



CALCOLO FEM DELLA ARMATURA APS/MV

LOCOMOTIVA E401



CODICE: B.20.93.018.00

EDIZIONE: A

Pag. 1 di 3

CONTROLLO EDIZIONE

EDIZIONE	MOTIVO	DATA
A	Edizione	13-06-2016

Eseguito da:

Nome: I. GONZÁLEZ

Firma:

Data: 13-06-2016

Verificato da:

Nome: A. BALDA

Firma:

Data: 13-06-2016

Approvato da:

Nome: A. BALDA

Firma:

Data: 13-06-2016



CALCOLO FEM DELLA ARMATURA APS/MV

LOCOMOTIVA E401



CODICE: B.20.93.018.00

EDIZIONE: A

Pag. 2 di 3

INDICE

1. ALLEGATI	3
-------------------	---



CALCOLO FEM DELLA ARMATURA APS/MV

LOCOMOTIVA E401

CODICE: B.20.93.018.00


EDIZIONE: A

Pag. 3 di 3

1. ALLEGATI

In allegato si presenta il calcolo FEM dell'armadio Trafofiltro.

Documento	Edizione	Data	Denominazione
Doc.SOLUTE T_ME_007_0006_IR_0002	00	09/06/2016	RISTRUTTURAZIONE ROTABILI. RELAZIONE DI CALCOLO FEM ARMATURA APS/MV LOCOMOTIVA TRENITALIA

	Identificazione T_ME_007_0006_IR_0001	Ed. 00	Pagina 1 di 65
	Relazione di Calcolo		


RISTRUTTURAZIONE ROTABILI

RELAZIONE DI CALCOLO FEM ARMATURA APS/MV LOCOMOTIVA TRENITALIA

Il presente documento è di proprietà di Trenitalia. Nessuna parte di questo documento può essere riprodotta, memorizzata, trasmessa in qualsiasi forma e/o con qualsiasi mezzo di registrazione salvo approvazione scritta di:

TRENITALIA S.p.A. – DIREZIONE TECNICA

Esp.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	09/06/2016	Prima edizione	C.Gonzalez / SOLUTE	P. Ruiz / SOLUTE	I. Rodríguez / SOLUTE

	Relazione di Calcolo
	ARMATURA ELETTRICA B.20.83.005, LOCOMOTIVA TRENITALIA

Indice

1. GENERALITÀ	5
1.1 Scopo	5
1.2 Giustificazione di Armatura APS1-MV1 con i risultati di Armatura APS2-MV2	6
2. RIFERIMENTI	7
2.1 Norme	7
2.2 Documenti	7
3. SIMBOLI E UNITÀ DI MISURA	8
4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	9
5. CASI DI CARICO DI DISEGNO E CRITERI DI ACCETTABILITÀ.....	10
5.1 Carichi statici	10
5.2 Carichi di fatica	10
5.3 Analisi d'impatto	12
5.4 Analisi d'invecchiamento simulato a livelli di vibrazioni aleatorie aumentate (Randome response – PSD).....	13
5.5 Verifica delle giunzioni saldate.....	15
5.5.1 Casi di carico statici.....	15
5.5.2 Casi di carico a fatica	15
6. REALIZZAZIONE DEL MODELLO FEM.....	16
6.1 Descrizione del modello FEM	19
6.2 Aplicación de masas en el modelo FEM	20
6.3 Applicazione delle condizioni di contorno al modello FEM	21
6.4 Sistemi di coordinate nel modello FEM	22
7. CASI DI CARICO	23
8. ANALISI DEI RISULTATI	25
8.1 Calcolo del materiale base (membrature). Casi di carico statici	25
8.1.1 LC1_E-X5_POS (Rif. A Tabella 11)	26
8.1.2 LC1_E-X5_NEG (Rif. B Tabella 11)	27

8.1.3 LC1_E-Y1_POS (Rif. C Tabella 11).....	28
8.1.4 LC1_E-Y1_NEG (Rif. D Tabella 11).....	29
8.1.5 LC1_E-Z1_POS (Rif. E Tabella 11).....	30
8.1.6 LC1_E-Z1_NEG (Rif. F Tabella 11)	31
8.2 Calcolo del materiale base (membrature), casi di carico a fatica (Rif. G,H,I,J,KeL Tabella 11)	32
8.3 Casi di carico d’impatto	35
8.3.1 SHOCK_X_POS (Rif. M Tabella 11).....	36
8.3.2 SHOCK_X_NEG (Rif. N Tabella 11)	37
8.3.3 SHOCK_Y_POS (Rif. O Tabella 11).....	38
8.3.4 SHOCK_Y_NEG (Rif. P Tabella 11).....	39
8.3.5 SHOCK_Z_POS (Rif. Q Tabella 11).....	40
8.3.6 SHOCK_Z_NEG (Rif. R Tabella 11).....	41
8.4 Prova d’invecchiamento, PSD (Rif. T Tabella 11).....	42
8.5 Calcolo delle Giunzioni saldate, casi di carico statici (Rif. A, B, C, D, E, F Tabella 11)	44
8.6 Calcolo delle Giunzioni saldate, casi di carico a fatica (Rif. G, H, I, J, K, L Tabella 11)	45
8.7 Reazioni nell'incastro dovute ai carichi statici.	48
9. RIEPILOGO DEI RISULTATI	51
10. CONCLUSIONI.....	52
ANNESSO A. Verifiche qualitative.....	53
A.1 Verifica delle reazioni.....	53
A.2 Equilibrio d’energia.....	53
A.3 Verifica dei modi propri di vibrazione.....	53
ANNESSO B. Mappa delle giunzioni saldate analizzate	54

1. GENERALITÀ

1.1 Scopo

Il presente documento descrive i calcoli ad elementi finiti (calcoli **FEM**) che sono stati eseguiti in conformità alle sezioni 9.1, 9.2, 8.3 e 8.2.25 della ST di **TRENITALIA (TI)** n.°**383601** ed alle normative **UNI EN 12663-1**, **UNI-EN 61373**, **ERRI B12 RP60**, per dimostrare il corretto dimensionamento strutturale relativo all'applicazione di nuove Apparecchiature/Arredi su Rotabili TI già in esercizio. In particolare in questa relazione di calcolo si è esaminata la nuova applicazione del armadio elettrico **APS** rappresentato nella Figura 1.

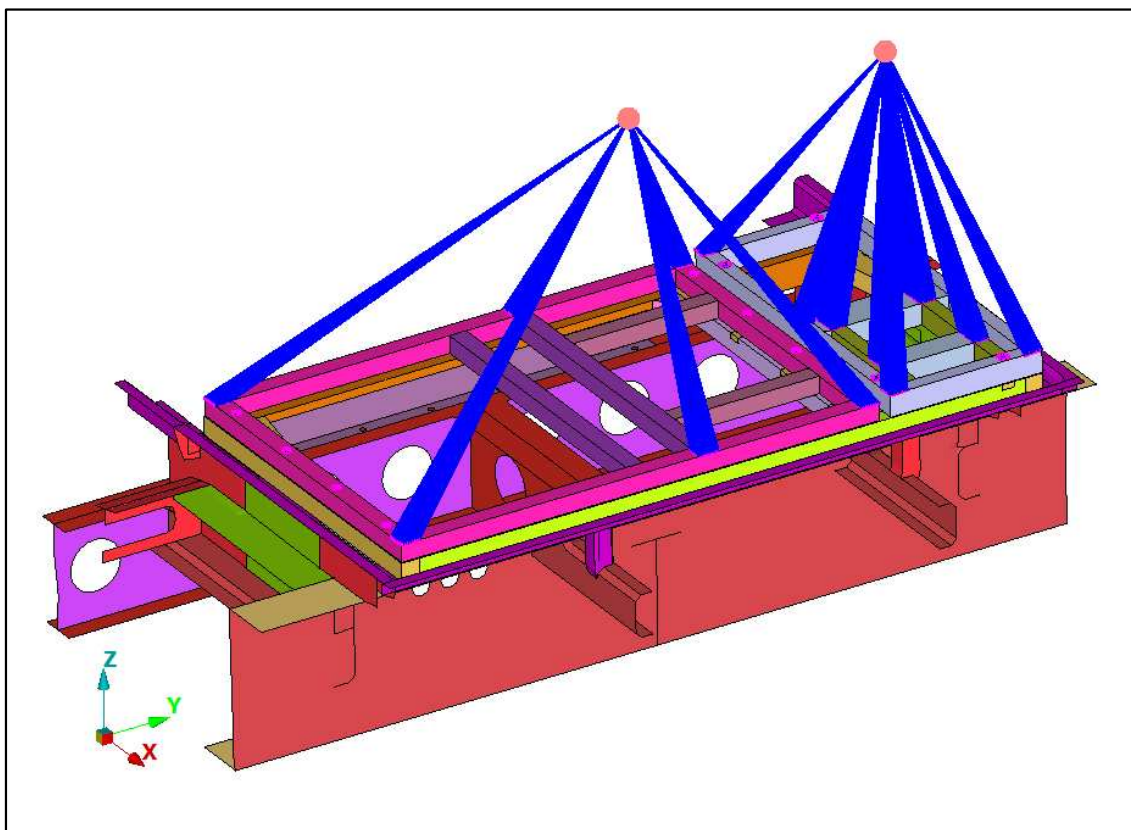


Figura 1 – Vista generale del modello.

1.2 Giustificazione di Armatura APS1-MV1 con i risultati di Armatura APS2-MV2

La struttura simmetrica per i componenti APS1 e MV1 è giustificata dal calcolo delle strutture APS2 MV2 di questo documento. Questo è dovuto al fatto che per la stessa condizione della posizione del centro di gravità, le strutture APS2 e MV2 sopportano carichi superiori.

Questa argomentazione si sviluppa in base ai dati di masse e centri di gravità delle attrezzature, proporzionati in base ai riferimenti locali.

		Massa (kg)	Centro di gravità (mm)		
			X	Y	Z
ARAMATURE APS1 / MV1	APS1	1554	442	823.3	749.34
	MV1	232	462.3	240.2	858.5
ARAMATURE APS2 / MV2	APS2	1583	443.3	835.4	873.1
	MV2	270	453.4	231.7	793


Tabla 1 – Condizioni di carico

I casi di carico dominanti sono l'accelerazioni in x e y, sia in statica, come in shock. Il parametro dominante è il momento sopra il livello di posizionamento dell'armatura. Questo momento viene determinato dall'altezza del centro di gravità e dal valore della massa. Questo momento rappresentativo (chiamato $M_{x/y}$) possiede due valori:

		$M_{x/y}$ (Nm)
ARMATURE APS1 / MV1	APS1	1164.5
	MV1	199.2
ARMATURE APS2 / MV2	APS2	1382.1
	MV2	214.1

Tabla 2 – Condizioni di carico

Si può verificare che nelle armature APS1/MV1 i valori di momento sono inferiori alle armature APS2/MV2, di conseguenza i valori di resistenza strutturale nelle armature APS1/MV1 saranno inferiori a quelli ottenuti dall'analisi delle armature PS2/MV2.

	Relazione di Calcolo
	ARMATURA ELETTRICA B.20.83.005, LOCOMOTIVA TRENITALIA

2. RIFERIMENTI

I Riferimenti si suddividono in Norme e Documenti, come di seguito elencato.

2.1 Norme

In tabella 1 sono indicate le Norme a cui si è fatto riferimento per l'esecuzione delle analisi strutturali e resistenti.

Rif.	Data	Denominazione	Autore
[1]	Ottobre 2010	UNI EN 12663-1 Applicazioni Ferroviarie - Requisiti Strutturali delle Casse dei Rotabili Ferroviari-Parte 1: Locomotive e materiale rotabile per passeggeri.	UNI
[2]	Agosto 2005	UNI EN 1993-1-8 Progettazione delle Strutture di Acciaio - Progettazione dei Collegamenti	UNI
[3]	Agosto 2005	UNI EN 1993-1-9 Progettazione delle Strutture di Acciaio - Progettazione a Fatica	UNI
[4]	12/07/2002	ST n.°373753 Specifica Tecnica per Coppie di Serraggio	TI
[5]	Ottobre 2010	CEI EN 61373 Materiale rotabile – Prove d'Urto e Vibrazione.	CEI
[6]	Giugno 2001	ERRI B12 RP60 Tests to demonstrate the strength of railways vehicles.	ERRI

Tabella 3 - Norme

2.2 Documenti

In Tabella 2 sono definiti i Documenti che vengono forniti a TI, insieme ai disegni di tutti gli insiemi e particolari e specifiche necessari per l'implementazione sul Rotabile delle modifiche di cui al precedente paragrafo 1.1:

Rif.	Data	Denominazione	Autore
[1]/...../.....	Plano n.° APS.00. _ Armadio LV1	CAF
[2]/...../.....	Plano n.° B.20.83.016.00. _ Assieme di carpenteria LV1	CAF

Tabella 4 - Documenti

La suddetta documentazione deve essere conforme al par.2.2 della **ST n.°383601**.

3. SIMBOLI E UNITÀ DI MISURA

A) Di seguito si elenca la descrizione del significato dei simboli utilizzati in questo documento:

σ_{VonMises}	Tensione Von Mises calcolata con analisi ad elementi finiti;
σ_{VMtrue}	Tensione di Von Mises calcolata tramite un'analisi ad elementi finiti, e corretta secondo il criterio di Neuber.
$\sigma_{0.2}$	Tensione minima di snervamento
σ_R	Tensione minima a rottura
σ_{adm}	Tensione ammissibile per materiale base o saldato per carichi statici
$\Delta\sigma_{\text{princ}}$	Delta tensione principale calcolata con analisi ad elementi finiti
σ_{Nmax}	Tensione principale massima ammissibile a fatica per un particolare giunto o per materiale base
$\sigma_{\text{princ_max}}$	Tensione principale massima di trazione del ciclo di fatica di ampiezza $\Delta\sigma_{\text{princ}}$ calcolata con analisi ad elementi finiti
$\sigma_{\text{princ_min}}$	Tensione principale minima di trazione del ciclo di fatica con ampiezza $\Delta\sigma_{\text{princ}}$, calcolata tramite un'analisi ad elementi finiti
$\Delta\sigma_N$	Delta Tensione ammissibile a fatica, per un particolare giunto o per materiale base per numero di cicli - $N_{\text{Acc}}=2 \times 10^6$ (Acciaio);
$\Delta\sigma_{\text{axial}}$	Delta di tensione assiale nel corpo del bullone.
$\Delta\tau$	Delta di tensione tangenziale nel corpo del bullone.
g	Accelerazione di gravità
E	Modulo di elasticità normale
G	Modulo di elasticità tangenziale
ν	Modulo di Poisson

B) Come unità di misura e sistemi di riferimento, quando non specificato diversamente, s'intendono i seguenti:

- Lunghezza : m
- Tempo : s
- Forza : N
- Tensioni : N/m²
- Massa : kg

4. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Le diverse parti modificate della struttura della armatura elettrica, sono state realizzate in **Acciaio S355**, con lo scopo di usare, come richiesto, (Vedi il capitolo 4 della IT n.° 383601) lo stesso materiale della struttura originale. Le principali caratteristiche dei materiali dell'armatura elettrica, sono indicate nella Tabella 5:

Rif.	NORMA DI RIFERIMENTO	TIPO DI MATERIALE	Utilizzo	SPESSORE	METALLO BASE		CARATTERISTICHE
				e [mm]	$\sigma_{0.2}$ (N/mm ²)	σ_R (N/mm ²)	
1	EN10025-	S355J2WP	Chapas	e<3 3≤e≤16	355 355	510 470	E = 210000 N/mm ² G = 80000 N/mm ² $\nu = 0,3$ $\rho = 7,85 \times 10^{-6}$ kg/mm ³
2	EN10210	S355J2H	Perfiles	e<3 3≤e≤16	355 355	510 470	E = 210000 N/mm ² G = 80000 N/mm ² $\nu = 0,3$ $\rho = 7,85 \times 10^{-6}$ kg/mm ³

Tabella 5 - Caratteristiche dei materiali impiegati per la struttura dell'Armatura Elettrica.

5. CASI DI CARICO DI DISEGNO E CRITERI DI ACCETTABILITÀ

Considerando le varie tipologie di condizioni di carico che le norme vigenti richiedono di verificare, si elencano di seguito i criteri d'accettabilità utilizzati nei calcoli.

5.1 Carichi statici

Si considereranno i casi di carico statici indicati nella EN12663 nel paragrafo 6.5.2 per un veicolo tipo "L", anche se nel caso orizzontale l'accelerazione è aumentata fino a 5g (è il caso più sfavorevole), ovvero:

- 1) E-X5 (Tabella 13 norma UNE-EN_12663-1), $\pm 5g$ orizzontale combinato con $+ 1g$ verticale.
- 2) E-Y1 (Tabella 14 norma UNE-EN_12663-1), $\pm 1g$ trasversale combinato con $+ 1g$ verticale
- 3) E-Z1 (Tabella 15 norma UNE-EN_12663-1), $(1 \pm c)g$ verticale con $c= 1.25$

I valori delle tensioni σ_c calcolate per tutti i casi di carico, devono soddisfare la condizione:

$$\sigma_c \leq \sigma_{adm}$$

Utilizzando la tensione ammissibile del materiale con la seguente formula:

$$\sigma_{adm} = \sigma_{0.2} / 1.15$$

Il materiale utilizzato per la modellizzazione FEM segue un comportamento lineare. Per valori superiori al limite elastico, è possibile usare la correzione di Neuber come metodo di verifica. Questa correzione si basa sulla legge di Neuber e nell'uso dei diagrammi di Ramberg-Osgood. Il criterio di utilizzazione consiste nel fatto che la zona tensionale influenzata sia minima, vicina al 10% della sezione resistente delle strutture considerate, ed inoltre i valori delle tensioni dovranno essere vicini alla tensione di snervamento.

Si permette la presenza di zone con concentrazioni di tensioni locali che superano la tensione di snervamento del materiale, queste zone con deformazioni plastiche locali dovranno essere sufficientemente piccole per non causare deformazioni permanenti rilevanti e permettere la redistribuzione delle tensioni nelle suddette zone.

5.2 Carichi di fatica

Si applicano alla struttura i casi di carico indicati nella EN 12663 nei paragrafi 6.6.4 e 6.6.6 per un veicolo tipo "L", ovvero:

- 1) F-Y015 (Tabella 16 norma UNE-EN_12663-1), $\pm 0.2g$ trasversale.
- 2) F-Z015 (Tabella 17 norma UNE-EN_12663-1)), $1 \pm 0.25g$ verticale.
- 3) F-X015 (Tabella 18 norma UNE-EN_12663-1), $\pm 0.15g$ orizzontale.

Lo stato tensionale della struttura degli armadi corrispondenti ai sei casi di carico descritti precedentemente si risolvono con un calcolo statico lineare realizzato con Abaqus Standard 6.13.4.

Per la verifica a fatica dell'integrità strutturale i due criteri che devono essere soddisfatti saranno qui sotto elencati.

$$\Delta\sigma_{princ} \leq \Delta\sigma_N$$

$$\sigma_{princ_max} \leq \sigma_{N\ max}$$

I valori dei ranghi di tensioni $\Delta\sigma_{princ}$ e la tensione σ_{princ_max} devono essere calcolati utilizzando il metodo descritto nel Rif. [6], che si riassume qui di seguito.

- 1) Per ogni caso di carico si determina il tensore delle tensioni e la tensione principale massima in ogni nodo.
- 2) Ottenuti questi valori, è possibile determinare la maggiore delle massime tensioni principali in ogni nodo tra tutti i tensori corrispondenti ai casi di carico (l'involvente dei casi di carico a fatica) e di conseguenza la direzione principale associata.
- 3) In ogni nodo si ottiene la proiezione dei tensori delle tensioni (per ogni caso di carico) sulla direzione principale massima ottenuta in ogni nodo.
- 4) Dalla proiezione di questo nuovo tensore di tensioni, si seleziona la minore delle tensioni principali minime, che assieme alla tensione principale massima del punto 1), determina il rango delle tensioni.

Con questo procedimento si otterrà in ogni nodo un rango ed un valore di tensioni che, concordando con il Rif. [6], non deve superare i limiti specificati. In ogni nodo si dovrà soddisfare la condizione:

$$\Delta\sigma_{princ} = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

$$\sigma_{princ_max} \leq \sigma_{max}$$

Nel caso di materiali in acciaio conformi alla norma **UNI EN 10025-2**, i valori: $\Delta\sigma_N = 2\sigma_{Alim}$ e $\sigma_{Nmax} = \sigma_{maxlim}$, sono quelli indicati per il valore di $K=0,2$ nella tabella qui di seguito ([6]).

	$2\sigma_{Alim}$ (N/mm)		σ_{mlim} (N/mm ²)				σ_{maxlim} (N/mm ²)			
			K=0.2		K=0.3		K=0.2		K=0.3	
Acciaio	370	520	370	520	370	520	370	520	370	520
Categoria Dettaglio										
160	120	160	200	300	185	267	240	360	240	347
112	112	112	182	273	168	187	218	327	218	243
100	100	100	182	250	167	167	218	300	217	217
90	90	90	182	225	150	150	218	270	195	195
80	80	80	182	200	133	133	218	240	173	173
71	71	71	178	178	118	118	214	214	153	153
50	50	50	125	125	83	83	150	150	108	108
36	36	36	90	90	60	60	108	108	78	78

Tabella 6 – Valori per $2\sigma_{Alim}$, σ_{maxlim} secondo la categoria del dettaglio presente nel rif. [6].

Il valore che si utilizza per la verifica è il limite a fatica per **2 milioni di cicli** con possibilità di sopravvivenza $\geq 97,5\%$.

Si dovranno verificare separatamente il materiale base e quello saldato. Nel caso del materiale base, la categoria del dettaglio selezionabile sarà il 160 (DC160 secondo **UNI EN 1993-1-8**). Il materiale d'apporto della saldatura, seguirà le specificazioni del paragrafo 5.6.2.

5.3 Analisi d'impatto

La struttura sarà sottoposta a una sequenza d'impulsi semi-sinusoidali, ognuno di una durata D ed una ampiezza nominale di cresta A . Questi valori vengono raccolti nella norma EN61373:2010, tabella 3 per apparecchiature montate sulla locomotiva di classe A (Vedi rif. [5]).

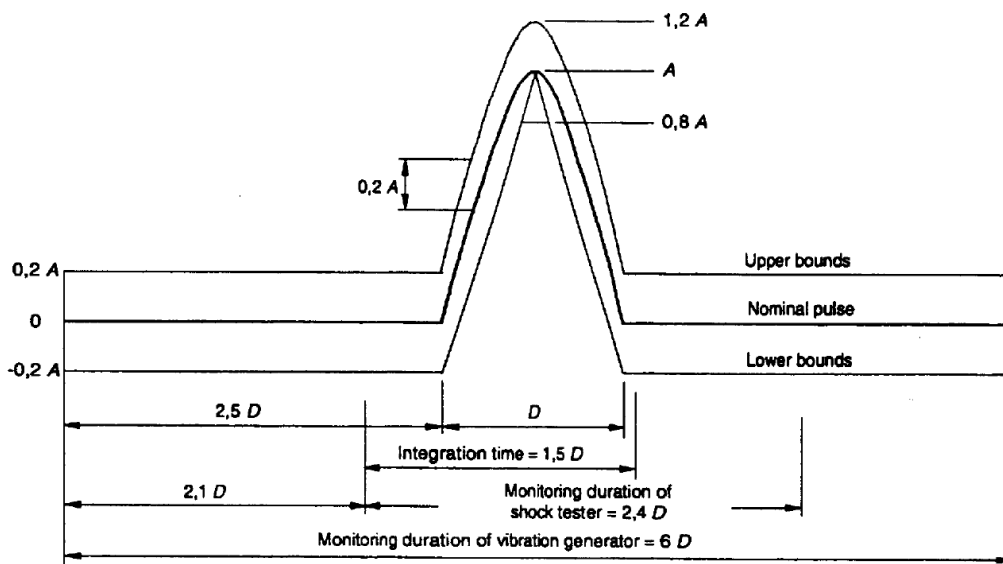


Figura 2 – Forma d'impulso semi-sinusoidale di durata nominale D e d'ampiezza nominale A .

Category	Orientation	Peak acceleration A (m/s ²)	Nominal duration D (ms)
1 Class A and class B Body mounted	Vertical	30	30
	Transverse	30	30
	Longitudinal	50	30
2 Bogie mounted	All	300	18
3 Axle mounted	All	1 000	6

NOTE – Some category 1 equipment intended for specific applications may require additional shock testing with peak accelerations A of 30 m/s² and duration D of 100 ms. In such cases these test levels should be requested and agreed prior to testing.

Figura 3 – Limiti di tolleranza per impulsi semi-sinusoidali.

I casi di carico si studiano tramite un calcolo dinamico non lineare realizzato con Abaqus Explicit 6.13.4.

L'analisi dei risultati dei casi di carico precedenti si realizzerà seguendo gli stessi criteri impiegati nei casi di carico statici.

5.4 Analisi d'invecchiamento simulato a livelli di vibrazioni aleatorie aumentate (Random response – PSD)

L'obiettivo è riprodurre tramite FEM, la prova d'invecchiamento simulato presente nella norma EN61373:2010 (Vedi rif. [4]). L'apparecchiatura si sommette a una prova di 5h per ogni asse con i livelli ASD specificati nella norma antecedente. Si raccolgono i livelli ASD e la gamma di frequenze per il funzionamento dell'apparecchiatura in servizio.

L'equivalenza con la prova delle 5h accelerata equivale a una vita utile di una carrozza di 25 anni (300giorni/anno e 10h/giorno).

La grafica sottostante mostra la distribuzione delle curve ASD.

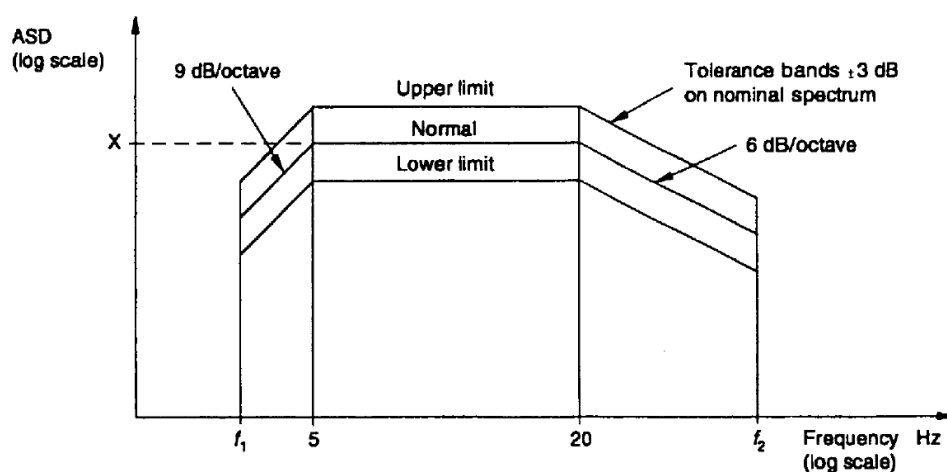



Figura 4 - Curva – Spettro ASD in funzione della frequenza

	Relazione di Calcolo
	ARMATURA ELETTRICA B.20.83.005, LOCOMOTIVA TRENITALIA

Quando la massa é: $\leq 500kg$ $f_1 = 5Hz$ $f_2 = 150Hz$

Quando la massa é: $> 500kg \leq 1250kg$ $f_1 = \frac{1250}{masa} \times 2Hz$ $f_2 = \frac{1250}{masa} \times 60Hz$

Quando la massa é: $> 1250kg$ $f_1 = 2Hz$ $f_2 = 60Hz$

Il livello di ASD per ognuna delle accelerazioni della prova d'invecchiamento secondo il Rif.[5] si mostrano nella tabella di seguito.

	Vertical	Transverse	Longitudinal
Functional Test ASD Level (m/s ²) ² /Hz	0.0166	0.0041	0.0073
RMS value m/s ² 2 Hz to 150 Hz	0.750	0.370	0.500
Long Life Test ASD Level (m/s ²) ² /Hz	0.532	0.131	0.234
RMS value m/s ² 2 Hz to 150 Hz	4.25	2.09	2.83
NOTE 1 – For items with test frequencies less than 2 Hz the r.m.s. levels will be higher than those quoted above.			
NOTE 2 – For items with test frequencies less than 150 Hz the r.m.s. levels will be lower than those quoted above.			
NOTE 3 – If frequencies above f_2 are known to exist they may be included, the amplitude being established by extending the 6 dB/octave decay line until it intersects the maximum frequency required. In such cases the r.m.s. levels will be increased.			

Tabella 7 – Categoria 1 –Classe A – Apparecchiature montate nella cassa della carrozza – Spettro ASD.

La procedura di calcolo con gli Elementi Finiti è la successiva: si calcola con ABAQUS l'analisi modale, ed il Steady State Dynamics per determinare le funzioni trasformate nel dominio delle frequenze. L'elaborazione dei risultati si realizza con il programma FE-SAFE, applicando in contemporanea tutte e tre le eccitazioni. Internamente il software calcola i ranghi delle tensioni e le relaziona con i ranghi delle tensioni ammissibili (curva S-N del materiale) per il dettaglio più restrittivo (materiale della saldatura).

I risultati ottenuti si rappresentano in forma di danni, verificando che il valore dello stesso sia inferiore all'unità.

5.5 Verifica delle giunzioni saldate

5.5.1 Casi di carico statici

Per realizzare la verifica delle giunzioni saldate soggette a casi di carico statici, in base all'Eurocodice si devono compiere due requisiti:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3 (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0.5} \leq f_u / (\beta_w \gamma_{M2}) \quad \sigma_{\perp} \leq f_u / \gamma_{M2}$$

Dove:

f_u è la tensione ultima nominale della membratura più debole della giunzione.

σ_{\perp} è la tensione normale perpendicolare alla sezione di gola

τ_{\perp} è la tensione tangenziale (al piano della sezione di gola) perpendicolare all'asse del cordone di saldatura

τ_{\parallel} è la tensione tangenziale (al piano della sezione di gola) parallela all'asse del cordone di saldatura

β_w è il fattore appropriato di correzione preso dalla tabella 4.1 rif [5].

I valori delle tensioni si ottengono con il seguente procedimento:

- 1) Si analizzano i valori dei carichi (forze e momenti) che passano per la saldatura, che viene rappresentata nel modello FEM da nodi comuni alle due membrane della giunzione. I carichi si determinano nel centro geometrico della giunzione saldata.
- 2) Si distribuiscono elasticamente gli sforzi del centro geometrico tra tutte le sezioni dei cordoni di saldatura proiettati sul piano che contiene la giunzione.
- 3) Si determinano le tensioni nei punti estremi, e si riportano al piano originale, concordando con le indicazioni del Rif. [3]
- 4) Si verificano le relazioni indicate precedentemente.

Questo procedimento è stato svolto per ottenere le tensioni delle nove unioni saldate più sollecitate (vedi annesso B) negli stati tensionali corrispondenti. Per questo nove gruppi di unioni saldate si sono svolte le verifiche precedentemente descritte. Una volta che queste nove unioni abbiano superato i requisiti di verifica, si può giustificare che le restanti unioni saldate meno sollecitate, siano verificate con gli stessi requisiti di resistenza.

5.5.2 Casi di carico a fatica

Per la verifica della saldatura a fatica, si deve implementare lo stesso procedimento descritto nel paragrafo 5.2. Per le giunzioni saldate la categoria del dettaglio che si deve utilizzare sarà la: 36 (DC36 secondo Rif. [2]).

I risultati delle giunzioni saldate per il caso d'invecchiamento simulato (Random response – PSD) si analizzeranno con il criterio del Danno accumulato (regola di Palmgren-Miner) partendo dai risultati ottenuti nelle tre prove simulate, e considerando la stessa curva tensioni-cicli: DC36.

6. REALIZZAZIONE DEL MODELLO FEM

Il modello ad elementi finiti si è sviluppato partendo dalla geometria 3D del armatura elettrica **APS**. Il codice usato per la realizzazione del modello numerico è stato **Hypermesh 13** e quello impiegato per i calcoli FEM è stato **ABAQUS 6.13-4**.

Il modello risultante presenta i seguenti tipi e quantità d'elementi finiti e nodi:

Elemento/Nodo	Numero
Quadr.	85649
Triang.	863
Esag.	43447
Nodi	191555

Tabella 8. – Riassunto dei elementi presenti nel modello.

Nella

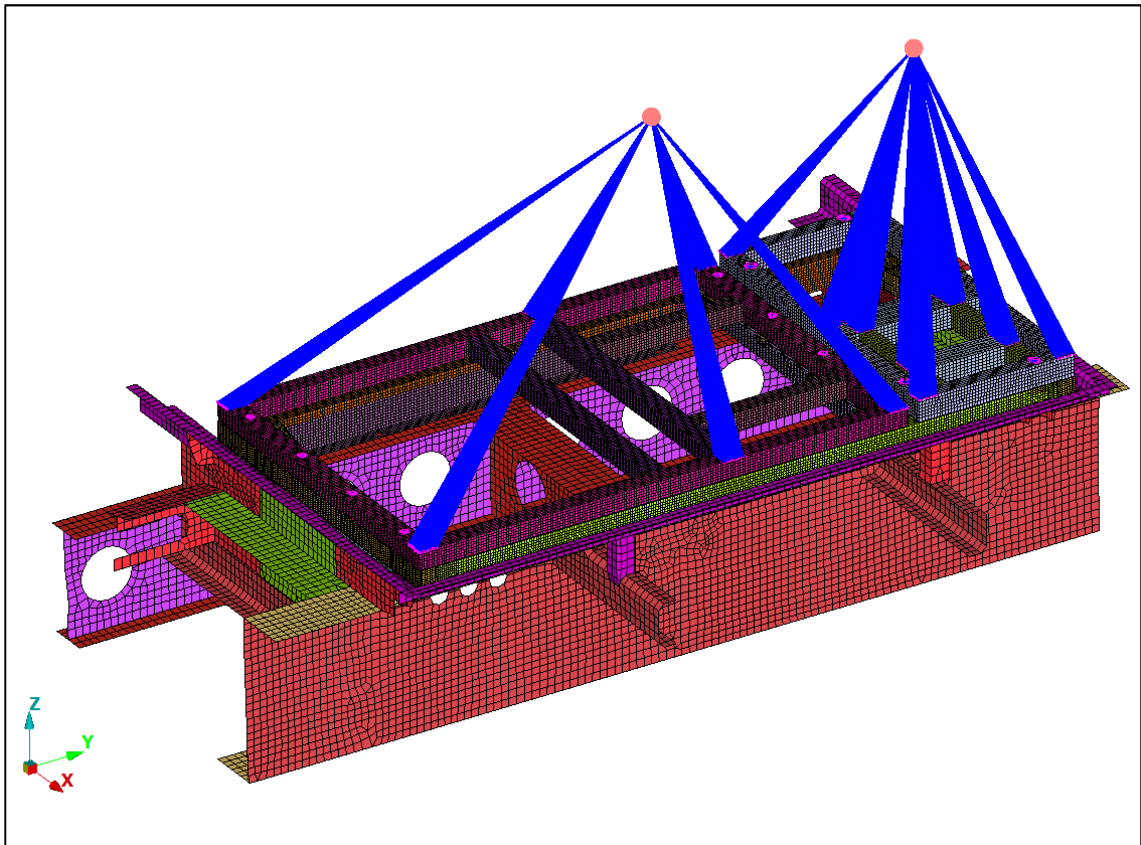


Figura 6 si rappresenta una vista significativa del modello FEM, nelle quali si può apprezzare visualmente la forma, le dimensioni e la distribuzione degli elementi della mesh. I requisiti di qualità della mesh ottenuti si indicano nell'immagine tratta dal calcolo FEM e si espressa nella **Figura 5**, e risponde ai criteri di accettabilità indicati nel paragrafo 6.2 de la IT n.° 383601.

N° totale di elementi	Elementi Curved/warped	% elem. distorsionati
-----------------------	------------------------	-----------------------

130484	32	0.025%
--------	----	--------

Tabella 9. – Elementi fuori dai criteri di qualità della mesh.

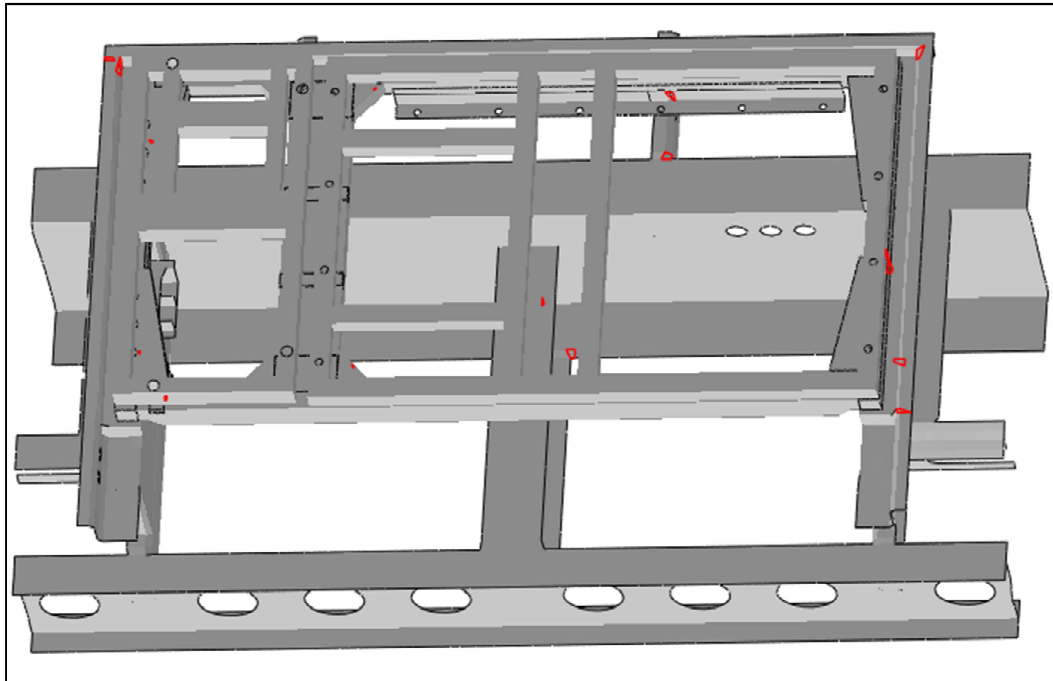


Figura 5 – In rosso, si segnalano gli elementi del modello FEM che non rispettano i criteri di qualità della mesh.

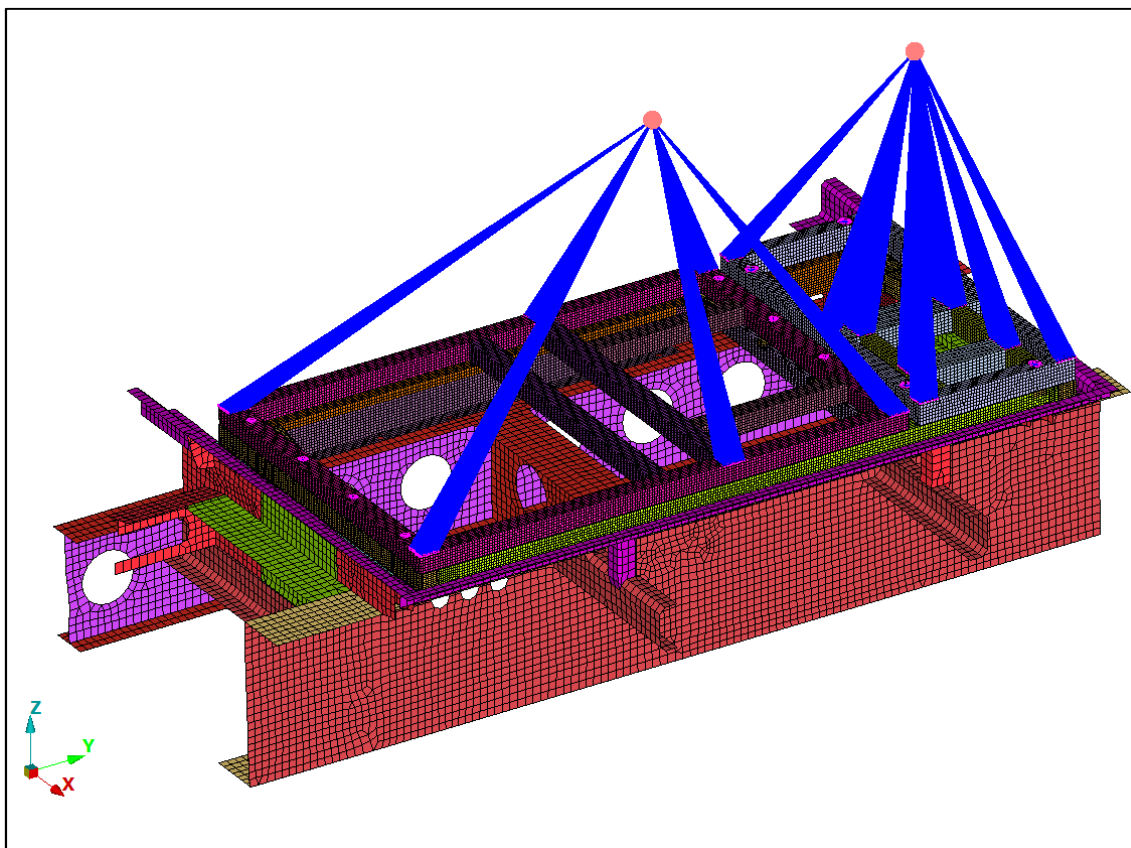


Figura 6 - Vista in dettaglio della parte interna del modello FEM

6.1 Descrizione del modello FEM

Il modello FEM rappresenta la struttura completa dell'armatura elettrica **APS**. La mesh si compone per la maggior parte di elementi SHELL S4, utilizzando in alcune zone gli elementi SHELL S3 per realizzare le transizioni della mesh. Per la mesh del contrappeso, sono stati utilizzati elementi solidi esaedrici C3D8. La dimensione media degli elementi è di 10mm. Nelle figure successive si può vedere la mesh del modello FEM.

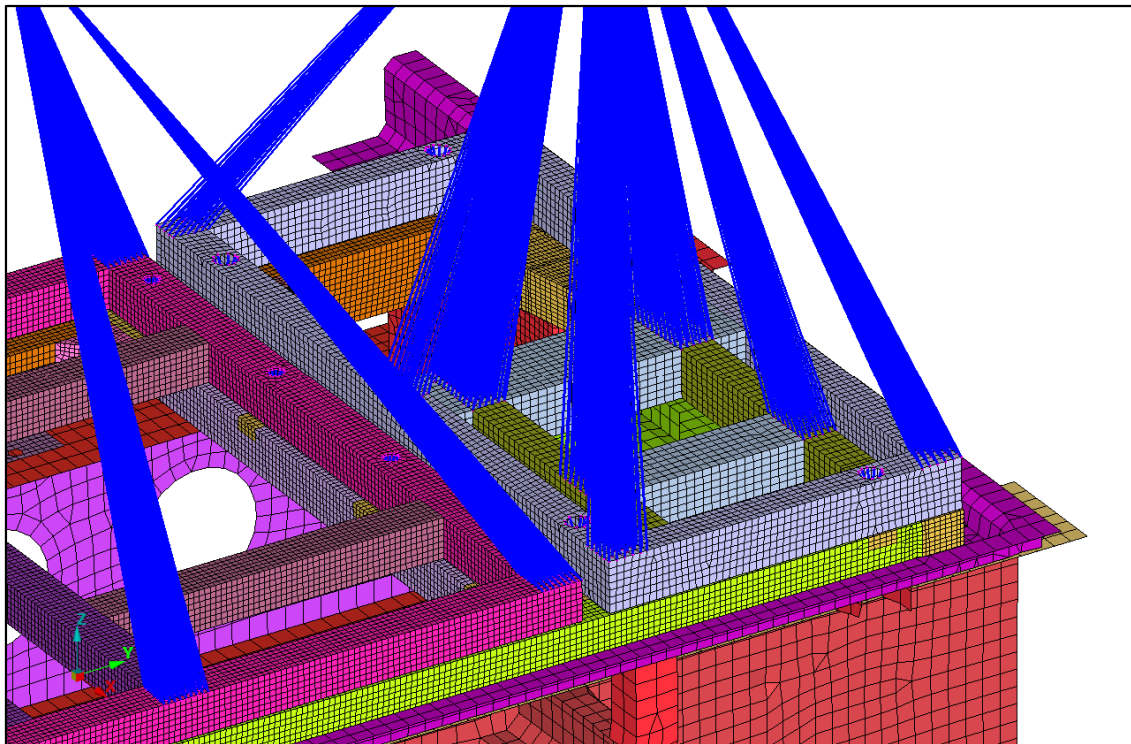


Figura 7 - Vista 1 della mesh del modello FEM completo.

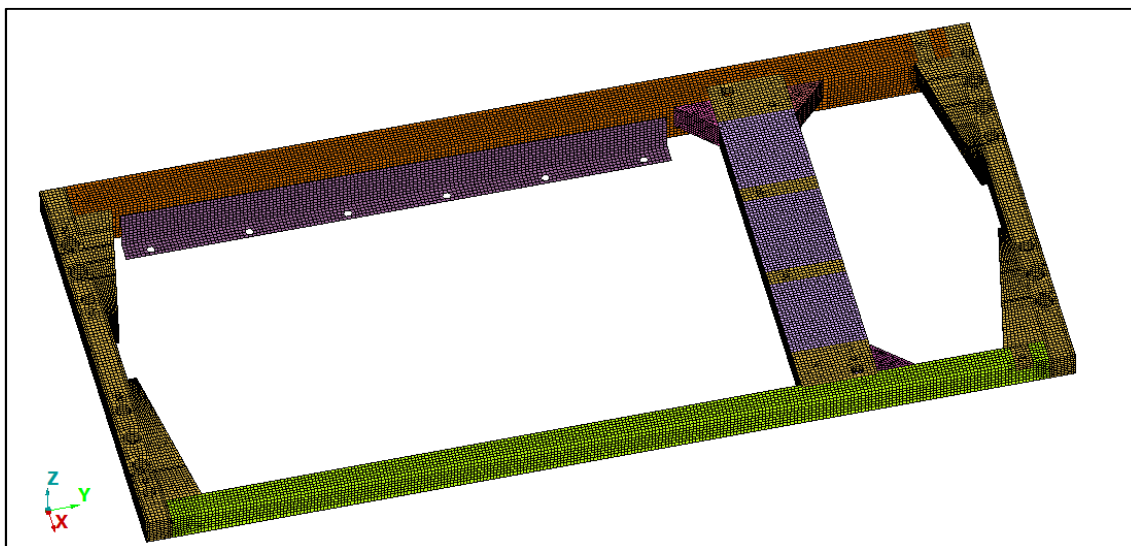


Figura 8 - Vista 2 della mesh del modello FEM completo.

Le giunzioni saldate tra i profili e quelle tra membrature e profili sono state rappresentate tramite una serie di

nodi in comune e unificando le diverse proprietà.

6.2 Aplicación de masas en el modelo FEM

La massa totale dell'armatura elettrica **APS** è:

Armatura	Massa (kg)
APS	2295

Nella Tabella 10 si indicano i valori caratteristici delle principali masse dell'armadio elettrico. Nella Figura 9 si mostrano le localizzazioni delle masse.

Elemento	Nome	Massa (kg)
1000000	APS2_MASS	1583
2000000	MV2_MASS	270

Tabella 10 – Caratteristiche delle masse dell'armadio elettrico.

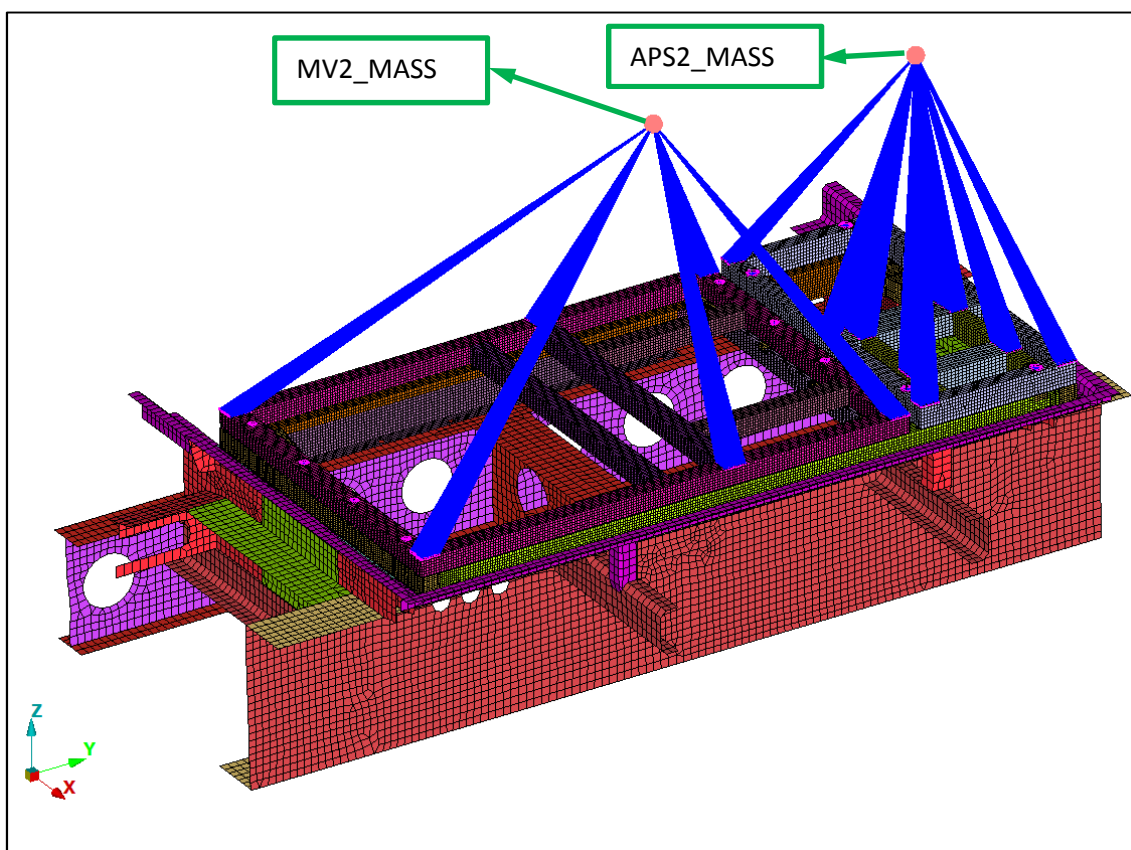


Figura 9 – Nomenclatura delle masse dell'armadio elettrico

6.3 Applicazione delle condizioni di contorno al modello FEM

Le condizioni di contorno o di vincolo del modello **FEM**, si mostrano nelle seguenti figure, dove si possono vedere in dettaglio la applicazione dei vincoli, colorati in blu.

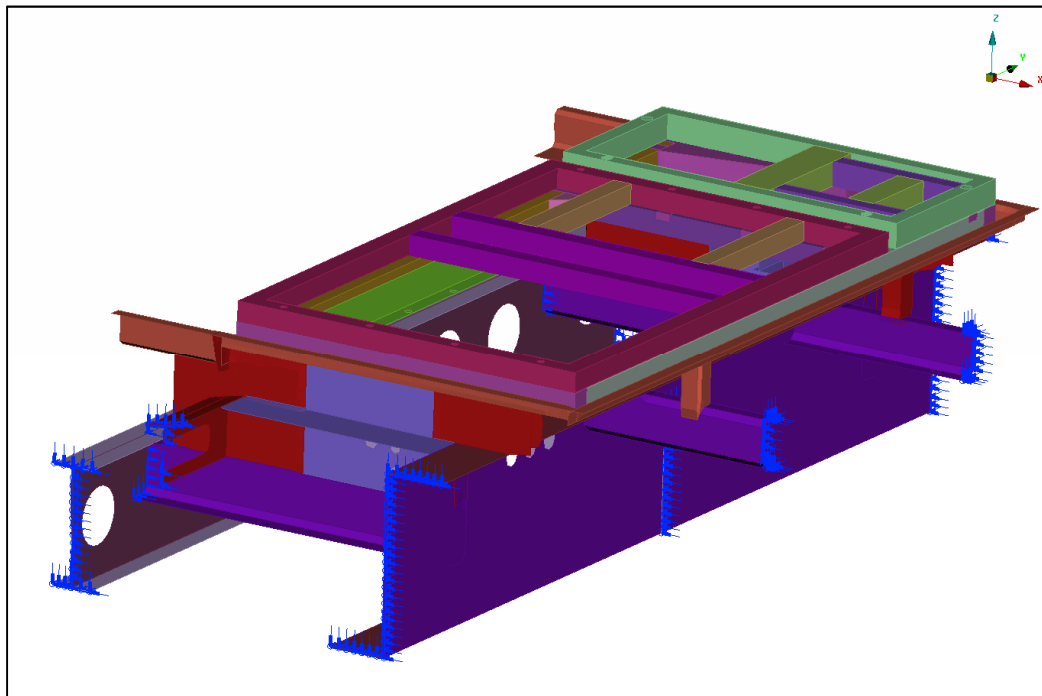


Figura 10 – Dettaglio 1 dei vincoli applicati alla parte inferiore delle travi verticali

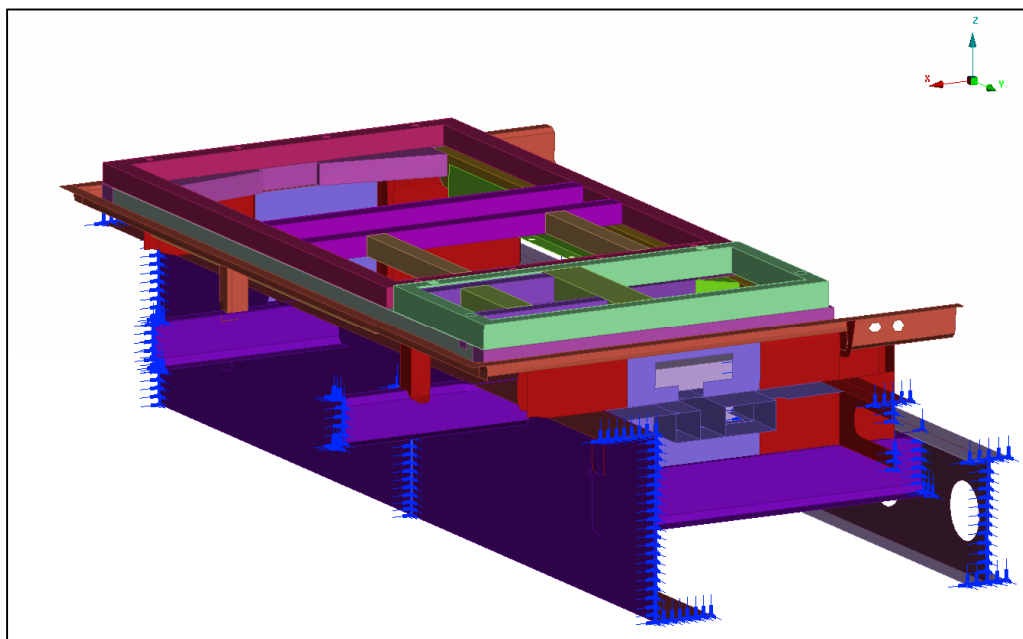


Figura 11 – Dettaglio 2 dei vincoli applicati alla parte inferiore delle travi verticali

6.4 Sistemi di coordinate nel modello FEM

Il sistema di coordinate del modello FEM si trova definito come specificato nella figura di seguito.

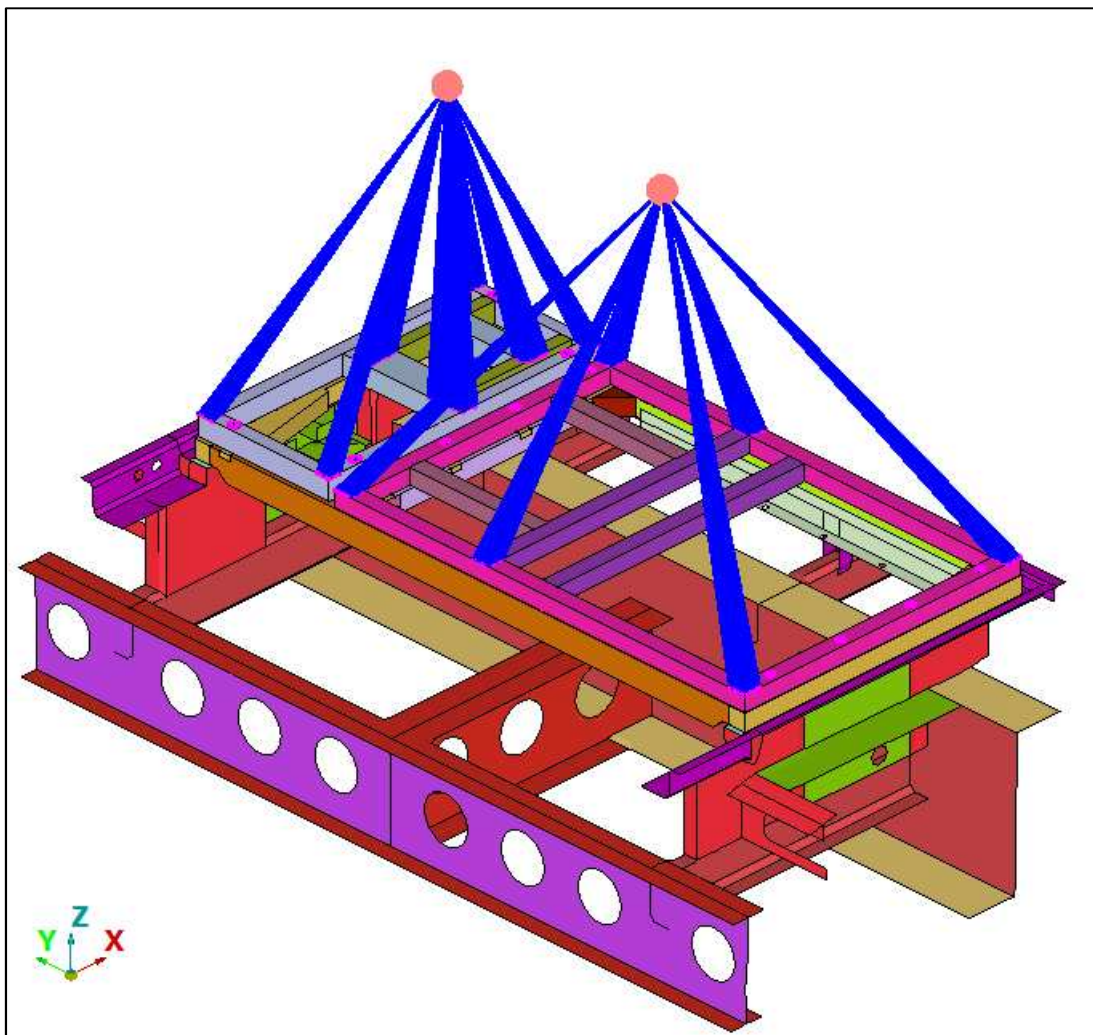


Figura 12 – Sistema di riferimento locale del modello.

Gli assi di conseguenza risultano definiti come segue:

- **X** corrisponde all'asse longitudinale
- **Z** corrisponde all'asse verticale
- **Y** corrisponde all'asse trasversale.

7. CASI DI CARICO

D'accordo con la descrizione del capitolo 5 di questo documento, le condizioni di carico che devono essere verificate sono riassunte nella Tabella 11.

Tipo di carico	Rif.	Condizioni di carico	Norma/ST di riferimento
Statici	A	LC1_E-X5_POS accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore 5g + accelerazione della gravità.	UNI-EN-12663-1, Tabella 13
	B	LC1_E-X5_NEG accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore -5g + accelerazione della gravità.	UNI-EN-12663-1, Tabella 13
	C	LC2_E-Y1_POS accelerazione applicata in direzione trasversale di valore 1g + accelerazione della gravità.	UNI-EN-12663-1, Tabella 14
	D	LC2_E-Y1_ accelerazione applicata in direzione trasversale di valore -1g + accelerazione della gravità.	UNI-EN-12663-1, Tabella 14
	E	LC3_E-Z1_POS accelerazione applicata in direzione verticale di valore -2.25g	UNI-EN-12663-1, Tabella 15
	F	LC3_E-Z1_NEG accelerazione applicata in direzione verticale di valore 0.25g	UNI-EN-12663-1, Tabella 15
Fatica	G	LC4_F-Y015_POS accelerazione applicata in direzione trasversale di valore 0.2g.	UNI-EN-12663-1, Tabella 16
	H	LC4_F-Y015_NEG accelerazione applicata in direzione trasversale di valore -0.2g.	UNI-EN-12663-1, Tabella 16
	I	LC5_F-Z015_POS accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore 1.25g	UNI-EN-12663-1, Tabella 17
	J	LC5_F-Z015_POS accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore 0.75g	UNI-EN-12663-1, Tabella 17
	K	LC6_F-X015_POS accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore 0.15g	UNI-EN-12663-1, Tabella 18
	L	LC6_F-X015_NEG accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore -0.15g	UNI-EN-12663-1, Tabella 18
Impatto	M	SHOCK_X_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 50g	UNI-EN-61373:2101, Figura 7
	N	SHOCK_X_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -50g	UNI-EN-61373:2101, Figura 7
	O	SHOCK_Y_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 30g	UNI-EN-61373:2101, Figura 7
	P	SHOCK_Y_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -30g	UNI-EN-61373:2101, Figura 7
	Q	SHOCK_Z_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 30g	UNI-EN-61373:2101, Figura 7
	R	SHOCK_Z_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -30g	UNI-EN-61373:2101, Figura 7
Prova d'invecchiamento	S	PSD. Durata della prova 5h. Tre curve con i livelli di ASD. Vedi Tabella 11 e Figura 13	UNI-EN-61373:2101, Figura 2

Tabella 11 – Condizioni di carico

Seguendo i criteri stabiliti nel paragrafo 5.4 di questo documento, per una massa $m = 2294.3$ kg e seguendo i criteri presenti nella Figura 4, si ottengono le tre curve PSD che si mostrano qui di seguito.

Frequenza (Hz)	ASD (m/s^2) ² /Hz		
	Verticale	Trasversale	Longitudinale
5	0.532	0.131	0.234
20	0.532	0.131	0.234
150	0.0096	0.00236	0.00422

Tabella 12 – Livelli ASD per frequenza.

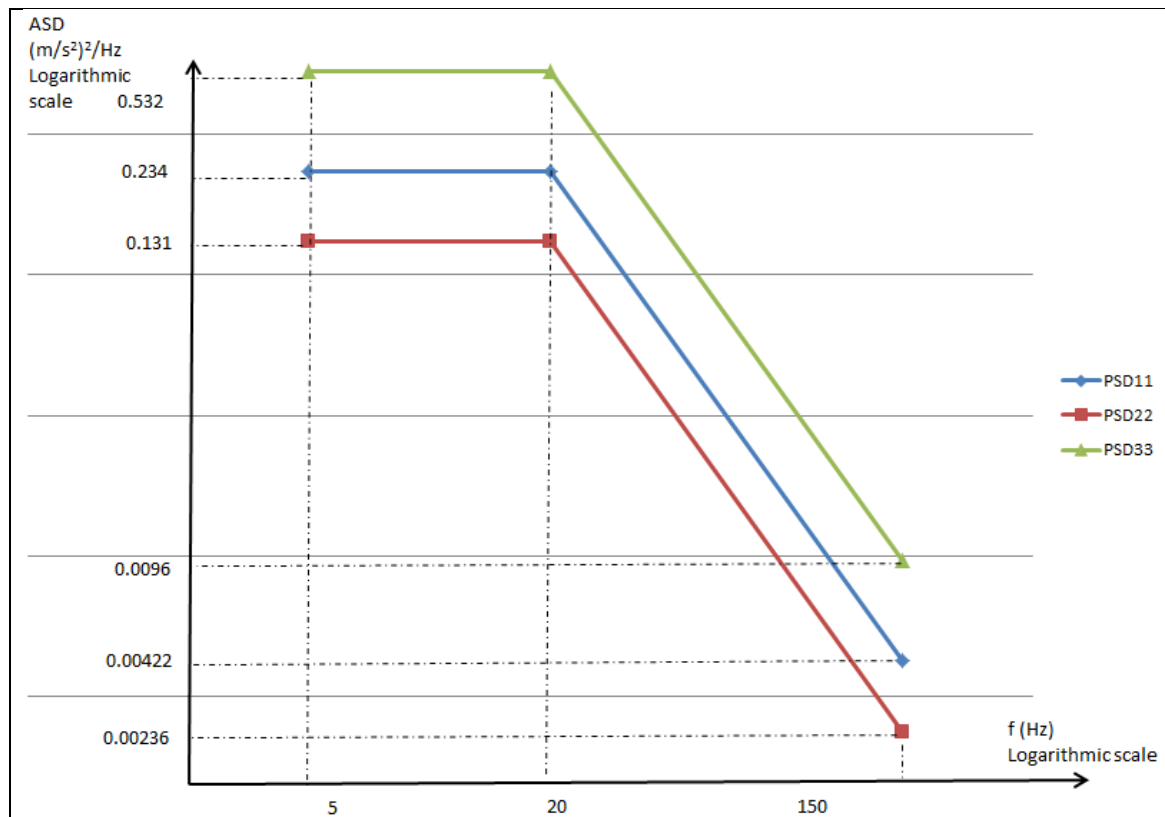


Figura 13 – Curve PSD

8. ANALISI DEI RISULTATI

In questo capitolo, si mostrano i risultati ottenuti in ognuna delle analisi dei casi di carico esposti nella Tabella 11.

8.1 Calcolo del materiale base (membrature). Casi di carico statici

Le seguenti figure mostrano l'analisi tensionale di Von Mises del modello **FEM** per ogni caso di carico indicato nella Tabella 11. In concreto, per rappresentare le tensioni, si utilizzano varie immagini tanto generali (viste del modello completo senza mesh) come dettagliate (viste di ampliamenti locali del modello con rispettiva mesh) delle zone più affettate.

In forma di riassunto, alla fine di ogni caso di carico si mostra una tabella riassuntiva con i punti maggiormente critici calcolati come segue:

$$\eta_1 = \sigma_{adm} / \sigma_{VM}$$

Infine, si ricorda che le deformazioni verranno espresse in **m**, mentre le tensioni in **Pa**.

Rif.	Tipi di carico	Condizioni di Carico	Coefficienti di sicurezza
			η_1
A	Statici	LC1_E-X5_POS accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore 5g + accelerazione della gravità.	1.29
B		LC1_E-X5_NEG accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore -5g + accelerazione della gravità.	1.37
C		LC2_E-Y1_POS accelerazione applicata in direzione trasversale di valore 1g + accelerazione della gravità.	>2
D		LC2_E-Y1_ accelerazione applicata in direzione trasversale di valore -1g + accelerazione della gravità.	>2
E		LC3_E-Z1_POS accelerazione applicata in direzione verticale di valore -2.25g	>2
F		LC3_E-Z1_NEG accelerazione applicata in direzione verticale di valore 0.25g	>2

Tabella 13 – Coefficienti di sicurezza per i casi di carico statici.

Come si può osservare nelle seguenti figure, ci sono delle zone dove le tensioni sono più alte del limite, 309 MPa. Tutti questi valori corrispondono in tutti i casi a un numero limitato di nodi e sono dovuti a singolarità numeriche del modello FEM.

8.1.1 LC1_E-X5_POS (Rif. A Tabella 11)

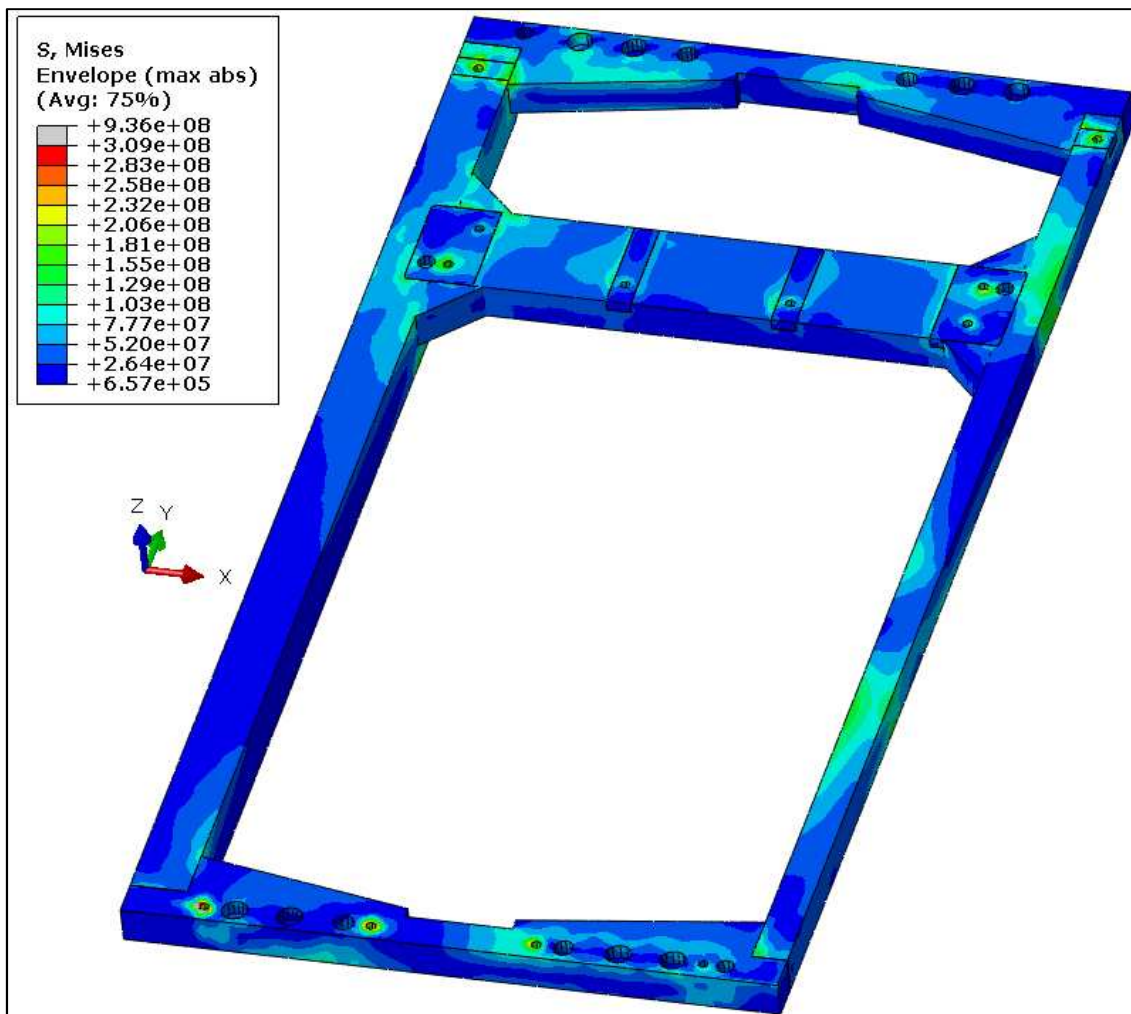


Figura 14 – Caso di carico LC1_E-X5_POS_Tensione di Von Mises. Vista generale.

8.1.2 LC1_E-X5_NEG (Rif. B Tabella 11)

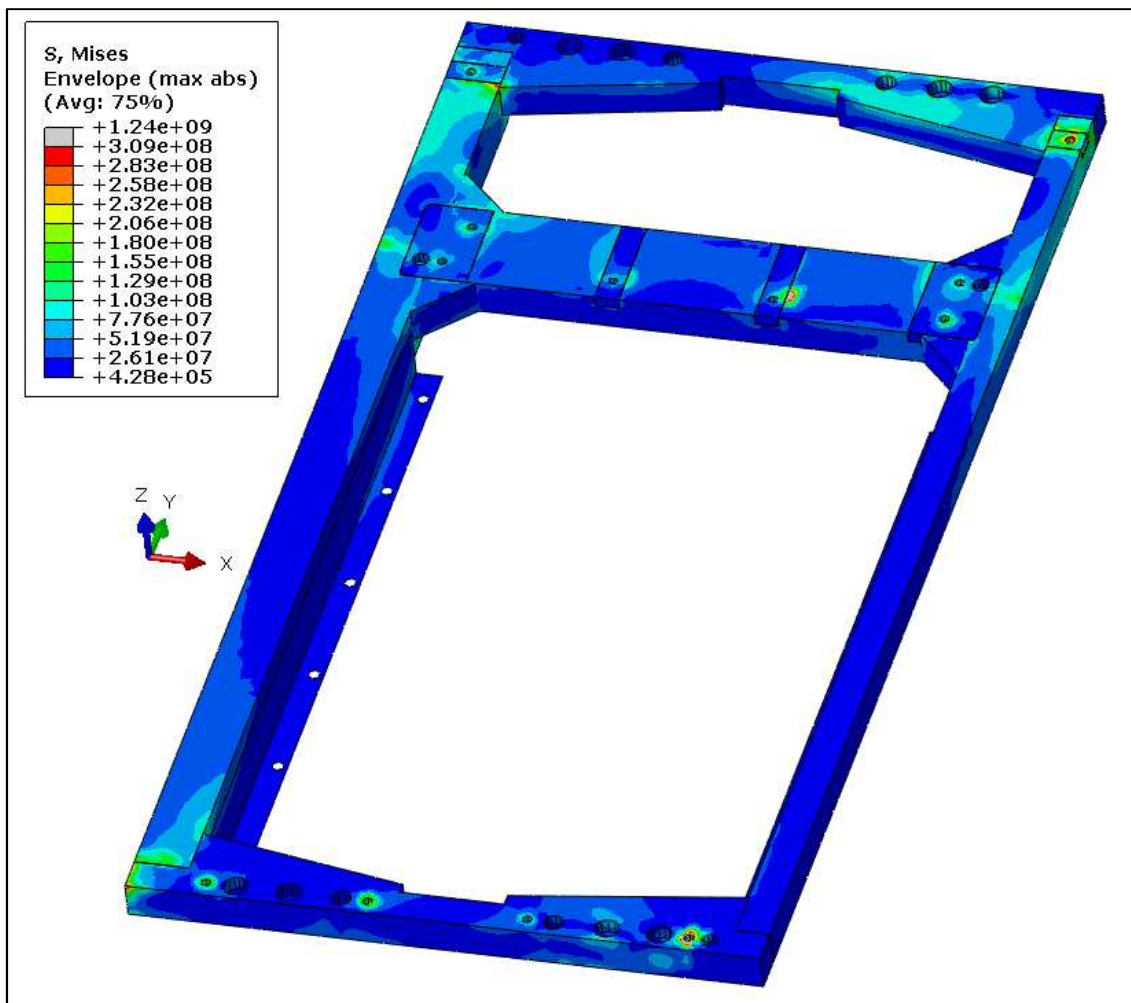


Figura 15 – Caso di carico LC1_E-X5_NEG_Tensione di Von Mises. Vista generale.

8.1.3 LC1_E-Y1_POS (Rif. C Tabella 11)

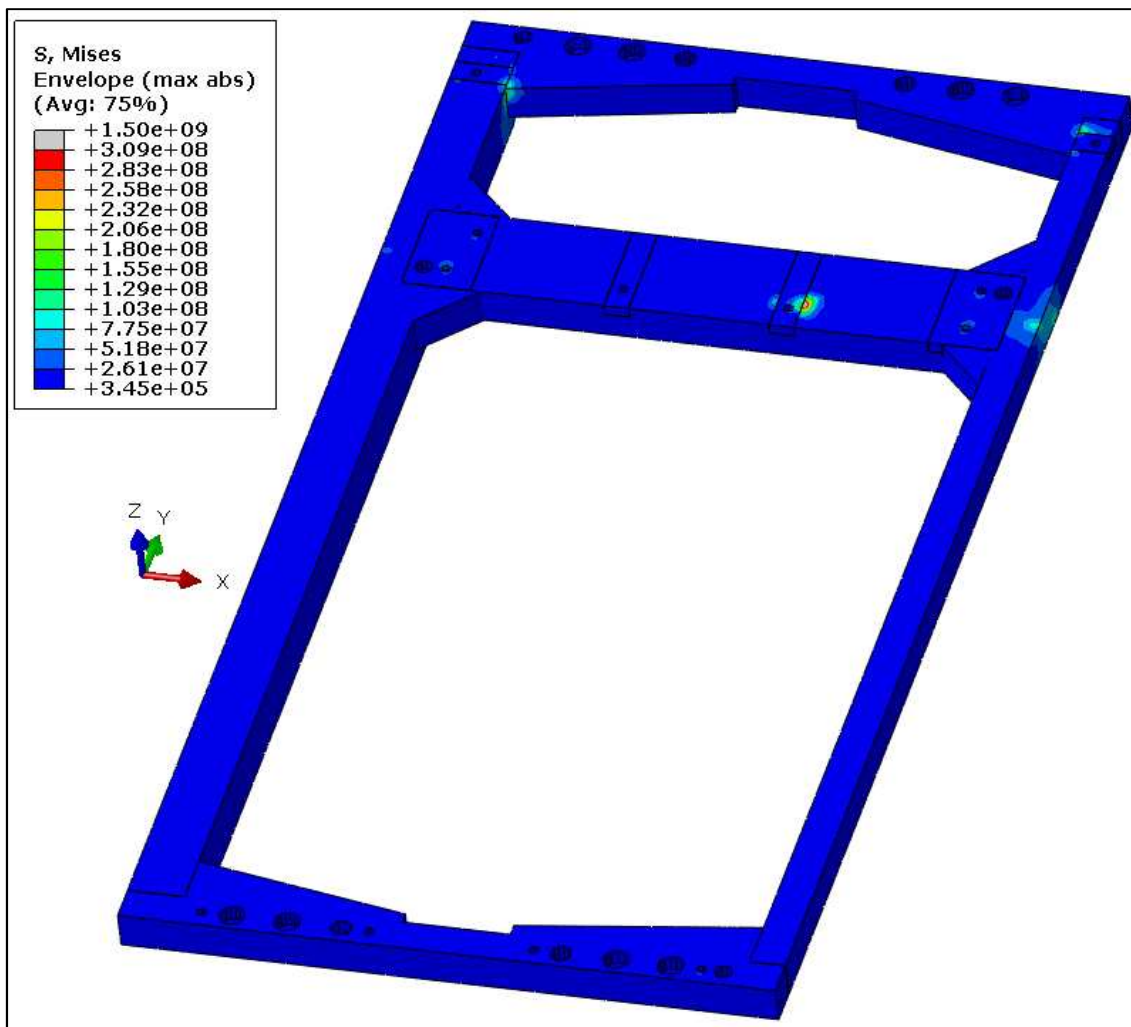


Figura 16 – Caso di carico LC1_E-Y1_POS_Tensione di Von Mises. Vista generale.

8.1.4 LC1_E-Y1_NEG (Rif. D Tabella 11)

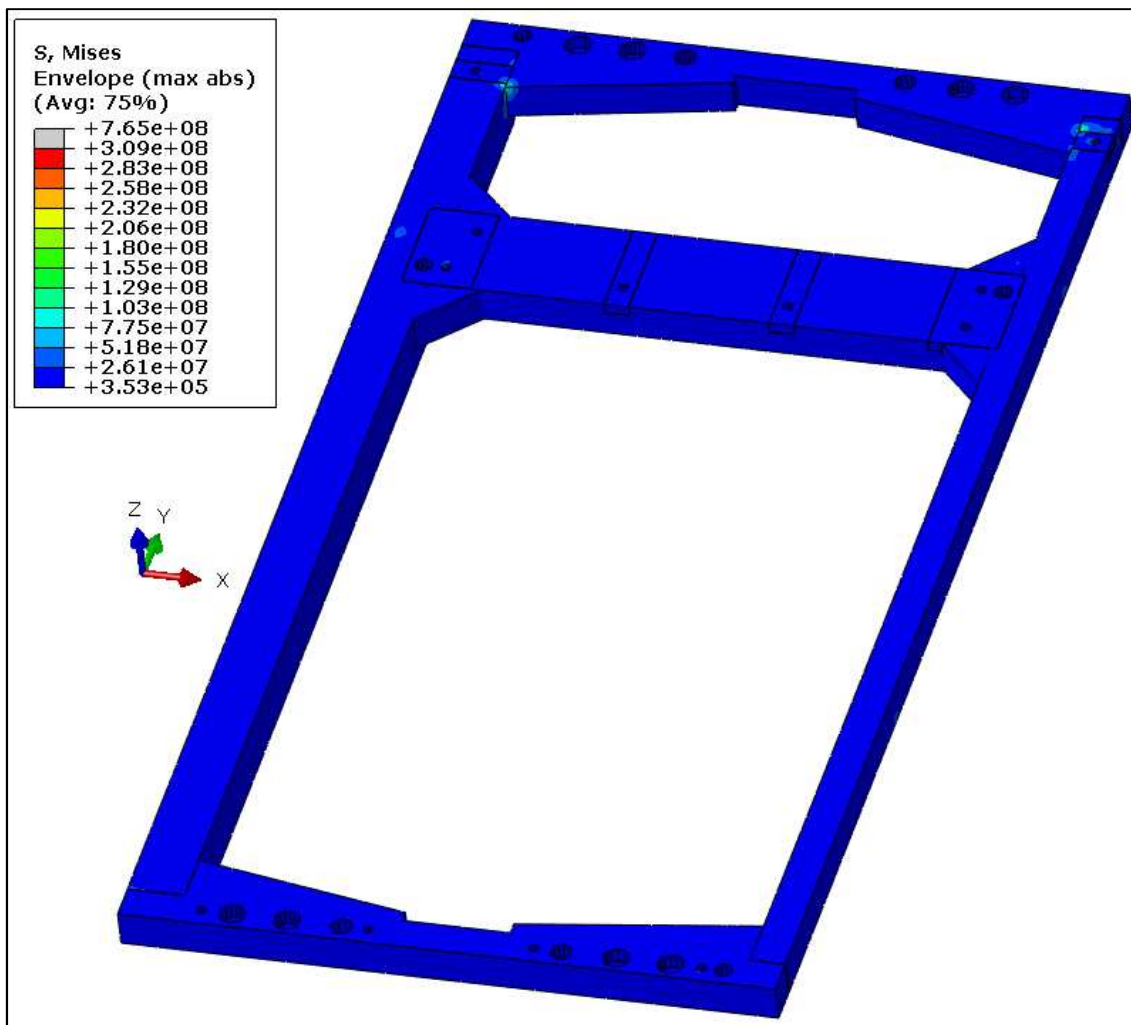


Figura 17 – Caso di carico LC1_E-Y1_NEG_Tensione di Von Mises. Vista generale.

8.1.5 LC1_E-Z1_POS (Rif. E Tabella 11)

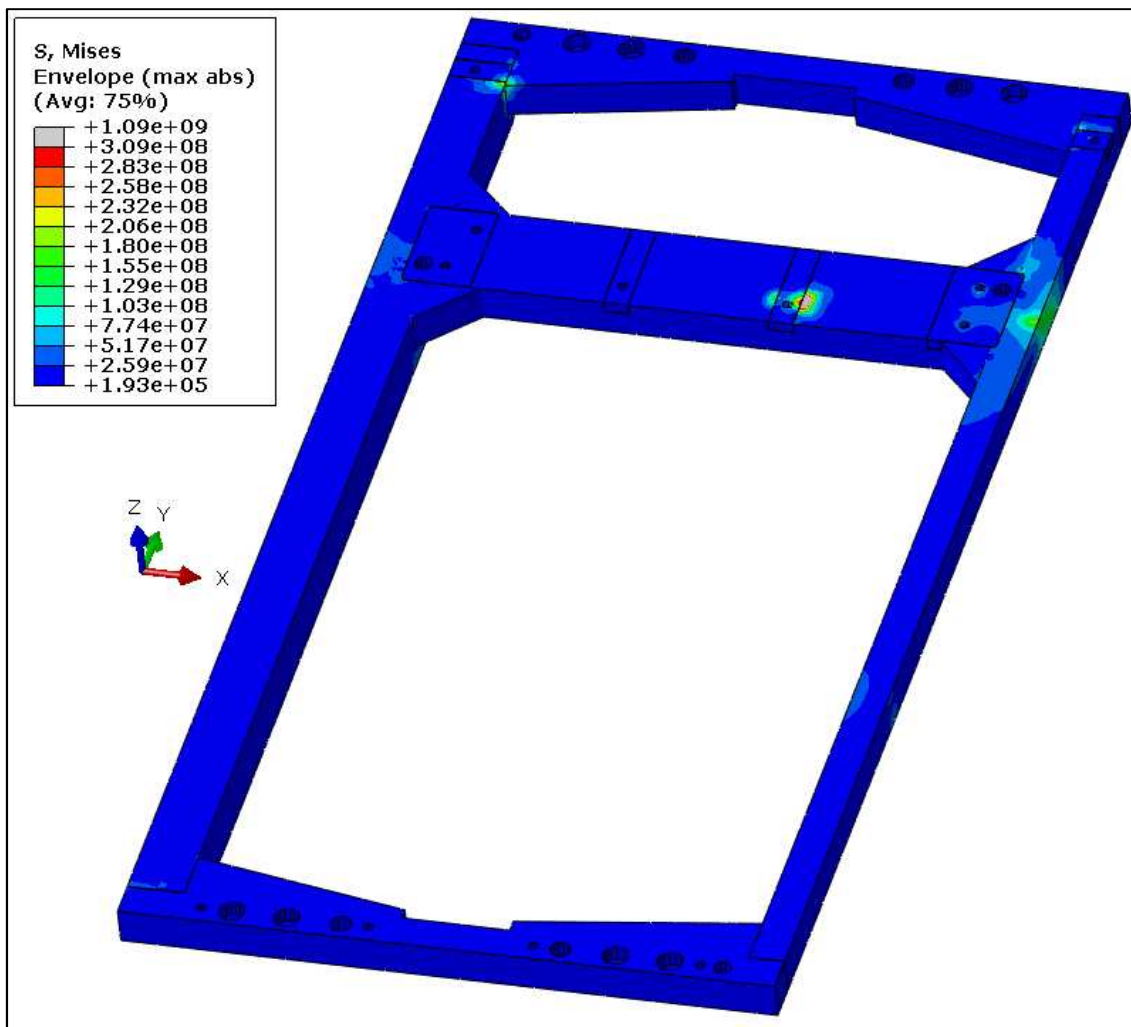


Figura 18 – Caso di carico LC1_E-Z1_POS_Tensione di Von Mises. Vista generale.

8.1.6 LC1_E-Z1_NEG (Rif. F Tabella 11)

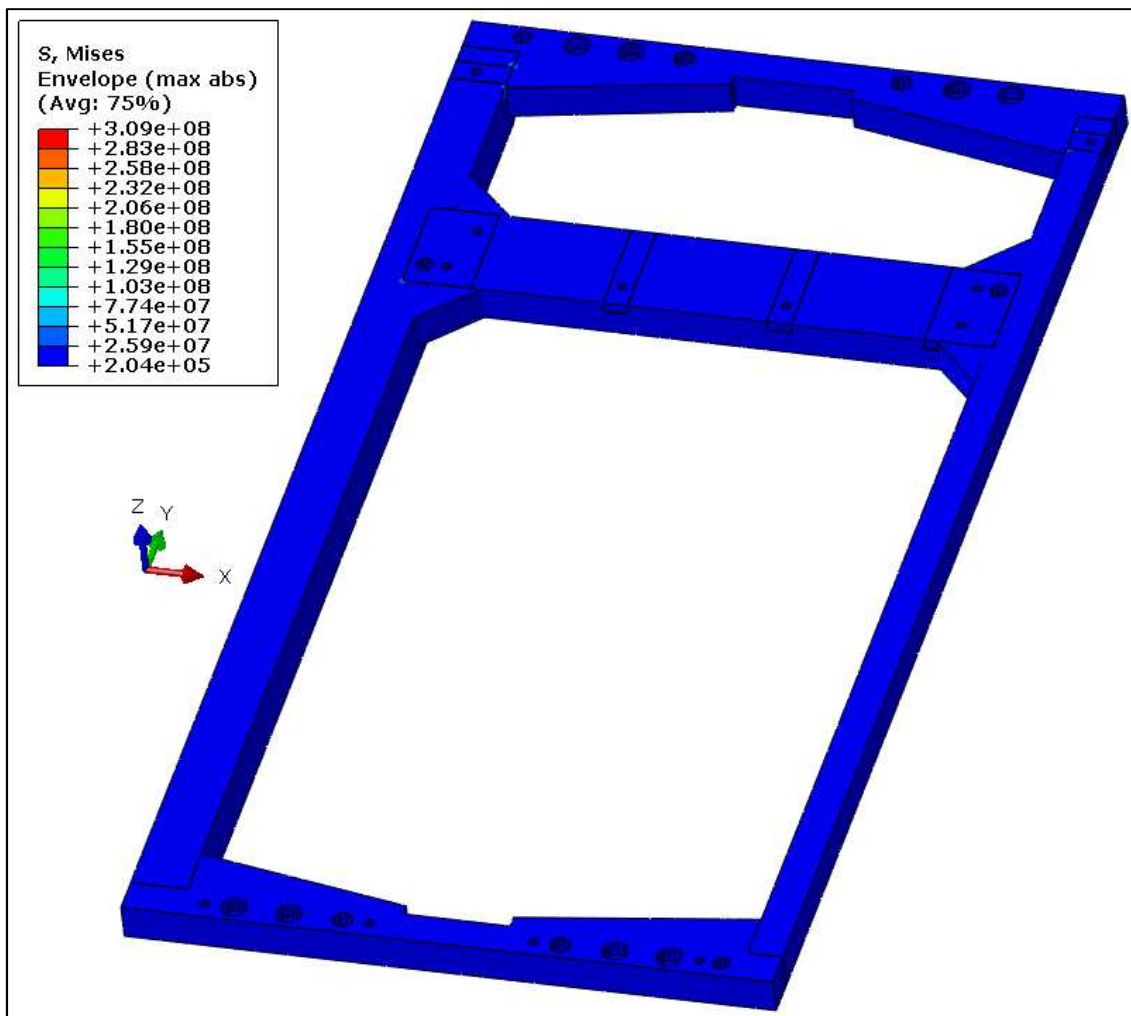


Figura 19 – Caso di carico LC1_E-Z1_NEG_Tensione di Von Mises. Vista generale.

8.2 Calcolo del materiale base (membrature), casi di carico a fatica (Rif. G, H, I, J, K e L Tabella 11)

Seguendo le indicazioni del paragrafo 5.2, le due condizioni di verifica per le membrature (materiale base) a fatica sono le seguenti:

$$\Delta\sigma_{princ} \leq \Delta\sigma_N$$

$$\sigma_{princ_max} \leq \sigma_{N\ max}$$

La categoria scelta per il materiale base è DC160.

Le figure di seguito mostrano le immagini delle tensioni principali massime ed il loro rango corrispondente, visualizzando sempre in ogni nodo l'involuppo dei 6 casi di carico a fatica (Rif. G, H, I, J, K e L Tabella 11), considerando il valore più sfavorevole di ogni caso di carico.

Infine, si mostrano in una tabella riassuntiva i coefficienti di sicurezza più critici calcolati come segue:

$$\eta_{2mb} = \Delta\sigma_N / \Delta\sigma_{princ_e} \quad \eta_{3mb} = \sigma_{N\ max} / \sigma_{princ_max}$$

Le tensioni vengono espresse in **Pa**.

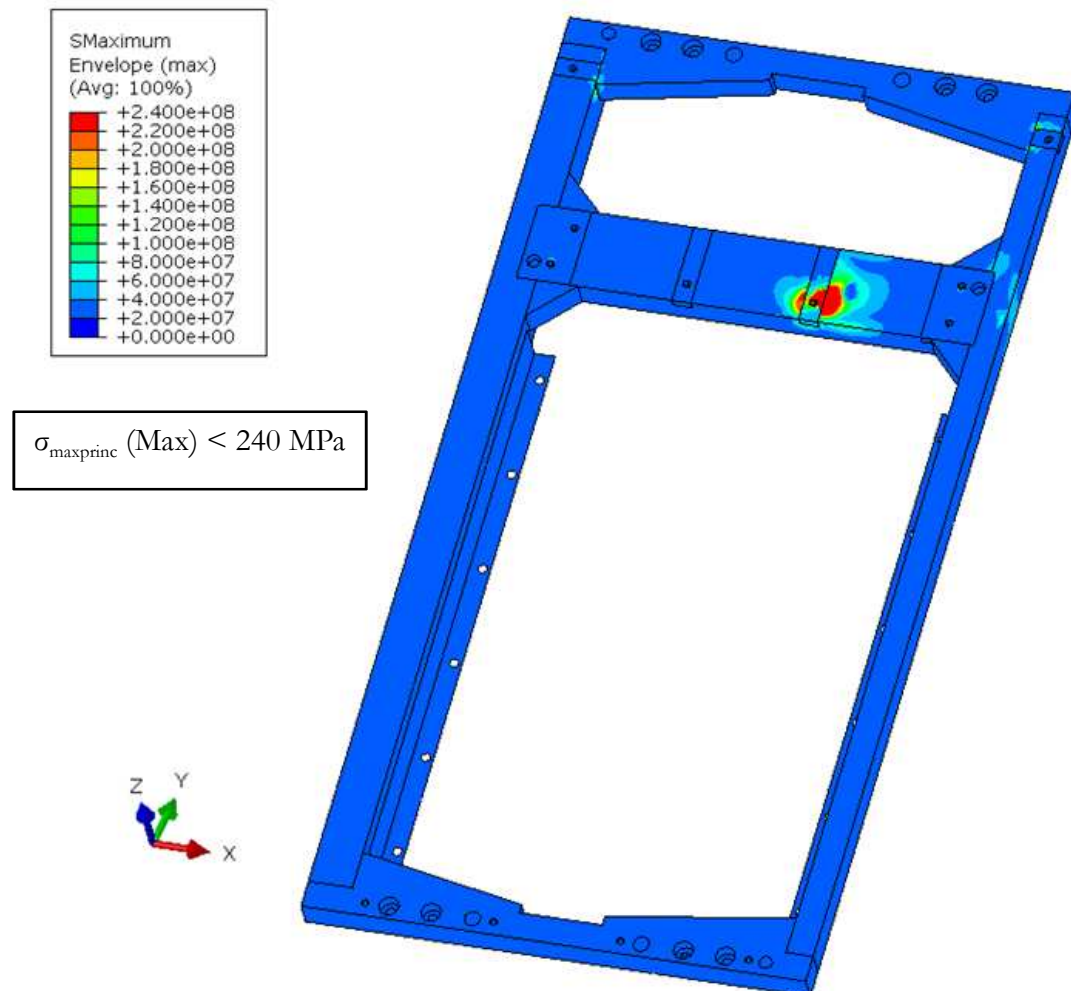


Figura 20 – Involuppo dei casi di carico a fatica, materiale base, massima tensione principale σ_{princ_max}

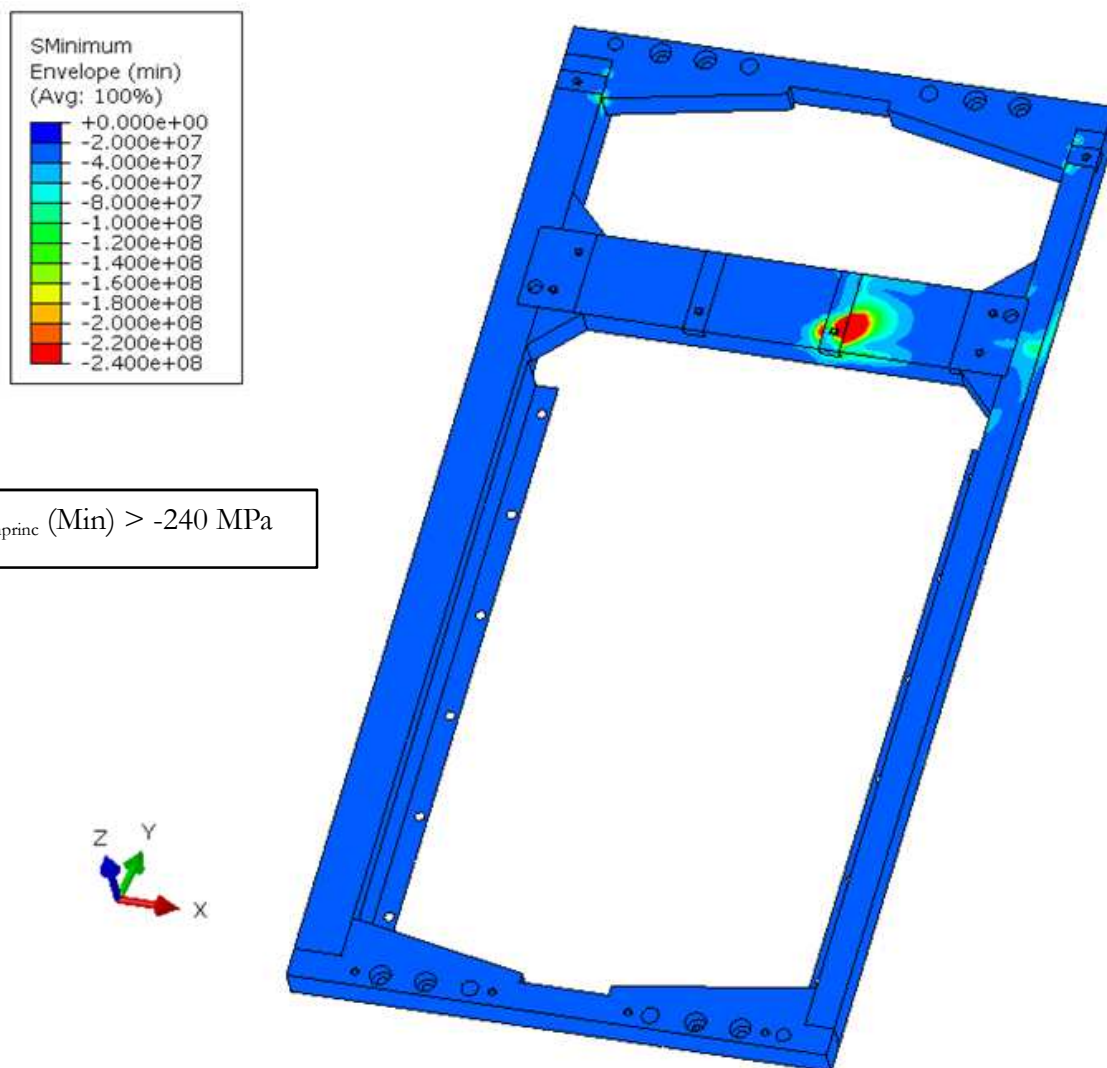


Figura 21 – Inviluppo dei casi di carico a fatica, materiale base, minima tensione principale $\sigma_{\text{princ_max}}$.

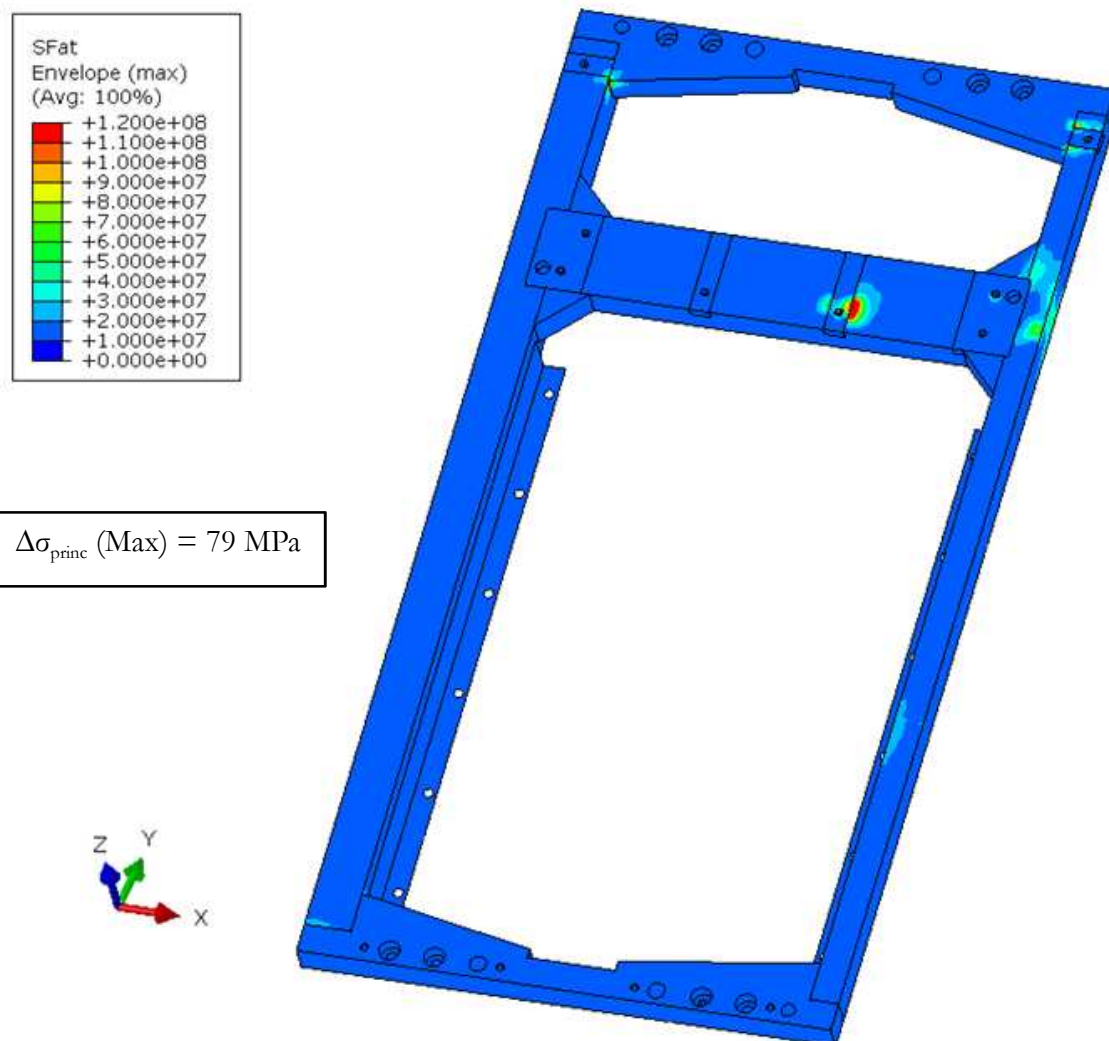


Figura 22 – Involuppo dei casi di carico a fatica, massimo incremento tensionale $\Delta\sigma$.

Tipo di carico	Rif.	Coefficiente di sicurezza	
		η_{2mb}	η_{3mb}
Fatica	G, H, I, J, K, L	1.51	1.83

Tabella 14 – Coefficienti di sicurezza per i casi di carico a fatica.

8.3 Casi di carico d'impatto

A continuazione si mostrano i risultati per i casi di carico d'impatto descritti nella Tabella 11. Le immagini sottostanti mostrano lo stato tensionale di Von Mises per ogni caso di carico, visualizzando in ogni nodo l'inviluppo delle tensioni considerando ogni istante di tempo durante il quale si sviluppa lo shock (60 ms).

Le tensioni vengono espresse in N/m^2

Per riassumere, a continuazione si mostrano in una tabella i margini di sicurezza critici per ogni caso di carico calcolati come segue:

$$\eta_1 = \sigma_{adm} / \sigma_{VM}$$

Rif.	Tipo di carico	Condizione di carico	Coefficienti di sicurezza
			η_1
M	Impatto	SHOCK_X_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 50g	1.07
N		SHOCK_X_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -50g	1.05
O		SHOCK_Y_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 30g	1.09
P		SHOCK_Y_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -30g	1.09
Q		SHOCK_Z_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 30g	1.20
R		SHOCK_Z_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -30g	1.07

Tabella 15 – Coefficienti di sicurezza per i casi di carico d'impatto.

Come si può osservare nelle seguenti figure, ci sono delle zone dove le tensioni sono più alte del limite, 309 MPa. Tutti questi valori corrispondono in tutti i casi a un numero limitato di nodi e sono dovuti a singolarità numeriche del modello FEM.

8.3.1 SHOCK_X_POS (Rif. M Tabella 11)

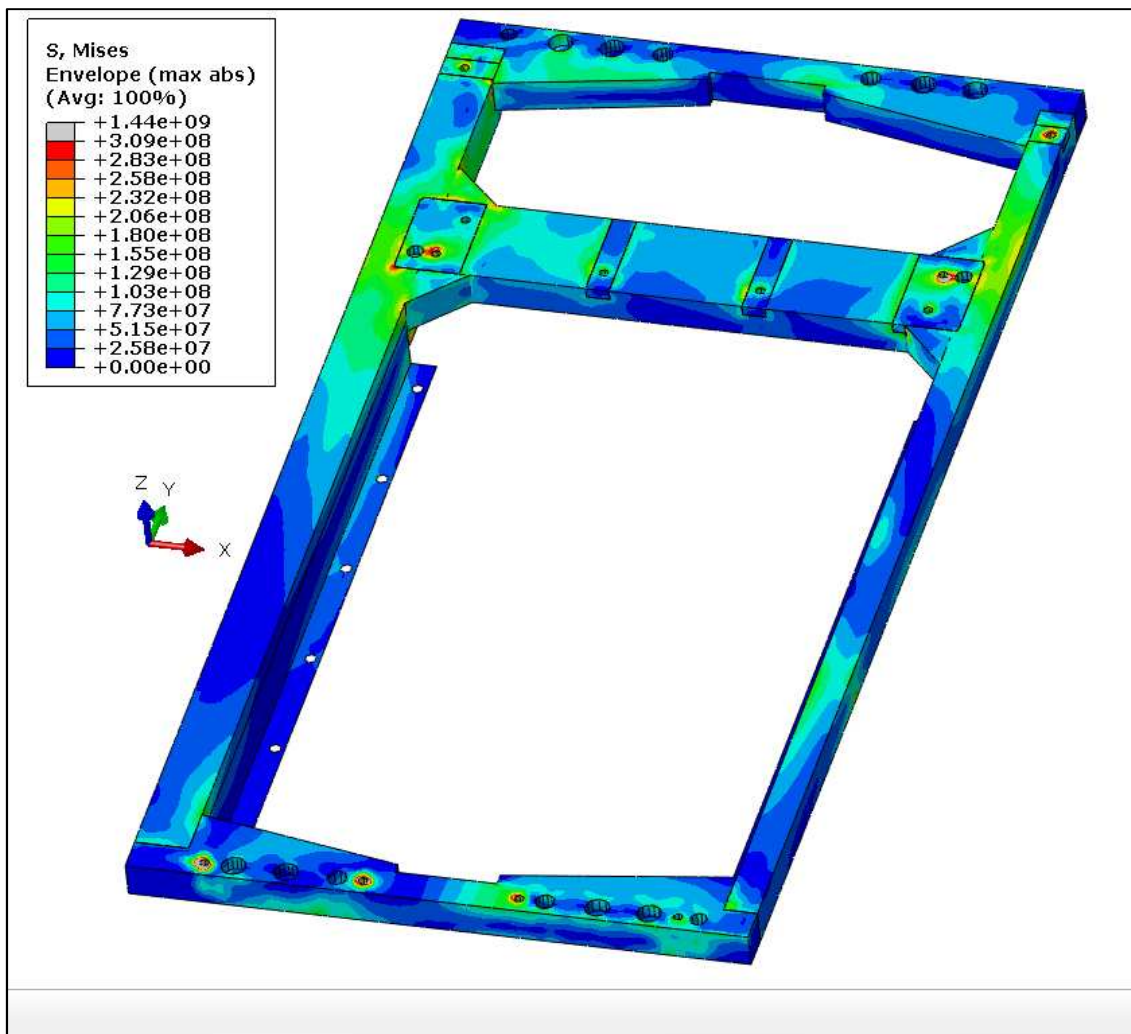


Figura 23 – Caso di carico SHOCK_X_POS, Tensione di Von Mises. Involuppo di tutti gli istanti di tempo della risposta (t = 30 ms). Vista generale.

8.3.2 SHOCK_X_NEG (Rif. N Tabella 11)

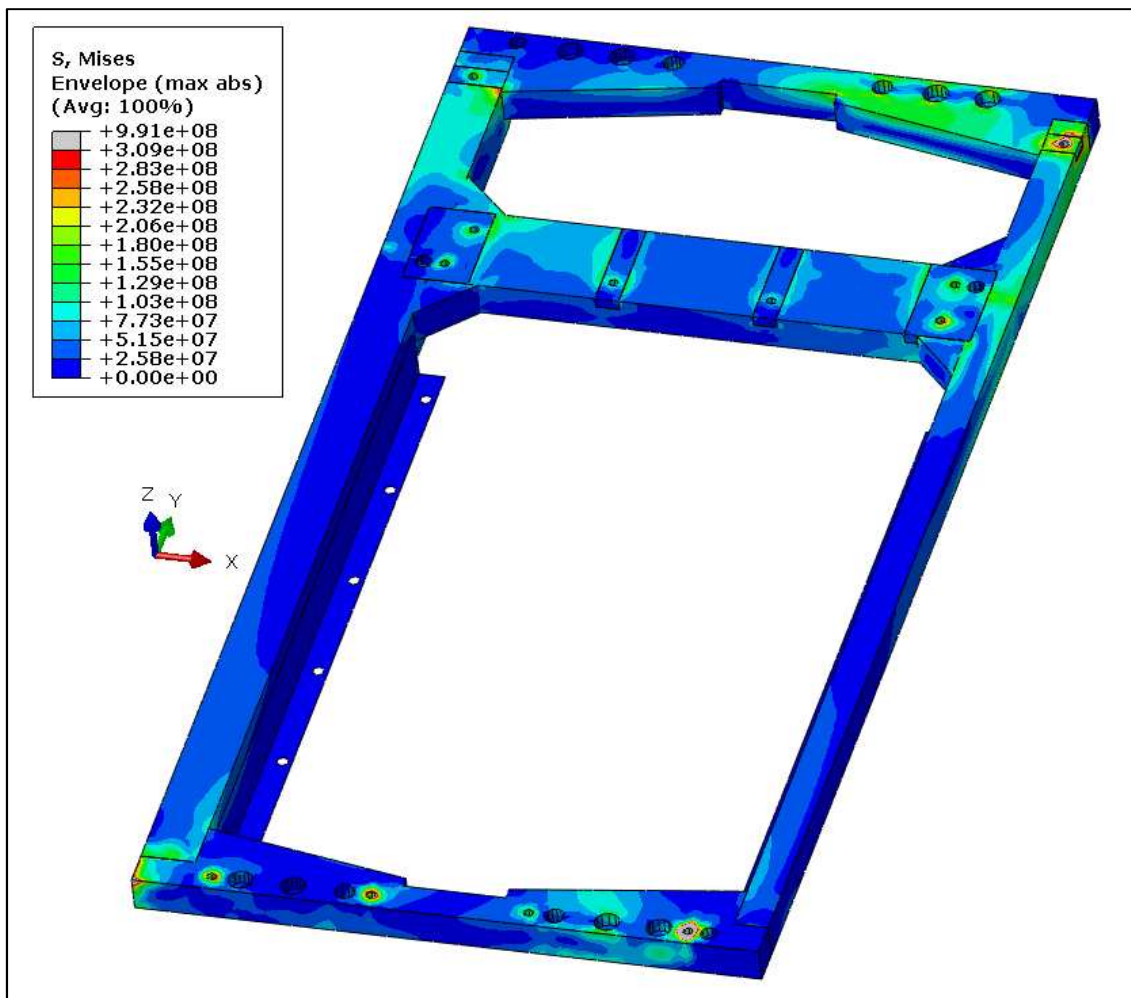


Figura 24 – Caso di carico SHOCK_X_NEG, Tensione di Von Mises. Inviluppo di tutti gli istanti di tempo della risposta (t = 30 ms). Vista generale.

8.3.3 SHOCK_Y_POS (Rif. O Tabella 11)

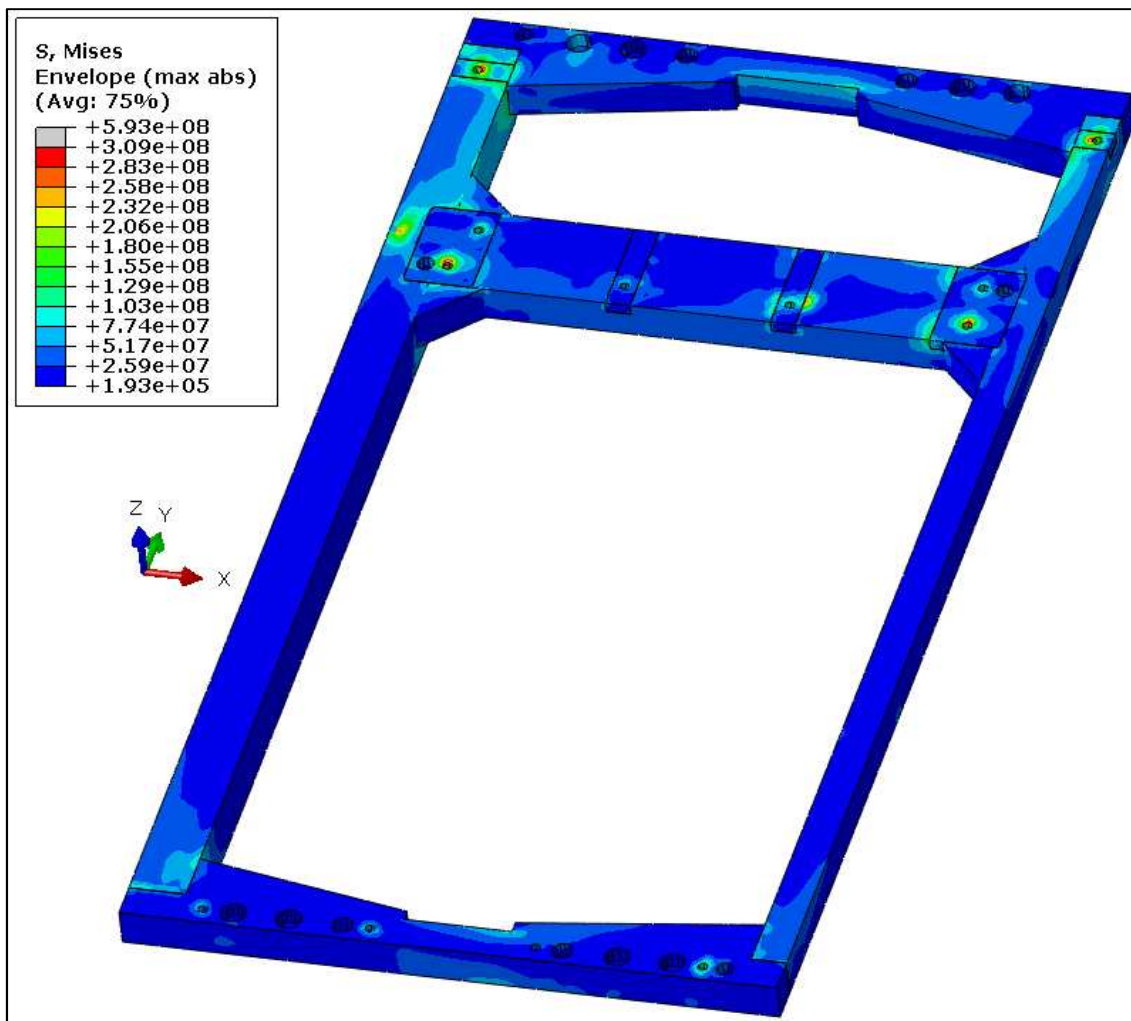


Figura 25 – Caso di carico SHOCK_Y_POS, Tensione di Von Mises. Involuppo di tutti gli istanti di tempo della risposta (t = 48 ms). Vista generale.

8.3.4 SHOCK_Y_NEG (Rif. P Tabella 11)

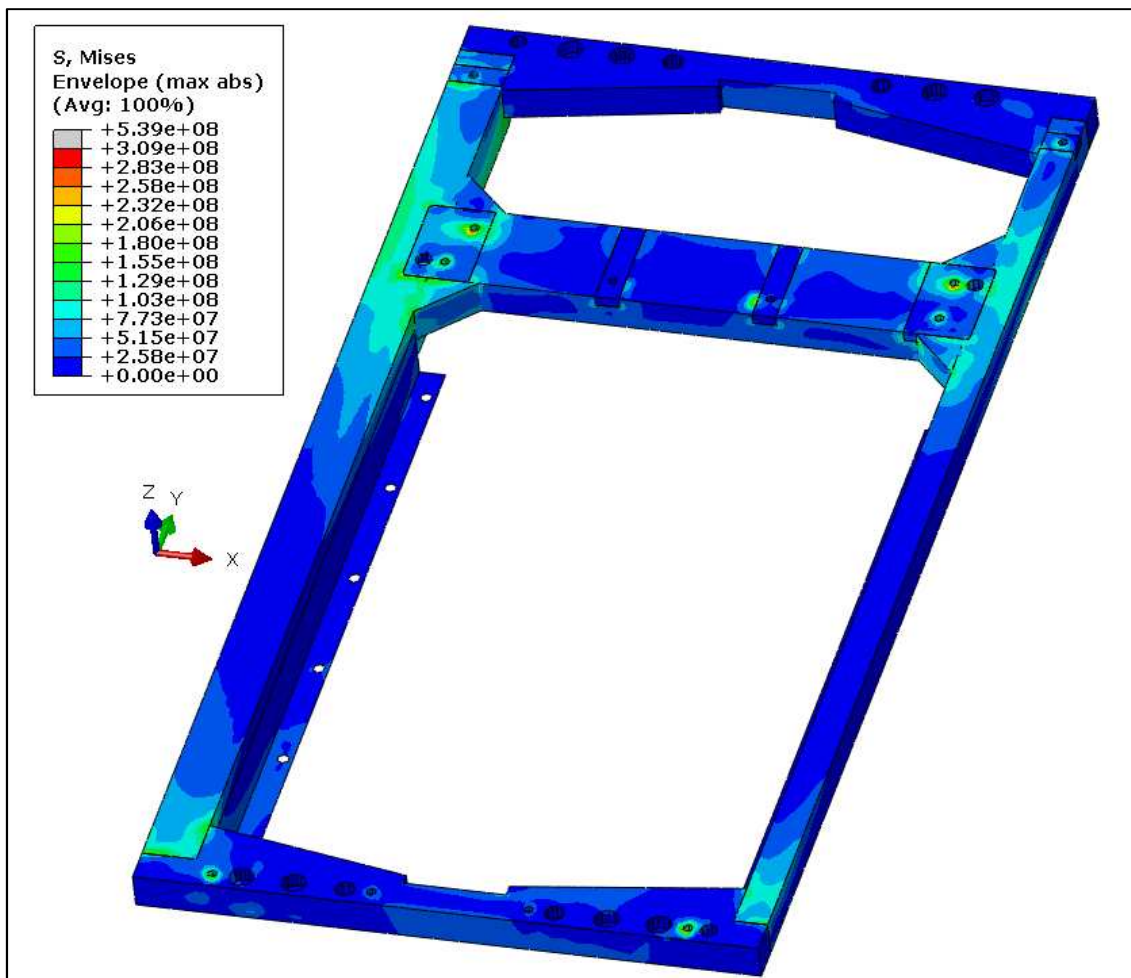


Figura 26 – Caso di carico SHOCK_Y_NEG, Tensione di Von Mises. Involuppo di tutti gli istanti di tempo della risposta ($t = 48$ ms). Vista generale.

8.3.5 SHOCK_Z_POS (Rif. Q Tabella 11)

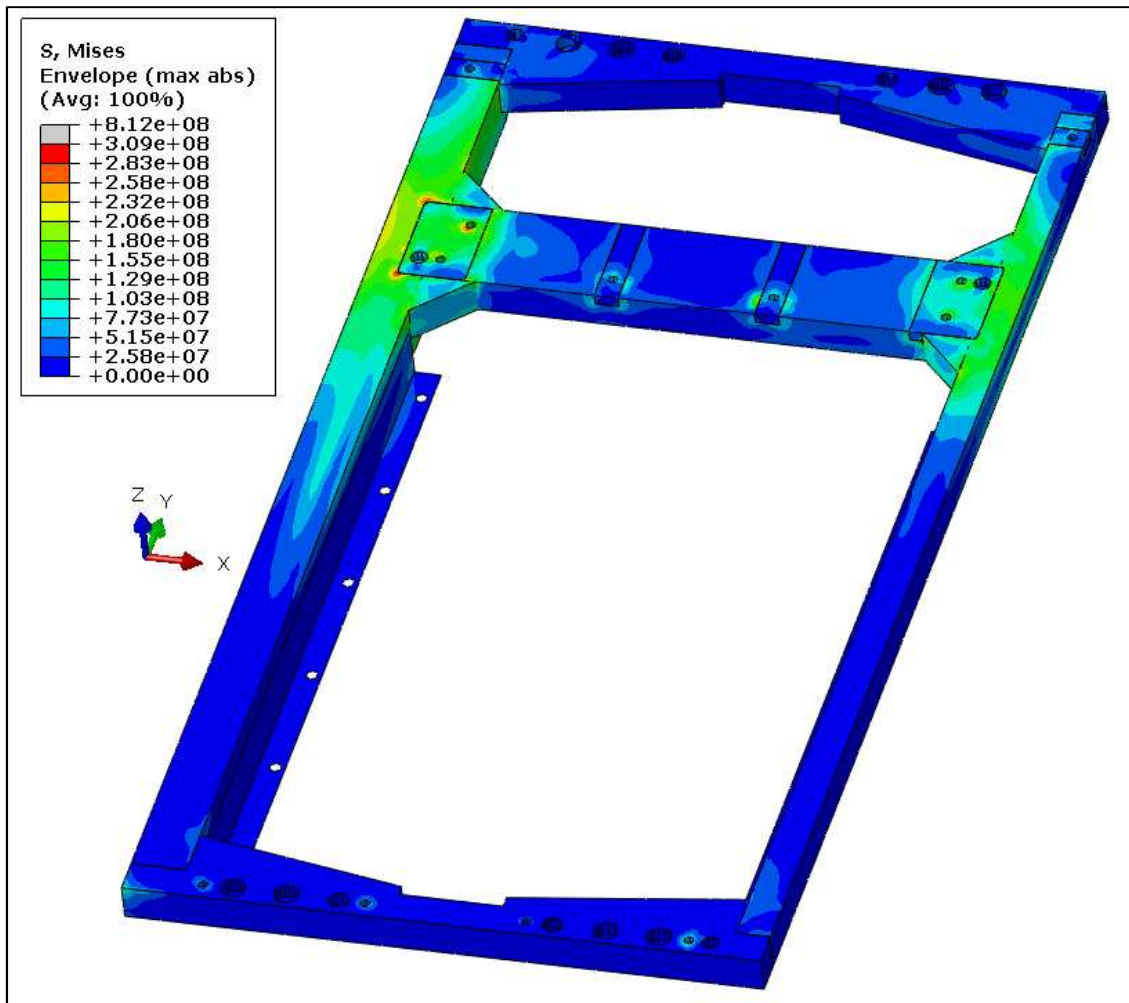


Figura 27 – Caso di carico SHOCK_Z_POS, Tensione di Von Mises. Involuppo di tutti gli istanti di tempo della risposta (t = 45 ms). Vista generale.

8.3.6 SHOCK_Z_NEG (Rif. R Tabella 11)

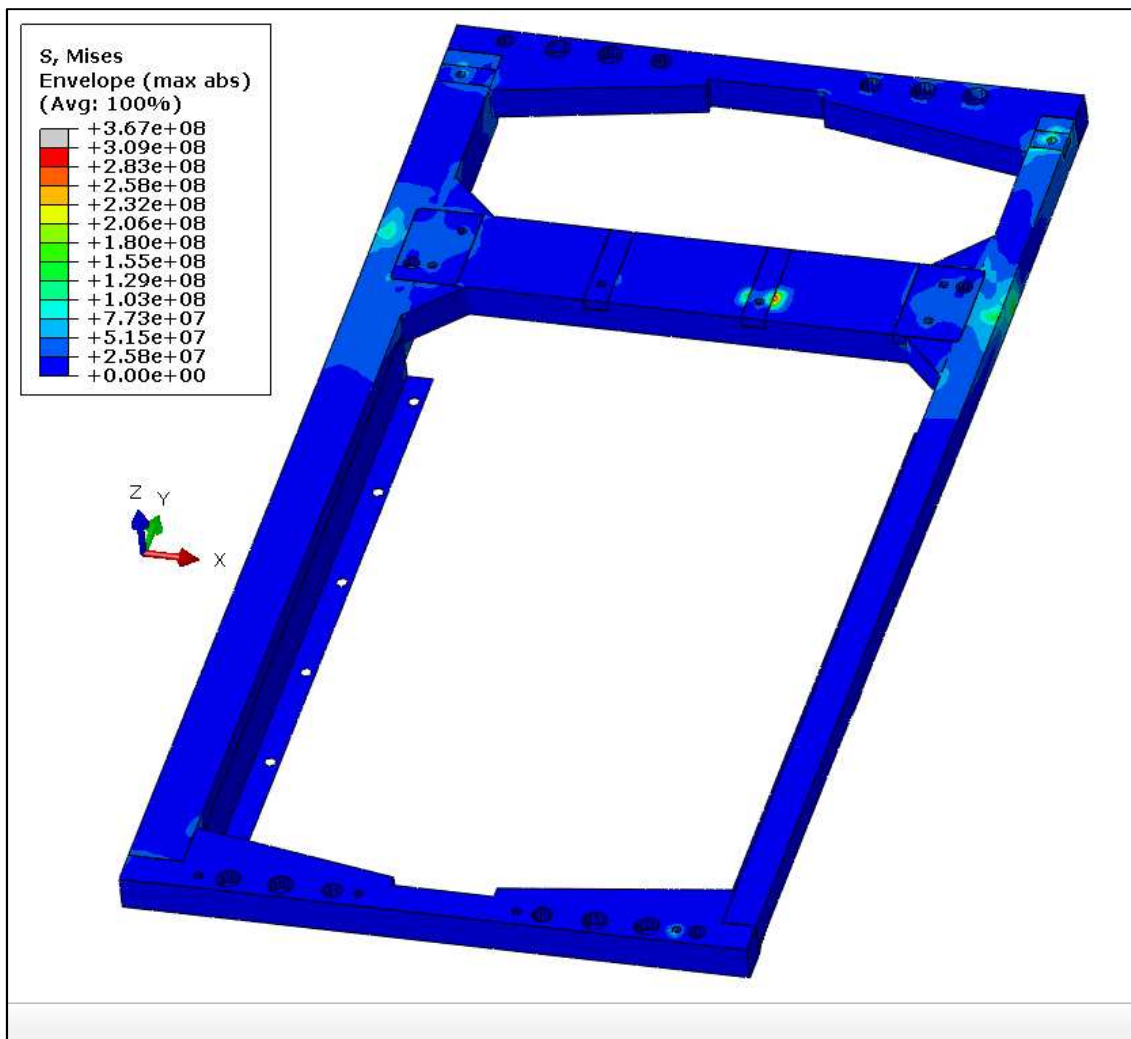


Figura 28 – Caso di carico SHOCK_Z_NEG, Tensione di Von Mises. Involuppo di tutti gli istanti di tempo della risposta ($t = 30$ ms). Vista generale.

8.4 Prova d'invecchiamento, PSD (Rif. T Tabella 11)

Si sono effettuate tramite il programma FE-SAFE le analisi a posteriori dell'analisi d'invecchiamento simulato (seguendo la norma EN61373:2010 e la descrizione del paragrafo 5.4) dell'armatura elettrica. Per effettuare la simulazione di questa prova, c'è bisogno delle curve PSD per ognuna delle 3 direzioni, come viene specificato nella Figura 13. I risultati ottenuti dalla prova d'invecchiamento si esprimono sotto forma di danno. A continuazione si mostrano una serie di immagini con l'involuppo del LogNf ($D = 1/10^{\text{LogNf}}$). I danni ottenuti a partire dalla prova si mostrano in una tabella riassuntiva con i valori massimi ottenuti.

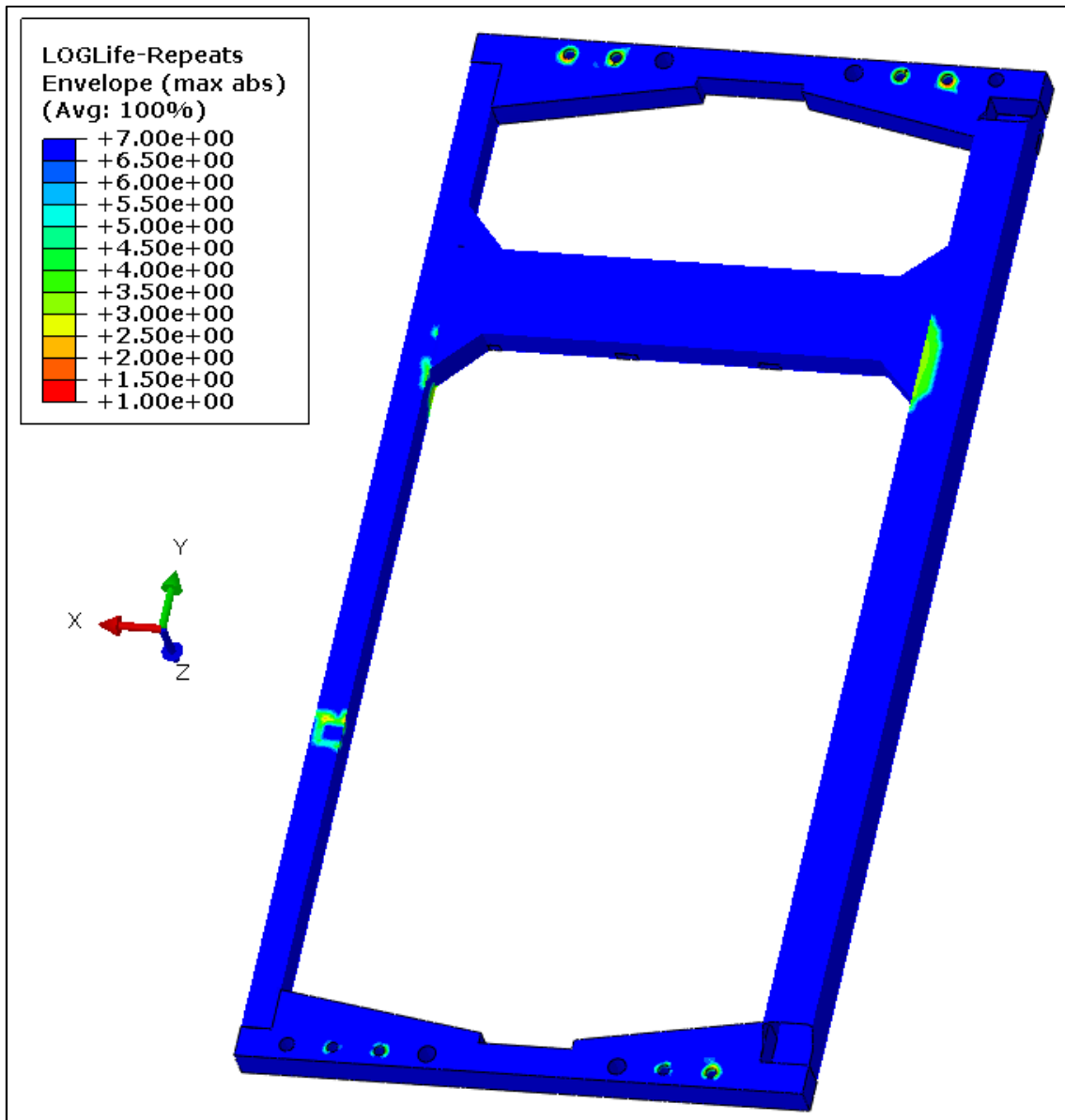


Figura 29 – Prova d'invecchiamento simulato, grafico del LogNf. Vista generale.

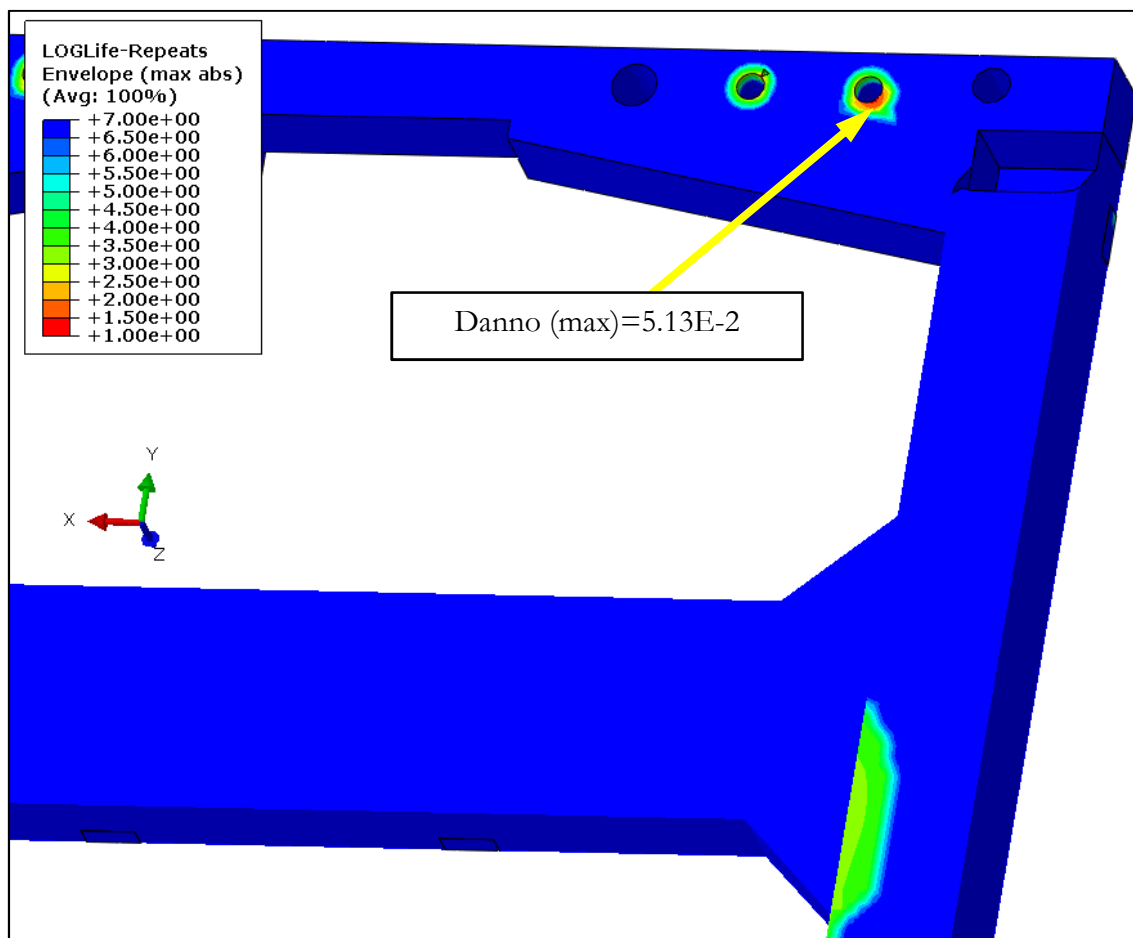


Figura 30 – Prova d'invecchiamento simulato, grafico del LogNf. Vista in dettaglio.

Ref.	Tipo di carico	Condizione di carico	LogNf	Danno
				D
S	Prova d'invecchiamento	PSD. Durata della prova 5h. Tre curve con i livelli di ASD.	1.29	0.0513

Tabella 16 – LogNf e danno per la prova d'invecchiamento.

8.5 Calcolo delle Giunzioni saldate, casi di carico statici (Rif. A, B, C, D, E, F

Tabella 11)

Come descritto nel paragrafo 5.6.1, si analizzano le dieci saldature più sollecitate, con il criterio della massima tensione di Von Mises ottenuta nel materiale base circostante.

A continuazione si mostra una tabella con i valori minimi del margine di sicurezza per ognuna delle giunzioni saldate. Le localizzazioni delle saldature si dettagliano nell'Annesso B.

Saldatura	Caso di carico	Localizzazione	Risultati del calcolo nella condizione estrema	
			MoSWELD,1	MoSWELD,2
01_I_DOBLE_1	Extrema_LC1_E-X5_NEG-W	A	4.79	13.64
03_L_1	Extrema_LC3_E-Z1_POS-W	K	17.96	40.34
04_L_2	Extrema_LC1_E-X5_POS-W	L	20.64	36.52
07_U_1	Extrema_LC3_E-Z1_POS-W	G	20.18	34.09
11_U_5	Extrema_LC1_E-X5_POS-W	G	10.59	24.94

Tabella 17 – Margine di sicurezza per i casi di carico statici delle unioni saldate analizzate.

8.6 Calcolo delle Giunzioni saldate, casi di carico a fatica (Rif. G, H, I, J, K, L Tabella 11)

Seguendo le indicazioni del paragrafo 5.2, le due condizioni di verifica per le membrature (materiale base) a fatica sono le seguenti:

$$\Delta\sigma_{princ} \leq \Delta\sigma_N$$

$$\sigma_{princ_max} \leq \sigma_{N_max}$$

In questo caso, per la verifica delle saldature, la categoria del dettaglio secondo l'Eurocodice è la DC36. Le figure di seguito mostrano le immagini delle tensioni principali massime ed il loro rango corrispondente, visualizzando sempre in ogni nodo l'involuppo dei 6 casi di carico a fatica.

Infine, si mostrano in una tabella riassuntiva i coefficienti di sicurezza più critici calcolati come segue:

$$\eta_{2sold} = \frac{\Delta\sigma_N}{\Delta\sigma_{princ}} \quad \eta_{3sold} = \frac{\sigma_{N_max}}{\sigma_{princ_max}}$$

Le tensioni vengono espresse in **Pa**.

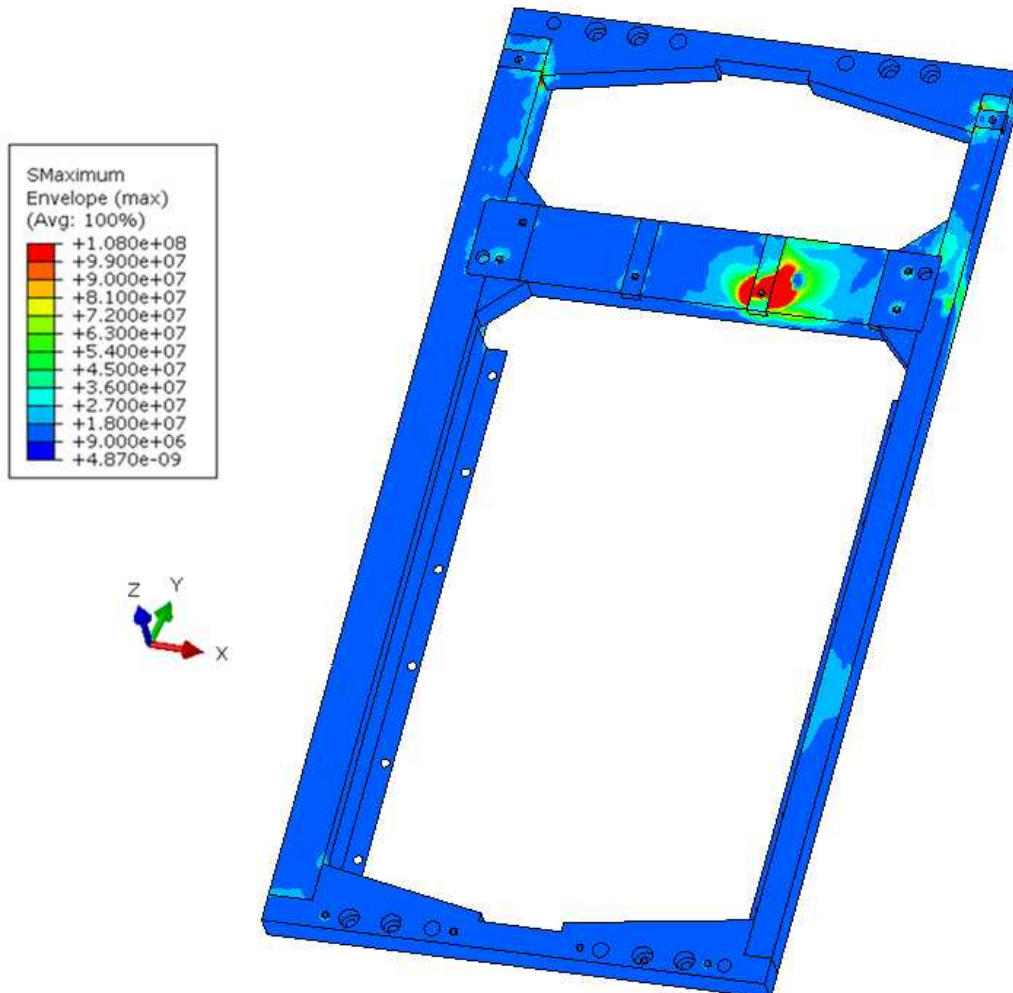


Figura 31 – Involuppo dei casi di carico a fatica, σ_{princ_max} nelle unioni saldate. Vista generale.

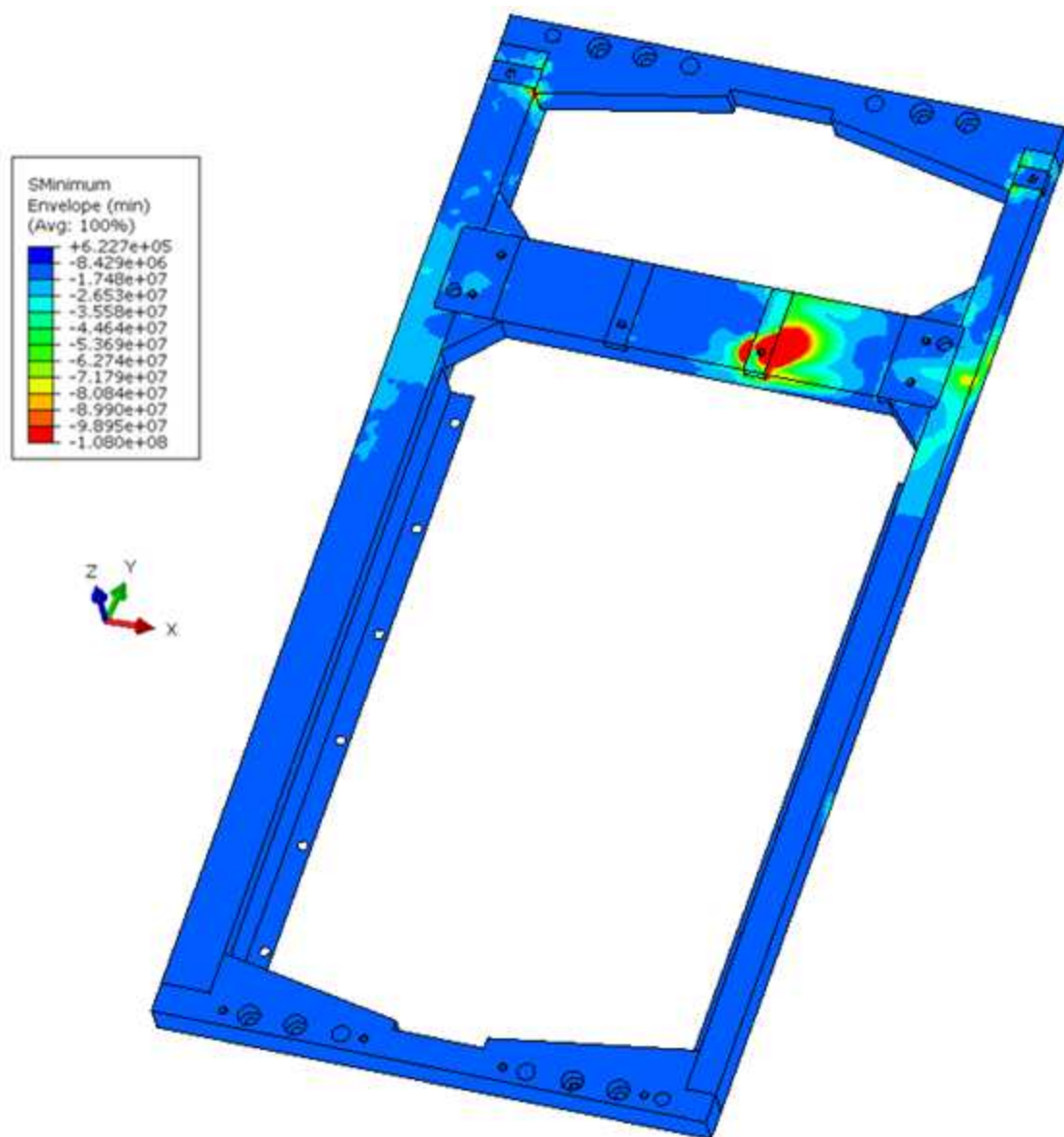


Figura 32 – Involuppo dei casi di carico a fatica, $\sigma_{\text{princ_min}}$ nelle unioni saldate. Vista generale.

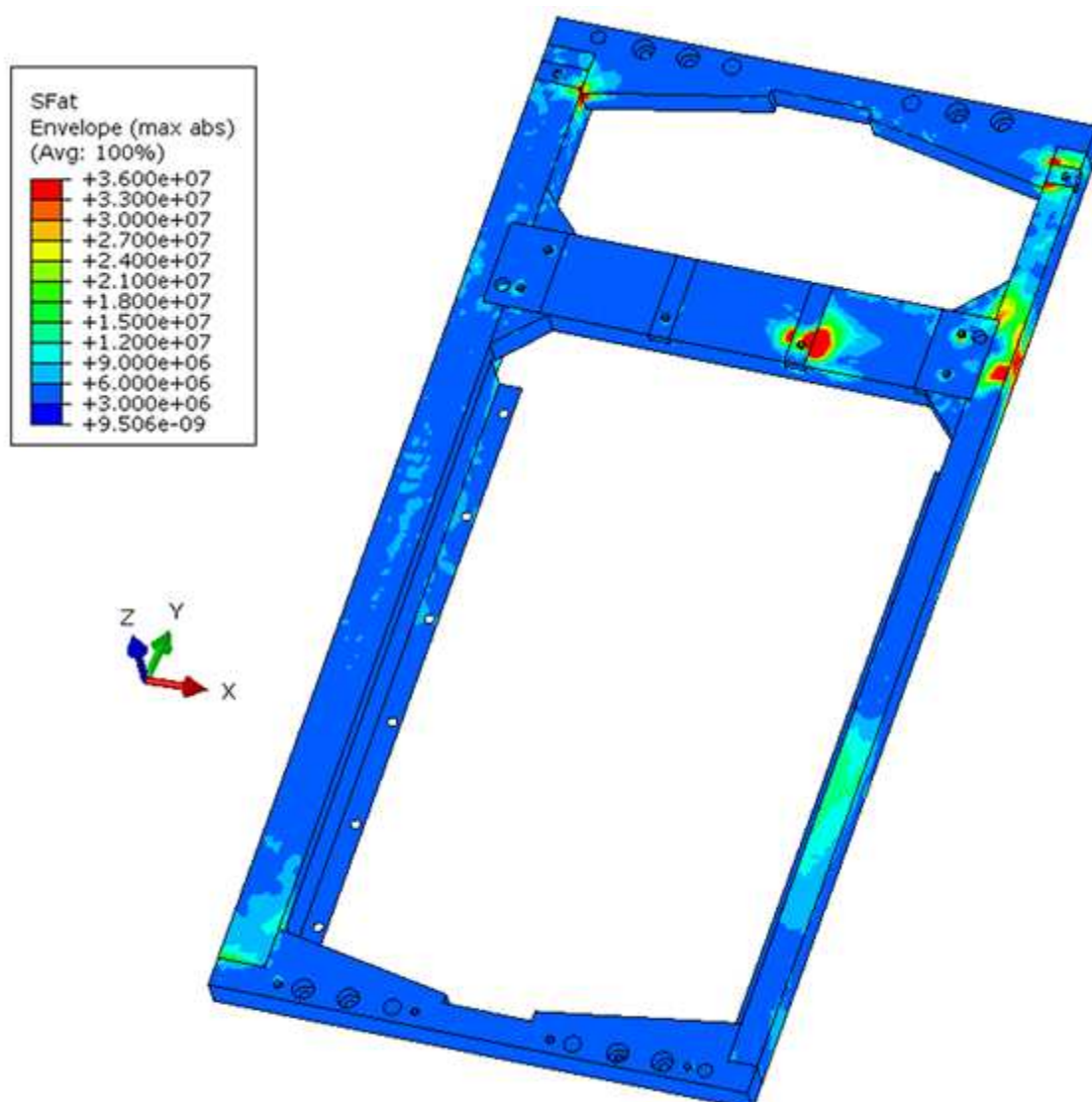


Figura 33 – Involuppo dei casi di carico a fatica, $\Delta\sigma$ nelle unioni saldate. Dettaglio 1.

Tipo di carico	Rif.	Coefficienti di sicurezza	
		η_{2sold}	η_{3sold}
Fatica	G, H, I, J, K, L	1.51	>2

Tabella 18 – Coefficienti di sicurezza per i casi di carico a fatica.

8.7 Reazioni nell'incastro dovute ai carichi statici.

Le reazioni presenti negli incastri si elencano nella seguente tabella, dove le localizzazioni corrispondenti vengono indicate nella figura.

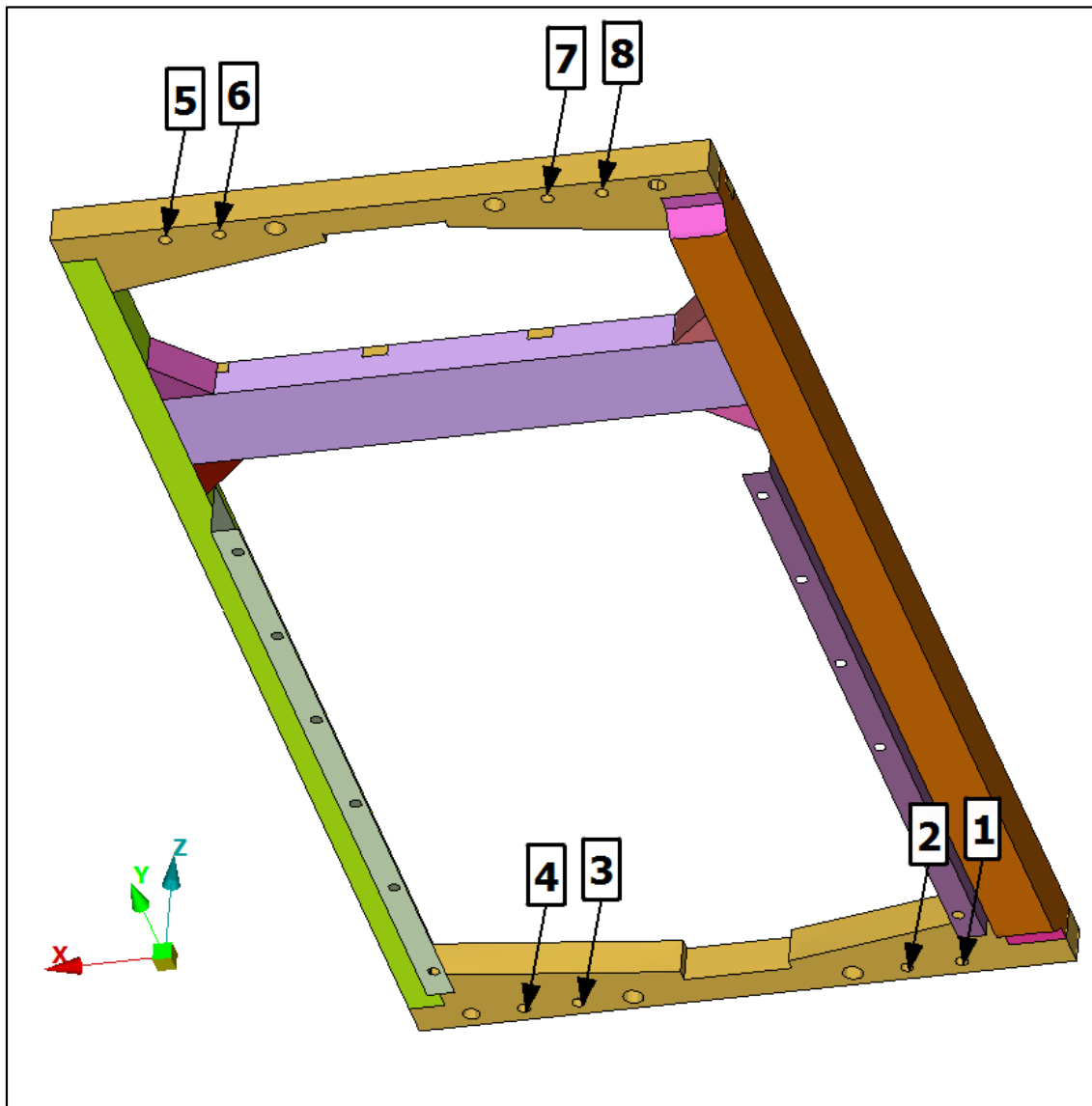


Figura 34 – Dettaglio delle condizioni di contorno applicate nella parte inferiore dei profili verticali.

		Force (N)			Moment (Nm)		
	X-NEG	Force X	Force Y	Force Z	Moment X	Moment Y	Moment Z
A	1	-20600	-418	9660	-22.1	21.2	6.03
	2	-24800	-1080	12500	-37.4	24.6	-25.5
	3	3390	1610	41600	-3.61	-7.12	-1.38
	4	22300	-4450	26600	-37.5	-87.9	-4.88
	5	17100	-2520	19000	-4	-79.6	-16.8
	6	-12600	878	12000	-17.8	37.3	8.5
	7	-29500	4730	4450	25.5	51.8	47.3
	8	-14900	405	13600	58.7	7.01	34.6
	X-POS	Force X	Force Y	Force Z	Moment X	Moment Y	Moment Z
B	1	24100	-3850	77200	145	7.65	-21.8
	2	40700	-2100	14100	29.2	-65.8	18
	3	2830	259	7650	34.6	-9.56	-11.2
	4	-22000	3040	1260	7.1	37.1	14.9
	5	-6650	-62	6510	-14.6	20.6	16.1
	6	10800	-3130	15600	-52.7	-23.7	9.6
	7	28600	-1820	17700	-31.4	-45.5	-26
	8	7360	-7630	73600	-126	-47.4	-2.41
	Y-NEG	Force X	Force Y	Force Z	Moment X	Moment Y	Moment Z
C	1	939	-724	4710	-11.3	-7.18	2.36
	2	2320	217	3360	-9.11	-3.81	2.57
	3	-2050	-1170	1150	4.21	1.1	4.98
	4	-2600	-1400	837	1.66	5.06	-5.33
	5	3030	-1540	2610	3.24	-7.21	-3.51
	6	1990	-2040	1150	-0.0892	-4.97	8.16
	7	-1720	183	1680	0.306	3.58	3.34
	8	-951	-2920	4720	-12.1	-4.94	4.78
	Y-POS	Force X	Force Y	Force Z	Moment X	Moment Y	Moment Z
D	1	-1190	2590	2040	11.2	-1.51	-4.3
	2	-1620	-9	1160	2.6	2.25	-3.71
	3	1660	759	2960	-5.77	-5.82	-3.53
	4	1960	2390	2990	-5.3	-6.84	11.5
	5	-879	3790	522	3.04	0.952	14.7
	6	-1750	293	618	1.3	3.16	-1.54
	7	1280	504	3320	13.7	0.573	-4.04
	8	-193	3370	7560	35.4	-13.2	-3.3

Tabella 19 – Reazioni nell'incastro dovute ai carichi statici (1)

	Z-NEG	Force X	Force Y	Force Z	Moment X	Moment Y	Moment Z
E	1	-436	541	1790	8.32	-0.719	-0.707
	2	-664	-70	762	2.68	0.868	-1.88
	3	219	25	1680	6.29	-0.274	-0.394
	4	614	337	1310	4.65	-2.09	0.816
	5	1480	-366	3810	-10.3	-2.49	-1.34
	6	676	205	4620	-13.7	-4.18	1.41
	7	-932	37	1910	-4.77	2.26	2.04
	8	99	-700	5980	-12.7	-8.78	3.42
	Z-NEG	Force X	Force Y	Force Z	Moment X	Moment Y	Moment Z
F	1	19	-306	2500	-6.23	-3.73	-0.208
	2	684	115	2170	-6.07	-1.44	1.3
	3	-880	27	96	0.673	1.15	0.454
	4	-1180	-838	24	-0.825	2.09	-3.74
	5	2450	-524	3690	10.2	-9.23	-2.57
	6	461	-372	2650	8.82	-3.17	1.34
	7	-329	336	2350	8.71	4.87	0.673
	8	-923	317	5320	21.3	-6.02	3.75

Tabella 20 – Reazioni nell'incastro dovute ai carichi statici (2)

9. RIEPILOGO DEI RISULTATI

Nella Tabella 21 e nella Tabella 24 si mostrano per i casi carico statici ed a fatica rispettivamente, i valori dei coefficienti minimi di sicurezza relativi alle tensioni che affettano il materiale base e le giunzioni saldate, così come i fattori di riserva inversa per le giunzioni bullonate. Nella Tabella 22, si mostrano per i casi di carico d'impatto i valori dei coefficienti di sicurezza minimi relativi alle tensioni che influenzano il materiale base. Infine, nella Tabella 23, si mostrano i valori del danno per il caso della prova d'invecchiamento.

I calcoli dei coefficienti di sicurezza η , danno ed IRF (fattori di riserva inversi) si sono appoggiati alle seguenti relazioni:

– $\eta_1 = \sigma_{adm} / \sigma_{vm}$ (questa relazione si applica per le condizioni di carico statiche della tabella 6, i quali riferimenti sono **A, B, C, D, E e F** e per i casi di carico d'impatto: **M, N, O, P, Q, R**).

– $\eta_{2mb} = \Delta \sigma_N / \Delta \sigma_{princ}$ e $\eta_{3mb} = \sigma_{Nmax} / \sigma_{princ_max}$ (questa relazione si applica tanto al materiale base quanto alle saldature per le condizioni di carico a fatica della tabella 6, i quali riferimenti sono: **G, H, I, J, K, L**).

– $\eta_{2sold} = \Delta \sigma_N / \Delta \sigma_{princ}$ e $\eta_{3sold} = \sigma_{Nmax} / \sigma_{princ_max}$ (queste relazioni si applicano tanto al materiale base quanto alle saldature per le condizioni di carico a fatica della tabella 6, i quali riferimenti sono: **G, H, I, J, K, L**).

– **D** (Per il caso della prova d'invecchiamento accelerato, il risultato si esprime come danno, tabella 7, Rif. T).

–MS₁: (questa relazione si applica nel caso delle giunzioni saldate per le condizioni di carico statiche della tabella 7, i quali riferimenti sono: **A, B, C, D, E e F**).

–MS₂: (questa relazione si applica nel caso delle giunzioni saldate per le condizioni di carico statiche della tabella 7, i quali riferimenti sono: **A, B, C, D, E e F**).

Rif.	Tipo di carico	Condizioni di carico	Coefficiente di sicurezza di riferimento		
			η_1	MS1	MS2
A	Statico	LC1_E-X5_POS accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore 5g + accelerazione della gravità.	1.29	4.79	>10
B		LC1_E-X5_NEG accelerazione applicata in direzione longitudinale di valore -5g + accelerazione della gravità.	1.37	>10	>10
C		LC2_E-Y1_POS accelerazione applicata in direzione trasversale di valore 1g + accelerazione della gravità.	>2	>10	>10
D		LC2_E-Y1_ accelerazione applicata in direzione trasversale di valore -1g + accelerazione della gravità.	>2	>10	>10
E		LC3_E-Z1_POS accelerazione applicata in direzione verticale di valore -2.25g	>2	>10	>10
F		LC3_E-Z1_NEG accelerazione applicata in direzione verticale di valore -0.25g	>2	>10	>10

Tabella 21 – Coefficienti di sicurezza per i casi di carico statici.

Rif.	Tipo di carico	Condizioni di carico	Coefficiente di sicurezza
			η_1
M	Impatto	SHOCK_X_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 50g	1.07
N		SHOCK_X_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -50g	1.05
O		SHOCK_Y_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 30g	1.09
P		SHOCK_Y_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -30g	1.09
Q		SHOCK_Z_POS impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore 30g	1.20
R		SHOCK_Z_NEG impulso semisinusoidale di 30 millisecondi di valore -30g	1.07

Tabella 22 - Coefficienti di sicurezza per i casi di carico d'impatto.

Rif.	Tipo di carico	Condizioni di carico	LogNf	Danno
				D
S	Prova d'invecchiamento	PSD. Durata della prova 5h. Tre curve con i livelli di ASD. Vedi tabella e figura	1.29	5.13E-02

Tabella 23 – Coefficienti di sicurezza per la prova d'invecchiamento.

Tipo di carico	Rif.	Coefficiente di sicurezza			
		η_{2mb}	η_{2sold}	η_{3mb}	η_{3sold}
Fatica	G, H, I, J, K, L	1.51	1.51	1.83	>2

Tabella 24 - Coefficienti di sicurezza per i casi di carico a fatica.

10. CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati espressi, la progettazione della struttura dell'armatura **APS/MV** si adegua ai requisiti delle norme raccolte nel paragrafo 2.1, che vengono impiegate in questa analisi.

ANNESSO A. Verifiche qualitative.

A.1 Verifica delle reazioni.

Si vuole verificare che introducendo un carico esterno (1g) in ognuno dei tre assi, le forze di reazione che si ottengono nel modello siano le stesse.

Direzione del carico	Massa totale [Kg]	Reazione teorica [N]	Somma delle reazioni in X [N]	Somma delle reazioni in Y [N]	Somma delle reazioni in Z [N]	
Asse X	2294.3	-22507.083	-22515	6.1213E-09	-1.5673E-10	OK
Asse Y			-2.3887E-09	-22515	3.1057E-09	OK
Asse Z			1.3992E-09	-4.5961E-10	-22515	OK

Tabella 25 – Verifica delle reazioni.

A.2 Equilibrio d'energia.

Nella tabella successiva si mostra la verifica dell'equilibrio dell'energia.

Direzione del carico	Lavoro esterno (EW) [J]	E totale (ET) [J]	Equilibrio energia (EB) [J]	E equilibrio permesso (EBa) (0.01Etotal/100) [J]	ϵ (EB/EW) (-)	ϵ permesso (-)	
X Axis	0.346019	0.346019	-1.37E-10	3.46019E-05	-3.96916E-10	<1E-6	OK
Y Axis	0.104768	0.104768	-3.49E-12	1.04768E-05	-3.33102E-11	<1E-6	OK
Z Axis	1.96E-02	1.96E-02	-4.47E-13	1.95956E-06	-2.28241E-11	<1E-6	OK

Tabella 26 – Equilibrio d'energia.

A.3 Verifica dei modi propri di vibrazione.

Si vuole verificare tramite il calcolo “Free-Free” (senza nessun tipo di vincolo) dei modi propri che i primi 6 modi propri sono quelli di un solido rigido e con una frequenza propria vicina allo zero.

N° modo	Autovalore	Frequenza (RAD/tempo)	Frequenza (Cicli/Tempo)	Massa generalizzata
1	0.0000	0.0005	0.0001	3089.4
2	0.0000	0.0006	0.0001	3089.9
3	0.0000	0.0010	0.0002	2294.6
4	1.2741	1.1288	0.17965	343.06
5	6.8065	2.6089	0.41522	335.84
6	9.9822	3.1595	0.50284	314.04
7	4276.7	65.397	10.408	341.92

Tabella 27 – Modi propri e autovalori.

ANNESSO B. Mappa delle giunzioni saldate analizzate

A continuazione si mostrano una serie di figure che identificano le giunzioni saldate analizzate nei paragrafi 8.5 e 8.6.

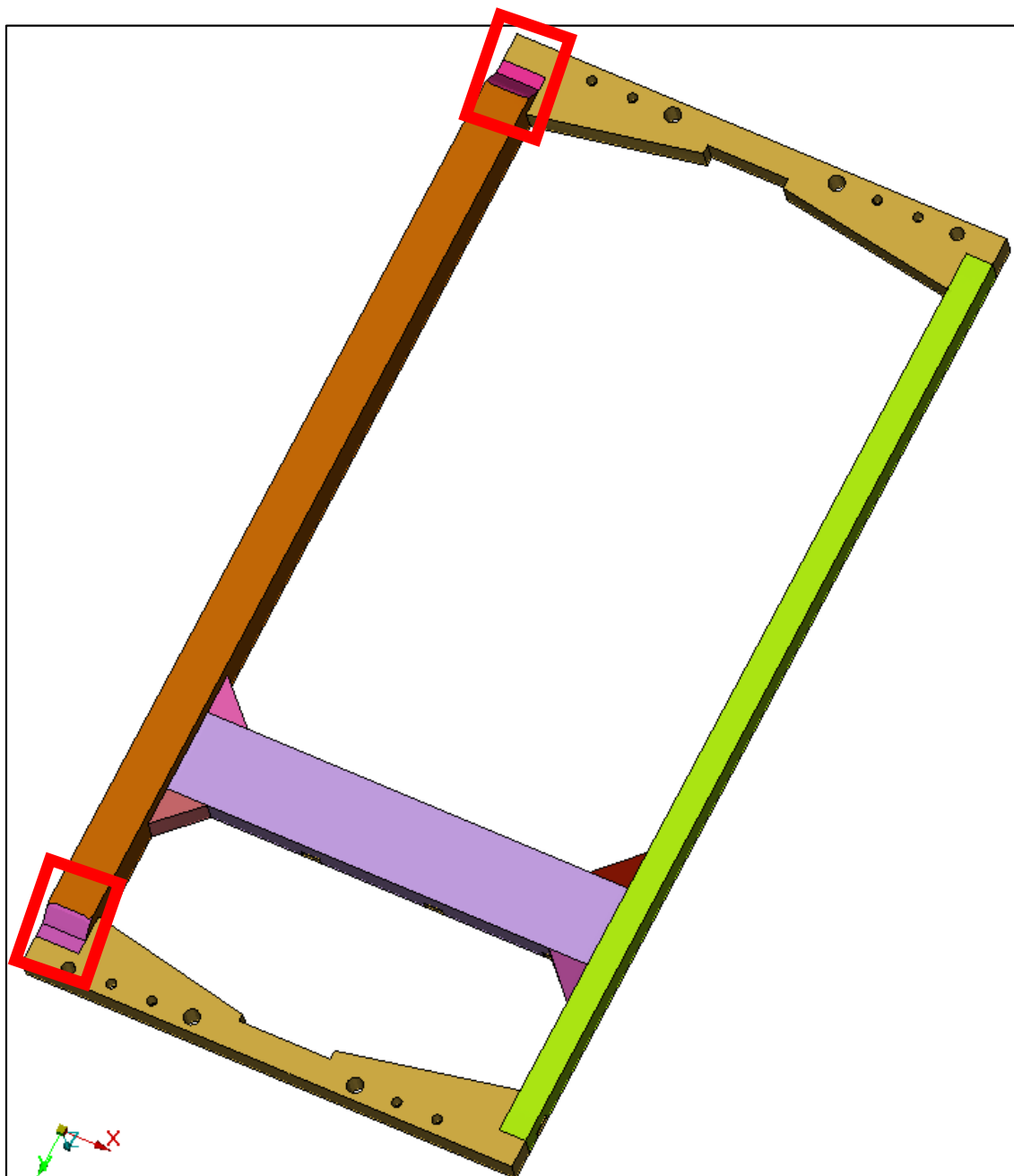


Figura 35 – Saldature 01_I_DOBLE_1 e 01_I_DOBLE_2

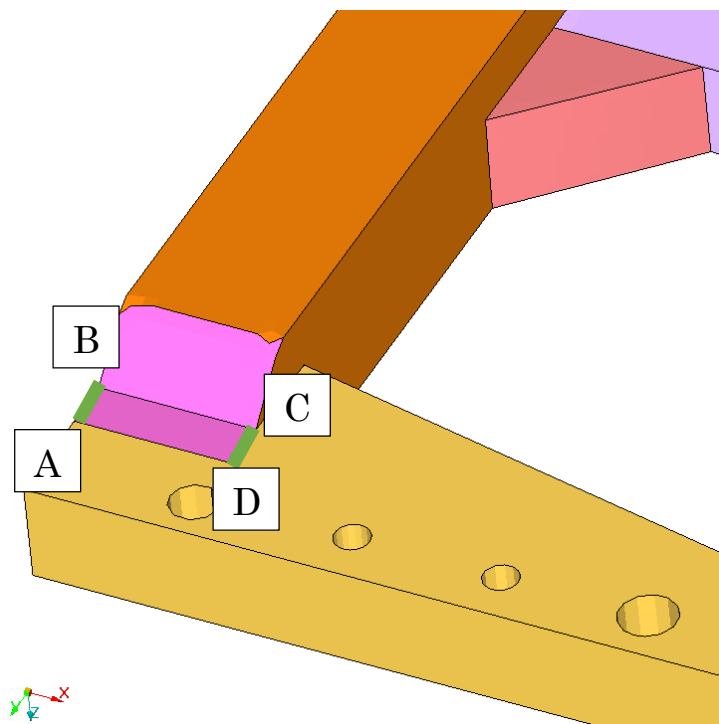


Figura 36 – Saldatura 01_I_DOBLE_1

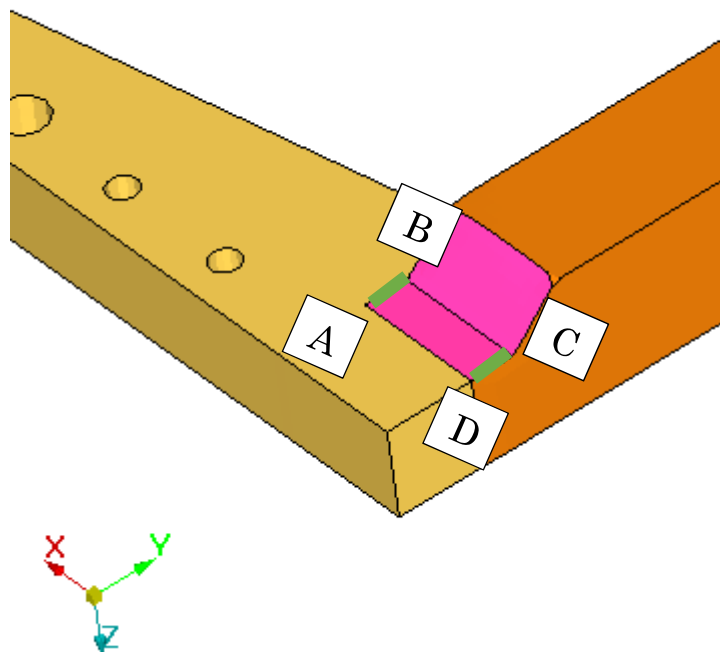


Figura 37 – Saldatura 01_I_DOBLE_2

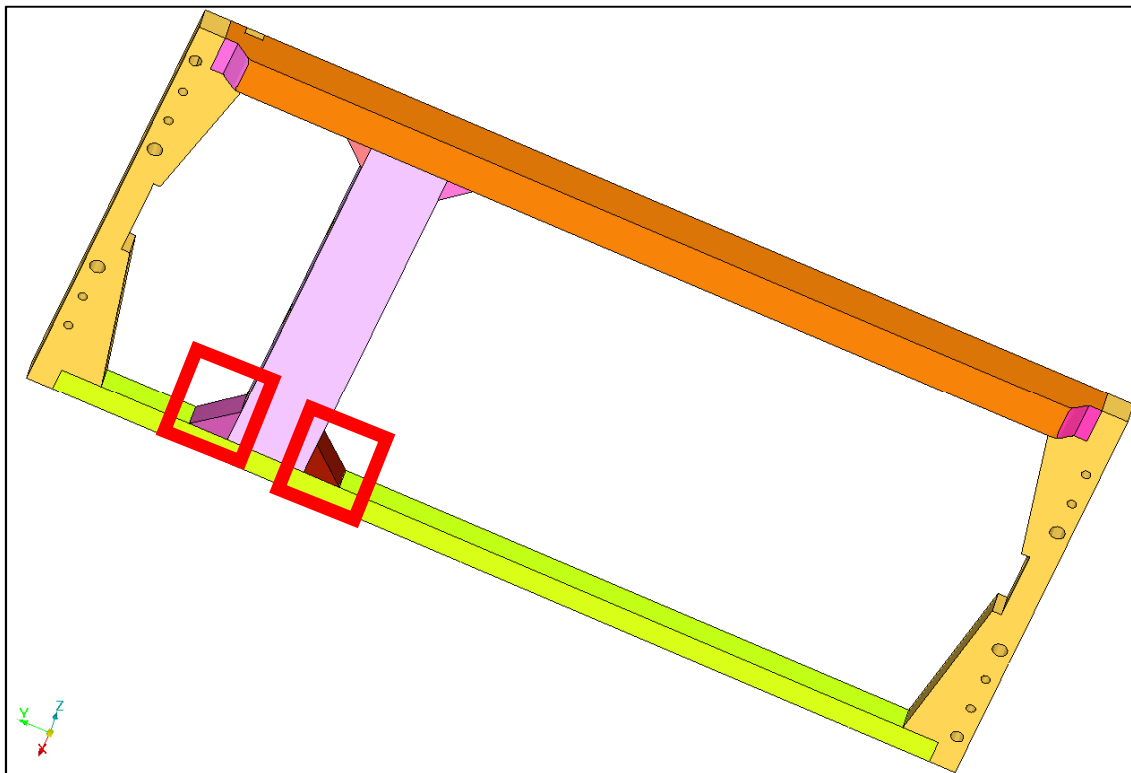


Figura 38 – Saldature 03_L_1 e 04_L_2

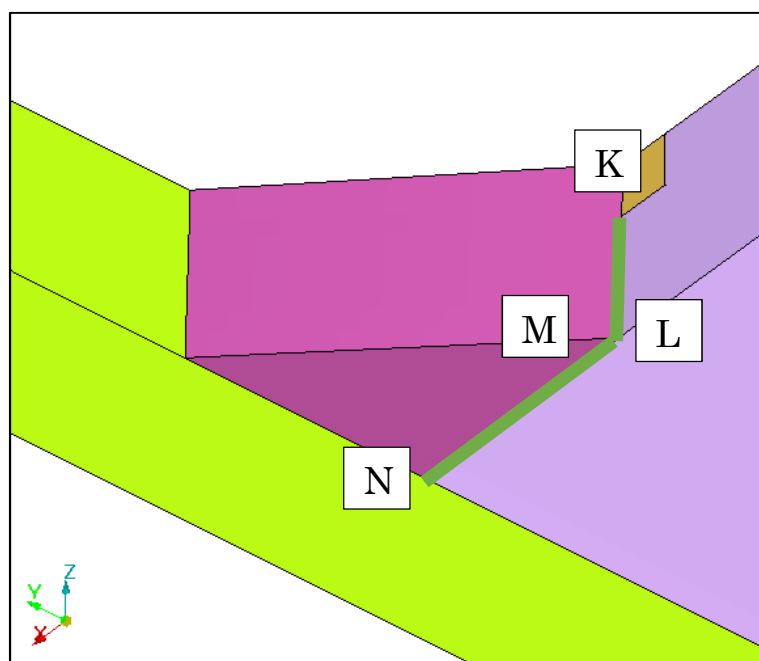


Figura 39 – Saldatura 03_L_1

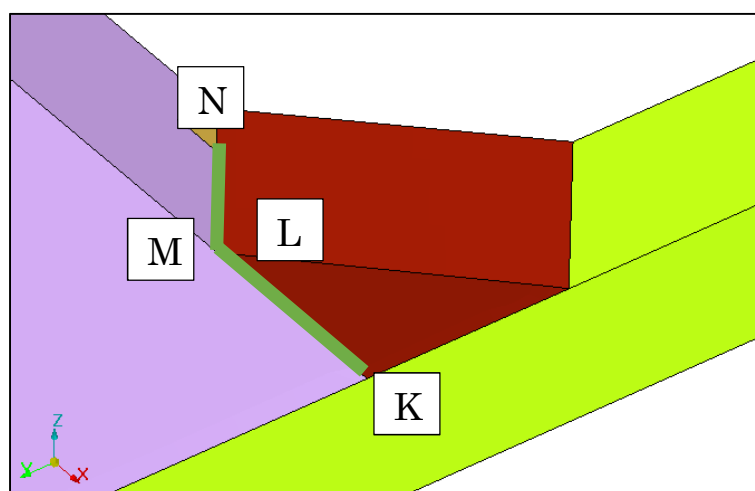


Figura 40 – Saldatura 04_L_2

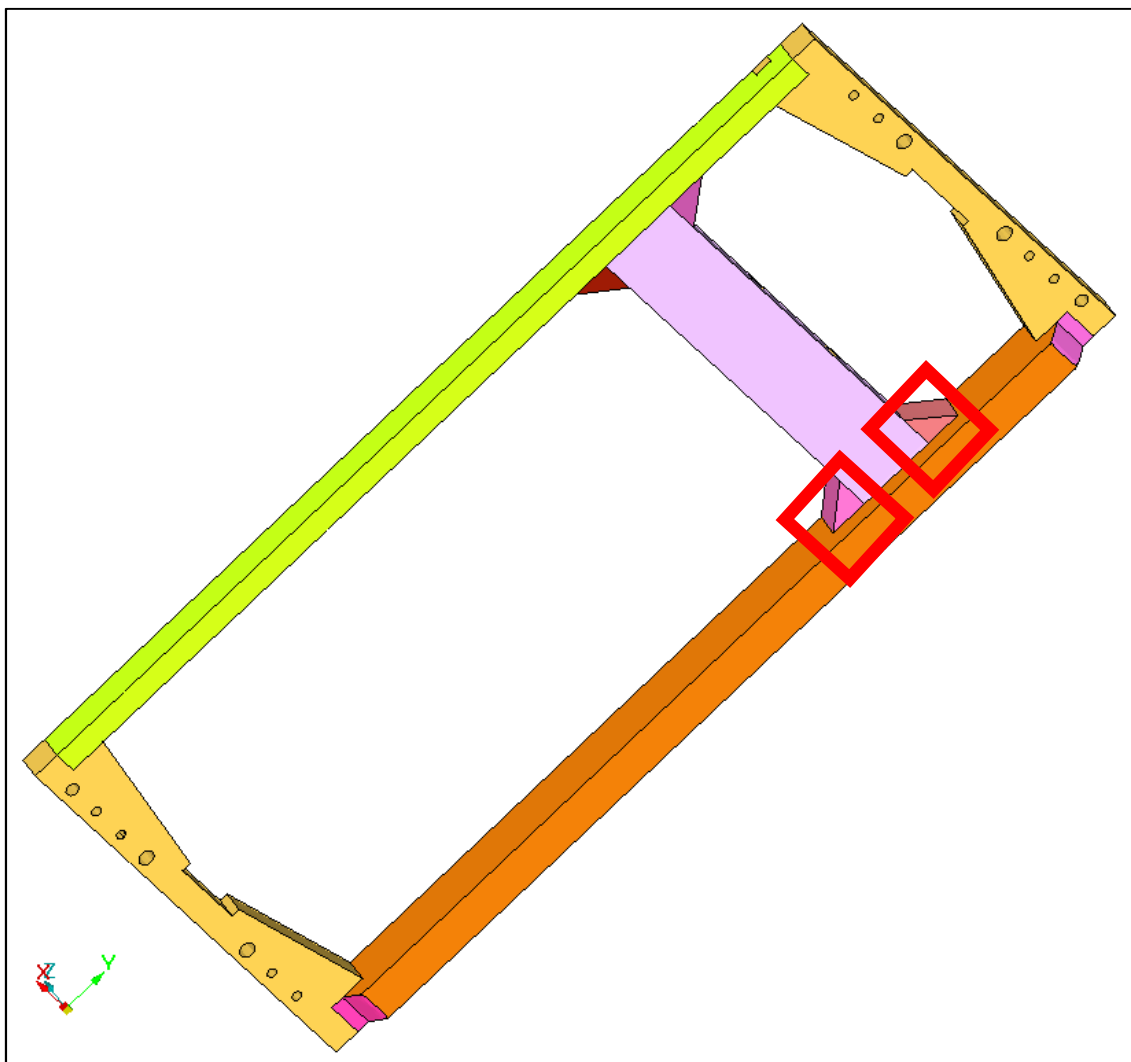


Figura 41 – Saldature 05_L_3 e 06_L_4

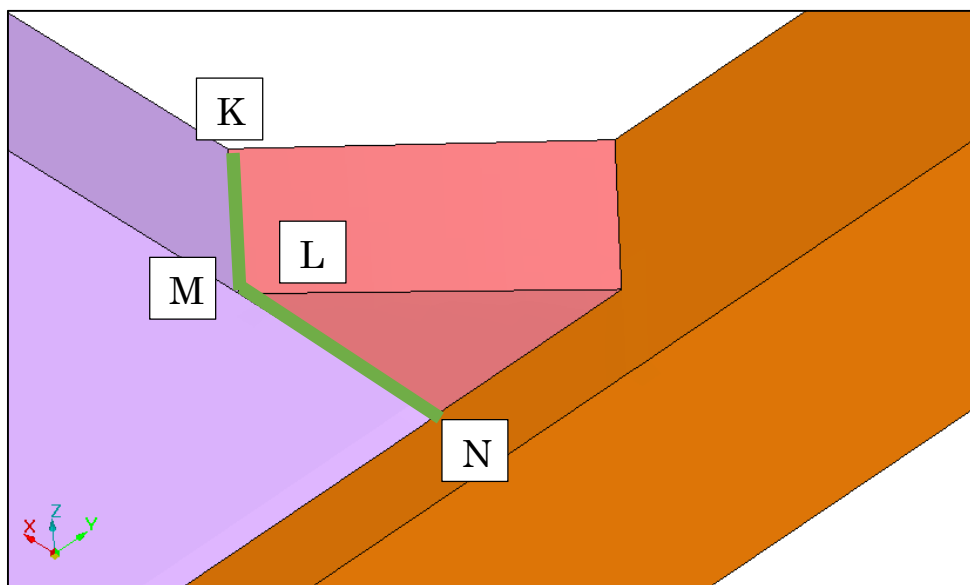


Figura 42 – Saldatura 05_L_3

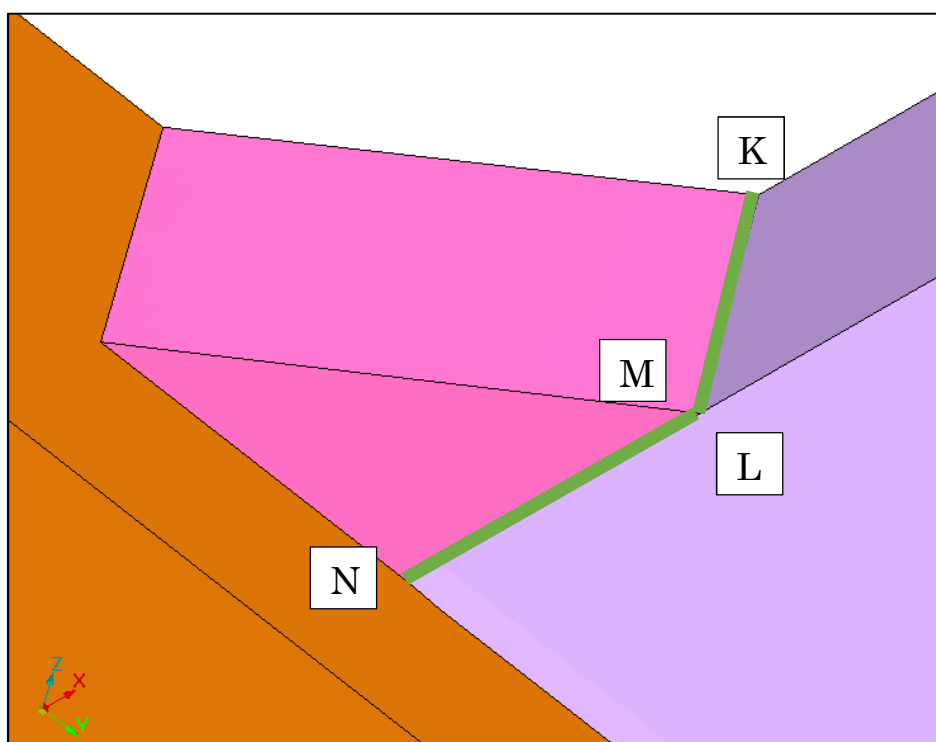


Figura 43 – Saldatura 06_L_4

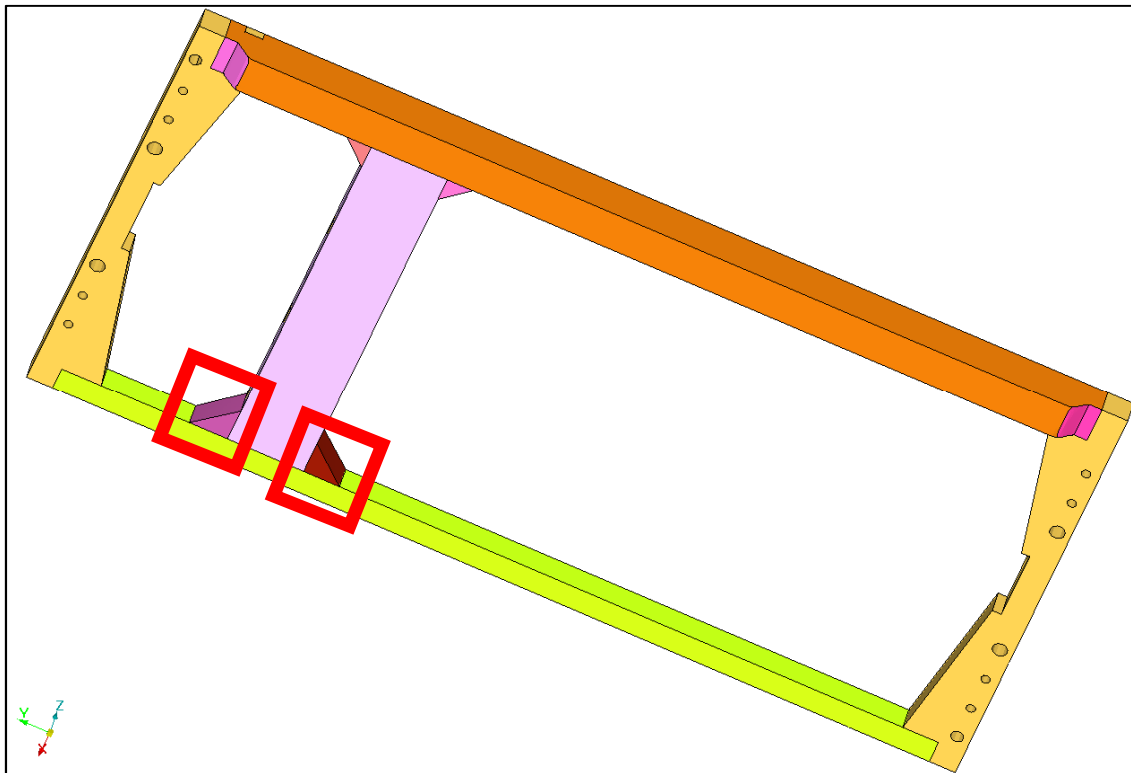


Figura 44 – Saldature 07_U_1 e 08_U_2

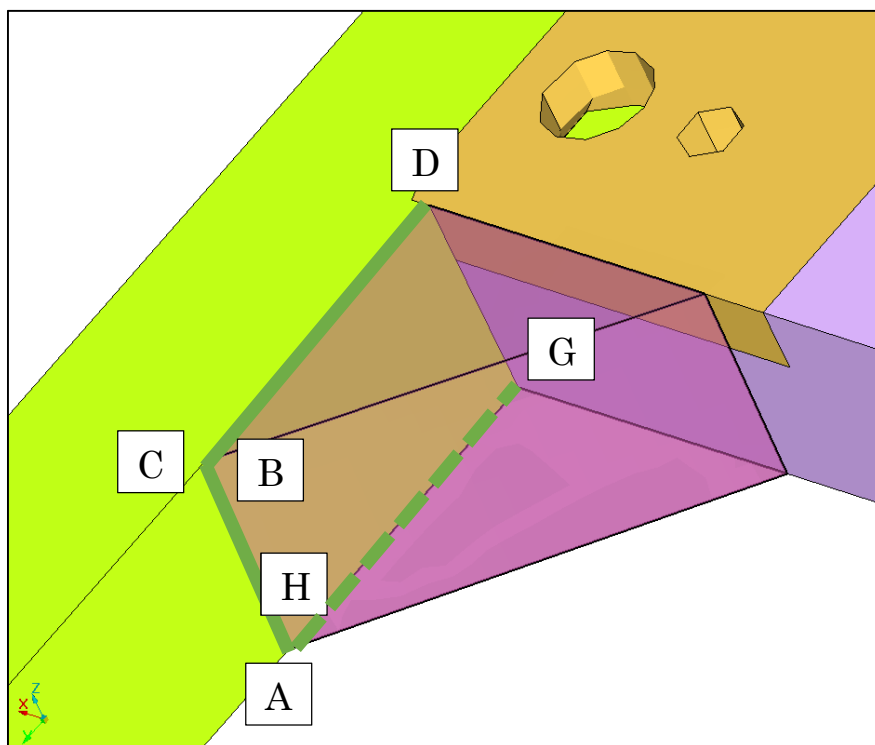


Figura 45 – Saldatura 07_U_1

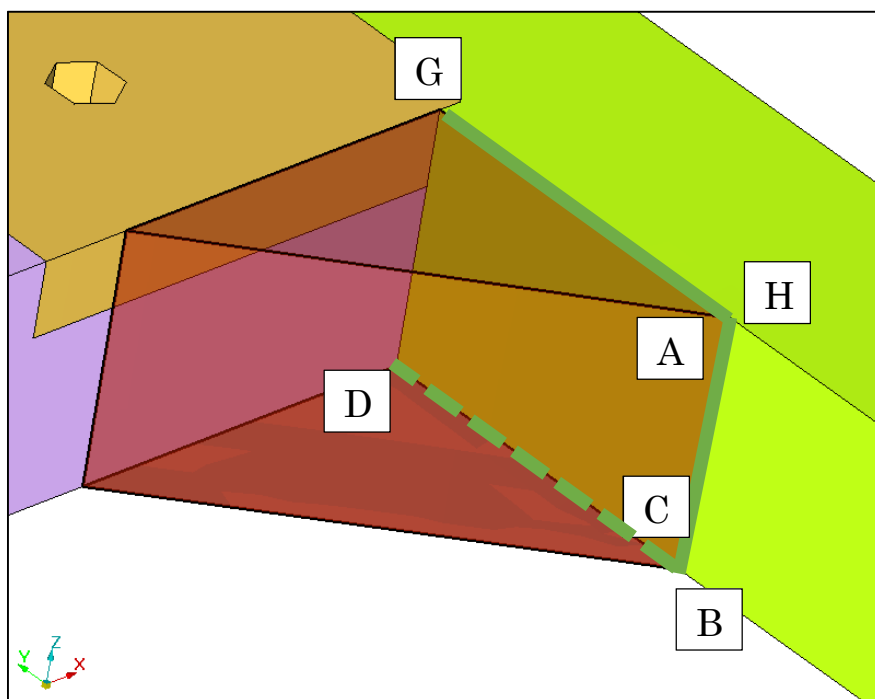


Figura 46 – Saldatura 08_U_2

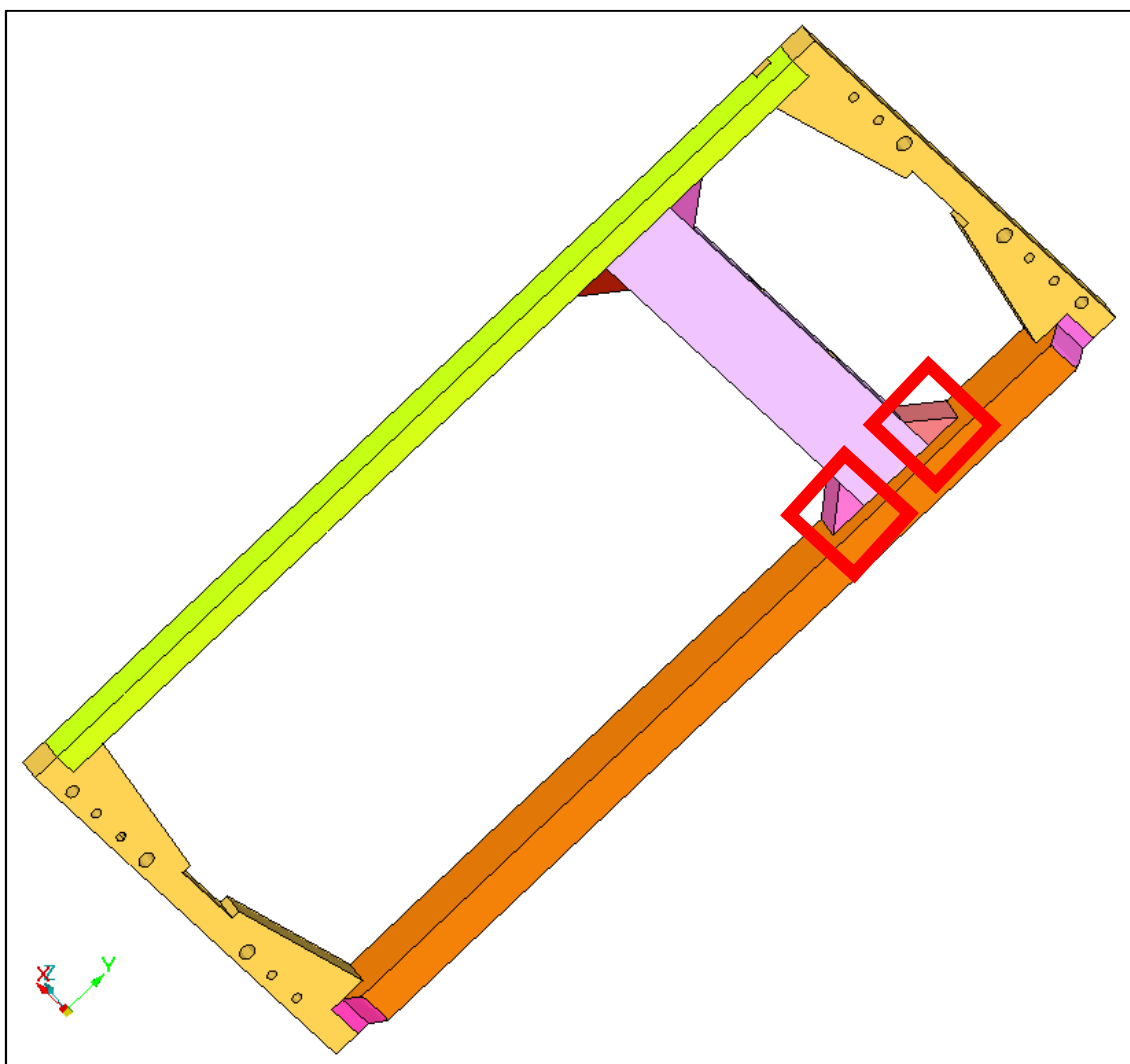


Figura 47 – Saldature 09_U_3 e 10_U_4

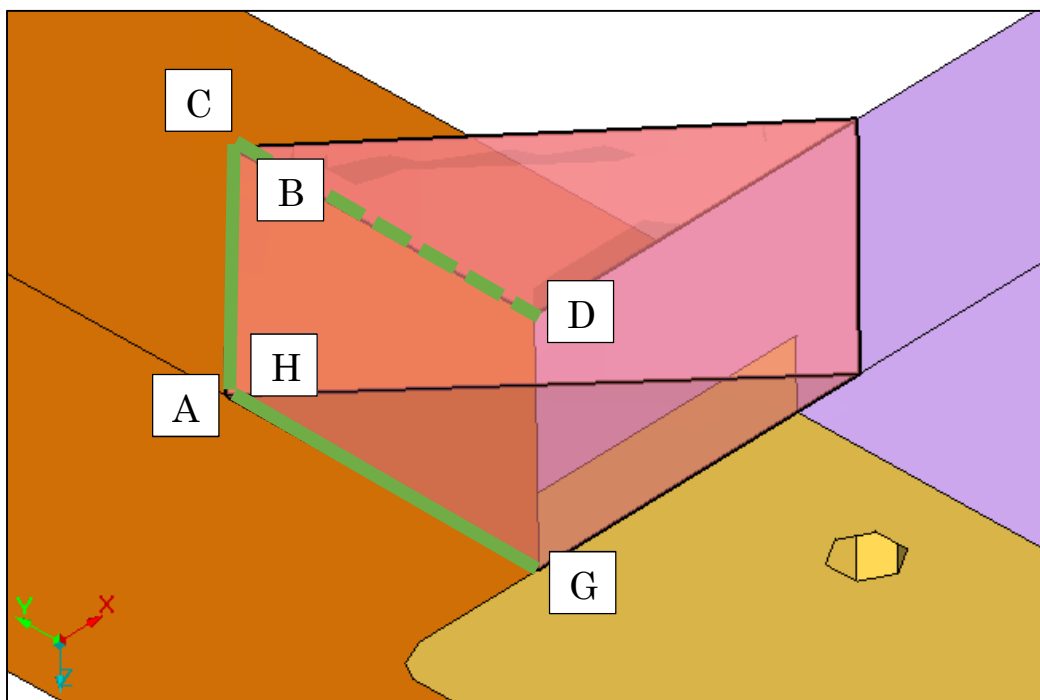


Figura 48 – Saldatura 09_U_3

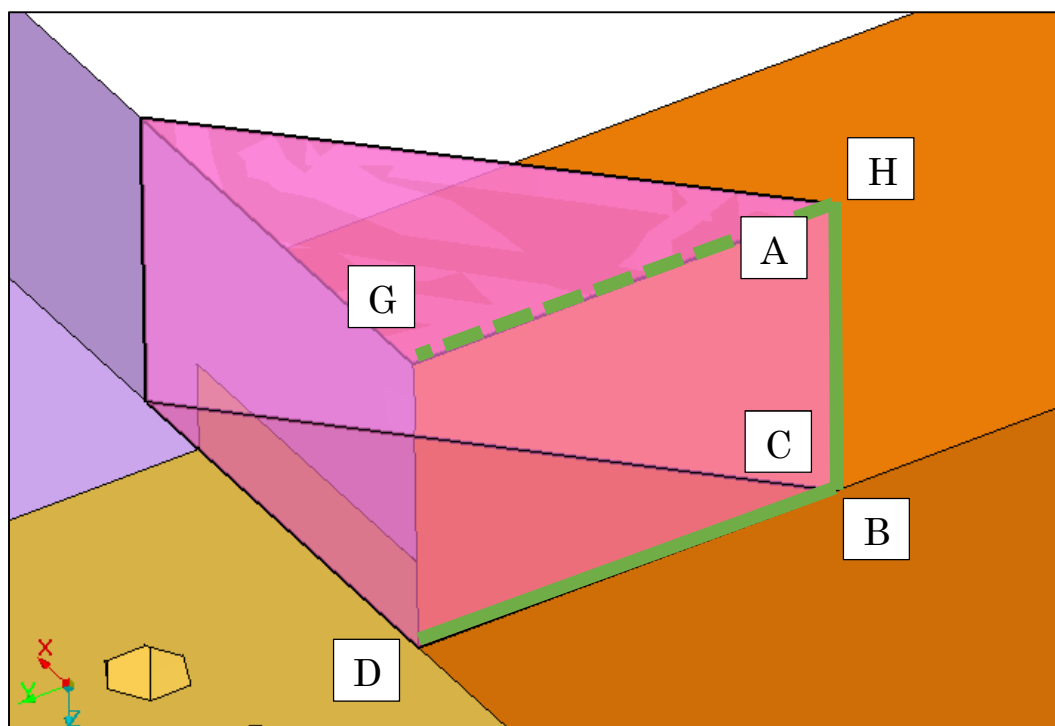


Figura 49 – Saldatura 10_U_4

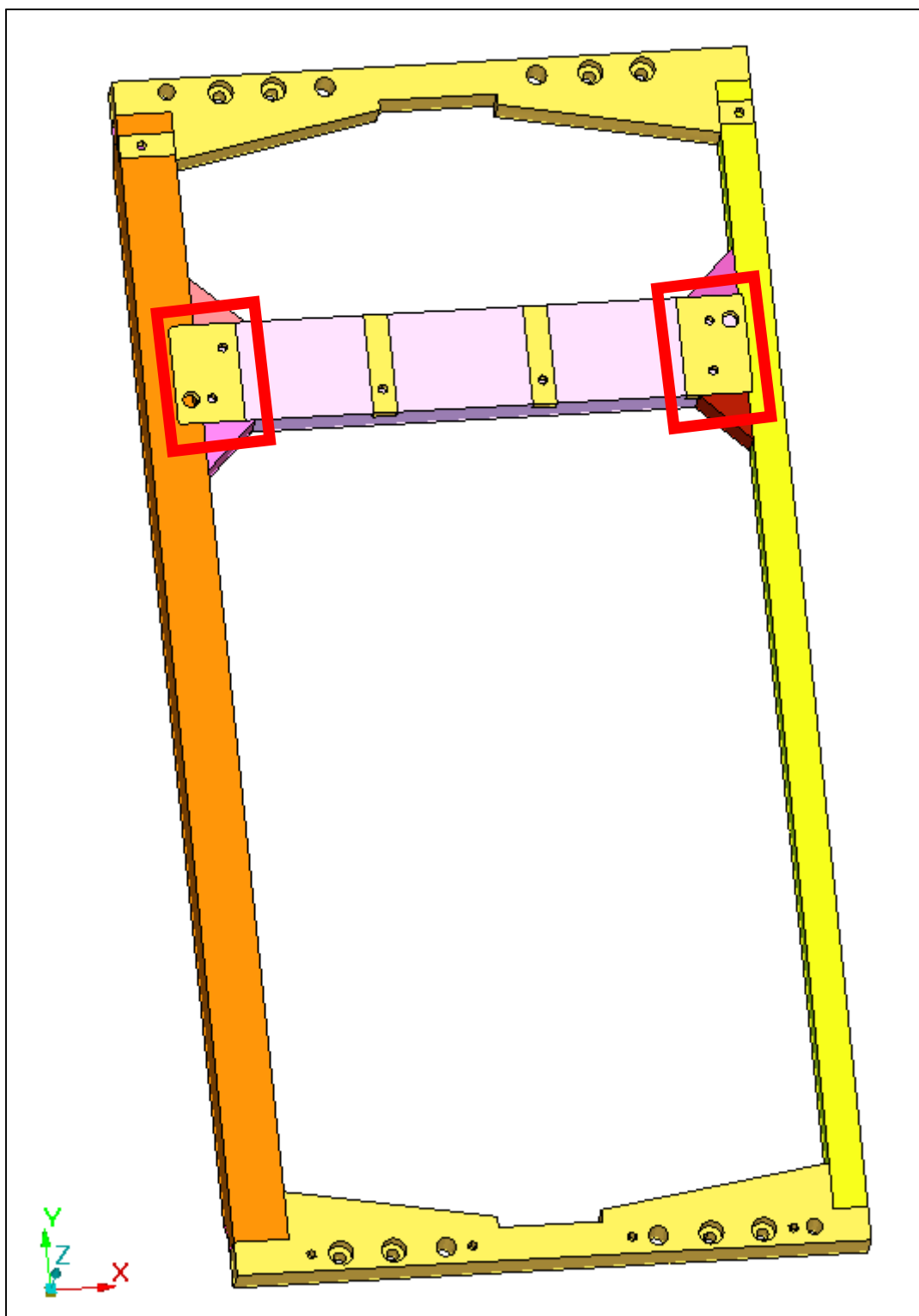


Figura 50 – Saldature 11_U_5 e 12_U_6

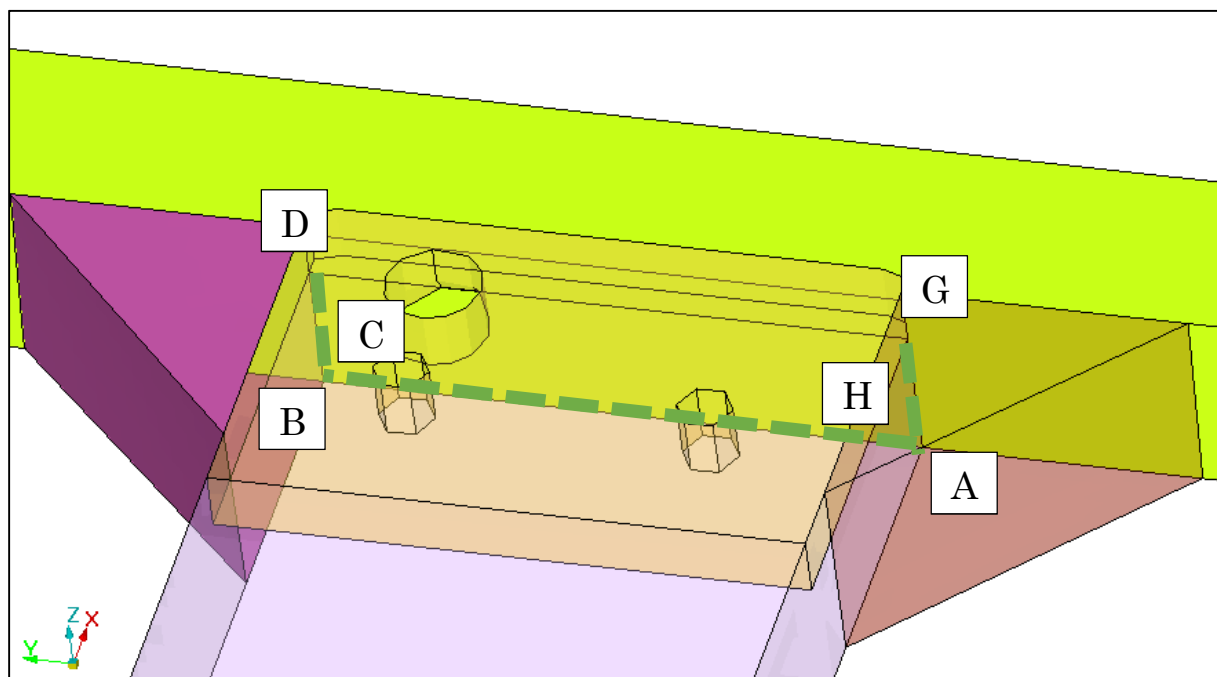


Figura 51 – Saldatura 11_U_5

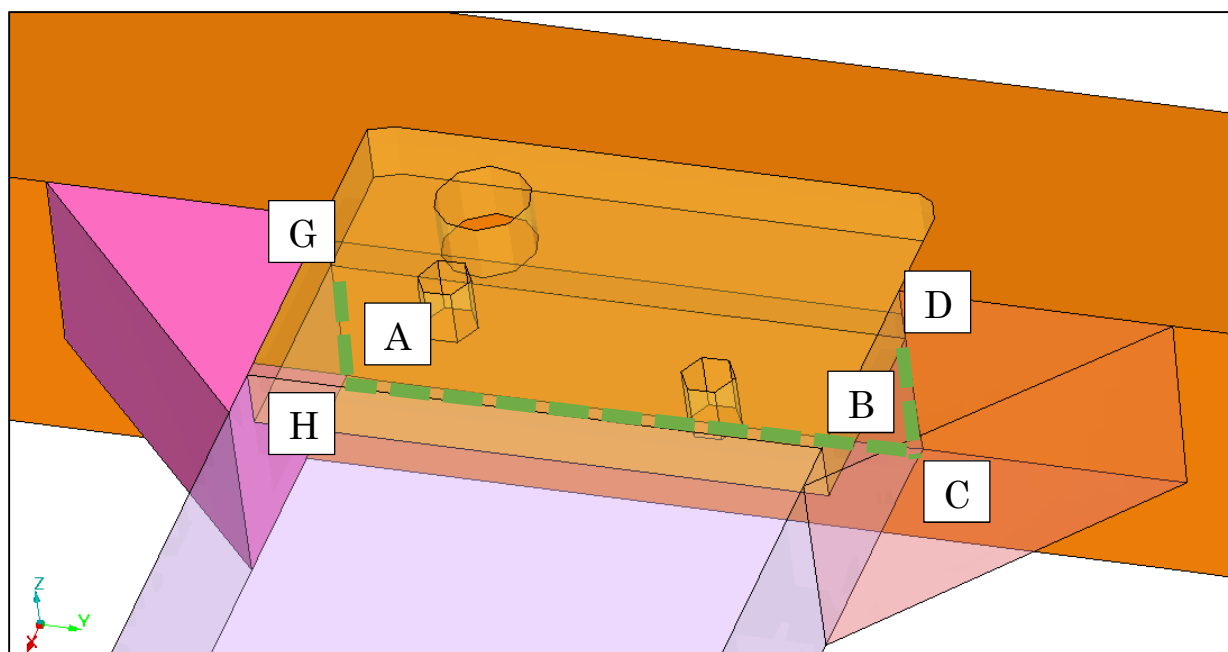


Figura 52 – Saldatura 12_U_6