

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria



Dipartimento di ing. Meccanica e Aerospaziale
Laurea Magistrale in INGEGNERIA MECCANICA

**PROGETTAZIONE E VERIFICA DI
UN SISTEMA DI ISOLAMENTO
ACUSTICO MEDIANTE VUOTO IN
UN AEROPLANO**

Relatore:

Prof. Alessandro Salmi

Laureando:

Dott. Alessandro Maizzi

Anno accademico 2017-2018

Sommario

1.	Introduzione	2
2.	La teoria della propagazione del suono.....	3
2.1	La sorgente sonora e il suo modello	3
2.2	Grandezze fisiche del suono.....	4
2.3	Grandezze cinematiche del suono	6
2.4	Grandezze fisiche del suono.....	8
2.5	Livelli sonori – Scala di decibel	10
2.6	Propagazione del suono nel vuoto.....	11
2.7	Tipologie di rumore	11
3.	Progettazione ed esecuzione della prova.....	17
3.1	Progettazione del modello (CATIA V5).....	17
3.1.1	Determinazione degli strumenti di misura	17
3.1.2	Concezione e progettazione del modello	19
3.2	Calcolo strutturale (Hypermesh)	23
3.2.1	Pre-processing. Preparazione del modello.	24
3.2.2	Analisi FEM.....	35
3.3	Stampo	46
3.4	Messe in tavola.....	51
3.5	Produzione e montaggio	64
3.5.1	Procedura di ottenimento del laminato	64
3.6	Esecuzione della prova	79
5	Conclusioni.....	87
	Allegati	88

1. Introduzione

La seguente tesi ha lo scopo di descrivere ed analizzare la progettazione e l'esecuzione di una prova atta a studiare la capacità di isolamento acustico tramite vuoto d'aria spinto tra due strutture a guscio cilindriche, la prima contenuta nella seconda. La prova mira ad identificare l'aliquota di rumore trasmessa dal necessario collegamento tra le due strutture, rispetto alla condizione ideale di isolamento completo.

Il modello ideato andrà a rappresentare la scocca di un aereo con la relativa pannellatura interna (da qui le due strutture a guscio cilindriche una interna all'altra). Quest'ultima normalmente prevede diversi strati di materiale, fondamentali per riprodurre un corretto isolamento dal rumore generato dai motori dell'aereo e che, altrimenti, andrebbe a disturbare i passeggeri, e quindi a ridurre il comfort a bordo durante il volo. Il presente studio intende verificare che, sostituendo i vari strati di isolante e forzando un vuoto d'aria fra la scocca e la pannellatura (i due gusci), è comunque possibile eliminare il disagio a bordo causato dal rumore. Il modello prevederà per cui solamente le due strutture a guscio una dentro l'altra ed il collegamento fra di esse, che determinerà purtroppo la trasmissione di una parte del rumore allontanandoci così dal caso ideale. Verranno effettuate tre prove: la prima mira a simulare il caso ideale (senza collegamenti) lasciando il guscio interno sospeso dentro quello esterno mediante l'utilizzo di fili; la seconda presenterà invece i collegamenti, comprensivi di sistema di smorzamento; la terza infine sarà come la seconda, ma in assenza di smorzatori, in modo da capire la loro influenza nella prova.

Questo porterà alla formazione di tre ambienti ben distinti: l'ambiente esterno in condizioni standard; l'ambiente presente tra i due gusci a pressione teoricamente nulla; e l'ambiente interno al guscio più piccolo, in condizioni che simulano quelle all'interno di un aereo in volo, simili a quelle ambiente standard.

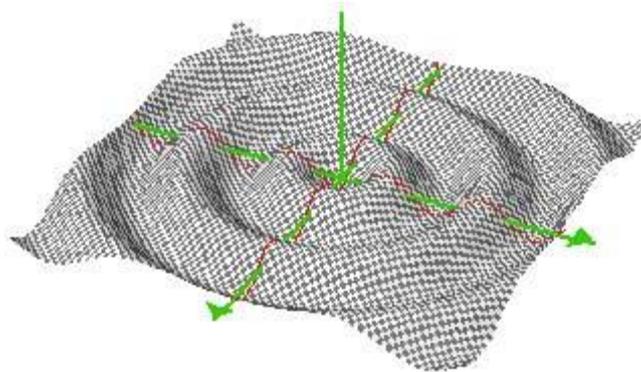
Il materiale della struttura impiegato per il modello sarà lo stesso utilizzato per le pannellature di un aereo reale, ovvero un sandwich con i due strati esterni in fibra di carbonio, e quello interno che presenta una struttura a nido d'ape di materiale metallico, in alluminio o in rame, in base alle esigenze strutturali.

Per effettuare questo studio sarà necessaria un'iniziale progettazione del modello per poi, dopo aver verificato la solidità della struttura attraverso il calcolo strutturale, procedere con la produzione dello stesso in modo da poterlo poi utilizzare per effettuare la prova sperimentale di interesse.

2. La teoria della propagazione del suono

L'acustica è una disciplina scientifica che si occupa delle caratteristiche dei suoni, cioè studia come gli effetti sonori si producono e si propagano, operando sulla scala logaritmica dei decibel [dB].

I suoni sono onde create da vibrazioni che generano una variazione di pressione che si propaga all'interno di un mezzo senza trasporto di materia (nel vuoto non c'è suono). Per cui è un fenomeno fisico, non un oggetto e per esistere ha bisogno di una sorgente, cioè di un corpo vibrante e di un mezzo elastico di propagazione in cui le onde possano viaggiare. Vibrando, questo la sorgente trasmette le proprie vibrazioni al mezzo che lo circonda (nel nostro caso, l'aria). L'energia sonora, quindi, è un'energia meccanica (o cinematica) che, partendo dalla sorgente stessa, si irradia sotto forma di onde attraverso il mezzo di propagazione fino all'ascoltatore, senza trasporto di materia.



2.1 La sorgente sonora e il suo modello

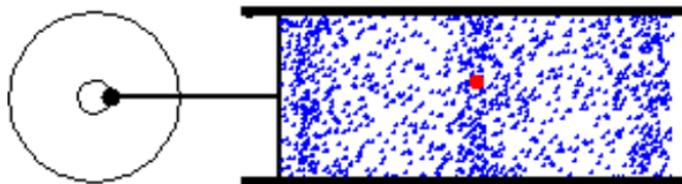


Figura 2.1.1: Pistone e albero rotante

Per comprendere l'origine fisica del suono consideriamo un pistone che oscilla periodicamente grazie ad un albero rotante (figura 2.2.1); il rapido succedersi di compressioni ed espansioni genera un movimento delle particelle del mezzo elastico: le particelle mosse dal pistone provocano, grazie a una reazione a catena, il movimento delle particelle contigue che generano onde meccaniche di tipo longitudinale. Mentre le singole particelle oscillano continuamente attorno alla loro posizione iniziale, l'onda generata si muove a velocità costante (moto d'assieme).

La “velocità del suono” della suddetta onda è una costante fisica, detta C_0 , e dipende solo dal mezzo elastico attraverso il quale si propaga.

Il moto delle particelle genera l’onda ed il suono si propaga sotto forma di onda sonora. Le onde sonore prodotte provocano dei movimenti periodici delle molecole d’aria formando strati alternati di aria compressa e rarefatta (figura 2.1.2) che si propagano in tutte le direzioni fino ad arrivare al nostro orecchio; lo stesso accade quando si parla, poiché si sposta una quantità finita di aria.

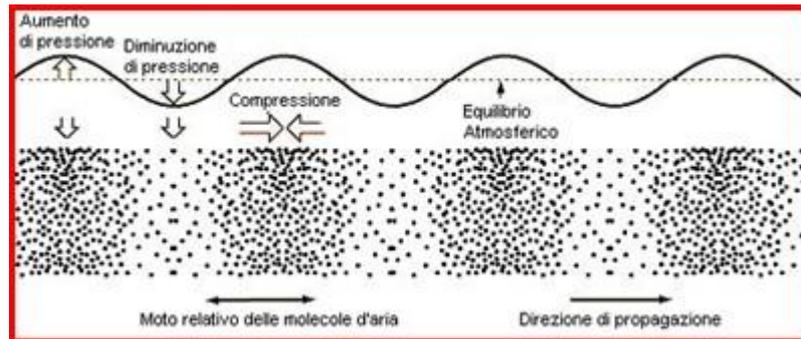


Figura 2.2.1.1.2

2.2 Grandezze fisiche del suono

Il suono è caratterizzato da alcune grandezze fondamentali quali l'ampiezza, la frequenza (o periodo di oscillazione), la lunghezza d'onda e la velocità di propagazione nel mezzo attraversato (figura 2.2.1).

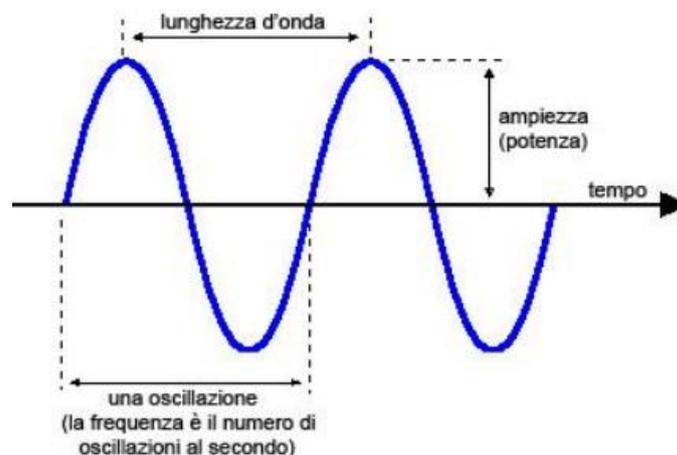


Figura 2.2.1: Grandezze fisiche del suono

Ampiezza dell'Onda:

L'ampiezza delle fluttuazione della pressione sonora è la caratteristica che ci permette di distinguere i suoni forti da quelli deboli; in pratica quello che comunemente chiamiamo il "volume" del suono (figura 2.2.2). L'orecchio umano è sostanzialmente un sensore di pressione. Normalmente però non si utilizza l'ampiezza della fluttuazione di pressione sonora espressa in Pa (pascal) per misurare la sensazione sonora percepita dall'uomo, si usa invece convertire tale valore di pressione sonora nella scala logaritmica dei dB (decibel), definendo così il Livello di Pressione Sonora (SPL, Sound Pressure Level). La pressione acustica necessaria perché un suono sia udibile dall'orecchio umano varia a seconda della frequenza dei suoni. Un suono di 1.000 Hz è udibile a "0 dB", mentre scendendo a 30 Hz occorre un livello di pressione sonora di almeno 60 dB perché il suono sia udibile. L'esposizione prolungata a livelli di pressione sonora superiori agli 85 dB può causare forti disturbi o addirittura sordità permanente.

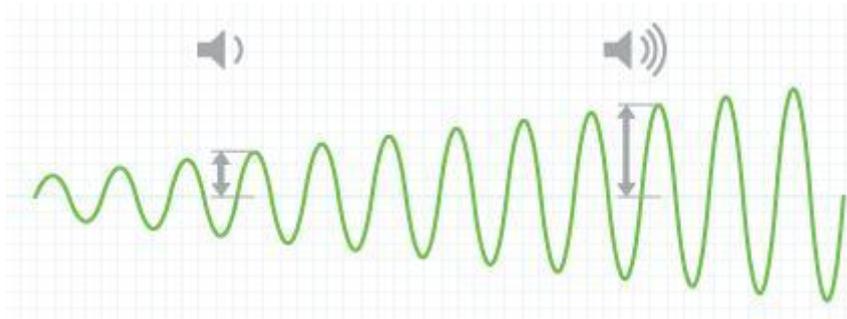


Figura 2.2.2: Ampiezza d'onda

Frequenza:

L'altezza percepita dei suoni dipende dalla frequenza (f), cioè dal numero delle oscillazioni che si verificano in un dato tempo (un secondo), quanto più numerose esse sono, tanto più acuto è il suono. La frequenza si misura in "Hertz" [Hz]; il termine Hertz si riferisce al nome del fisico tedesco che per primo studiò questi fenomeni. Dire che un suono è di 300 Hz significa che il corpo che lo produce vibra 300 volte al secondo. In natura esistono suoni che vanno da un minimo di 1 Hz a un massimo di circa 1.000.000 Hz. L'orecchio umano può solo sentire i suoni compresi tra 20 e 20.000 Hz. I suoni di frequenza inferiore ai 20 Hz vengono chiamati *infrasuoni*; quelli superiori ai 20.000 Hz vengono chiamati *ultrasuoni*. Molti animali sono in grado di udire questi tipi di suono, perché dotati di un udito con campo di frequenza più esteso di quello umano.

PERIODO (T):

Si definisce periodo il tempo necessario per compiere un ciclo completo, anche definito come inverso della frequenza.

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{ed} \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

dove: **T** è il periodo, **f** è la frequenza e **ω** è la velocità angolare

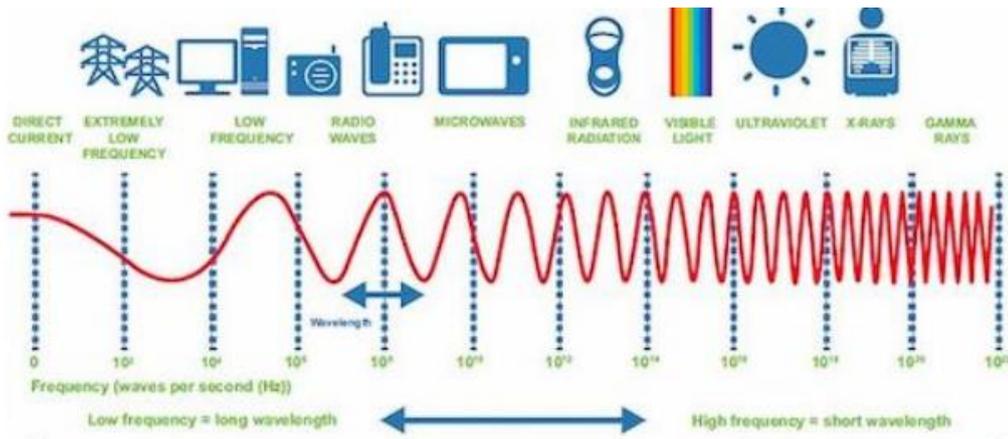


Figura 2.2.3: Frequenza sonora

2.3 Grandezze cinematiche del suono

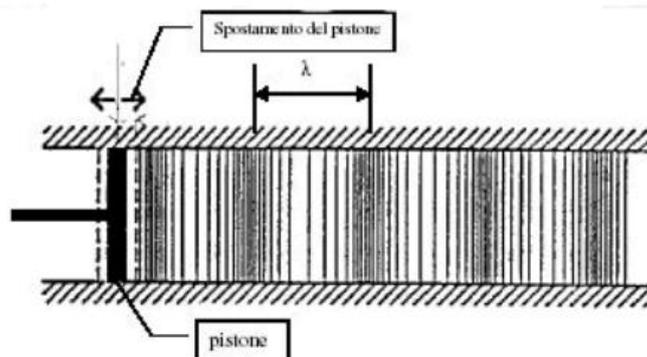


Figura 2.3.1

Spostamento s :

$$s(t) = s_0 \cdot \cos(\omega t)$$

Con s_0 si intende il valore dello spostamento massimo della superficie vibrante, determinata dalla corsa del pistone che va avanti ed indietro.

Velocità delle particelle \underline{v} :

$$v = \frac{ds}{dt} = -\omega s_0 \cdot \text{sen}(wt)$$

La velocità delle particelle, essendo un vettore, permette agli animali aventi organi predisposti, come l'uomo, di percepire da quale direzione proviene il suono.

Velocità del suono c_0 :

La velocità delle particelle \underline{v} non va confusa con la velocità del suono c_0 .

$$c_0 = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T}$$

dove:

- coefficiente di dilatazione adiabatica $\gamma = 1.41$
- costante universale dell'aria $R = 287 \text{ [J/kgK]}$
- temperatura assoluta $T = 273.16 + t \text{ [K]}$

La velocità del suono dipende dalla temperatura. Nell'aria, per esempio:

$t = 20^\circ\text{C}$ quindi $T = t + 273.16(\text{K}) = 293.16 \text{ K}$

$\gamma = 1.41$, $R = 287 \text{ [J/kgK]}$

$c_0 = 344,34 \text{ [m/s]}$

Nelle strutture solide, per esempio:

Materiale	Densità $\rho_0 \text{ [kg/m}^3\text{]}$	Velocità del suono $c \text{ [m/s]}$
Acciaio	7800	5000
Alluminio	2700	5820
Calcestruzzo	2000 – 2600	3500 – 5000
Gomma	1010 – 1250	35 – 230
Legno	400 – 700	3300
Marmo	2600	3800
Mattoni pieni	2100	3600
Piombo	11300	1260
Rame	8900	4500
Sabbia	1600	1400 – 2600
Stagno	7280	4900
Sughero	240	480
Vetro	2300 – 5000	4000 – 5000
Zinco	7100	3750

In questo caso :

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Dove:

E è il modulo elastico del materiale [N/m²]

P è la densità del materiale [kg/m³]

Il suono è fatto di velocità (causa del fenomeno) e di pressione (effetto). In un caso monodimensionale, la velocità è un vettore che si sviluppa lungo l'asse x, mentre nella realtà, per avere l'informazione completa del campo sonoro, si compie una registrazione a quattro canali (v_x , v_y , v_z , p).

Le proprietà elastiche del mezzo determinano la velocità del suono e quindi anche la lunghezza d'onda (λ). Essa può essere calcolata come:

$$\lambda = \frac{c_0}{f}$$

Frequenza e lunghezza d'onda hanno un rapporto di inversa proporzionalità: all'aumentare di f, la lunghezza d'onda λ diminuisce.

Accelerazione:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\omega^2 s_0 \cdot \cos(\omega t)$$

L'accelerazione è poco usata, in quanto solitamente si preferisce usare la velocità delle particelle come grandezza cinematica.

2.4 Grandezze fisiche del suono

Si definiscono grandezze di campo:

- Pressione sonora p = [Pa]
- Velocità di particelle v = [m/s]

Queste grandezze di campo sono difficili da calcolare in modo previsionale. Sono quelle realmente percepibili dal sistema uditivo umano, esse variano in ogni punto del campo. Solo in ambienti molto piccoli è possibile effettuare una simulazione numerica, con tecnica FEM (finite elements) o BEM (boundary elements), in grado di prevedere numericamente il valore di pressione e velocità in ciascun punto del campo. In ambienti più grandi si deve rinunciare al calcolo deterministico

delle grandezze di campo, e ci si deve accontentare di un calcolo “statistico” delle sole grandezze energetiche, che risulta fattibile anche per ambienti molto vasti, o all’aperto.

Si definiscono grandezze energetiche:

- Densità di energia sonora $D = [J/m^3]$
- Intensità sonora $I = [W/m^2]$
- Potenza sonora $W = [W]$

Tutte le suddette grandezze possono essere espresse in decibel (dB); la scala dei decibel è una scala logaritmica utilizzata per compattare il grande range di valori delle grandezze energetiche percepiti dall’essere umano, più precisamente il decibel è 10 volte il logaritmo decimale del rapporto tra il valore energetico in esame e il valore energetico di riferimento.

Intensità sonora:

L’Intensità sonora I è il parametro di valutazione del flusso di energia che attraversa una determinata superficie. E’ definita come l’energia che nell’unità di tempo attraversa, in direzione normale, una superficie unitaria (W/m^2). L’intensità \underline{I} è un parametro vettoriale definito da un modulo, una direzione ed un verso:

$$I = (P, t) = p(P, t) \cdot v(P, t)$$



Figura 2.4.1 Intensità sonora in dB

Potenza sonora:

Descrive la capacità di emissione sonora di una sorgente e viene misurata in Watt (W). La potenza non può essere misurata direttamente, ma richiede metodi particolari per la sua determinazione. La potenza sonora è un descrittore univoco di una sorgente sonora, infatti, una quantità oggettiva indipendente dall'ambiente in cui la sorgente è posta.

Considerata una superficie chiusa S che racchiude una sorgente sonora, la potenza acustica W emessa dalla sorgente è data dall'integrale dell'intensità sonora I sulla superficie considerata:

$$W = \int_S I(P, t) \cdot ndS$$

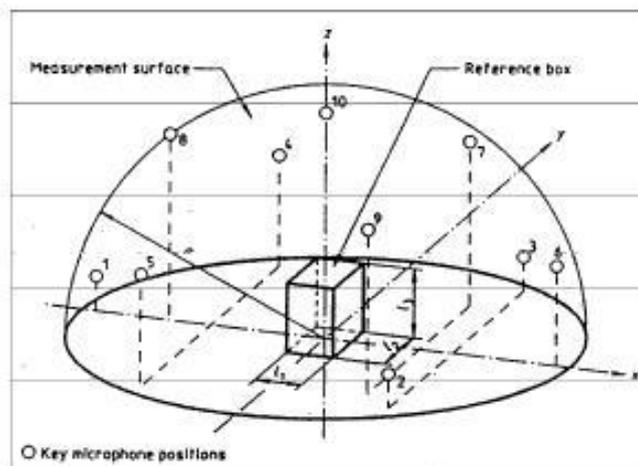


Figura 2.4.2: Potenza sonora

2.5 Livelli sonori – Scala di decibel

Si definisce livello di pressione sonora L_p la quantità:

- $L_p = 10 \log p^2 / p_{rif}^2 = 20 \log p / p_{rif} \text{ [dB]}$

Si definisce livello di velocità sonora L_v la quantità:

- $L_v = 10 \log v^2 / v_{rif}^2 = 20 \log v / v_{rif} \text{ [dB]}$

Si definisce livello di intensità sonora L_I la quantità:

- $L_I = 10 \log I / I_{rif} \text{ [dB]}$

Si definisce livello di densità sonora L_D la quantità:

- $L_D = 10 \log D / D_{rif} \text{ [dB]}$

Si definisce infine livello di potenza sonora L_W la quantità:

- $L_W = 10 \log W / W_{rif} \text{ [dB]}$

Somma di livelli sonori:

La somma tra due livelli sonori, ad esempio di pressione, non è eseguita semplicemente come somma dei livelli, in quanto ciò che si somma sono invece i valori di pressione.

Per cui, tra due suoni diversi 1 e 2:

$$\begin{aligned}L_{p1} &= 10 \log (p_1/p_{rif})^2 & (p_1/p_{rif})^2 &= 10^{L_{p1}/10} \\L_{p2} &= 10 \log (p_2/p_{rif})^2 & (p_2/p_{rif})^2 &= 10^{L_{p2}/10} \\(p_T/p_{rif})^2 &= (p_1/p_{rif})^2 + (p_2/p_{rif})^2 & &= 10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10} \\L_{pT} &= L_{p1} + L_{p2} = 10 \log (p_T/p_{rif})^2 & &= 10 \log (10^{L_{p1}/10} + 10^{L_{p2}/10})\end{aligned}$$

2.6 Propagazione del suono nel vuoto

Il suono è una vibrazione in un mezzo fisico, quindi nel vuoto non può propagarsi. E infatti nel vuoto i suoni non si trasmettono. La luce invece non si può considerare come una vibrazione di una sostanza materiale. Infatti, oggi si sa che tutte le radiazioni elettromagnetiche, tra le quali c'è la luce, possono essere interpretate come vibrazioni del campo elettromagnetico oppure come particelle velocissime (i fotoni), che sono prive di massa. Qualunque delle due ipotesi scientifiche si preferisca, i fotoni non hanno bisogno di materia per propagarsi. Anzi, la presenza di materia rallenta la loro corsa.

Questa è la teoria che gira attorno alle prove sperimentali che verranno eseguite: ricreando il vuoto all'interno di un'intercapedine il suono non avrà la possibilità di attraversarla, producendo così un isolamento acustico perfetto.

2.7 Tipologie di rumore

I suoni e i rumori sono fondamentali per la vita dell'uomo. Tanto i suoni quanto i rumori. I suoni sono gradevoli da ascoltare e quindi si fa maggior caso ad essi, anche dal punto di vista melodico. I rumori, invece, per natura sono sgradevoli e quindi è più facile non farci troppo caso.

La parola "rumore" nel linguaggio quotidiano indica qualcosa di indistinto e caotico. Tuttavia in ambito scientifico diversi tipi di rumore possono essere quantitativamente caratterizzati studiandone il contenuto spettrale. La classificazione del rumore è di fondamentale importanza nello studio di tutti quei segnali che contengono delle componenti casuali, e trova massiccio impiego nella tecnologia del suono.

Rumore bianco

In analogia alla luce bianca che è formata dalla sovrapposizione di onde elettromagnetiche di tutte le frequenze visibili, se un rumore è costituito da uno spettrogramma sostanzialmente "piatto" con onde di tutte le frequenze e di intensità simile ad ogni frequenza, esso si dice rumore bianco. Il rumore bianco, ricco di alte frequenze suona "stridulo", ha un eccesso di brillantezza che ci infastidisce. L'estensione dello spettro su tutte le frequenze ha intensità variabile ma, in media, costante sulle varie regioni dello spettro (figura 2.7.1).

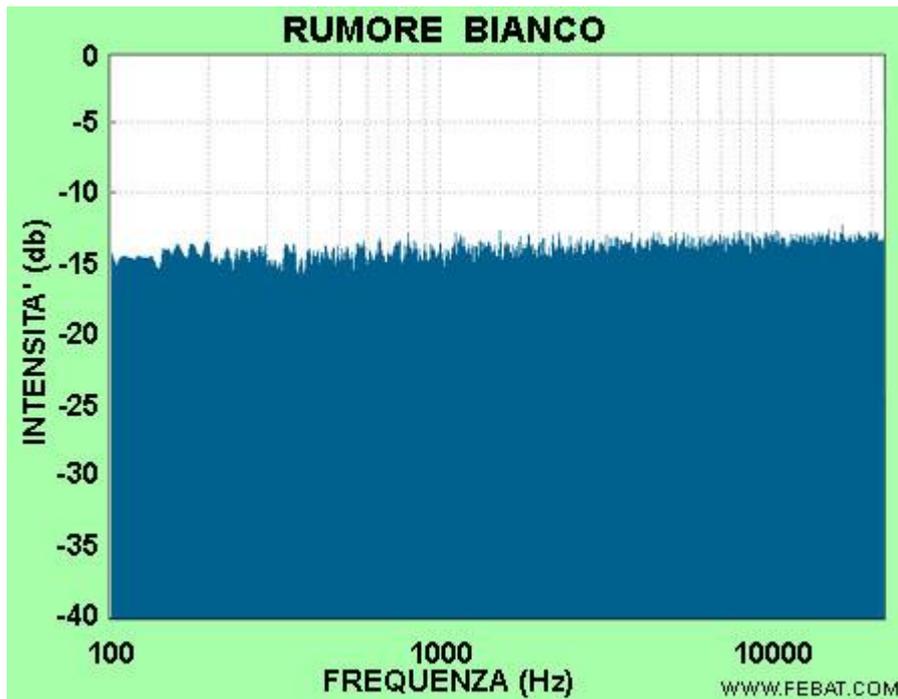


Figura 2.7.1: Rumore bianco. Spettro in frequenza

Esistono vari tipi di rumore detti colorati caratterizzati dal fatto di avere alcune componenti dello spettro prevalenti sulle altre.

Rumore rosa

Il rumore rosa ha una prevalenza dell'intensità delle armoniche a bassa frequenza (figura 2.7.2). Esso può essere ottenuto dal rumore bianco con un'apposita azione di filtro delle alte frequenze. Il rumore rosa spesso viene costruito assegnando le seguenti regole (è un po' un ossimoro assegnare regole per costruire un evento casuale come il rumore):

- l'intensità decresce nel passaggio da un'ottava all'altra come l'inverso della frequenza. Ciò significa che essa dimezza nel passaggio da un'ottava all'altra (in scala logaritmica ciò equivale ad una attenuazione di 3 dB).
- l'andamento in intensità all'interno di un'ottava è riprodotto per ogni ottava.

Sembra che il rumore così costruito abbia proprietà rilassanti assomigliando a molti rumori naturali come la pioggia o le cascate d'acqua. Il rumore rosa trova comunque applicazione anche negli ambienti di registrazione per "rinvigorire" il suono a basse frequenze; a tali frequenze infatti il nostro orecchio soffre di calo di prestazioni.

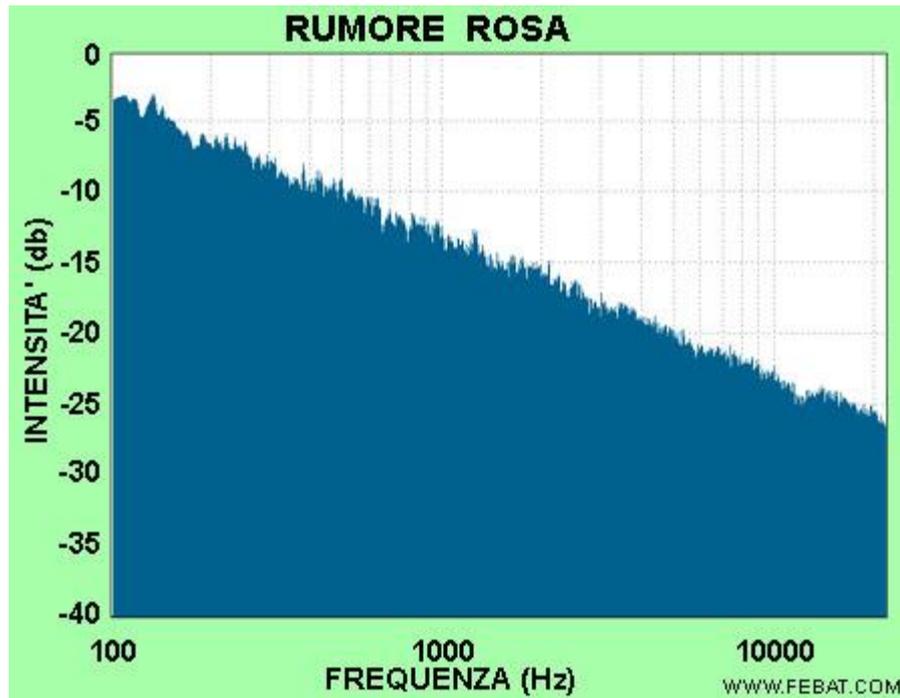


Figura 2.7.2: Rumore rosa. Spettro in frequenza.

Rumore marrone

In questo genere di rumore vi è un'accentuazione ancora maggiore, rispetto al rumore rosa, della presenza di basse frequenze. L'intensità decresce, da un'ottava all'altra, come l'inverso del quadrato della frequenza (cioè con un'attenuazione, in scala logaritmica, di 6 dB). Il rumore marrone assomiglia ad un rombo di tuono.

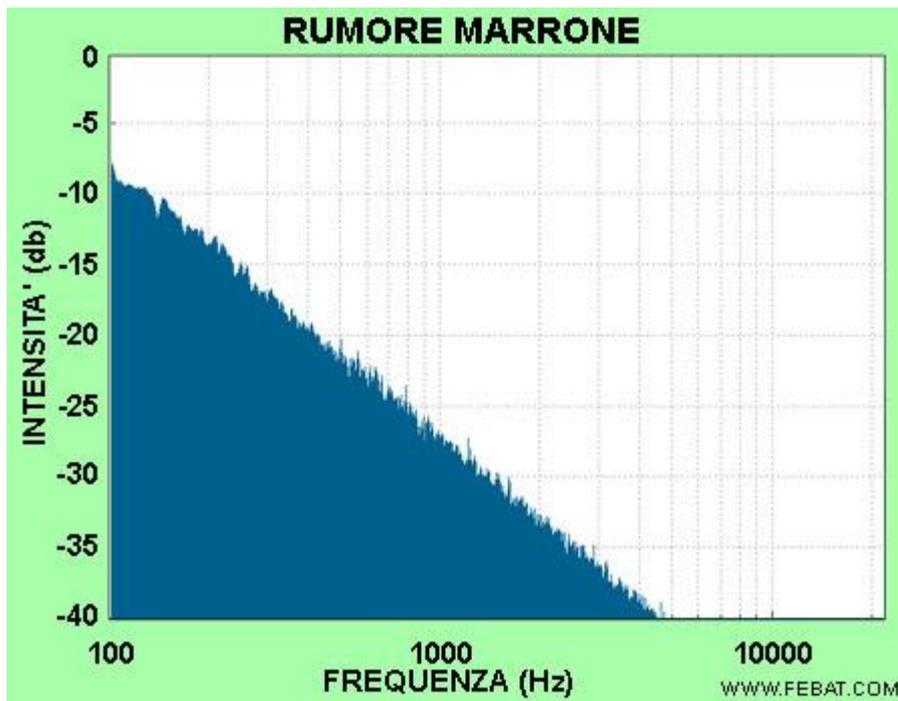


Figura 2.7.3: Rumore marrone. Spettro in frequenza.

Rumore rosso

Un'ulteriore accentuazione (senza regole matematiche precise come per il rumore rosa e marrone) della presenza di basse frequenze determina il rumore rosso. Esso suona come un rimbombo molto basso (un treno che passa nel metrò, il rumore di un motore che fa vibrare, per risonanza, le pareti di una stanza) e si colloca alla soglia in inferiore delle frequenze udibili. E' molto utilizzato nella musica elettronica e nella musica da "film".

Rumore blu

Questo rumore è praticamente il complementare del rumore rosa. Esso mostra una prevalenze delle altezze frequenze con un incremento delle intensità di 3dB per ottava. Ovviamente esso viene ottenuto con un azione di filtro delle basse frequenze. Suona come una sorta di sibilo, stridulo e artificiale.

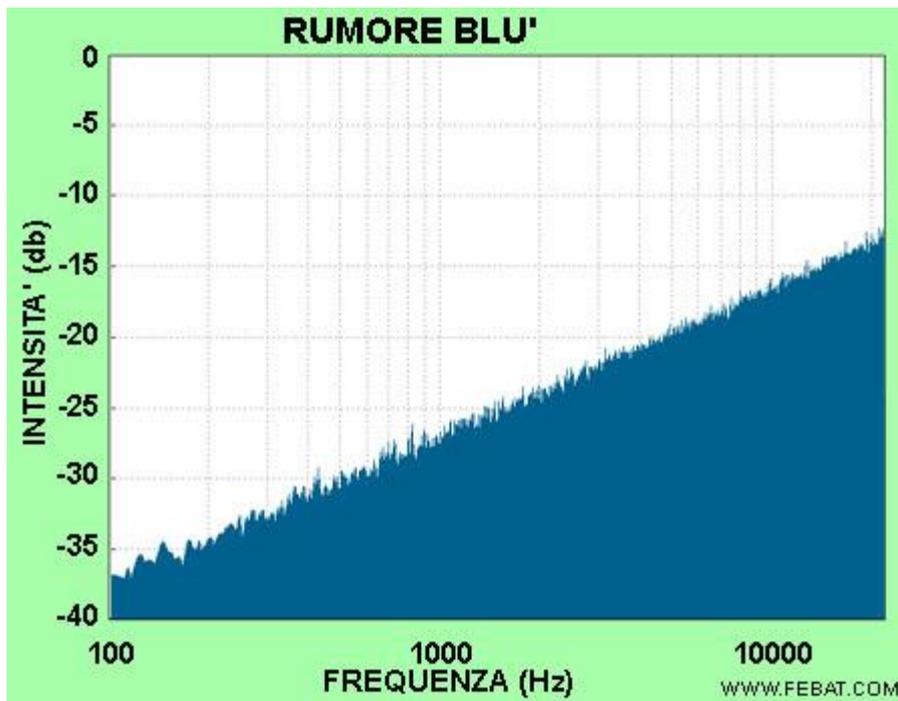


Figura 2.7.4: Rumore blu. Spettro in frequenza.

Rumore viola

È il complementare del rumore marrone con una forte prevalenze dell'intensità delle alte frequenze. L'intensità cresce di 6 dB per ottava. L'effetto sibilante è ancora più fastidioso che nel rumore blu.

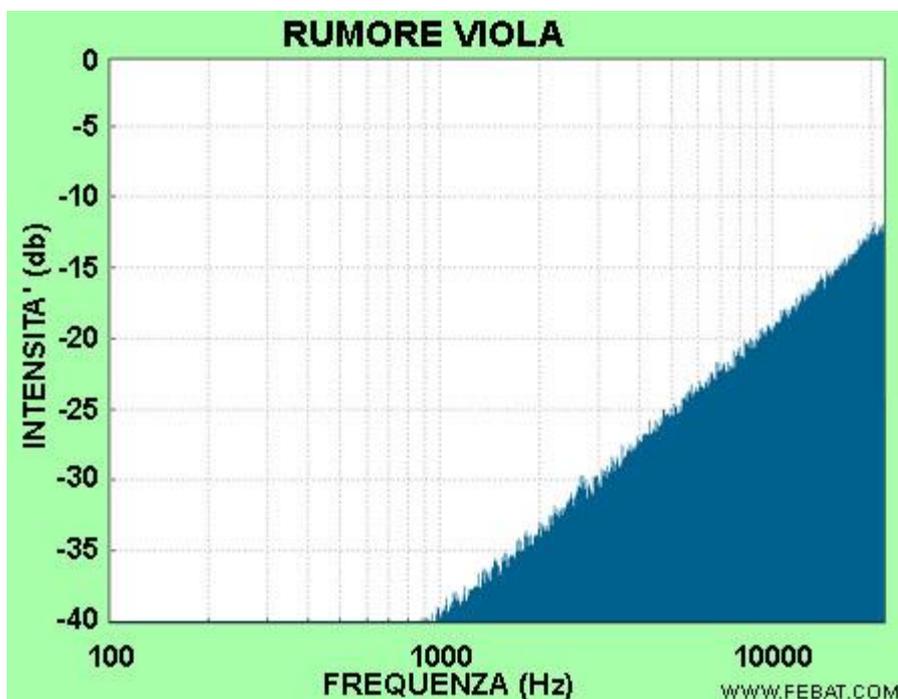


Figura 2.7.5: Rumore viola. Spettro in frequenza.

3. Progettazione ed esecuzione della prova

3.1 Progettazione del modello (CATIA V5)

Per la progettazione della geometria del modello è stato utilizzato CATIA V5, una piattaforma commerciale di tipo CAD/CAE/CAM il cui software è stato sviluppato dall'azienda francese Dassault Systems.

3.1.1 Determinazione degli strumenti di misura

Per iniziare risulta necessario innanzitutto determinare le dimensioni del modello stesso; per ridurre il consumo di materiale l'obiettivo sarebbe quello di ridurle il più possibile. Questa decisione trova però un limite nelle dimensioni degli strumenti di misura che dovranno poi essere inseriti all'interno del guscio interno e impiegati per l'analisi sperimentale.

Tra le diverse variabili da tenere conto durante il volo, quelle che sono state scelte per il modello si sono alla fine ridotte a due, necessarie per poter seguire e svolgere la prova nel modo corretto. La scelta è ricaduta su:

- **Un fonometro**

La scelta di un fonometro come primo strumento risulta abbastanza scontata; sarà infatti fondamentale durante l'esecuzione della prova per poter valutare l'aliquota di rumore che riesce a raggiungere l'interno della fusoliera. Essendo già presente un fonometro in inventario in quanto in passato sono state fatte altre prove di tipo sonoro, si è deciso di impiegare quello (figura 3.1.1.1). Le dimensioni di questo strumento (185mmx145mmx**40mm**) non sono troppo ridotte, il che costringe quelle del modello a crescere; si è comunque preferito ciò all'alternativa di acquistarne uno nuovo, visto che comunque risponde delle caratteristiche richieste per questo studio.



Figura 3.1.1.1: Fonometro Head Acoustics – Squadriga II

- **Un data logger di pressione**

Altro strumento che è stato ritenuto utile è un trasduttore di pressione, in particolare un data logger, in modo da poter monitorare l'andamento della pressione all'interno della fusoliera per tutta la durata della prova. I tre ambienti devono infatti rimanere sempre ben separati per far sì che la prova vada a buon fine, e un monitoraggio della pressione interna è il modo migliore per assicurarsene: una riduzione nel tempo della pressione dell'ambiente interno vorrebbe dire che parte dell'aria tende a passare nell'ambiente che dovrebbe rimanere in condizioni di vuoto, cosa che porterebbe ad un'alterazione della prova.

Non possedendone uno, si è potuto avere più possibilità di scelta per il data logger: dovendo monitorare una pressione simile a quella atmosferica ed eseguendo la prova a temperatura ambiente, non sono presenti esigenze specifiche e si ha la possibilità concentrarsi unicamente sulle dimensioni dello strumento, in modo da poter occupare meno spazio possibile all'interno della fusoliera.

La scelta è infine ricaduta sul modello TESTO 176 P1 (figura 3.1.1.2), un datalogger per pressione assoluta temperatura e umidità, di dimensioni 103mmx63mmx33mm.



Figura 3.1.1.2: Datalogger TESTO 176 P1

3.1.2 Concezione e progettazione del modello

Dalle dimensioni degli strumenti di misura riportate, si sono determinate quelle del modello, tenendo conto anche dello spazio da dedicare ai cavi e al microfono necessari per il funzionamento del fonometro. Considerando quindi tutti i vari elementi da inserire nella fusoliera, l'area prestabilita per l'interno della stessa è di 270mmx210mm (figura 3.1.2.1).

L'idea è di produrre entrambi i gusci utilizzando uno stampo, per cui il modello prende l'aspetto mostrato nella figura. La flangia posizionata in corrispondenza dell'apertura è necessaria per poter assemblare la struttura con un tappo, al fine di isolare l'interno con l'esterno a pressione idealmente nulla; i fori mostrati sono fori passanti, e quelli corrispondenti sul tappo sono più larghi per permettere l'installazione degli inserti visto che il tappo verrà prodotto in materiale composito a sandwich, con nido d'ape come *core*.

Una difficoltà riscontrata in fase di disegno è quella di determinare il raggio di piegatura del modello, prodotto incollando fra di loro diversi layer in fibra carbonio. Considerando i dati presenti nella specifica di riguardo, la piegatura scelta per evitare che il materiale si rovini è di 20mm: il tratto curvo (all'interno della struttura) rappresenta la pannellatura a vista per i passeggeri, mentre quello piano rappresenta il pavimento.

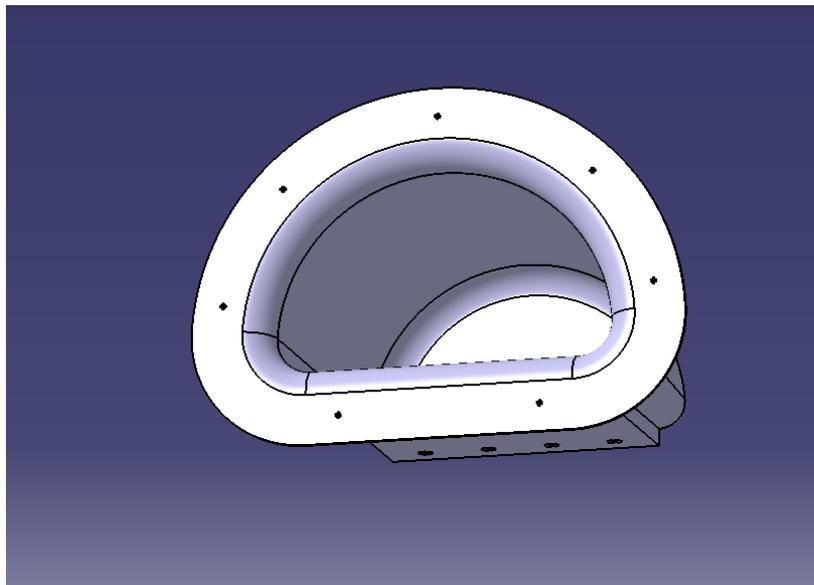


Figura 3.1.2.1: Guscio interno della struttura

Al momento della rappresentazione della scocca esterna (figura 3.1.2.2), un importante oggetto di discussione è stata la dimensione del gap tra i due gusci. Parlando in dimensioni reali, tra la pannellatura della fusoliera e la scocca dell'aereo è presente un gap di 70mm; mentre l'intero modello è stato ridotto in scala, si è deciso di lasciare invariata questa dimensione, questo poiché

l'obiettivo è quello di valutare l'aliquota di rumore che raggiunge l'interno, obiettivo raggiungibile solamente senza variare quello spessore, in quanto quest'ultimo si comporta esattamente come uno strato di isolante. Risulta evidente che, in una prova di valutazione dell'isolamento, ridurre lo spessore di isolante altererebbe la prova determinando un aumento del rumore percepito.

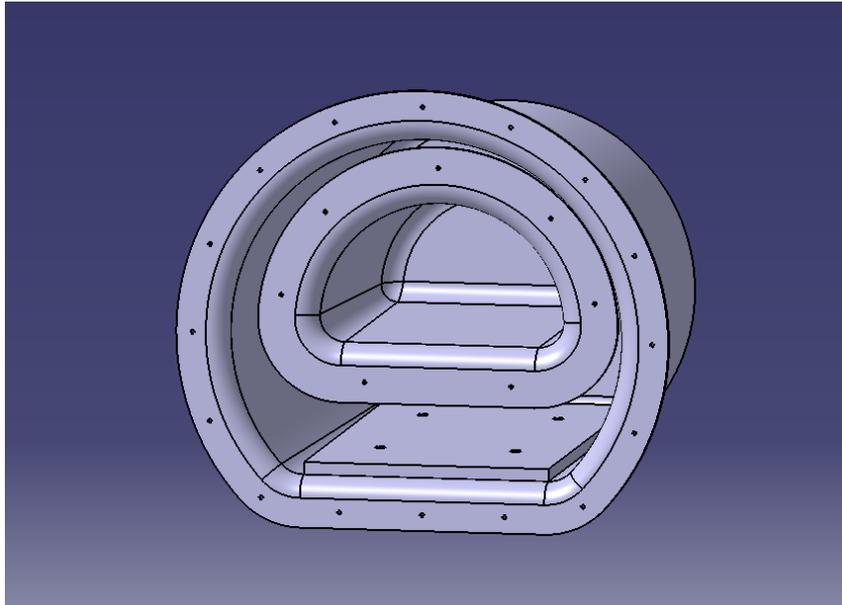


Figura 3.1.2.2: I due gusci concentrici

La forma del guscio esterno è semplicemente cilindrica, come nel caso reale, e il collegamento con quello interno avviene attraverso dei montanti che permettono di mantenere il pavimento in posizione orizzontale e fissa. La struttura presenterà anche degli smorzatori, che saranno una parte importante durante la trasmissione del suono, e saranno assemblati mediante dei profilati a L collegati tramite viti alla scocca esterna (figure 3.1.2.3 e 3.1.2.4).

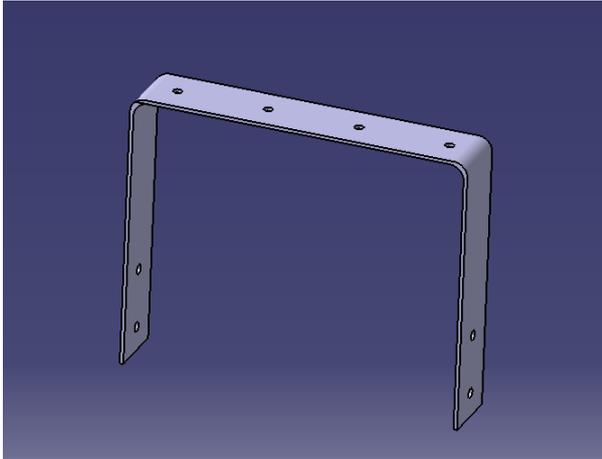


Figura 3.1.2.3a: Montante

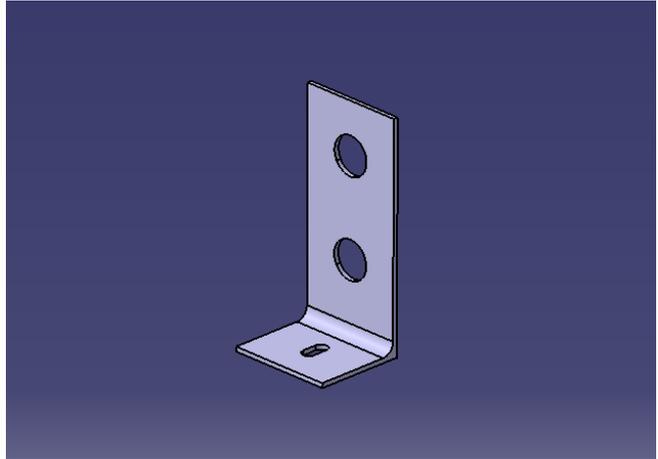


Figura 3.1.2.3b: Profilato a L



Figura 3.1.2.3c: Smorzatore Grommet

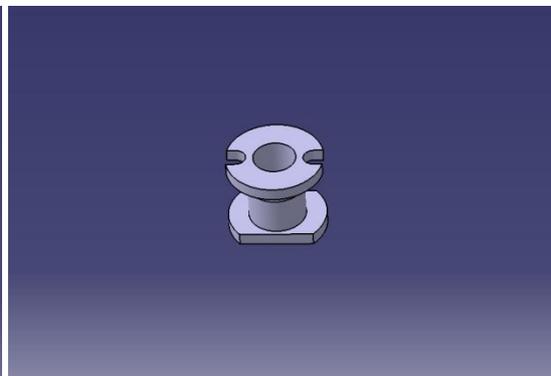


Figura 3.1.2.3d: Inserito cieco

Un'osservazione banale, ma importante da fare, è che la zona tra i due gusci deve essere perfettamente isolata dalle altre due. Quindi non è possibile collegare i vari componenti tra di loro (ad esempio i montanti con la fusoliera) utilizzando semplicemente una vite e un dado per mezzo di un foro passante; quest'ultimo infatti metterebbe direttamente in comunicazione i due ambienti. La soluzione a ciò è quella di utilizzare degli inserti ciechi, che però non possono essere installati in uno spessore così ridotto; è per questo che sia tra montanti e guscio interno, sia alla base del guscio esterno sono stati previsti dei basamenti formati da *sandwich* (visibili in figura 3.1.1.1 e 3.1.2.2) dallo spessore di poco più di mezzo pollice che verranno incollati alla struttura, nei quali verranno quindi eseguiti i fori per gli inserti. Il sandwich è composto da due ply di carbonio con un *core* in nido d'ape.

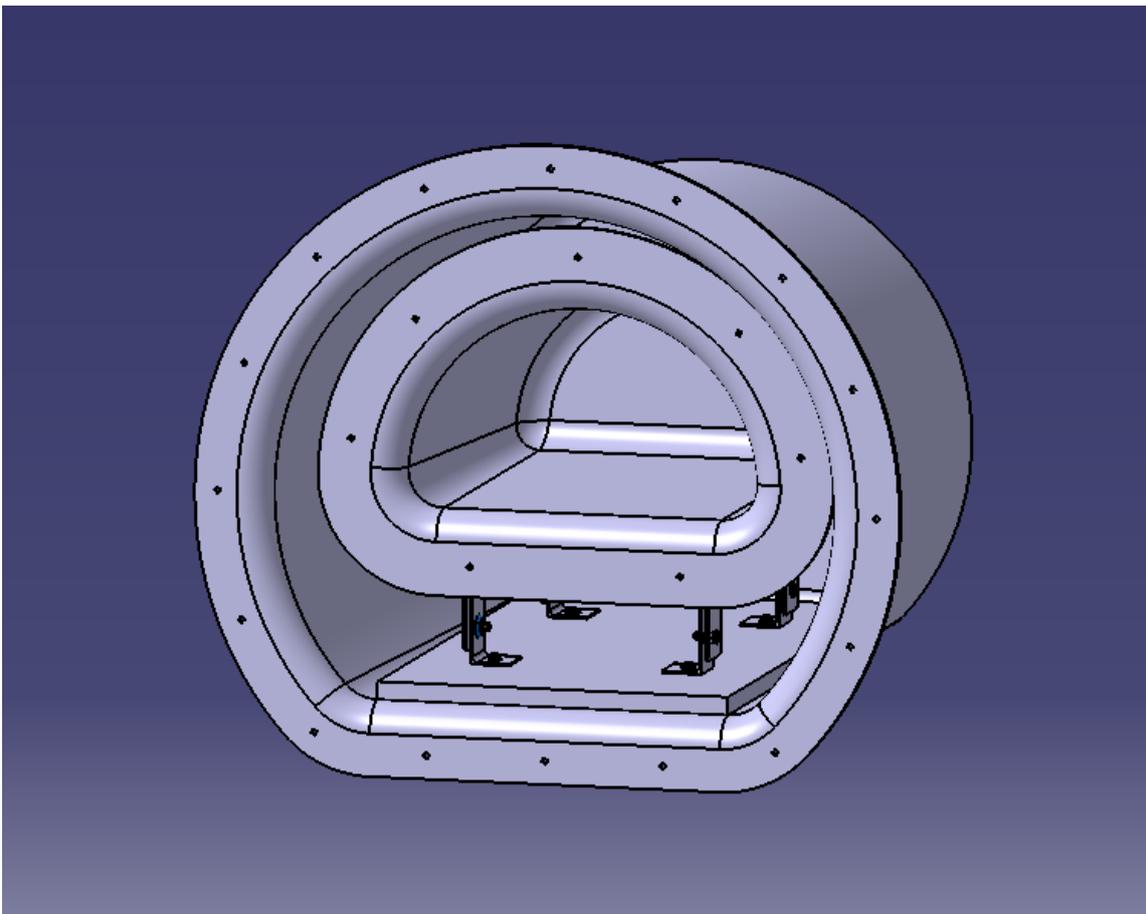
I collegamenti critici, in particolare, sono quelli tra i profilati ad L e la scocca estera, e quelli tra i montanti e la fusoliera. La scelta riguardante il lato di foratura è stata presa soprattutto tenendo conto dell'aspetto di montaggio, in modo da renderlo il più semplice possibile. Nella figura 3.1.2.3d è presente anche un particolare degli inserti utilizzati. Un elemento aggiuntivo impiegato

è una boccola ad incollaggio: si è scelto di adoperarla per chiudere il guscio interno con il suo tappo, questo perché non si avrebbe la possibilità di bloccare il dado in fase di assemblaggio a causa della presenza del guscio esterno.

Tutti gli organi di collegamento (viti, dadi e inserti) impiegati presentano una filettatura di tipo imperiale con diametro 0.1900in. Sia i fori per ospitare gli inserti che quelli per ospitare gli smorzatori dovranno essere molto più larghi del diametro medio della filettatura: le dimensioni dei fori di installazione sono state scelte utilizzando le specifiche dei rispettivi componenti.

Sia questo, che tutto quello che è stato detto finora, è possibile ritrovarlo nella figura 3.1.2.4, che presenta il complessivo dell'intera struttura, comprensiva di collegamenti. Gli unici due elementi esclusi dalla vista sono i tappi dei due gusci che sono stati nascosti per permettere l'osservazione dell'interno della struttura stessa.

Il tutto occuperà uno spazio di circa mezzo metro in lunghezza e mezzo metro in larghezza.



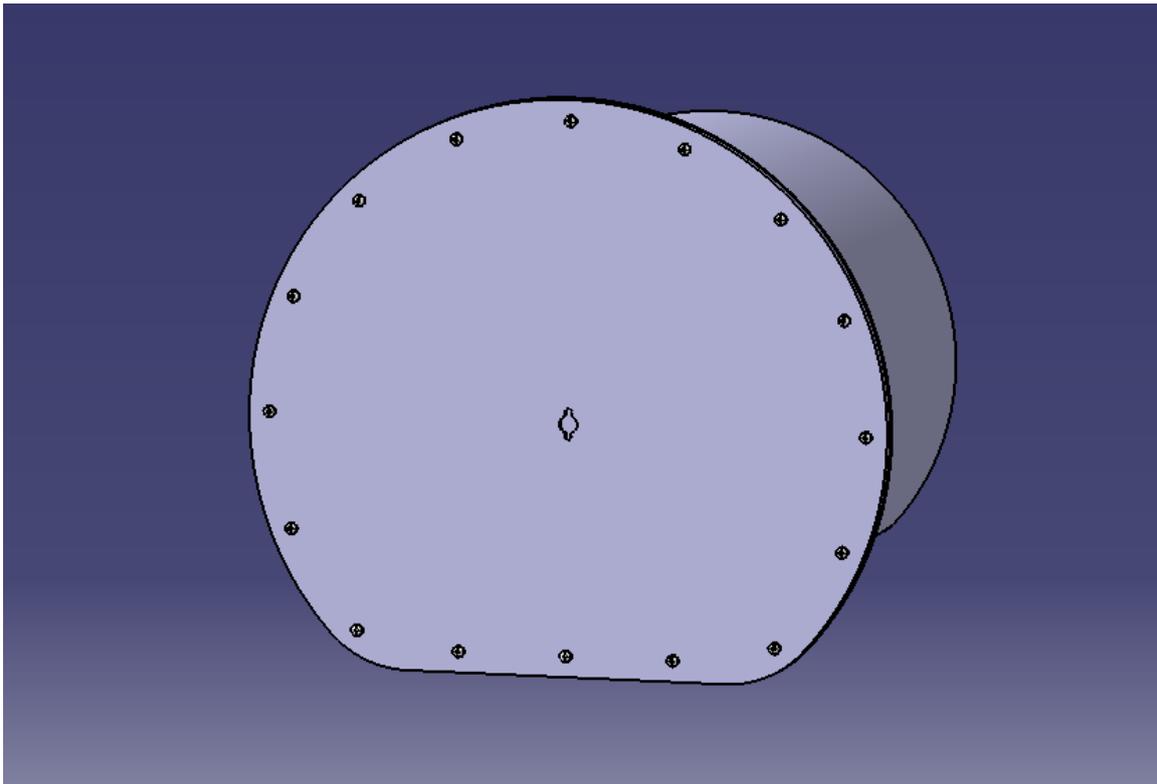


Figura 3.1.2.4: Complessivo

3.2 Calcolo strutturale (Hypermesh)

Una volta conclusa la fase di progettazione e aver sviluppato il modello CAD completo, è possibile passare ad un programma di simulazione FEM importando il file del CAD salvato in formato IGES. Nel nostro caso il software scelto per preparare il modello e per poi eseguire l'analisi è Hypermesh, ramo del software Hyperworks, un programma CAE per Pre e Post Processing sviluppato negli Stati Uniti dall'Altair Engineering.

La grafica iniziale che ritroviamo dopo aver importato il file di interesse risulta quella in figura 3.2.1, nella quale sono stati rimossi i due tappi per permettere la visibilità interna ai gusci.

Gli step che verranno seguiti con l'utilizzo di questo software sono:

- **Pre-processing:** dove il modello viene meshato e preparato per l'analisi;
- **Analisi:** dove viene eseguito il calcolo per la valutazione degli spostamenti, degli stress e delle deformazioni, in modo da capire se il modello sviluppato risulta adatto per lo scopo affidatogli;
- **Post-processing:** dove si andranno a fare considerazioni su risultati ottenuti dall'analisi.

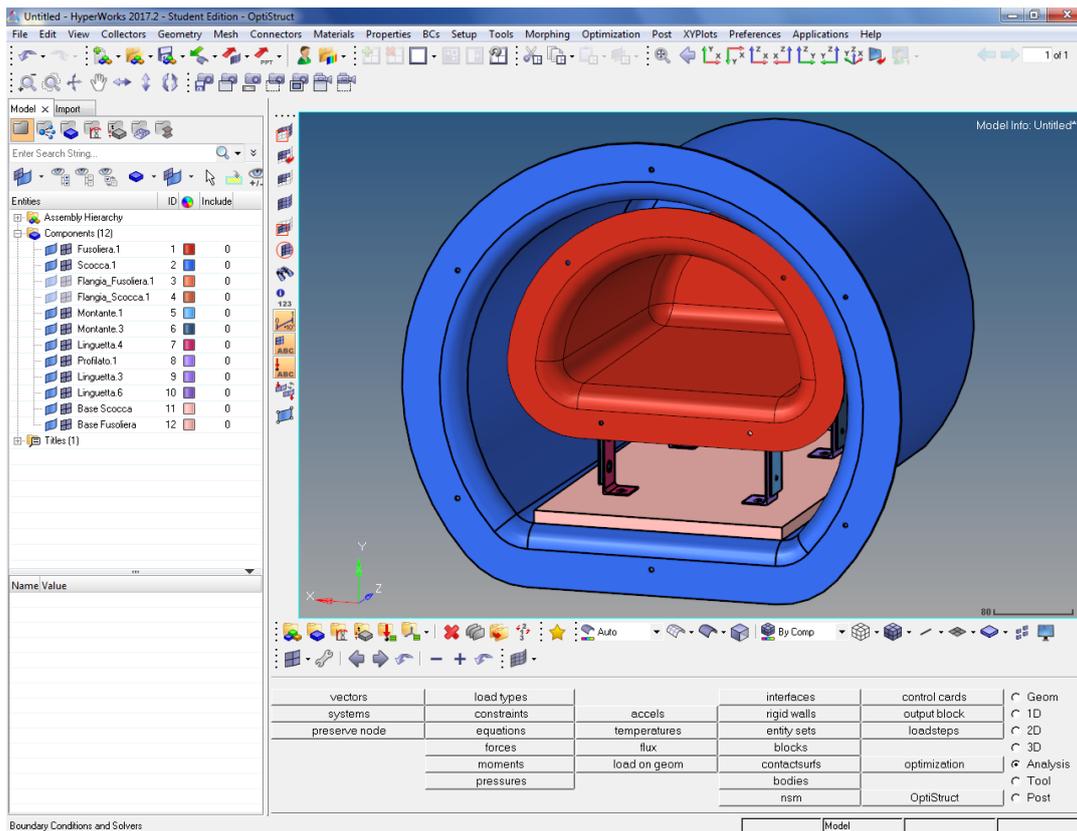


Figura 3.2.1: HyperWorks

3.2.1 Pre-processing. Preparazione del modello.

Il punto di partenza per l'esecuzione di un'analisi agli elementi finiti e quello della preparazione del modello, nel quale si prepara la mesh, si implementano gli eventuali collegamenti, si applicano i vincoli e infine si applicano i carichi.

Preparazione della mesh

Vista la struttura del CAD, e visti quindi i ridotti spessori del modello, la cosa migliore risulta quella di utilizzare una mesh bidimensionale, passando cioè per l'estrazione delle superfici medie. Verrà analizzato nel dettaglio unicamente il guscio interno, questo perché gli altri componenti si possono elaborare allo stesso modo, iterando i ragionamenti.

Si consideri quindi in partenza il solido della fusoliera (figura 3.2.1.1a). Procediamo per prima cosa nell'estrazione della superficie media, sulla quale poi verrà prodotta la mesh: il risultato è quello ottenuto in figura 3.2.1.1b.

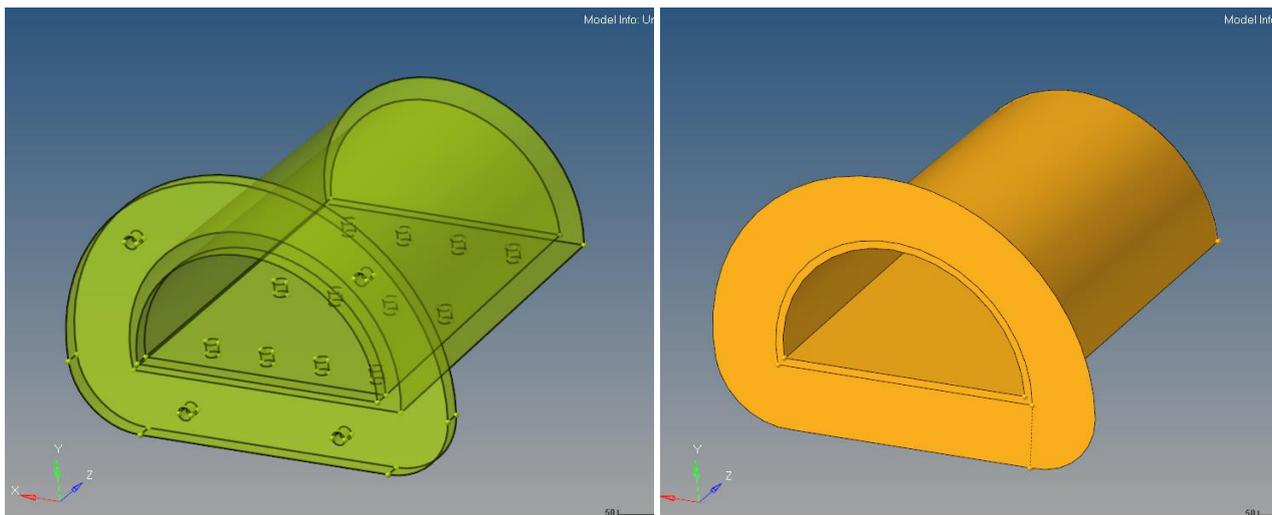


Figura 3.2.1.1: Creazione della superficie media

Una volta ottenuta la superficie media, non essendosi autogenerati i fori, risulta necessario modificarla, procedendo con una serie di operazioni di taglio in corrispondenza dei fori presenti nel modello solido.

I fori sono un punto critico nell'analisi, e bisogna quindi prestare attenzione agli stress che si generano in quella zona. Per ottenere risultati migliori si preferisce quindi meshare inizialmente solo la zona circostante ai fori (figura 3.2.1.2), per poi procedere con la stessa operazione per il resto della superficie. Idealmente vorremmo meshare le varie superfici utilizzando un numero di elementi infinito, e ciò non è evidentemente possibile, ma è comunque necessario utilizzare un numero minimo di elementi per poter ottenere dei valori verosimili dall'analisi: per quanto riguarda la zona circostante i fori, si è optato per un numero di elementi pari ad otto, numero sufficiente per permettere una buona approssimazione dei fori stessi. I fori più grandi, ospitanti gli inserti e gli smorzatori, arrivano a presentare anche dieci elementi.

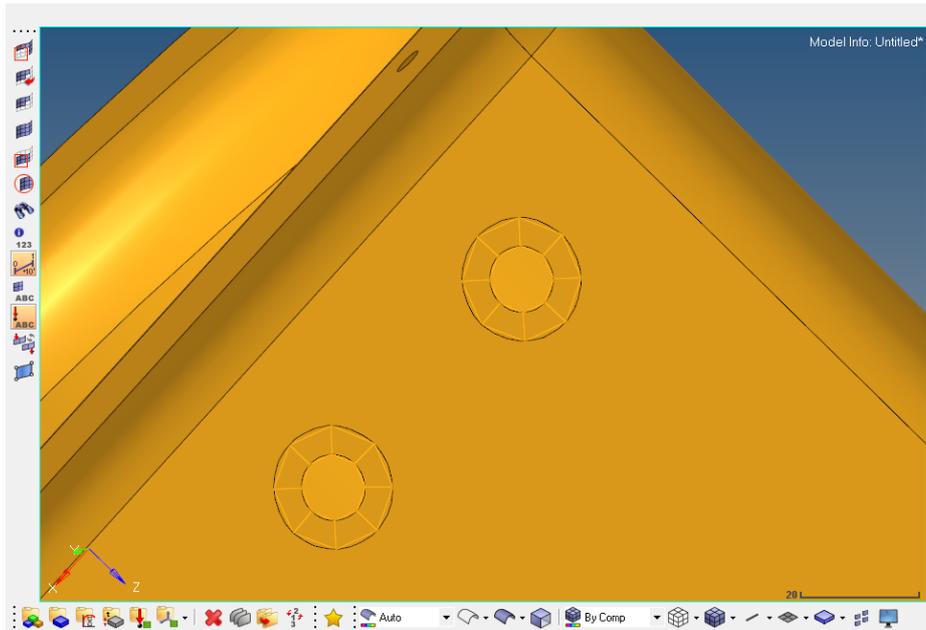


Figura 3.2.1.2: Mesh attorno ai fori

Una volta meshati i fori, si disegna la mesh per tutto il resto della superficie, che in automatico si andrà ad adattare ai nodi utilizzati per le mesh dei fori (figura 3.2.1.3).

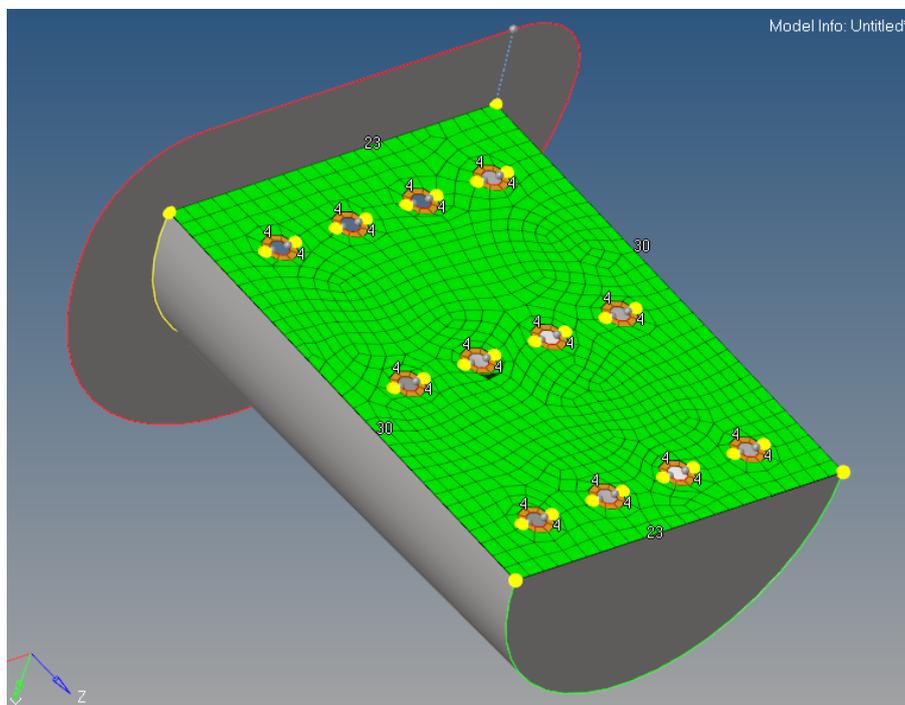


Figura 3.2.1.3: Mesh sull'intera superficie

Questo ragionamento viene iterato su tutta la superficie del guscio. Nell'operazione, il software potrebbe incorrere ad alcuni errori, generando così una mesh non adatta alla simulazione in quanto potrebbe portare ad un'alterazione dei risultati. In particolare è necessario che la forma e le dimensioni degli elementini soddisfino determinati requisiti onde evitare ciò. Alcuni di questi requisiti riguardano la dimensione minima, la dimensione massima, lo jacobiano, i valori minimi degli angoli, i valori massimi degli angoli etc. La presenza di questi problemi viene segnalata colorando di giallo e di rosso gli elementi che sono soggetti ad uno di questi errori (figura 3.2.1.4a). Il colore giallo viene usato quando i valori di interesse escono dalle tolleranze, ed il rosso quando essi diventano critici per l'analisi. Nel caso di elementi gialli l'analisi viene comunque eseguita anche se probabilmente porterà a risultati alterati, mentre nel caso di elementi rossi il software ne impedisce proprio l'avvio.

Per risolvere questi errori, il software mette a disposizione un pannello (figura 3.2.1.4b) che permette di interagire direttamente con i singoli elementi, in modo da modificarli ed ottimizzarli con comandi quali: spostamento manuale dei nodi, ottimizzazione automatico dei nodi o degli elementi, soppressione di lati etc.

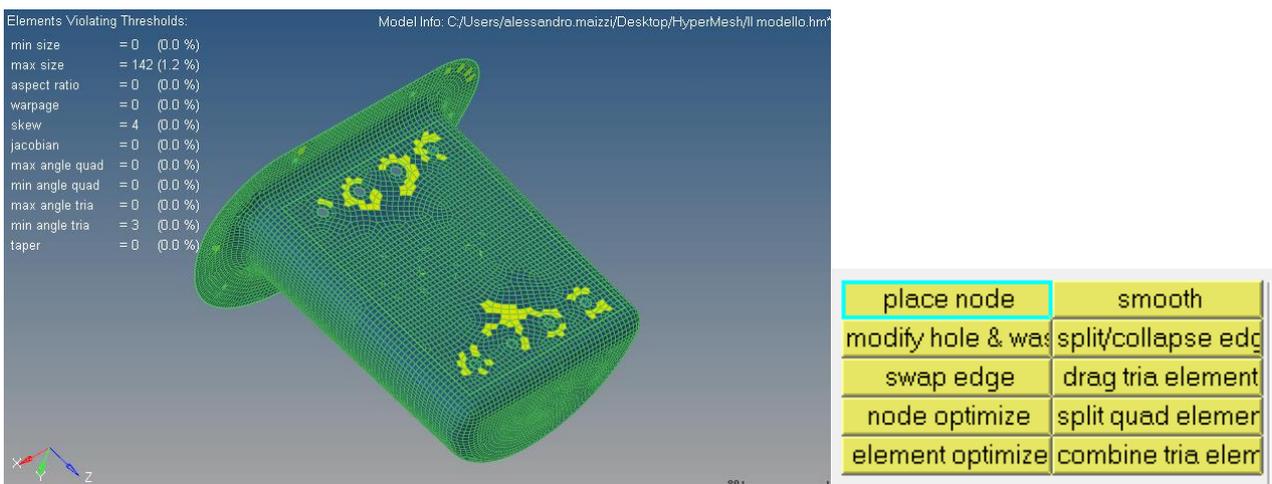


Figura 3.2.1.4: Segnalazione di errori nella mesh

Queste operazioni vanno ripetute per tutti i componenti che sono stati prodotti con l'utilizzo di CATIA nel capitolo precedente. Ogni volta che la mesh di un componente è conclusa, è necessario controllare che i nodi di ogni elemento coincidano con i nodi degli elementi adiacenti.

Una volta completate le varie mesh, si è ottenuto il risultato che è mostrato a livello a grafico nella figura seguente (3.2.1.5).

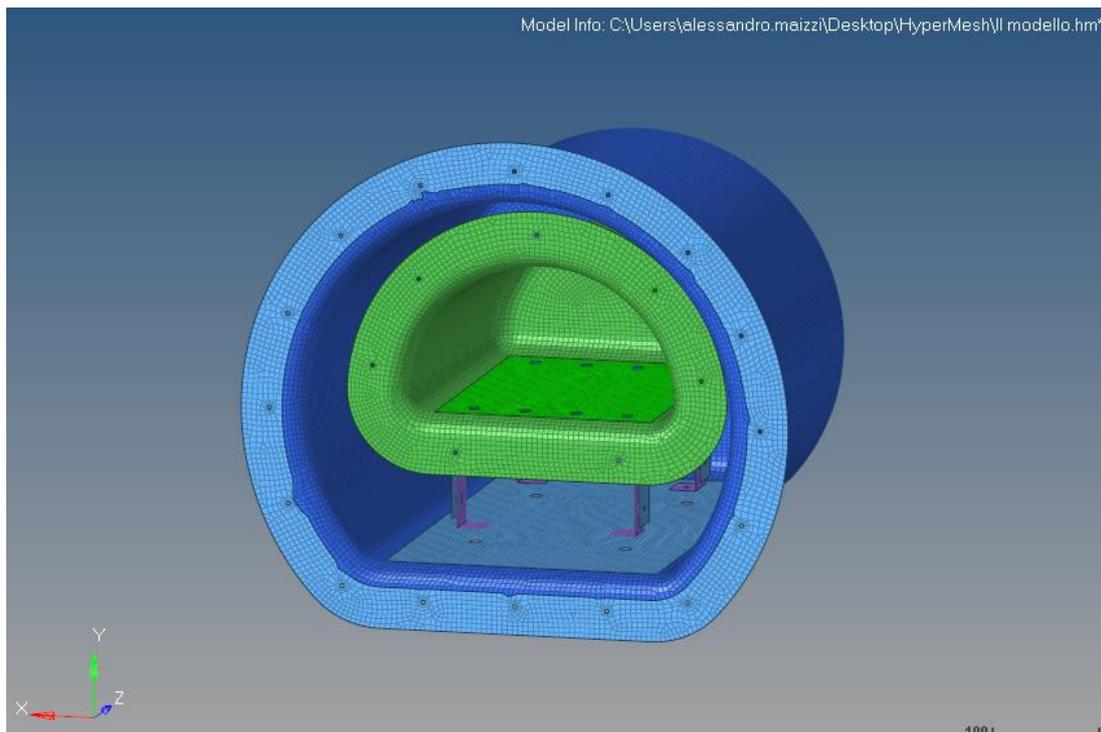


Figura 3.2.1.5: La figura mostra tutti i componenti completamente meshati

Definizione dei materiali e delle proprietà

Per poter eseguire l'analisi e capire se l'idea della struttura è adatta a reggere il carico prodotto dal differenziale di pressione, è necessario definire il materiale con il quale sviluppare ogni componente e capire quindi i materiali che ci sono in gioco.

In base al tipo di comportamento del materiale stesso si andranno a definire delle *Card Image*, infatti il software supporta proprietà di tipo isotrope, ortotrope e anisotrope. Le proprietà di nostro interesse però si limitano a:

- **Isotropia:** Un materiale con proprietà isotrope è definito come un materiale avente le stesse proprietà in ogni direzione. Questo materiale può essere utilizzato con tutti gli elementi lineari. Card image MAT1.
- **Ortotropia in due dimensioni:** Definisce una proprietà del materiale ortotropo (materiale avente le stesse proprietà in tre direzioni perpendicolari fra loro) per elementi di piastra e guscio. Card Image MAT8.

La seconda proprietà è evidentemente utile per quei componenti che possiedono più strati laminati, i quali avranno quindi un comportamento bidimensionale. Gli altri elementi saranno invece isotropi. Di seguito viene presentato l'elenco dei materiali (figura 3.2.1.5) che si è deciso di impiegare, che corrispondono, in ordine di ID a:

- Acciaio. Che sarà impiegato unicamente per la definizione del materiale delle viti e degli altri elementi standard);
- Alluminio. Che caratterizzerà il materiale alcuni componenti, quali i montanti e i profilati estrusi;
- Fibra di carbonio. Che sarà impiegato per formare i sandwich e per costituire i due gusci esterno e interno;
- Nido d'ape. Il primo sarà quello utilizzato per i due basamenti, accoppiandolo con le ply in fibra di carbonio, mentre il secondo andrà a costituire il *gillfab* che sarà però acquistato esternamente;
- Lana di vetro. Che costituisce il gillfab insieme al nido d'ape.

Entities			
	ID		Include
Assembly Hierarchy			
Cards (1)			
Components (13)			
Load Collectors (6)			
Load Steps (1)			
Materials (6)			
Steel	1	Green	0
Alluminium	2	Blue	0
Carbon	3	Yellow	0
Honeycomp Aramyd	4	Cyan	0
Honeycomp GILLFAB	5	Green	0
Wovenglass	6	Blue	0
Properties (9)			
Titles (1)			

Figura 3.2.1.5: Elenco materiali

Ogni materiale presenterà delle caratteristiche variabili in base alla Card Image che associamo. Secondo quanto detto prima il MAT8 verrà associato alla fibra di carbonio, alla lana di vetro e al nido d'ape, mentre a tutto il resto verrà associato il MAT1.

Per dare l'idea di come si presenta la schermata di input delle caratteristiche viene riportata in figura 3.2.1.6.

Name	Value
Solver Keyword	MAT1
Name	Steel
ID	1
Color	
Include	[Master Model]
Defined	<input checked="" type="checkbox"/>
Card Image	MAT1
User Comments	Hide In Menu/Export
E	179264.0
G	70576.4
NU	0.27
RHO	7.92e-006
A	
TREF	
GE	
ST	
SC	
SS	
MATS1	<input type="checkbox"/>
MATT1	<input type="checkbox"/>
MAT4	<input type="checkbox"/>
MAT5	<input type="checkbox"/>
MATFAT	<input type="checkbox"/>
MATF1	<input type="checkbox"/>
MATX...	<input type="checkbox"/>

Figura 3.2.1.6: Schermata di input dati per l'acciaio

Una volta definiti i vari materiale, lo step successivo è quello di associarli ai vari componenti. E questo si fa definendo le proprietà. Anche qui in base a come vogliamo comporre il materiale, dovremo affidare una certa *Card Image*. Le Card Image che andremo ad utilizzare nella nostra situazione sono:

- **PSHELL:** La voce PSHELL viene utilizzata per definire le proprietà degli elementi di una piastra. Con l'elemento PSHELL si hanno diverse opzioni disponibili, che forniscono uno strumento versatile per la modellazione con un'ampia varietà di applicazioni.
- **PCOMP:** Il software permette la definizione di proprietà specifiche per l'esecuzione dell'analisi con materiali compositi, specificando le proprietà del materiale e l'orientamento per ciascuno degli strati.
- **PBARL:** Per la definizione delle proprietà di barre cilindriche (CBAR) si ha la possibilità di utilizzare questa proprietà che facilita l'inserimento dei dati.

Nella figura 3.2.1.7 qui di seguito viene mostrato l'elenco delle proprietà che sono state utilizzate.

Entities				ID	Color	Include
+ Assembly Hierarchy						
+ Cards (1)						
+ Components (13)						
+ Load Collectors (6)						
+ Load Steps (1)						
+ Materials (6)						
- Properties (9)						
+ t1.5 Al	1		0			
+ t2.0 Al	2		0			
+ t2.7 C	3		0			
+ Comp Base out	4		0			
+ Comp Flange	5		0			
+ Viti	6		0			
+ Comp Base in	7		0			
+ Aumento ply C	8		0			
+ GILLFAB	9		0			
+ Titles (1)						

Figura 3.2.1.7: Elenco proprietà

- **Profilati:** per i quattro piedi che sostengono la struttura interna, si è deciso di utilizzare dei profilati estrusi, in quanto la soluzione è più economica dell'alternativa di produrlo da lamiera. La scelta è avvenuta con l'ausilio di una delle specifiche aziendali la quale indica le dimensioni standard, e la proprietà PSHELL conseguentemente assegnatagli è quella con ID 1, alla quale corrisponde l'alluminio come materiale;
- **Montanti:** per produrre i montanti sarà necessario procedere per piegatura di lamiera. Lo spessore affidatogli sarà di 2mm, e la proprietà PSHELL corrispondente è la numero 2. Anche in questo caso il materiale usato è l'alluminio;
- **Gusci:** i due gusci saranno prodotti tramite degli stampi, sui quali verranno stesi i vari strati in fibra di carbonio. Ogni strato ha uno spessore di 0,45mm, e utilizzando sei strati si raggiunge uno spessore di 2,7mm. La proprietà PCOMP associata è la 3, composta da sei strati di fibra di carbonio. Dopo diverse analisi (come si vedrà dopo) si è ritenuto necessario rinforzare la flangia forata del guscio esterno; in quella zona verrà pertanto impiegato uno spessore composto da dieci strati, che richiedono l'utilizzo di una proprietà aggiuntiva, quella con ID 8;
- **Basamenti:** abbiamo detto nel capitolo precedente che per l'assemblaggio si è deciso di incollare dei basamenti piani sui due gusci, per problemi legati all'isolamento dell'aria.

Questi piani saranno quindi formati da un composito composto da due strati in fibra di carbonio, e uno strato centrale in nido d'ape. Le PCOMP assegnate sono quelle con ID 4 e 7. La separazione è dovuta semplicemente a motivi;

- **Tappi:** dopo aver effettuato alcune analisi, per evitare una freccia troppo elevata durante la deformazione del tappo esterno si è deciso di produrre il tappo con una piastra spessa. Per cui, mentre il tappo interno sarà prodotto in gillfab, quello esterno sarà un lavorato.
- **Viti:** gli unici componenti prodotti in acciaio sono i componenti standard, quali viti inserti etc. A questi verrà associata la proprietà 6.

Come esempio di proprietà prendiamo quella del tappo esterno (figura 3.2.1.8): nella prima finestra vengono inseriti i principali dati di input; nella seconda vengono richieste invece informazioni riguardanti singolarmente i diversi strati che compongono il sandwich.

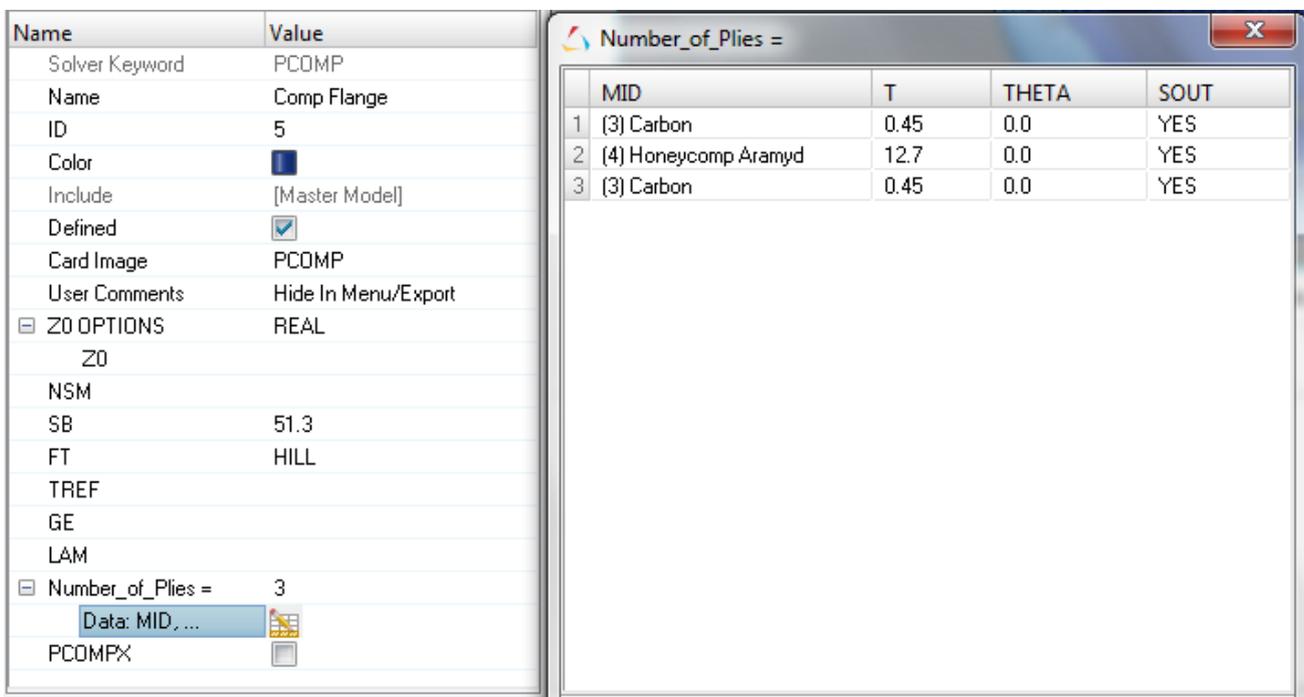


Figura 3.2.1.8: Schermata di input delle proprietà

Definizione di carichi e vincoli

Questo paragrafo si propone di implementare nel software l'effetto che creano i due differenziali pressione che si scaricano sulla struttura. Gli effetti che si prevedono sono due.

Il primo è quello dovuto al differenziale di pressione presente tra l'ambiente interno e l'ambiente a pressione nulla che nasce dal gap tra i due gusci. La conseguenza di ciò si ripercuoterà sulle pareti che separano i due spazi, ovvero sulla struttura del guscio interno, compreso il suo tappo,

portandolo a gonfiarsi, visto che internamente è presente l'aria che spinge verso l'esterno. Per simulare ciò è stato di conseguenza applicato in Hypermesh, un carico di pressione uniforme sulla superficie suddetta (figura 3.2.1.9).

In secondo luogo è da considerare la spinta dell'aria esterna alla struttura che spinge contro il guscio esterno: essendoci vuoto spinto al di là della parete, il guscio tenderà a subire l'effetto contrario del primo, ritrovandosi a convergere verso l'interno. Anche qui è stato applicato un carico di pressione uniforme sul guscio esterno (figura 3.2.1.10)

Essendo le dimensioni di quest'ultimo guscio notevoli, i carichi coinvolti risultano molto grandi, e saranno infatti questi poi critici durante il calcolo strutturale. In entrambi i casi comunque, la pressione applicata è di 1bar, cioè la pressione atmosferica.

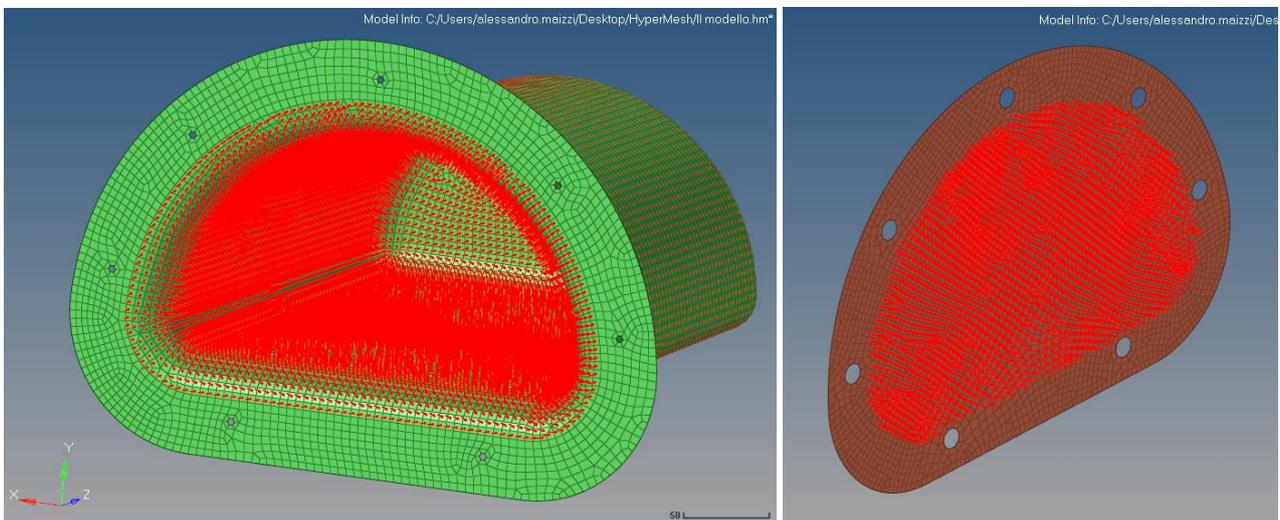


Figura 3.2.1.9: Pressione applicata sul guscio interno

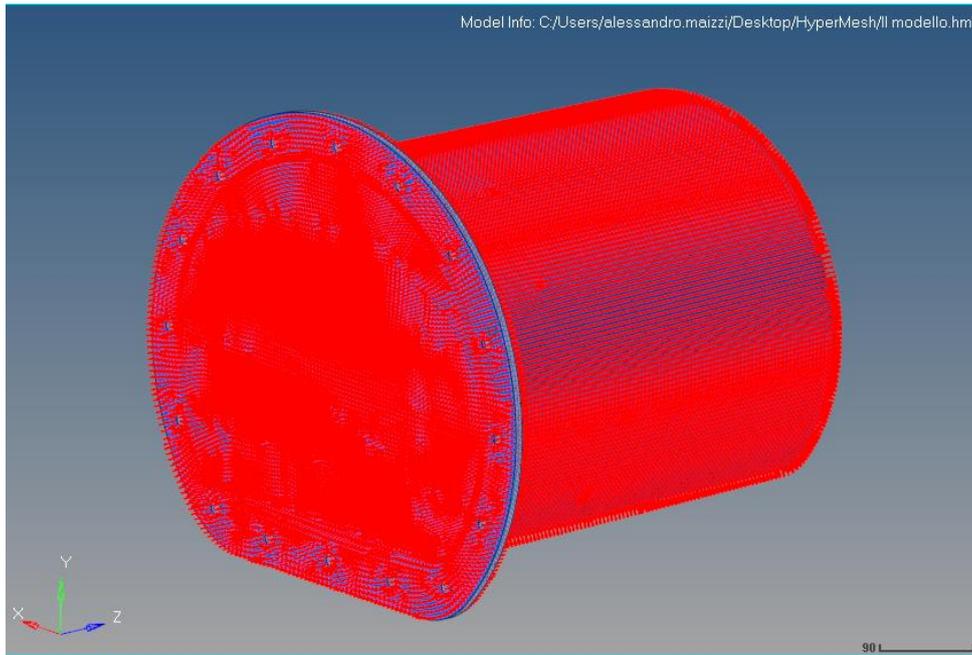


Figura 3.2.1.10: Pressione applicata sul guscio interno

Per quanto riguarda i vincoli invece, la struttura verrà posizionata su quattro appoggi. Il fenomeno che ci si aspetta sono reazioni vincolari verticali, con verso opposto alla forza peso.

In figura 3.2.1.11 sono evidenziati i vettori ottenuti successivamente dall'analisi, i quali rappresentano le **reazioni vincolari dovute alla forza peso**. Il peso maggiore, in corrispondenza delle frecce rosse, è causato dalla particolare geometria della struttura. Basta pensare al grande peso prodotto dal tappo in alluminio.

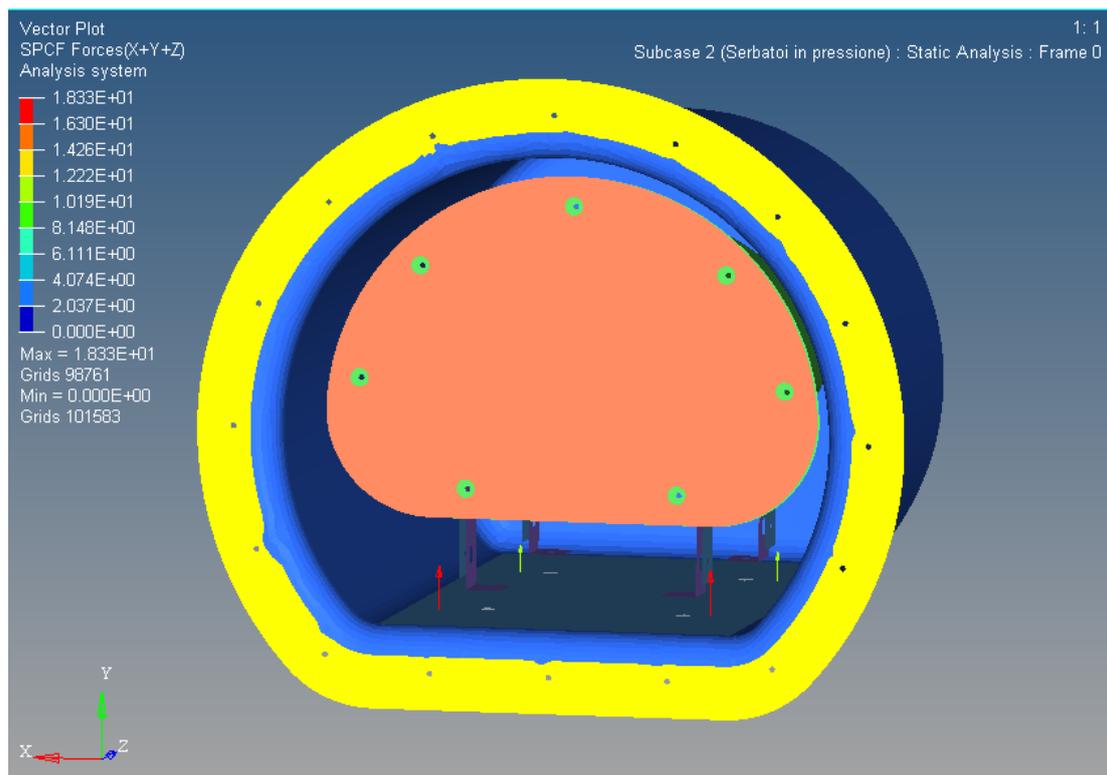


Figura 3.2.1.11: Reazioni vincolari

3.2.2 Analisi FEM

Dopo aver quindi preparato il modello si può procedere con lo sviluppo dei risultati e, una volta indicati tutti gli input, è possibile lanciare l'analisi.

Al momento del lancio viene automaticamente generato un file di input che viene letto dal processore. Il modello di output viene alla fine aperto tramite Hyperview.

Hyperview è sempre parte del pacchetto Hyperworks e offre la possibilità di analizzare tutti gli output richiesti al momento del lancio dell'analisi. In particolare, gli output di nostro interesse riguardano gli spostamenti, utili per valutare quanto le parti piane tenderanno a curvare al momento dell'aspirazione dell'aria, le forze in gioco, per valutare il carico assorbito dai vincoli e gli stress, utili per verificare che il materiale non incorra a rottura nel mezzo della prova.

Spostamenti

Questo dato di output è molto importante per capire l'entità della deformazione che viene prodotta in alcune zone. In particolare quelle più critiche da questo punto di vista sono il tappo esterno, il tappo interno e i fondi dei due gusci. La previsione è sicuramente quella che fra i due

gusci quello da tenere sotto controllo sarà quello esterno, questo poiché, possedendo delle superfici più ampie, subirà una forza maggiore indotta dalla pressione.

Cerchiamo ora riscontro di queste teorie su Hyperview.

Iniziamo col valutare gli spostamenti che subiscono i vari elementi del guscio esterno. La figura 3.2.2.1 mostra la schermata fornita dal software. Notare subito che per la due immagini sono state usate due scale di colore diverse, per dare una maggiore sensibilità sugli spostamenti nelle diverse zone di interesse.

La prima immagine esplicita i vari valori lungo il tappo esterno. Avendo impiegato uno spessore di alluminio di 10mm la freccia massima è ridotta a circa 3mm, concentrata ovviamente nella zona centrale del tappo. L'effetto che provocherà, come vedremo dopo, sarà sollecitare a taglio le viti.

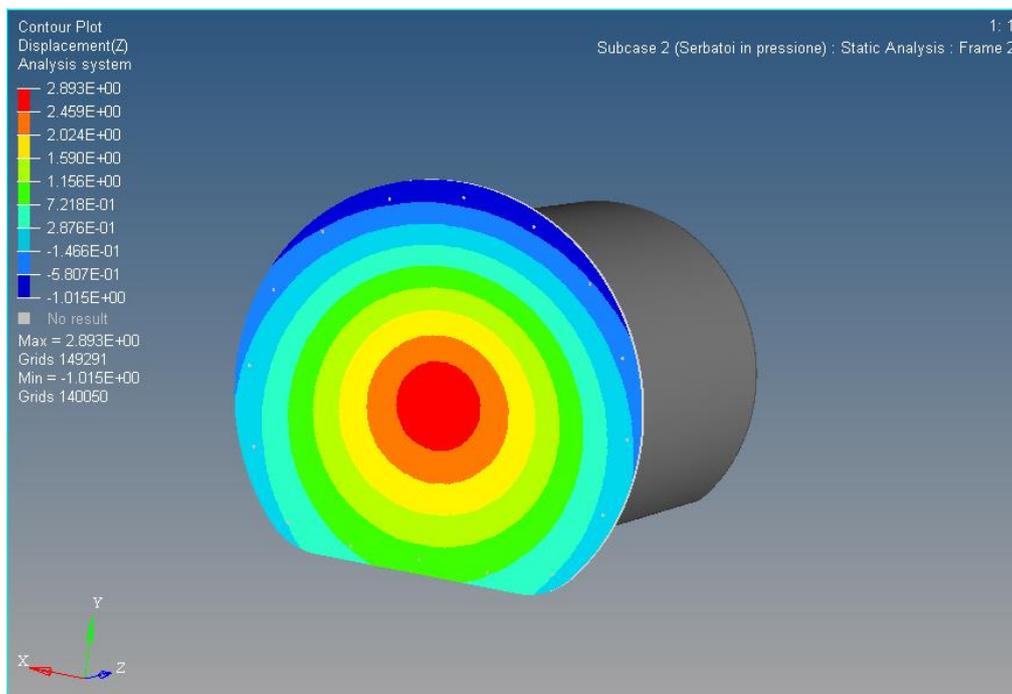


Figura 3.2.2.1a: Spostamenti degli elementi del guscio esterno

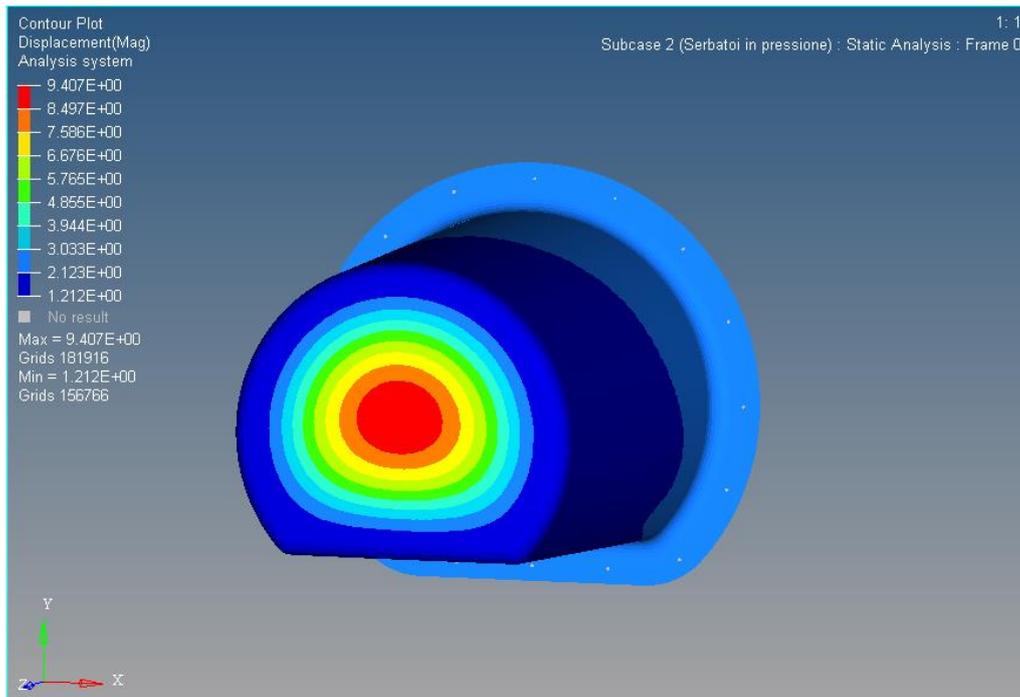


Figura 3.2.2.1b: Spostamenti degli elementi del guscio esterno

Meno critico è invece il discorso riguardante il fondo del guscio esterno, nonostante la freccia più elevata. Il valore raggiunto è infatti di ben 9mm, ma , come vedremo dopo, non sarà un problema ai fini della tensione.

Per chiarezza si presenta anche la figura 3.2.2.2, la quale mostra le frecce per i componenti del guscio interno che presentano rispettivamente 2mm e 1mm.

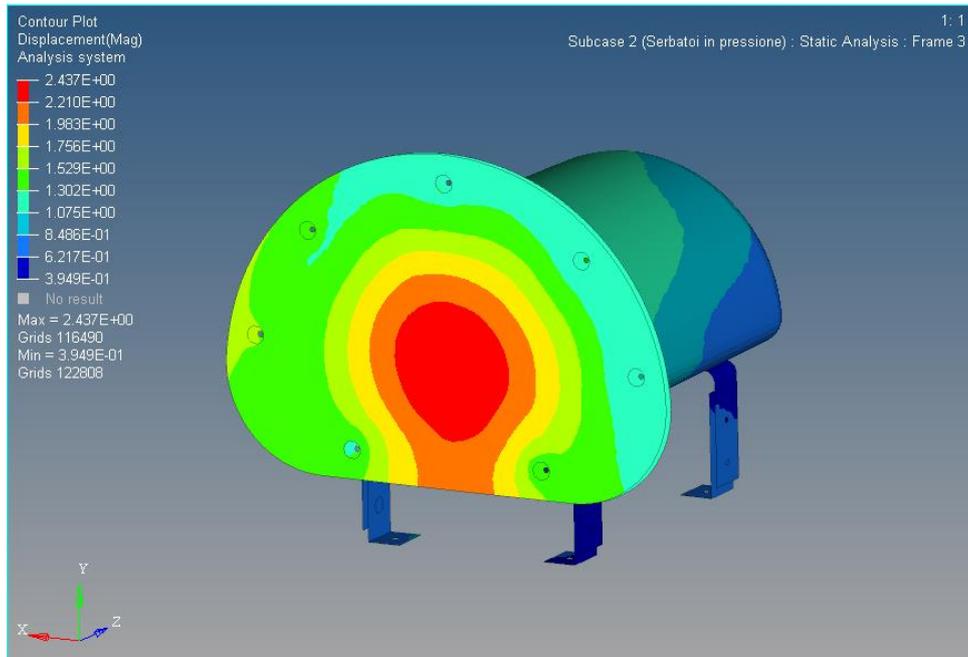


Figura 3.2.2.2a: Spostamenti degli elementi del guscio interno

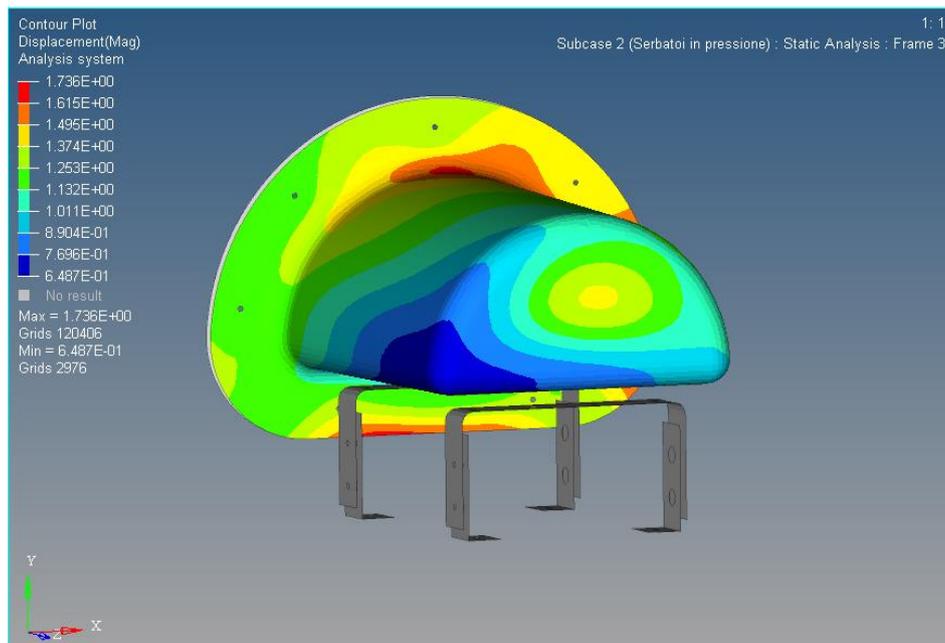


Figura 3.2.2.2b: Spostamenti degli elementi del guscio interno

Vista la grande pressione sul tappo esterno è stato necessario ricorrere a spessori tanto grandi. Fare altrimenti avrebbe causato valori di stress troppo elevato nella zona adiacente alle viti. Per evitare ciò si è precedentemente pensato di impiegare un sandwich con carbonio e nido d'ape anche per questo componente, con una leggera bombatura verso l'esterno: la soluzione era

soddisfacente ma, vista la geometria richiesta dal pezzo, sarebbe stato necessario un altro stampo che avrebbe fatto aumentare troppo i costi di produzione.

Tensioni

Il componente critico per quanto riguarda le tensioni a cui il materiale è sottoposto risulta essere il guscio esterno: questo, come dicevamo prima, è a causa della freccia che ritroviamo sul suo tappo, che produce un effetto di convergenza dei suoi fori verso il centro. Questo effetto provoca un sforzo di taglio sulle viti che collegano tappo e guscio, che tendono a strappare il materiale sulla flangia del guscio.

Si è ragionato molto su questo problema e si sono provate varie alternative, tra cui quella di cambiare forma e materiale al tappo. La soluzione che in definitiva si è scelta di adottare è stata quella descritta precedentemente, che prevede delle ply di carbonio aggiuntive come rinforzo dei fori della flangia, la piastra in alluminio come tappo e un numero di viti pari a sedici.

L'analisi definitiva viene presentata per mezzo delle figure seguenti.

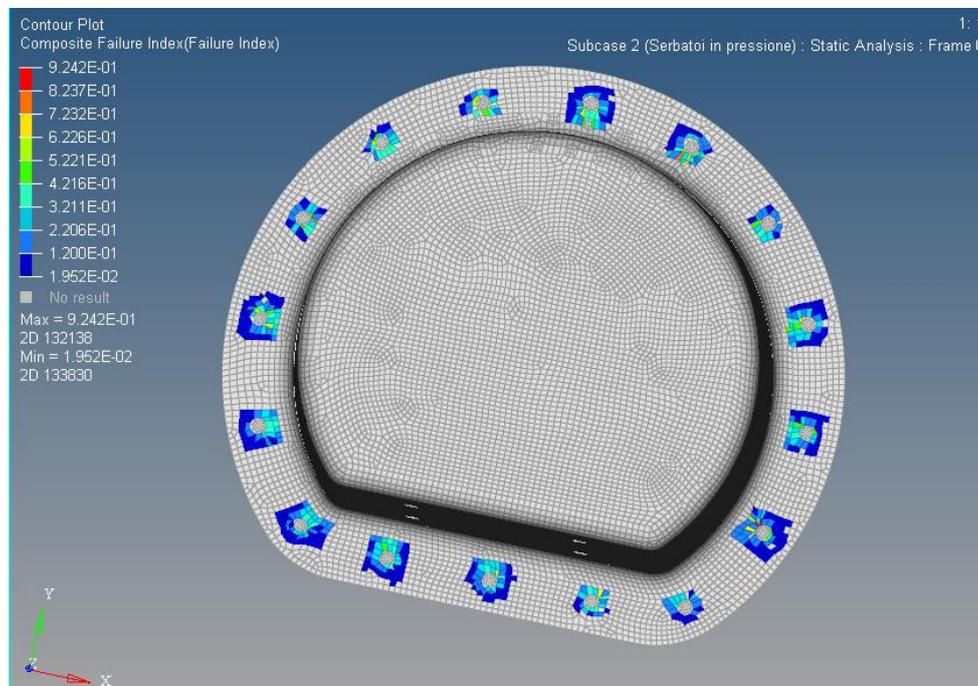


Figura 3.2.2.3: Ply index attorno ai fori del guscio esterno

Il ply index è un indice utilizzato per i componenti in composito che permette di capire se il materiale supera il limite di snervamento oppure no: valutato considerando sia la tensione a cui il componente è soggetto sia la tensione ammissibile, più il suo valore è superiore a 1, più siamo oltre il limite di snervamento. Di conseguenza quello che vogliamo ottenere è un valore per questo indice minore di 1 ovunque.

Nella figura 3.2.2.3 vediamo che, utilizzando un rinforzo di quattro ply oltre le sei utilizzate per tutta la struttura, riusciamo a raggiungere un ply index inferiore a 0,9. Per completezza viene presentata qui di seguito la stessa immagine (figura 3.2.2.4) per il guscio interno, ampiamente in sicurezza. È importante tenere conto che i primi elementi circostanti i fori non sono da considerare vista la natura con la quale i collegamenti vengono implementati in Hypermesh.

Questo effetto invece risulta poco rilevante sul tappo esterno, vista la scelta del materiale e del suo spessore al fine di ottenere una freccia ridotta. Lo stress su di esso viene rappresentato nella figura 3.2.2.5, nel quale non vale più il discorso del ply index in quanto il materiale impiegato non è composito. Il valore di tensione massima fornito da Hypermesh va pertanto paragonato con la tensione ammissibile dell'alluminio scelto che corrisponde a circa 300MPa; siamo quindi in sicurezza.

L'ultimo componente particolarmente sollecitato che richiede quindi una verifica strutturale è il guscio esterno, infatti, fino ad ora, abbiamo solamente parlato della zona attorno ai fori. Ma anche

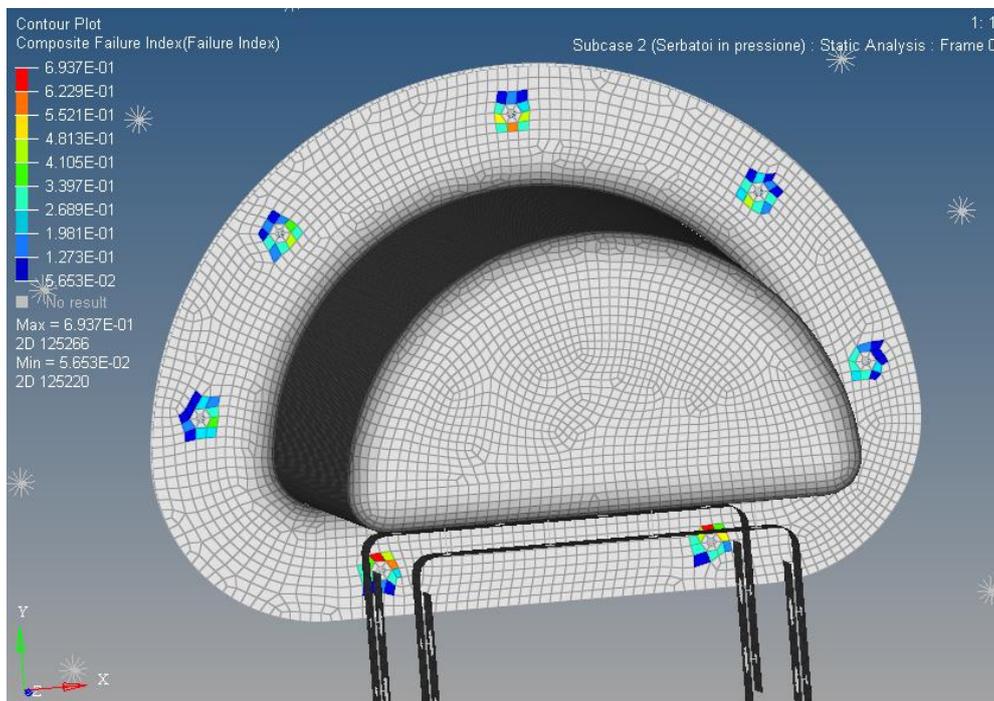


Figura 3.2.2.4: Ply index attorno ai fori del guscio interno

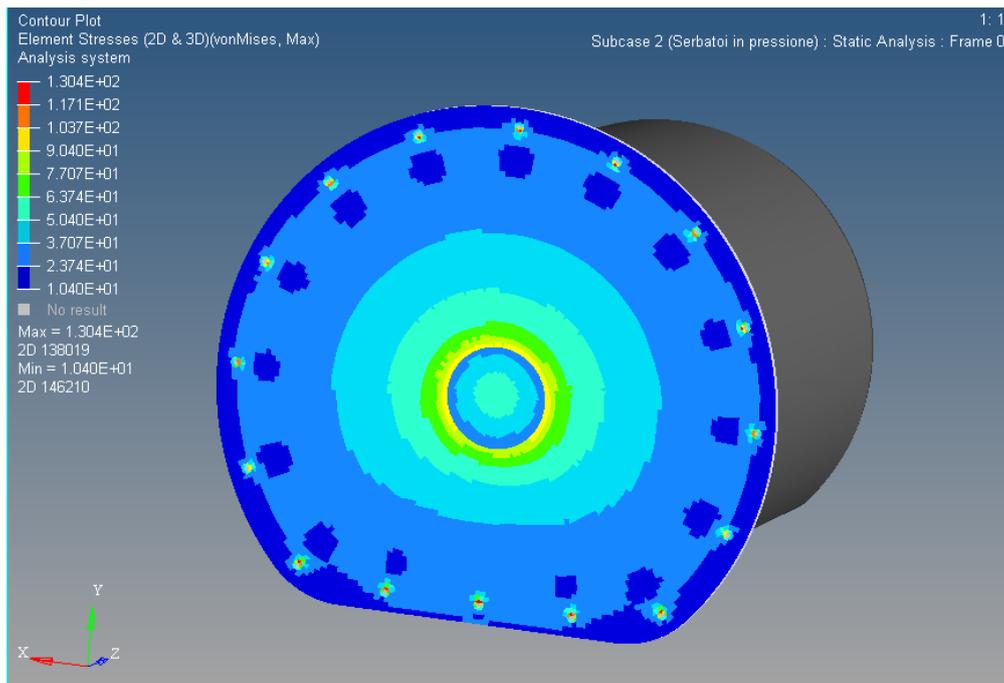


Figura 3.2.2.5: Tensione sopportata dal tappo esterno

il resto della struttura risulta particolarmente sollecitata, basti pensare al fondo del guscio che presenta una freccia di circa 9mm. Essendo l'intero componente costituito dalle sei ply in fibra di carbonio, ovvero da un materiale composito, utilizzeremo il ply index per verificare che non incorra a snervamento o rottura.

La zona più critica, come previsto, risulta essere proprio il contorno del fondo, che deve sopportare la grossa inflessione dell'area (figura 3.2.2.6). Per completezza viene mostrata anche la figura che rappresenta il ply index sul guscio interno, ricordando che anche essa è composta da sei ply di carbonio.

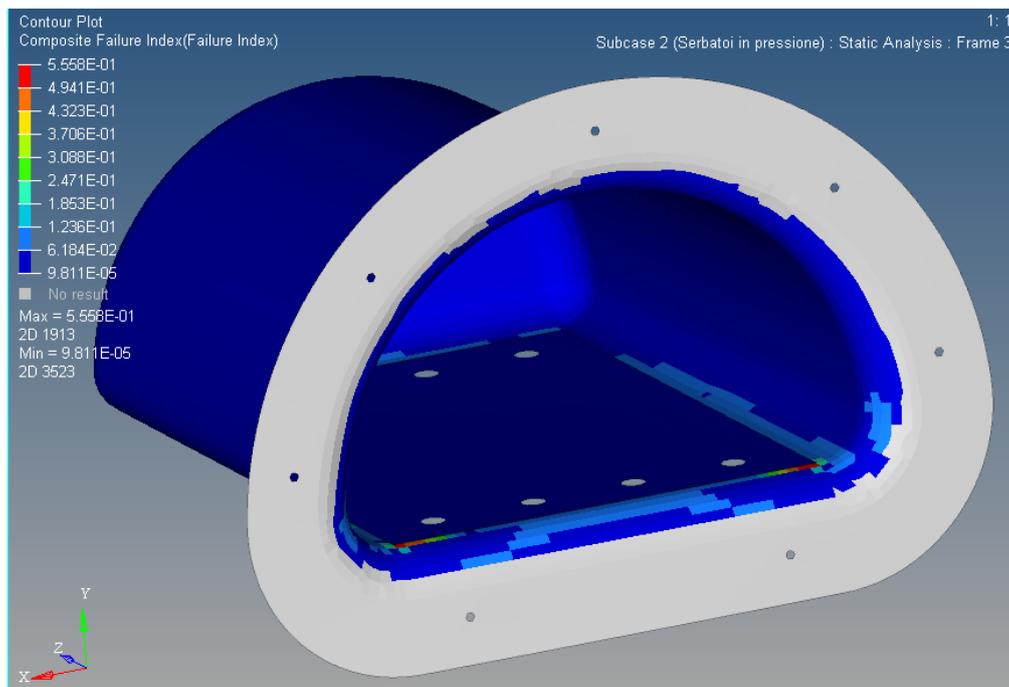
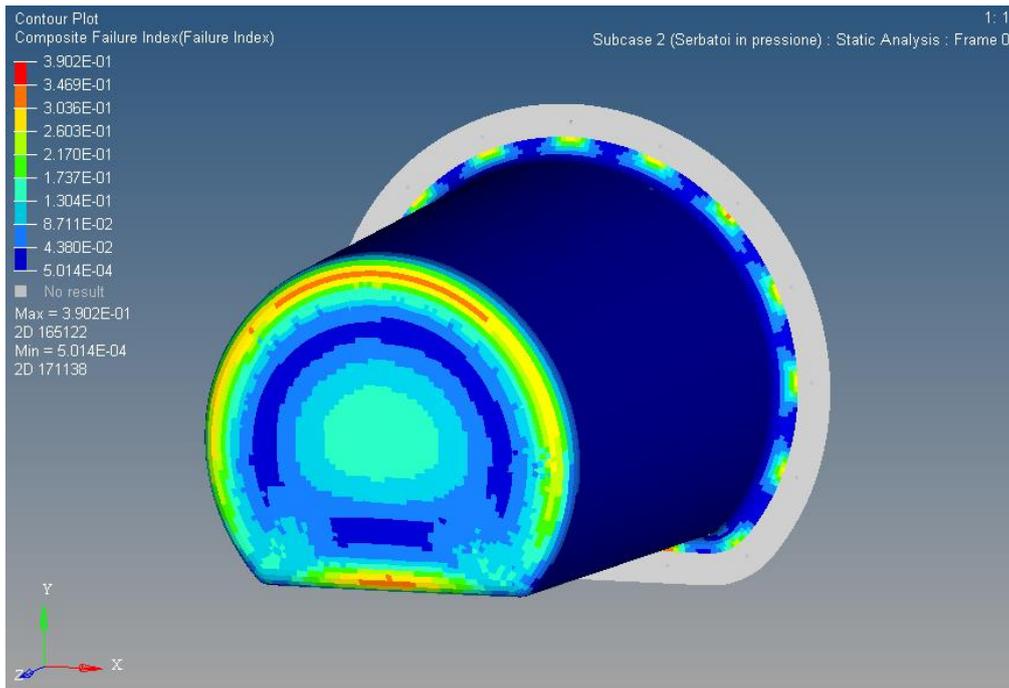


Figura 3.2.2.6: Ply index sui gusci

Gli altri elementi, tra cui gli elementi responsabili del collegamento tra i due gusci, non sono stati tirati in ballo in quanto il carico che devono sopportare è di bassa entità.

Viti

Per analizzare come si comportano le viti e per capire se risultano critiche possiamo considerare due tipi di resistenza:

- Resistenza a *bearig*.

Non è altro che la tendenza della vite a strappare i componenti che collega. Per verificare che questo cedimento non avvenga, si utilizza la seguente:

$$\frac{F_{max}}{d \cdot s} \cdot CS = \sigma_{amm}$$

Come valore di tensione ammissibile a bearing è stato impiegato il valore ottenuto da vecchie prove su ply di M26 (fibra di carbonio) che raggiungevano la rottura a 444MPa.

Considerando che la forza massima a taglio agente sulle viti, ricavata a seguito della simulazione, è risultata di circa 1675N, si può ricavare, tramite formula inversa, il valore del coefficiente di sicurezza CS.

Il coefficiente di sicurezza così ottenuto ha un valore di circa 4,5 per il GUSCIO ESTERNO, quello più critico. Pertanto possiamo ritenerci in sicurezza.

- Resistenza a *pull-through*.

La resistenza a pull-through è la capacità del materiale a resistere alla tendenza che ha la vite penetrare il materiale. Nel nostro caso è solamente il guscio interno da considerare, in quanto solo le sue viti lavorano a trazione. La verifica è la seguente:

$$\frac{F_{max}}{2\pi R \cdot s} \cdot CS = \sigma_{amm}$$

Il valore di tensione ammissibile corrisponde a 51,3MPa

La forza massima assiale agente sulle viti, ricavata a seguito della simulazione strutturale, è risultata di circa 805N.

Il coefficiente di sicurezza così ottenuto ha un valore di circa 56 per il GUSCIO INTERNO, quello più critico. Il valore così alto è spiegato dal fatto che l'elemento che spinge non è una vite, ma un'olivetta a incollaggio.

Considerando il pull-through per gli inserti passanti invece, si ha una forza ammissibile pari a 1540N, da cui il **coefficiente di sicurezza risulta pari a circa 1,9**.

Alternativa con cinque ply

Visto la buona resistenza della struttura si è pensato di ridurre il numero di ply che la costituisce, portandola da sei a cinque (figura 3.2.2.7).

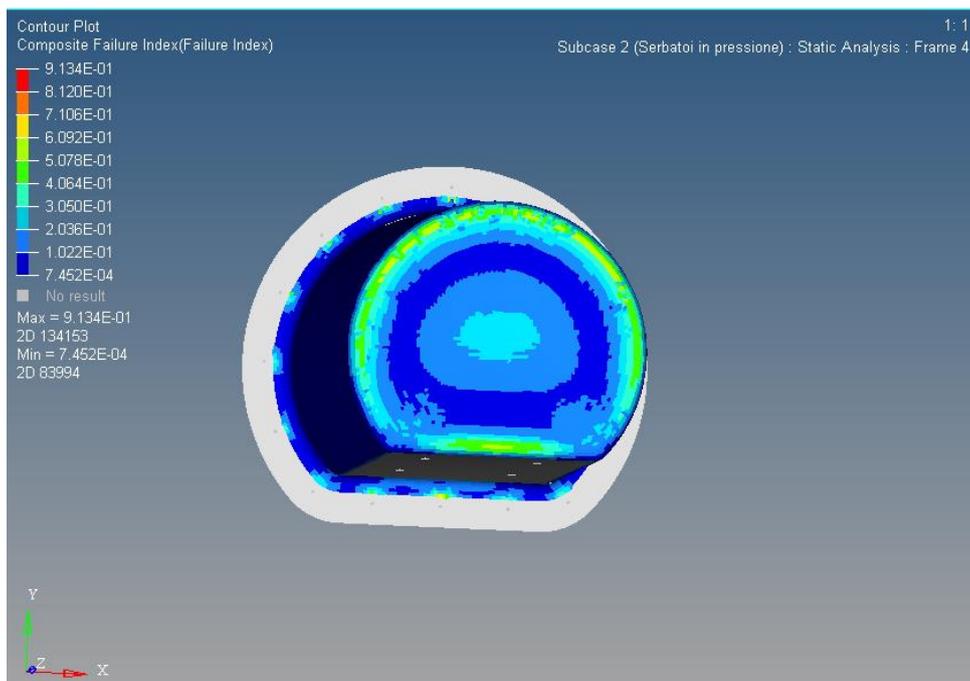
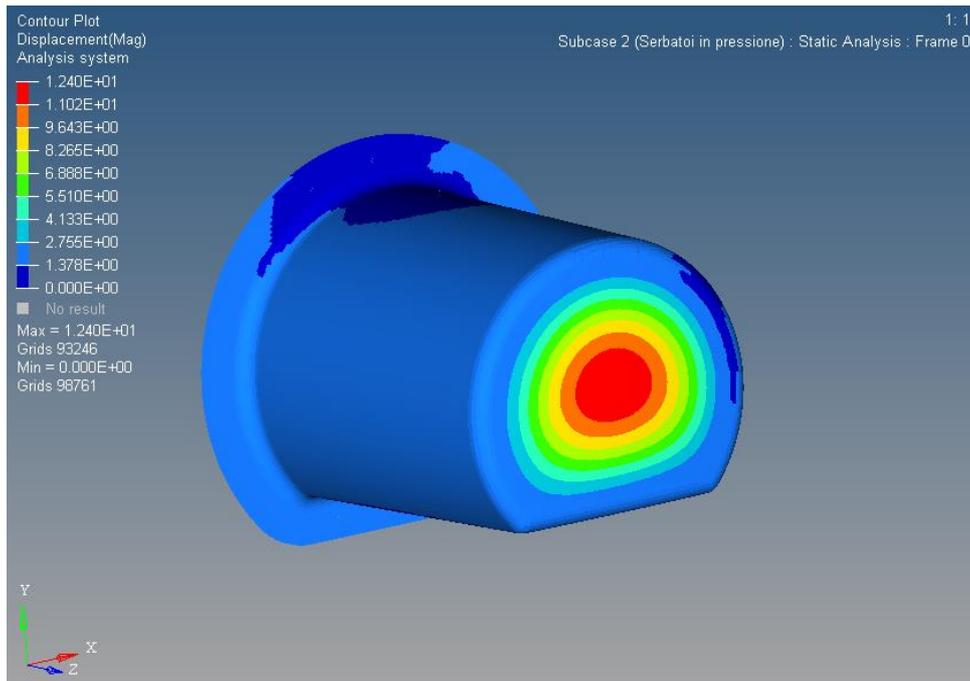


Figura 3.2.2.7: Rispettivamente freccia e tensione del caso con cinque ply

Osservare come, riducendo il numero di ply, la freccia sul fondo del guscio esterno sia aumentata a 12mm. Questo aumento della freccia porterebbe ad un aumento del ply index sul bordo del fondo stesso permettendogli di raggiungere un valore di circa 0,7. La soluzione è accettabile ma, per questione di sicurezza, si è preferito impiegare una ply aggiuntiva, utilizzando quindi sei ply come previsto.

3.3 Stampo

La produzione degli stampi, per esigenze di tempo, è stata affidata ad una ditta esterna, insieme alla loro progettazione. Il primo risultato ricevuto è stato chiaramente la matematica degli stampi. Osserviamo innanzitutto lo stampo associato al guscio interno con p/n 6TST-697-035 (figura 3.3.1); tutte le osservazioni che saranno fatte a proposito varranno anche per lo stampo rispettivo del guscio esterno.

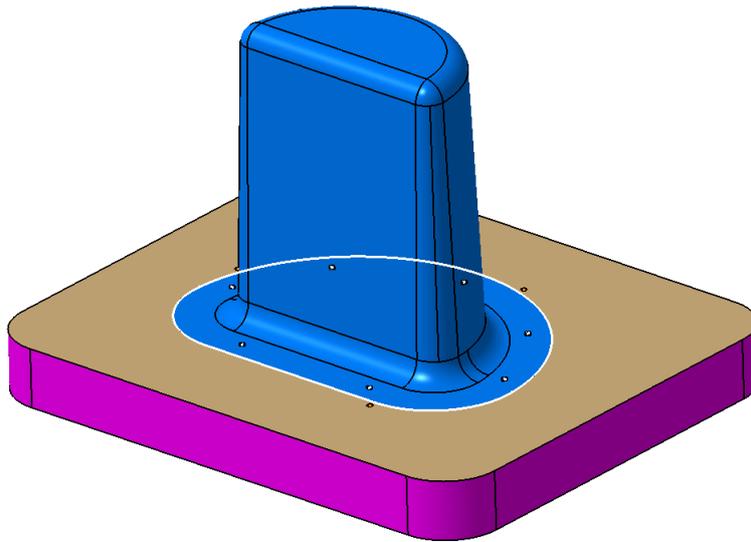


Figura 3.3.1: Stampo del guscio interno

Essendo uno stampo da laminazione, la sua applicazione avverrà attraverso l'adagiamento dei vari strati di interesse su di esso in modo da associare la giusta morfologia ad ognuno, e, dopo aver tagliato il materiale in eccesso, arrivando ad ottenere l'aspetto della figura 3.3.2.

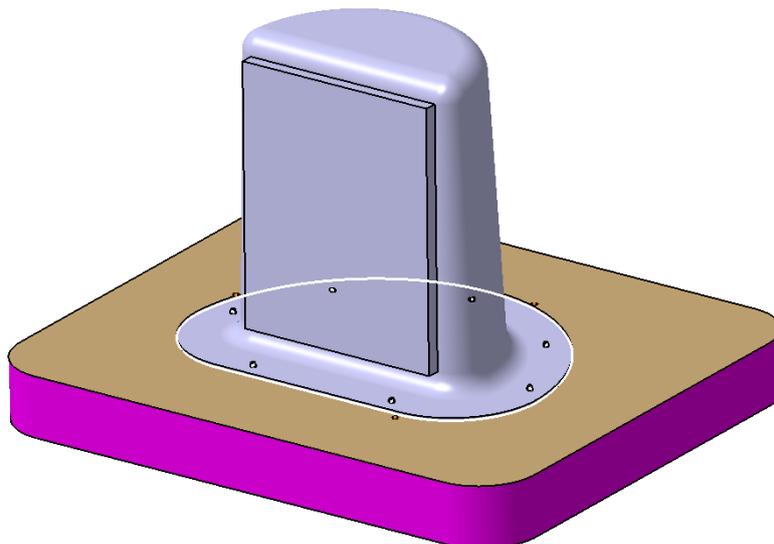


Figura 3.3.2: Guscio esterno ottenuto sullo stampo

Per raggiungere questa forma è però necessario eseguire alcune operazioni specifiche dopo aver steso tutti i layer nel modo giusto; a tal proposito è possibile notare nella figura 3.3.1 tre elementi:

- *trim-line*
- fori per il *trim-line* a croce
- fori TH

Procediamo con ordine.

La *trim-line* è raffigurata in figura 3.3.1 come una curva che segue il contorno del pezzo, e ha come funzione quella di definire dove i vari strati che abbiamo steso andranno tagliati per raggiungere la forma richiesta. Visto che, una volta stesi i layer, la *trim-line* andrebbe coperta e non potremmo più sapere dove è posizionata, questa curva è il realtà in rilievo sullo stampo, in questo modo il percorso da seguire per completare il taglio sarà evidenziato sui layer stessi.

I fori per il *trim-line* a croce hanno una funzione simile alla *trim-line* e il loro aspetto è mostrato in figura 3.3.3. Proprio come per il taglio per eseguire il contorno del guscio, è necessario anche eseguire i fori presenti; per poter sapere la posizione corretta dei fori sono anche in questo caso presenti delle linee in rilievo, e sono posizionate a croce in modo da conoscere con esattezza dove si troveranno i loro centri.

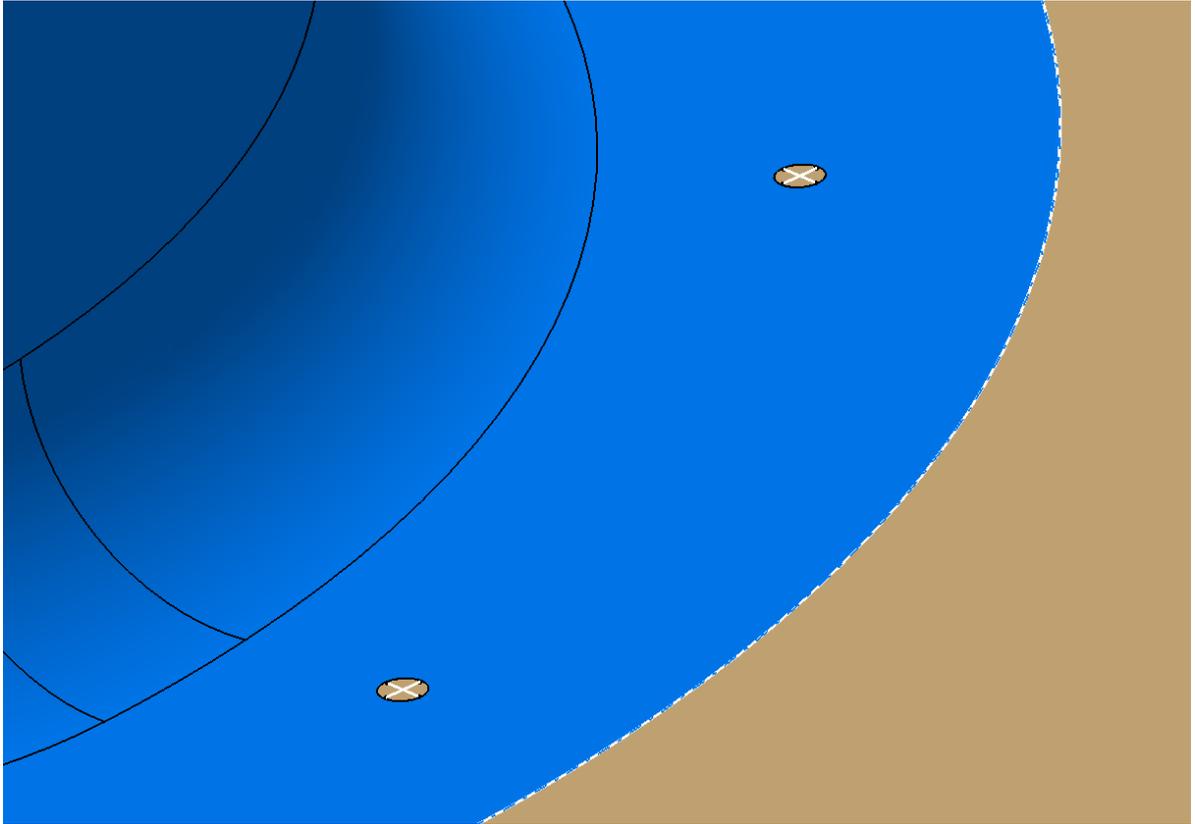


Figura 3.3.3: Fori per il trim-line a croce

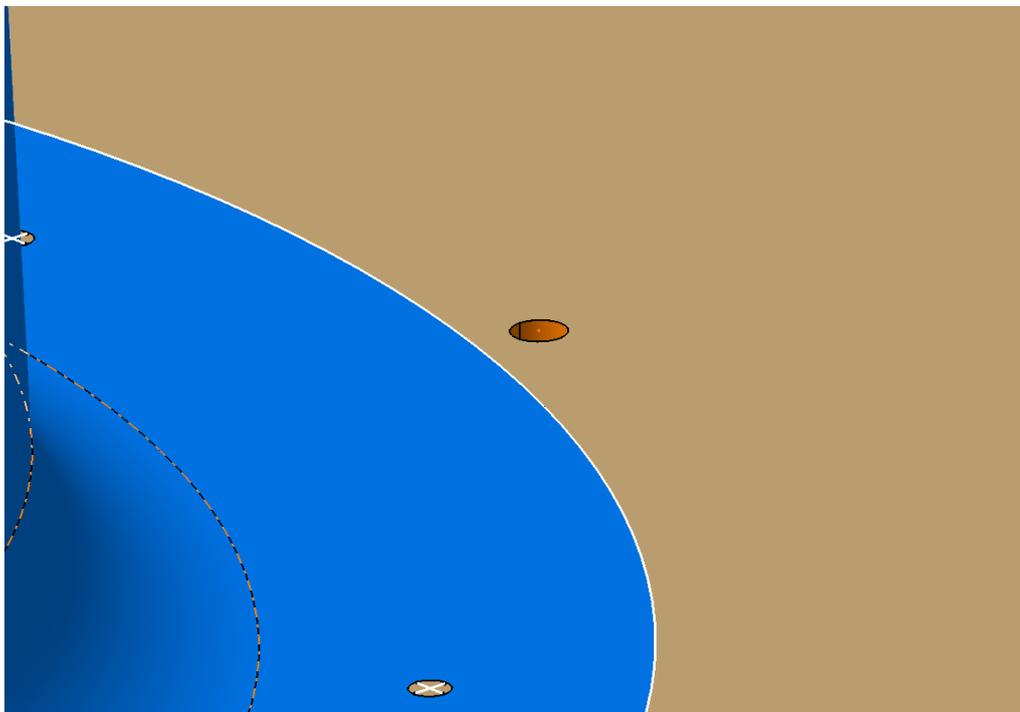


Figura 3.3.4: Fori TH

In ultimo ci sono i fori TH, che però non saranno in realtà necessari per la prova e sono presentati in figura 3.3.4. La loro presenza è fortemente richiesta quando necessitiamo di un'elevata precisione sul pezzo: in questi casi viene eseguito un taglio abbastanza sommario lungo la trim-line girando però attorno ai fori TH. Una volta fatto ciò viene rimosso il semilavorato così ottenuto dallo stampo e viene fissato ad un adeguato supporto per mezzo dei di questi fori; il tutto viene a questo punto inserito nella macchina utensili di cui abbiamo bisogno e vengono eseguite così le varie lavorazioni di precisione. Nel nostro caso potrebbe essere utilizzato questo sistema per rifinire correttamente il contorno pezzo, ma visto che non abbiamo grosse richieste di precisione preferiamo non procedere in questo modo risparmiando sia tempo che risorse economiche.

Per completezza presentiamo anche l'aspetto dello stampo per il guscio esterno (figure 3.3.5 e 3.3.6), per il quale, come già detto, valgono le stesse considerazioni appena fatte.

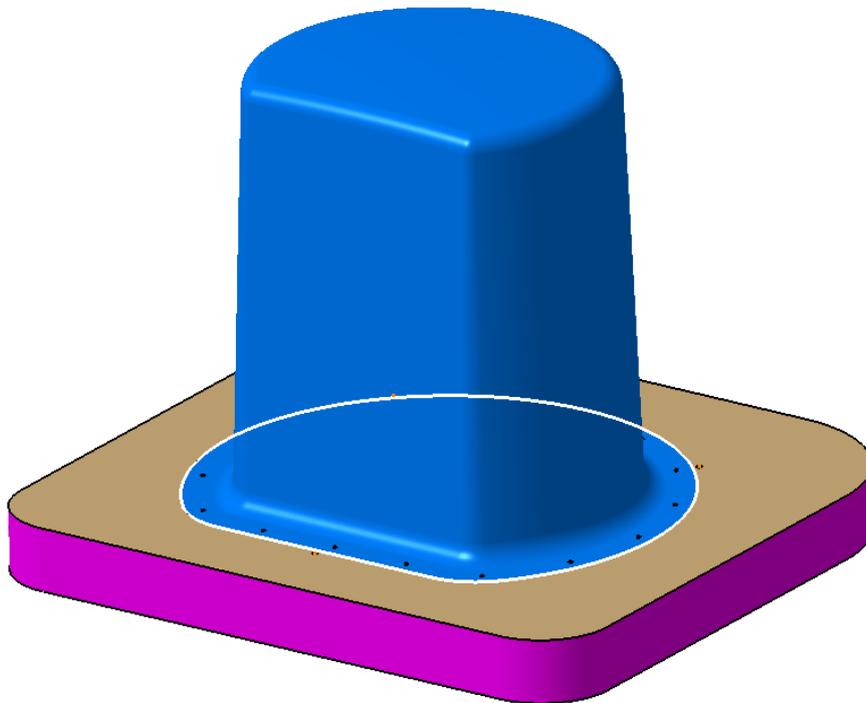


Figura 3.3.5: Stampo del guscio esterno

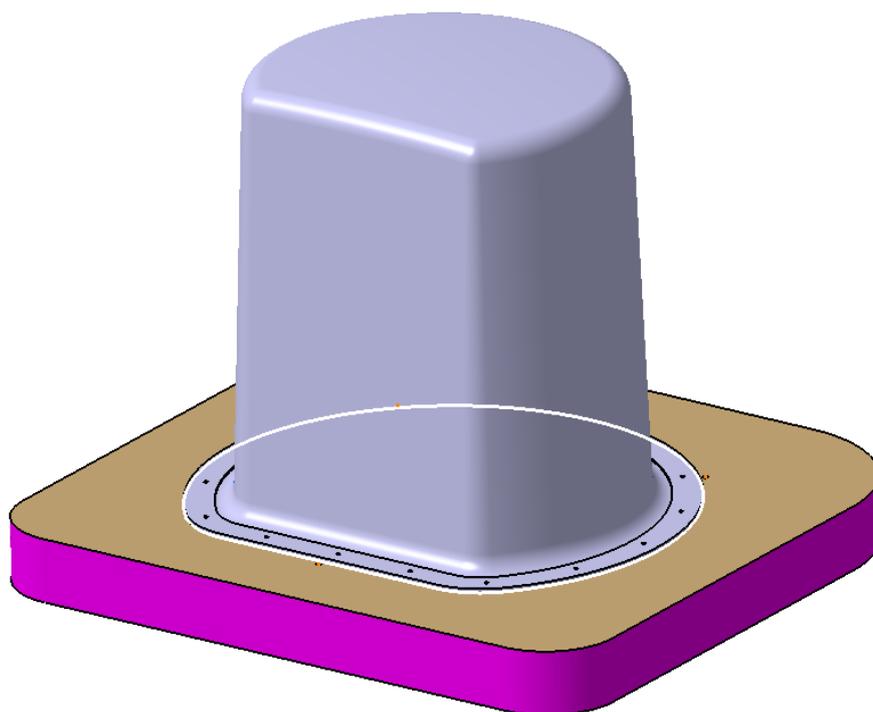


Figura 3.3.6: Guscio esterno ottenuto sullo stampo

3.4 Messe in tavola

Dopo aver preparato al meglio il modello si può iniziare a parlare di produzione. Le messe in tavola risultano, infatti, fondamentali nel momento in cui il progetto arriva nelle mani dei responsabili della produzione stessa. Il loro compito è quello di illustrare quali saranno i vari step da seguire al fine di arrivare poi al prodotto completo, a partire dalle laminazioni e dalle forature, fino ad arrivare agli assemblaggi e alle installazioni.

Ad accompagnare le messe in tavola è presente un documento necessario per interpretarle al meglio, la cui denominazione è Distinta Base Tecnica, conosciuta come DBT. Quest'ultima permette di apprendere informazioni circa i grezzi, gli standard e le specifiche impiegate, che le messe in tavola ci indicheranno poi come lavorare e assemblare. Oltre ciò, prevede anche l'albero dei materiali, ovvero l'elenco di tutti i componenti, sottoassiemi, semilavorati e materie prime necessari per realizzare il prodotto, ognuno rappresentato da un *part number* (p/n) che nel nostro caso sarà nella forma 6TST-697-XXX:

I numeri con le cifre finali che vanno da -001 a -029 rappresentano dei componenti ottenuti da un'installazione; quelli che vanno da -031 a -099 rappresentano degli assiemi; mentre quelli che vanno da -101 a -199 rappresentano delle parti.

La distinta base rappresenta una sequenza ordinata di legami, detti legame padre-figlio, che collegano ogni articolo con il suo componente. I prodotti finiti non hanno mai padri, i componenti di acquisto non hanno mai figli, e gli oggetti prodotti o assemblati dall'azienda hanno sempre figli. Laddove c'è un legame padre figlio, vi è collegato una tavola, che contiene l'operazione, o le operazioni, necessarie per trasformare il figlio nel padre.

Vengono qui di seguito presentate le dieci tavole che sono state prodotte, e infine la Distinta Base.

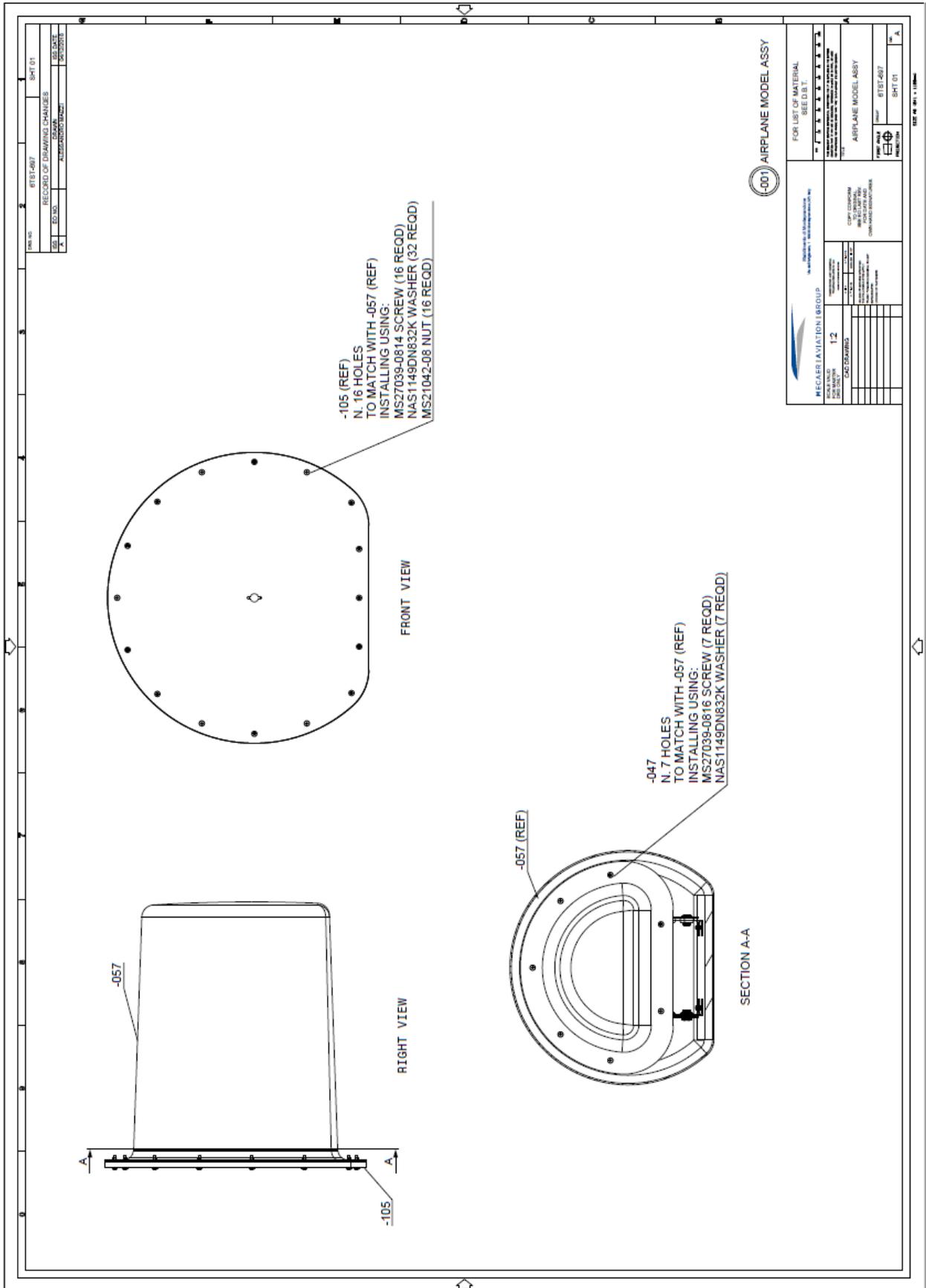


Tavola 1: 6TST-697-001

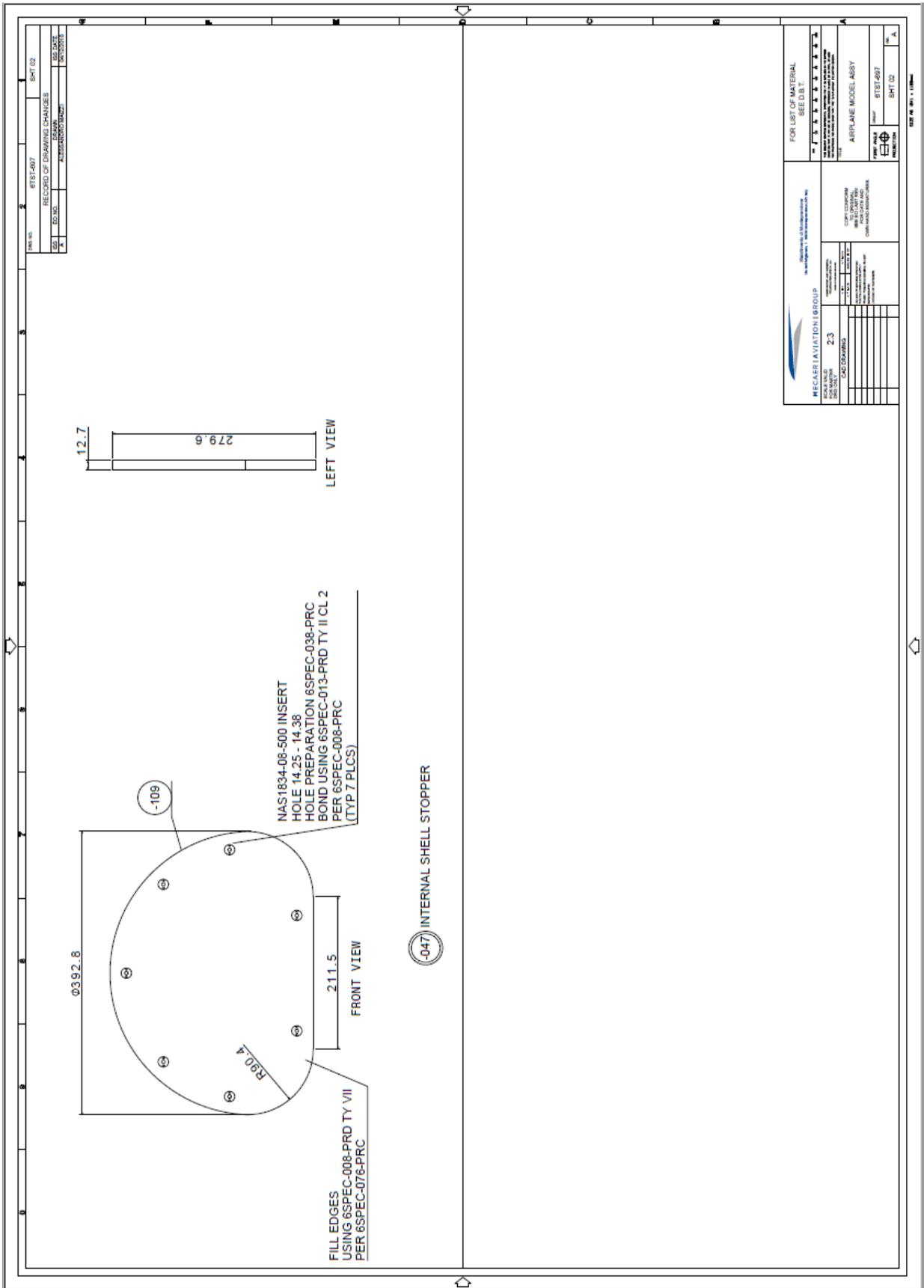


Tavola 2: 6TST-697-047

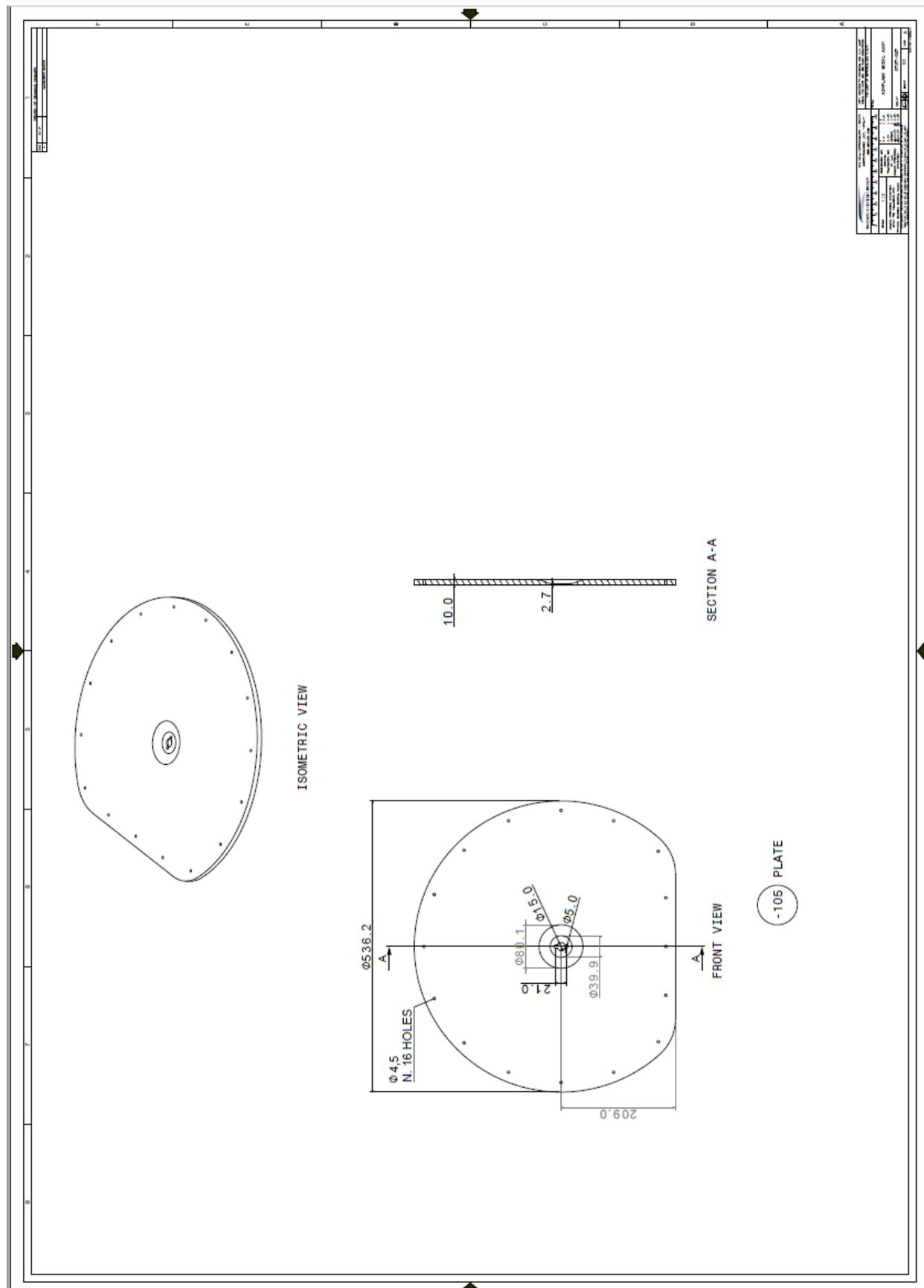


Tavola 3: 6TST-697-105

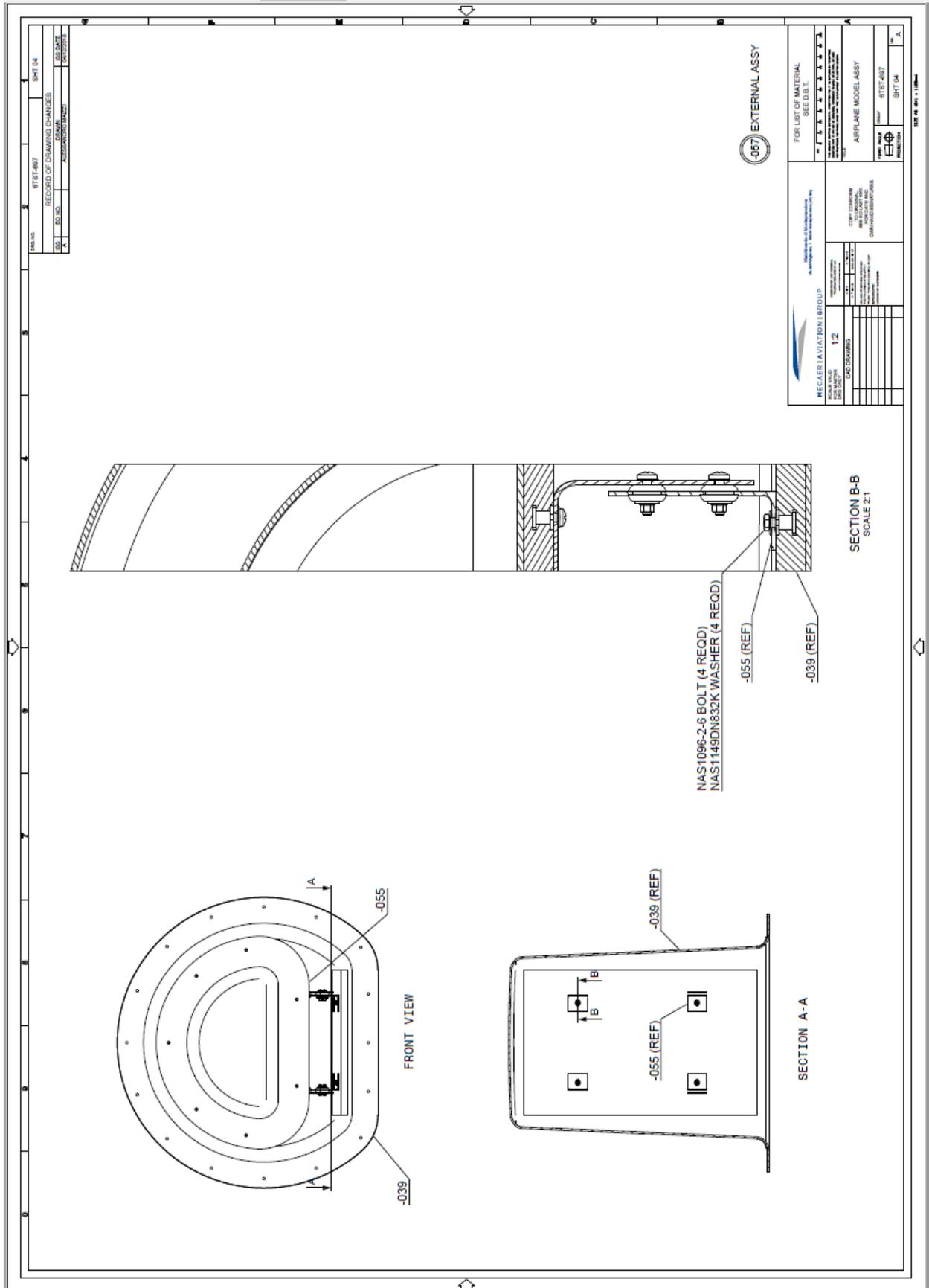
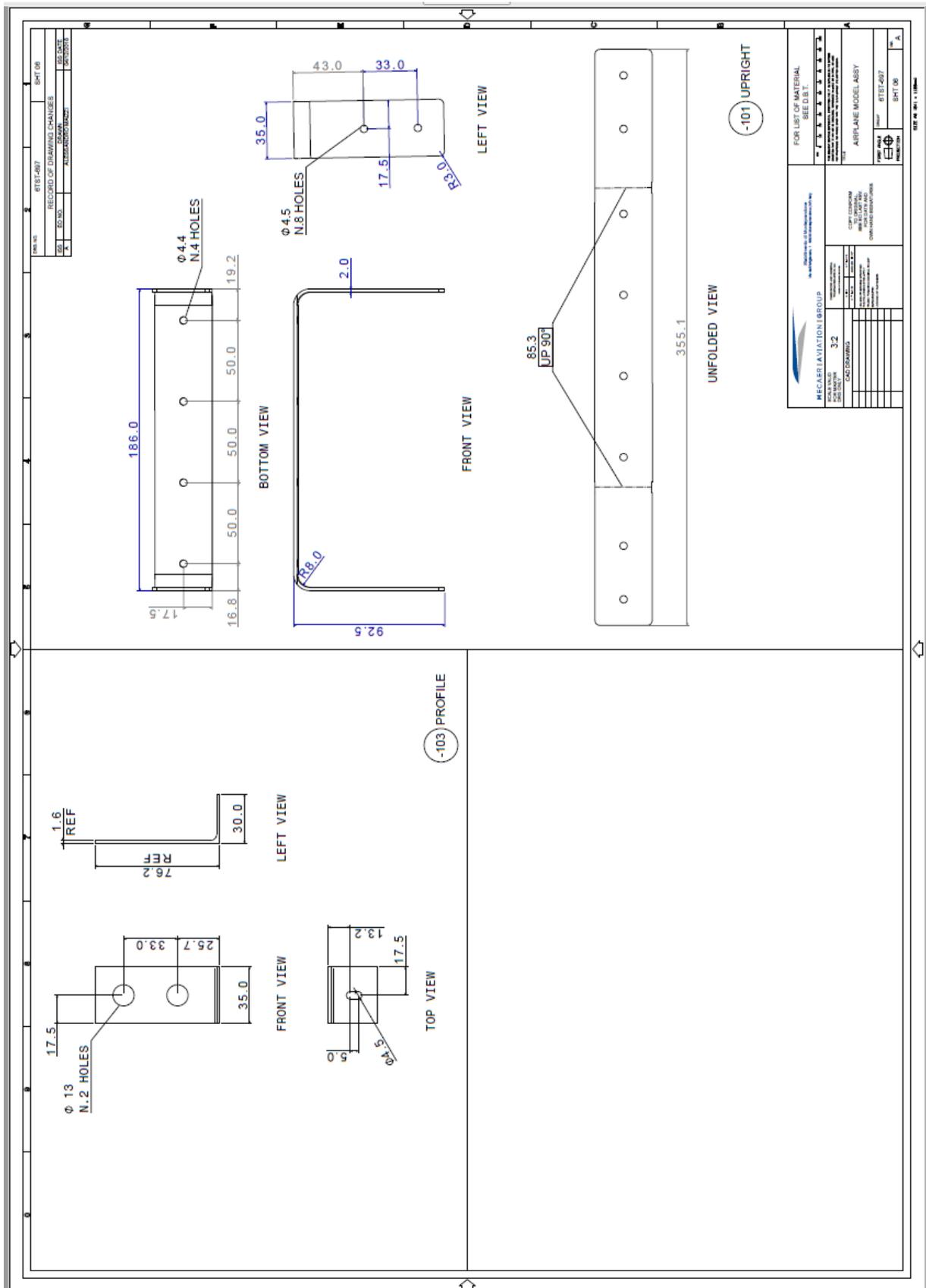
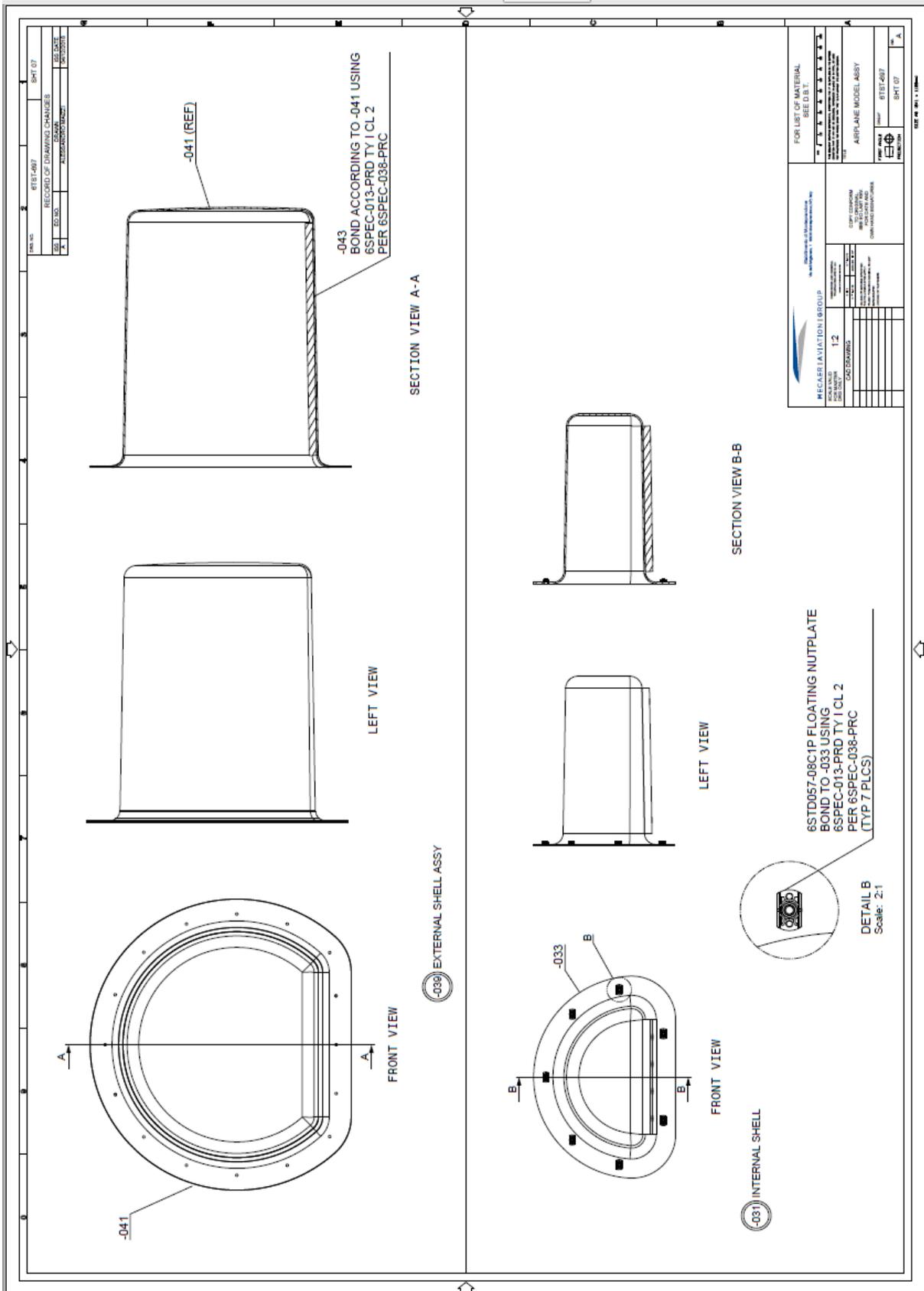


Tavola 4: 6TST-697-057



FOR LIST OF MATERIAL SEE B.1	
REVISIONS	
NO.	DESCRIPTION
1	ISSUE FOR PRODUCTION
PROJECT: AIRPLANE MODEL ASBY DRAWING NO.: 8533 UP 901 SHEET NO.: 101 UPRIGHT SCALE: 1:1	
DATE: 10/10/2010	DESIGNER: SHT 06
CHECKED: SHT 06	APPROVED: SHT 06

Tavola 6: 6TST-697-101 e -103



REV	NO	DATE	DESCRIPTION
1	1	15/03/2017	ISSUE FOR PRODUCTION

REV	NO	DATE	DESCRIPTION
1	1	15/03/2017	ISSUE FOR PRODUCTION

FOR LIST OF MATERIAL SEE D.B.L.	
MATERIALS LIST	
PART NAME	
QUANTITY	
UNIT	
REVISION	
DATE	
DRAWN BY	
CHECKED BY	
APPROVED BY	
SCALE	
SHEET NO.	
SHEET OF	

Tavola 7: 6TST-697-031 e -039

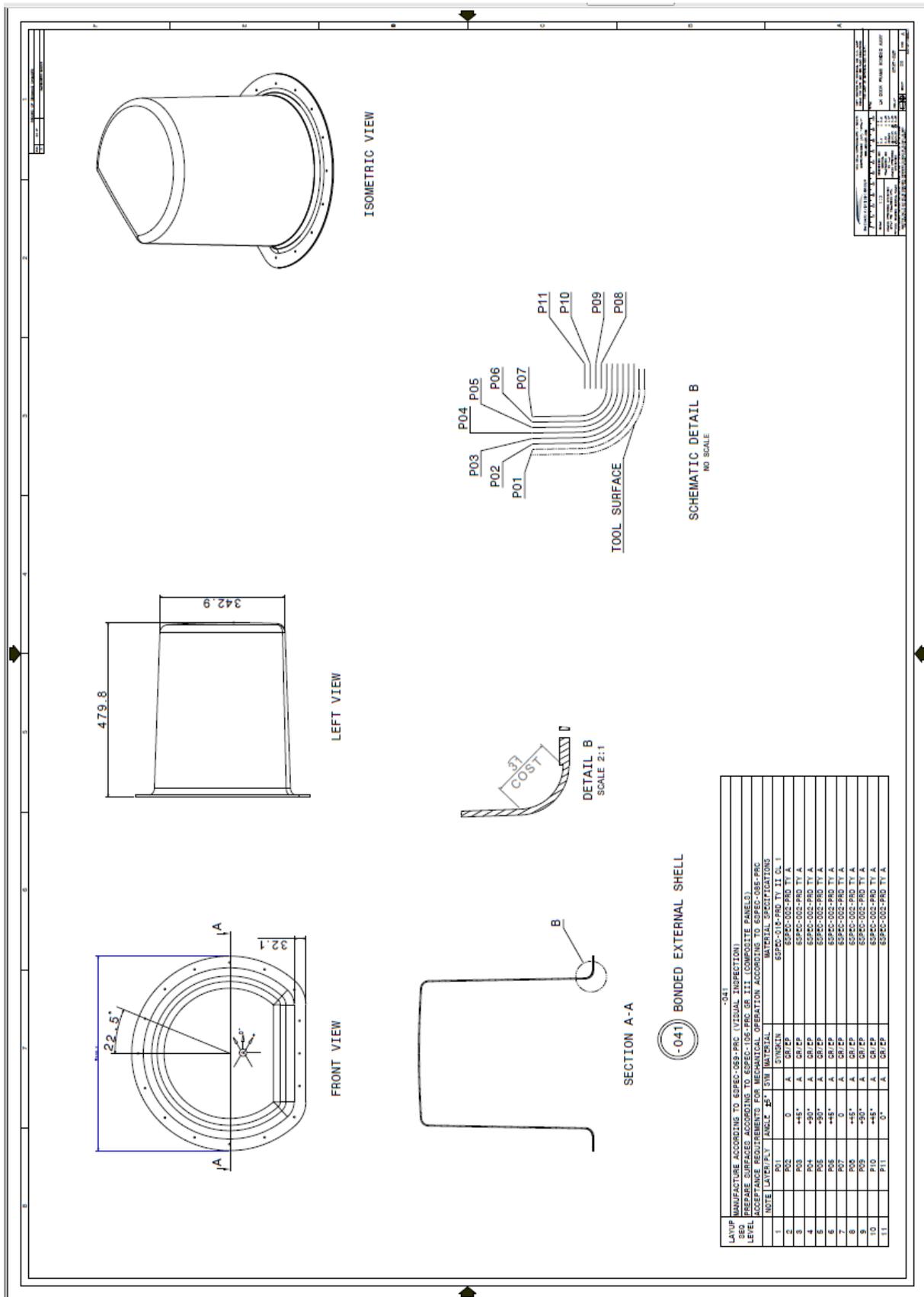


Tavola 8: 6TST-697-041

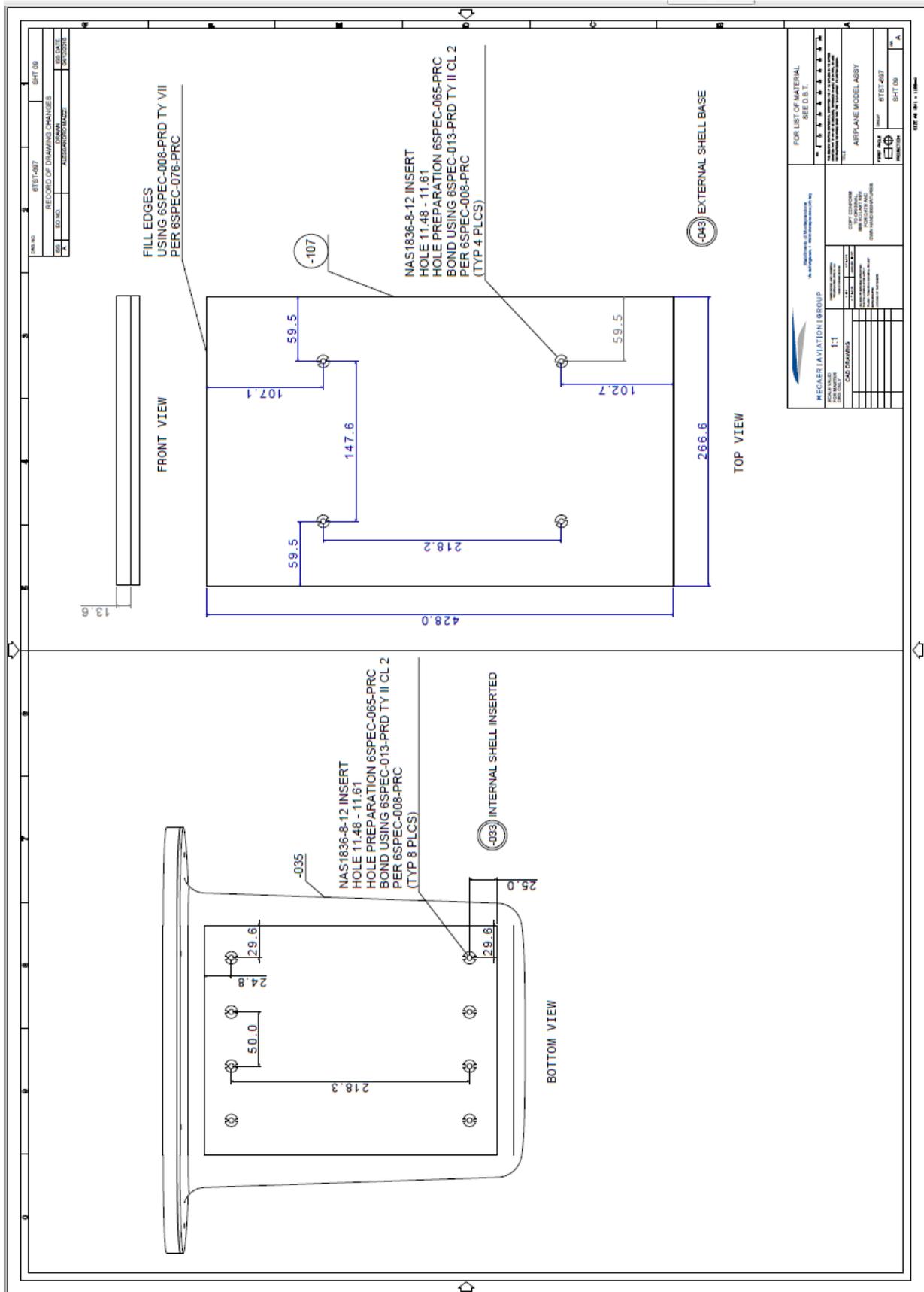


Tavola 9: 6TST-697-033 e 043

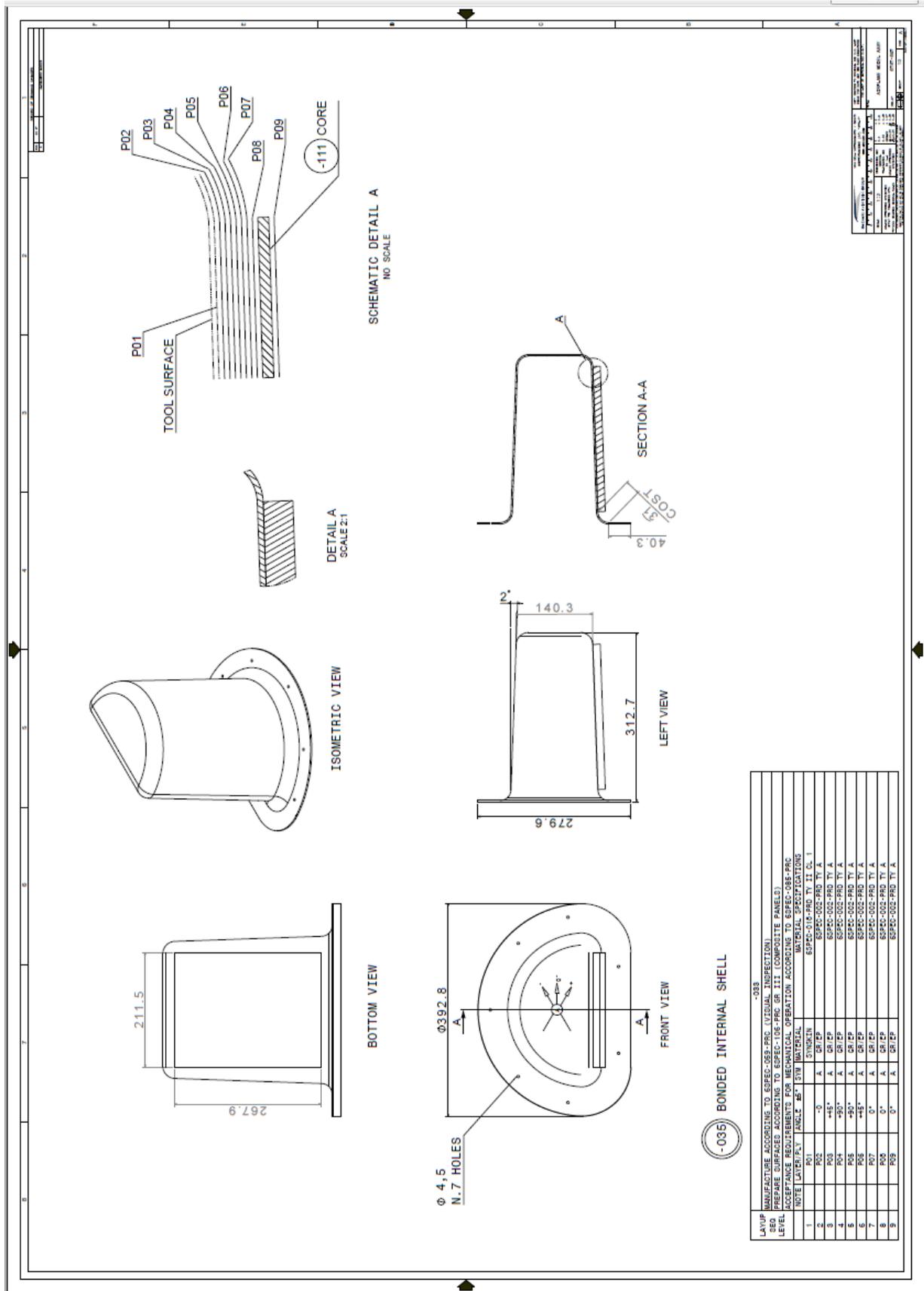


Tavola 10: 6TST-697-035

DRAWING NUMBER:
 TITLE:
 ISSUE:
 DOC. NUMBER:
 STATUS:
 FINISH SPEC.:
 FINISH CODE:

6AB1ME505
 SCUFF PLATE S.D. 37 PLUS INSTL
 A
 6AB1-5673
 D
 6SPEC-001-PRD
 6SPEC-017-PRD



PIN FINITO		TIPO		DENOMINAZIONE		SPECIFICA		UM		LARGHIA		LUNGH.		COND.		FIN.SUP.	
PART NUMBER		TYPE		DESCRIPTION		SPECIFICATION		THICK.		WIDTH		LENGTH					
-001								PESO / WEIGHT =	11,307 kg								
-031								PESO / WEIGHT =	1,252 kg								
-033								PESO / WEIGHT =	1,252 kg								
-035								PESO / WEIGHT =	1,252 kg								
-039								PESO / WEIGHT =	3,627 kg								
-041								PESO / WEIGHT =	3,395 kg								
-043								PESO / WEIGHT =	0,232 kg								
-047								PESO / WEIGHT =	0,148 kg								
-055								PESO / WEIGHT =	1,587 kg								
-057								PESO / WEIGHT =	5,269 kg								
-101		LA		AL-ALY 2024-T3		AMS-QQ-A-250/4		MM	2,00	35	355,1			T3			
-103		PR		MAKE FROM A170A 125 C2		AMS-QQ-A-200/3		MM	1,60	35	106			T3511			
-105		PI		AL-ALY 2024-T351		AMS-QQ-A-250/4		MM	10	600				T351			
-107		FB		PLANAR SANDWICH PANEL		MAKE FROM 6STD019-1-12,7-1-0		MM	13,6	300	450						
-109		FB		GILLFAB		MAKE FROM 6SPEC-042-PRD TY I TH.12,7mm		MM	12,7	440							
-111		HC		HONEYCOMP		6SPEC-016-PRD GR I, CL II, TY I,3,2-48		MM	12,7	230	300						
								PESO / WEIGHT =	0,127 kg								

DRAWING NUMBER:
 TITLE:
 ISSUE:
 DOC. NUMBER:
 STATUS:
 FINISH SPEC.:
 FINISH CODE:



6AB1ME505
 SCUFF PLATE S.D. 37 PLUS INSTL
 A
 6AB1-5673
 D
 6SPEC-001-PRD
 6SPEC-017-PRD

PART LIST

REV	ZONA ZONE	NOTE	A/P	DENOMINAZIONE DESCRIPTION	PART NUMBER	*****	-001	-031	-033	-035	-039	-041	-043	-047	-055	-057
A	2B01		A	AIRPLANE MODEL ASSY	-001											
A	0B07		A	INTERNAL SHELL	-031		1								1	
A	7D09		A	INTERNAL SHELL INSERTED	-033			1								
A	8B10		A	BONDED INTERNAL SHELL	-035											
A	8D07		A	EXTERNAL SHELL ASSY	-039											1
A	7B08		A	BONDED EXTERNAL SHELL	-041				1							
A	2B09		A	EXTERNAL SHELL BASE	-043				1							
A	8D02		A	INTERNAL SHELL STOPPER	-047		1									
A	2B05		A	INTERNAL ASSY	-055											1
A	2B04		A	EXTERNAL ASSY	-057		1									
A	1B06		P	UPRIGHT	-101										1	
A	6D06		P	ANGLE	-103										1	
A	6A03		P	PLATE	-105		1									
A	2E09		P	PANEL	-107							1				
A	7F02		P	PANEL	-109									1		
A	1D10		P	CORE	-111					1						
				SCREW	MS27039-0814		16									
				INSERT	NAS1834-08-500								7			
				SCREW	MS27039-0816		7									
				WASHER	NAS1149DN832K		39								16	4
				NUT	MS21042-08		16								8	4
				BOLT	NAS1096-2-6										8	
				SCREW	MS27039-0810										8	
				WASHER	NAS1149D0332K										8	
				SCREW	MS27039-0805										8	
				FLOATING NUTPLATE	6STD057-08C1P			7								
				INSERT	NAS1836-8-12									4		8
				GROMMET	MS35489-1			AR			AR					
				ADHESIVE, 6SPEC-013-PRD TY I CL 2				AR			AR					
				ADHESIVE, 6SPEC-008-PRD TY VII				AR			AR					
				ADHESIVE, 6SPEC-013-PRD TY II CL 2				AR			AR					
				6SPEC-002-PRD TY A							AR					
				6SPEC-018-PRD TY II CL 1							AR					

3.5 Produzione e montaggio

Nel complesso, i componenti che sono necessari per poter studiare nel modo previsto l'argomento in esame sono prodotti alcuni tramite laminazione, alcuni tramite piegatura di lamiera e altri sono degli estrusi acquistati esternamente.

3.5.1 Procedura di ottenimento del laminato

Il punto di partenza è il rotolo del materiale pre-impregnato (figura 3.5.1). Il rotolo viene conservato a basse temperature (circa -15°C) affinché la resina mantenga le sue proprietà. Per prima cosa è quindi necessario estrarre dal freezer il rotolo per poi lasciarlo a temperatura ambiente per almeno mezz'ora, tempo indicativo e variabile anche in funzione della temperatura ambiente e del tipo di materiale.

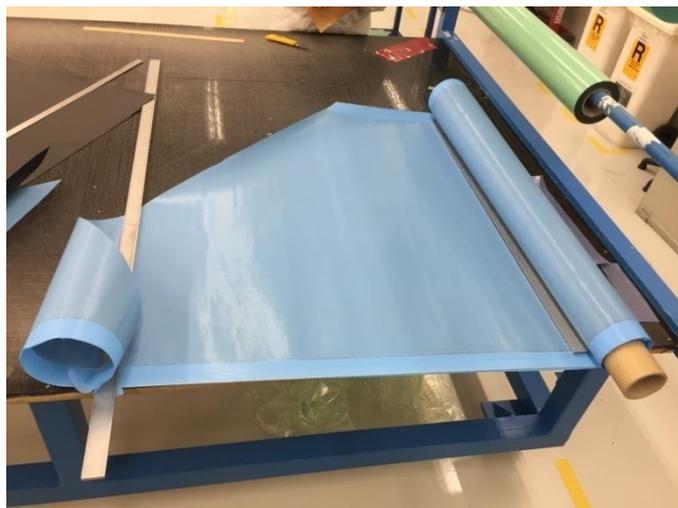


Figura 3.5.1: Rotolo di preimpegnato

Nel frattempo è necessario prevedere un'accurata pulizia sia del tavolo di lavoro che degli stampi da laminazione, questo per evitare che polvere o materiali estranei possano interagire con i film di preimpegnato durante la laminazione.

Una volta che i rotoli sono pronti è possibile iniziare a laminare, tenendo sott'occhio il ciclo di lavorazione che è stato predisposto, che presenta tutte le istruzioni da seguire per ottenere il finito. Il processo di laminazione consiste nella sovrapposizione di diversi strati di materiale in modo da ottenere un unico pezzo finito.

Innanzitutto si apporta il primo strato, che non sarà di carbonio ma di *synskin* (figura 3.5.2), utilizzato in questi casi per evitare problemi di estrazione del pezzo dallo stampo o per eventuale riverniciatura dopo il trattamento in autoclave. Nonostante anche questo film sia preimpregnato, è necessario a volte agire con una sorgente di calore in modo da far agire la resina a meglio. Nel caso specifico viene utilizzato un fono per capelli, in quanto la temperatura ambiente invernale risulta leggermente inferiore di quella standard.

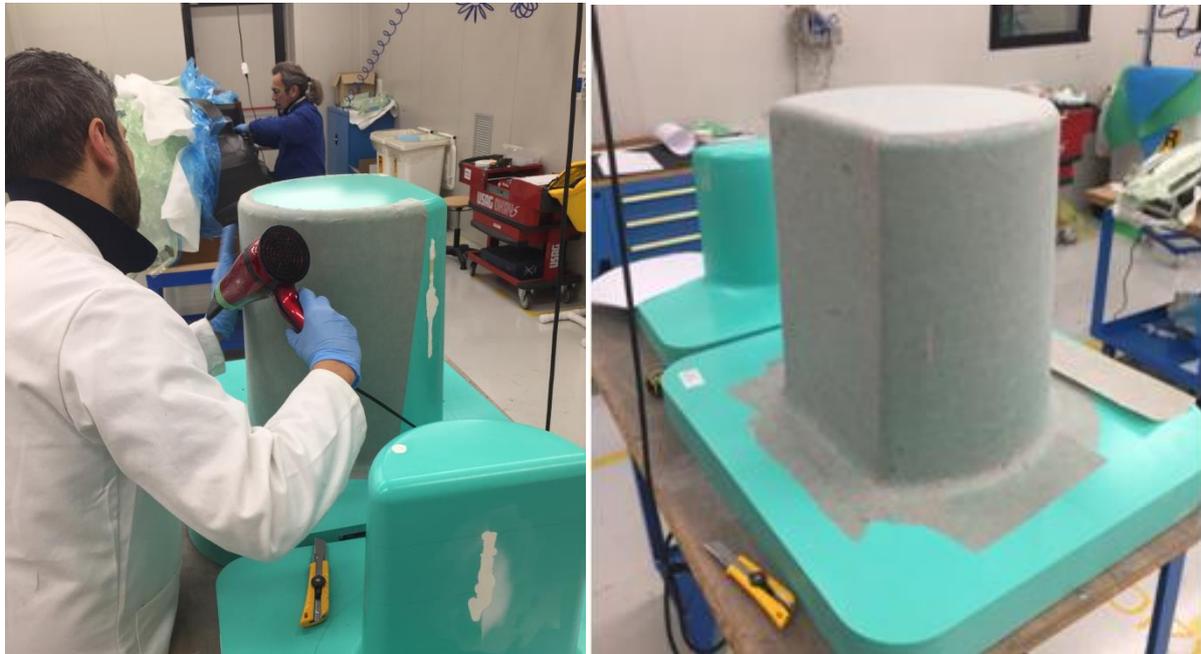


Figura 3.5.2: Disposizione del *synskin*

Successivamente si applica il primo strato di carbonio, sopra il *synskin*. Essendo spesso 0.45mm non si adagerà facilmente nel seguire le curvature minori dello stampo, e anche in questo caso sarà necessario l'utilizzo del fono ed un'adeguata pressione applicata manualmente in modo da assicurare una corretta aderenza. Lo strumento utilizzato di solito è una spatola o un rullo che permettono di pressare al meglio i fogli contro lo strato precedente e di eliminare tutte le eventuali bolle d'aria. Una volta che i diversi strati si saranno incollati sarà impossibile riuscirli a separare senza provocare danni al laminato.

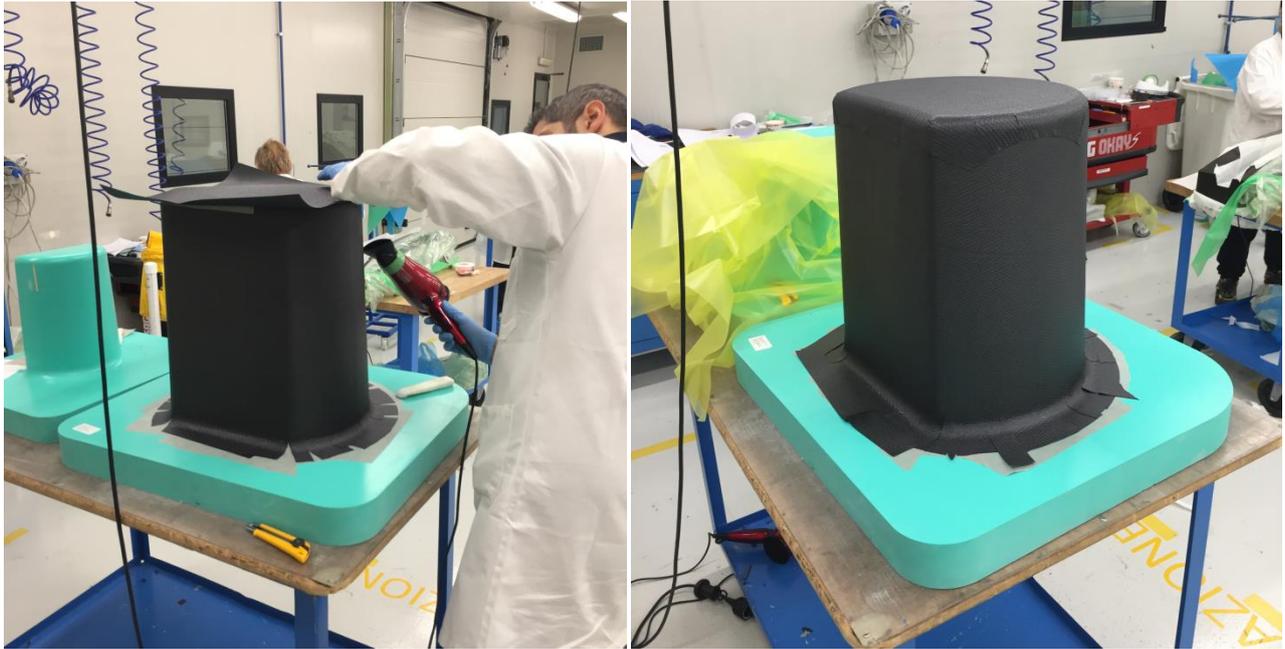


Figura 3.5.3: Disposizione dello strato di carbonio

Il ciclo di lavoro presenta a volte, fra uno strato e l'altro, uno step che ha come uniche finalità quelle di assicurare l'incollaggio tra i diversi strati e di formare correttamente il pezzo. Questo step, proprio come l'operazione di preparazione in autoclave, prevede l'utilizzo del sacco a vuoto.

Preparazione del sacco a vuoto

La tecnologia del sacco a vuoto in autoclave è un'evoluzione della formatura con sacco a vuoto, in cui la pressione di compattazione del laminato è prodotta dalla sola pressione atmosferica. Per ottenere laminati con caratteristiche migliori, si applica una pressione compresa tra i 4 e i 14 atmosfere, a seconda del prodotto, del tipo di autoclave e della forma del pezzo.

L'utilizzo di questo sistema permette così di ottenere diversi vantaggi tra cui:

- Bassa porosità del laminato, grazie alla pressione applicata;
- Bassi livelli di scorrimento delle lamine le une sulle altre, dovuti alla uniforme distribuzione della pressione sul laminato;
- Ottima finitura superficiale della faccia a contatto con lo stampo;
- Valore costante dello spessore del laminato;
- Grande valore di ripetibilità del processo grazie agli stampi metallici ed alla uniforme distribuzione di calore e pressione del ciclo computerizzato.

Per eseguire una corretta preparazione del sacco a vuoto si posiziona un film distaccante che vada a ricoprire tutta la superficie del laminato per evitare che il sacco vada poi ad incollarsi ad essa al momento dell'aspirazione dell'aria, e per poter preparare la superficie ad una eventuale verniciatura (figura 3.5.4a). Un secondo strato di materiale da apportare necessario ad una corretta aspirazione dell'aria deve essere un materiale ovattoso (figura 3.5.4b). Infatti la sua funzione è quella di omogeneizzare la rimozione dell'aria dall'interno del sacco, la quale verrebbe altrimenti rimossa principalmente dalla zona circostante la valvola; in secondo luogo, il suo compito è quello di impedire alla valvola di entrare direttamente in contatto con il materiale, in quanto il materiale stesso fungerebbe da tappo per la valvola che non riuscirebbe così ad aspirare l'aria.

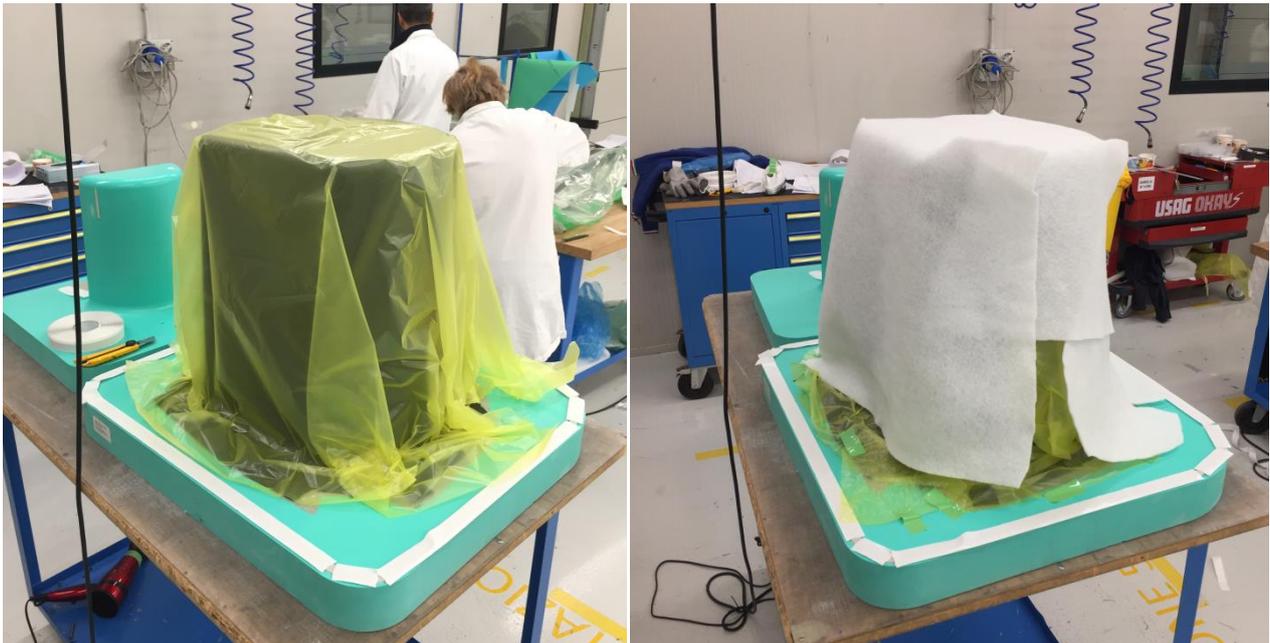


Figura 4.5.4: Preparazione del sacco a vuoto

A questo punto, il tutto può essere inserito all'interno di una pellicola (figura 3.5.5) che svolgerà il ruolo del sacco. Essa infatti viene incollata agli stampi per mezzo di un adesivo apposito in modo da isolare completamente il laminato dall'esterno. Sul sacco viene anche eseguito un foro, che ospiterà poi la valvola per l'aspirazione tramite la pompa. Dopo aver controllato e sigillato tutte le eventuali perdite d'aria, l'operazione è completata e la pompa può essere inserita e avviata.



Figura 3.5.5: Posizionamento nel sacco

All'avviamento della pompa il sacco inizia a spalmarsi sul laminato, ed è importante seguire questo step per evitare che troppo materiale del sacco stesso si accumuli sullo stesso punto, il che potrebbe disomogeneizzare la distribuzione di pressione e produrre variazioni di spessore nel pezzo (figura 3.5.6). Una volta che l'estrazione dell'aria è terminata, l'interno del sacco raggiunge circa i 0,4bar, un differenziale di pressione con l'esterno sufficiente a schiacciare il laminato contro lo stampo. Grazie a questa operazione, la compattazione e l'adesione del materiale risulta di gran lunga migliore rispetto alle sole operazioni manuali.



Figura 3.5.6: Aspirazione dell'aria

Dopo aver tenuto il laminato in quelle condizioni per almeno un quarto d'ora, si apre il sacco e si riprende la laminazione. Nel caso in cui debba essere impiegato uno strato di nido d'ape, bisogna avere l'accortezza di controllare se il materiale utilizzato è compatibile con esso. Nel caso in questione, essendo il materiale incompatibile, è stato necessario apportare del nastro adesivo apposito (figura 3.5.7). In fine si chiude la laminazione coprendo l'honeycomp abbondando con almeno due centimetri (figura 3.5.8).

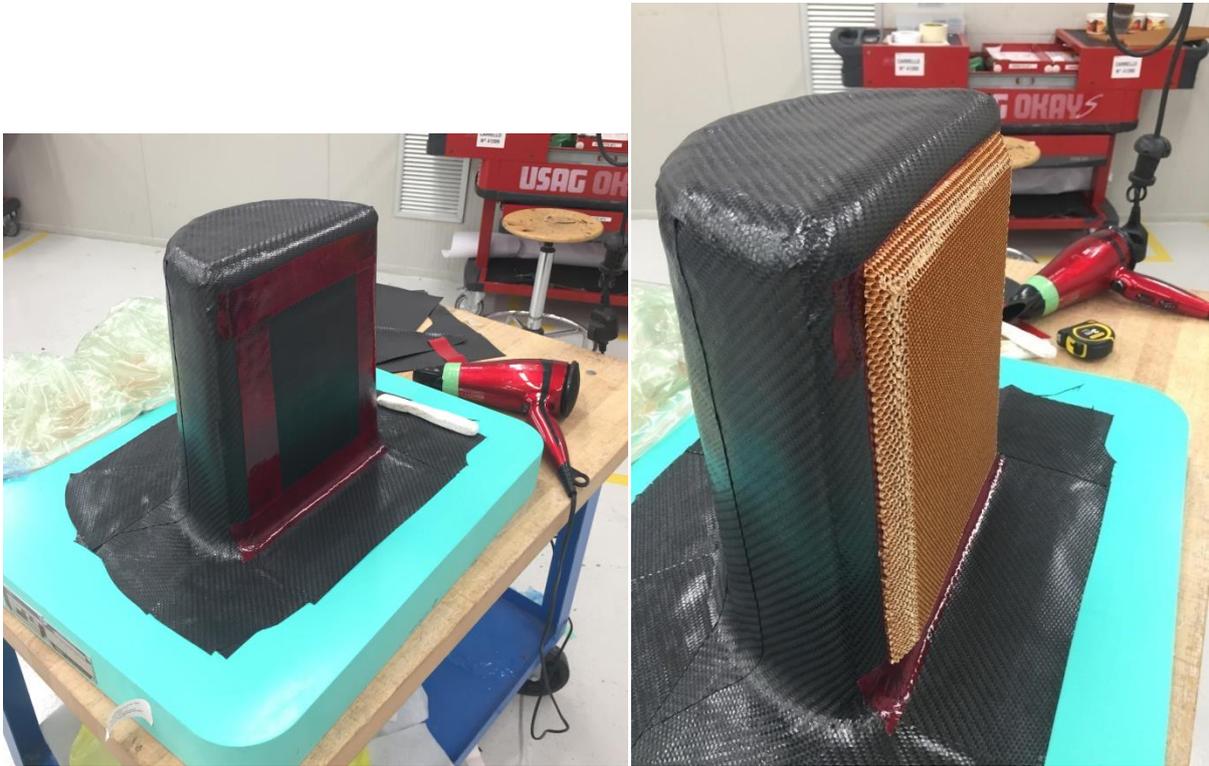


Figura 3.5.7: Applicazione del nido d'ape

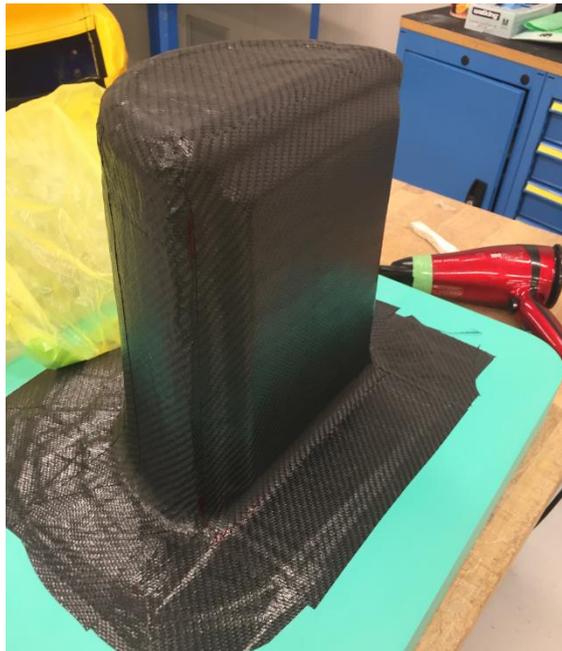


Figura 3.5.8: Applicazione dell'ultimo strato

Avviamento dell'autoclave

L'autoclave in questione (figura 3.5.9), impiegata per la cottura dei componenti, è una delle autoclavi prodotta da Moroso, e permette di raggiungere temperature oltre i 150° e oltre i 10 bar, ma avendo problemi di stabilità ad alte temperature si è preferito impiegare un ciclo più lungo e con temperature non troppo elevate. Inoltre, poichè uno dei due componenti presenta uno strato di nido d'ape, si è mantenuta l'aria in autoclave ad una pressione non superiore ai 3 bar, in modo da evitare che esso venga schiacciato.



Figura 3.5.9: L'autoclave utilizzata

Per cui, una volta inserite le parti in autoclave, si procede con l'implementazione del programma, in questo modo l'autoclave potrà in autonomia eseguire interamente il ciclo di cura desiderato, che è rappresentato in figura 3.5.10.

La pompa che aspira aria dal sacco viene poi disattivata quando si raggiungono circa i 2 bar di pressione.

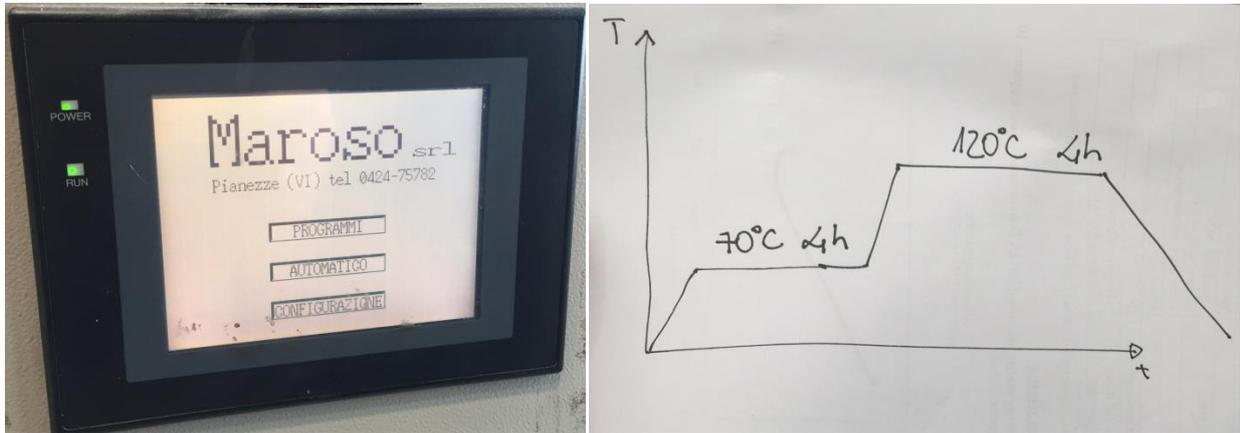


Figura 3.5.10: Ciclo di cura

Il ciclo, come mostrato in figura, prevede diverse fasi:

1. la fase di salita è quella necessaria per riuscire a raggiungere la temperatura e la pressione di regime in modo controllato e graduale. Nel caso di interesse si è scelta, considerando il materiale utilizzato, una salita corrispondente a circa 3°C al minuto;
2. la seconda fase è una pausa, durante la quale viene mantenuta una condizione stazionaria di pressione e temperatura. Si è presa questa scelta poichè lo stampo, essendo maschio ed essendo quindi molto voluminoso, possiede un'inerzia termica elevata, ed ha quindi bisogno di diverso tempo per essere scaldato. Senza la presenza di una pausa intermedia durante la salita, il laminato, una volta terminato il ciclo, verrebbe altrimenti cotto solamente esternamente poichè la temperatura troppo ridotta raggiunta dallo stampo non sarebbe sufficiente a cuocerlo nella zona a contatto con lo stampo stesso. La decisione presa prevede un mantenimento delle condizioni di circa 4 ore, ad una temperatura di 70°C e ad una pressione di 2 bar;
3. una volta terminata la fase di pausa, è possibile riprendere con la salita. Continuando con una progressione di 3°C al minuto si raggiunge la fase di regime;
4. la fase di regime è quella principale, durante la quale avverrà la cottura del laminato. Sono necessarie quindi elevata pressione e temperatura. Nel nostro caso, si è scelto di mantenere una temperatura di 120°C, per assicurare la stabilità termica, e una pressione di 3 bar per un totale di circa 4 ore;

5. terminata la condizione di regime, si conclude il ciclo con la fase di discesa che riporta l'ambiente interno all'autoclave alle condizioni atmosferiche. Anche in questa situazione la discesa prevede una diminuzione di temperatura di 3°C al minuto, in modo di non creare eccessive variazioni termiche.

Ultime lavorazioni e montaggio

Una volta concluso il ciclo è possibile tirare fuori i laminati, aspettare che lo stampo si raffreddi ancora, e procedere con l'estrazione dei pezzi dagli stampi (figura 3.5.11).

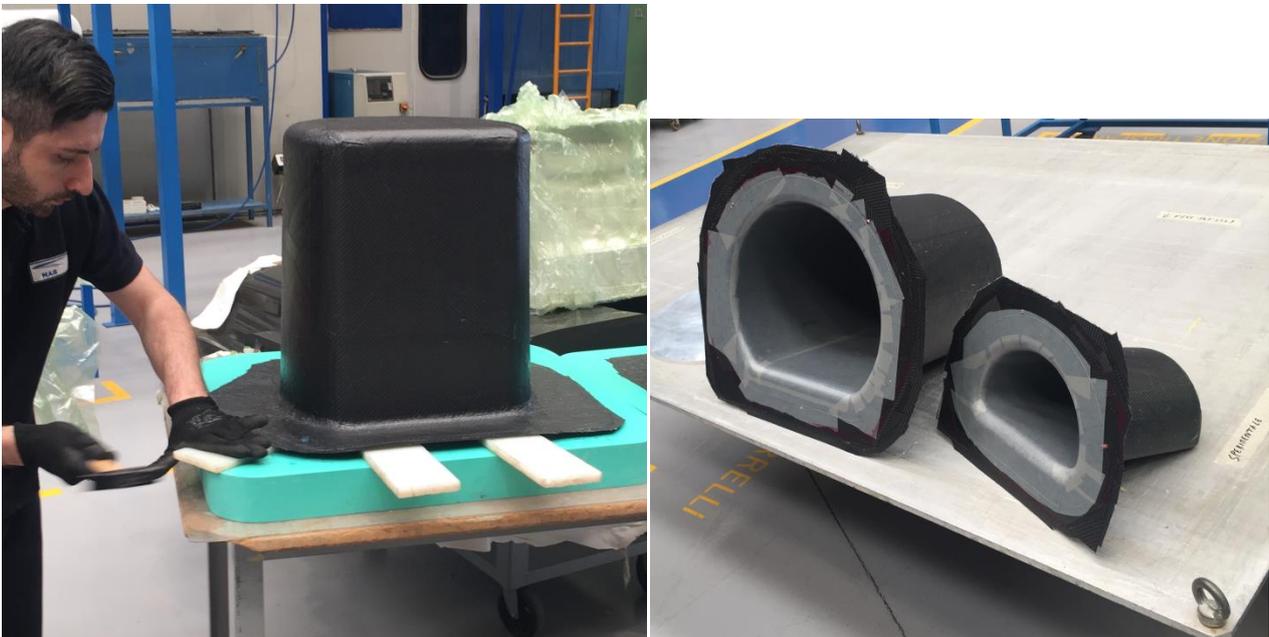


Figura 3.5.11: Estrazione dei laminati

Prima di procedere con l'assemblaggio è necessario eseguire delle operazioni di trafilatura, foratura, incollaggio ed insertatura.

La trafilatura è evidentemente attuata dare le giuste dimensioni alle flange dei due componenti, tagliandoli lungo le trim-line (figura 3.5.12).



Figura 3.5.12: Trafilatatura

Segue la foratura in figura 3.5.13, anch'essa svolta utilizzando le posizioni delle trim-line dei fori. Lo strumento impiegato è un trapano e, poichè la foratura di un numero così elevato di ply di carbonio risulta impegnativa, si parte con un foro di dimensioni ridotte, per poi procedere con l'allargamento. Nella figura si evidenzia il fatto che, per assicurare l'assemblaggio della piastra con il guscio esterno, si preferisce forare direttamente attraverso i fori già presenti sulla prima, in modo da lavorare esattamente i punti corrispondenti ad essi.

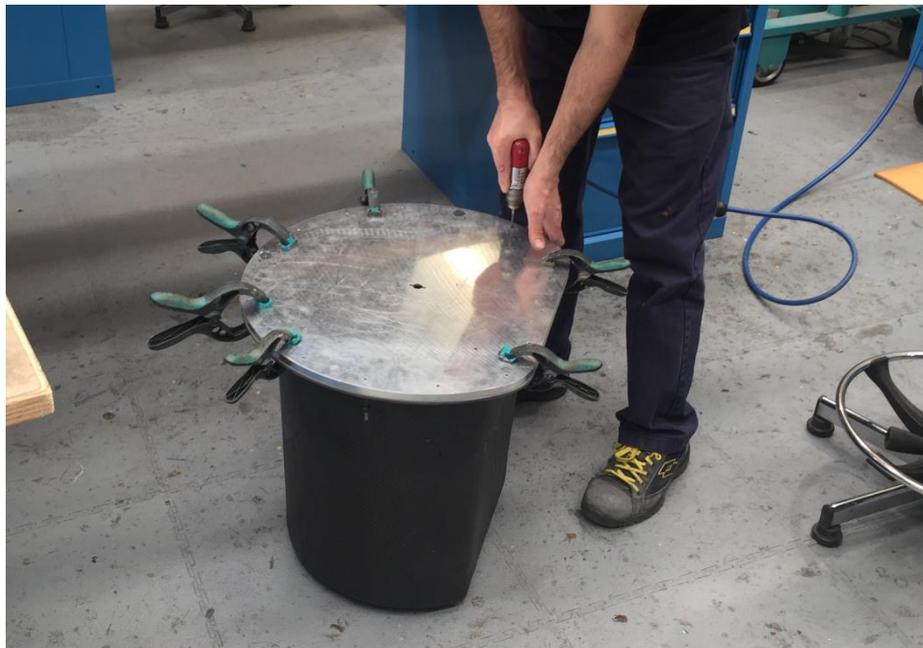


Figura 3.5.13: Foratura delle flange

L'insertatura avverrà ovviamente sul nido sul nido d'ape come prescritto dalle tavole 2D esposte precedentemente. Per conoscere esattamente i punti di foratura, si è preferito stampare delle dime come quella in figura 3.1.14; in questo modo l'operatore potrà forare esattamente nei punti lì riportati.

Fatto ciò si procede con la foratura del materiale e la rimozione del nido d'ape nella zona limitrofa al foro, per poi inserire la resina che andrà ad occupare tutto il volume così liberato fissando correttamente l'inserto (figura 3.5.15).

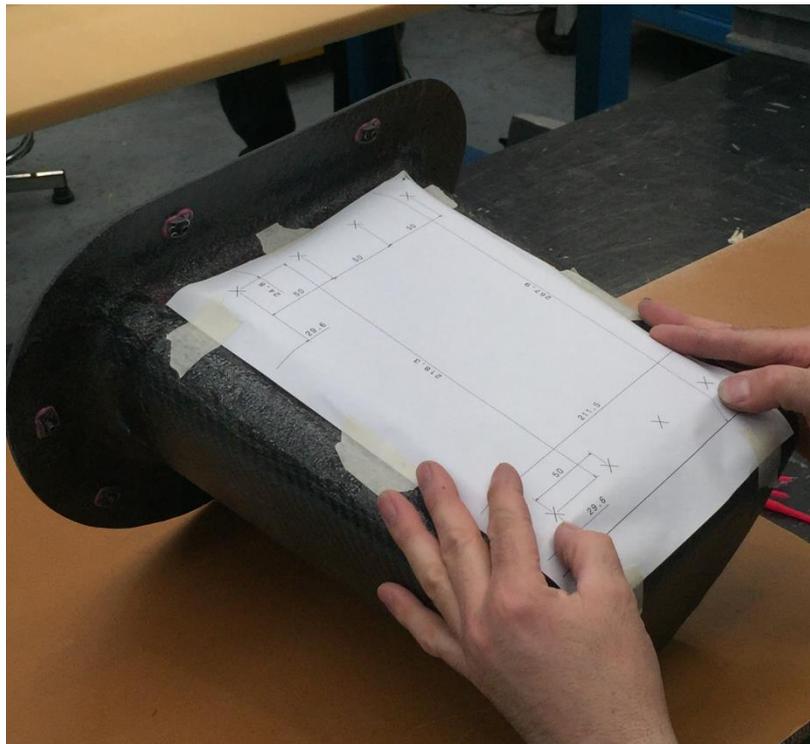


Figura 3.5.14: Posizionamento della dime



Figura 3.5.15: Foratura e inserimento degli inserti

Altra operazione è l'incollaggio, sia per il sandwich insertato sia per le olivette, che permette di ottenere rispettivamente 6TST-697-039 e 6TST-697-031. La preparazione della resina, come per il caso degli inserti è un procedimento delicato che prevede l'aggiunta delle corrette proporzioni di resina, catalizzatore e densificante (figura 3.5.16). Una volta preparata, a temperatura ambiente deve essere applicata entro mezz'ora per evitare che si solidifichi prima ancora dell'impiego della stessa; d'estate è richiesta maggiore rapidità, con un limite di tempo di circa quindici minuti.

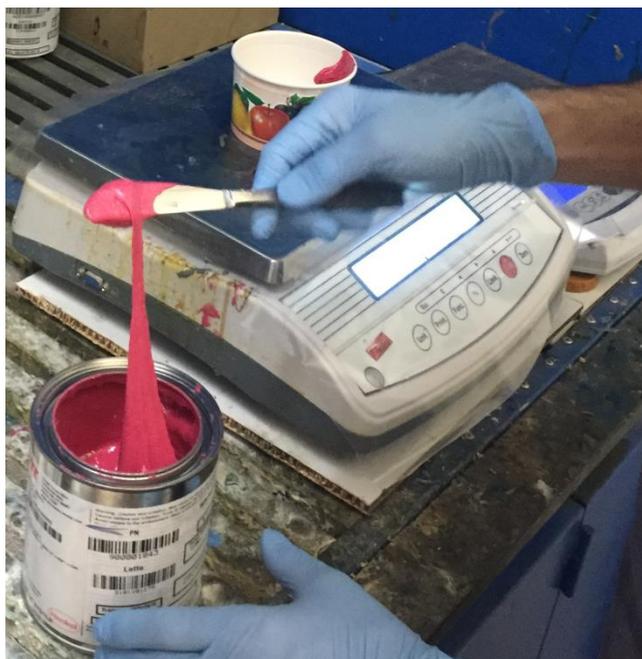


Figura 3.5.16: Preparazione della resina



Figura 3.5.17: Posizionamento della resina per i part number 6TST-697-039 e 6TST-697-031

Per velocizzare il fissaggio della resina si sono posizionati i componenti nel forno di figura 3.5.18 ad una temperatura di 50°C per circa un'ora; è consigliato di posizionare dei pesetti e del nastro adesivo per evitare che le parti incollate si spostino dalla posizione corretta durante la cottura della resina (figura 3.5.19).



Figura 3.5.18: Forno



Figura 3.5.18: Forno

Una volta completate tutte queste operazioni, tutti i componenti sono completi ed è così possibile preparare tutta l'attrezzatura necessaria per i test.

3.6 Esecuzione della prova

Una volta ottenuti tutte le parti richieste nella DBT, e una volta procurati i trasduttori, è possibile iniziare con l'esecuzione dei test. Prima però di procedere è fondamentale avere ben chiara l'idea di quello che si sta facendo e di quale dev'essere l'obiettivo finale: ciò determina che una corretta progettazione della prova è necessaria. Questa avviene compilando un documento chiamato *test plan*, che conterrà tutto ciò che è necessario sapere per svolgere la prova e tutte le modalità di svolgimento.

Riflettiamo innanzitutto sui risultati che vogliamo ottenere. I test sono attui a valutare l'aliquota di rumore che viene trasmessa attraverso i collegamenti nella struttura, che presenta un gap tra le due pareti concentriche dal quale tutta l'aria presente all'interno viene rimossa. L'assenza di aria determina, in linea teorica, l'impossibilità del suono di essere trasmesso; ciò vuol dire che un rumore esterno dovrebbe essere completamente annullato nell'attraversamento delle pareti, isolando così l'interno dei gusci.

Per valutare ciò è quindi necessario inserire un fonometro nella struttura che possa controllare l'andamento del rumore ricevuto. Visto che l'ambiente interno è isolato, è anche interessante valutare l'andamento della pressione, che teoricamente dovrebbe presentare valori leggermente inferiori all'atmosfera.

Visto che l'oggetto di analisi è l'aliquota di rumore trasmessa attraverso gli elementi di collegamento tra i gusci, la soluzione migliore è quella di effettuare un confronto del caso di studio con un caso ideale nel quale la trasmissione di rumore è effettivamente nulla. Un'analisi interessante è quella che sorge dal paragone fra il caso con i collegamenti semplici e quello con i collegamenti smorzati, fondamentali in un aeroplano per smorzare le vibrazioni a cui è soggetto. Gli smorzatori Grommet che verranno impiegati sono quelli che sono stati presentati in precedenza nel capitolo 3.1.1. Per quanto riguarda invece il caso "ideale", l'obiettivo è quello di simulare la situazione nella quale il guscio interno fluttua dentro quello esterno: la soluzione adottata è quella che prevede l'impiego di alcuni elastici, con i quali il guscio piccolo verrà appeso dentro quello grande; grazie alle proprietà smorzanti degli elastici, dovremmo trovare un riscontro simile a quello ideale. I metodi di utilizzo sia per i Grommet che per gli elastici vengono spiegati in modo esaustivo nel test plan.

Ricapitolando, la fase di sperimentazione prevederà la riproduzione di tre casi nell'ordine seguente: il caso con i collegamenti normali, il caso con i collegamenti smorzati e il caso ideale con l'utilizzo degli elastici. La sequenza di esecuzione delle prove è stata scelta tenendo conto del fatto che la prova ideale è la più "complessa" da preparare, infatti è stata prevista una soluzione alternativa, che prevede di adagiare il guscio interno su una schiuma disposta nel guscio esterno. Ciò andrebbe ad alterare i componenti impiegati, per cui è preferibile aver già eseguito tutti gli altri test.

Tutto quello appena esposto si può ritrovare sul test plan: questo documento ha il compito di fungere da tramite fra il progettista e l'esecutore della prova, ed è perciò necessario che indichi tutte le istruzioni di interesse per l'operatore.

Test Plan

Nel paragrafo precedente è già stato spiegato il ruolo che il test plan assume nel momento in cui bisogna svolgere dei test. Qui di seguito si parlerà invece dettagliatamente di esso, analizzando tutte le sezioni che lo compongono. Le terminologie non saranno in lingua italiana in quanto, per questo caso specifico, è stato redatto in inglese

Le sezioni principali di un test plan sono tre:

La prima fase è quella dell'introduzione, che permette di capire a grandi linee di cosa tratteranno le prove che verranno effettuate. In particolare presenta:

- un primo paragrafo chiamato "*Scope*", nel quale viene spiegato cosa rappresentano le prove che verranno eseguite;
- il paragrafo successivo è "*Applicable Documents*" che indica tutti i documenti di supporto alla prova, quali specifiche o regolamentazioni;
- in ultimo c'è il "*Summary of Test Plan*" che spiega come verrà studiato il caso esposto nel primo paragrafo e espone le varie prove che saranno effettuate in modo da dare un'idea di come andrà svolto tutto l'esperimento.

La seconda parte è il corpo del test plan, e conterrà tutte le informazioni dettagliate riguardanti lo svolgimento dei test e gli strumenti e i componenti coinvolti. Esso viene diviso in:

- "*Test Article Description*", che presenta tutte le parti principali che verranno impiegate durante i test, con rispettive immagini e informazioni sui pesi;
- "*Test Rig and used Instrument*" nel quale viene inserito l'elenco dei supporti e degli eventuali trasduttori impiegati;
- "*Test Procedure*", ovvero la sezione nella quale viene spiegato nel dettaglio lo svolgimento di ogni test. Vengono create diversi paragrafi, ognuno dedicato ad un "*test case*" in modo da fornire precise istruzioni agli operatori. Vengono inoltre indicati i dati di calibrazione, i criteri di riuscita/fallimento dei test, informazioni sulla registrazione e sull'ispezione;
- Altre due sezioni vengono poi dedicate alle indicazioni riguardanti il personale che sarà presente durante l'esecuzione delle prove e sul luogo di svolgimento del test.

La terza ed ultima parte è dedicata invece agli allegati, che contengono tutti i documenti da compilare durante lo svolgimento del test e le tavole usate per la produzione e l'assemblaggio del prodotto. Viene presentato il test plan specifico per il caso di studio negli allegati di questo documento.

Risultati

Per avere risultati accettabili è stato innanzitutto necessario verificare la capacità di tenuta dei due gusci. Per fare ciò si è iniziato con l'esecuzione di due test, di cui il primo atto a valutare la capacità di tenuta del guscio esterno, ed il secondo per valutare quella del guscio interno.

Per la prima prova si è deciso di non inserire il guscio interno e di procedere solamente con l'inserimento del datalogger di pressione all'interno del guscio esterno, per poi chiudere quest'ultimo. Per ottenere una tenuta migliore si è chiaramente prevista una guarnizione, impiegata come in figura 3.6.1.



Figura 3.6.6 Applicazione della guarnizione

Una volta fatto ciò, la struttura viene collegata alla valvola per applicare il vuoto (figura 3.6.2), che dal barometro stressato della valvola si è visto essere di circa 0.05bar (figura 3.6.3). Lasciandolo lì per circa un'ora si è verificato che la pressione interna non avesse subito variazioni per poi andare ad analizzare gli output del trasduttore (figura 3.6.4): si è quindi ottenuta la conferma che la pressione è rimasta costante nel tempo. In verità il datalogger ha potuto fornire solamente una conferma parziale della situazione poiché esso non riesce a raggiungere pressioni inferiori a 600bar; infatti nel diagramma in figura 3.6.5 è possibile notare come il segnale sia assente una volta iniziata l'asportazione dell'aria.

Una conferma che il vuoto aveva tenuto era la forma che aveva assunto la struttura, infatti, il fondo del guscio si era curvato verso l'interno, esattamente come era stato previsto nell'analisi FEM.



Figura 3.6.7 Asportazione dell'aria

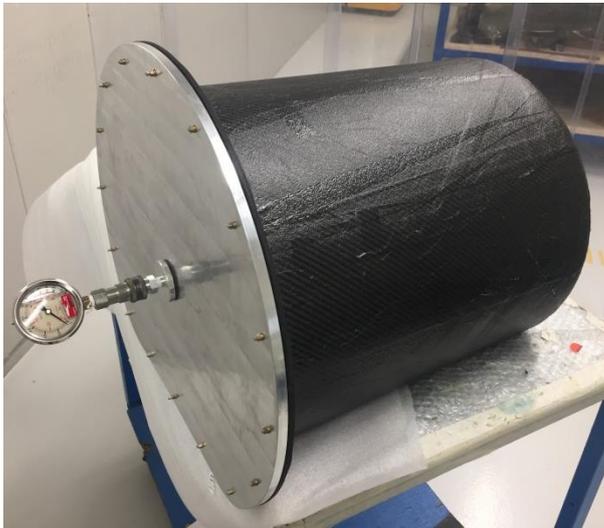


Figura 3.6.8 Pressione interna al guscio

Nome strumento: Testo		01/04/2019 18:27:14			Pagina	1/1
Data/ora: 01/04/2019 12:06:04		Minimo	Massimo	Media	Limiti	
Ora fine: 01/04/2019 12:35:34	no name [mbar]	912,6	1018,4	1010,819	600,0/1100,0	
Canali di misura: 1						
Valori: 60						
SN 41002016						
Test valutazione vuoto						

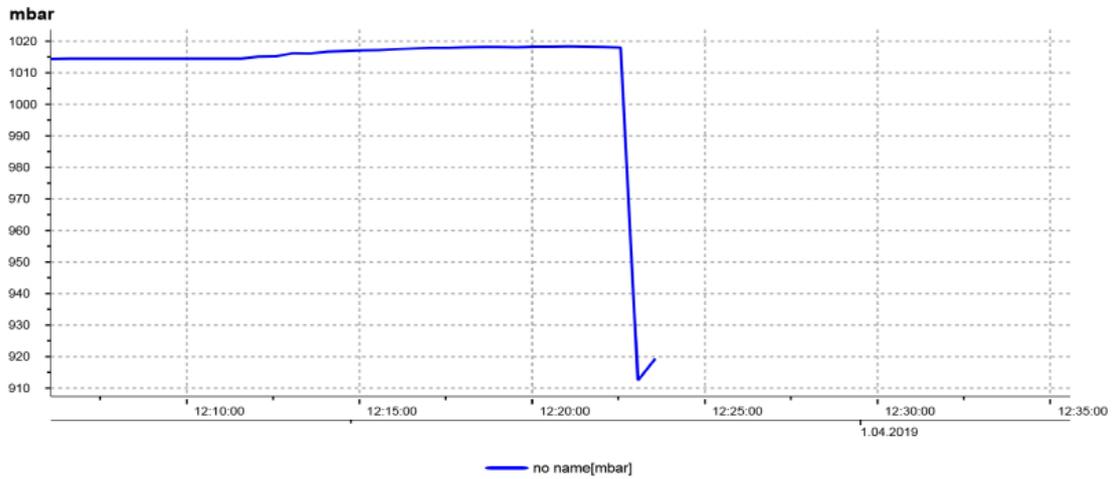


Figura 3.6.9 Output del datalogger di pressione della prima prova



Figura 3.6.10 Deformazione della struttura verso l'interno

Successivamente, per valutare la tenuta dell'altro guscio, è stato inserito il trasduttore di pressione all'interno di esso, alloggiato quindi nel guscio esterno: l'idea era quella di simulare la situazione del test finale, cioè con assenza di aria nel gap tra i due cilindri e di vedere se l'aria presente nel guscio interno sarebbe fuoriuscita. Una volta sigillati entrambi i gusci uno dentro l'altro, si è iniziato quindi con l'applicazione del vuoto tra i due gusci. Tornati un'ora dopo la pressione da manometro era salita quasi a 0.8bar, il che faceva presagire che qualcosa era andato storto. Una volta disassemblato il tutto e importati nel pc i dati del datalogger, ci si è effettivamente resi conto, osservando il grafico in figura 3.6.6 che la pressione nel guscio interno era scesa.

Nome strumento: Testo		01/04/2019 18:56:54			Pagina	1/1
Data/ora: 01/04/2019 14:25:26		Minimo	Massimo	Media	Limiti	
Ora fine: 01/04/2019 15:54:56	no name [mbar]	557,7	1016,1	940,165	600.0/1100.0	
Canali di misura: 1						
Valori: 180						
SN 41002016						
Test valutazione vuoto						

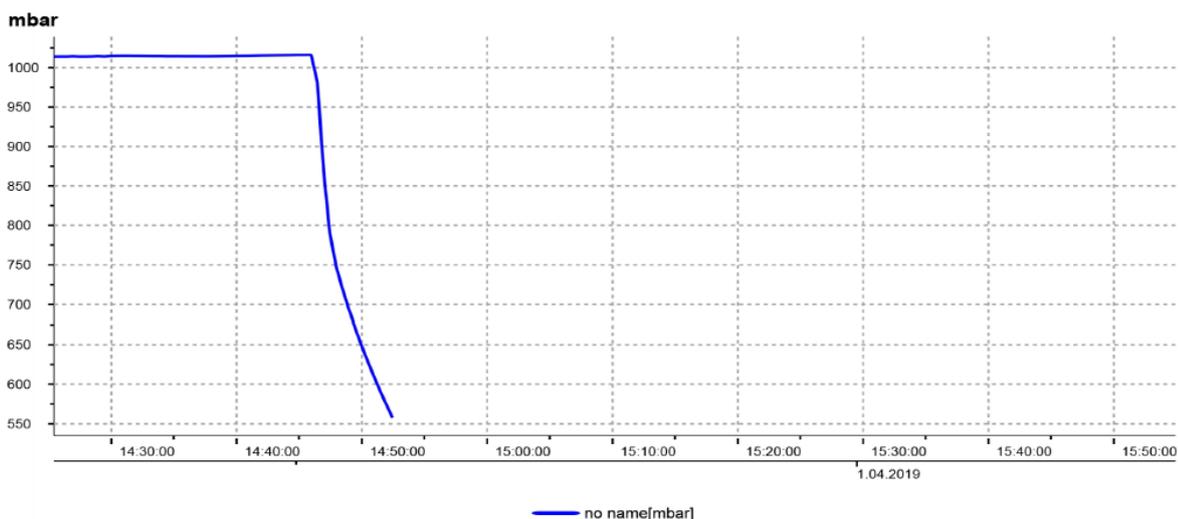


Figura 3.6.11 Diminuzione di pressione nel tempo all'interno del guscio piccolo

Visto che la pressione si riduce di circa 400mbar nel giro di quattro minuti, non si avrebbe mai avuto a disposizione il tempo necessario per fare la prova finale. Ciò vuol dire che si sarebbe dovuta trovare una soluzione al problema. La prima soluzione pensata per il problema era l'azione sulla guarnizione del guscio interno, che effettivamente risultava poco efficiente: per cui invece di impiegare una striscia di gomma, si è deciso di prendere un foglio di intero dal magazzino ritagliandolo esattamente delle dimensioni necessarie, in modo da non avere accavallamenti del materiale e da evitare che la guarnizione segua un percorso diverso da quello voluto.

Seguendo questa pista, l'aspetto finale della guarnizione risulta essere quello in figura 3.6.7.

Purtroppo anche in questo modo non si sono ottenuti i risultati sperati per cui, facendo un passo indietro, si è deciso di rianalizzare l'analisi FEM: ciò che si è osservato è che, a causa di una non curanza, si è lasciata effettivamente una freccia troppo elevata lungo un tratto del bordo del tappo interno (figura 3.6.8).

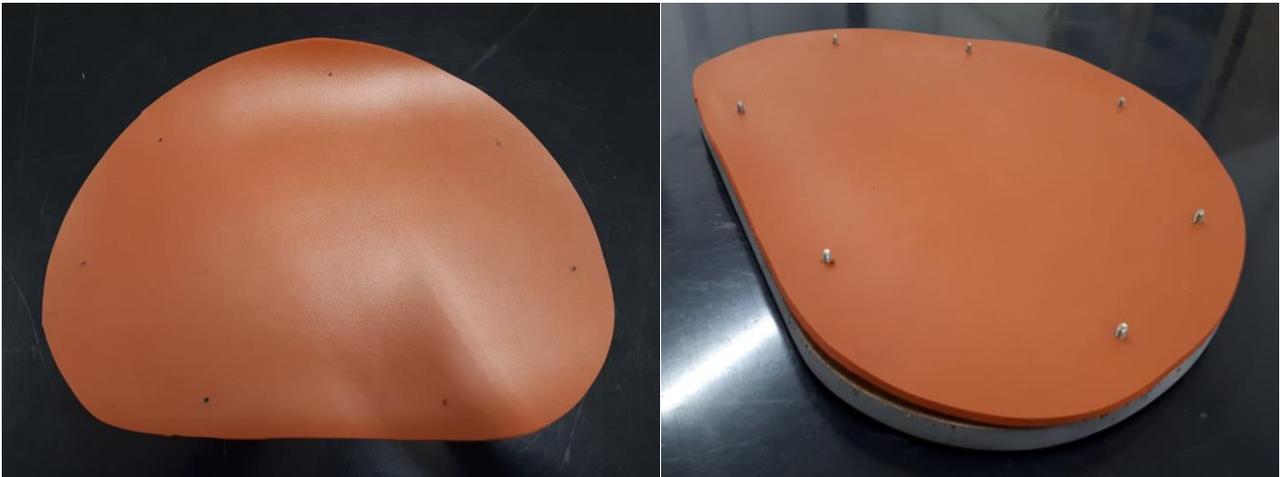


Figura 3.6.12: Guarnizione per la chiusura del guscio interno

Per ovviare a ciò, la soluzione trovata è stata quella di raddoppiare il numero di viti lungo il perimetro del componente e di cambiare il gillfab in un sandwich con le ply di carbonio invece di quelle in fibra di vetro in modo da evitare inflessioni che porterebbero ad una fuoriuscita dell'aria. In questo modo l'analisi strutturale porta risultati migliori, visibili in figura 3.6.9

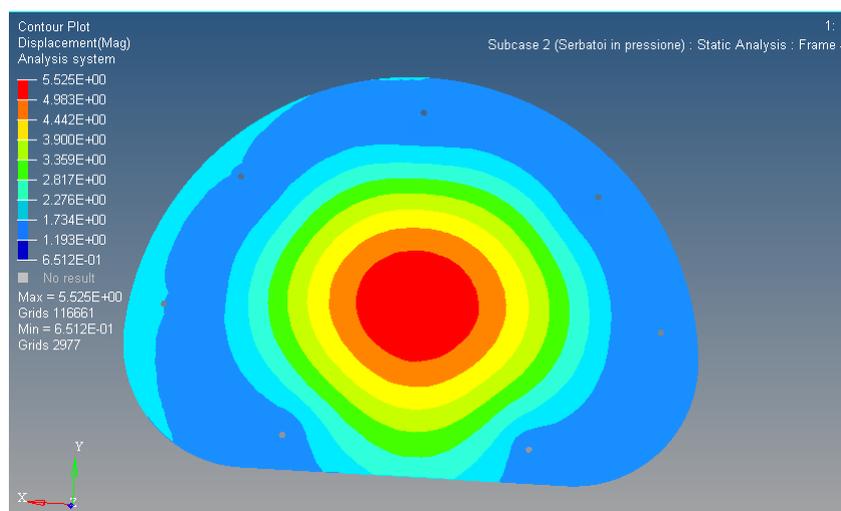


Figura 3.6.8: Analisi FEM prima l'apporto delle modifiche per l'irrigidimento

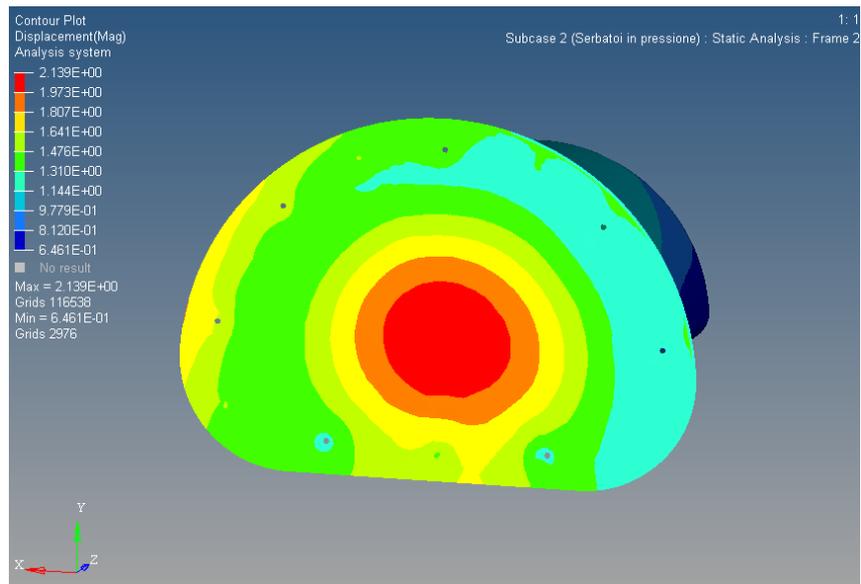


Figura 3.6.9: Analisi FEM dopo l'apporto delle modifiche per l'irrigidimento

4 Conclusioni

Allegati



RELAZIONE REPORT

N. **6TST-697**

TITOLO **EMPTY OF AIR SOUNDPROOF**
TITLE **TEST PLAN**

REV. A DATA _____
DATE

Preparata: <i>Prepared</i>	DO <i>Design Office</i>	_____	Data <i>Date</i>
		A. MAZZI	
Controllata: <i>Checked</i>	DO <i>Design Office</i>	_____	Data <i>Date</i>
		M. BRUTTINI	
	CVE STR <i>Compliance Verification Engineer</i>	_____	Data <i>Date</i>
		V. MASSARELLI	
Verificata: <i>Verified</i>	CVE ELAV <i>Compliance Verification Engineer</i>	_____	Data <i>Date</i>
		L. ROMANO	
	CVE CBS <i>Compliance Verification Engineer</i>	_____	Data <i>Date</i>
		S. FACCO	
	CVE Manuals <i>Compliance Verification Engineer</i>	_____	Data <i>Date</i>
		A. CAIONI	
Approvata <i>Approved</i>	HOAW <i>Head Office of Airworthiness</i>	_____	Data <i>Date</i>
		A. AMBROSINI	
Autorizzata <i>Authorized</i>	HDO <i>Head Design Organization</i>	_____	Data <i>Date</i>
		M. MARINI	

QUESTA RELAZIONE E' COMPOSTA DI **35** PAGINE
THIS REPORT CONSISTS OF **PAGES**

REVISIONI REVISION				
REV.	DESCRIZIONE <i>DESCRIPTION</i>			
A	First issue	Preparata <i>Prepared</i>	MAIZZI	Data Date
		Controllata <i>Cheched</i>		Data Date
		Verificata <i>Verified</i>		Data Date
		Approvata <i>Approved</i>		Date Date
		Autorizzata <i>Authorized</i>		Data Date
		Preparata <i>Prepared</i>		Data Date
		Controllata <i>Cheched</i>		Data Date
		Verificata <i>Verified</i>		Data Date
		Approvata <i>Approved</i>		Data Date
		Autorizzata <i>Authorized</i>		Data Date

LISTA DI DISTRIBUZIONE
DISTRIBUTION LIST

SOCIETA' COMPANY	NOME/ENTE NAME/DEPARTMENT	C. di C.	n. COPIE n° COPIES	NOTE NOTES

TABLE OF CONTENTS
INDICE DEL CONTENUTO

1	INTRODUCTION	5
1.1	SCOPE	5
1.2	APPLICABLE DOCUMENTS.....	5
1.3	COMPLIANCE STATEMENT (DICHIARAZIONE DI CONFORMITÀ)	5
1.4	SUMMARY OF TEST PLAN.....	5
2	TEST ARTICLE	7
2.1	TEST ARTICLE DESCRIPTION	7
2.1.1	TEST ARTICLE WEIGHT.....	9
2.1.2	MASS AND CENTER OF GRAVITY..... <i>Error! Bookmark not defined.</i>	
2.2	TEST RIG AND USED INSTRUMENT (6TST-697-001)	10
2.3	TEST PROCEDURE	11
2.3.1	TEST CASE TC01	11
2.3.2	TEST CASE TC02	13
2.3.3	TEST CASE TC03	14
2.3.4	CONFORMITY INSPECTION	18
2.3.5	CALIBRATION DATA.....	18
2.3.6	PASS/ FAIL CRITERIA.....	18
2.3.7	DATA RECORDING (see annex C).....	19
2.4	AUTHORIZATION FOR TEST	19
2.5	TEST PERSONNEL AND WITNESSING.....	19
2.6	TEST LOCATION	19
3	ANNEX A: DOA AUTHORIZATION FOR TEST.....	21
4	ANNEX B: INSPECTION REPORT.....	22
5	ANNEX C: TEST CHECK LIST.....	17
6	ANNEX D: RICHIESTA PERSONALE, ATTREZZATURA E AREA DI PROVA	19
7	ANNEX E: WHIFFLETREES DRAWINGS P/N 6TST-505	2621

1 INTRODUCTION

1.1 SCOPE

This document contains the plan of the soundproof test with empty of air to be performed on a structure made of two cylindrical concentric shells, one inside the other. The scope is to evaluate the efficiency of this kind of isolation.

1.2 APPLICABLE DOCUMENTS

- | | |
|-------------------|----------------------------------|
| (1). 6TST-353 | Damping loss factor test plan |
| (2).MAG-III-2-062 | Inspection and testing procedure |
| (3).MAG-III-2-091 | Test article DOA management |

1.3 COMPLIANCE STATEMENT (dichiarazione di conformità)

NA

1.4 SUMMARY OF TEST PLAN

This test plan describes the tests to be conducted on the assy 6TST-697-001.

The structure's geometry is similar to a standard airplane, enough to give us the results that we expect.

To analyze the right influence of the isolation, different cases are going to be studied: the noise shall be produced using an external source that it's going to be measured thanks to the sound measuring tool that is positioned inside the internal shell.

In all test cases, it won't be possible to remove all the air from the interspace between the two shells, so we'll try to get a pressure's value of about 0.1bar.

The testing sequence will be:

1. STRUCTURE ASSEMBLED WITH DAMPERS (TC01)
2. STRUCTURE ASSEMBLED WITHOUT DAMPERS (TC02)
3. STRUCTURE ASSEMBLED WITH RUBBER BANDS (IDEAL CASE) (TC03)

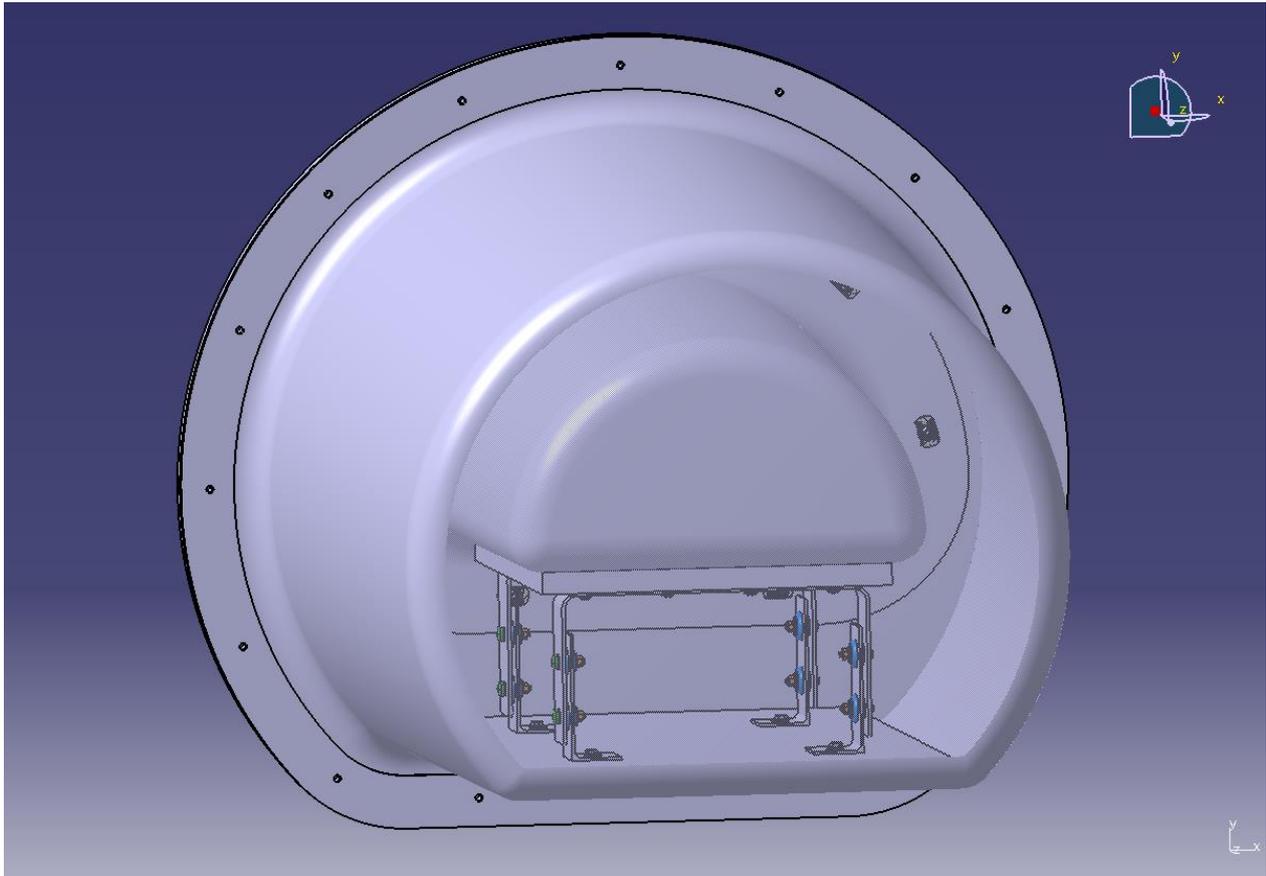


Figure 1: TC01

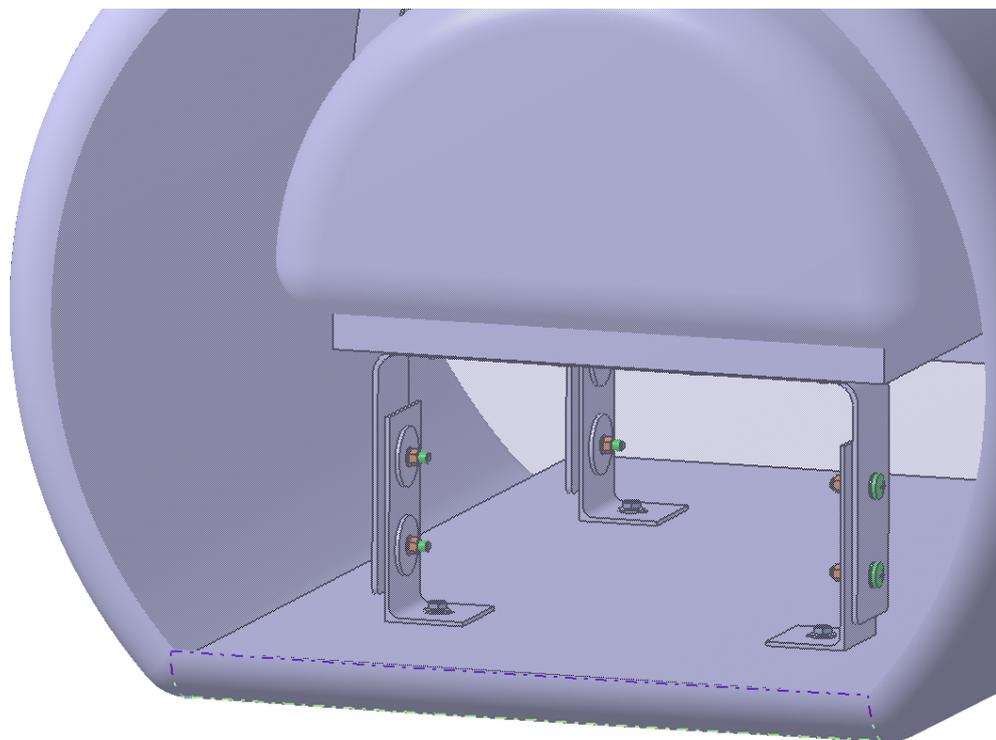


Figure 2: TC02

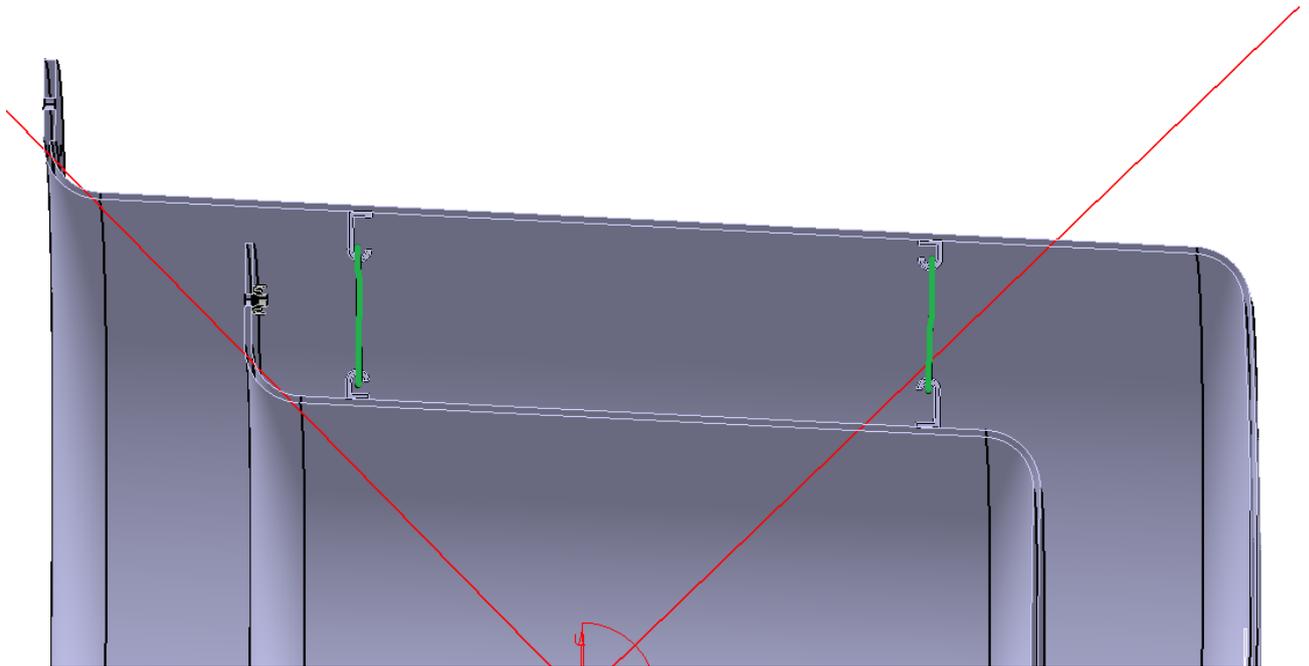


Figure 3: TC03

2 TEST ARTICLE

2.1 TEST ARTICLE DESCRIPTION

The test article is composed by the following main parts:

- a) 6TST-697-031 Internal shell
- b) 6TST-697-039 External shell assy
- c) 6TST-697-105 Plate
- d) 6TST-697-047 Internal shell stopper

The assy to be tested shall be renamed with the following p/n **6TST-505-001**.

In the following pictures there is a view of all the items utilized for the tests.

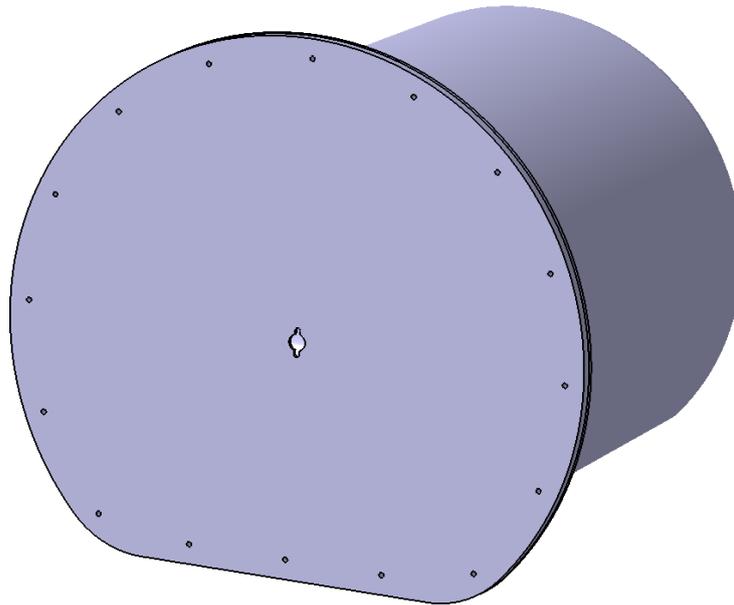


Figure 4: 6TST-697-105 and 6TST-697-039

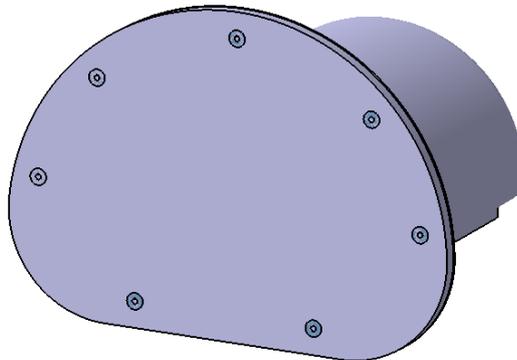


Figure 5: 6TST-697-031 and 6TST-697-047

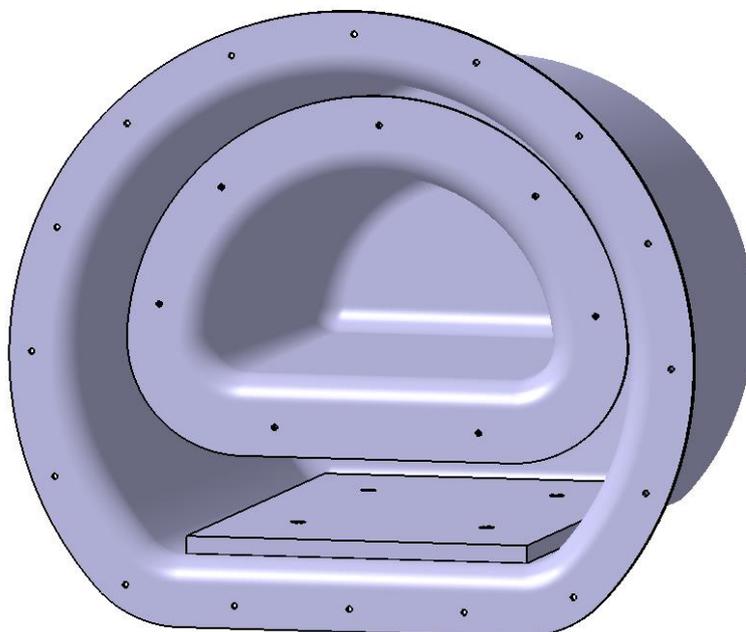


Figure 6: 6TST-697-031 and 6TST-697-039

2.1.1 TEST ARTICLE WEIGHT

The test article shall be tested using the following weights:

P/N	DESCRIPTION	WEIGHT [kg]
6TST-697-031	Internal shell	1.25
6TST-697-039	External shell assy	3.63
6TST-697-105	Plate	5.79
6TST-697-047	Internal shell stopper	0.15
TOTAL WEIGHT		10.82

Table 1 - Test article weight

	EMPTY OF AIR SOUNDPROOF TEST PLAN	6TST-697-001
		Rev. A
		Page 10 of 35

2.2 TEST RIG AND USED INSTRUMENT (6TST-697-001)

To do not constrain the model, two simple supports are used to hold it.

The tools to get information about the sound and the pressure are *Head Acoustics – Squadriga II* and *Datalogger TESTO 176 P1*, and a pump used to envelop the empty of air between the two shells; the chosen valve to use the pump is a *VAC VALV 399* that is assembled with the stopper of the external shell thanks to the appropriate hole.

The Squadriga is going to need a microphone and an accelerometer; in this way there is the possibility to acquire both the noise and the vibrations.

	EMPTY OF AIR SOUNDPROOF TEST PLAN	6TST-697-001
		Rev. A
		Page 11 of 35

2.3 TEST PROCEDURE

2.3.1 TEST CASE TC01

For this test case, to mount the structure these components are needed: 6TST-697-101, 6TST-697-103, n.8 MS35489-1, n.59 NAS1149DN832K, n.24 MS21042-08, n.8 MS27039-0810, n.8 NAS1149D0332K, n.8 MS27039-0805, n.4 NAS1096-2-6, n.7 MS27039-0816, n.16 MS27039-0814.

6TST-697-101 shall be assembled with 6TST-697-031 using n.8 MS27039-0805 and n.8 NAS1149DN832K. Then, add 6TST-697-103 using n.8 MS35489-1, n.8 MS27039-0810, n.8 NAS1149DN832K, n.8 NAS1149D0332K and n.8 MS21042-08. Finally assemble 6TST-697-039 using n.4 NAS1149DN832K and n.4 NAS1096-2-6. The final structure shall be as shown in the figure 7.

The two measurement tools with them instrumentation shall now be inserted inside 6TST-697-031 (as in figure 7b) and finally it's possible to close the smaller shell with 6TST-697-047 using n.7 MS27039-0816 and n.7 NAS1149DN832K, and the bigger one with 6TST-697-105 using n.16 MS27039-0814, n.32 NAS1149DN832K and n.16 MS21042-08, providing an adequate sealing gasket.

After this, the removal of the air shall be realized to proceed with the analysis using the valve and the pump: mount the valve and then assemble the pump to use it.

The pressure between the two shells shall be lower than 0.1bar.

To complete the test, a speaker shall be positioned close to the structure as shown in figure 8 and a white noise is going to be reproduced at the intensity of 100 dB with a distance of about 1,5m.

Before the test starts, there is the need to ensure that the intensity of the sound is the one desired: to do that, the microphone shall be positioned at 1,5m form the speaker and the volume shall be adjusted in order to get the right intensity, checking the one shown on the instrument.

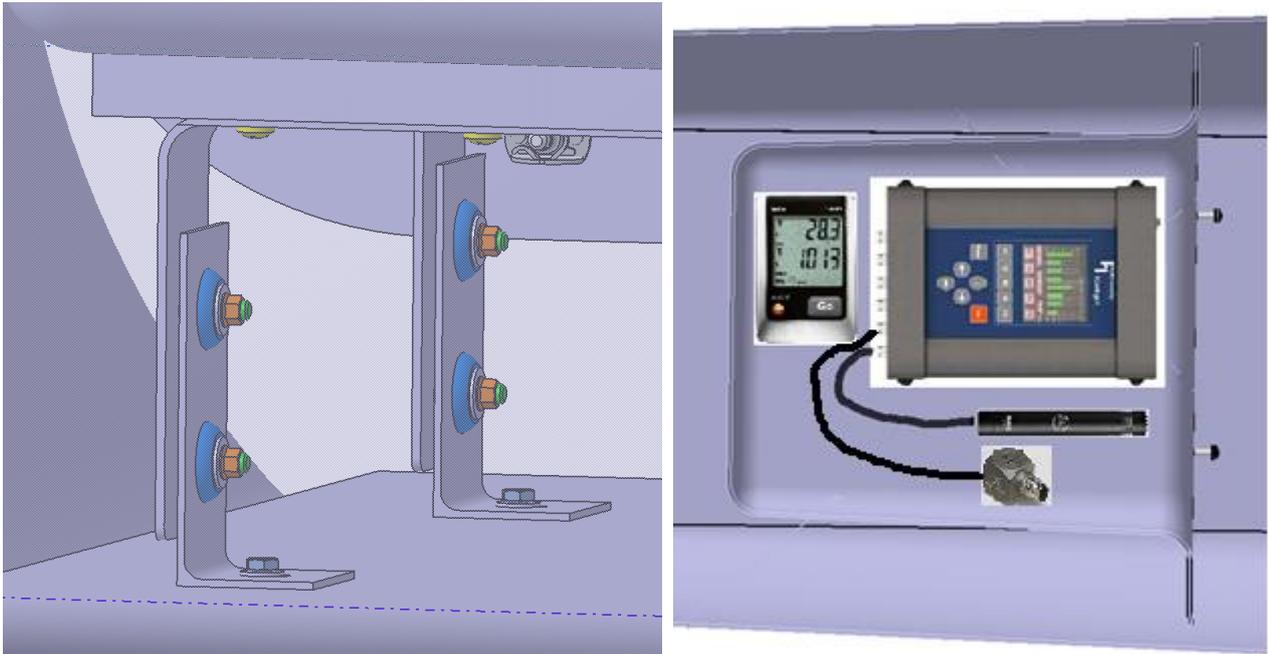


Figure 7 – With dampers (TC01)

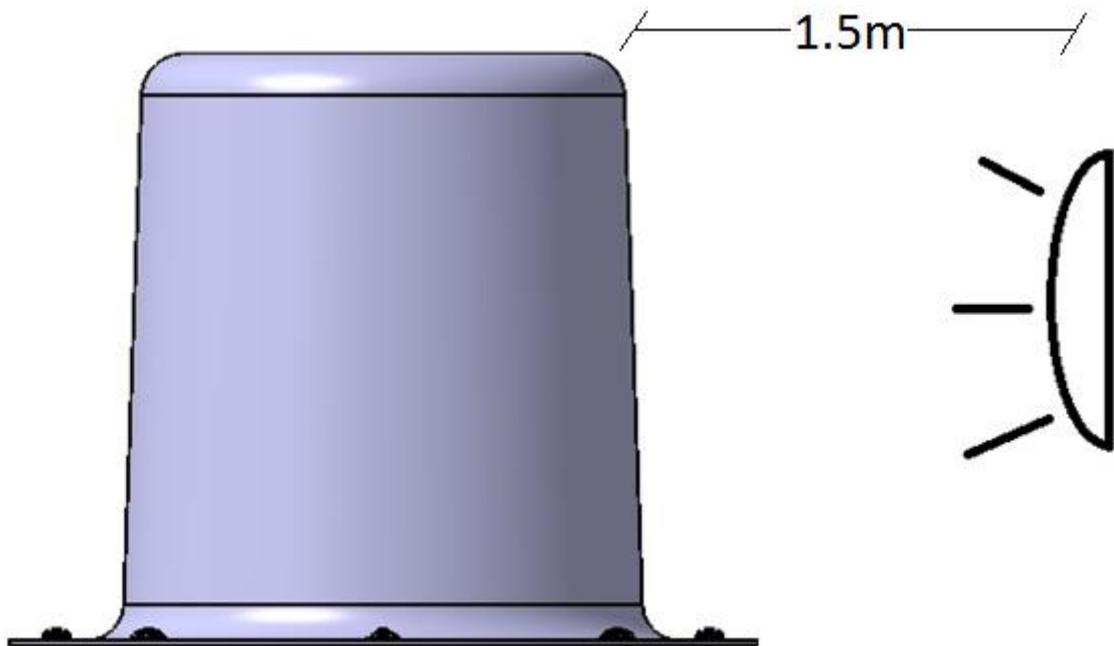


Figure 7 – With dampers (TC01)

2.3.2 TEST CASE TC02

For this test case, to mount the structure these components are needed: 6TST-697-101, 6TST-697-103, n.59 NAS1149DN832K, n.24 MS21042-08, n.8 MS27039-0810, n.8 NASM970-3, n.8 MS27039-0805, n.4 NAS1096-2-6, n.7 MS27039-0816, n.16 MS27039-0814.

6TST-697-101 shall be assembled with 6TST-697-031 using n.8 MS27039-0805 and n.8 NAS1149DN832K. Then add 6TST-697-103 using n.8 MS27039-0810, n.8 NAS1149DN832K, n.8 NASM970-3 and n.8 MS21042-08. Complete then assembling 6TST-697-039 using n.4 NAS1149DN832K and n.4 NAS1096-2-6. The final structure shall be as shown in the figure 8.

The two measurement tools with them instrumentation shall now be inserted inside 6TST-697-031 (as in figure 8b) and finally it's possible to close the smaller shell with 6TST-697-047 using n.7 MS27039-0816 and n.7 NAS1149DN832K, and the bigger one with 6TST-697-105 using n.16 MS27039-0814, n.32 NAS1149DN832K and n.16 MS21042-08, providing an adequate sealing gasket.

After this, the removal of the air shall be realized to proceed with the analysis using the valve and the pump. We need first to mount the valve and then we can assembly the pump to use it.

The pressure between the two shells shall be lower than 0.1bar.

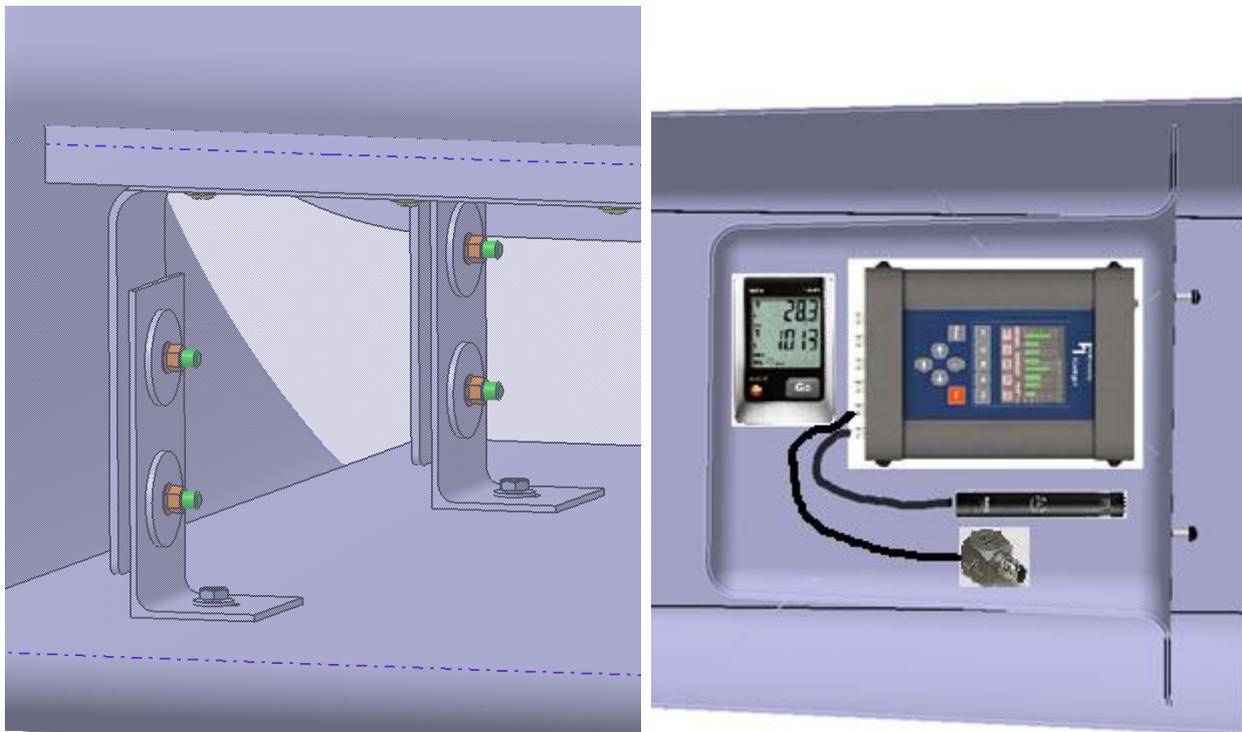


Figure 8 – Without dampers (TC02)

To complete the test, a speaker shall be positioned close to the structure as shown in figure 8 and a white noise is going to be reproduced at the intensity of 100 dB with a distance of about 1,5m.

Before the test starts, there is the need to ensure that the intensity of the sound is the one desired: to do that, the microphone shall be positioned at 1,5m form the speaker and the volume shall be adjusted in order to get the right intensity, checking the one shown on the instrument.

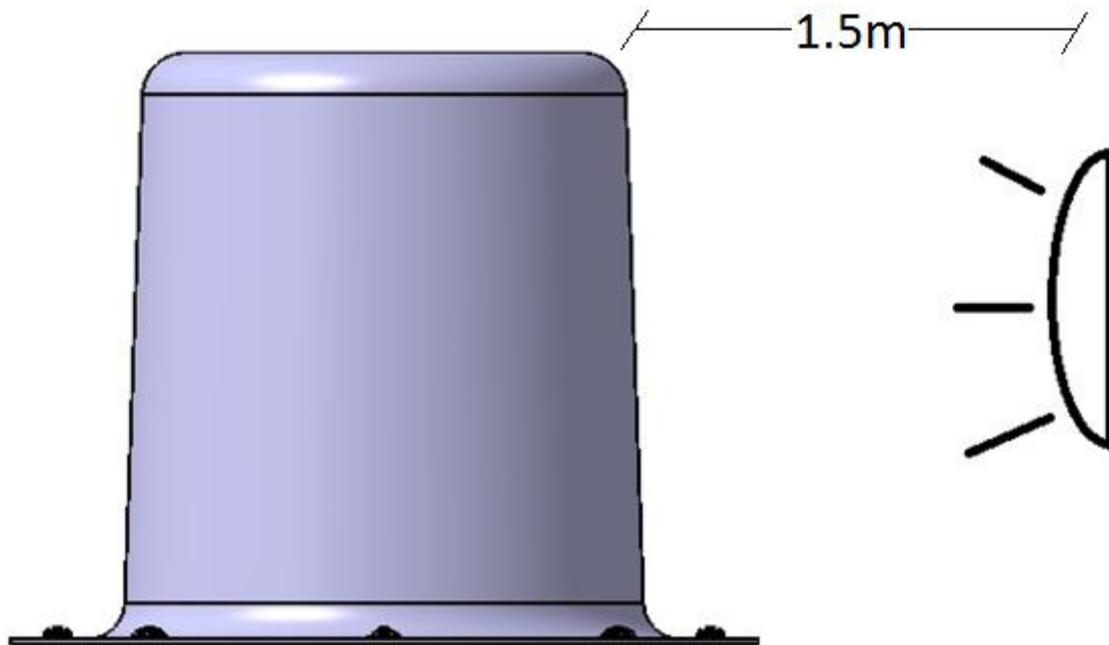


Figure 7 – With dampers (TC01)

2.3.3 TEST CASE TC03

This last case shall represents the ideal case where we don't need anything to keep one shell concentric to the other.

To simulate that situation, some rubber bands and n.4 hooks are needed to mount the structure.

Take two hooks, glue them on the top of the internal shell 6TST-697-031 as shown in the figure 9 using 6SPEC-013-PRD TY I CL 2 and the other two to glue them on the top of the external shell 6TST-697-039 as shown in figure 10 using 6SPEC-013-PRD TY I CL 2.

The two measurement tools with them instrumentation shall now be inserted inside 6TST-697-031 (as in figure 11) and finally it's possible to close the smaller shell with 6TST-697-047 using n.7 MS27039-0816 and n.7 NAS1149DN832K.

Now let's use the rubber bands to assemble the two shells through the hooks as shown in figure 12. Now the internal shell should float in the air thanks to the bands.

The bigger shell can be closed with 6TST-697-105 using n.16 MS27039-0814, n.32 NAS1149DN832K and n.16 MS21042-08, providing an adequate sealing gasket.

After this, the removal of the air shall be realized to proceed with the analysis using the valve and the pump. We need first to mount the valve and then we can assembly the pump to use it.

It won't be possible to remove all the air from the interspace between the two shells, so we'll try to get a pressure's value lower than 0.1bar.

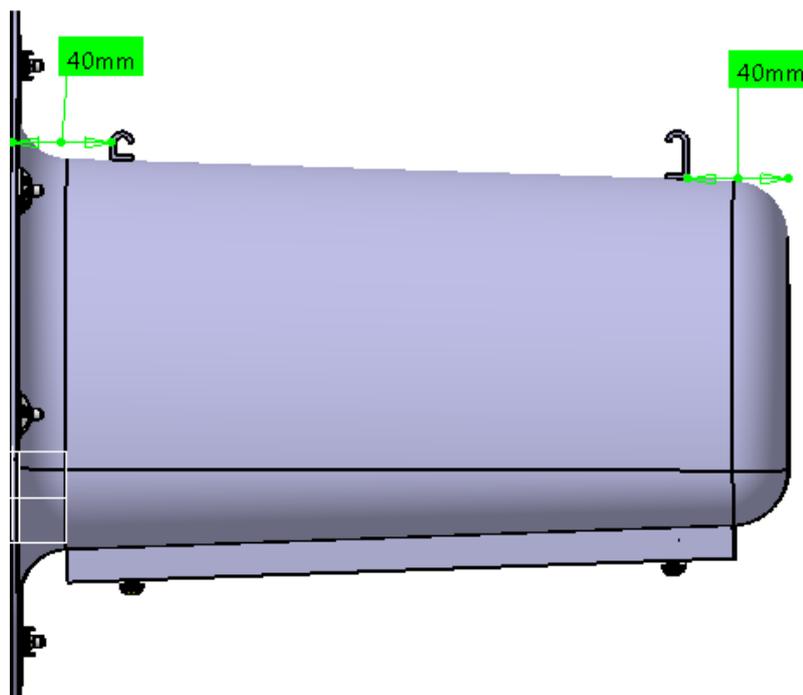


Figure 9

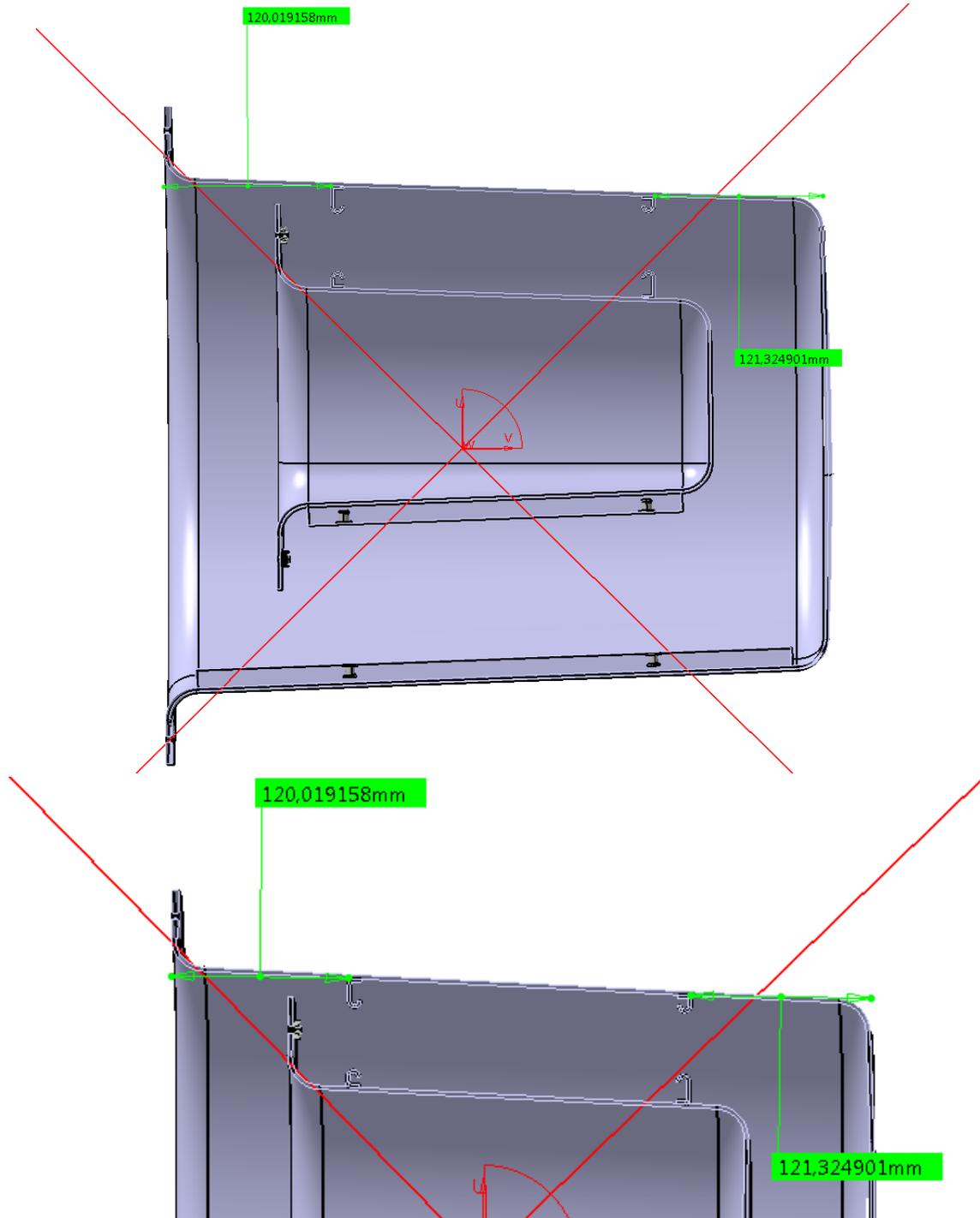


Figure 10



Figure 11

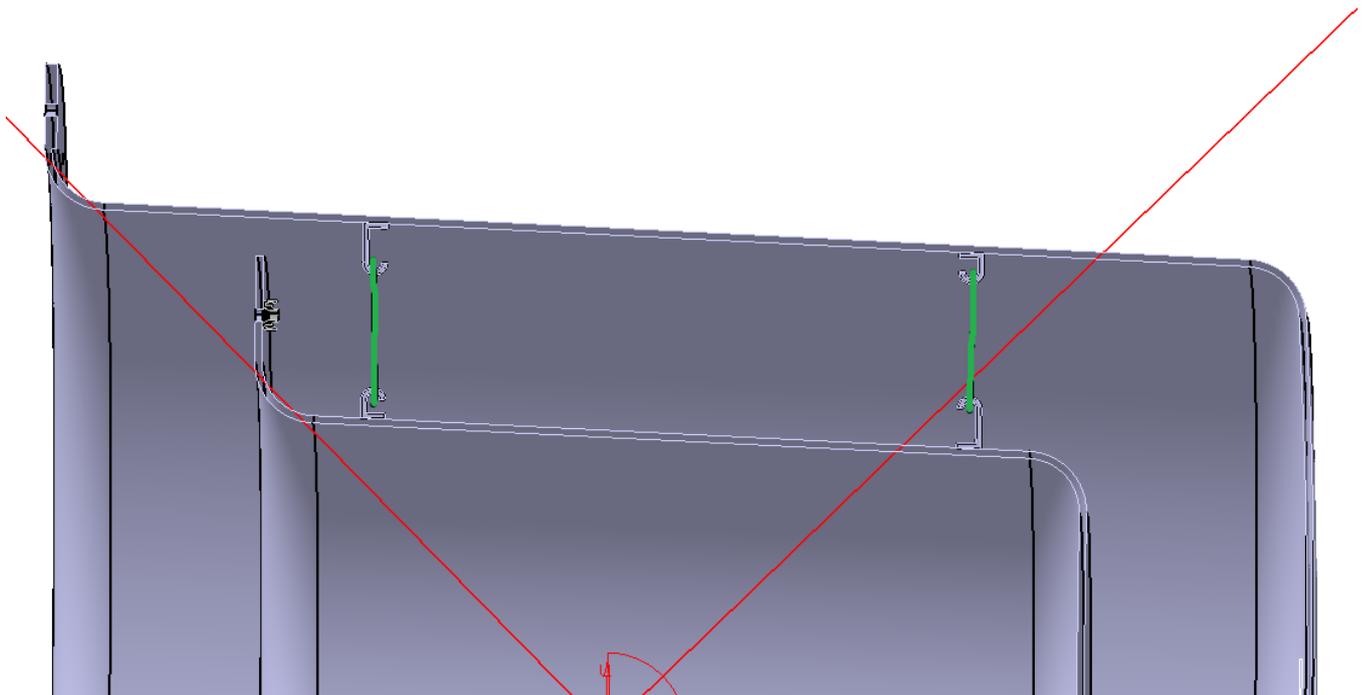


Figure 12

To complete the test, a speaker shall be positioned close to the structure as shown in figure 8 and a white noise is going to be reproduced at the intensity of 100 dB with a distance of about 1,5m.

Before the test starts, there is the need to ensure that the intensity of the sound is the one desired: to do that, the microphone shall be positioned at 1,5m from the

speaker and the volume shall be adjusted in order to get the right intensity, checking the one shown on the instrument.

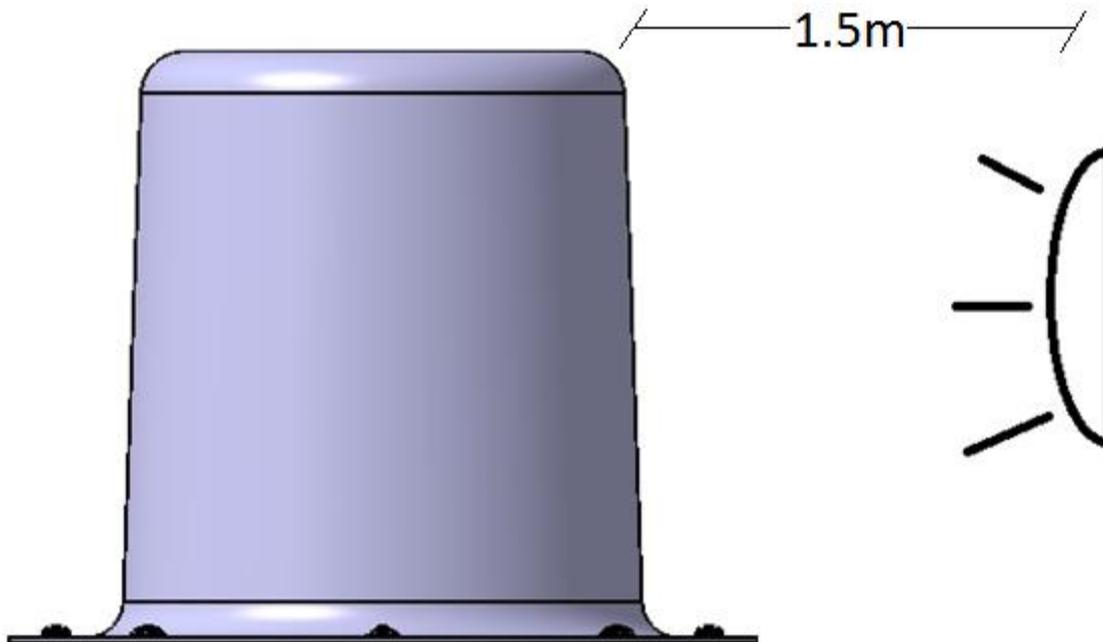


Figure 7 – With dampers (TC01)

2.3.4 CONFORMITY INSPECTION

Before the execution of each test case, the test article, defined in paragraph 2.1, shall be inspected, according to MAG-III-2-062 by:

- MAG DO TRP,
- MAG DO PE,
- MAG CVE STR&DC

The form in annex B shall be complete and any deviation shall be noted and recorded in the static test report 6EC10000N093.

2.3.5 CALIBRATION DATA

All measuring devices used in the test shall have a valid calibration data sheet. A copy of the calibration data sheet shall be added to the test report.

2.3.6 PASS/ FAIL CRITERIA

The following pass/fail criteria will be applied to determine if the tests are considered successfully passed:

	EMPTY OF AIR SOUNDPROOF TEST PLAN	6TST-697-001
		Rev. A
		Page 19 of 35

In TC03, the amount of noise detected is maximum the 80% of the other two cases.

2.3.7 DATA RECORDING

The following data will be recorded:

- Test article p/n with COC;
- test method;
- test pass/ fail criteria;
- test results;
- photographic documentation and video recording (overall view, details as required);

Test reports shall be signed by the qualified Compliance Verification Engineer witnessing the tests.

2.4 **AUTHORIZATION FOR TEST**

Prior to the execution of the test, it is necessary that the ATS, filling for the affected part of the form in ANNEX A, and the Inspection report filling for the affected part of the form in ANNEX B , are completed.

2.5 **TEST PERSONNEL AND WITNESSING**

MAG CVE Structures and MAG DO personnel will witness the test.

So the following personnel shall be present to the test:

- MAG TRP: Valentina Canala
- MAG PE: Mario Bruttini
- MAG Compliance Verification Engineer (CVE): Vincenzo Massarelli

2.6 **TEST LOCATION**

The test described in this document will be performed at :

MAG SpA
Via dell'artigianato V traversa, n1
Monteprandone

The area dedicate to the test will be agreed with MAG Operative Manager and RSPP, using the module reported in annex E.

Any deviation shall be noted and recorded in the static test report 6EC10000N093.

 <p>MECAER AVIATION GROUP</p>	EMPTY OF AIR SOUNDPROOF TEST PLAN	6TST-697-001
		Rev. A
		Page 20 of 35

3 ANNEX A: DOA AUTHORIZATION FOR TEST



DOA AUTHORISATION FOR TEST

Authorization Number:	(1)	Date of Issuance:	(2)
SUBJECT			
Test to be performed	(3)		
REF A	MAG Test Plan Number:	(4)	Revision:
REF B	Check List for Ground / Lab Test	(5)	
REF C	List of instrumentation and Instrument Calibration Status:	(6)	Issue date:
SECTION A (to be filled in by DOA Testing Facility)			
SECTION A	DECLARATION		
	The test equipment and all measuring equipment required in MAG Test Plan (ref. A), and listed in the document at ref. C is adequate for the test, suitable for correct acquisition of the required parameters and appropriately calibrated. The test set-up (ref. B) is compliant with the document in MAG Test Plan (ref. A). The _____ testing equipment is suitable for performing the test.		
	DOA Test Quality	Signature	Date
SECTION B (to be filled in by MAG Specialist)			
SECTION B	DECLARATION		
	The test article is representative for the test. The test stand and the test set-up are suitable for performing the test.		
	DO Specialist Project Responsible	Signature	Date
SECTION C (to be filled in by MAG CVE)			
SECTION C	DECLARATION		
	I hereby authorized the test considering: 1. the declarations signed by the Test Quality and DO Specialist Project Responsible and the content of the documentation referenced in those declarations; 2. that the test article configuration is in conformity with the requirements of MAG Test Plan (ref. A): the Certificate of Conformity (CoC signed by the Prototype Production Organization Quality) is enclosed in Annex A. 3. Any <i>non conformity</i> discovered on the test article has been evaluated and can be accepted as representative of the part to be tested (the Non-Conformity Inspection Report is enclosed in Annex B).		
	COMMENTS		
MAG CVE	Signature	Date	
Name in block letters			
Annex A	(9) Certificate of Conformity n° _____		
Annex B	(10) Non-Conformity Report n° _____		
Annex C	(11) Test Article Inspection n° _____		

4 ANNEX B: INSPECTION REPORT

		TEST ARTICLE INSPECTION		No.:	
				Date:	
				Project No.:	
PROTOTYPE P/N & DESCRIPTION					
APPLICABLE DESIGN DATA	DRAWING/DOCUMENT P/N	REV	DESCRIPTION		
INSPECTION PURPOSE/DESCRIPTION					
<input type="checkbox"/> VISUAL INSPECTION TEST ARTICLE <input type="checkbox"/> CHECK PERMANENT DEFORMATION PREVIOUS TEST CASE: _____ <input type="checkbox"/> CHECK DEVIATIONS (if any fill box below) <input type="checkbox"/> OTHER: _____					
DEVIATION					
Description/Causes/Corrective Action/etc...:					
CONFORMITY		C.o.C. No.: _____			
TEST ARTICLE APPROVAL		<input type="checkbox"/> YES Comments: _____			
		<input type="checkbox"/> NO Comments: _____			
DO Specialist		_____		_____	
		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>	
CVE		_____		_____	
		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>	
		_____		_____	
		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>	
Other Functions		_____		_____	
		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>		<small>Name in Block Letters & Signatures</small>	

MAG-III-2-091 "Test Article DOA Management" - MAG-III-2-062 "Gestione Ispezioni e Prove"
MOD-DOA-ISP-002 (24/02/2016)

5 ANNEX C: TEST CHECK LIST

	CHECK LIST FOR GROUND / LABORATORY TEST	Nr.: CLT - xxx
		Date.: _____

<u>RIFERIMENTI PREVENTIVI</u>	Note
<input type="checkbox"/> Test Plan (identificativo, revisione, data di approvazione, ...)	
<input type="checkbox"/> Manualistica (nome, identificativo, revisione, sezione, ...)	
<u>RIFERIMENTI PER L'ESECUZIONE DELLA PROVA</u>	Note
<input type="checkbox"/> Test Article Inspection Report (numero, data, compilatore, ...)	
<input type="checkbox"/> Statement of Conformity (numero, data, ...)	
<u>APPARATI E STRUMENTAZIONE</u>	Note
<input type="checkbox"/> Martinetti (identificativo, N° e data certificato taratura, N° e data certificato di calibrazione, scadenze, ...)	
<input type="checkbox"/> Manometri (identificativo, N° e data certificato taratura, N° e data certificato di calibrazione, scadenze, ...)	
<input type="checkbox"/> Trasduttori (identificativo, N° e data certificato taratura, N° e data certificato di calibrazione, scadenze, ...)	
<input type="checkbox"/> Sistema di Eccitazione (descrizione, identificativo, verifiche funzionalità, scadenze, ...)	
<input type="checkbox"/> Sistema di Acquisizione (descrizione dei sensori, dei canali, della visualizzazione durante la prova, identificativo, verifiche funzionalità, scadenze, ...)	
<input type="checkbox"/> ALTRO:	
<u>VERIFICHE</u>	Note
<input type="checkbox"/> Verifiche dimensionali Test Rig (data, esito, documento di riferimento, concessioni, ...)	

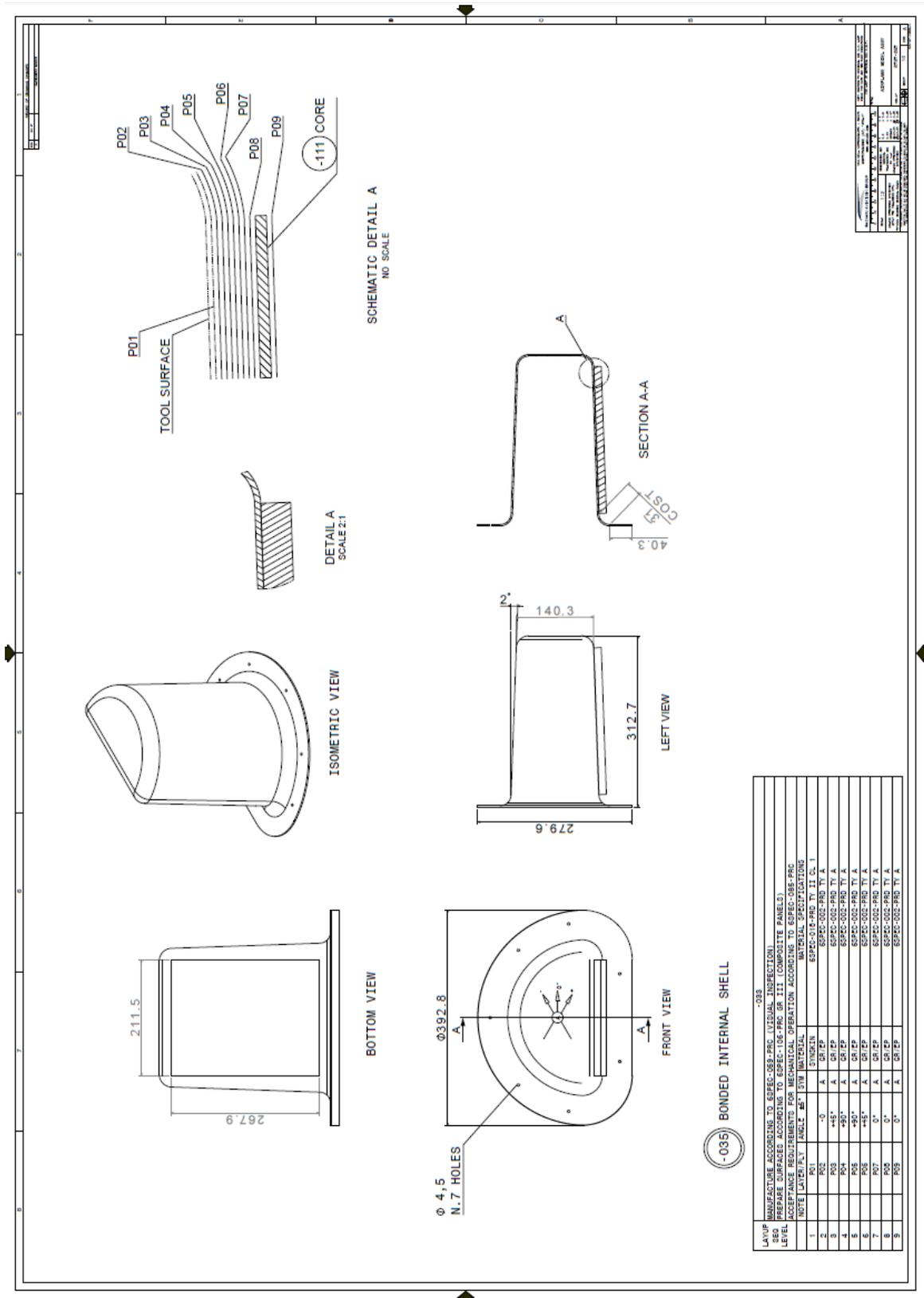
	CHECK LIST FOR GROUND / LABORATORY TEST	Nr.: CLT - xxx
		Date.: _____

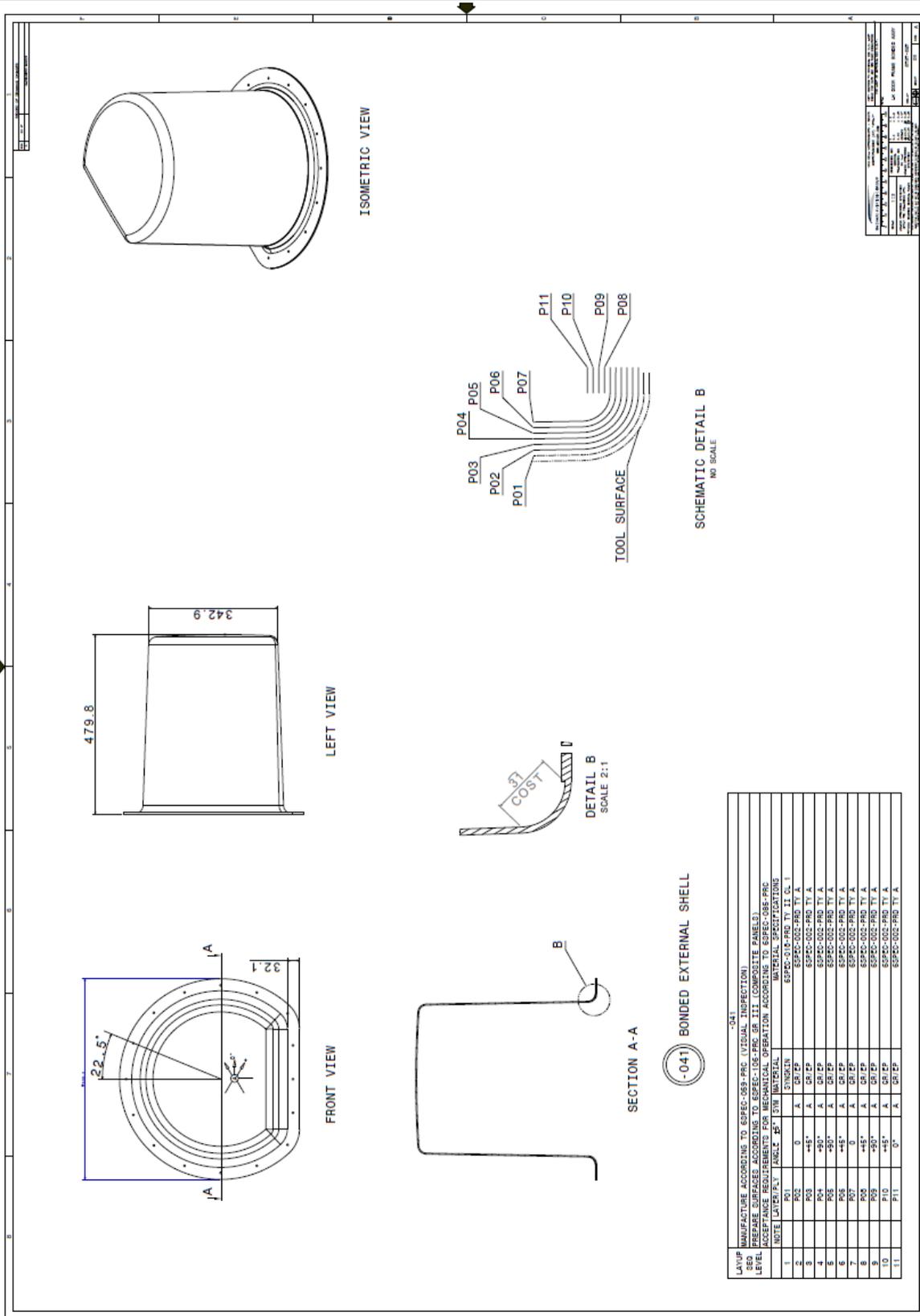
<input type="checkbox"/> Verifiche accoppiamento Test Rig / Test Article (data, esito, documento di riferimento, concessioni, ...)	
<input type="checkbox"/> Verifiche posizione strumentazione e sensori (data, esito, documento di riferimento, concessioni, ...)	
<input type="checkbox"/> Peso Test Rig (data, esito, documento di riferimento, concessioni, ...)	
<input type="checkbox"/> Peso Test Article (data, esito, documento di riferimento, concessioni, ...)	
SIGNATURE	
Test Reference Person: _____ [NAME IN BLOCK]	Date: _____

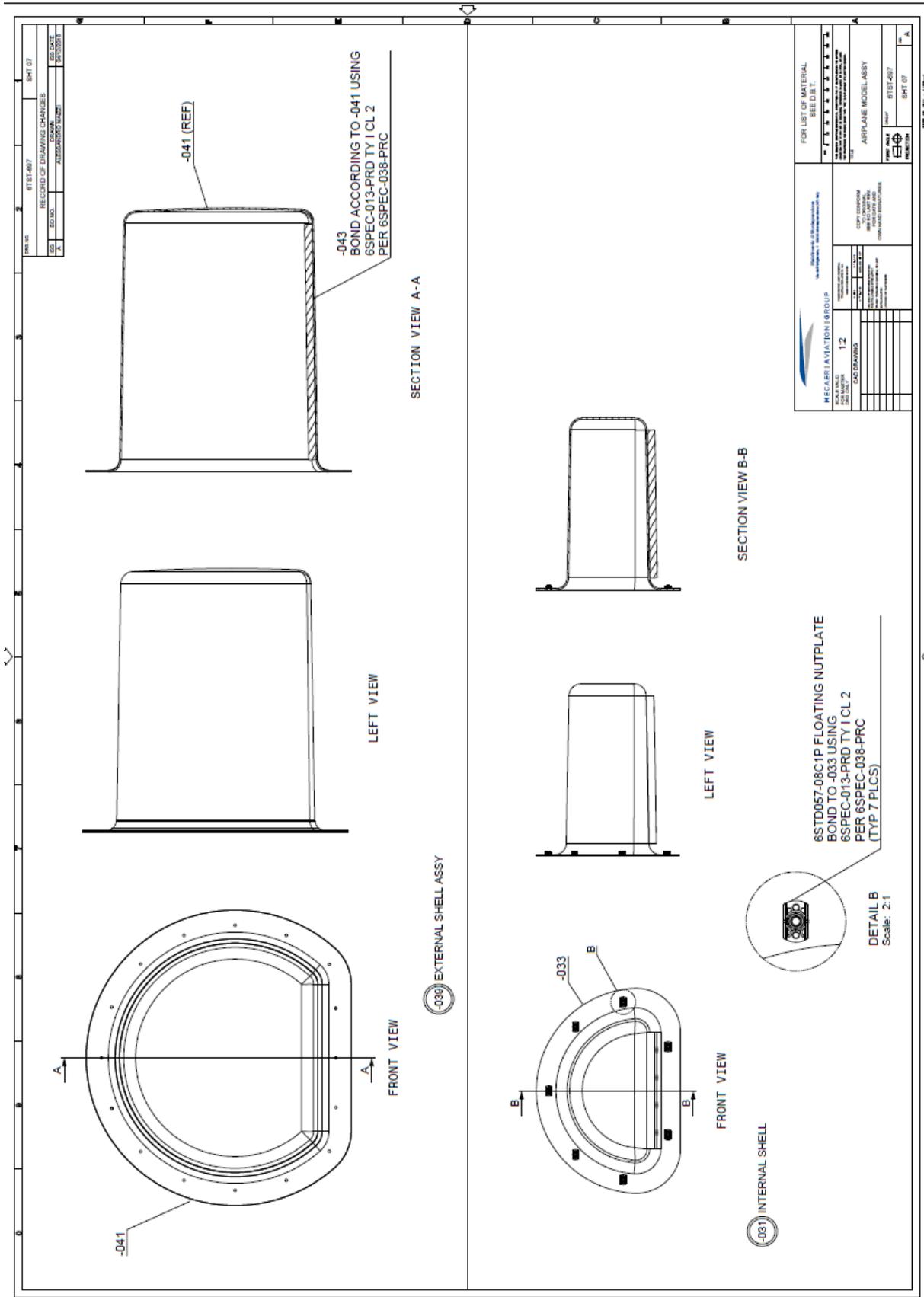
6 ANNEX D: RICHIESTA PERSONALE, ATTREZZATURA E AREA DI PROVA

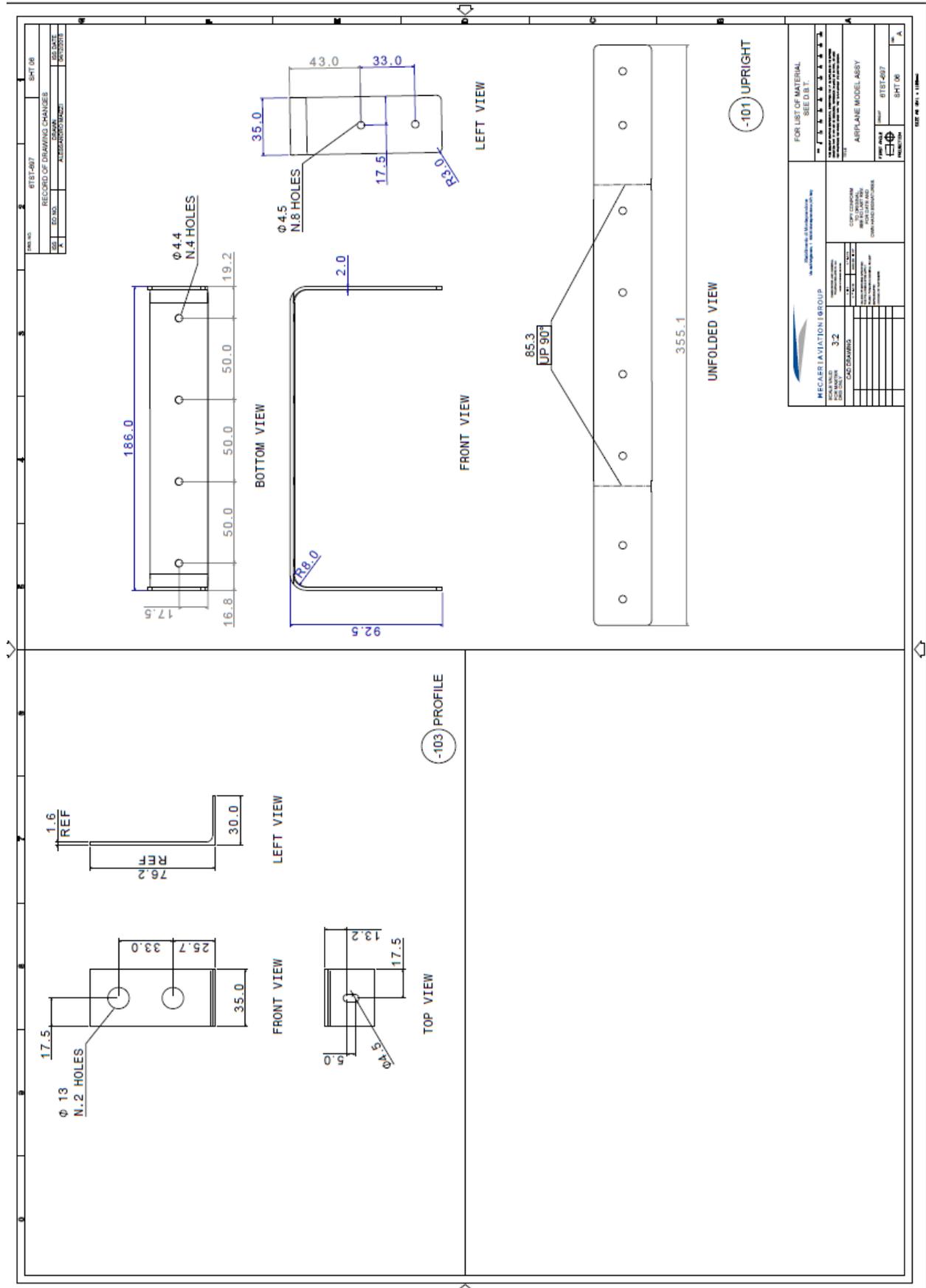
		<p><i>RICHIESTA PERSONALE, ATTREZZATURA E AREA DI PROVA</i></p>		<p>Page 1 di 1</p>
Test plan			Doc. N.	RT_AA_00X
			Date:	
Tipo di prova	<input type="checkbox"/> Strutturale statica <input type="checkbox"/> elettrica <input type="checkbox"/> Certificazione instl. <input type="checkbox"/> funzionale <input type="checkbox"/> Strutturale dinamica <input type="checkbox"/> Valutazione prototipo <input type="checkbox"/> Other			
Descrizione attività	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">DESIGN ORGANIZATION</p>			
Proposta DO				
Applicant	[NAME IN BLOCK LETTERS]	Signature	Date	

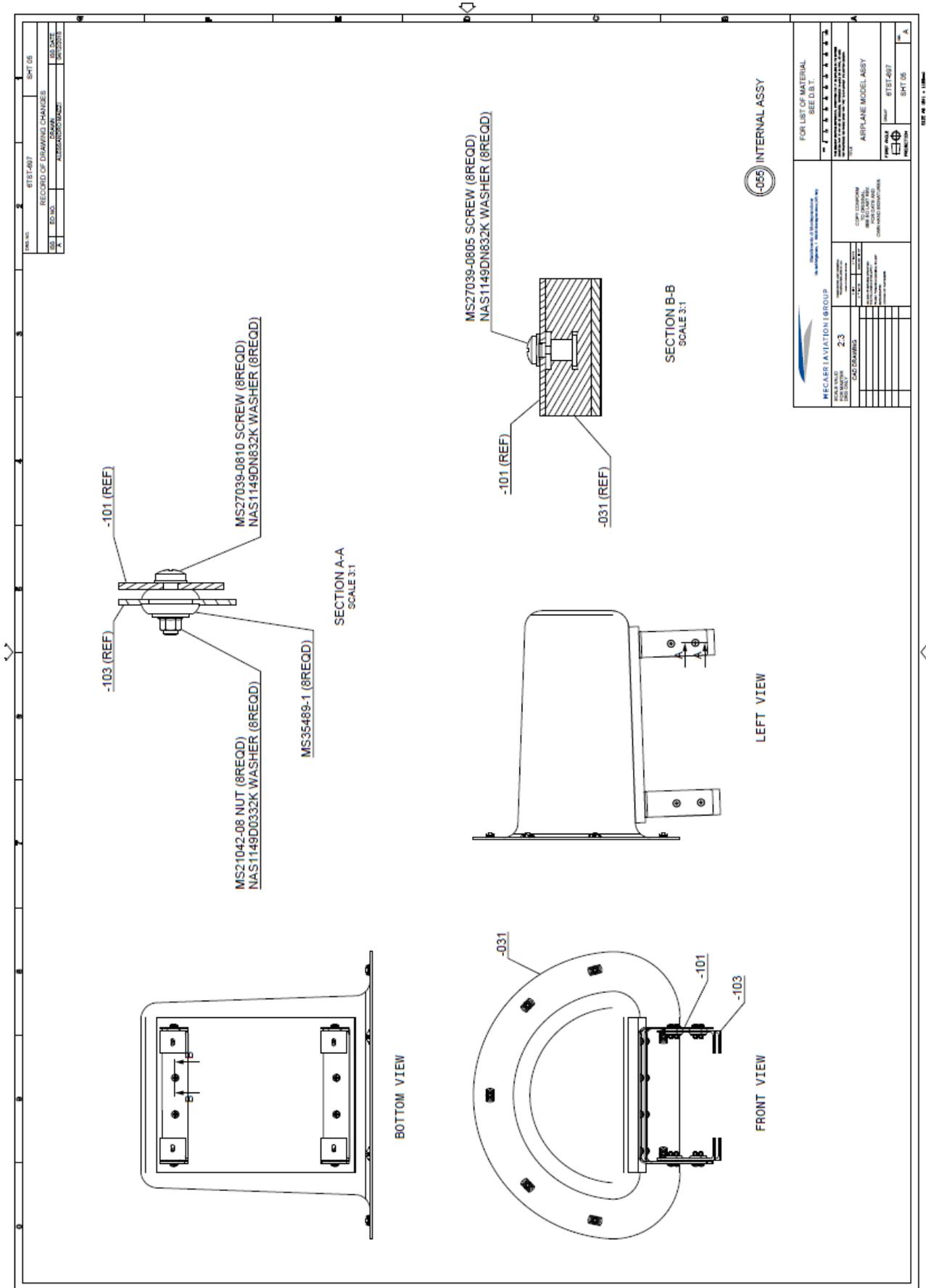
7 ANNEX E: DRAWINGS

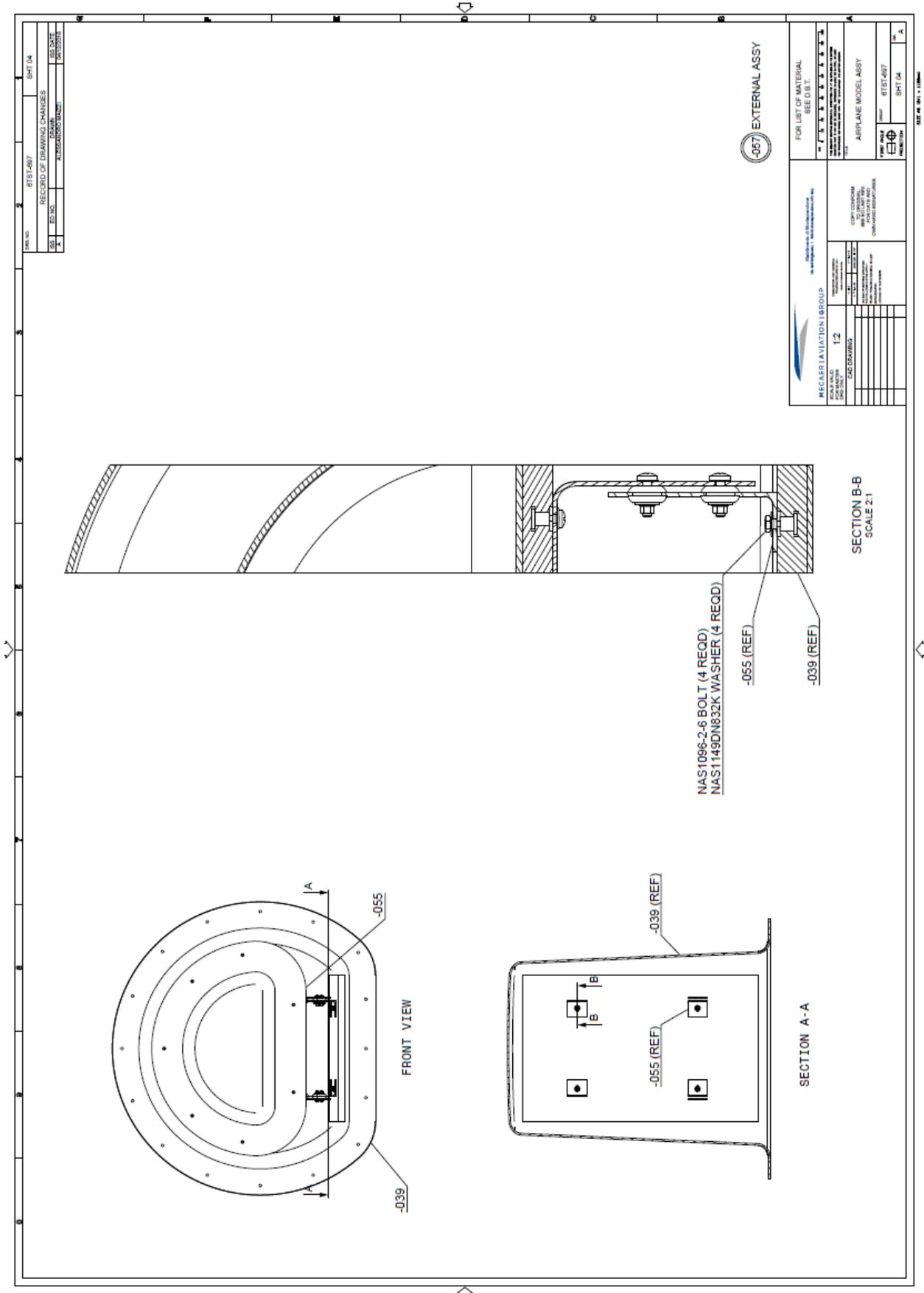


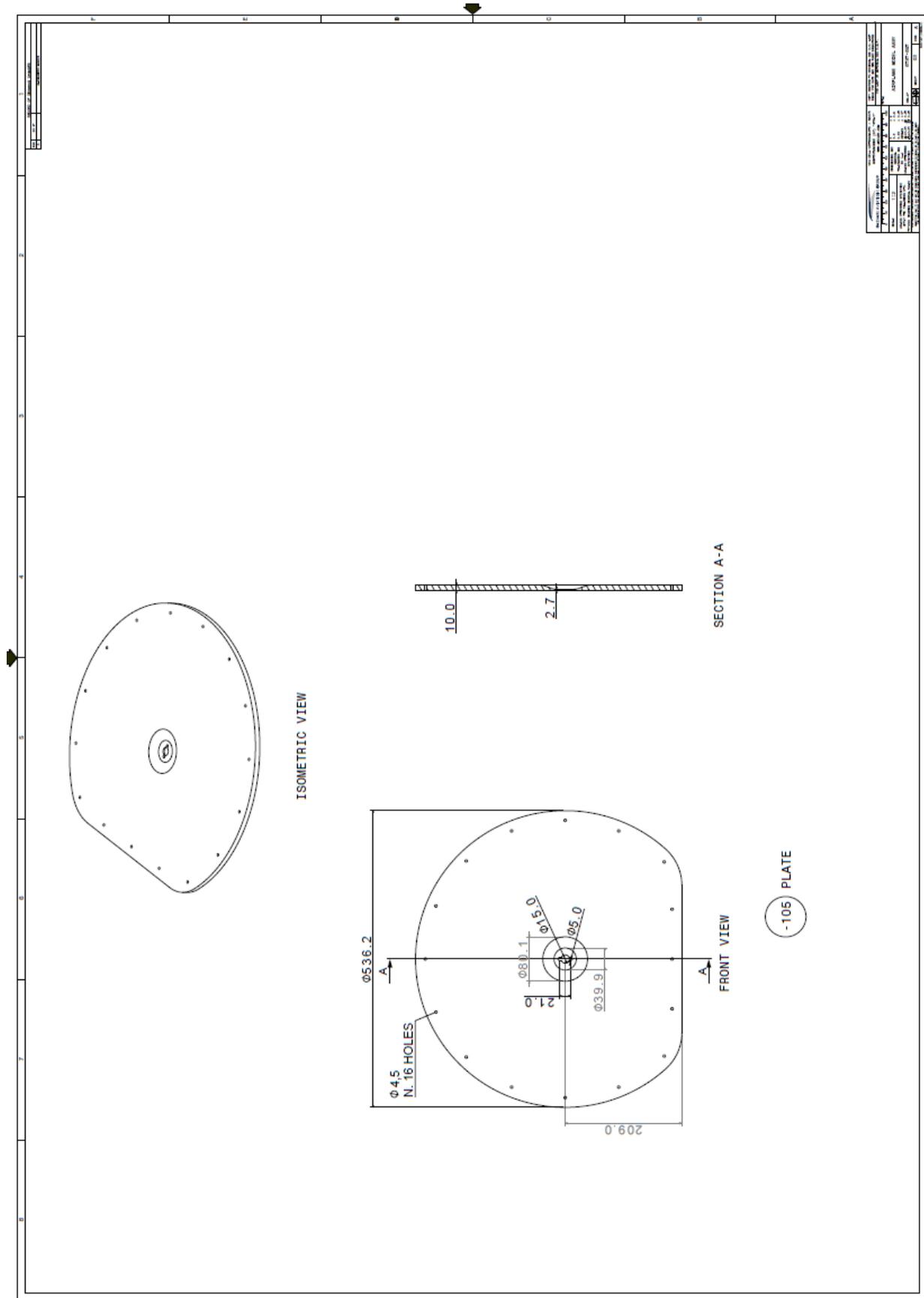


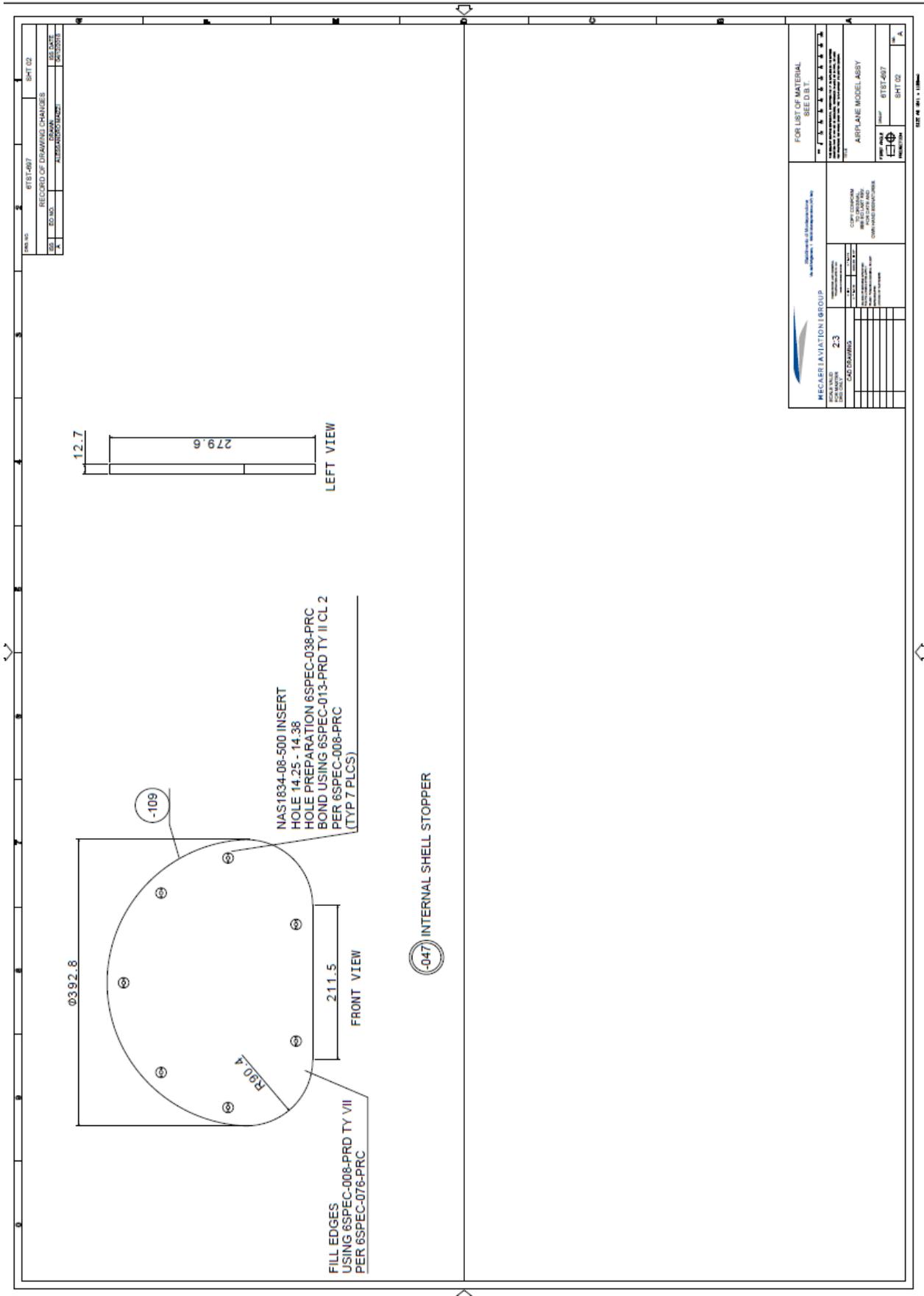












Bibliografia

Battilocchi V., Lorenzani G., *Il suono*, Università degli Studi di Parma, aprile 2016.

Ferrara V., *La propagazione del suono*, in “The Soundmaster”, <http://www.thesoundmaster.it>.

Graziani M., *Dispense di Acustica per Musicisti*, in “maurograziani.org”, <http://www.maurograziani.org/>.

Deambrosis G.V., Natta G., *Il suono*, Università degli Studi di Genova.

Piazzese G., *Misurare e denunciare l'inquinamento acustico e ambientale (Siracusa)*, in “La commune – Siracusa”, agosto 2018.

Frulli L., *Misurazione della potenza Sonora*, in “Professionisti del suono”, http://www.professionistidelsuono.net/blog_audio/, febbraio 2016.

Fiorini B., *Come si propaga il suono?*, in “Velocità Relative Silver Award Scienza per Tutti”, 2002.

Vér I., Beranek L., *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley & Sons Inc., 2006.

Harris C., *Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control*, Harris C., 1991.

Crocker M., *Handbook of noise and vibration control*, John Wiley & Sons Inc., 2007.

Battaglin F., *Rumore*, <http://www.febat.com/>