

M. Natalini, T. Pisanu, C. Pernechele, M. Morsiani

Luglio 2005

***ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI DELLE DEFORMAZIONI
TERMICHE SUL RADIOTELESCOPIO DI MEDICINA***

RAPPORTO N°IRA 376/05

INDICE

1. INTRODUZIONE	4
2. MODELLO FEM DEL RADIOTELESCOPIO DI MEDICINA.....	5
INTRODUZIONE AL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI.....	5
MODELLO DEL RADIOTELESCOPIO.....	7
CASE 1	13
CASE 2	14
4. ANALISI DELLE DILATAZIONI TERMICHE – QUADRUPODE.....	15
CASE 1	18
CASE 2	19
CASE 3	20
5. ANALISI DELLE DILATAZIONI TERMICHE – BACK STRUCTURE.....	21
SET-UP DEI SENSORI.....	23
CONFIGURAZIONE TT4.....	23
CONFIGURAZIONE TT4+4	23
CONFIGURAZIONE TT8+8	24
CONFIGURAZIONE TT8+8B.....	24
CONFIGURAZIONE TT12+	25
CONFIGURAZIONE TT12+B.....	25
DISTRIBUZIONI DI TEMPERATURA.....	26
CASE 1	27
CASE 2	28
CASE 3	30
CASE 4	31
CASE 5	32

1. INTRODUZIONE

In questo rapporto interno vengono riportate le analisi agli elementi finiti realizzate finora sul modello del radiotelescopio di Medicina per lo studio del sistema di controllo attivo, costituito da sensori di temperatura, da utilizzare sull'antenna per la correzione degli effetti termici.

Lo studio che rientra nell'ambito del programma di ricerca "*Tecnologie Radioastronomiche: Ottiche attive per il Sardinia Radio Telescope (SRT)*" ha come obiettivo la realizzazione di un sistema di compensazione degli effetti termici per il SRT per mezzo di un'opportuna rete di sensori di temperatura dislocati nella varie parti della struttura.

Il radiotelescopio di Medicina è stato scelto come strumento di test sperimentali e di verifica per le simulazioni agli elementi finiti.

Le analisi FEM sono state realizzate su un modello dell'antenna di Medicina fornito dalla *BCV Progetti*, opportunamente modificato per poter imporre le nuove condizioni al contorno (carichi termici ovvero temperature applicate direttamente sugli elementi).

Il programma che è stato utilizzato per le analisi è il codice di calcolo ANSYS 8.0.

Nei prossimi capitoli verranno illustrate le analisi FEM sulle diverse parti strutturali del radiotelescopio su cui si è deciso di focalizzare l'attenzione:

- 1) l'alidada,
- 2) il quadrupode
- 3) la reticolare di sostegno del riflettore primario (back-up structure - BUS).

Come è noto i gradienti termici che si generano sulla struttura danno origine a errori non sistematici che possono essere quantificati e corretti solo con opportuni sistemi di controllo in tempo reale. Gli errori non sistematici dovuti agli effetti termici possono generare diversi tipi di errori tra cui errori di puntamento (deformazioni termiche di alidada e quadrupode), errori di focale (deformazioni termiche di quadrupode e BUS) o errori sulla forma del paraboloide (deformazioni termiche della BUS).

2. MODELLO FEM DEL RADIOTELESCOPIO DI MEDICINA

INTRODUZIONE AL METODO DEGLI ELEMENTI FINITI

Nell'ambito dei metodi numerici utilizzati per simulare il comportamento meccanico-strutturale dei solidi continui e in particolare delle strutture complesse, il metodo degli elementi finiti (chiamato anche *FEM – Finite Element Method*) è quello maggiormente diffuso. Il metodo si basa sulla suddivisione o discretizzazione di un generico dominio in un numero finito di sottodomini elementari. Questo è dovuto al fatto che, nel caso di analisi strutturali, le equazioni differenziali dell'equilibrio elastico su un dominio assai complesso come quello del pezzo “intero” risultano abbastanza complicate se non impossibili da risolvere, mentre fare la stessa cosa su un dominio geometricamente assai semplice come quello dei singoli elementi è cosa relativamente più semplice.

I domini elementari, in relazione ai quali si calcola la soluzione delle equazioni, quasi sempre approssimata, sono caratterizzati da forme geometricamente semplici (tipicamente: quadrilateri, triangoli per il 2D; tetraedri, esadri, parallelepipedi per il 3D), e vengono definiti “*elementi*”, figura 1. I singoli elementi interagiscono tra di loro e con l'esterno attraverso i “*nodi*” (ovvero i vertici degli elementi) e questo insieme di interazioni viene governato dall'insieme delle “equazioni di equilibrio”. Si ottiene in tal modo un sistema di equazioni, da risolvere contemporaneamente, che è legata al numero di nodi utilizzati per realizzare il modello.

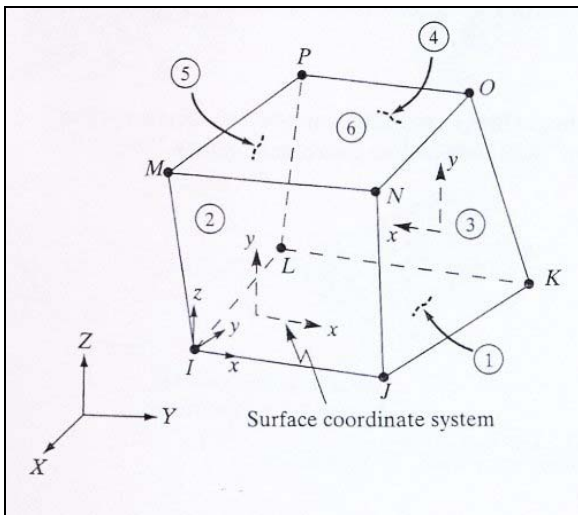


Figura 1: Esempio di Elemento Finito

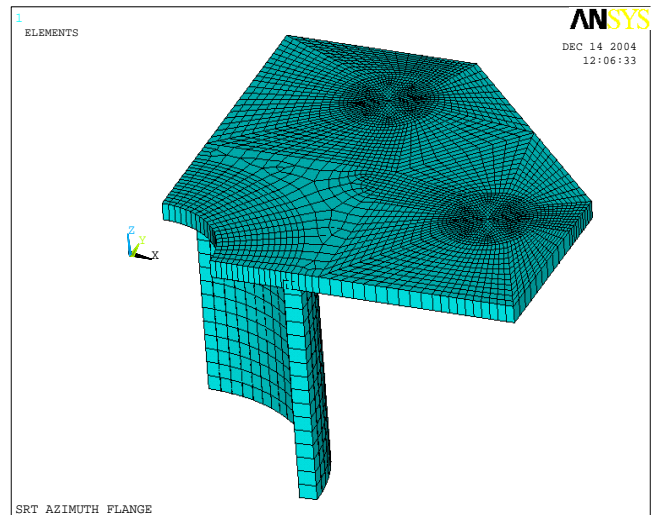


Figura 2: Esempio di Mesh

La figura 3 mostra uno schema della sequenza operativa del metodo degli elementi finiti nell'analisi strutturale.

Il programma che è stato utilizzato per le analisi (ANSYS 8.0) è uno dei codici di calcolo attualmente più diffusi per la simulazione FEM. Il software, che consente di risolvere una vasta gamma di problemi di simulazione (e.g. analisi strutturale, termica, fluidodinamica o elettromagnetica), contiene in un unico ambiente i tre moduli che in genere caratterizzano i programmi FEM e rispecchiano le tre diverse fasi concettuali di studio di un problema ovvero: preparazione del problema (*pre-processing*), soluzione del problema (*solution*) e analisi della soluzione (*post-processing*).

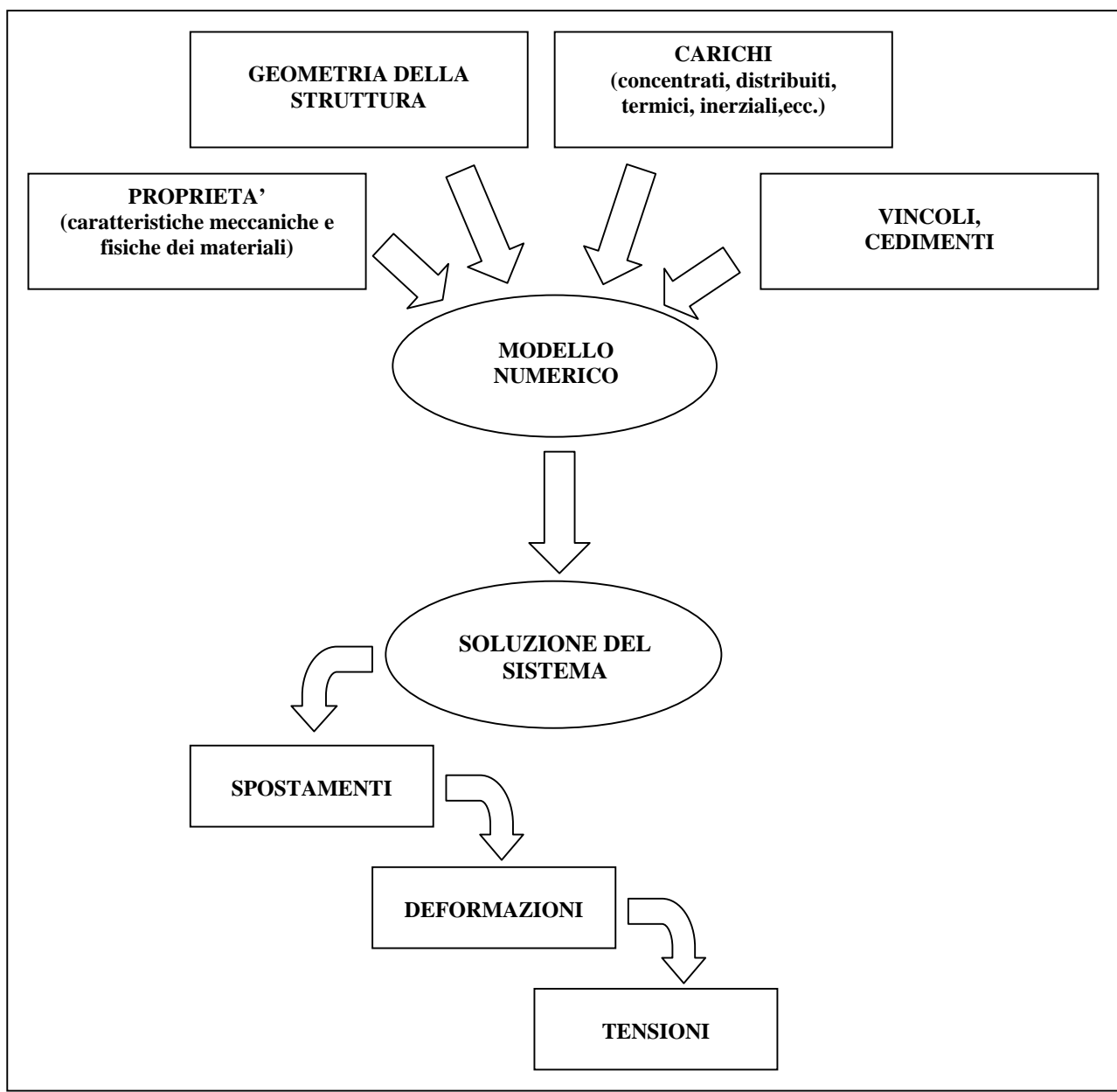


Figura 3: Sequenza operativa dell'analisi strutturale

La fase di “pre-processing” è quella durante la quale l'utente definisce la geometria del problema che vuole risolvere, assegna le condizioni al contorno (i vincoli esterni e le forze che sollecitano il sistema oggetto dello studio), definisce le caratteristiche dei materiali e la “mesh” del problema, ovvero la suddivisione della geometria del problema nei tanti elementi di cui sopra, figura 2. Tipicamente i moduli di pre-processing mettono a disposizione dell'utente degli strumenti per il disegno assistito al calcolatore (tipo CAD) con i quali è possibile definire la geometria globale del problema, nonché assegnare le condizioni al contorno. La funzione più importante del modulo di pre-processing è tuttavia quella di generare la mesh: è questo forse l'aspetto più delicato del problema, in quanto dalla definizione di una buona mesh dipende il delicato equilibrio tra accuratezza della soluzione e tempi di calcolo.

La fase di “solution” è la fase in cui vengono realizzati i calcoli. I solutori sono in genere pacchetti “chiusi” che da un lato accettano dei dati in ingresso (spesso codificati in lunghi file di testo ASCII, generati dal pre-processore), dall'altro restituiscono la soluzione del problema quasi sempre anche questa sottoforma di file di testo.

La fase di “post-processing” è la fase in cui vengono analizzati e visualizzati i risultati attraverso le funzionalità di visualizzazione grafica e i file di testo.

MODELLO DEL RADIOTELESCOPIO

Tutte le analisi contenute in questo rapporto sono state realizzate su un modello agli elementi finiti del radiotelescopio di Medicina fornito dalla *BCV Progetti*. Il modello, realizzato in origine per le analisi degli effetti gravitazionali sull'antenna di Medicina e Noto, è stato opportunamente modificato (caratteristiche dei materiali e aspetti geometrici) per poter imporre le nuove condizioni di carico, di tipo termico, che si volevano applicare.

Il modello FEM di partenza della *BCV Progetti*, in formato CDB, è stato modificato in file TXT in modo da poter utilizzare i classici comandi ANSYS ed apportare quindi le opportune modifiche al modello di partenza. Notare che le unità di misura sono nel Sistema Tecnico e non S.I..

Il modello utilizzato, mostrato in figura 4, è costituito nel suo complesso da 2967 elementi e 1831 nodi. Gli elementi che sono stati utilizzati sono di seguito elencati:

- BEAM4: Elemento Beam 3D (per la modellazione delle strutture reticolari e telai);
- BEAM44: Elemento Beam 3D (per la modellazione delle strutture reticolari e telai);
- LINK 8: Elemento Truss 3D (per la modellazione delle strutture reticolari);
- SHELL63: Elemento Shell 3D (per la modellazione della ruota di elevazione);

- SURF22: Elemento di Superficie (per la modellazione dei pannelli riflettore primario);
- MASS21: Elemento Massa (per la modellazione di masse concentrate);

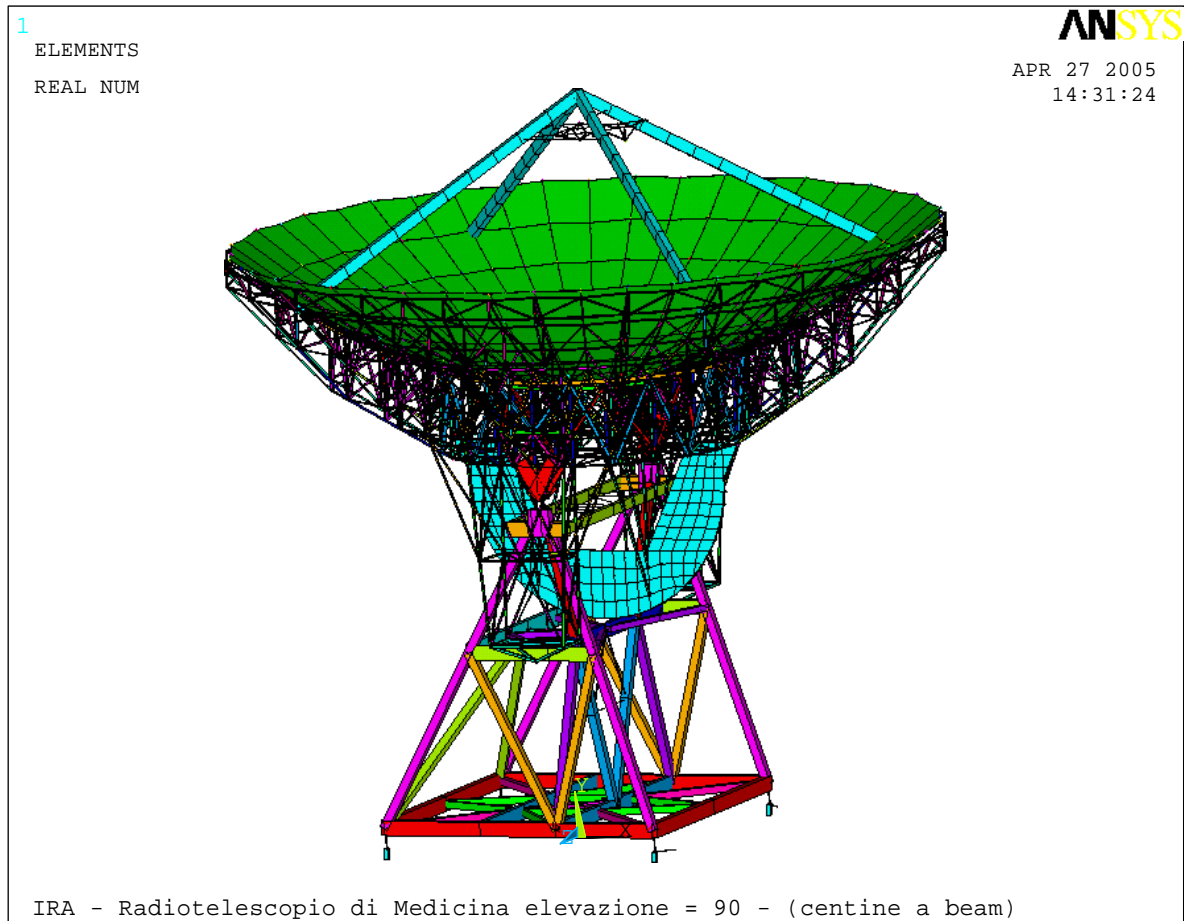


Figura 4: Modello FEM del Radiotelescopio di Medicina

Il materiale utilizzato per modellare tutta la struttura è un acciaio con le seguenti caratteristiche meccaniche:

Modulo di Young – E	206 [GPa]
Poisson - ν	0.3
Coeff. Dilatazione Termica – α	1.2E-5 [1/°C]
Densità - ρ	7800 [Kg/m ³]

Si noti che i pannelli in alluminio del riflettore sono stati modellati con degli elementi SURF22 che non hanno alcun valore strutturale e sono utilizzati solo per la visualizzazione grafica degli spostamenti nella fase di post-processing.

In figura 5 sono riportate alcune parti del file ASCII utilizzato per realizzare il modello FEM del radiotelescopio di Medicina.


```

/COM,ANSYS RELEASE 8.0 UP20030930 08:55:28 01/18/2005
/PREP7
/NOPR
/TITLE, IRA - Radiotelescopio di Medicina elevazione = 90 - (centine a beam)
ANTYPE, 0

!----- ELEMENT TYPE
ET, 1, 4
ET, 2, 8
ET, 3, 44
KEYOP, 3, 7, 1
ET, 4, 44
KEYOP, 4, 7, 11
ET, 5, 44
ET, 6, 44
KEYOP, 6, 8, 1
(.....)
!----- REAL
R, 1, 300, 0, 0, 0, 0, 0
R, 2, 700, 794000, 306700, 0, 0, 0
RMORE, 0, 650000, 193, 380
R, 3, 244, 165600, 17310, 17.8, 30.8,
340
RMORE, 244, 165600, 17310, 17.8, 30.8, 340
R, 4, 160, 99000, 4011, 11.45, 30.6,
155
RMORE, 160, 99000, 4011, 11.45, 30.6, 155
(.....)
!-----> MATERIALS
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000,
MPDATA,R5.0, 1, EX, 1, 1, 2060000.00,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000,
MPDATA,R5.0, 1, NUXY, 1, 1, 0.300000000,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000,
MPDATA,R5.0, 1, ALPX, 1, 1, 1.200000000E-05,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000,
MPDATA,R5.0, 1, DENS, 1, 1, 7.850000000E-06,
MPTEMP,R5.0, 1, 1, 0.00000000,
(.....)
!-----> MODEL
!-----> NODES
N, 1, 646.6, 0, 646.6
N, 2, 646.6, 0, -646.6
N, 3, -646.6, 0, -646.6
(.....)
!----- ELEMENTS
MAT, 2
TYPE, 2
REAL, 1
SECNUM, 1
ESYS, 0
EN, 1, 1, 11
EN, 2, 2, 12
EN, 3, 3, 13
(.....)
!-----> LOADS & CONSTRAINTS
TREF, 0.00000000
ACEL, 0, 0, 0.00000000
D, 1, UX, 0.00000000, 0.00000000
D, 1, UY, 0.00000000, 0.00000000
D, 1, UZ, 0.00000000, 0.00000000
D, 2, UX, 0.00000000, 0.00000000
(.....)

```

Figura 5: Parti del File ASCII del modello FEM del Radiotelescopio di Medicina

3. ANALISI DELLE DILATAZIONI TERMICHE – ALIDADA

L'analisi FEM delle dilatazioni termiche sull'alidada ha come finalità la determinazione del numero e della posizione dei sensori di temperatura da utilizzare su questa parte dell'antenna. Attraverso le analisi sono state individuate le membrature più sensibili ai gradienti termici in termini di errore di elevazione e di cross-elevazione. La figura 6 mostra il modello FEM dell'alidada; gli elementi utilizzati per la modellazione sono i BEAM4 e i BEAM44. Gli elementi *Beam* sono in genere impiegati per modellare strutture reticolari o telai in cui le travi che li costituiscono sono soggette sostanzialmente all'azione del momento flettente, presentando sezioni trasversali di dimensioni assai inferiori rispetto alla loro dimensione longitudinale.

La differenza di maggiore rilievo tra i due elementi è che il BEAM44, rispetto al BEAM4, offre la possibilità di avere due tipi di sezione differenti alle sue estremità, e quindi riesce a modellare travi con forme geometriche più complicate.

Entrambi gli elementi hanno nelle loro caratteristiche la possibilità di poter essere utilizzati con il comando BFE (*Element Body Force*) che permette di imporre direttamente sul singolo elemento dei carichi di volume come flussi di calore, campi elettrici o come nel caso in esame delle temperature.

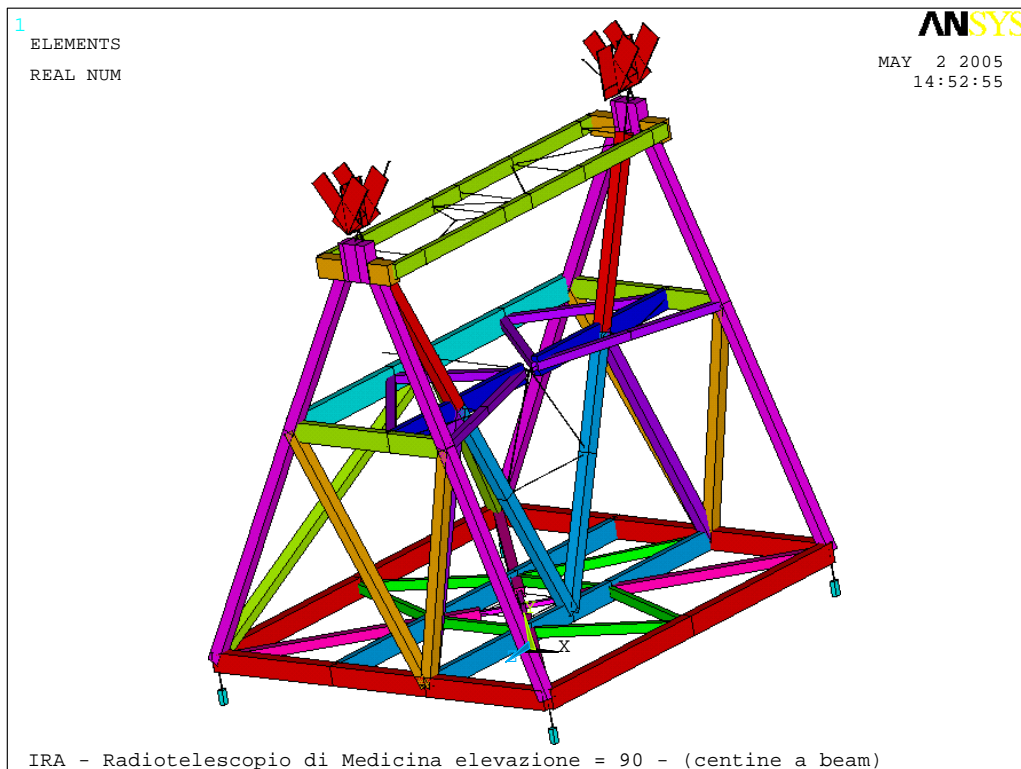


Figura 6: Modello FEM Alidada

Applicando il comando BFE ad ogni singola membratura costituente l'alidada, sono stati calcolati dei coefficienti di rotazione, misurati in $[arcsec/^\circ C]$, che indicano la sensibilità della singola membratura ai gradienti termici in termini di errore di elevazione e di cross-elevazione.

Le condizioni di carico termico utilizzate per la determinazione dei coefficienti sono:

1. Gradiente di $1^\circ C$, applicando con il comando BFE una temperatura omogenea, tra la membratura in esame e le altre, figura 7;
2. Gradiente di $1^\circ C$, applicando con il comando BFE un gradiente attraverso la sezione trasversale della trave, tra la membratura in esame e le altre, figura 8.

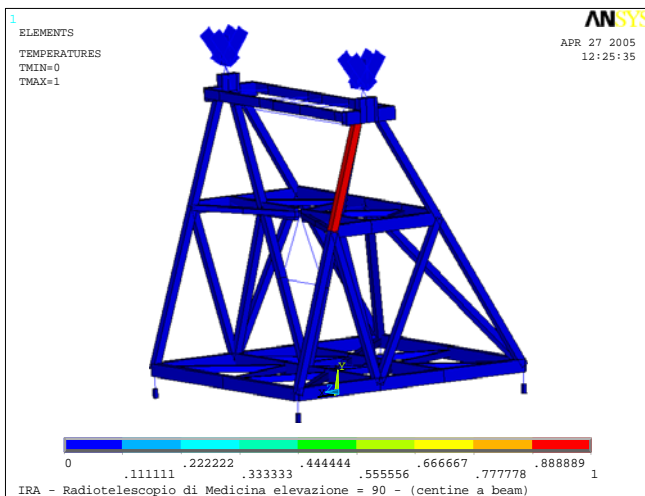


Figura 7: Modello FEM Alidada – CASO 1
Gradiente di $1^\circ C$ omogeneo tra le membrature

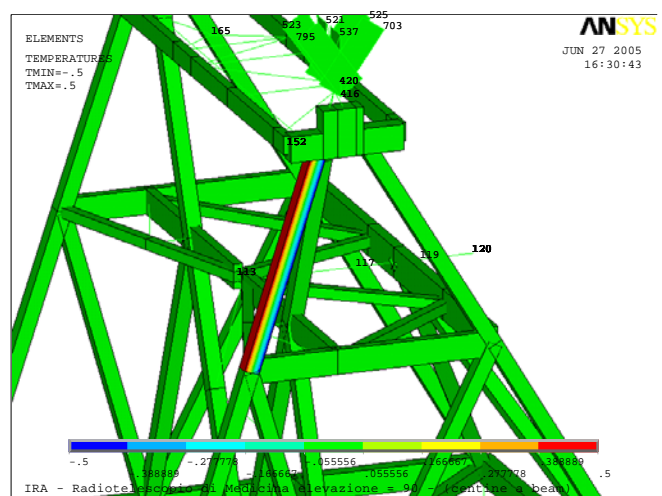


Figura 8: Modello FEM Alidada – CASO 2
Gradiente di $1^\circ C$ “trasversale” tra le membrature

I coefficienti di rotazione ricavati dalle analisi, misurati in $[arcsec/^\circ C]$, sono stati valutati in corrispondenza dei due punti della struttura in cui attualmente sono posizionate le livelle elettroniche, figura 9, nel seguente modo:

- Coefficiente di Rotazione per l'Elevazione: relativo alla rotazione ROTZ del nodo 71, posizionato in corrispondenza della livella di elevazione;
- Coefficiente di Rotazione per la X-Elevazione: calcolato come rotazione nel piano Y-Z dagli spostamenti UY dei nodi 203 e 204, corrispondenti alle due estremità della trave su cui è posizionata la livella di cross-elevazione.

Nelle tabelle 1 e 2 sono riportati i risultati ottenuti per le due casistiche descritte in precedenza. Come si noterà esistono delle membrature che risultano fortemente influenzate dalla presenza dei gradienti termici, generando degli errori che sono di diversi ordini di grandezza superiori rispetto alle altre.

La prima colonna delle tabelle riporta il numero della membratura caricata con il gradiente termico (i numeri sono relativi ai corrispondenti elementi nel modello FEM). La seconda riporta un numero di riferimento utilizzato per l'analisi per distinguere i vari casi. La terza e quarta colonna riportano la rotazione ROTZ del nodo 71, corrispondente alla posizione della livella di inclinazione. Le colonne 5 e 6 riportano lo spostamento UY nei nodi 203 e 204 utilizzati per calcolare l'errore di cross-elevazione, riportato nell'ultima colonna.

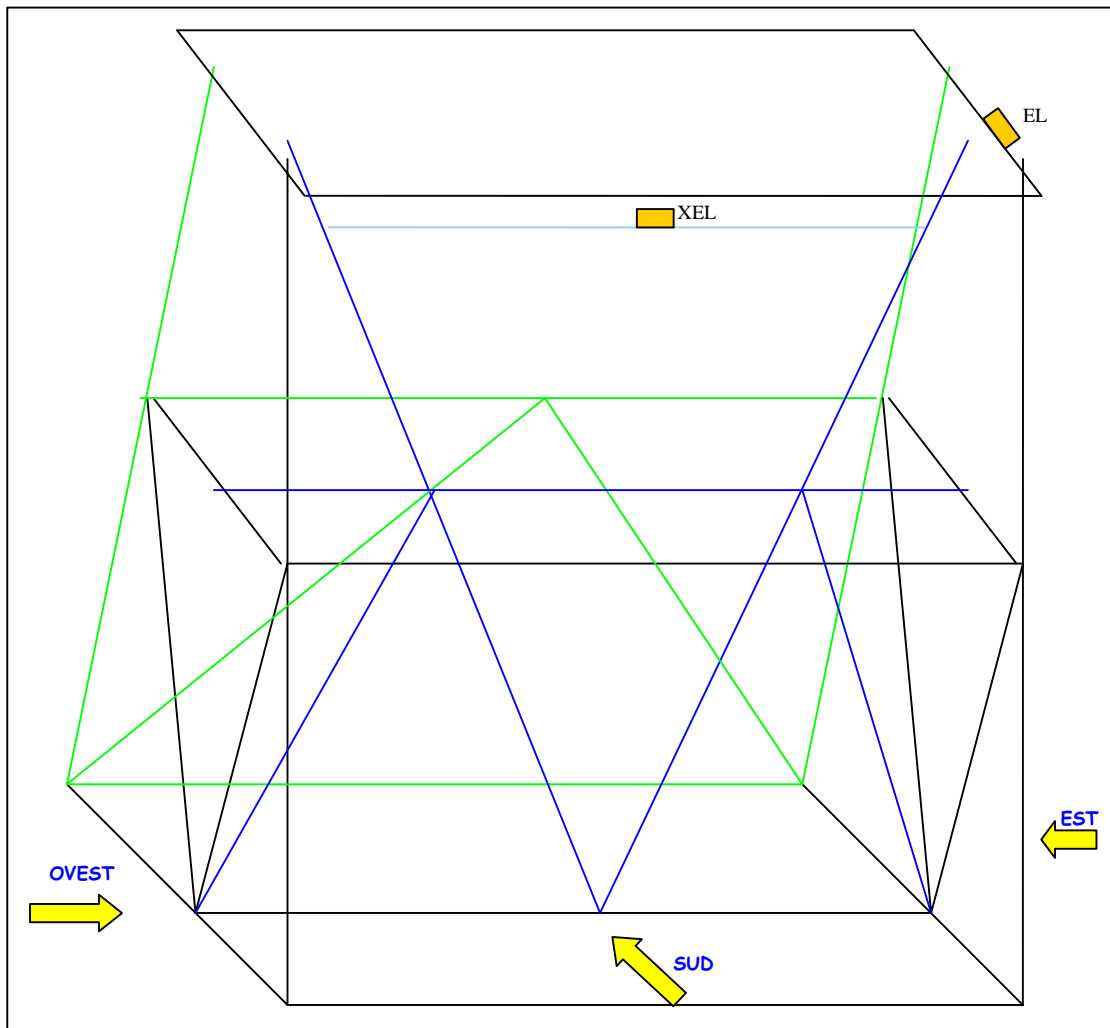


Figura 9: Schema dell'alidada con posizione delle livelle

CASE 1

Modello Ansys	Elevazione - T COSTANTE			XElevazione - T COSTANTE		
	LOAD CASE	NODO 71 [RAD]	Livella [arcsec/°C]	NODO 203 [cm]	NODO 204 [cm]	Livella [arcsec/°C]
SEa---139 - SUD	1	1.42E-05	2.932	2.529E-04	2.956E-03	-0.515
SEb---138 - SUD	2	7.68E-06	1.584	8.054E-04	5.472E-03	-0.890
NEa---141 - SUD	3	-1.65E-05	-3.401	1.596E-04	2.036E-03	-0.358
NEb---140 - SUD	4	-9.48E-06	-1.956	3.003E-04	3.897E-03	-0.686
132 - SUD -s	5	1.03E-05	2.133	-5.148E-04	-1.025E-03	0.097
133 - SUD -n	6	-1.27E-05	-2.615	-1.756E-04	-8.794E-04	0.134
SWa---135 - SUD	7	-2.39E-07	-0.049	2.947E-03	2.625E-04	0.512
SWb---134 - SUD	8	-2.85E-07	-0.059	5.478E-03	8.116E-04	0.889
NWa---137 - SUD	9	4.55E-09	0.001	2.030E-03	1.660E-04	0.355
NWb---136 - SUD	10	2.27E-07	0.047	3.893E-03	3.041E-04	0.684
130 - SUD -s	11	-5.86E-08	-0.012	-1.040E-03	-5.095E-04	-0.101
131 - SUD -n	12	-1.60E-07	-0.033	-8.857E-04	-1.689E-04	-0.137
50-51 - ALTO	13	2.80E-06	0.578	1.325E-04	5.956E-04	-0.088
52-53 - ALTO	14	8.31E-08	0.017	6.056E-04	1.258E-04	0.091
16-17-18 - ALTO	15	2.87E-06	0.591	-1.431E-04	-2.531E-03	0.455
11-12-13 - ALTO	16	-2.14E-07	-0.044	-2.533E-03	-1.450E-04	-0.455
9-10 - ALTO	17	-2.29E-07	-0.047	6.068E-05	6.020E-05	0.000
14-15 - ALTO	18	-1.59E-07	-0.033	2.147E-04	2.170E-04	0.000
V - Ovest -da SUD	19	3.26E-07	0.067	3.076E-03	-1.662E-03	0.903
V - Est - SUD	20	2.24E-07	0.046	-1.634E-03	3.063E-03	-0.895
22-23-24 ALTO	23	1.26E-07	0.026	-7.740E-05	-7.686E-05	0.000
19-20-21-41 ALTO	24	-4.95E-07	-0.102	-6.727E-04	-6.648E-04	-0.002
26 - ALTO	25	2.02E-07	0.042	-1.256E-04	-1.210E-04	-0.001
30 - ALTO	26	1.69E-08	0.003	4.124E-05	-4.221E-05	0.016
29 - ALTO	27	-1.69E-08	-0.003	-4.144E-05	4.207E-05	-0.016
25 - ALTO	28	4.91E-08	0.010	-1.200E-04	-1.253E-04	0.001
36 - ALTO	29	9.95E-08	0.021	-1.319E-05	-1.684E-04	0.030
34 - ALTO	30	-1.96E-08	-0.004	-5.843E-05	6.074E-05	-0.023
33 - ALTO	31	6.20E-08	0.013	6.048E-05	-5.929E-05	0.023
35 - ALTO	32	1.35E-07	0.028	-1.674E-04	-1.023E-05	-0.030
28 - ALTO	33	-1.9266E-08	-0.004	-5.417E-04	9.476E-05	-0.121
32 - ALTO	34	-5.4207E-08	-0.011	6.753E-06	-1.111E-05	0.003
31 - ALTO	35	5.4874E-08	0.011	-1.002E-05	7.975E-06	-0.003
27 - ALTO	36	4.9425E-07	0.102	8.928E-05	-5.464E-04	0.121
60-61-62-63 - ALTO	37	-1.7416E-08	-0.004	3.718E-05	-3.346E-05	0.013
54-55-56-57 - ALTO	38	6.2286E-08	0.013	6.480E-04	5.796E-04	0.013
68 - ALTO	39	-3.8119E-08	-0.008	1.145E-04	-5.331E-05	0.032
69 - ALTO	40	9.3367E-09	0.002	-1.247E-04	7.373E-05	-0.038
70 - ALTO	41	6.707E-08	0.014	5.021E-05	-8.827E-05	0.026
71 - ALTO	42	-1.3507E-07	-0.028	-8.256E-05	1.774E-04	-0.050
66-67 - ALTO	43	3.3515E-08	0.007	-8.483E-05	6.138E-05	-0.028
64-65 - ALTO	44	1.1211E-07	0.023	5.955E-05	-8.193E-05	0.027
81,84-86-92 - ALTO	45	3.7522E-07	0.077	2.714E-04	3.375E-04	-0.013
87,90-85-91 - ALTO	46	-4.2466E-07	-0.088	1.980E-04	2.452E-04	-0.009
116 - SUD	47	9.8583E-07	0.203	7.285E-04	2.127E-03	-0.267
117 - SUD	48	2.0528E-07	0.042	2.150E-03	7.166E-04	0.273
143 - SUD	51	-4.3545E-07	-0.090	-5.109E-04	6.798E-04	-0.227
142 - SUD	52	1.8253E-07	0.038	6.743E-04	-5.278E-04	0.229

Tabella 1: Coefficienti per Elev e XElev per il caso gradiente di 1°C omogeneo tra le membrature

CASE 2

Modello Ansys	Elevazione - GRADIENTI			XElevazione - GRADIENTI		
MEMBRATURA	LOAD CASE	NODO 71 [RAD]	Livella [arcsec/°C]	NODO 203 [cm]	NODO 204 [cm]	Livella [arcsec/°C]
SEa---139 - SUD	1	1.83E-05	3.784	-2.230E-05	6.762E-05	-0.017
SEb---138 - SUD	2	-2.48E-06	-0.511	4.341E-05	7.673E-05	-0.006
NEa---141- SUD	3	1.88E-05	3.874	7.223E-06	-2.378E-05	0.006
NEb---140 - SUD	4	-2.53E-06	-0.522	-2.924E-05	-4.696E-05	0.003
132 - SUD -s	5	-1.75E-06	-0.361	1.969E-05	-3.838E-06	0.004
133 - SUD -n	6	-1.74E-06	-0.359	-1.415E-06	6.049E-05	-0.012
SWa---135 - SUD	7	2.03E-08	0.004	6.854E-05	-2.283E-05	0.017
SWb---134 - SUD	8	7.42E-10	0.000	7.613E-05	4.381E-05	0.006
NWa---137 - SUD	9	2.23E-08	0.005	-2.530E-05	7.935E-06	-0.006
NWb---136 - SUD	10	-7.66E-09	-0.002	-4.568E-05	-2.992E-05	-0.003
130 - SUD -s	11	-3.87E-09	-0.001	-4.411E-06	2.003E-05	-0.005
131 - SUD -n	12	-5.48E-09	-0.001	6.154E-05	-1.877E-06	0.012
50-51 - ALTO	13	1.02E-08	0.002	-2.697E-05	8.790E-05	-0.022
52-53 - ALTO	14	-2.54E-09	-0.001	8.972E-05	-2.783E-05	0.022
16-17-18 - ALTO	15	1.01E-07	0.021	7.034E-05	3.550E-04	-0.054
11-12-13 - ALTO	16	1.02E-08	0.002	3.558E-04	7.024E-05	0.054
9-10 - ALTO	17	5.34E-08	0.011	8.052E-05	7.792E-05	0.000
14-15 - ALTO	18	-1.06E-07	-0.022	1.058E-06	-1.937E-06	0.001
V - Ovest -da SUD	19	-7.79E-08	-0.016	-1.459E-06	-2.378E-06	0.000
V - Est - SUD	20	-8.00E-07	-0.165	-2.878E-06	-1.533E-06	0.000
22-23-24 ALTO	23	2.17E-08	0.004	4.834E-05	4.725E-05	0.000
19-20-21-41 ALTO	24	4.98E-08	0.010	6.979E-05	6.861E-05	0.000
26 - ALTO	25	1.21E-10	0.000	3.717E-05	-1.373E-05	0.010
30 - ALTO	26	-2.93E-10	0.000	1.278E-05	2.171E-05	-0.002
29 - ALTO	27	-7.16E-10	0.000	2.186E-05	1.265E-05	0.002
25 - ALTO	28	-3.50E-08	-0.007	-1.361E-05	3.697E-05	-0.010
36 - ALTO	29	1.94E-09	0.000	2.132E-05	8.748E-06	0.002
34 - ALTO	30	2.97E-09	0.001	2.493E-05	1.521E-05	0.002
33 - ALTO	31	1.97E-09	0.000	1.527E-05	2.486E-05	-0.002
35 - ALTO	32	-9.01E-09	-0.002	8.868E-06	2.124E-05	-0.002
28 - ALTO	33	-1.22E-08	-0.003	7.534E-06	-2.272E-05	0.006
32 - ALTO	34	8.33E-09	0.002	-1.259E-06	8.277E-06	-0.002
31 - ALTO	35	8.61E-09	0.002	8.219E-06	-1.197E-06	0.002
27 - ALTO	36	4.31E-08	0.009	-2.270E-05	7.337E-06	-0.006
60-61-62-63 - ALTO	37	1.26E-07	0.026	-1.294E-04	-1.272E-04	0.000
54-55-56-57- ALTO	38	-3.68E-07	-0.076	1.983E-04	1.984E-04	0.000
68 - ALTO	39	-4.81E-07	-0.099	3.074E-05	9.027E-05	-0.011
69 - ALTO	40	-5.05E-08	-0.010	-3.498E-05	4.208E-05	-0.015
70 - ALTO	41	-1.72E-08	-0.004	4.240E-05	-1.763E-05	0.011
71 - ALTO	42	3.71E-08	0.008	8.609E-05	3.904E-05	0.009
66-67 - ALTO	43	2.35E-08	0.005	-2.643E-05	3.364E-05	-0.011
64-65 - ALTO	44	2.44E-07	0.050	2.971E-05	-2.572E-05	0.011
81,84-86-92 - ALTO	45	9.52E-10	0.000	7.708E-07	2.869E-07	0.000
87,90-85-91 - ALTO	46	-5.41E-10	0.000	5.159E-07	1.535E-07	0.000
116 - SUD	47	-2.23E-07	-0.046	1.723E-06	1.236E-05	-0.002
117 - SUD	48	-2.52E-08	-0.005	1.242E-05	1.573E-06	0.002
143 - SUD	51	-4.85E-09	-0.001	1.764E-05	6.677E-06	0.002
142 - SUD	52	1.05E-08	0.002	7.284E-06	1.753E-05	-0.002

Tabella 2: Coefficienti per Elev e XElev per il caso gradiente di 1°C “trasversale” tra le membrature

4. ANALISI DELLE DILATAZIONI TERMICHE – QUADRUPODE

La determinazione del numero e della posizione dei sensori di temperatura da utilizzare sul quadrupode si è basata anche in questo caso su analisi FEM realizzate sul modello dell'antenna di Medicina precedentemente descritto. La figura 10 riporta uno schema della sezione trasversale delle 4 travi che costituiscono il quadrupode e della loro dimensione longitudinale. La figura 11 mostra il modello FEM del quadrupode utilizzato nelle analisi; gli elementi utilizzati per modellare il quadrupode sono i BEAM44. La sezione trasversale delle travi nel modello risulta rettangolare, figura 11, ma questo è solo un problema di visualizzazione grafica degli elementi *Beam*, in quanto gli elementi utilizzati hanno comunque, tra le loro proprietà, le caratteristiche della sezione ad ellisse riportata in figura 10.

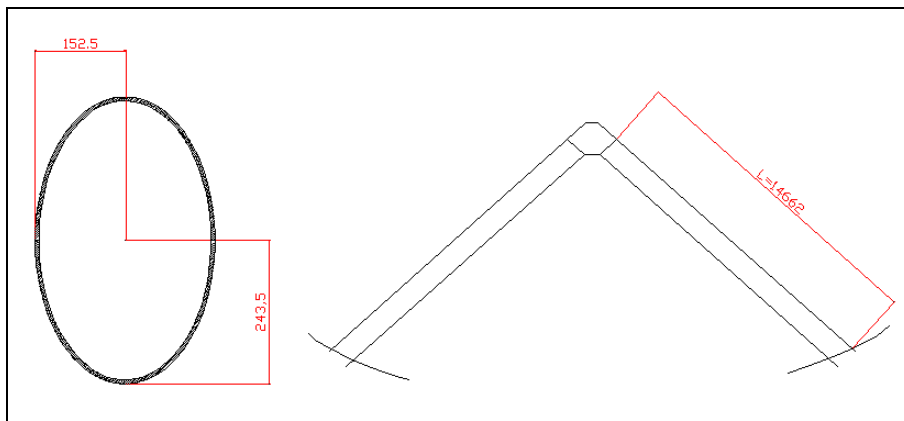


Figura 10: Schema del quadrupode

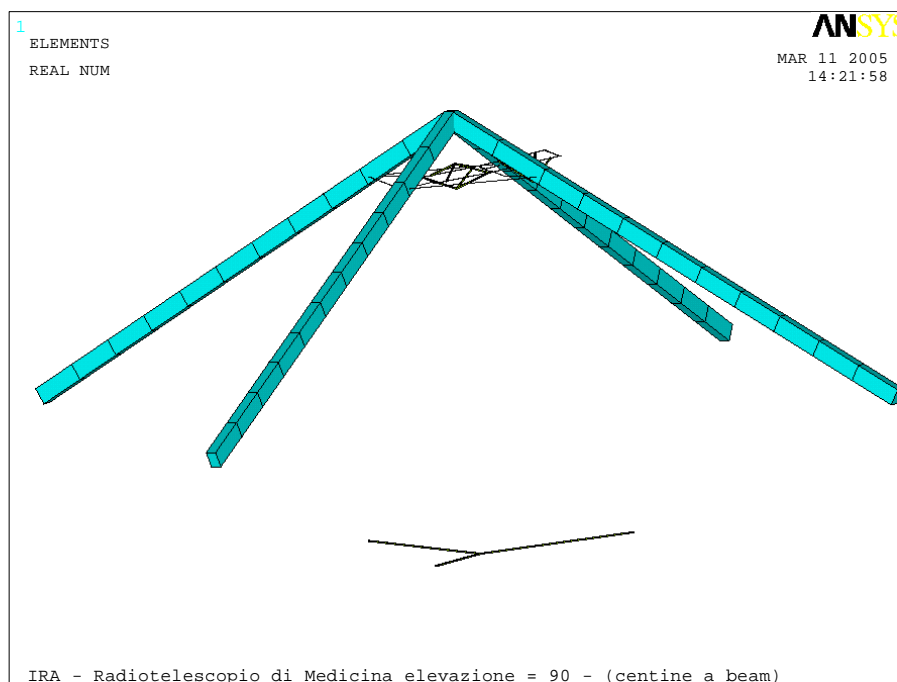


Figura 11: Modello FEM del quadrupode

Per capire come la struttura si comporta sotto l'effetto termico sono state considerate le seguenti condizioni di carico:

1. Gradiente di 1°C (temperatura omogenea) tra la membratura in esame e le altre, caso 1, figura 13;
2. Gradiente di 1°C (gradienti lineari trasversali rispetto alle travi) tra la membratura in esame e le altre, caso 2, figura 14 e 15;
3. Gradiente di 1°C (gradienti lineari longitudinali alle travi) tra la membratura in esame e le altre, caso 3, figura 16 e 17;

Il punto considerato per valutare l'errore di puntamento causato dalle deformazioni termiche è il nodo 1270 corrispondente alla posizione del fuoco primario. Per passare dagli spostamenti del nodo 1270 all'errore di puntamento è stata considerata la *Sensibilità alla traslazione del ricevitore primario* (pari a 15.8 arcsec/mm), come descritto nel rapporto interno IRA-CNR 236/97, che permette di calcolare l'errore sul puntamento dovuta ad una variazione della posizione del fuoco primario. Per ottenere l'errore di puntamento, gli spostamenti nelle direzioni X e Z sono stati quindi moltiplicati per 15.8 [arcsec/mm].

Il sistema di riferimento utilizzato è il seguente, figura 12a:

Asse Y: lungo l'asse ottico (positivo dal vertice dello specchio primario al fuoco primario);

Asse Z: coincidente con l'asse di elevazione (positivo dal vertice dello specchio primario verso sinistra, guardando frontalmente l'antenna ad elevazione 0).

Asse X: completa la terna destrorsa (positivo dal vertice dello specchio primario verso il basso, guardando l'antenna frontalmente ad elevazione 0).

Gli spostamenti che interessano per valutare l'errore di puntamento sono sul piano X-Z. Gli spostamenti lungo l'asse Y generano solo una variazione del fuoco. Le rotazioni attorno agli assi di riferimento X e Z non comportano errori sul puntamento ma solo perdita di efficienza

La nomenclatura utilizzata per distinguere le travi è quella riportata in figura 12a.

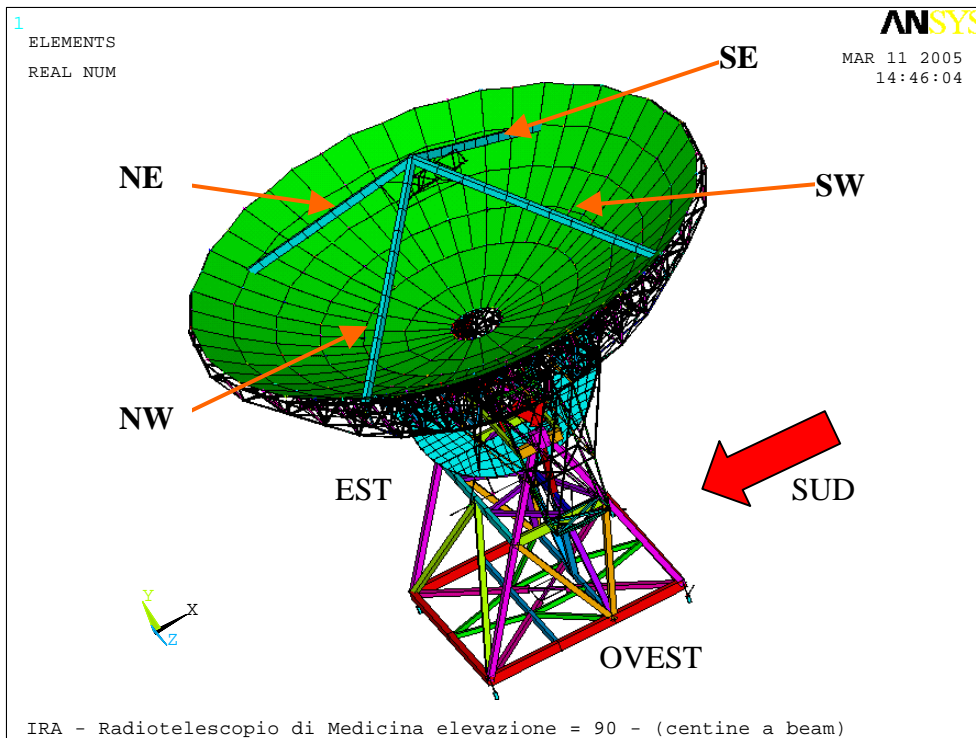


Figura 12a: Modello FEM dell'antenna e Sistema di riferimento – Elev 90

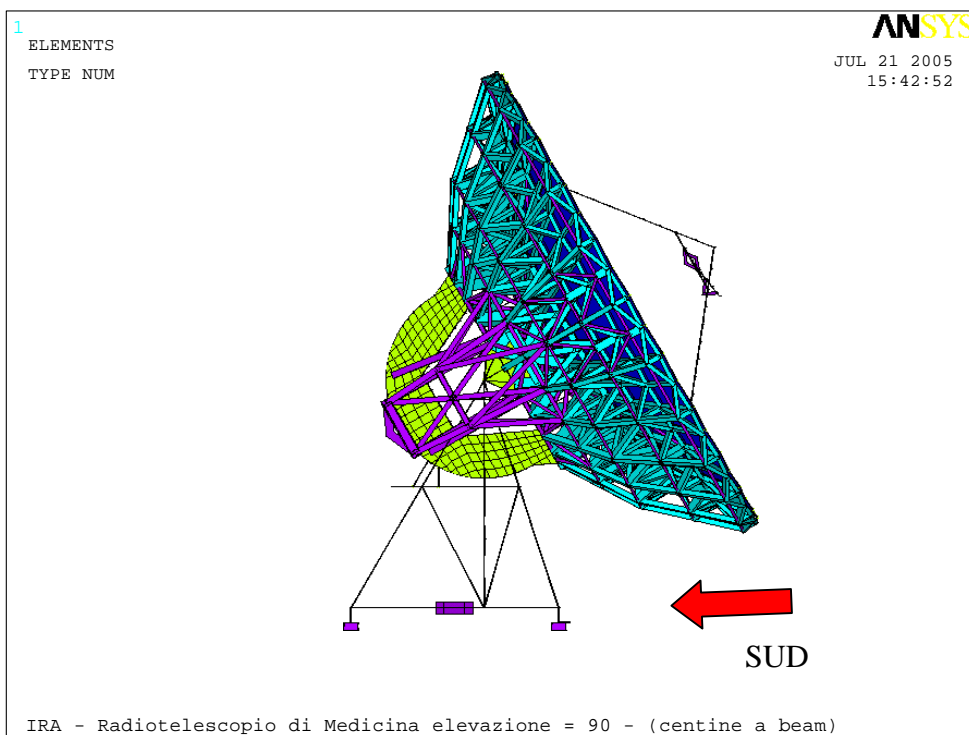


Figura 12b: Modello FEM dell'antenna – Elev 30

CASE 1

A ogni singola trave (una per volta) è stata applicata una temperatura di 1°C costante (longitudinalmente e trasversalmente), figura 13. Il load-case 5 considera tutte le travi contemporaneamente a 1°C; come si nota, per effetto della simmetria gli spostamenti lungo x e z si annullano, mentre, come ci si aspettava, quadruplica il valore di UY trovato nei casi precedenti.

La tabella 3 mostra i risultati ottenuti.

LOAD CASE	TRAVE	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	Pointing Error X [arcsec]	Pointing Error Z [arcsec]
1	SW	-0.060	0.083	-0.060	-0.954	-0.956
2	SE	-0.060	0.083	0.060	-0.954	0.956
3	NW	0.061	0.083	-0.061	0.963	-0.961
4	NE	0.061	0.083	0.061	0.963	0.961
5	TUTTE	0.001	0.333	0.000	0.017	0.000

Tabella 3: Risultati del CASO 1

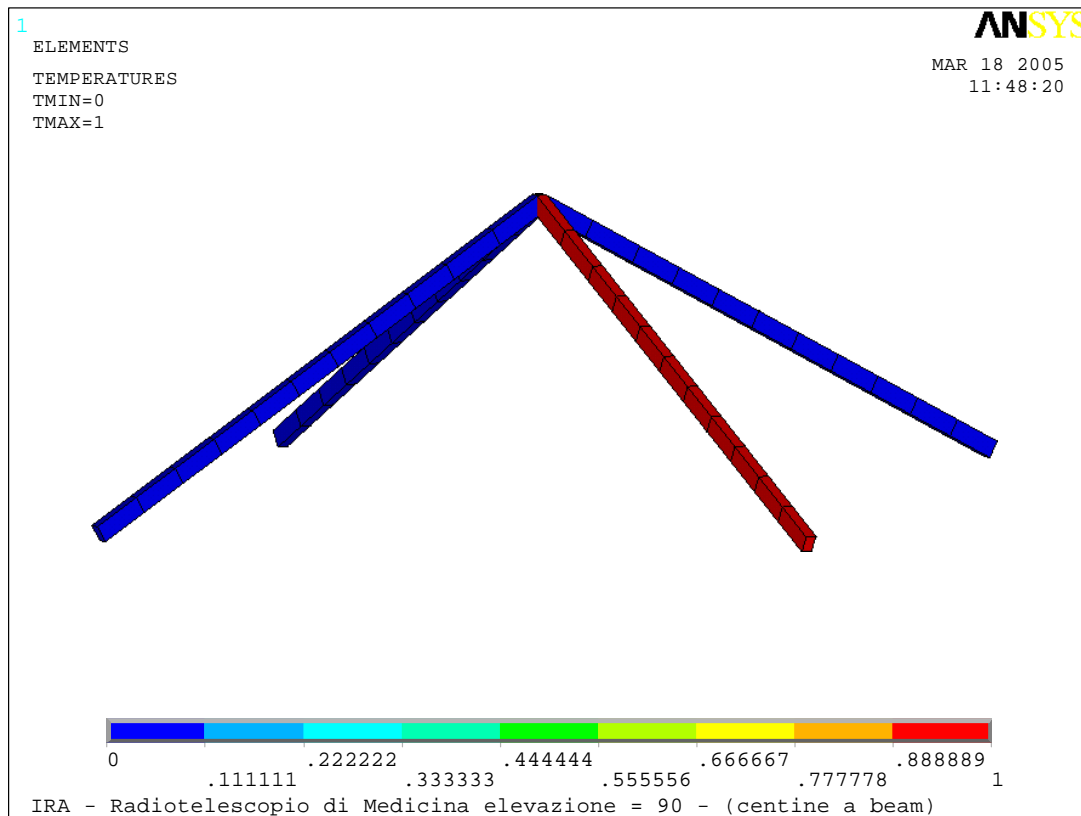


Figura 13: T=1°C sulla trave SW – Case 1, Load case 1

CASE 2

In questo caso è stato considerato il gradiente termico attraverso la sezione trasversale della trave. Nel *CASE 2A* si considera il gradiente di 1 grado tra parte superiore e parte inferiore, fig. 14. Nel *CASE 2B* il gradiente è considerato lateralmente, figura 15.

Come per il *CASO 1* le travi sono state considerate prima singolarmente è poi contemporaneamente. Le tabelle 4 e 5 riportano i risultati ottenuti.

CASO 2A

LOAD CASE	TRAVE	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	Pointing Error X [arcsec]	Pointing Error Z [arcsec]
1	SW	0.082	0.006	0.081	1.293	1.286
2	SE	0.082	0.006	-0.081	1.293	-1.286
3	NW	-0.082	0.006	0.083	-1.302	1.313
4	NE	-0.082	0.006	-0.083	-1.302	-1.313
5	TUTTE	-0.001	0.024	0.000	-0.018	0.000

Tabella 4: Risultati del CASO 2A

CASO 2B

LOAD CASE	TRAVE	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	Pointing Error X [arcsec]	Pointing Error Z [arcsec]
1	SW	0.033	0.001	-0.033	0.522	-0.527
2	SE	-0.033	-0.001	-0.033	-0.522	-0.527
3	NW	0.034	0.000	0.033	0.532	0.527
4	NE	-0.034	0.000	0.033	-0.532	0.527
5	TUTTE	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.001

Tabella 5: Risultati del CASO 2B

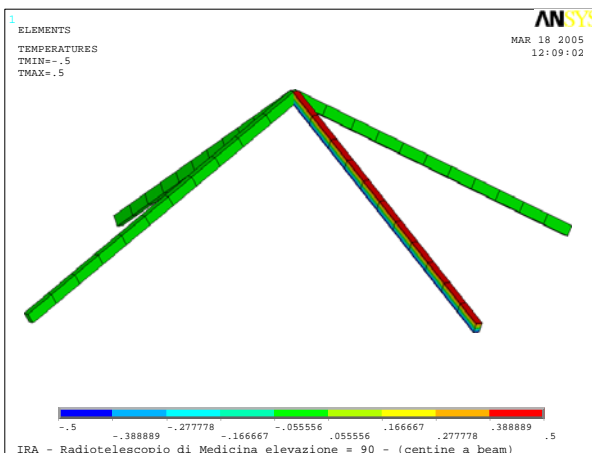


Figura 14: Gradiente di 1°C sulla trave SW
Caso 2A, Load case 1

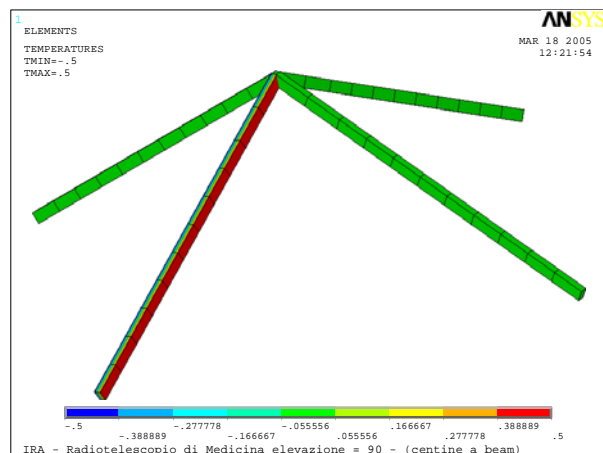


Figura 15: Gradiente di 1°C sulla trave SW
Caso 2B, Load case 1

CASE 3

In questi casi si analizza l'effetto del gradiente termico unitario applicato lungo la dimensione longitudinale delle 4 travi costituenti il quadrupode. Se si considera il caso di temperatura costante sulla sezione trasversale con gradiente longitudinale, l'effetto risultante è nullo in quanto il carico applicato è anti-simmetrico.

Nel *CASO 4A* e *CASO 4B*, oltre al gradiente applicato lungo la direzione longitudinale, sono stati considerati anche i gradienti termici attraverso la sezione trasversale (analogamente ai CASI 2A e 2B della precedente sezione). Le tabelle 6 e 7 riportano i risultati ottenuti. Le figure 16 e 17 sono relative ai due casi in esame.

CASO 4A

LOAD CASE	TRAVE	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	Pointing Error X [arcsec]	Pointing Error Z [arcsec]
1	SW	0.023	0.009	0.023	0.367	0.359
2	SE	0.023	0.009	-0.023	0.367	-0.359
3	NW	-0.023	0.009	0.023	-0.356	0.363
4	NE	-0.023	0.009	-0.023	-0.356	-0.363
5	TUTTE	0.001	0.036	0.000	0.022	0.000

Tabella 6: Risultati del CASO 4A

CASO 4B

LOAD CASE	TRAVE	UX [mm]	UY [mm]	UZ [mm]	Pointing Error X [arcsec]	Pointing Error Z [arcsec]
1	SW	0.009	0.002	-0.010	0.144	-0.161
2	SE	-0.009	-0.002	-0.010	-0.144	-0.161
3	NW	0.011	0.000	0.010	0.166	0.161
4	NE	-0.011	0.000	0.010	-0.166	0.161
5	TUTTE	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabella 7: Risultati del CASO 4B

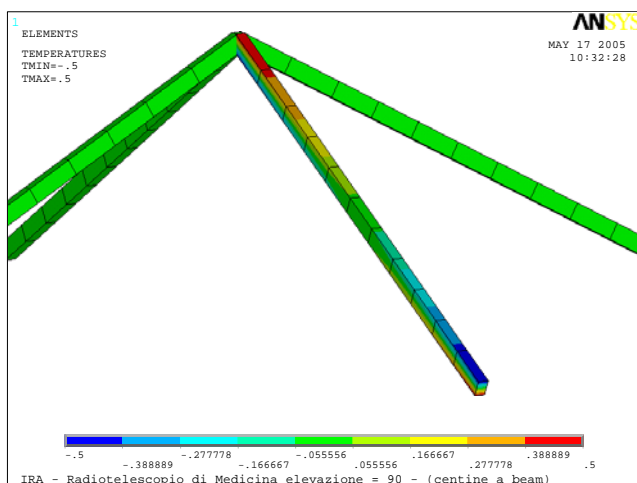


Figura 16: Gradiente di 1°C sulla trave SW - Caso 4A

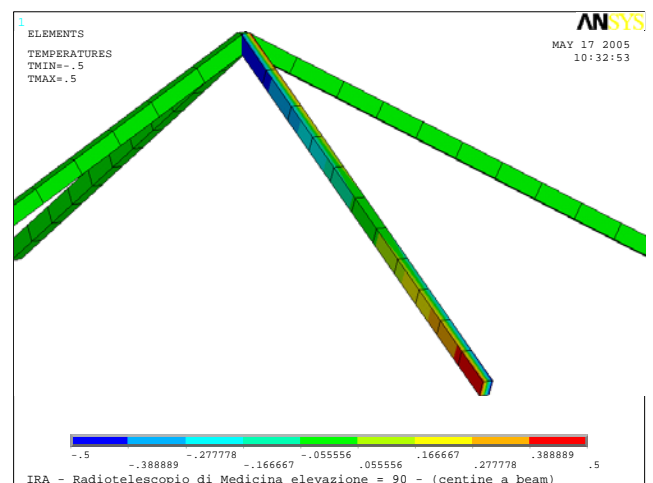


Figura 17: Gradiente di 1°C sulla trave SW - Caso 4B

5. ANALISI DELLE DILATAZIONI TERMICHE – BACK STRUCTURE

L'obiettivo di questo studio è l'analisi del riflettore primario (*back-structure*) dell'antenna di Medicina per stabilire il numero e la posizione dei sensori di temperatura necessari per analizzare il comportamento della struttura a seguito delle dilatazioni termiche.

Lo studio si è basato sull'utilizzo del modello FEM fornito dalla BCV, opportunamente modificato per poter imporre i carichi termici (temperature applicate direttamente sugli elementi); file utilizzato per le analisi “*elev_90_r5.txt*”.

Il riflettore di Medicina è costituito da 24 centine (più 24 false centine). Le centine sono costituite da un corrente superiore, un corrente inferiore, diagonali e montanti; la figura 1 mostra il modello FEM di una centina. Il riflettore è stato modellato con elementi BEAM 44 e LINK8; la figura 2 mostra il modello dell'intero riflettore.

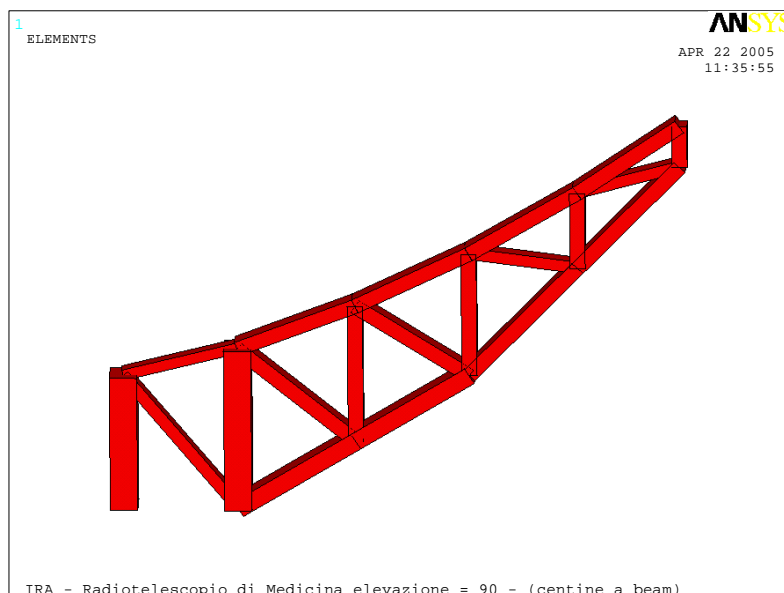


Figura 1: Modello FEM della centina

Per stabilire quanti sensori servono sul paraboloide si è pensato di imporre delle distribuzioni di temperatura realistiche sugli elementi, valutarne la deformata, gli errori di puntamento e vedere quanto meglio vengono “fittate” da una combinazione lineare delle loadings associate alle varie configurazioni di set-up dei sensori ipotizzate inizialmente.

Le distribuzioni realistiche si basano sia su campagne di misure di temperatura realizzate in precedenza sull'antenna di Medicina sia su misure di temperature ricavate dalle pubblicazioni di altri gruppi di ricerca (e.g. misure su NRO45-[m], ricavato dal rapporto Vertex di A. Greve “64-[m] Sardinia Radio Telescope, Final Design Report, Thermal Calculations- 2000” [1]).

Le deformate sono state confrontate attraverso un programma di best-fit per paraboloidi, scritto in *FORTRAN* da *G.Grueff* (file sorgente “*fitpara.for*”), che minimizza la distanza lungo l’asse ottico (*asse Z*). Le configurazioni dei set-up sono state ipotizzate secondo una suddivisione a zone del riflettore; le configurazioni risultano pertanto diverse tra loro per numero e posizione dei sensori. La figura 3 mostra un esempio di suddivisione a 8 zone.

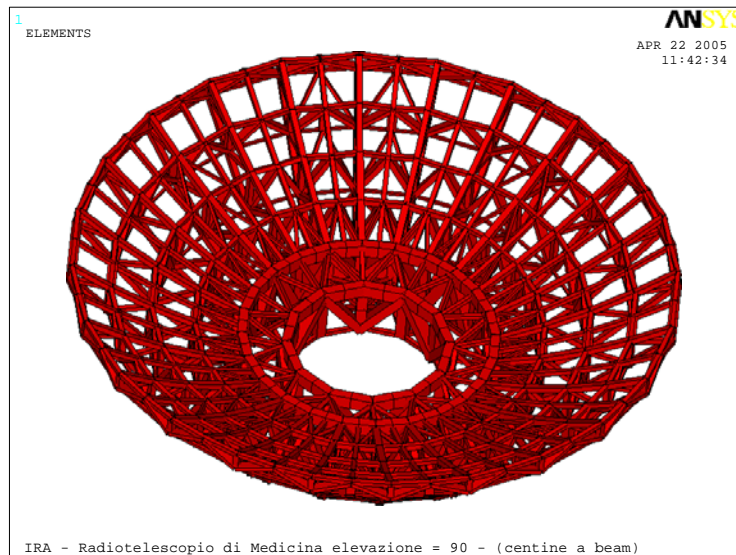


Figura 2: Modello FEM del riflettore

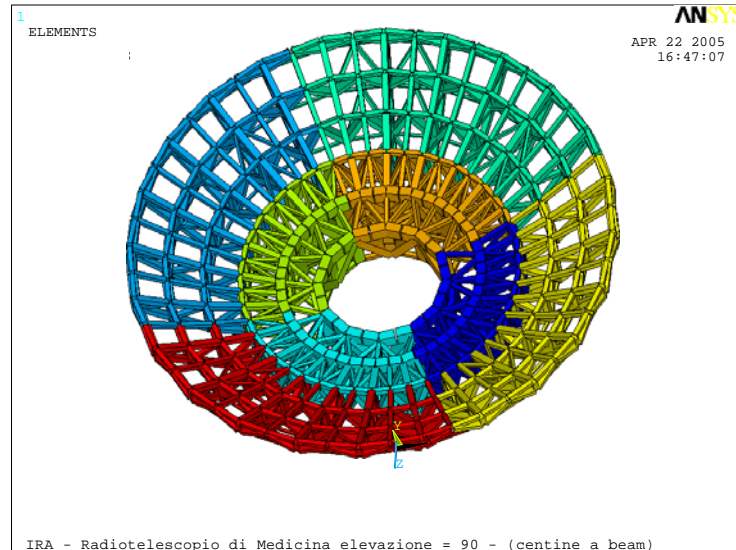


Figura 3: Configurazione a 8 zone

In tutte le configurazioni, ad ogni settore è stata associata la corrispondente temperatura “misurata” dal sensore. Si noti che i sensori, in tutte le configurazioni analizzate, sono stati considerati posizionati sempre lungo le centine principali, e che il valore “misurato” corrisponde al valore di temperatura risultante dalla distribuzione realistica impostata.

Si riportano di seguito le diverse configurazioni analizzate.

SET-UP DEI SENSORI

Per ogni configurazione è stata valutata la deformazione del riflettore generata dall'applicazione di una temperatura unitaria ad ogni singolo settore. La deformazione complessiva, dovuta da una determinata distribuzione realistica, è stata calcolata come combinazione lineare delle singole loadings (temperatura unitaria) moltiplicate per la temperatura "misurata" dal corrispettivo sensore.

Configurazione TT4

Il riflettore è stato suddiviso in 4 settori a cui sono state associate le corrispondenti temperature dei 4 sensori posizionati sul terzo anello del corrente superiore del riflettore. Figura 4.

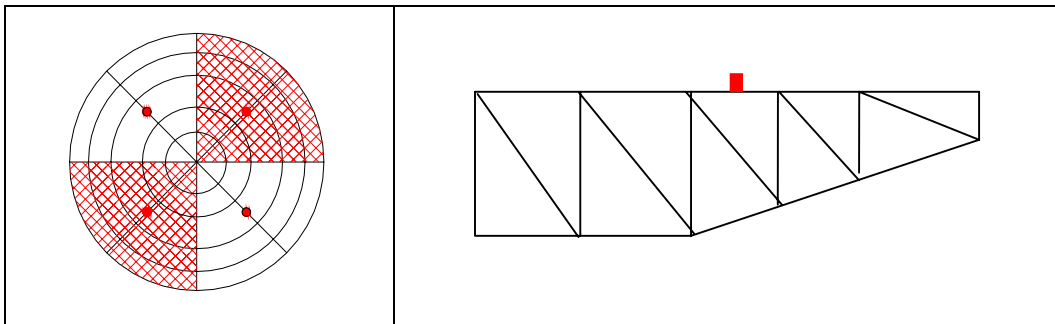


Figura 4: Configurazione TT4

Configurazione TT4+4

Anche in questo caso il riflettore è stato suddiviso in 4 settori. Rispetto al caso precedente i sensori sono 8: 4 sul corrente superiore e 4 sul corrente inferiore. Al corrente superiore sono state applicate le temperature misurate dai sensori sul corrente superiore; analogamente al corrente inferiore quelle misurate sul corrente inferiore; mentre alle diagonali e ai montanti è stata applicata una temperatura pari al valor medio tra i valori misurati sul corrente superiore e inferiore del rispettivo settore. Figura 5.

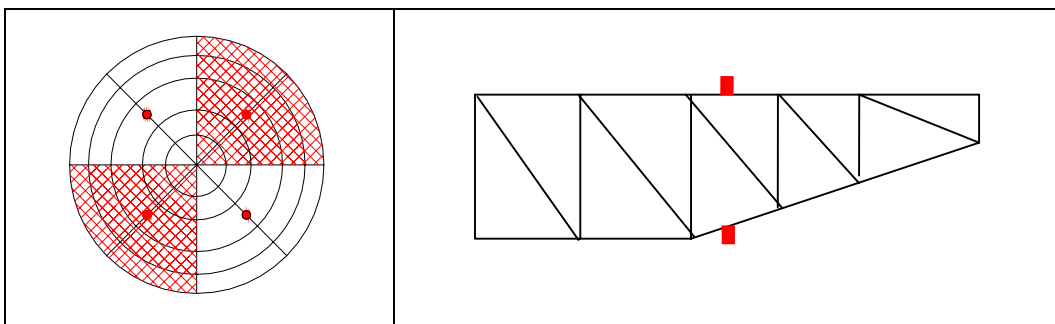


Figura 5: Configurazione TT4+4

Configurazione TT8+8

Il riflettore è stato suddiviso in 8 settori. I 4 settori più interni comprendono il 1° e 2° anello, mentre i 4 settori più esterni comprendono 3°, 4° e 5° anello. In questa configurazione i sensori sono 16: 8 sul corrente superiore e 8 sul corrente inferiore. Al corrente superiore sono state applicate le temperature misurate dai sensori sul corrente superiore; analogamente al corrente inferiore quelle del corrente inferiore; mentre alle diagonali e ai montanti è stata applicata una temperatura pari al valor medio dei valori misurati sul corrente superiore e inferiore del rispettivo settore. Figura 6.

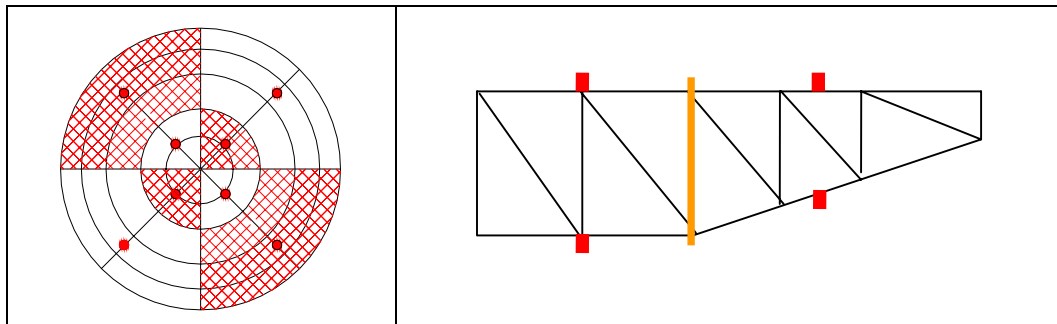


Figura 6: Configurazione TT8+8

Configurazione TT8+8B

Il riflettore è stato suddiviso in 8 settori. I 4 settori più interni comprendono 1°, 2° e 3° anello, mentre i 4 settori più esterni comprendono 4° e 5° anello. In questa configurazione i sensori sono 16: 8 sul corrente superiore e 8 sul corrente inferiore. Al corrente superiore sono state applicate le temperature misurate dai sensori sul corrente superiore; analogamente al corrente inferiore quelle del corrente inferiore; mentre alle diagonali e ai montanti è stata applicata una temperatura pari al valor medio dei valori misurati sul corrente superiore e inferiore del rispettivo settore. Figura 7.

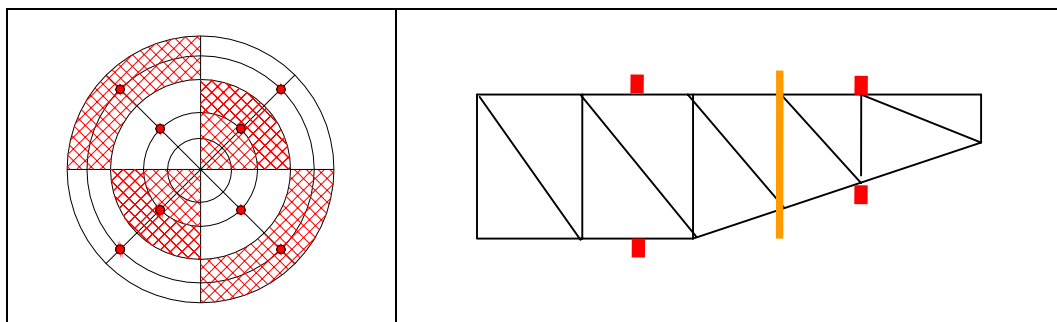


Figura 7: Configurazione TT8+8B

Configurazione TT12+

Il riflettore è stato suddiviso in 24 settori. I primi 8 settori più interni sono costituiti dal 1° anello; altri 8 settori (intermedi) comprendono il 2° e il 3° anello; mentre i restanti 8 settori più esterni comprendono il 4° e il 5° anello. In questa configurazione i sensori sono 48: 24 sono posizionati sul corrente superiore e 24 sul corrente inferiore. Al corrente superiore sono state applicate le temperature misurate dai sensori sul corrente superiore; analogamente al corrente inferiore quelle del corrente inferiore; mentre alle diagonali e ai montanti è stata applicata una temperatura pari al valor medio dei valori misurati sul corrente superiore e inferiore del rispettivo settore. Figura 8.

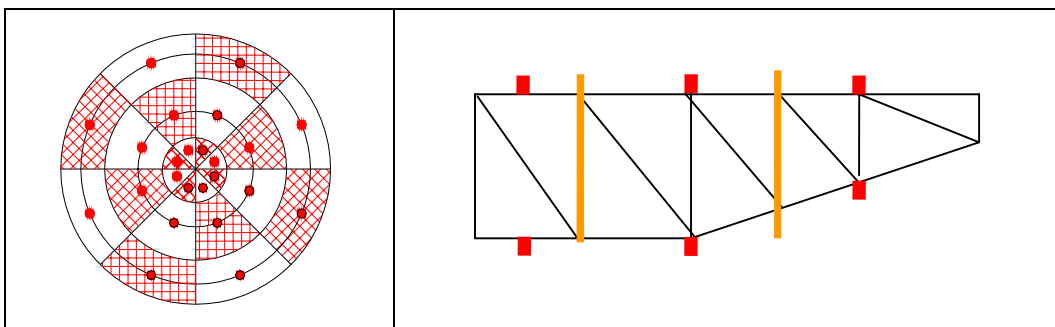


Figura 8: Configurazione TT12+

Configurazione TT12+B

Il riflettore è stato suddiviso come nel caso precedente in 24 settori. I primi 8 settori più interni sono costituiti dal 1° e dal 2° anello; altri 8 settori (intermedi) comprendono il 3° e il 4° anello; mentre i restanti 8 settori più esterni comprendono il 5° anello. Anche in questa configurazione i sensori sono 48: 24 sono posizionati sul corrente superiore e 24 sul corrente inferiore. Al corrente superiore sono state applicate le temperature misurate dai sensori sul corrente superiore; analogamente al corrente inferiore quelle del corrente inferiore; mentre alle diagonali e ai montanti è stata applicata una temperatura pari al valor medio dei valori misurati sul corrente superiore e inferiore del rispettivo settore. Figura 9.

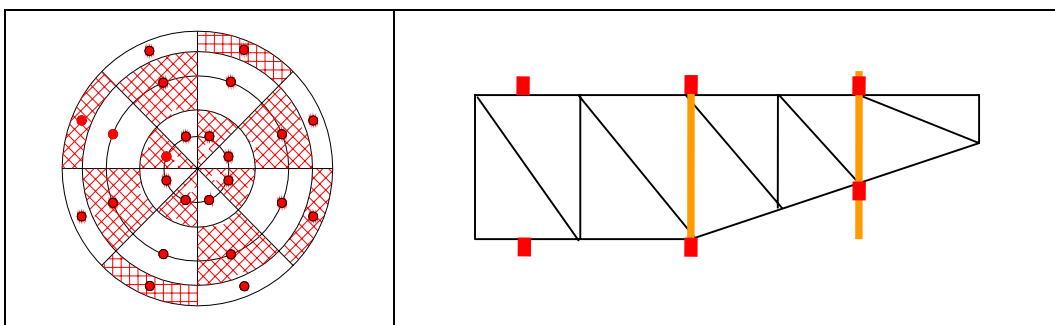


Figura 9: Configurazione TT12+B

DISTRIBUZIONI DI TEMPERATURA

Per valutare la differenza tra le diverse configurazioni di set-up ed il caso reale sono state considerate diverse distribuzioni di temperatura. In tutti i casi analizzati è stato utilizzato il sistema di riferimento riportato in figura 10.

- Asse Z coincidente con l'asse ottico;
- Asse Y diretta secondo l'asse di elevazione;
- Asse X completa la terna.

Si noti che il sistema di riferimento del modello FEM era differente dal sistema utilizzato nel programma di best-fit. È stato pertanto necessario importare i dati secondo il sistema di riferimento riportato in figura 10.

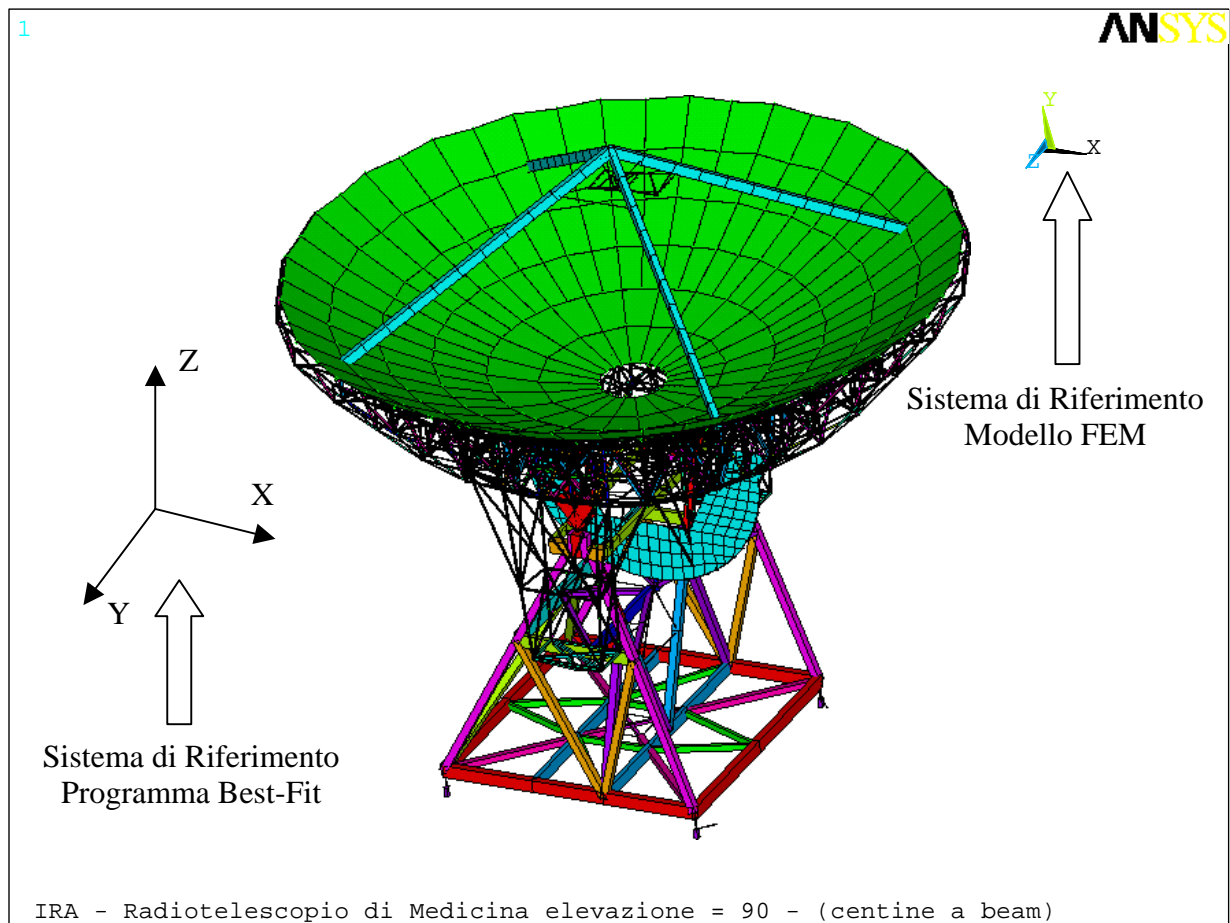


Figura 10: Sistema di Riferimento

Di seguito vengono riportate le diverse casistiche analizzate.

CASE 1

In questo caso è stata considerata una distribuzione di temperatura sul riflettore simile a quella riportata nella relazione del Greve per il radiotelescopio NRO 45-m [1] (back-structure ventilata). La distribuzione, diversamente dal caso citato, è stata considerata doppiamente simmetrica. Lo schema di figura 11 riporta le temperature utilizzate nell'analisi agli elementi finiti (figura 12).

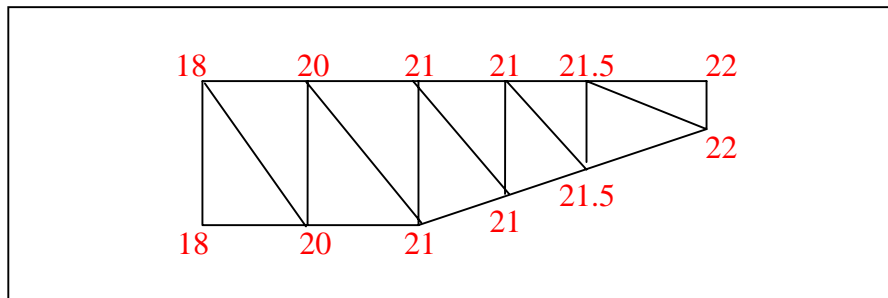


Figura 11: Distribuzione di temperatura realistica CASE 1

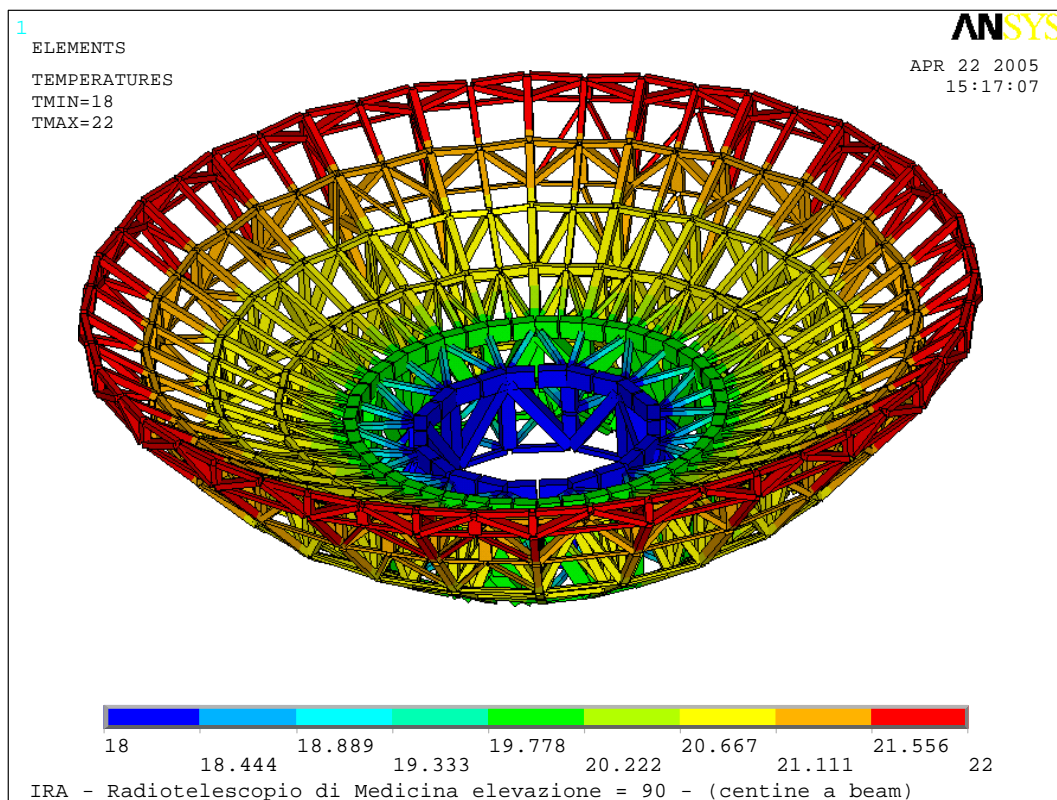


Figura 12: Modello FEM con distribuzione realistica CASE 1

Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva con i valori ottenuti dal best-fit. Le varie configurazioni di set-up sono state confrontate con il caso della distribuzione realistica (prima riga). Nelle colonne sono riportati il valore di RMS e i 6 gradi di libertà del paraboloide considerati dal programma di best-fit; questi sono le due rotazioni fuori dal piano (*rotx* e *roty*), gli spostamenti del vertice del paraboloide (*x*, *y* e *z*) e la variazione della focale (*focal*). L'asse *z* e la variazione della focale coincidono con l'asse ottico.

Nella colonna “*err RMS*” sono riportati i valori di RMS della differenza tra la deformata dello schema di sensori utilizzato e quella di riferimento (distribuzione “reale”). Nella colonna “*Max Disp*” sono riportate le massime differenze tra le due deformate messe a confronto.

	RMS [mm]	err RMS [mm]	Max Disp [mm]	rotx [arcosec]	roty [arcosec]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	focal [mm]
CASE 1	0.2340	0.0000	0.000	0.00001	-0.00049	-0.024	0.002	-0.761	5.247
TT4	0.2301	0.0571	0.025	0.00000	-0.00004	0.010	0.002	-0.700	4.832
TT4+4	0.2301	0.0571	0.025	0.00000	-0.00004	0.010	0.002	-0.700	4.832
TT8+8	0.2237	0.0466	0.016	-0.00020	-0.00029	-0.071	-0.090	-0.696	4.972
TT8+8B	0.2303	0.0512	0.013	-0.00007	-0.00044	-0.149	-0.031	-0.713	5.054
TT12+	0.2178	0.0518	0.020	-0.00003	0.00014	0.080	-0.018	-0.688	4.794
TT12+B	0.2327	0.0390	-0.010	-0.00015	-0.00039	-0.101	-0.070	-0.720	5.106

Tabella 1: Confronto tra distribuzione realistica del CASE 1 e le diverse configurazioni di set-up

CASE 2

In questo caso è stata considerata una distribuzione di temperatura simile al caso precedente ma con un certo gradiente lungo la centina, ovvero tra corrente inferiore e corrente superiore. Lo schema di figura 13 riporta le temperature impostate sul modello FEM (figura 14).

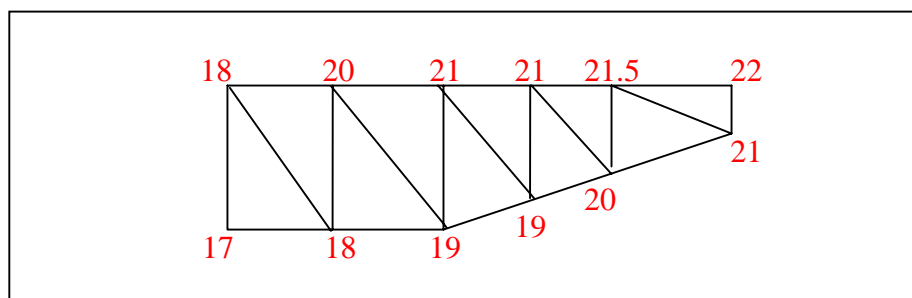


Figura 13: Distribuzione di temperatura realistica CASE 2

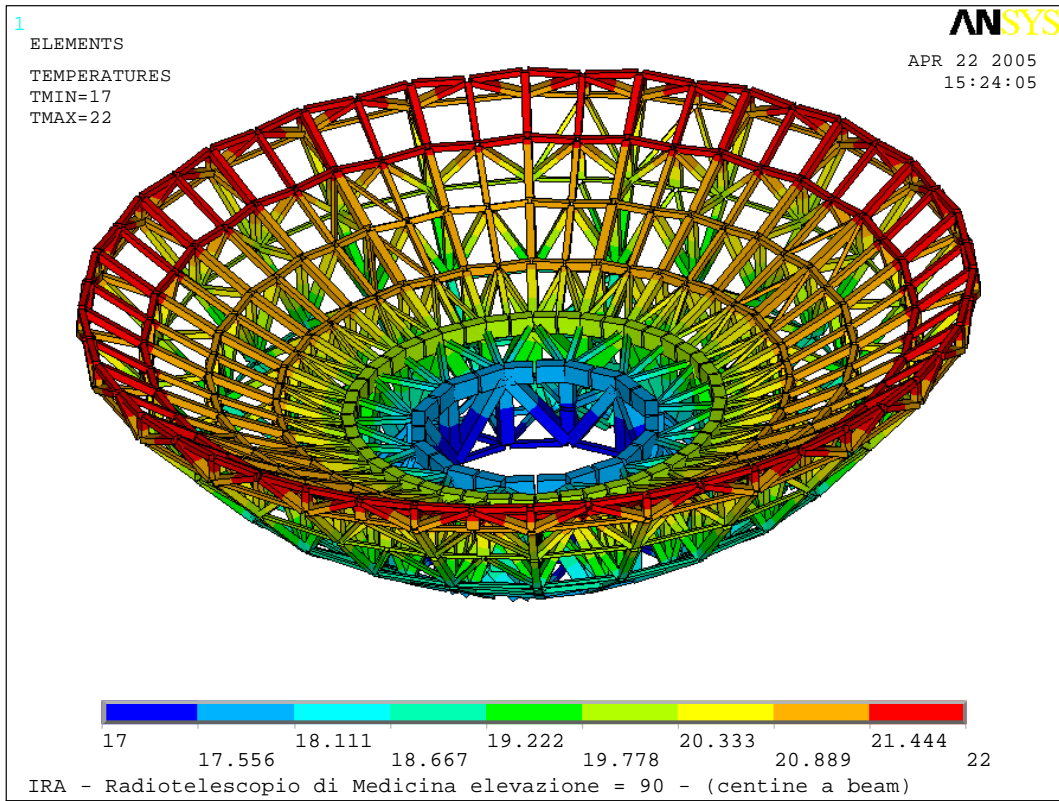


Figura 14: Modello FEM con distribuzione realistica CASE 2

La tabella 2 riporta i valori ottenuti in questo caso.

	RMS [mm]	err RMS [mm]	Max Disp [mm]	rotx [arcosec]	roty [arcosec]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	focal [mm]
CASE 2	0.2539	0.0000	0.000	-0.00002	-0.00051	-0.037	-0.010	-0.816	5.959
TT4	0.2301	0.0796	0.056	0.00000	-0.00004	0.010	0.002	-0.700	4.832
TT4+4	0.2483	0.0608	0.029	-0.00017	-0.00035	-0.087	-0.077	-0.753	5.443
TT8+8	0.2389	0.0481	0.020	0.00001	-0.00029	-0.034	0.002	-0.745	5.585
TT8+8B	0.2468	0.0515	0.016	0.00000	-0.00033	-0.056	-0.006	-0.760	5.684
TT12+	0.2408	0.0459	0.016	0.00005	-0.00028	-0.008	0.014	-0.743	5.578
TT12+B	0.2528	0.0358	0.010	0.00005	-0.00012	0.054	0.018	-0.782	5.806

Tabella 2: Confronto tra distribuzione realistica del CASE 2 e le diverse configurazioni di set-up

CASE 3

In questo caso è stata considerata una distribuzione con dei valori di temperatura e gradienti leggermente superiori ai casi precedenti (caso di back-structure non ventilata). Lo schema di figura 15 riporta le temperature impostate sul modello FEM (figura 16).

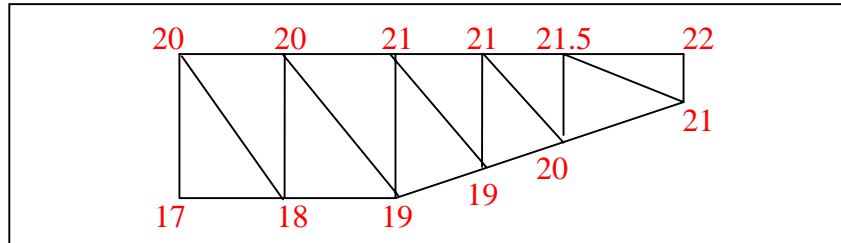


Figura 15: Distribuzione di temperatura realistica CASE 3

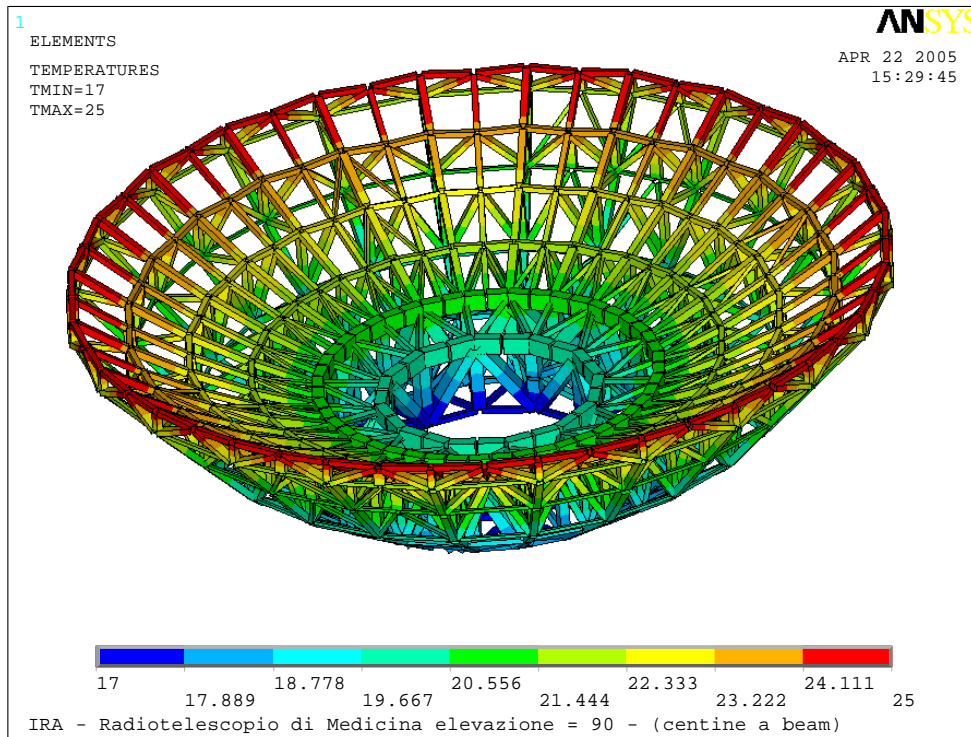


Figura 16: Modello FEM con distribuzione realistica CASE 3

	RMS [mm]	err RMS [mm]	Max Disp [mm]	rotx [arcosec]	roty [arcosec]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	focal [mm]
CASE 3	0.2880	0.0000	0.000	0.00001	-0.00070	-0.053	0.003	-0.946	7.072
TT4	0.2449	0.1200	0.087	-0.00004	-0.00025	-0.078	-0.024	-0.754	5.184
TT4+4	0.2789	0.0784	0.052	0.00007	-0.00002	0.061	0.027	-0.826	6.082
TT8+8	0.2734	0.0549	0.028	-0.00001	-0.00042	-0.025	-0.007	-0.846	6.465
TT8+8B	0.2788	0.0551	0.022	-0.00026	-0.00011	0.080	-0.112	-0.873	6.662
TT12+	0.2766	0.0507	0.020	0.00013	-0.00077	-0.165	0.055	-0.854	6.593
TT12+B	0.2927	0.0430	0.014	-0.00004	-0.00019	0.089	-0.020	-0.893	6.715

Tabella 3: Confronto tra distribuzione realistica del CASE 3 e le diverse configurazioni di set-up

CASE 4

In questo caso è stata considerata una distribuzione di temperatura simmetrica rispetto solo ad uno dei due assi di simmetria del paraboloide. Questa potrebbe essere infatti una condizione in cui il riflettore può venirsi a trovare (incidenza dell'irraggiamento maggiore su un lato; l'altro lato rimarrebbe in ombra con formazione di gradiente). La figura 17 mostra il modello FEM con la distribuzione di temperatura utilizzata.

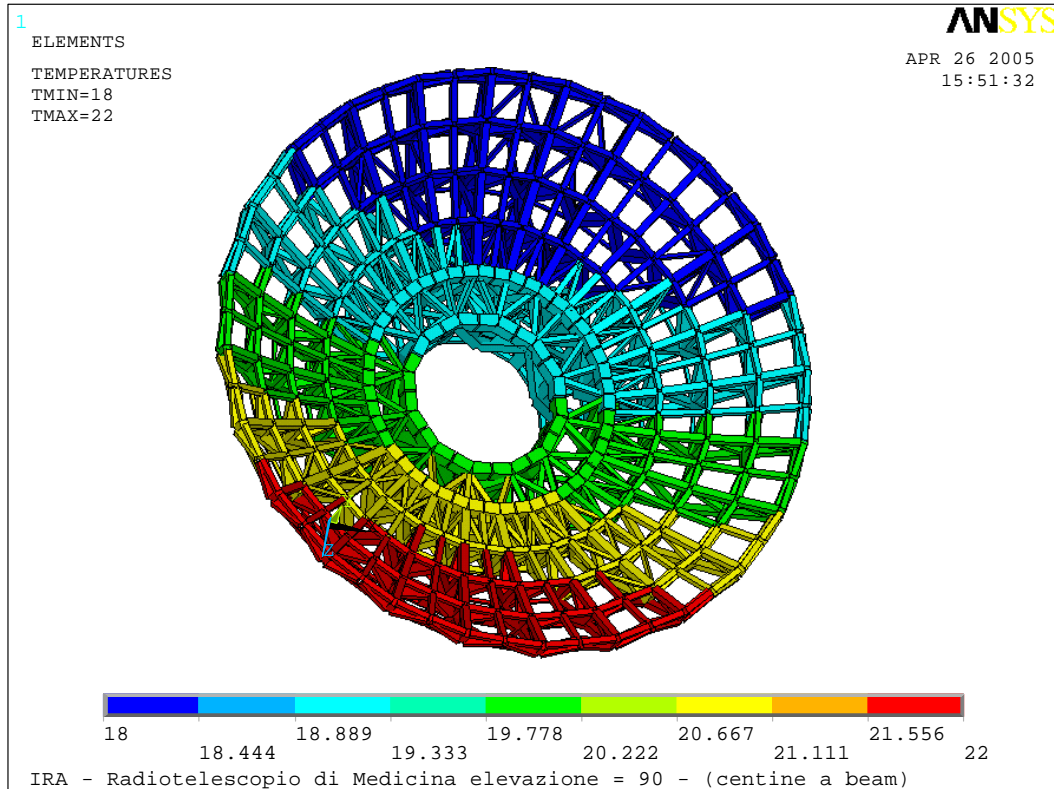


Figura 17: Modello FEM con distribuzione realistica CASE 4

	RMS [mm]	err RMS [mm]	Max Disp [mm]	rotx [arcosec]	roty [arcosec]	x [mm]	y [mm]	z [mm]	focal [mm]
CASE 4	0.2263	0.0000	0.000	-0.00004	-0.00040	0.078	0.073	-0.745	4.663
TT4	0.2168	0.0907	0.030	0.00118	-0.00027	0.002	0.516	-0.664	4.611
TT4+4	0.2166	0.0907	0.030	0.00121	-0.00033	-0.023	0.531	-0.664	4.614
TT8+8	0.2115	0.0917	0.029	0.00024	0.00013	0.067	0.139	-0.655	4.491
TT8+8B	0.2126	0.1062	-0.040	0.00122	0.00100	0.421	0.573	-0.665	4.620
TT12+	0.2089	0.1097	-0.049	-0.00003	0.00183	0.696	0.024	-0.671	4.610
TT12+B	0.2156	0.1099	-0.045	0.00076	0.00183	0.737	0.361	-0.666	4.615

Tabella 4: Confronto tra distribuzione realistica del CASE 4 e le diverse configurazioni di set-up

CASE 5

In questo caso sono state considerate diverse distribuzioni di temperatura con gradiente unitario lungo uno dei due assi di simmetria del paraboloide (asse X o asse Z nel modello FEM).

Il set-up che riesce a fittare meglio le 12 distribuzioni unitarie dovrebbe essere anche quello che è in grado di offrire migliori risultati nei casi in cui si considerano distribuzioni di temperature realizzate come combinazioni lineari dei 12 casi a temperatura “unitaria”.

I 12 casi analizzati, schematizzati nella figura 18 , sono stati valutati attraverso i 6 set-up di sensori descritti in precedenza. La casistica è stata suddivisa come segue:

- 3 distribuzioni “unitarie” lungo l’asse Z applicate solo al corrente superiore; corrente inferiore, montanti e diagonali non caricati ($T = 0^{\circ}\text{C}$)
- 3 distribuzioni “unitarie” lungo l’asse Z applicate solo al corrente inferiore; corrente superiore, montanti e diagonali non caricati ($T = 0^{\circ}\text{C}$)
- 3 distribuzioni “unitarie” lungo l’asse X applicate solo al corrente superiore; corrente inferiore, montanti e diagonali non caricati ($T = 0^{\circ}\text{C}$)
- 3 distribuzioni “unitarie” lungo l’asse X applicate solo al corrente inferiore; corrente superiore, montanti e diagonali non caricati ($T = 0^{\circ}\text{C}$)

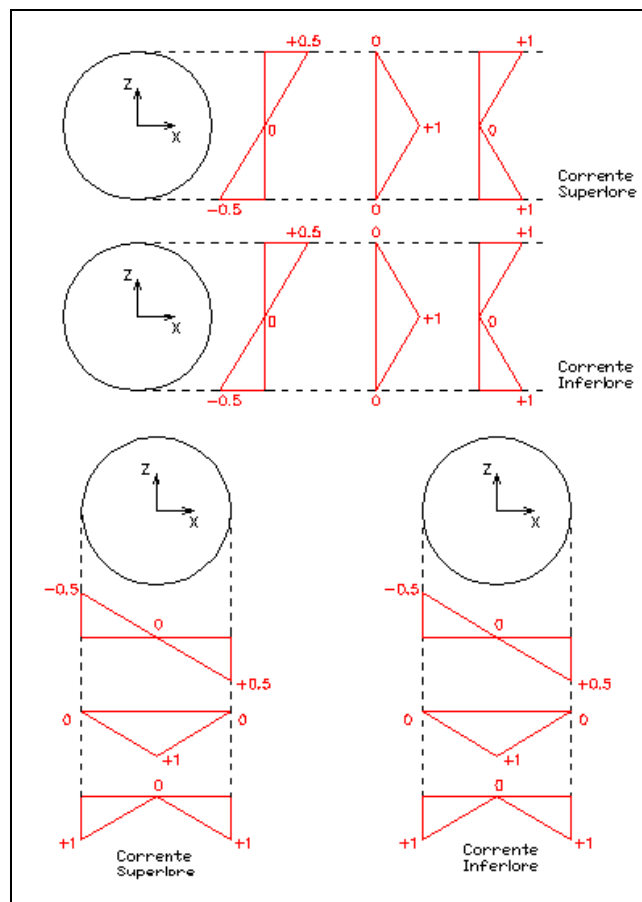


Figura 18: Schematizzazione dei 12 casi

Vengono di seguito riportate le figure relative alle 12 distribuzioni di temperatura applicate al modello FEM.

Case 5.1 – FILE: “grad_1_Z_UP”

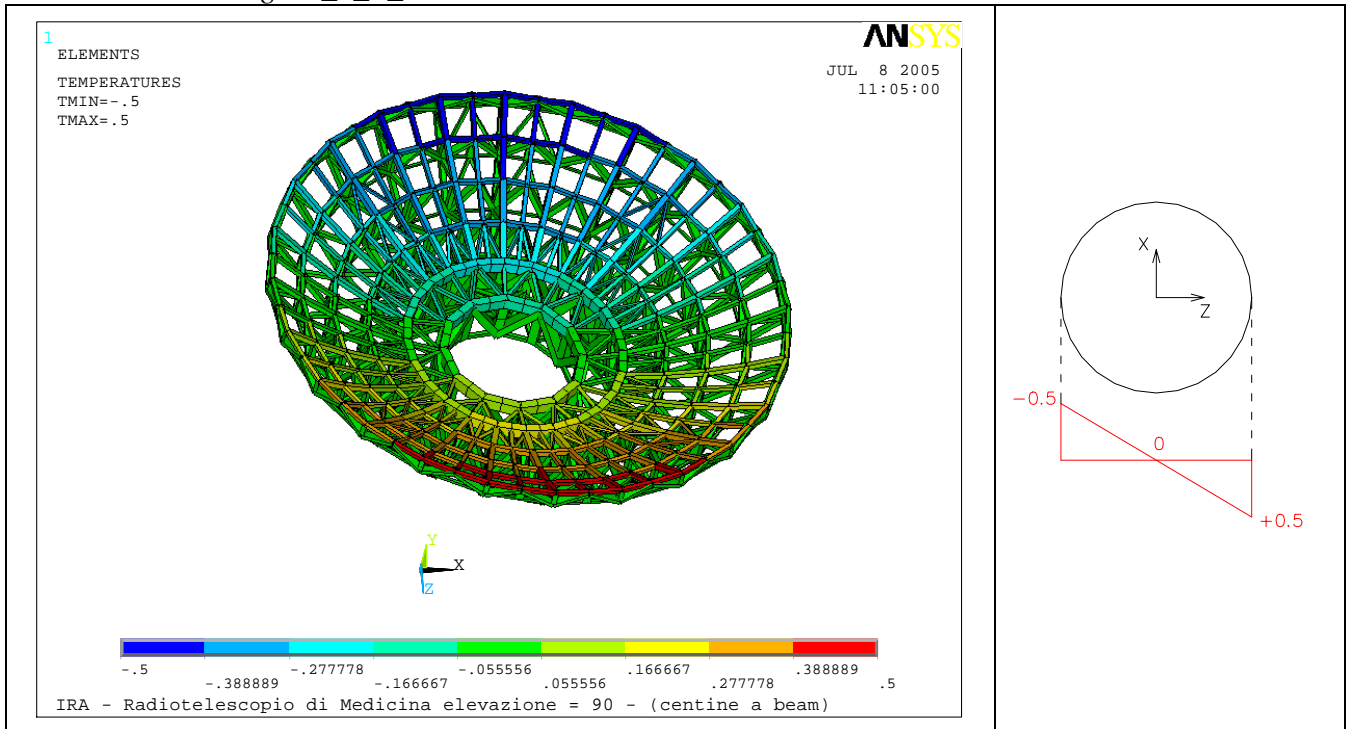


Figura 19: Modello FEM con distribuzione 1_Z_UP

Case 5.2 – FILE: “grad_2_Z_UP”

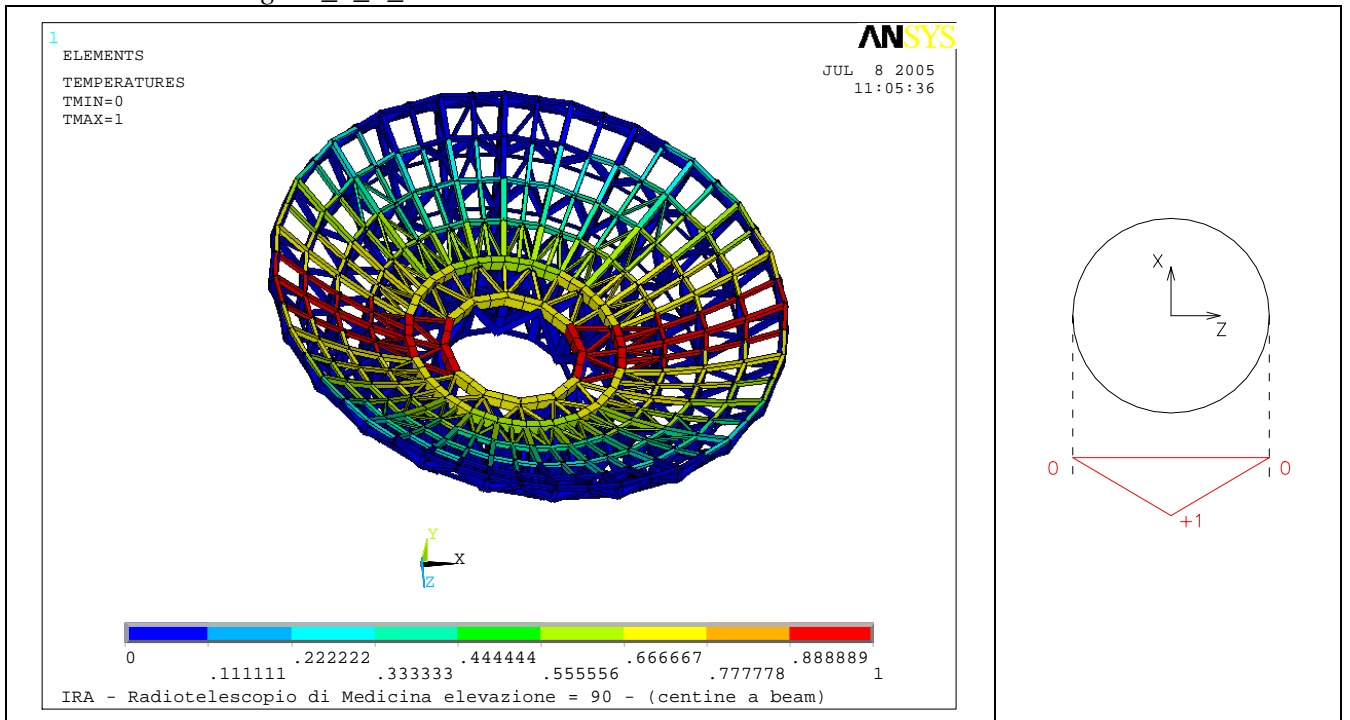


Figura 20: Modello FEM con distribuzione 2_Z_UP

Case 5.3 – FILE: “grad_3_Z_UP”

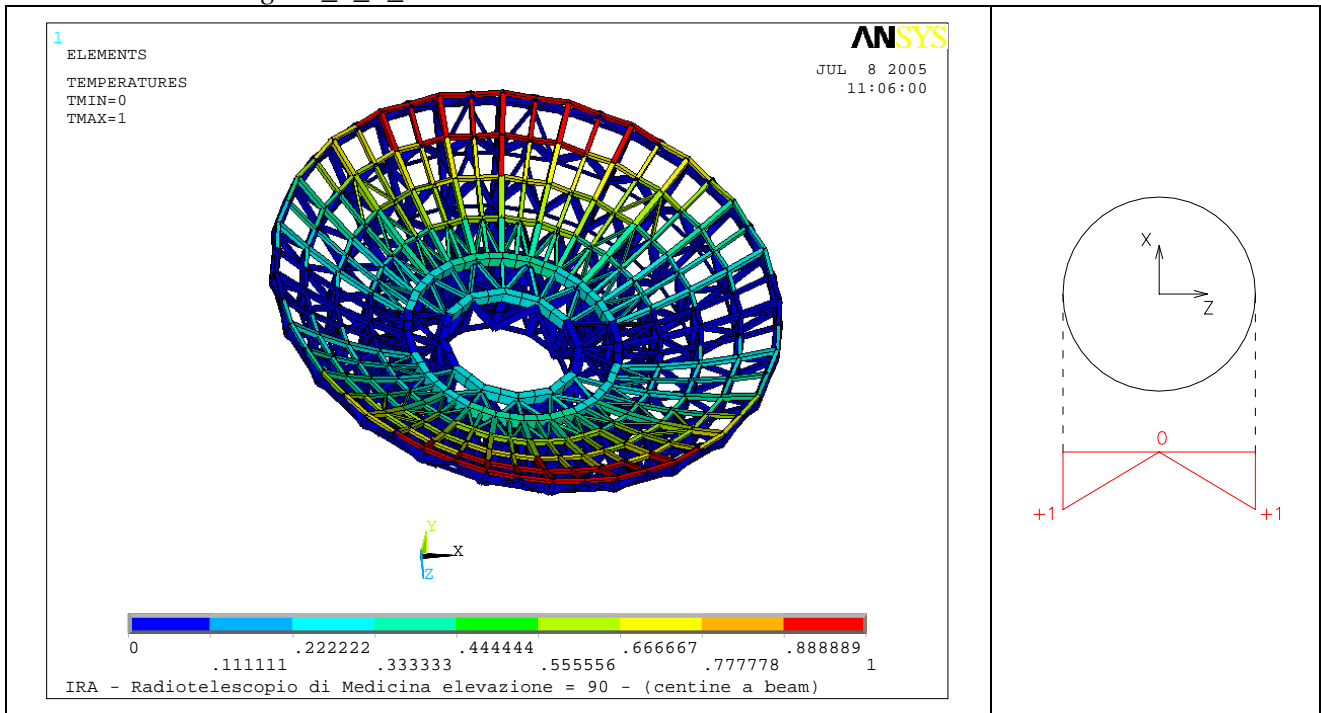


Figura 21: Modello FEM con distribuzione 3_Z_UP

Case 5.4 – FILE: “grad_4_Z_BOT”

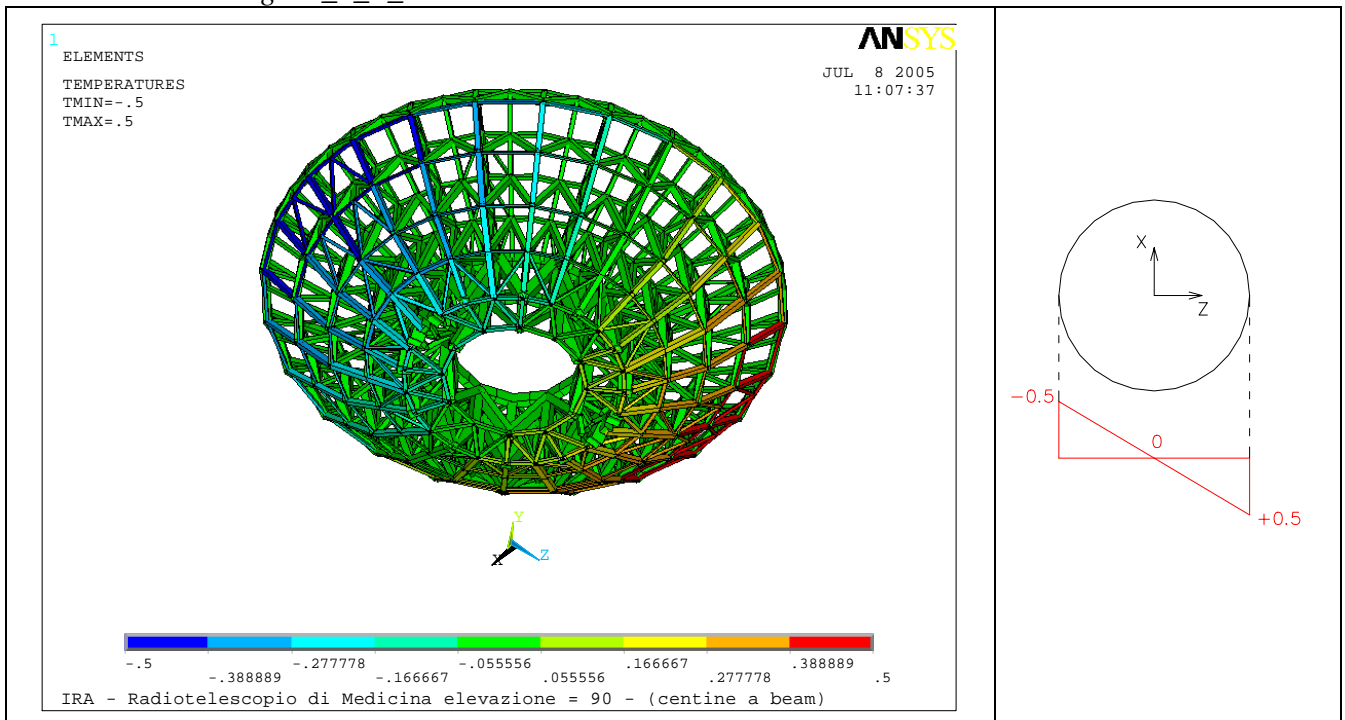


Figura 22: Modello FEM con distribuzione 4_Z_BOT

Case 5.5 – FILE: “grad_5_Z_BOT”

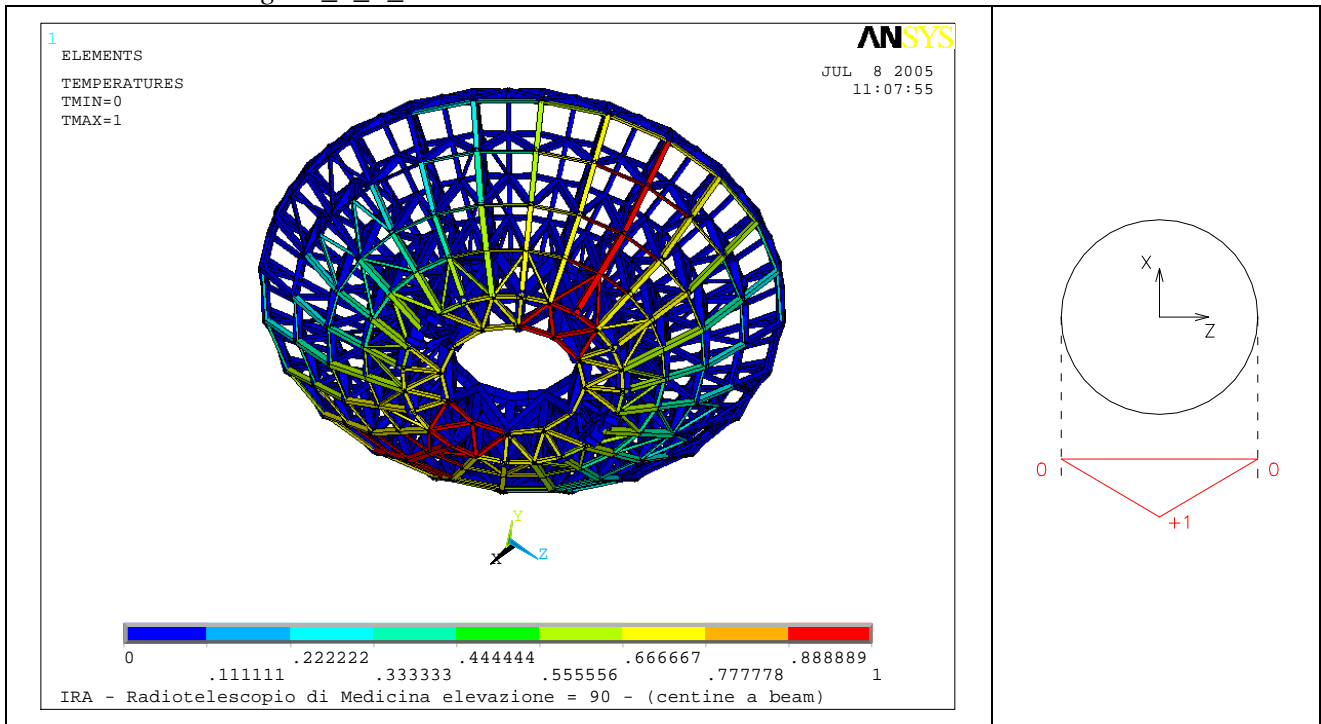


Figura 23: Modello FEM con distribuzione 5_Z_BOT

Case 5.6 – FILE: “grad_6_Z_BOT”

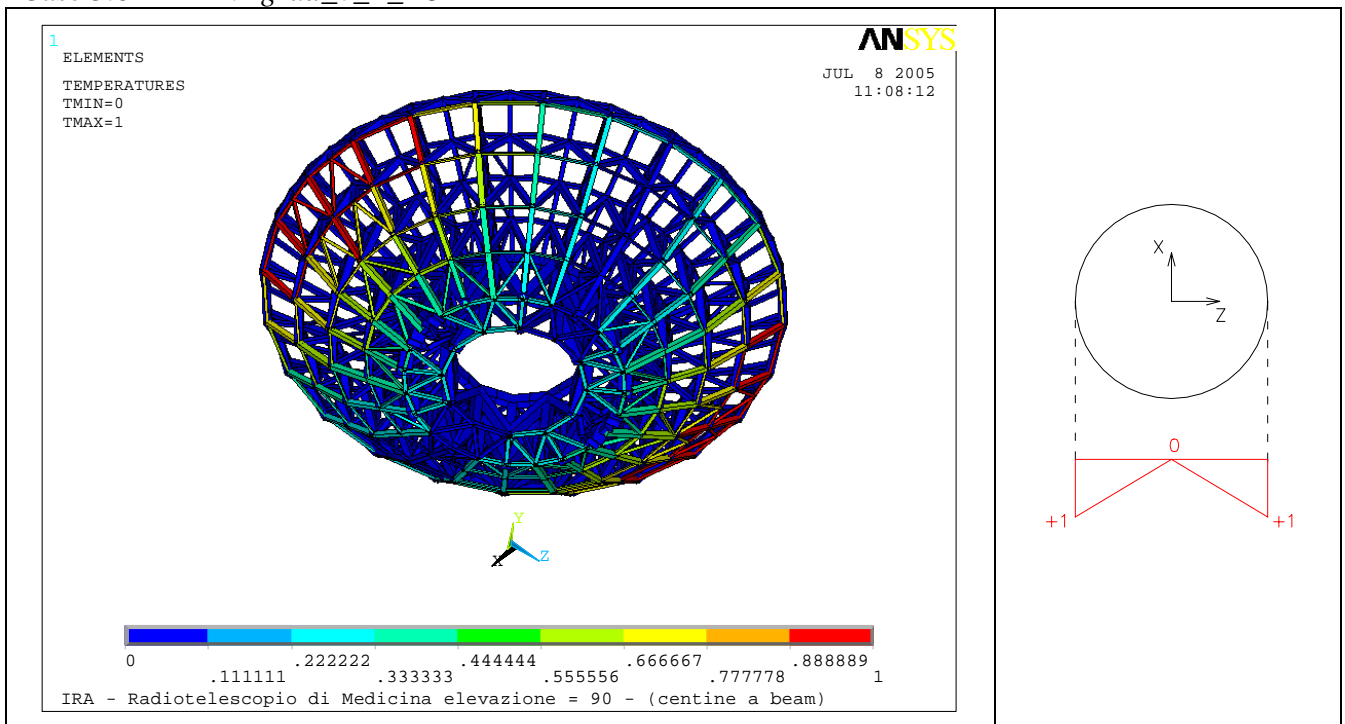


Figura 24: Modello FEM con distribuzione 6_Z_UP

Case 5.7 – FILE: “grad_7_X_UP”

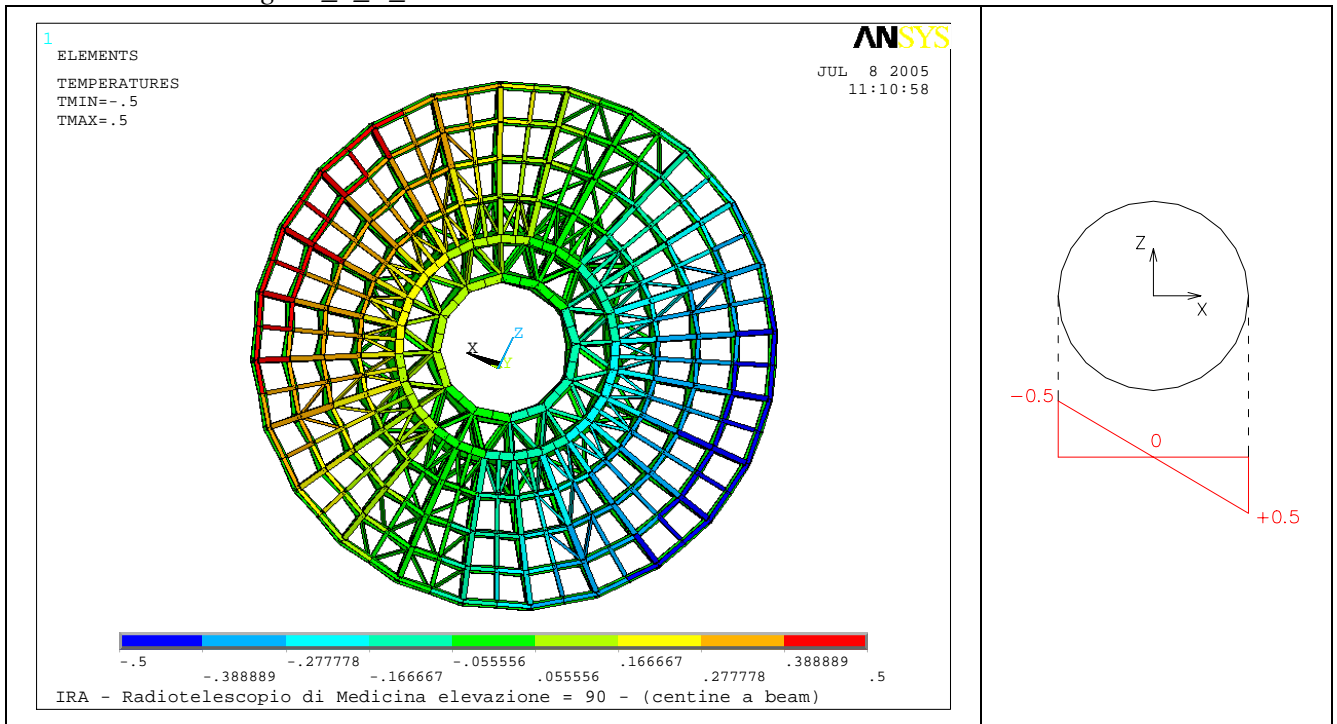


Figura 25: Modello FEM con distribuzione 7_X_UP

Case 5.8 – FILE: “grad_8_X_UP”

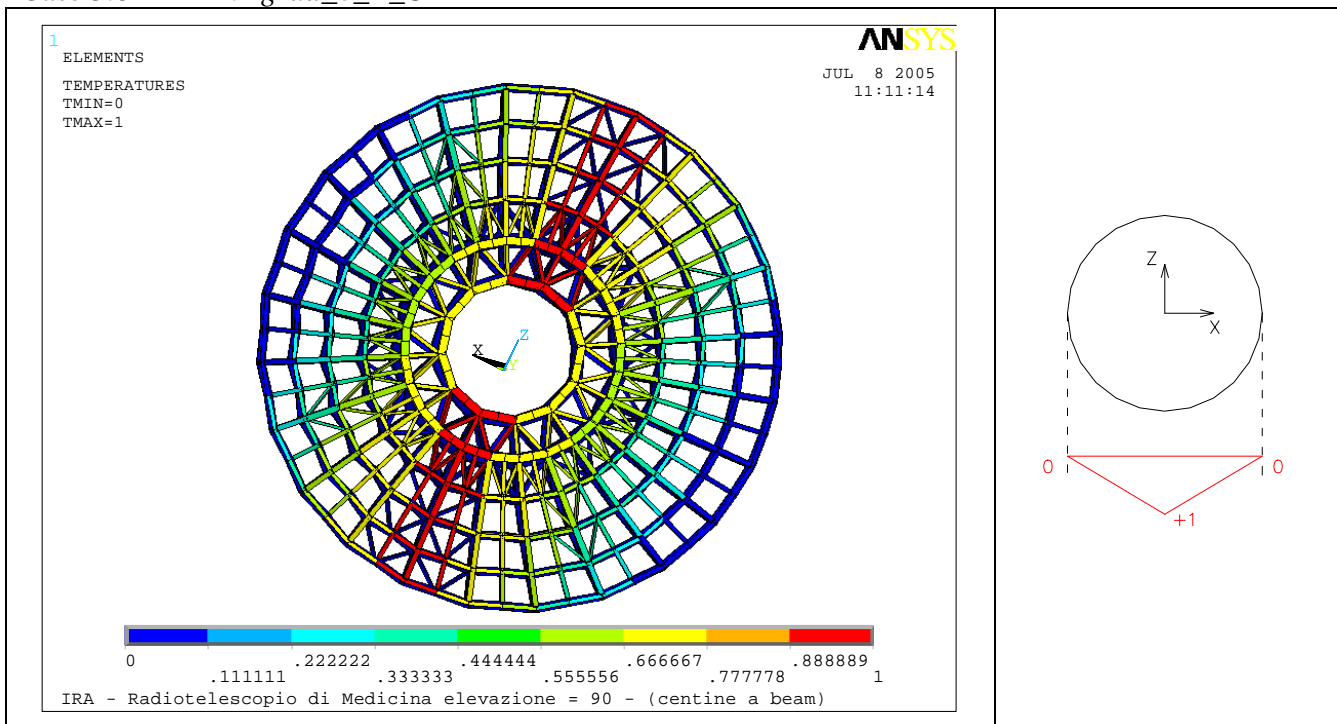


Figura 26: Modello FEM con distribuzione 8_X_UP

Case 5.9 – FILE: “grad_9_X_UP”

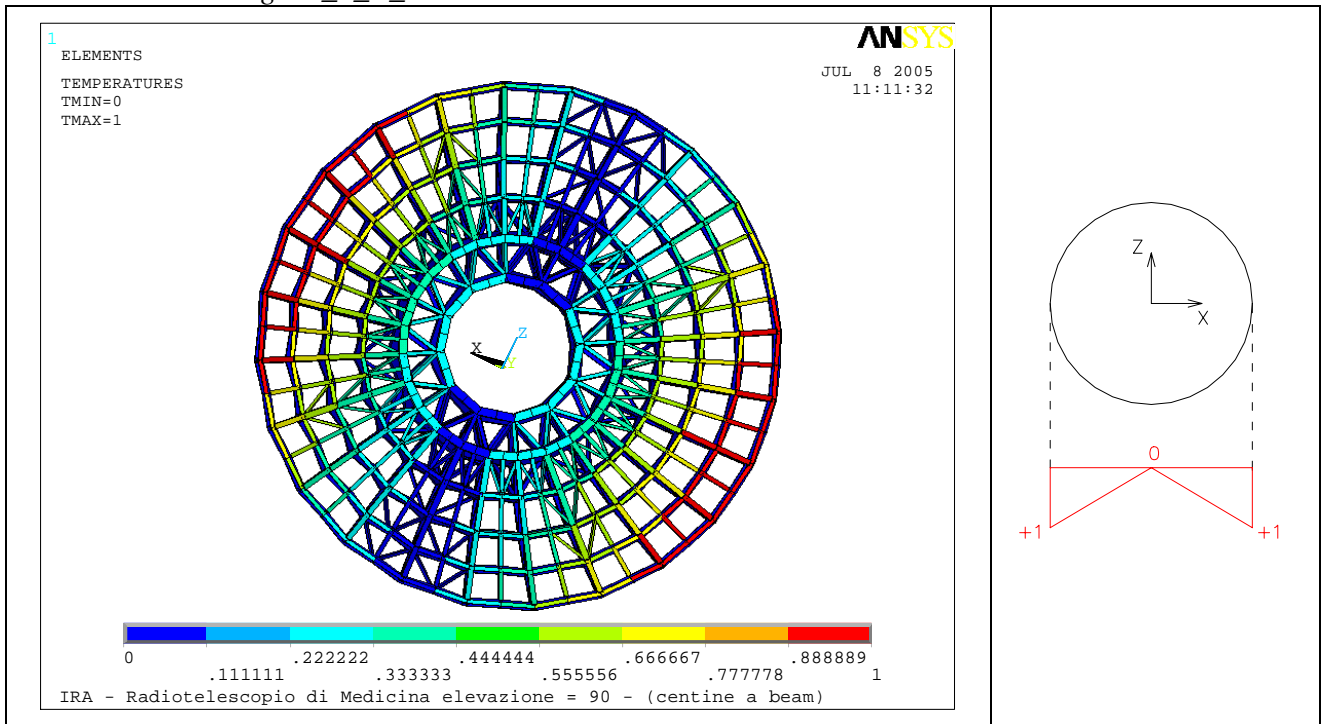


Figura 27: Modello FEM con distribuzione 9_X_UP

Case 5.10 – FILE: “grad_10_X_BOT”

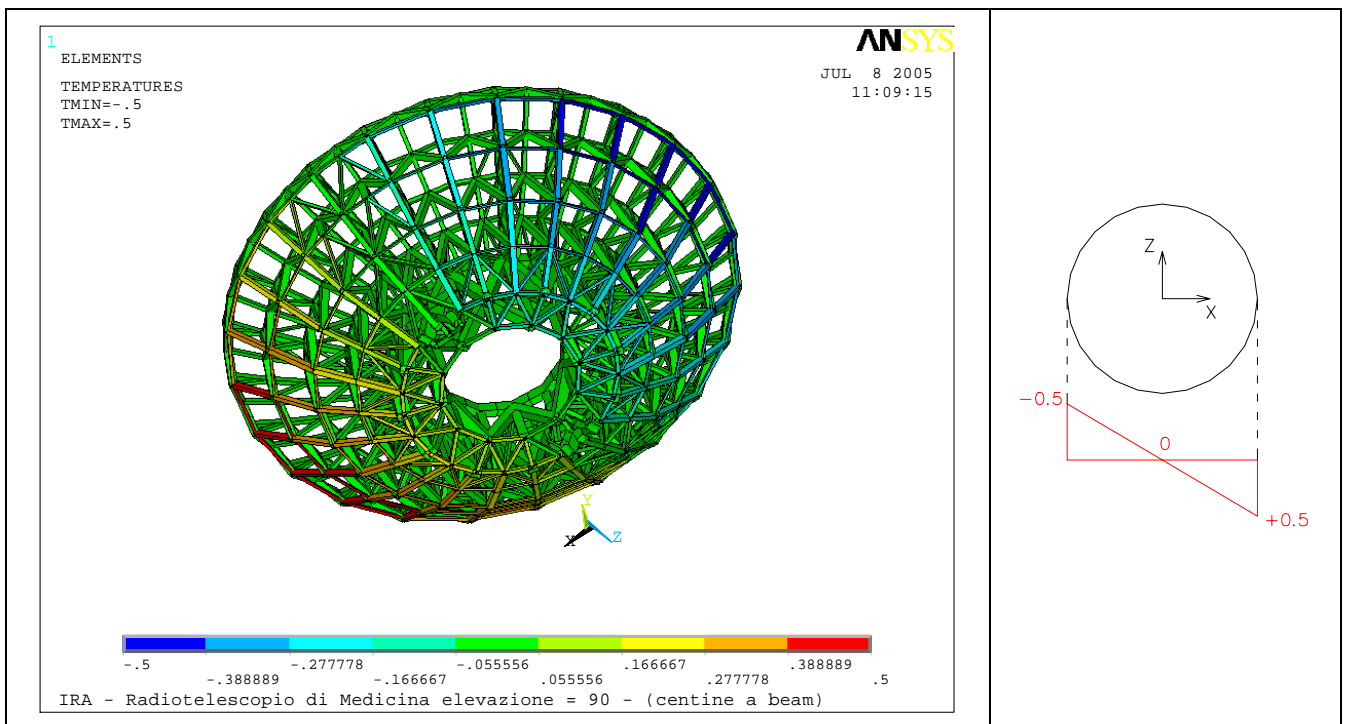


Figura 28: Modello FEM con distribuzione 10_X_BOT

Case 5.11 – FILE: “grad_11_X_BOT”

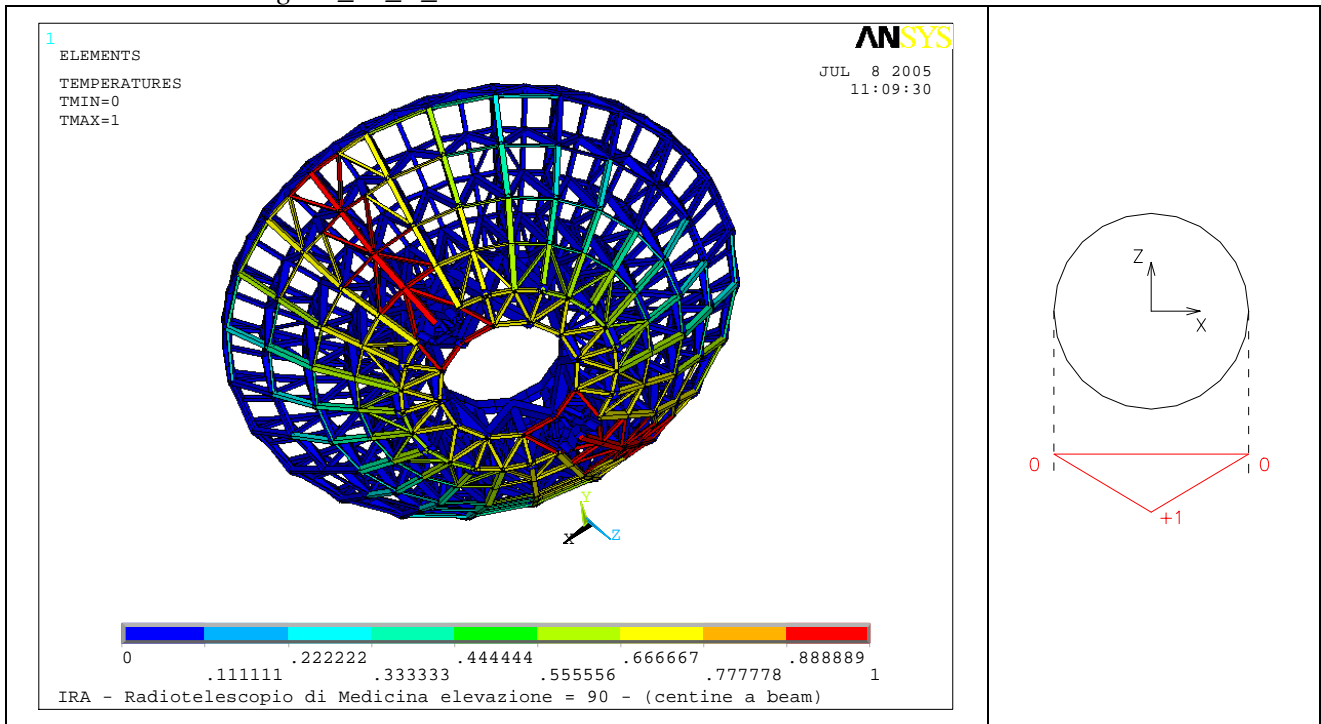


Figura 29: Modello FEM con distribuzione 11_X_BOT

Case 5.12 – FILE: “grad_12_X_BOT”

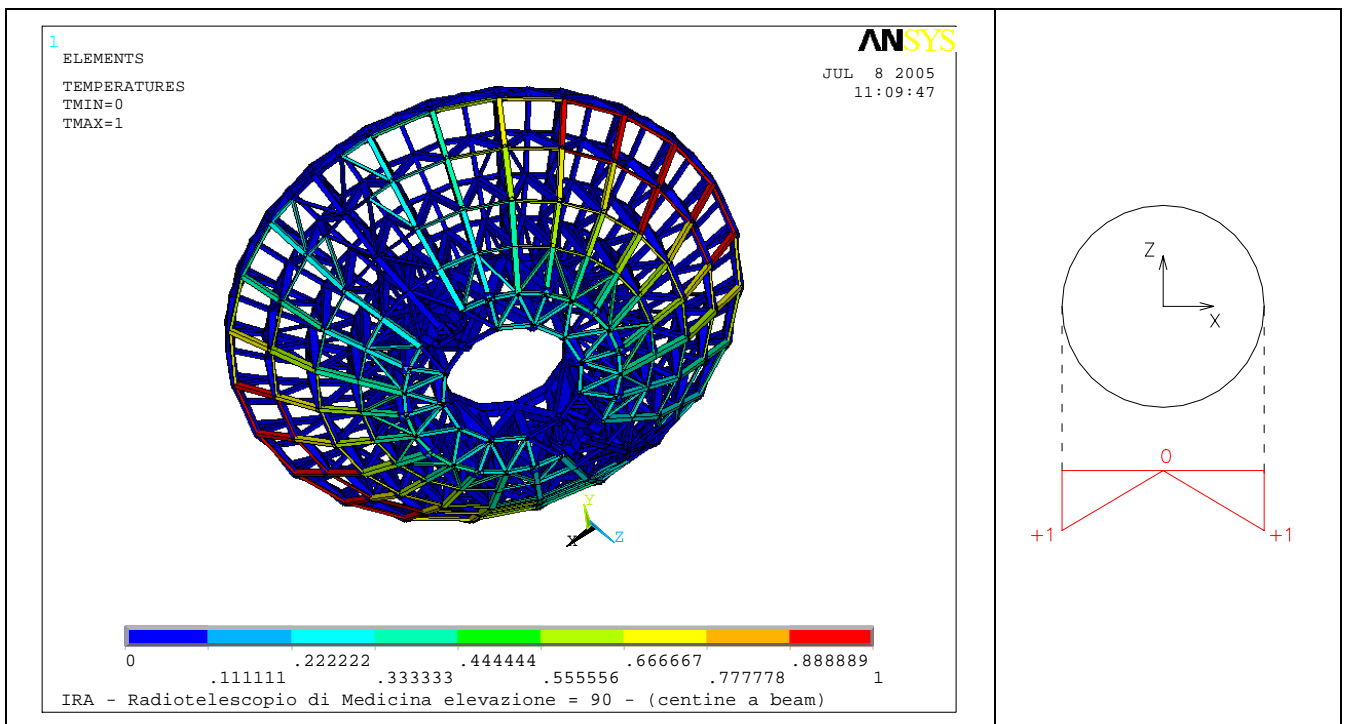


Figura 30: Modello FEM con distribuzione 12_X_BOT

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i risultati ottenuti per le 12 distribuzioni di temperatura.

Le tabelle 5, 6 e 7 sono relative all'utilizzo dei set-up dei sensori così come descritto nella sezione 2, ovvero la temperatura dei montanti e delle diagonali è stata calcolata come media tra la temperatura del corrente superiore e quella del corrente inferiore.

I risultati delle tabelle 8, 9 e 10 sono stati invece ottenuti senza considerare, sui montanti e sulle diagonali, il valore medio di temperatura esistente tra corrente superiore ed inferiore.

MEDIA

CASE	RMS [mm]	T4 [mm]	T4+4 [mm]	T8+8 [mm]	T8+8B [mm]	T12+ [mm]	T12+B [mm]
1	0.0247	0.0240	0.0277	0.0291	0.0251	0.0252	0.0269
2	0.0380	0.0312	0.0292	0.0327	0.0486	0.0378	0.0375
3	0.0491	0.0283	0.0317	0.0318	0.0548	0.0502	0.0520
4	0.0272	0.0250	0.0270	0.0300	0.0274	0.0278	0.0270
5	0.0393	0.0250	0.0300	0.0287	0.0514	0.0427	0.0411
6	0.0521	0.0250	0.0253	0.0256	0.0577	0.0493	0.0489
7	0.0249	0.0235	0.0294	0.0341	0.0255	0.0250	0.0264
8	0.0540	0.0312	0.0292	0.0327	0.0656	0.0557	0.0576
9	0.0481	0.0283	0.0317	0.0318	0.0467	0.0422	0.0451
10	0.0289	0.0250	0.0263	0.0285	0.0278	0.0284	0.0284
11	0.0563	0.0250	0.0300	0.0287	0.0637	0.0592	0.0551
12	0.0456	0.0250	0.0253	0.0256	0.0502	0.0439	0.0417

Tabella 5: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e le 6 configurazioni di set-up

CASE	T4	T4+4	T8+8	T8+8B	T12+	T12+B
1	0.014	0.011	0.010	0.011	0.006	0.007
2	0.036	0.033	0.035	0.018	0.011	0.012
3	0.045	0.027	0.030	0.018	0.010	0.011
4	0.011	0.010	0.011	0.006	0.006	0.012
5	0.030	0.034	0.036	0.021	0.014	0.013
6	0.047	0.038	0.040	0.019	0.013	0.013
7	0.013	0.013	0.011	0.011	0.006	0.007
8	0.048	0.034	0.028	0.022	0.013	0.013
9	0.043	0.036	0.032	0.018	0.009	0.011
10	0.011	0.008	0.009	0.012	0.006	0.006
11	0.053	0.044	0.042	0.017	0.013	0.013
12	0.039	0.040	0.037	0.020	0.013	0.013

Tabella 6: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e le 6 configurazioni di set-up
RMS della differenza tra la deformata "reale" e quella relativa allo schema dei sensori [mm]

CASE	T4	T4+4	T8+8	T8+8B	T12+	T12+B
1	-0.013	0.005	0.006	-0.005	-0.003	-0.003
2	0.031	0.010	0.012	0.008	-0.005	-0.004
3	0.025	-0.009	-0.012	0.008	0.005	-0.005
4	0.014	0.004	0.004	0.006	0.002	0.002
5	-0.019	-0.014	-0.012	0.006	0.005	0.005
6	-0.012	0.013	0.012	-0.006	0.005	0.005
7	-0.015	-0.006	-0.006	0.005	0.003	0.003
8	0.033	-0.011	0.011	-0.010	-0.005	-0.005
9	0.025	0.011	0.012	0.008	0.004	0.004
10	0.011	0.005	0.004	0.005	0.002	0.002
11	-0.022	-0.014	-0.012	0.008	-0.004	-0.005
12	-0.010	0.012	0.010	-0.007	0.005	0.006

Tabella 7: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e le 6 configurazioni di set-up
Massima differenza tra le due deformate [mm]

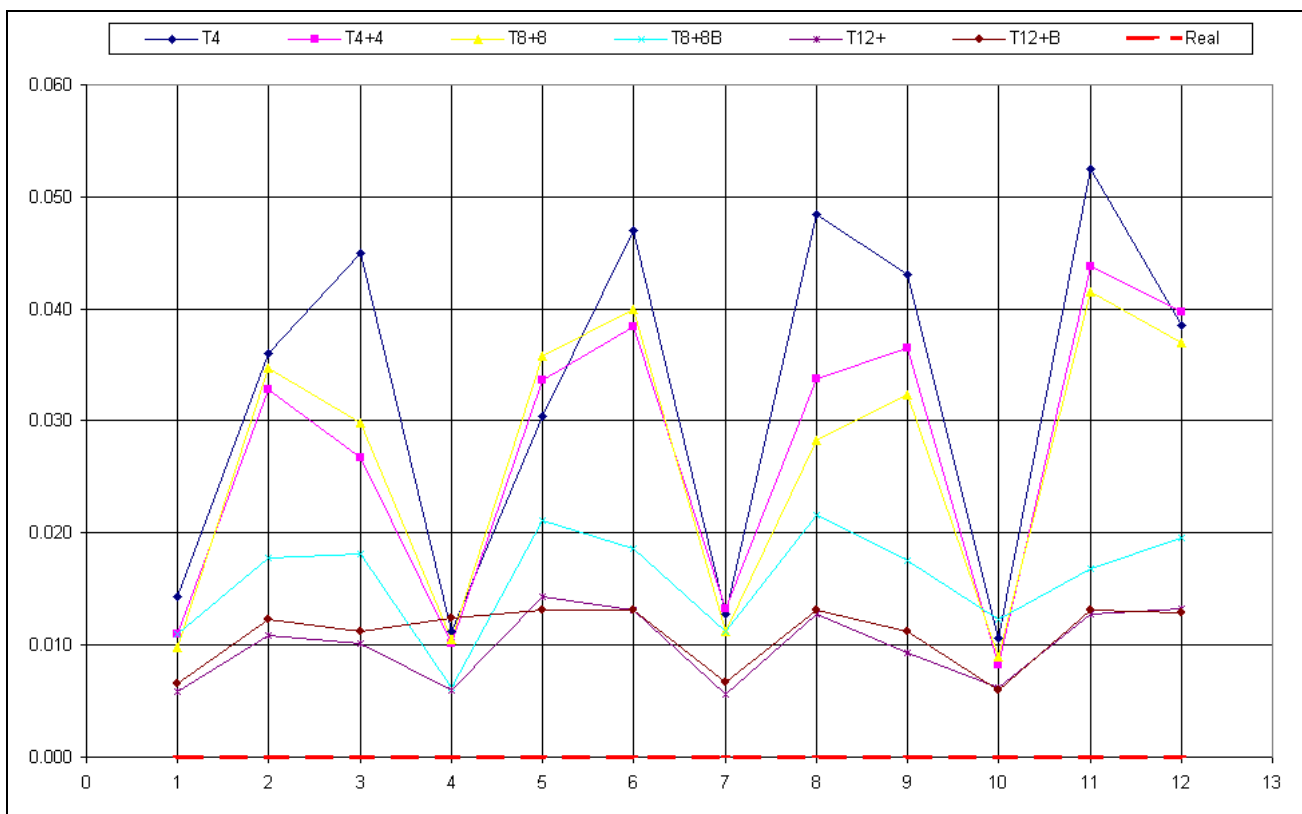


Figura 31: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e le 6 configurazioni di set-up
RMS della differenza tra la deformata "reale" e quella relativa allo schema dei sensori [mm]

NO MEDIA

CASE	RMS [mm]	T4 [mm]	T4+4 [mm]	T8+8 [mm]	T8+8B [mm]	T12+ [mm]	T12+B [mm]
1	0.0247	0.0240	0.0282	0.0290	0.0260	0.0249	0.0256
2	0.0380	0.0312	0.0310	0.0335	0.0480	0.0405	0.0386
3	0.0491	0.0283	0.0329	0.0276	0.0509	0.0495	0.0495
4	0.0272	0.0250	0.0292	0.0310	0.0290	0.0266	0.0281
5	0.0393	0.0250	0.0293	0.0302	0.0509	0.0404	0.0389
6	0.0521	0.0250	0.0260	0.0265	0.0643	0.0531	0.0497
7	0.0249	0.0235	0.0339	0.0353	0.0263	0.0249	0.0273
8	0.0540	0.0312	0.0310	0.0335	0.0611	0.0557	0.0572
9	0.0481	0.0283	0.0329	0.0276	0.0469	0.0475	0.0497
10	0.0289	0.0250	0.0283	0.0298	0.0289	0.0286	0.0290
11	0.0563	0.0250	0.0293	0.0302	0.0721	0.0612	0.0580
12	0.0456	0.0250	0.0260	0.0265	0.0526	0.0444	0.0414

Tabella 8: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e 6 configurazioni di set-up RMS della differenza tra la deformata “reale” e quella relativa allo schema dei sensori

CASE	T4	T4+4	T8+8	T8+8B	T12+	T12+B
1	0.014	0.011	0.010	0.010	0.004	0.005
2	0.036	0.029	0.030	0.015	0.006	0.008
3	0.045	0.029	0.030	0.014	0.007	0.008
4	0.011	0.010	0.010	0.013	0.005	0.005
5	0.030	0.036	0.039	0.019	0.011	0.010
6	0.047	0.036	0.039	0.020	0.012	0.011
7	0.013	0.013	0.011	0.011	0.005	0.006
8	0.048	0.035	0.032	0.015	0.008	0.008
9	0.043	0.035	0.032	0.015	0.007	0.008
10	0.011	0.009	0.009	0.012	0.005	0.005
11	0.053	0.041	0.037	0.019	0.012	0.011
12	0.039	0.041	0.037	0.019	0.011	0.011

Tabella 9: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e le 6 configurazioni di set-up RMS della differenza tra la deformata “reale” e quella relativa allo schema dei sensori [mm]

CASE	T4	T4+4	T8+8	T8+8B	T12+	T12+B
1	-0.013	0.005	0.006	-0.005	-0.003	-0.003
2	0.031	0.009	0.012	0.007	-0.004	-0.004
3	0.025	-0.009	-0.012	0.007	0.004	0.004
4	0.014	0.004	0.004	0.006	0.002	0.002
5	-0.019	-0.013	-0.012	0.006	-0.004	-0.004
6	-0.012	0.013	0.012	-0.006	0.004	0.004
7	-0.015	-0.005	-0.006	0.005	0.003	0.003
8	0.033	0.011	0.012	-0.004	-0.004	-0.008
9	0.025	0.011	0.012	0.008	0.004	0.004
10	0.011	0.004	0.004	0.006	0.002	0.003
11	-0.022	-0.013	-0.011	0.007	-0.005	-0.004
12	-0.010	0.013	0.011	-0.007	0.004	0.005

Tabella 10: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e le 6 configurazioni di set-up
Massima differenza tra le due deformate [mm]

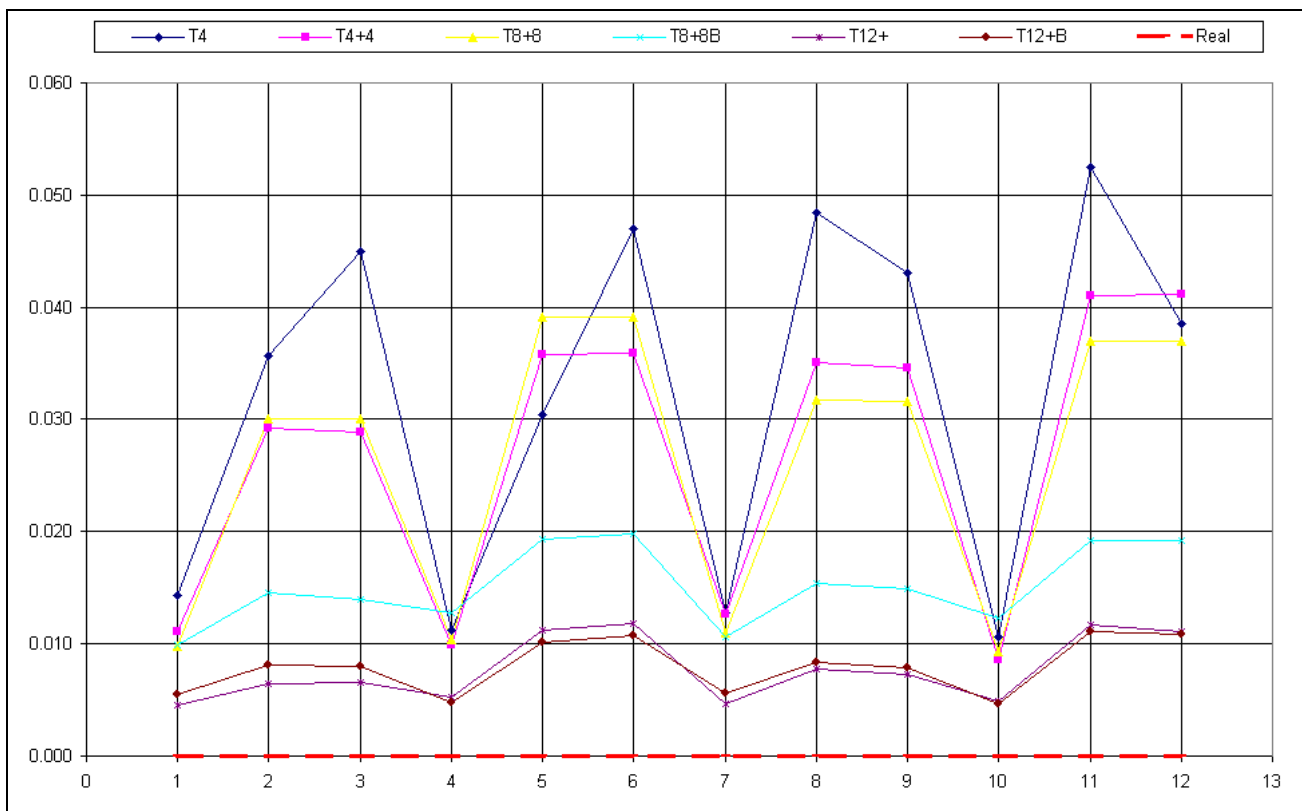


Figura 32: Confronto tra le 12 distribuzioni di temperatura e le 6 configurazioni di set-up
RMS della differenza tra la deformata "reale" e quella relativa allo schema dei sensori [mm]