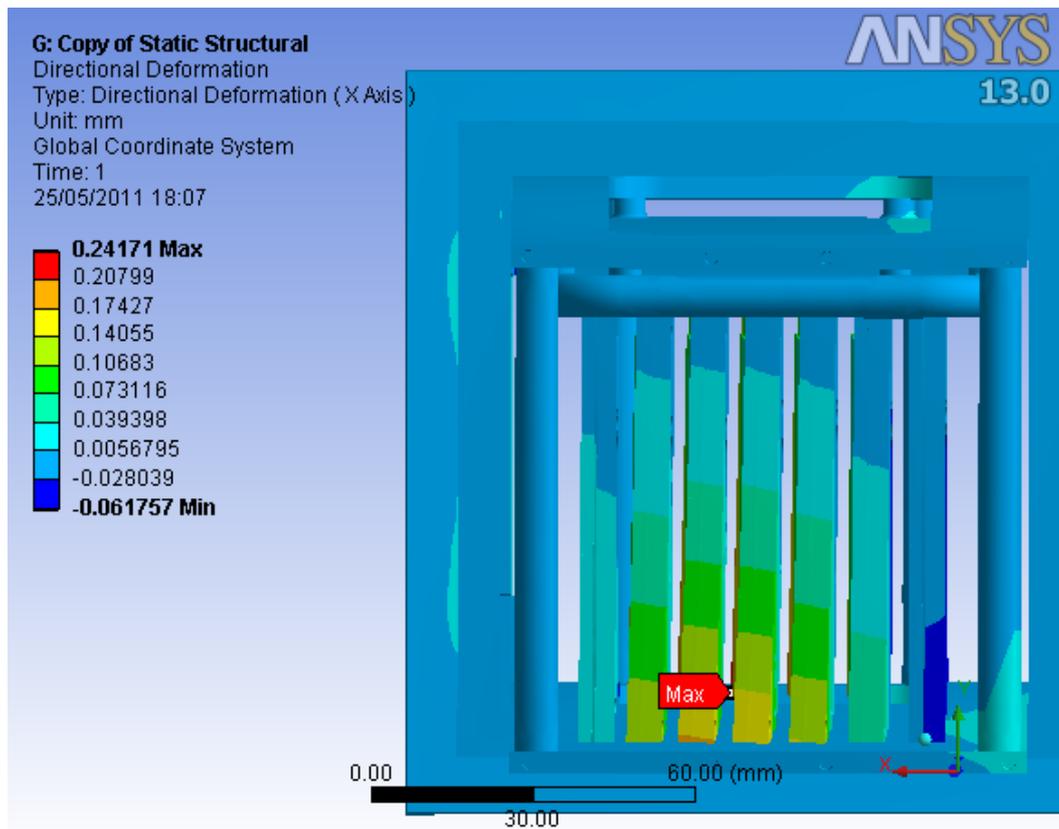
Osserviamo innanzitutto l'effetto del carico termico sulla freccia complessiva dell'intera struttura.

Il massimo valore lo si ha ancora alla massima estremità dall'incastro, aumentato tuttavia del 15.87%.

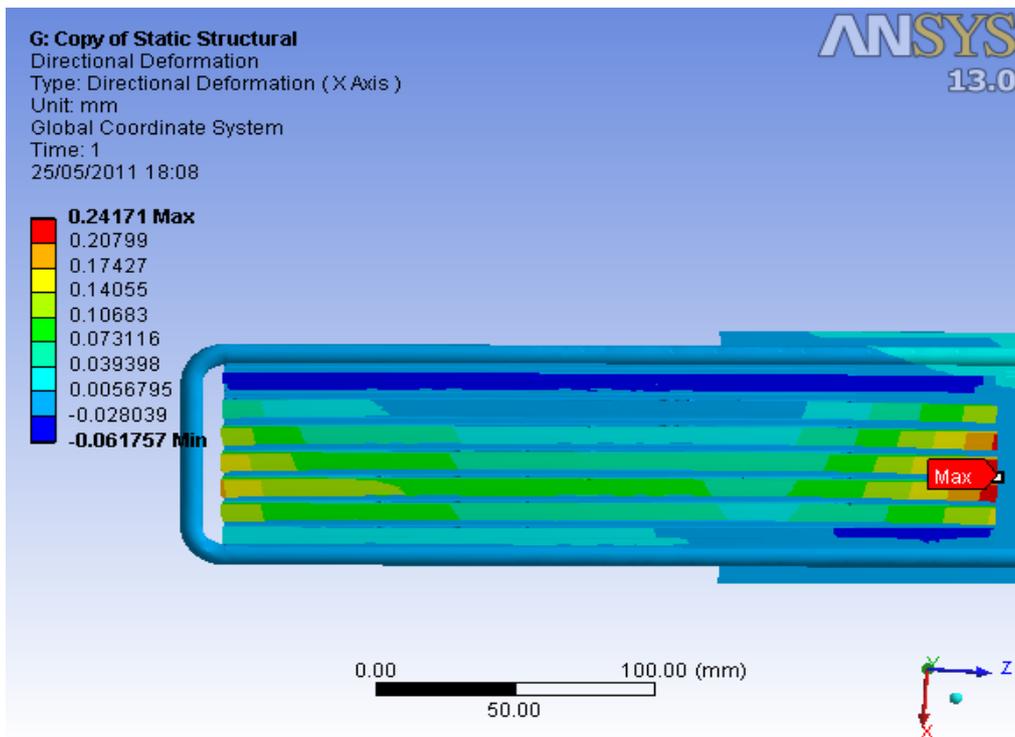


Inoltre si nota che le schede e le lamine centrali sono leggermente inclinate verso l'asse x positivo.

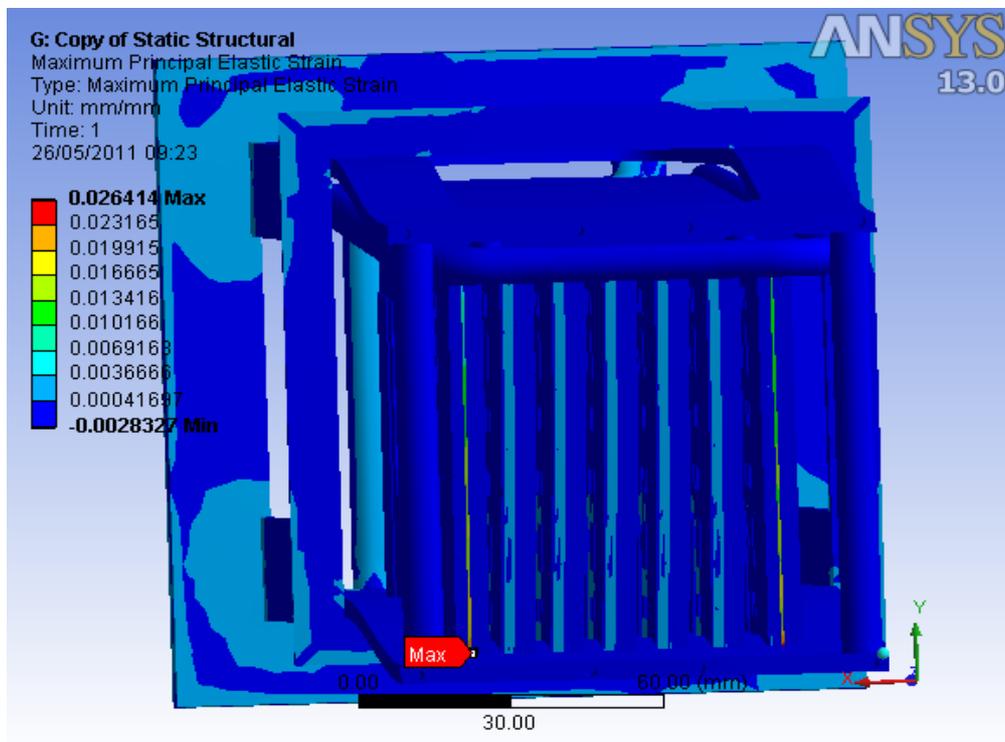
Infatti diagrammando lo spostamento lungo tale direzione si osserva una freccia massima pari a 0.24171 [mm].



A causa della maggior temperatura nelle schede centrali, si ha una loro curvatura con intradosso verso l'asse x positivo.

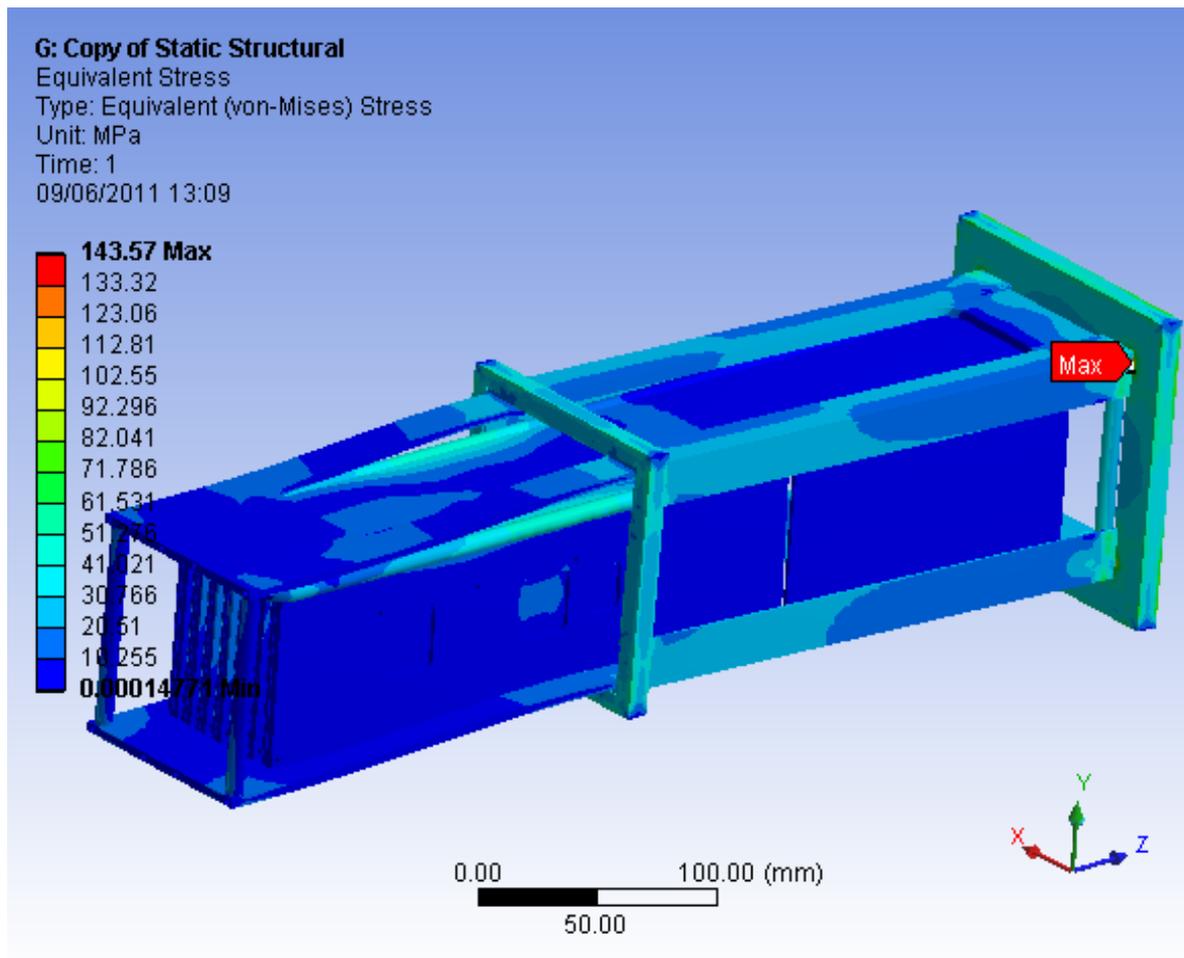


Nell'immagine superiore rappresentante una vista dal basso delle schede si vede che il massimo lo si raggiunge in quella centrale, a maggior temperatura. Quelle esterne invece a causa del miglior raffreddamento restano praticamente ferme o subiscono una leggera flessione nel verso opposto.

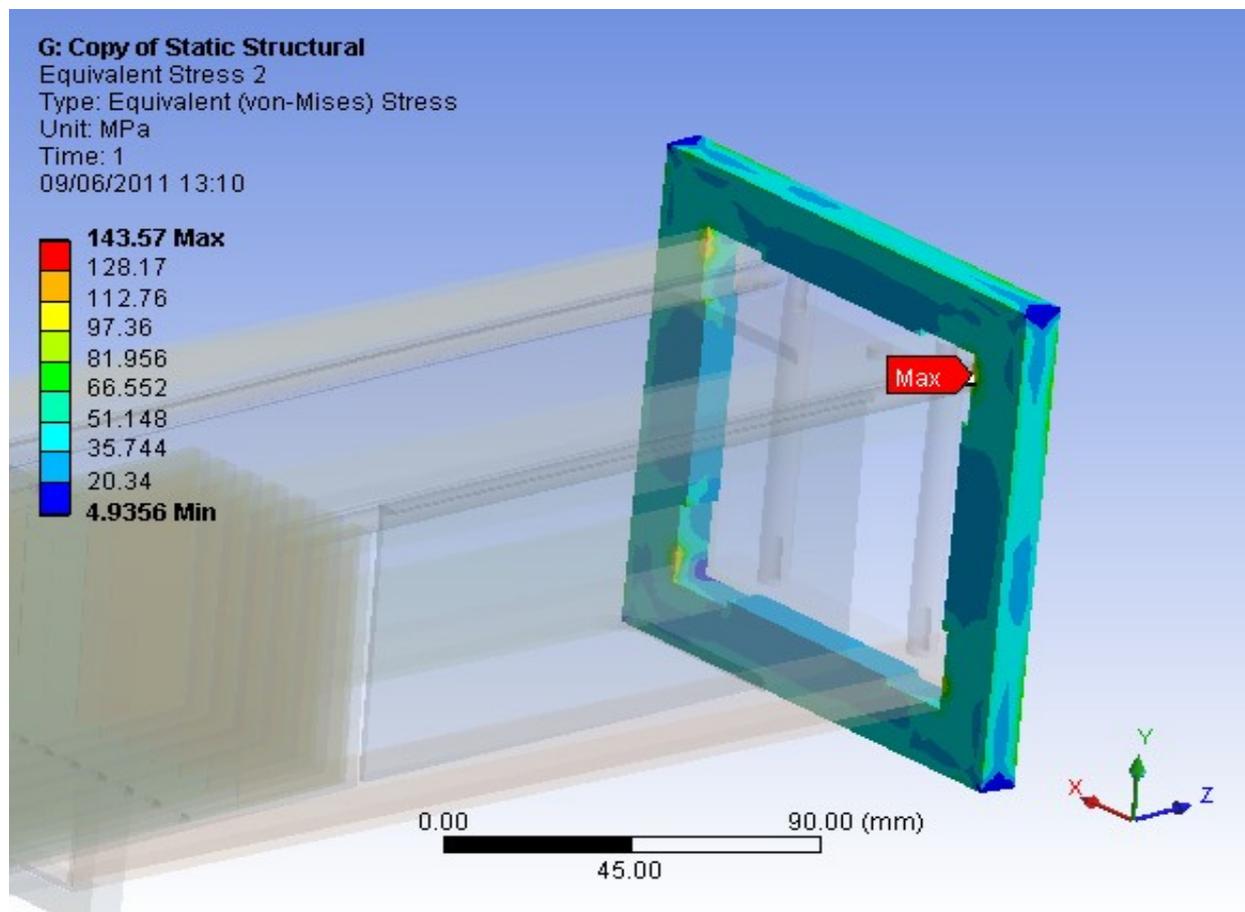


Come si vede nell'immagine relativa alle deformazioni, questo fa in modo che lo strato di colla sia sottoposto a trazione. Infatti esso è simulato come perfettamente collegato alla piastra in alluminio e alla scheda elettronica in modo da avere un contatto di tipo *Bonded* e trasmettere correttamente il calore.

Per quanto riguarda la tensione equivalente si nota come i valori siano aumentati rispetto al caso precedente.



Il picco si raggiunge in corrispondenza dell'incastro posteriore a causa dell'infittimento della mesh messo in evidenza precedentemente, e dello spigolo vivo. Questo mette in risalto un problema tipico dei contatti puntuali che non interessava andare ad indagare.



Si sono quindi individuate le zone più critiche della struttura sulle quali si dovrà porre maggior attenzione, nel realizzarne la geometria definitiva ed il relativo assemblaggio. Le tensioni massime si mantengono comunque al di sotto dei limiti del materiale e da questo punto di vista non costituiscono alcun problema.

## 8. Conclusioni

In questa tesi si è effettuata una simulazione termo-strutturale con il metodo degli elementi finiti di una parte di un apparato sperimentale per esperimenti di fisica.

Il lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto in fase di sviluppo F.A.Z.I.A. in collaborazione con il Dipartimento di Fisica e il reparto Progettazione dell'INFN di Bologna.

Nella prima parte, dopo aver introdotto i motivi e le problematiche a cui il progetto sta cercando di dare risposta ed una descrizione dell'apparato rivelatore e delle sue parti principali, si è passati a descrivere il metodo FEM e i suoi passaggi fondamentali.

Successivamente si è analizzato come il programma impiegato per tali simulazioni debba trattare i vari corpi e le loro interazioni per modellare un comportamento corretto e i vari modi di suddivisione del dominio continuo con gli elementi finiti, ovvero la fase di generazione della mesh.

Nella seconda parte si è effettuata inizialmente un'analisi strutturale statica del modello di blocco semplificato e suddiviso in due porzioni, soggetto solo al peso proprio. Si è così trovato che la geometria proposta presentava un punto che rendeva labile la struttura. Si è pertanto modificato il modello ed evidenziato il valore della freccia, dello stato deformativo e tensionale dello stesso, in relazione al grado di precisione della mesh adottata.

In seguito si è eseguita un'analisi termica a regime della parte posteriore del blocco considerato. Infatti esso presenta delle schede elettroniche con i relativi componenti per l'elaborazione e trasmissione dei dati rilevati. Si sono quindi rilevate le temperature che si sviluppano, tarando il modello in modo da rispecchiare i dati ricavati da prove sperimentali. Le temperature raggiunte sono elevate e questo indica la necessità di una modifica del sistema di raffreddamento impiegato.

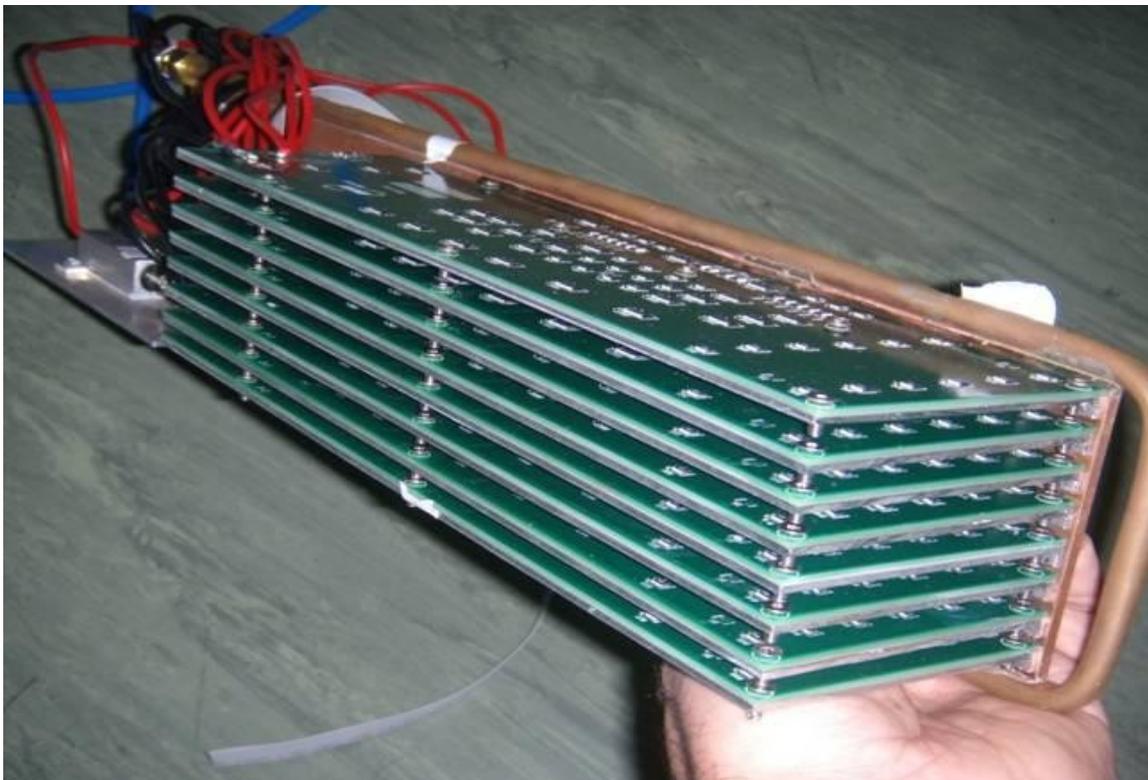
Infine si sono combinate le due analisi in una sola, valutando l'aumento della freccia, dello stato deformativo e tensionale dovuto al carico termico. In particolare si è potuto riscontrare una leggera flessione delle schede a causa dei diversi coefficienti di dilatazioni termiche delle parti a contatto. Si è evidenziato in tal modo che l'adesivo termoconduttivo che collega le schede elettroniche alle piastre di alluminio del blocco dissipatore, in alcune zone risulta in trazione, di un'entità il cui valore dovrà essere valutato se dannoso tramite le prove sperimentali.

In definitiva si è trovato un punto migliorabile del disegno del modello, si sono valutati in particolare modo la freccia d'inflessione massima, di valore troppo elevato per i requisiti di precisione richiesti dagli esperimenti di fisica. Si è quindi notato un altro possibile miglioramento da apportare al sistema di vincolamento meccanico al fine di ridurre tale valore dell'inflessione, importante all'atto

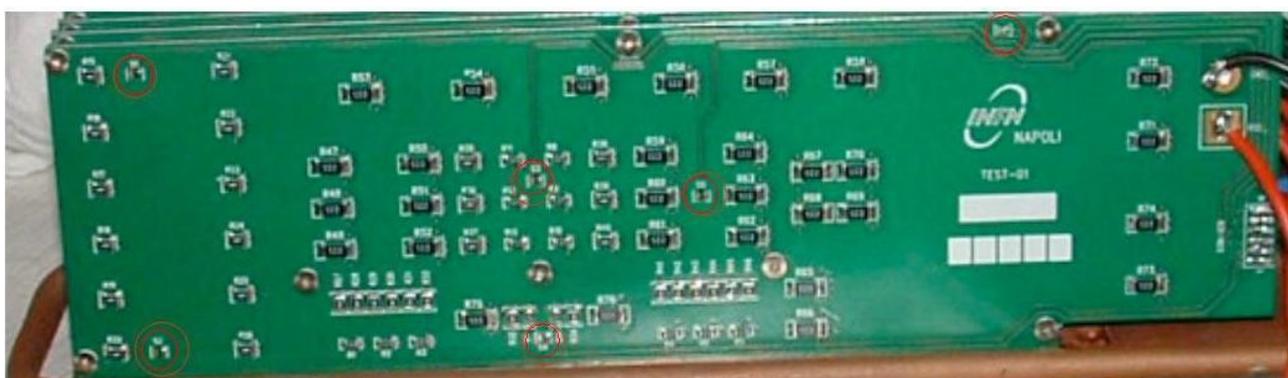
del montaggio dell'intera struttura. Infine si sono individuati i punti in cui si verificano le massime deformazioni e tensioni, che si mantengono sempre nel campo elastico dei materiali impiegati, facendo pertanto operare il componente in perfetta sicurezza.

## Appendice – Corrispondenza dati sperimentali e modello termico

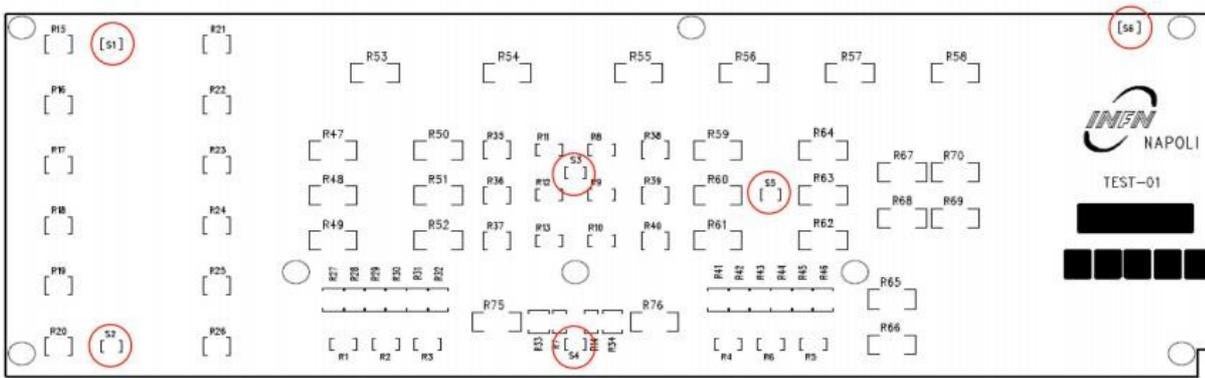
Si riportano nel seguito i valori ricavati dai sensori sperimentalmente e le temperature rilevate nel modello dell'analisi termica stazionaria.



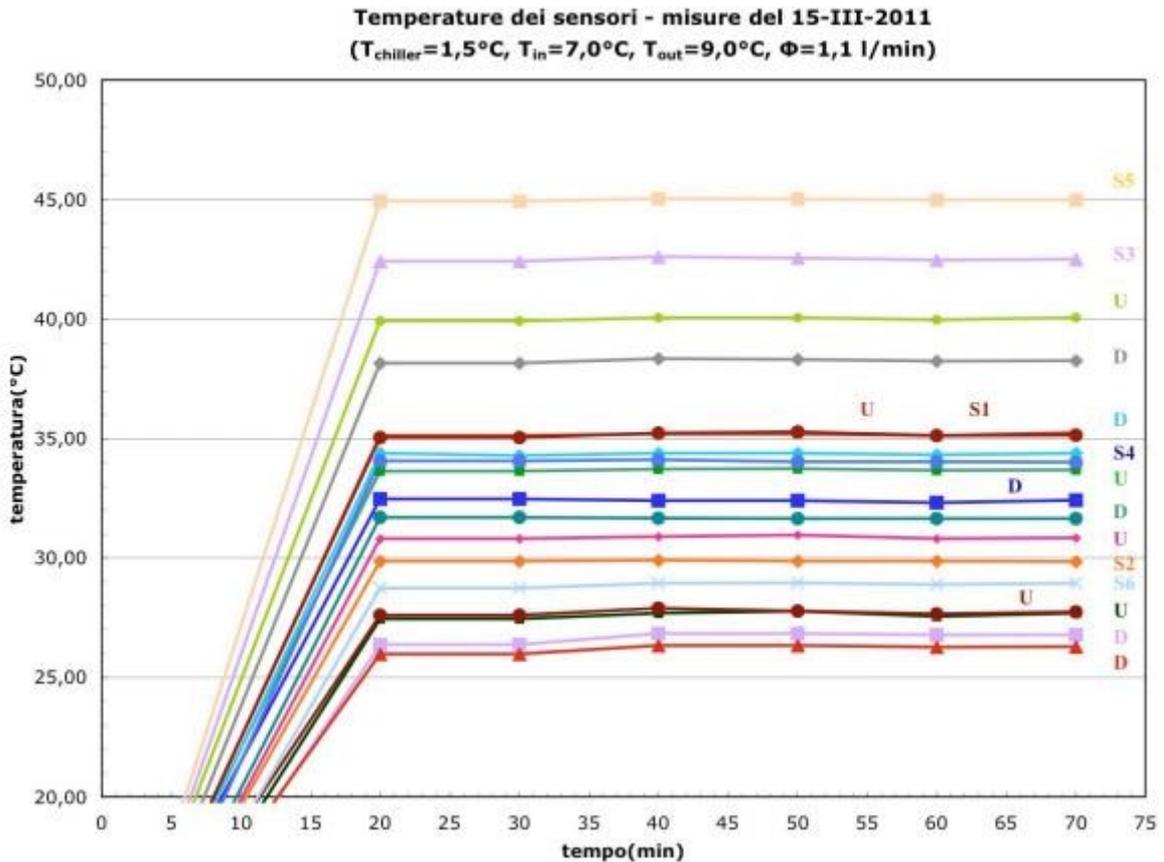
Questo è il modello del dissipatore termico con le schede ed i componenti elettronici montati e collegati.



Questa è la scheda più esterna con i sensori di temperatura montati. Nell'immagine sono cerchiati in rosso.

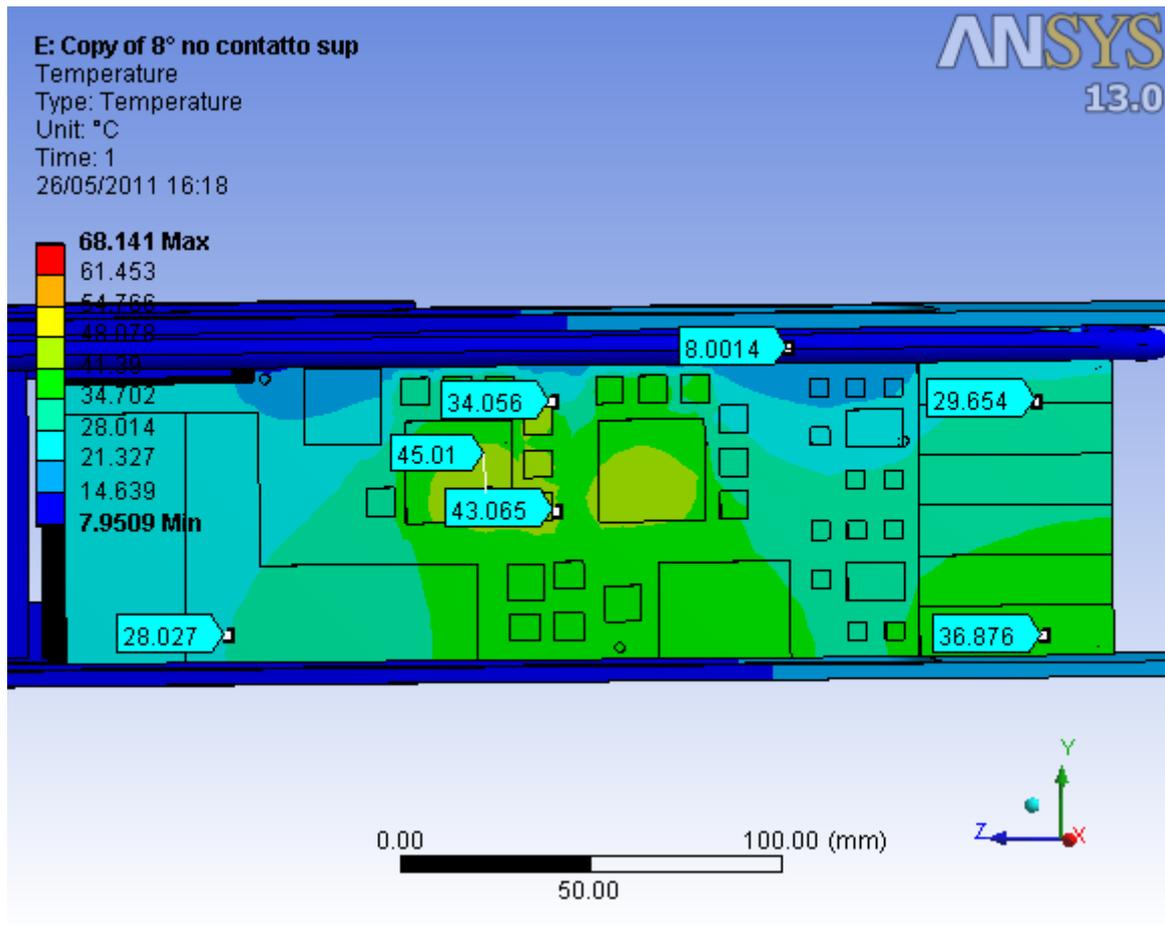


Lo schema della scheda precedente con la denominazione dei sensori: da 1 a 6 procedendo dall'alto verso il basso e da sinistra a destra.



Questo è il grafico che riporta i valori di temperatura rilevati a regime, quindi dopo un certo tempo. Si è indicata la portata dell'acqua di raffreddamento immessa e le sue temperature d'ingresso e di uscita. I valore presi come riferimento sono quelli indicati con una "S" e il numero del sensore. Gli altri valori si riferiscono a prove condotto con diversi tipi di resine termoconduttive da usare come

legante tra le schede e le piastre in alluminio.



Si è indicato che la temperatura media fissata all'interno dei canali di circolazione dell'acqua risulta essere di 8 [°C]. La scheda è la stessa esterna del blocco dissipatore in cui sono stati posizionati i sensori, nelle cui posizioni si sono indicati i valori calcolati col modello simulato. Questa immagine è al contrario rispetto a quella del modellino sperimentale.

## Bibliografia

1. Marchi Tommaso – *La rivelazione di neutroni in esperimenti di fisica nucleare: problematiche e studio di scintillatori organici.*
2. Marchi Tommaso – *Rivelatori a scintillazione per esperimenti di fisica nucleare.*
3. Farolfi Valerio – *Simulazione e misura della dispersione del calore in una scheda elettronica di front-end per rivelatori di fisica nucleare.*
4. Cesari Francesco – *Introduzione al metodo degli elementi finiti.* Pitagora Editrice Bologna.
5. M. N. Tamin and Y. B. Liew - Department of Applied Mechanics Faculty of Mechanical Engineering 81310 UTM Skudai, JOHOR - *NUMERICAL MODELING OF CYCLIC STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF Sn-Pb SOLDER JOINT DURING THERMAL FATIGUE*
6. Xiaowu Zhang, E.H. Wong, Charles Lee, Tai-Chong Chai, Yiyi Ma, Poi-Siong Teo, D. Pinjala, Srinivasamurthy Sampath - *Thermo-mechanical finite element analysis in a multichip build up substrate based package design* - institute of Microelectronics, A \*STAR, Singapore Science Park II, Singapore 117685, Singapore, Infineon Technologies Asia Pacific Pte Ltd, 168 Kallang Way, Singapore 349253, Singapore
7. [www.dowcorning.com](http://www.dowcorning.com) – *Thermally Conductive Materials*
8. [www.ansys.com](http://www.ansys.com) – *Assembly Analysis: considering techniques for accuracy*
9. Ansys Workbench – *User's Guide*