



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale: Ingegneria Aerospaziale

A.a. 2023-2024

Sessione di Laurea: Luglio 2024

Analisi numerica e sperimentale di un pannello alare con irrigidimenti bullonati

Relatori:

Ing. Marco Esposito
Prof. Marco Gherlone

Candidato:

Nicolas Ghiggini

Ringraziamenti

Desidero dedicare qualche riga di ringraziamenti a tutti coloro che, in un modo o nell'altro, hanno contribuito alla realizzazione di questa tesi magistrale.

Innanzitutto, desidero ringraziare i miei relatori, il Prof. Marco Gherlone e l'Ing. Marco Esposito, per la loro preziosa guida. Li ringrazio per la loro disponibilità e per avermi supportato durante la realizzazione del lavoro di tesi e fornito preziosi consigli per la stesura.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, che mi hanno sostenuto incondizionatamente in tutti questi anni di studi, incoraggiandomi a dare sempre il massimo. Senza il loro amore e il loro supporto, non avrei mai potuto raggiungere questo traguardo.

Grazie di cuore anche ai miei amici e colleghi di corso, che hanno condiviso con me gioie e difficoltà, rendendo questi anni universitari un'esperienza indimenticabile.

Infine, vorrei dedicare un pensiero speciale a mio fratello, Diego, la cui presenza e supporto mi ha dato la forza e la motivazione per affrontare e superare ogni sfida.

Indice

1. Introduzione.....	10
1.1 Descrizione dell'attività svolta	10
1.2 Impostazione dell'elaborato	11
1.3 Propositi della tesi.....	11
2. Giunti aerospaziali	12
2.1 Funzione dei giunti.....	12
2.2 Caratteristiche dei giunti.....	13
2.3 Giunzioni chiodate.....	13
2.4 Giunzioni incollate.....	14
2.5 Giunzioni bullonate	15
2.5.1 Tipi di giunzioni e disposizione dei fori	18
1.1.1 Unioni soggette a taglio.....	20
2.6 Unioni soggette a trazione.....	24
3. Modellazione dei giunti.....	27
3.1 Possibili approcci modellistici	27
3.2 Metodi tradizionali adottati in ambito industriale.....	29
3.3 Multi-spring model di Rutman.....	31
3.4 Soluzioni scelte	36
3.5 Elementi CFAST	36
3.6 Connessione con incollaggio.....	40
4. Creazione del modello FEM.....	45
4.1 Geometria.....	45
4.2 Materiali e proprietà.....	48
4.3 Mesh	50
4.4 Connessione tramite CFAST.....	53
4.5 Connessione tramite incollaggio	54
4.6 Definizione dei vincoli e dei carichi	56
4.7 Risultati.....	57
5. Prove sperimentali.....	60
5.1 Fase di smontaggio	60

5.2	Set – up sperimentale	61
5.3	1 ^a configurazione	62
5.4	Risultati 1 ^a configurazione	64
5.5	Prova sperimentale sul longherone	64
5.6	2a configurazione.....	66
5.7	Risultati 2a configurazione	67
5.8	Digital Image Correlation.....	68
5.9	Prova DIC.....	72
6.	Conclusioni.....	74
7.	Bibliografia.....	76

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: classi di resistenza dei bulloni [2].....	17
Tabella 2.2: distanze ed interassi [2].....	19
Tabella 3.1: parametri formule rigidezze [10].....	39
Tabella 3.2: Contact Table [11].....	41
Tabella 4.1: caratteristiche meccaniche Al-6060 [1]	48
Tabella 4.2: caratteristiche meccaniche Al-7075 [1]	49
Tabella 5.1: I configurazione.....	62
Tabella 5.2: risultati I prova sperimentale	64
Tabella 5.3: confronto con i risultati sperimentali.....	66
Tabella 5.4: II configurazione.....	66
Tabella 5.5: risultati sperimentali II configurazione.....	67

Indice delle figure

Figura 1.1: cassone alare	10
Figura 2.1: elementi di fissaggio [4]	12
Figura 2.2: giunzione rivettata [5]	13
Figura 2.3: giunzioni incollate [5]	14
Figura 2.4: esempi applicativi dei giunti incollati [5]	15
Figura 2.5: componenti di un bullone [2]	16
Figura 2.6: tipologie di giunzioni bullonate [3]	18
Figura 2.7: disposizione dei fori [2]	19
Figura 2.8: modalità di collasso della giunzione a taglio [3]	20
Figura 2.9: andamento tensioni, carico di taglio [2]	20
Figura 2.10: rottura a taglio del bullone [3]	21
Figura 2.11: rottura per rifollamento della lamiera [3]	22
Figura 2.12: rottura a trazione della lamiera [3]	22
Figura 2.13: collegamento a taglio e collegamento ad attrito [2]	23
Figura 2.14: unioni a taglio con più bulloni [3]	24
Figura 2.15: fasi comportamentali dell'unione a trazione [3]	24
Figura 2.16: unione a trazione, fase I [3]	25
Figura 2.17: unione a trazione, fase II [3]	25
Figura 2.18: modalità di collasso a trazione [3]	26
Figura 2.19: interazione trazione - flessione [2]	26
Figura 3.1: giunzione con offset [4]	27
Figura 3.2: connessione nodo-nodo [4]	28
Figura 3.3: connessione con RBE2/RBAR [4]	28
Figura 3.4: mesh independent fastener [4]	28
Figura 3.5: collegamento CBAR con RBE	29
Figura 3.6: CBAR con foro	30
Figura 3.7: Hexa8 con RBE [21]	30
Figura 3.8: CFAST	30
Figura 3.9: incollaggio	31
Figura 3.10: giunto con n-strati [6]	32
Figura 3.11: momento torcente nel giunto [6]	33
Figura 3.12: modello multi-spring [6]	34
Figura 3.13: esempio modello di Rutman [6]	35
Figura 3.14: collegamento CFAST [7]	36
Figura 3.15: punti ausiliari [8]	37
Figura 3.16: connessione QUAD4 - TRIA3 [8]	38
Figura 3.17: rigid body [4]	41
Figura 3.18: node to segment [12]	42
Figura 3.19: contact tolerance zone [12]	42

Figura 3.20: segment to segment [9].....	43
Figura 3.21: contatto segment to segment [12]	43
Figura 3.22: confronto tra modalità di contatto [12]	44
Figura 4.1: pannello (dimensioni in mm) [1]	45
Figura 4.2: corrente angolare superiore [1]	46
Figura 4.3: corrente centrale [1]	46
Figura 4.4: corrente inferiore [1].....	47
Figura 4.5: modello geometrico del pannello.....	47
Figura 4.6: modello geometrico dei correnti angolari.....	48
Figura 4.7: modello geometrico del corrente centrale	48
Figura 4.8: creazione materiale isotropo.....	49
Figura 4.9: proprietà 2D shell	50
Figura 4.10: isomesh di dimensione 2.6.....	51
Figura 4.11: mesh superficie forata correnti angolari.....	51
Figura 4.12: mesh ibrida - fori del pannello	52
Figura 4.13: mesh pannello	52
Figura 4.14: pannello - mesh all'incastro.....	52
Figura 4.15: bullonatura.....	53
Figura 4.16: proprietà CFAST.....	54
Figura 4.17: deformable body	55
Figura 4.18: body pair	56
Figura 4.19: vincolo incastro	56
Figura 4.20: carico con RBE3.....	57
Figura 4.21: freccia - modello CFAST	57
Figura 4.22: freccia - modello glued.....	58
Figura 4.23: tensore degli stress - modello glued.....	58
Figura 4.24: tensore degli stress - modello CFAST	59
Figura 4.25: stress traslazionale dei bulloni.....	59
Figura 5.1: pannello alare irrigidito.....	60
Figura 5.2: sezione trasversale del pannello irrigidito.....	61
Figura 5.3: incastro.....	61
Figura 5.4: asta	62
Figura 5.5: LVDT con display integrato	62
Figura 5.6: I configurazione	63
Figura 5.7: prova statica	63
Figura 5.8: geometria longherone	64
Figura 5.9: prova statica - longherone	65
Figura 5.10: mesh del longherone	65
Figura 5.11: prova statica numerica - longherone	66
Figura 5.12: II configurazione	66
Figura 5.13: tracciamento dei subset [13].....	68
Figura 5.14: griglia di calibrazione DIC	69
Figura 5.15: (a) deformazione subset – (b) funzione di correlazione [15]	70
Figura 5.16: monitoraggio e tracciamento del subset [14].....	71
Figura 5.17: trattamento della superficie per prova DIC.....	72
Figura 5.18: fotocamere per la prova DIC.....	72

Figura 5.19: risultati prova DIC73
Figura 5.20: ispezione sui bulloni.....73

Sommario

L'elaborato di tesi consiste nello studio di un pannello alare in alluminio, irrigidito tramite dei correnti ad L ad esso bullonati. La prima parte dello studio ha riguardato la realizzazione di un modello ad elementi finiti della struttura, tramite l'utilizzo dei software commerciali MSC Patran ed MSC Nastran. In particolare, sono state ricercate le metodologie più adatte alla simulazione delle connessioni bullonate e delle interazioni tra il pannello e gli irrigidimenti.

Essendo presente un gran numero di bulloni, si è focalizzata l'attenzione sui *low fidelity models*. In questo modo, è stato possibile modellizzare correttamente i bulloni presenti nel modello reale, senza dover necessariamente adoperare metodologie più complesse che presupponessero la modellizzazione di ogni singolo bullone nel dettaglio (ad esempio in 3D).

Successivamente, è stato possibile procedere alla fase sperimentale, in cui sono state svolte delle analisi strutturali per confrontare il modello numerico con quello reale. Durante la campagna sperimentale, per ottenere i risultati, sono stati adoperati strumenti quali LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) e DIC (Digital Image Correlation).

Tramite i risultati, si è poi potuta verificare l'accuratezza del modello numerico e trarre le conclusioni per uno sviluppo futuro del lavoro.

1. Introduzione

1.1 Descrizione dell'attività svolta

Il tema della tesi prevede lo studio numerico e sperimentale di una piastra irrigidita ed imbullonata. In particolare, la piastra oggetto di studio è un pannello alare, il quale è attraversato da tre correnti ad L.

I correnti non sono totalmente pieni, ma presentano dei fori in quanto il modello è stato ottenuto da un cassone alare presente nei laboratori del Politecnico di Torino. Allo stesso modo, anche il pannello risulterà forato in corrispondenza delle centine.

Si riporta in *Figura 1.1* il cassone alare completo:



Figura 1.1: cassone alare

In particolare, con il lavoro di tesi si vuole studiare l'interazione tra pannello e correnti, prestando particolare attenzione ai collegamenti bullonati. Come è possibile vedere dalla *Figura 1.1*, ci sono tre file di bulloni, per un totale di più di 300 collegamenti.

Si è quindi ricercata una soluzione che potesse modellare correttamente la presenza dei bulloni, senza necessariamente dover procedere manualmente alla modellizzazione di ogni singolo bullone. In tal senso, sono stati esclusi gli *high fidelity models*, con i quali si sarebbe dovuto modellare ogni bullone in 3D.

La ricerca delle metodologie più adatte è stata svolta nell'ambito dei *low fidelity models*, che permettono di simulare i collegamenti come connessioni rigide. In questo modo, è possibile

considerare anche il contributo dei bulloni nel modello numerico e svolgere le analisi strutturali, che saranno confrontate con i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale.

1.2 Impostazione dell'elaborato

Inizialmente verrà proposta una panoramica generale sui giunti utilizzati in ambito aerospaziale, focalizzando in particolare l'attenzione sulle giunzioni bullonate. In questo modo, sarà possibile conoscere le principali caratteristiche meccaniche dei bulloni, oggetto principale dello studio.

In un secondo momento, verrà affrontata la parte relativa alla modellazione dei giunti sui software MSC Patran e Nastran. Come detto nel paragrafo precedente, verranno analizzate le metodologie di tipo *low fidelity models* presenti in letteratura, prestando particolare interesse per le soluzioni che verranno utilizzate nel modello numerico da sviluppare.

Si cercherà di proporre al lettore in modo più chiaro possibile il funzionamento effettivo delle metodologie scelte.

Quindi, si potrà procedere alla creazione del modello numerico, presentandone le fasi salienti ed applicando le metodologie selezionate.

Successivamente, si procederà alla fase sperimentale, con la quale si potranno confrontare i risultati numerici con quelli ottenuti in laboratorio.

Infine, sarà possibile redigere il capitolo finale delle *Conclusioni*.

1.3 Propositi della tesi

Il lavoro svolto si propone come base per ulteriori studi sui collegamenti bullonati, che potranno essere svolti in futuro anche su modelli più complessi in cui sono presenti un gran numero di bulloni. In particolare, il proposito principale della tesi consiste nello studio e applicazione di uno o più metodi validi per la modellizzazione numerica dei bulloni, senza dover necessariamente ricorrere alla modellizzazione in 3D.

I metodi applicati per la realizzazione del modello numerico saranno confrontati tra loro, mostrando i vantaggi e gli svantaggi. Si vuole infine validare le metodologie trovate tramite delle prove sperimentali, confrontando i risultati numerici e sperimentali.

Al termine della campagna sperimentale sarà possibile trarre le conclusioni per dei possibili studi futuri sui collegamenti bullonati.

2. Giunti aerospaziali

In ambito aerospaziale, esistono varie tipologie di giunti, a seconda dell'applicazione per cui devono essere utilizzati. In generale, i giunti possono essere raggruppati in tre categorie [5]:

- **Permanenti:** l'organo di collegamento è rimovibile solamente con il danneggiamento di questo e, talvolta, del foro d'installazione. Rientrano in questa categoria le giunzioni realizzate con rivetti, saldature ed incollaggi.
- **Semi – permanenti:** la disinstallazione è possibile solo danneggiando l'organo di collegamento. Un esempio è il rivetto Hi – Lok.
- **Removibili:** l'organo di collegamento è removibile senza portare ad alcun danneggiamento. Questa categoria è molto utilizzata per elementi che devono essere facilmente ispezionabili. Rientrano in questa categoria le viti ed i bulloni.



Figura 2.1: elementi di fissaggio [4]

In questo capitolo andremo a fornire una panoramica generale sui giunti più adoperati nel settore aerospaziale, comprese le loro caratteristiche, materiali, tipologie ed altri aspetti correlati. In particolare, verrà approfondita nel dettaglio la giunzione bullonata.

2.1 Funzione dei giunti

I giunti aerospaziali hanno la funzione di collegare tra loro i diversi componenti presenti in una struttura aeronautica o spaziale.

I giunti trovano applicazione in diversi campi, dall'aeronautica civile e militare, fino alla missilistica ed ai moduli abitativi della ISS. Pertanto, lo studio dei metodi di giunzione è particolarmente importante e deve tener conto dei diversi ambienti operativi nel quale il giunto lavora.

Per ogni possibile applicazione, i giunti devono garantire degli standard di sicurezza molto elevati, per poter evitare possibili catastrofi. Nel seguente paragrafo verranno descritte le principali caratteristiche tipiche dei giunti aerospaziali.

2.2 Caratteristiche dei giunti

Una caratteristica principale dei giunti riguarda l'alta resistenza. Infatti, se consideriamo ad esempio l'ala di un velivolo, durante il volo sarà sottoposta a pressioni e stress molto elevati. È richiesto pertanto che i giunti abbiano un'alta resistenza a trazione e taglio. Inoltre, data la presenza di carichi dinamici, è necessaria anche una buona resistenza a fatica.

Un'altra caratteristica fondamentale riguarda la resistenza ai carichi termici. Le condizioni estreme a cui sono sottoposte le giunzioni non devono impedirne il corretto funzionamento.

Per i sistemi di fissaggio meccanici, quali rivetti e bulloni, è richiesta una buona resistenza alla corrosione. I fenomeni corrosivi sono particolarmente importanti in quanto sono in grado di peggiorare in maniera irreversibile le caratteristiche meccaniche e provocare, perfino, la rottura nelle condizioni operative. Inoltre, la corrosione comporta un danno economico perché si dovrà intervenire in modo oneroso con la manutenzione per sostituire i giunti ossidati.

Una caratteristica rilevante riguarda il peso. Infatti, su un velivolo sono presenti più di un milione di giunti (bulloni e rivetti), i quali causano un aumento di peso significativo. Si cerca quindi di preferire materiali quali l'alluminio ed il titanio rispetto all'acciaio.

Tutte le caratteristiche descritte rientrano negli standard del settore aerospaziale. Per le giunzioni si utilizzano gli standard **ISO/TC 20/SC 4** e **SAE AS9100**. In particolare, quest'ultimo tratta specificamente le giunzioni, includendo informazioni dettagliate.

2.3 Giunzioni rivettate

La rivettatura è una delle tecniche principali di giunzione in ambito aerospaziale. Viene tipicamente utilizzata per unire le lamiere che costituiscono il rivestimento di un aereo. Il collegamento avviene inserendo il rivetto nell'apposito foro e, successivamente, deformando a freddo la parte del gambo protendente, in modo da creare la seconda testa. Nel caso dei rivetti standard, la controtesta viene creata per ribattitura con un martello pneumatico.

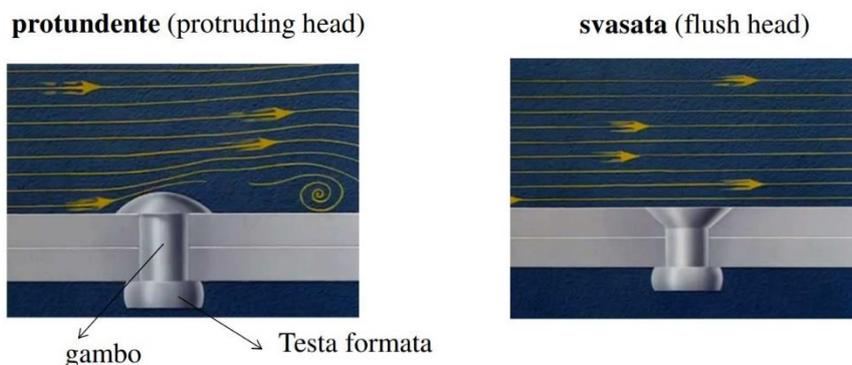


Figura 2.2: giunzione rivettata [5]

Come possibile vedere in *Figura 2.2*, la testa del rivetto può essere protudente o svasata. Per quanto riguarda i materiali utilizzati, tipicamente si utilizzano le leghe di Alluminio per avere dei

collegamenti più leggeri. Le giunzioni rivettate sono progettate per resistere principalmente a taglio e collegare piastre sottili. A seconda delle necessità, possono essere utilizzati dei rivetti quali i blind rivets, oppure i rivetti speciali (Lock – bolts, Hi – lock, Hi – shear).

I blind rivets vengono utilizzati se il collegamento non è accessibile da entrambi i lati, mentre i rivetti speciali si usano se sono richieste elevate caratteristiche meccaniche.

2.4 Giunzioni incollate

Le giunzioni incollate permettono di avere una distribuzione più uniforme del carico rispetto ai sistemi di fissaggio meccanici. In questo modo, vengono ridotti i picchi di concentrazione degli stress e si ha una miglior resistenza a fatica ed una migliore capacità di smorzamento delle vibrazioni.

In tali giunti, il carico viene trasmesso gradualmente attraverso lo strato adesivo presente nella zona di sovrapposizione (overlap region). L'adesivo agisce quindi come mediatore nella trasmissione del carico e si avrà una zona maggiore d'irrigidimento. Nella *Figura 2.3* si riporta quanto descritto:

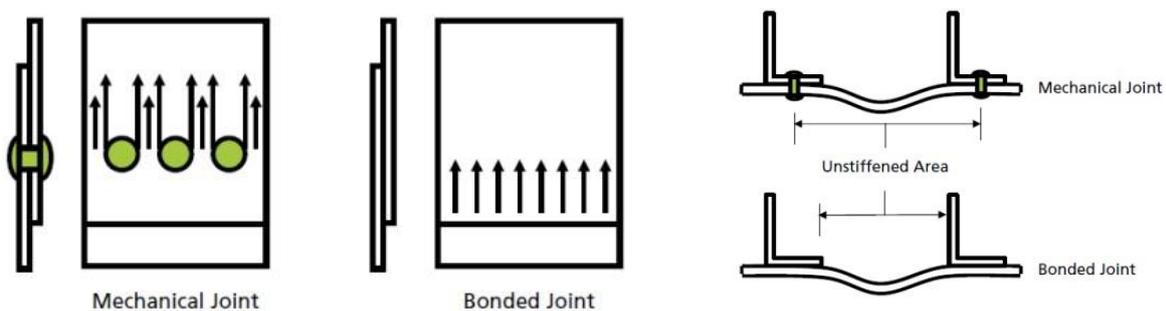


Figura 2.3: giunzioni incollate [5]

Inoltre, le giunzioni incollate presentano molteplici vantaggi. Di seguito vengono riportati i principali:

- **Peso e costo:** l'eliminazione dei giunti meccanici (bulloni e rivetti) consente di avere notevoli vantaggi in termini di leggerezza e costo.
- **Progettazione:** in fase progettuale possono essere realizzate strutture in composito (sandwich), assemblando i diversi materiali tramite incollaggio. Inoltre, dal punto di vista aerodinamico è possibile avere delle superfici esterne completamente lisce.
- **Rigidità:** rispetto alle giunzioni meccaniche o saldate, si ha un effetto di irrigidimento maggiore, in quanto la regione delle parti collegate è l'intera lunghezza del giunto. La resistenza a buckling è aumentata del 30% – 100%.

D'altro canto, i giunti incollati comportano delle problematiche per quanto riguarda la manutenzione. Infatti, sono giunzioni permanenti ed il loro smontaggio può provocare danni anche alle strutture adiacenti.

Anche l'applicazione del giunto è più complessa rispetto alle giunzioni meccaniche e richiede un'adeguata preparazione delle superfici, in modo da garantire un legame forte e durevole. Quest'ultima caratteristica è legata alla colla utilizzata, che ha una data di scadenza ed è soggetta a degradazione ambientale.

Si riportano in *Figura 2.4* alcuni esempi applicativi in cui vengono utilizzate le giunzioni incollate:

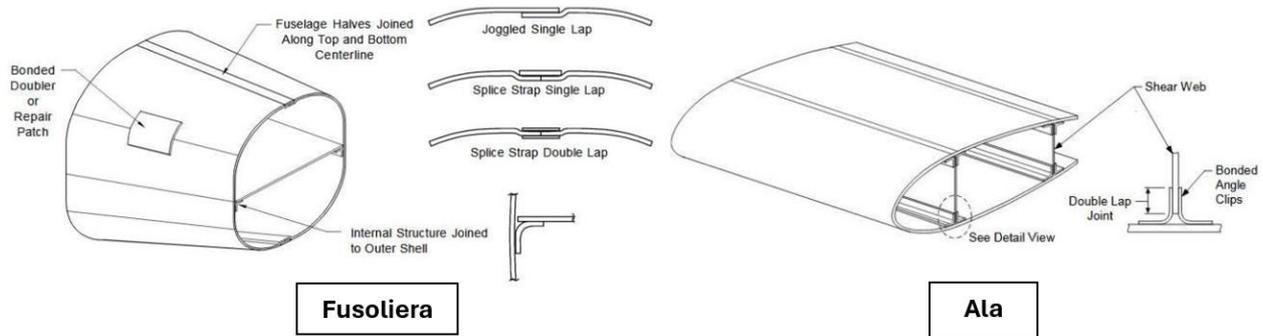


Figura 2.4: esempi applicativi dei giunti incollati [5]

2.5 Giunzioni bullonate

La bullonatura rientra nella categoria delle giunzioni rimovibili. È una soluzione molto adoperata in ambito aerospaziale. Infatti, le giunzioni bullonate hanno il vantaggio di essere molto resistenti e di poter essere agevolmente rimosse. I bulloni dell'industria aerospaziale sono molto affidabili in quanto resistono a fattori esterni estremi come:

- Alta pressione
- Velocità
- Vento
- Temperature instabili

Si tratta di condizioni atmosferiche e ambienti specifici e, pertanto, i bulloni utilizzati devono rispondere ad altrettante specifiche caratteristiche. In particolare, devono avere:

- Elevata resistenza all'ossidazione e alla corrosione per resistere a temperature e pressioni estreme;
- Elevata resistenza al taglio e alla trazione per garantire robustezza sul lungo periodo;
- Struttura leggera per facilitare il decollo e ridurre il consumo e relativi costi di carburante;
- Capacità di auto sigillatura e auto bloccaggio per evitare qualsiasi tipo di perdita di pressione.

I materiali utilizzati nei componenti dei bulloni sono principalmente l'alluminio, l'acciaio ed il titanio.

L' alluminio viene utilizzato quando è necessario che il bullone resista a temperature estreme ed alla corrosione, anche in condizioni di stress elevato.

L'acciaio, invece, è un materiale caratterizzato da un'elevata resistenza e durezza superficiale. Poiché si tratta di un materiale più pesante rispetto agli altri, la sua applicazione richiede studio ed analisi per ogni progetto specifico.

Infine, il titanio rappresenta una valida alternativa all'alluminio. Si tratta di un materiale che risponde a criteri di alta resistenza e durata. Il principale vantaggio nel suo impiego è la capacità di resistere a temperature estreme, sia calde che fredde, nel lungo termine. Di contro, presenta lo svantaggio di essere molto costoso.

I bulloni sono costituiti da tre componenti principali: la vite con testa, il dado e la rosetta.

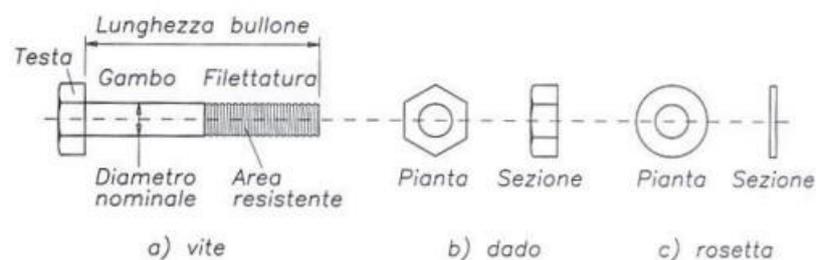


Figura 2.5: componenti di un bullone [2]

In generale, la vite ha una testa esagonale ed un gambo completamente o parzialmente filettato. Il dado, anch'esso di forma esagonale, si avvita lungo la filettatura del gambo. Infine, la rosetta è di forma circolare ed ha la funzione di distribuire uniformemente le tensioni tra lamiera e bullone. Inoltre, consente di evitare il disserraggio in presenza di vibrazioni.

Ci sono diverse classi di bulloneria, ciascuna relativa a viti con caratteristiche meccaniche differenti, che variano a seconda del materiale. La normativa che regola le caratteristiche meccaniche e fisiche della bulloneria è la **UNI EN ISO 898-1**.

Le principali classi di resistenza in ambito industriale sono:

- **4.6, 4.8 e 5.6** (bassa resistenza)
- **6.8** (media resistenza)
- **8.8, 10.9 e 12.9** (alta resistenza).

Dal codice numerico che identifica la classe di appartenenza di un bullone è possibile conoscere la resistenza a trazione f_{tb} ed il limite allo snervamento f_{yb} . Per ottenere il valore di quest'ultimo, bisogna moltiplicare tra loro i due numeri a destra e sinistra del punto e, moltiplicando ancora per 10, si ottiene il valore in MPa. Per la resistenza a trazione, invece, è sufficiente moltiplicare per 100 il primo numero antecedente al punto. Si riporta un esempio mostrato in *Tabella 2.1*:

Classe	Acciai normali			Acciai ad alta resistenza	
	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
f_{yb} [N/mm ²]	240	300	480	649	900
f_{tb} [N/mm ²]	400	500	600	800	1000

Tabella 2.1: classi di resistenza dei bulloni [2]

La normativa definisce per ogni diametro d un'area resistente, che è inferiore rispetto all'area nominale in quanto è presente la filettatura. In particolare, si ha:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{mentre l'area resistente è } A_{res} = 0.75 * A. \quad (2.1)$$

L'area resistente è utile al fine del calcolo della forza di precarico, la quale ha diverse funzioni:

- Porre gli elementi in compressione affinché non abbiano movimenti relativi
- Creare forze di attrito tra le parti limitando lo slittamento relativo
- Diminuire l'ampiezza di sollecitazione a fatica sul bullone

La formula che lega l'area resistente alla forza di precarico F_p è la seguente:

$$F_p = 0.7 \frac{f_{tb} * A_{res}}{\gamma_{M7}} \quad (2.2)$$

dove γ_{M7} è un coefficiente di sicurezza valido per il calcolo del precarico di bulloni ad alta resistenza.

Infine, dopo aver avvitato il dado fino a ottenere il contatto fra le superfici, con una chiave dinamometrica si fornisce il momento di serraggio:

$$M_{serr} = k * d * F_p \quad (2.3)$$

k : costante di rendimento (dichiarata dal produttore), assume valori di 0.10 – 0.16.

2.5.1 Tipi di giunzioni e disposizione dei fori

Le superfici possono essere giuntate in vari modi:

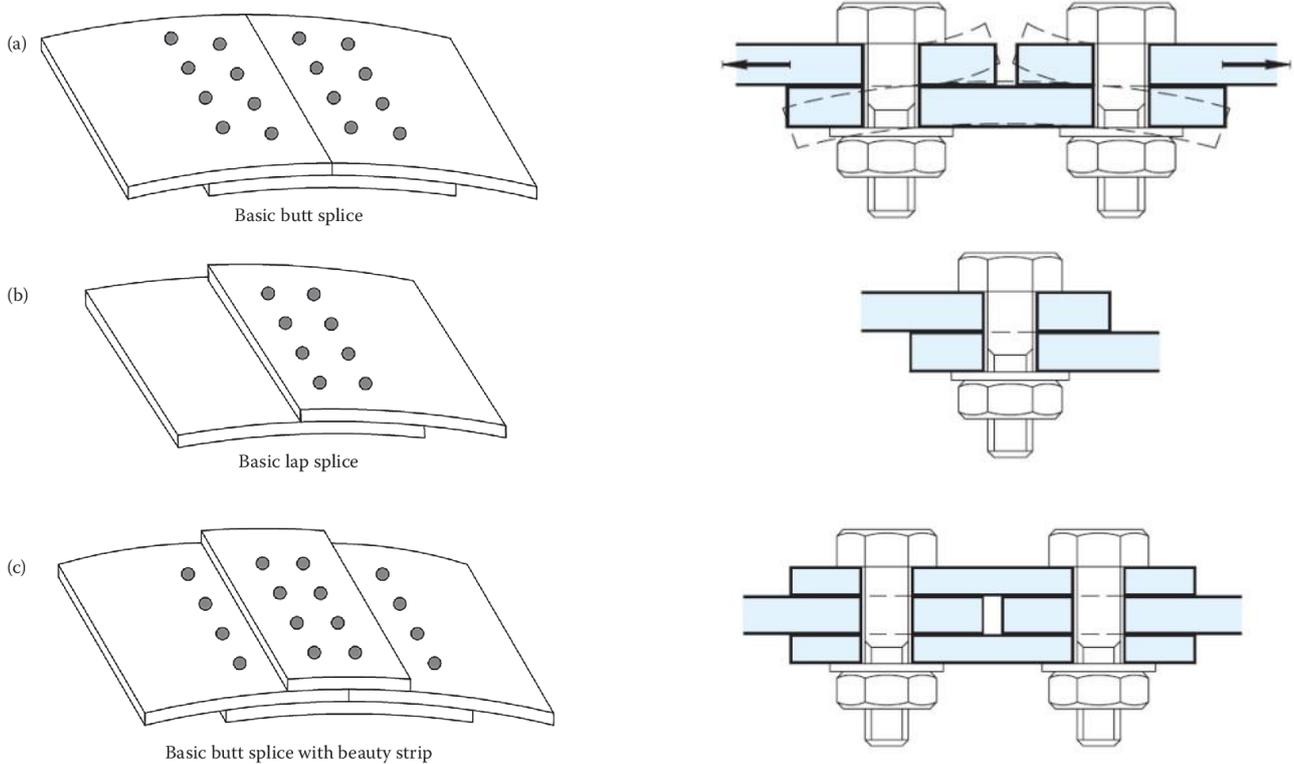


Figura 2.6: tipologie di giunzioni bullonate [3]

Il *basic lap splice* (semplice sovrapposizione), presenta un'unica sezione resistente del bullone. Anche nel *basic butt splice* (coprigiunto semplice) c'è una sola sezione resistente, ma in tale soluzione l'eventuale dissimmetria dell'unione può determinare deformazioni negli elementi, pertanto è una soluzione sconsigliata. Infine, nel caso di *basic butt splice with beauty strip*, il bullone unisce tre superfici ed in questo modo si evita il problema del caso precedente, essendo l'azione di trazione baricentrica.

La disposizione dei fori nelle unioni bullonate segue alcune regole geometriche, che dipendono da fattori ambientali, nonché dalla disposizione su file allineate o meno.

Di seguito, in *Figura 2.7*, si riportano i principali schemi, con annessa una tabella esplicativa delle distanze principali tra i fori (*Tabella 2.2*).

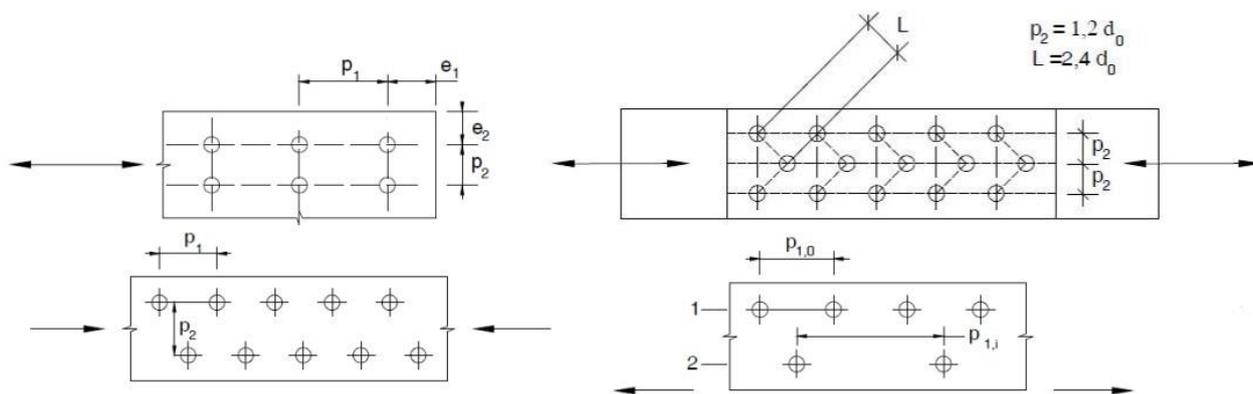


Figura 2.7: disposizione dei fori [2]

Distanze ed interassi	Minimo	Massimo		
		Unioni esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni non esposte a fenomeni corrosivi o ambientali	Unioni di elementi in acciaio resistente alla corrosione (EN10025-5)
e_1	$1.2 d_0$	$4t+40 \text{ mm}$	-	max (8t ; 125 mm)
e_2	$1.2 d_0$	$4t+40 \text{ mm}$	-	max (8t ; 125 mm)
p_1	$2.2 d_0$	min (14t ; 200 mm)	min (14t ; 200 mm)	min (14t ; 175 mm)
$p_{1,0}$	-	min (14t ; 200 mm)	-	-
$p_{1,i}$	-	min (28t ; 400 mm)	-	-
p_2	$2.4 d_0$	min (14t ; 200 mm)	min (14t ; 200 mm)	min (14t ; 175 mm)

Tabella 2.2: distanze ed interassi [2]

d_0 è il diametro del foro, mentre t lo spessore minimo degli elementi da collegare.

Nel modello in analisi del pannello irrigidito è possibile vedere l'applicazione di tali regole geometriche, in particolare, come vedremo in seguito, un chiaro esempio è riportato in *Figura 4.4*.

Per quanto riguarda le tolleranze del gioco foro-bullone, si ha che i fori calibrati presentano una tolleranza di 0.1 – 0.2 mm, mentre i fori con diametro inferiore a 24 mm hanno un gioco di 1 – 2 mm.

2.5.2 Unioni soggette a taglio

L'applicazione di un carico di taglio può portare a diverse modalità di collasso del giunto. Le più comuni sono il collasso per *rottura a taglio del bullone*, per *rifollamento della lamiera*, per *rottura a taglio della lamiera* e per *rottura a trazione della lamiera*. Si riportano in *Figura 2.8* le modalità di collasso:

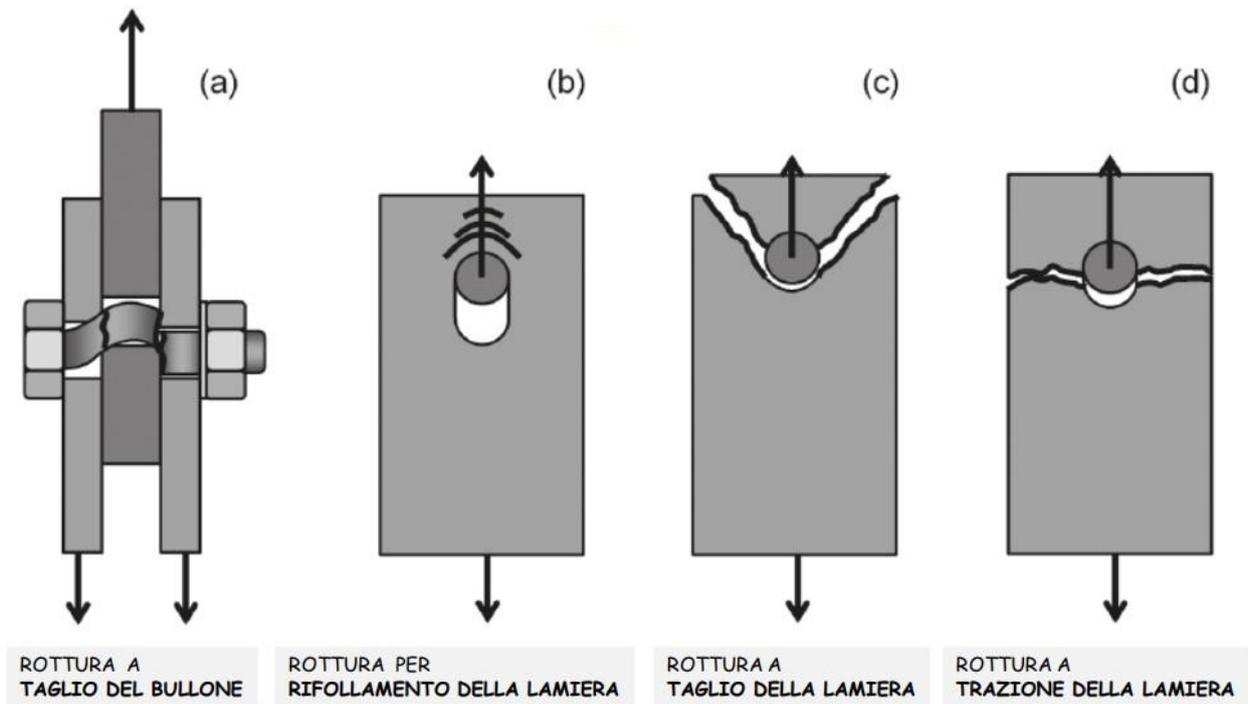


Figura 2.8: modalità di collasso della giunzione a taglio [3]

Verranno ora analizzati più nel dettaglio tali modalità di collasso. In particolare, nei calcoli verrà assunta l'ipotesi di tensioni in campo plastico:

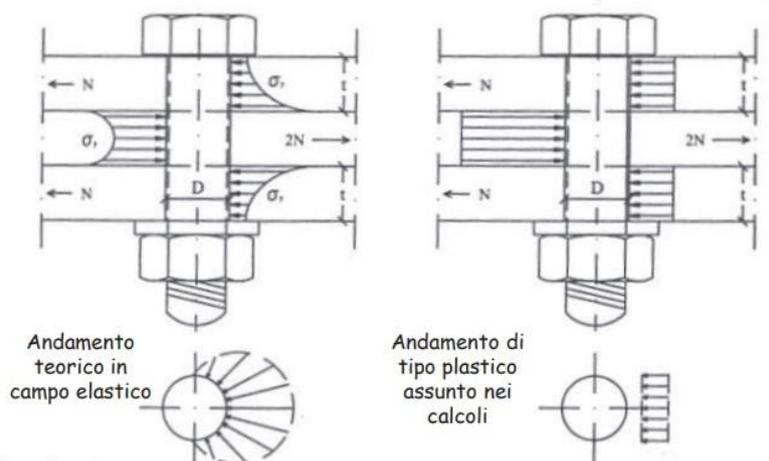


Figura 2.9: andamento tensioni, carico di taglio [2]

La rottura a taglio del bullone è causata da un eccessivo carico di taglio che supera la resistenza di taglio $F_{v,Rd}$ del bullone. In particolare, questa è determinata dalla seguente relazione:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v * f_{tb} * A_{res}}{\gamma_{M2}} \quad (2.4)$$

Il coefficiente α_v assume i valori di 0.5 per i bulloni classe 6.8 e 10.9 e 0.6 per le altre classi. Inoltre, l'area resistente viene utilizzata se lo scorrimento a taglio interessa la parte filettata della vite, altrimenti si utilizza l'area della parte non filettata ed il parametro α_v assume il valore 0.6.

Il coefficiente di resistenza dei bulloni γ_{M2} vale 1.25.

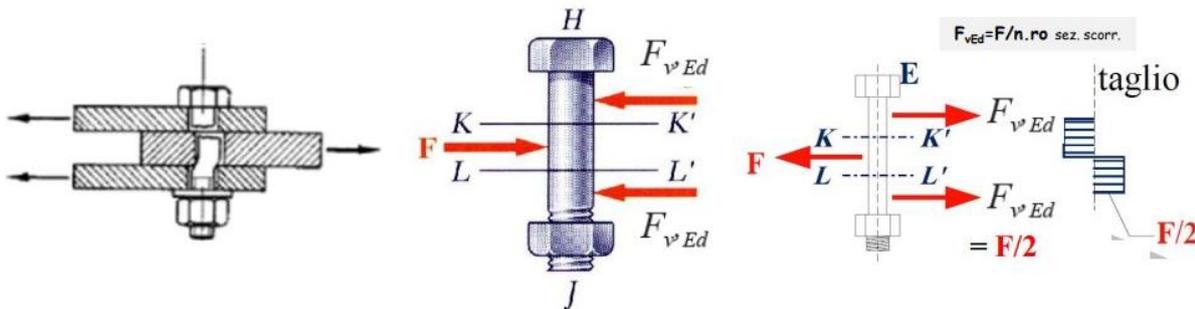


Figura 2.10: rottura a taglio del bullone [3]

Come è possibile vedere dalla *Figura 2.10*, nei calcoli si è assunto un andamento plastico per le tensioni. Per non avere la rottura, deve dunque essere rispettata la seguente disequazione:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad (2.5)$$

La rottura per rifollamento della lamiera è causata dalla plasticizzazione del foro. La resistenza di calcolo a rifollamento può essere assunta pari a:

$$F_{b,Rd} = k * \alpha * d * t * \frac{f_{tk}}{\gamma_{M2}} \quad (2.6)$$

dove:

f_{tk} è la resistenza a rottura del materiale della lamiera collegata;

k è un parametro che assume i valori:

- $k = \min\left(2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$ per bulloni di bordo che risultano perpendicolari al carico applicato
- $k = \min\left(1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7; 2.5\right)$ per bulloni interni che risultano perpendicolari al carico applicato

α è un parametro che assume i valori:

- $\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{btk}}{f_{tk}}; 1\right)$ per bulloni di bordo che risultano paralleli al carico applicato
- $\alpha = \min\left(\frac{p_1}{3d_0} - 0.25; \frac{f_{btk}}{f_{tk}}; 1\right)$ per bulloni interni che risultano paralleli al carico applicato

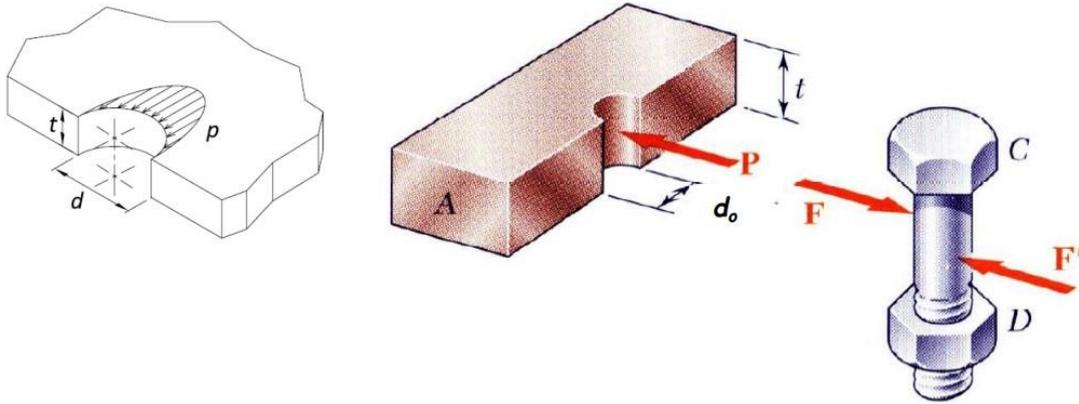


Figura 2.11: rottura per rifollamento della lamiera [3]

La rottura a trazione della lamiera è causata da un progressivo indebolimento dei fori che porta ad una propagazione della cricca ed alla rottura della lamiera.

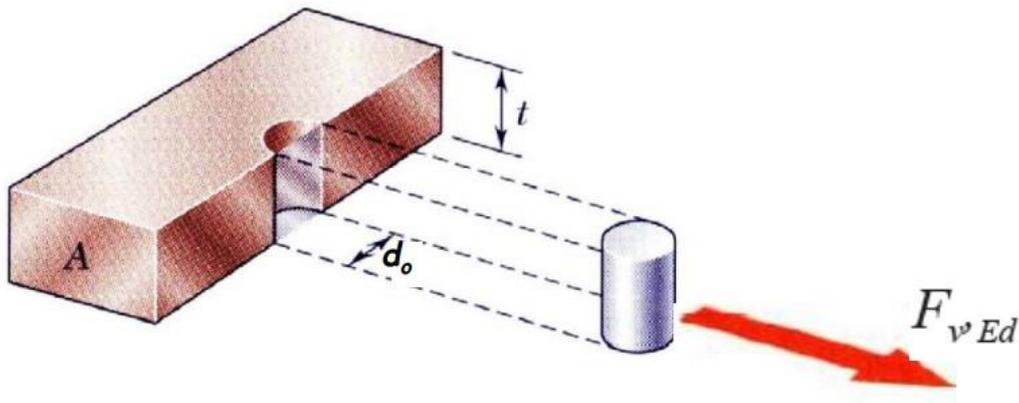


Figura 2.12: rottura a trazione della lamiera [3]

Per fare in modo che non si verifichi tale fenomeno, il carico applicato deve rispettare la seguente disequazione:

$$F_{v,Ed} \leq N_{u,Rd} \quad (2.7)$$

$N_{u,Rd}$ è la resistenza a rottura della sezione netta ed è determinata dalla relazione:

$$N_{u,Rd} = 0.9 * A_{net} * \frac{f_{tk}}{\gamma_{M2}} \quad (2.8)$$

dove l'area netta vale $A_{net} = A - d_0 t$.

Per quanto riguarda la tipologia c, la rottura a taglio della lamiera, questa si verifica quando i fori sono in prossimità di un bordo libero. Si può evitare tale modalità di collasso rispettando una distanza minima dal bordo, seguendo le normative.

La resistenza complessiva delle unioni a taglio, considerando tutte le modalità di collasso, è data da:

$$F_{v,Ed} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}) \quad (2.9)$$

Nei casi finora analizzati non si era considerato l'effetto dell'attrito, il quale modifica il meccanismo di resistenza del bullone. La differenza tra i due tipi di collegamento, con e senza attrito, è mostrata in *Figura 2.13*:

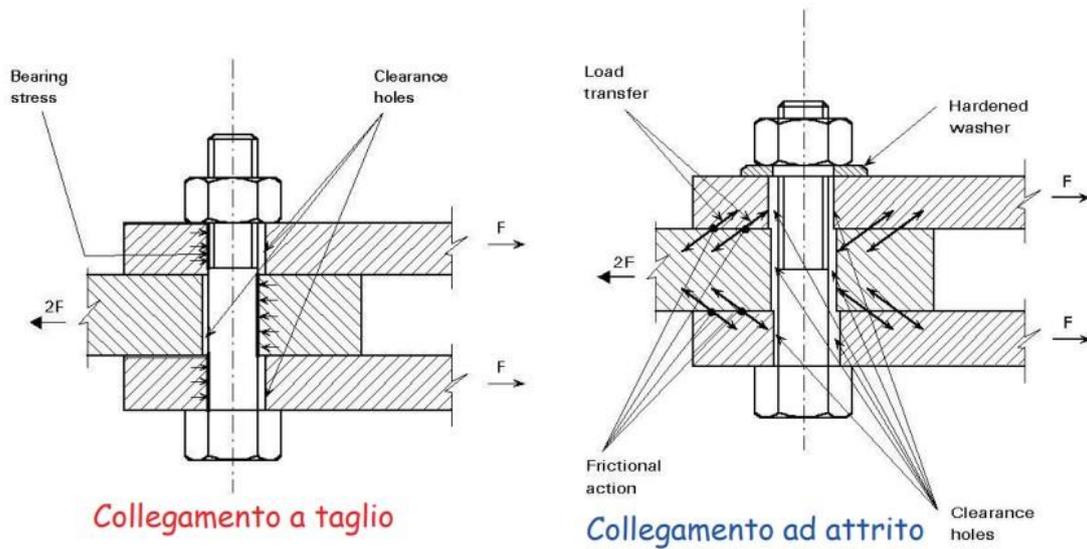


Figura 2.13: collegamento a taglio e collegamento ad attrito [2]

Il meccanismo resistente del *collegamento a taglio* è attivo quando la superficie laterale del gambo è a contatto con la superficie del foro. Nel collegamento ad attrito, invece, i bulloni vengono pre-caricati tramite il serraggio e premono tra loro le piastre. Il collegamento, perciò, crea uno stato di pre-sollecitazione tra le superfici a contatto.

Con il collegamento ad attrito si vuole limitare la deformabilità della struttura. La resistenza di calcolo allo scorrimento del bullone è data dalla seguente relazione:

$$F_{s,Rd} = \frac{n \cdot \mu \cdot F_{p,Cd}}{\gamma_{M3}} \quad (2.10)$$

dove

- n è il numero di superfici a contatto
- μ è il coefficiente d'attrito che vale 0.3 per le superfici non trattate e 0.45 per quelle trattate

- $F_{p,Cd}$ è lo sforzo di precarico, dato dalla relazione: $F_{p,Cd} = 0.7 \frac{f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M7}}$ (2.11)

Vale inoltre la relazione di verifica $F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ in cui, però, il superamento della forza di attrito $F_{s,Rd}$ non implica necessariamente il collasso dell'unione.

In presenza di più bulloni, il carico applicato viene ripartito in modo uniforme tra i bulloni. Se l'unione bullonata supera la lunghezza $L_j \geq 15d$ è necessario introdurre un parametro β per ridurre la resistenza di progetto dei bulloni più interni, come mostrato in *Figura 2.14*:

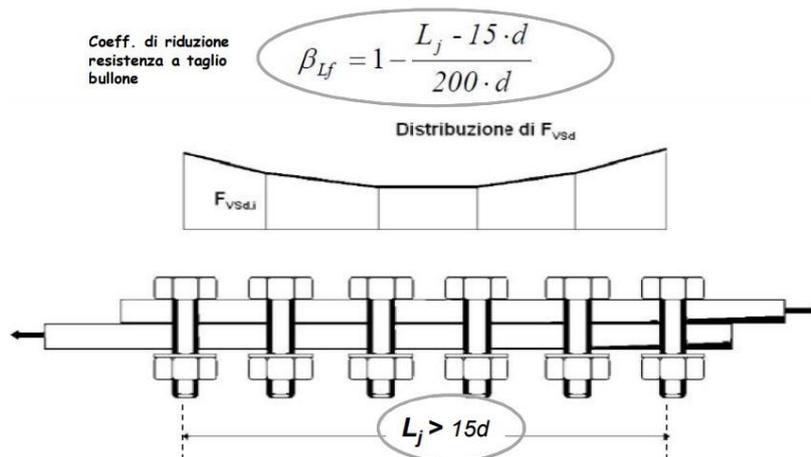


Figura 2.14: unioni a taglio con più bulloni [3]

Una volta valutate le sollecitazioni che competono a ciascun bullone, è facile ricondursi ai casi di verifica precedentemente esaminati.

2.5.3 Unioni soggette a trazione

Due piastre unite da una bullonatura e soggette ad un carico di trazione, in direzione perpendicolare al piano di contatto, attraversano due fasi prima di giungere a rottura:

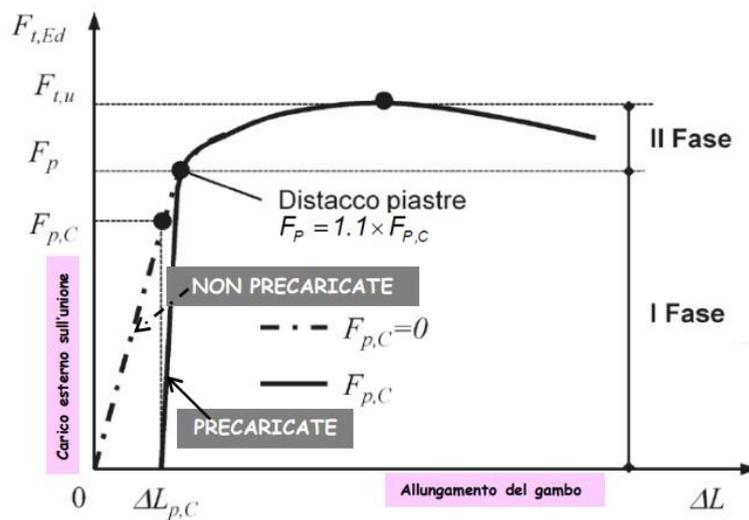


Figura 2.15: fasi comportamentali dell'unione a trazione [3]

Innanzitutto, la prima fase dipende dal valore di serraggio del bullone. In assenza di precarico, la forzante esterna viene trasferita interamente tramite i bulloni. Invece, con un valore di precarico $F_{p,C}$ i bulloni risultano inizialmente compressi di una lunghezza ΔL . La forzante esterna fino al valore pari a $1.1 \cdot F_{p,C}$ non porta al distacco delle piastre.

In particolare, nella prima fase si hanno dei valori di forze agenti sul gambo e sulle piastre, come riportato in *Figura 2.16*:

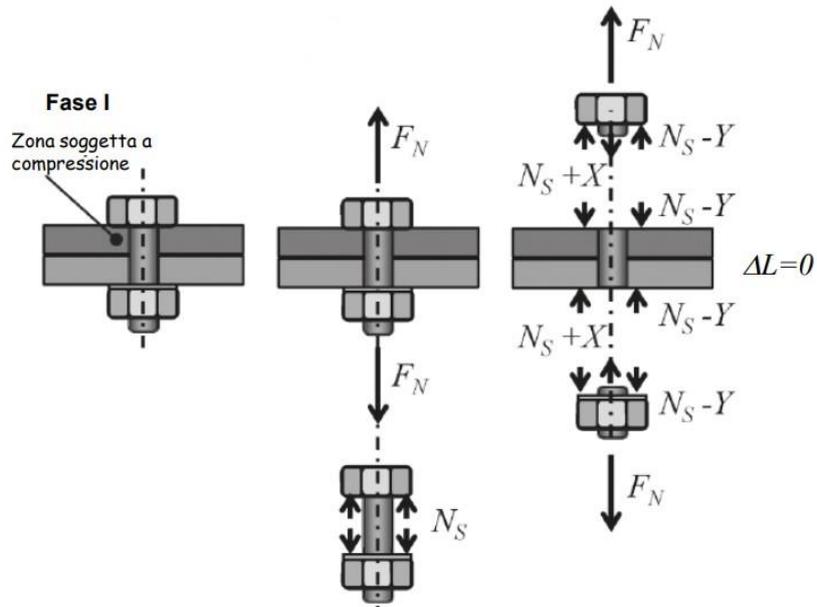


Figura 2.16: unione a trazione, fase I [3]

N_S corrisponde al valore di forza di serraggio. La forza agente sul gambo assume il valore di $N_S + X$, con $X = F_N/11$. La forza agente sulle piastre vale invece $N_S - Y$, con $Y = 10/11$.

Nella seconda fase, dopo il distacco delle piastre, all'aumentare del carico si ha una piena plasticizzazione del bullone a trazione e si arriva al collasso.

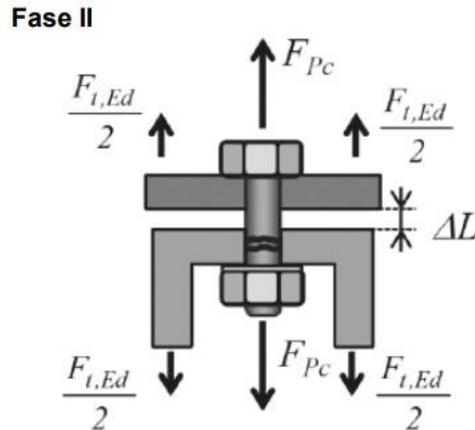


Figura 2.17: unione a trazione, fase II [3]

Le modalità di collasso per la giunzione caricata a trazione sono due:

- 1) Rottura a trazione del gambo del bullone
- 2) Rottura a punzonamento in corrispondenza della testa o del dado

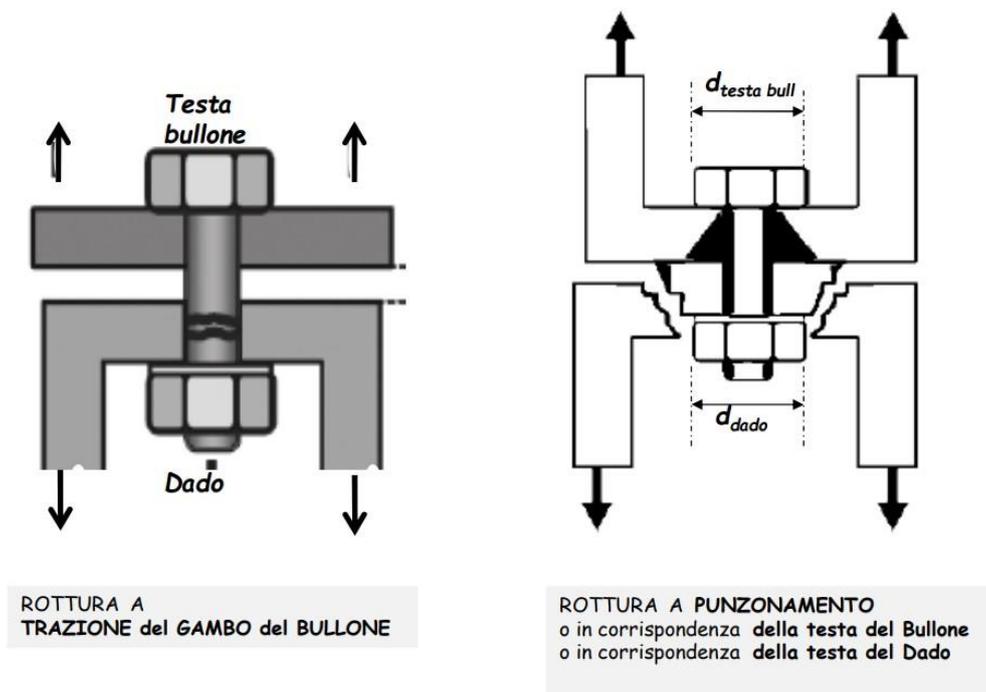


Figura 2.18: modalità di collasso a trazione [3]

Per l'unione a trazione si determinano quindi due resistenze:

$$\text{➤ } F_{t,Rd} = \frac{0.9 \cdot f_{tb} \cdot A_{res}}{\gamma_{M2}} \quad (2.12)$$

Resistenza a trazione del bullone. , f_{tb} è la tensione di rottura del gambo del bullone.

$$\text{➤ } B_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_{tk}}{\gamma_{M2}} \quad (2.13)$$

Resistenza a punzonamento. f_{tk} è la tensione di rottura della lamina, t_p il suo spessore, d_m il diametro minimo tra dado e testa del bullone.

Si assume il valore minimo tra le due resistenze per determinare la resistenza complessiva del giunto $F_{t,Ed}$. Se il materiale della flangia risulta troppo flessibile, l'azione della forzante esterna può causare la nascita di flessioni parassite. Questo è dovuto al fatto che il bullone, per seguire la deformazione della flangia, si inflette.

Si adotta dunque una formula di interazione lineare tra flessione e trazione, così definita:

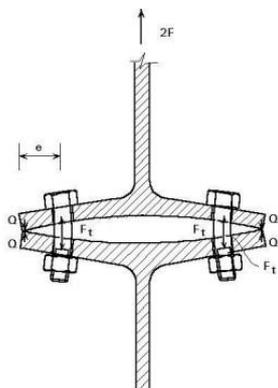


Figura 2.19: interazione trazione – flessione [2]

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1 \quad (2.14)$$

3. Modellazione dei giunti

La modellazione con gli elementi finiti di un giunto si differenzia in due categorie: *low fidelity models* e *high fidelity models*.

Quest'ultimo tipo di modello è utilizzato per analizzare sottocomponenti o quando si richiede un maggior dettaglio e vengono sfruttate le caratteristiche di non linearità dei materiali, il contatto, la frizione, ecc. In genere i modelli ad alta affidabilità sono usati per studiare l'effetto della resistenza del giunto al variare di alcune caratteristiche, come ad esempio la dimensione della testa del bullone.

Invece, per quanto riguarda il low fidelity model, il giunto viene rappresentato con un elemento 1D che sfrutta una soluzione statica di tipo lineare. Nonostante la notevole differenza nell'approccio e, a dispetto del nome, i modelli ad alta affidabilità non sempre risultano essere maggiormente accurati, in quanto sono presenti le non linearità dei materiali che introducono errori di tipo numerico.

Nel seguente capitolo si studieranno quindi i low fidelity models più comuni che vengono adoperati in ambito aerospaziale, in modo da poter applicare alcuni di questi al modello in esame.

3.1 Possibili approcci modellistici

In letteratura [4] esistono tre possibili configurazioni con le quali rappresentare un giunto, ciascuna con vantaggi e svantaggi:

1. Nodi comuni alle superfici

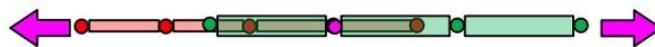


Figura 3.1: giunzione con offset [4]

In questa prima configurazione, il giunto viene modellato tramite l'utilizzo dell'offset. In questo modo, gli elementi delle due superfici risultano essere complanari ed è garantita l'unione.

Questo metodo risulta di facile applicazione, ma è necessario che le due mesh abbiano i nodi coincidenti in corrispondenza del giunto. Inoltre, nonostante possa essere valido per il carico agente sul giunto, non considera il momento che si crea dovuto alla non complanarità dei due strati nella realtà. Anche una riallocazione dei giunti comporta necessariamente dover ricreare nuove mesh con i nodi coincidenti.

2. Connessione nodo-nodo

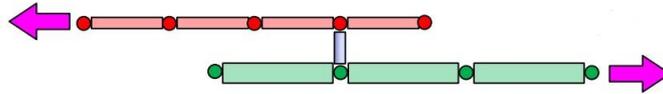


Figura 3.2: connessione nodo-nodo [4]

La configurazione mostrata in *Figura 3.2* ha il vantaggio di considerare il momento generato dall'applicazione del carico dovuto allo spessore delle lamine. Anche in questo caso, però, è necessario che le mesh siano congruenti nella posizione del giunto, in modo da poter svolgere il collegamento nodo-nodo tra le due superfici.

Questo approccio modellistico prevede due tipologie di elementi connettori:

- *Rigid Element Connectors* → si identifica la coppia di nodi da congiungere più prossima alla posizione reale del giunto e si utilizzano gli elementi RBE2 o RBAR, come mostrato nella figura sottostante.

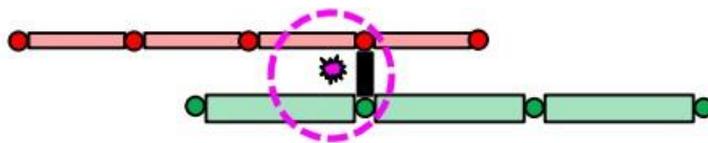


Figura 3.3: connessione con RBE2/RBAR [4]

Si ha lo svantaggio di non poter modellare la flessibilità del giunto.

- *Elastic Element Connectors* → si utilizzano gli elementi CBAR/CBEAM/CBUSH. In questo caso, è possibile creare dei modelli più accurati per simulare il giunto. Inoltre, si possono assegnare le caratteristiche di rigidità del giunto ed ottenere nei risultati delle curve load – deflection di tipo non lineare.

3. Mesh independent fastener

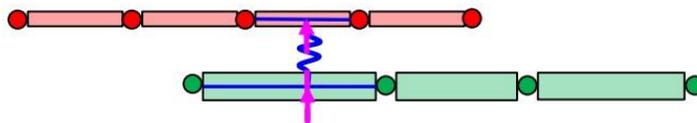


Figura 3.4: mesh independent fastener [4]

Quando non è possibile creare due mesh congruenti per via della geometria del modello, si usa l'approccio *mesh independent fastener*. Gli elementi che consentono di unire due superfici sfruttando il singolo elemento della mesh sono:

CWELD/CFAST, CSEAM, Glued Contact (Rigid o flexible).

Tra i principali vantaggi di questo metodo abbiamo la semplicità di applicazione, la possibilità di definire una tolleranza per la posizione del giunto e l'output dei risultati delle forze che si riferisce direttamente all'elemento della mesh. Di contro, il metodo non si applica per i *bearing loads* e per lo studio del *fastener slope*.

3.2 Metodi tradizionali adottati in ambito industriale

Nel seguente paragrafo vengono mostrati degli esempi applicativi dei metodi modellistici visti precedentemente. Tali soluzioni sono quelle più comuni utilizzate in ambito aerospaziale, in cui spesso vengono combinati tra loro due o più metodi.

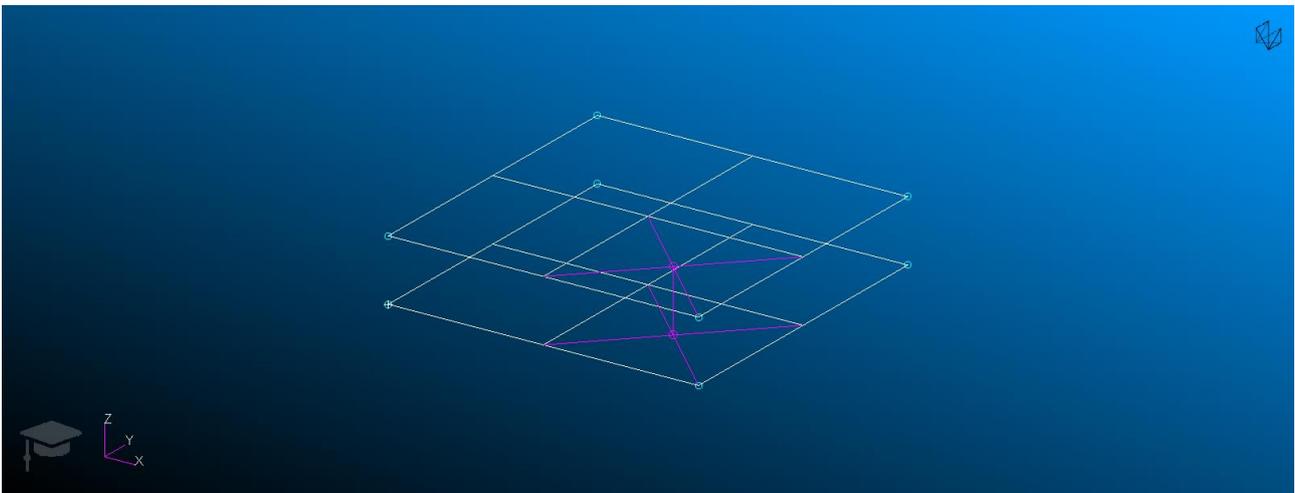


Figura 3.5: collegamento CBAR con RBE

La prima soluzione adottata è anche quella più semplice, che prevede di collegare le due superfici tramite un elemento CBAR collegato a sua volta ai vertici di un elemento finito con degli RBE¹.

Tale soluzione è applicabile nel caso in cui la presenza del foro è trascurabile rispetto alle dimensioni del modello. Nel caso contrario, si introduce la presenza del foro e si modella un CBAR collegandolo con gli RBE alla circonferenza, come mostrato in *Figura 3.6*:

¹ Gli RBE_s, Rigid Body Elements, sono elementi rigidi di due tipi: RBE2 e RBE3. Gli RBE2 consentono di legare i gradi di libertà di un nodo *master* con quelli di più nodi *slaves*. Gli RBE3, invece, presentano al contrario un solo nodo *slave*, connesso a più nodi *master*.

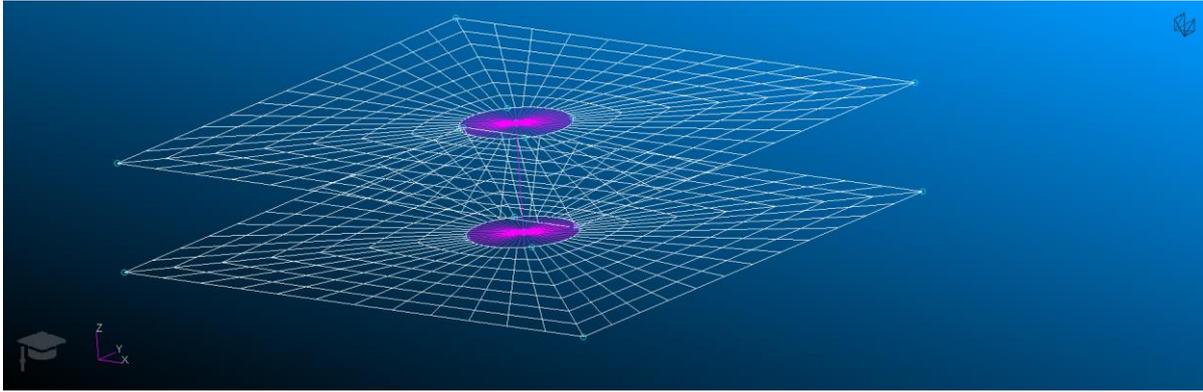


Figura 3.6: CBAR con foro

Infine, una soluzione molto usata in ambito industriale è l'elemento solido HEXA8, collegato alle piastre con gli RBE.

In questa configurazione, la lunghezza del lato dell'elemento solido viene ricavata dallo spessore delle due piastre (t_1 e t_2), in particolare risulta essere pari a $(t_1 + t_2)/2$.

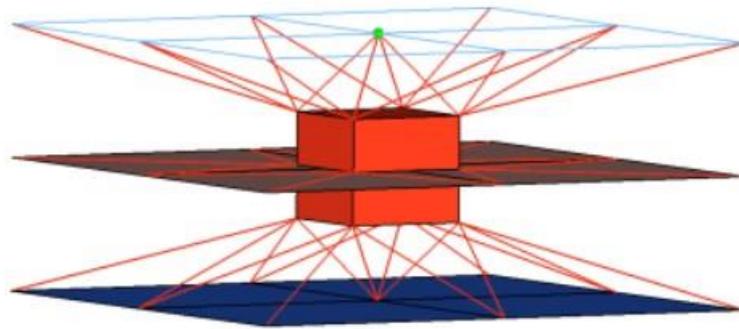


Figura 3.7: Hexa8 con RBE [21]

Un altro modo molto pratico per definire dei giunti è l'utilizzo dei CFAST. Infatti, tramite questo apposito comando, si può definire la posizione del giunto, il suo diametro e le mesh da collegare, che possono anche non essere corrispondenti. Si riporta in *Figura 3.8* un esempio:

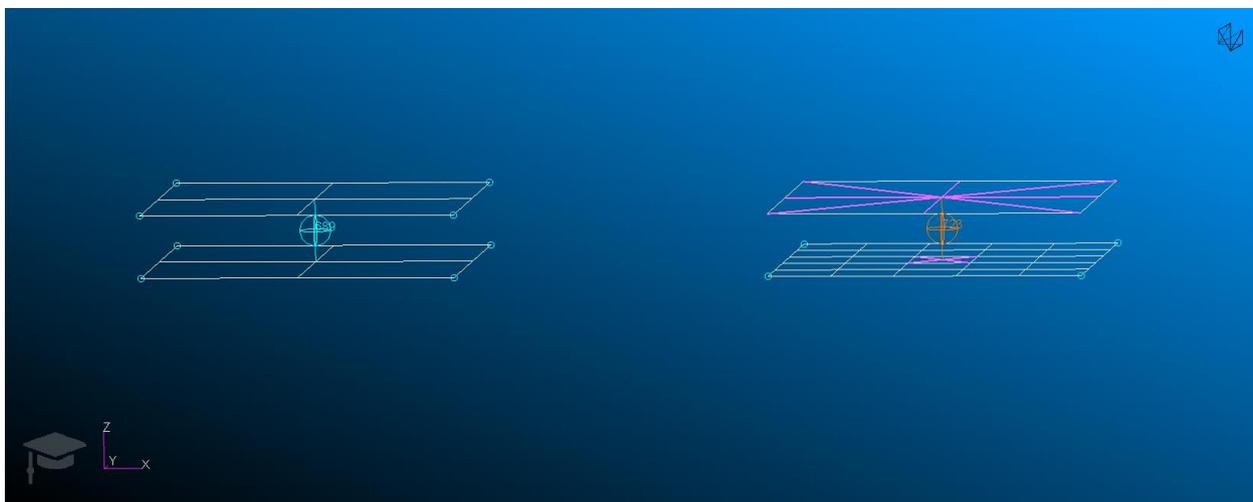


Figura 3.8: CFAST

Come è possibile vedere, il programma riesce in tutti i casi a creare un collegamento tra le due superfici, sfruttando le funzioni di forma di uno o più elementi finiti. È però cura dell'utente inserire i corretti valori di rigidità che avrà il giunto.

Nei casi in cui si abbiano geometrie molto complesse, anche l'utilizzo dei CFAST potrebbe risultare poco pratico. Si può optare, quindi, per una giunzione incollata. Anche se idealmente non rappresenta una giunzione bullonata, spesso si utilizza per assemblare in modo rapido diversi componenti tra loro. La rigidità verrà assegnata direttamente dal software (nel caso *rigid*) ed è in questo modo possibile svolgere delle prime analisi senza dover necessariamente creare un modello molto complesso.

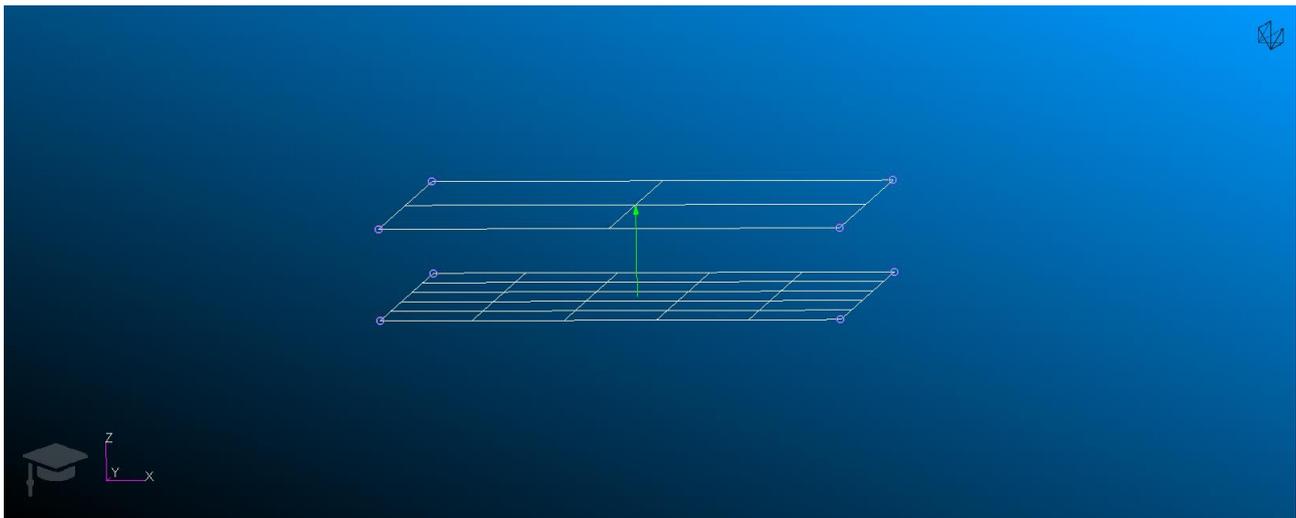


Figura 3.9: incollaggio

In *Figura 3.9* si può vedere il collegamento tramite incollaggio (rappresentato dalla freccia verde) tra le due superfici. Le due mesh possono essere anche di dimensione diversa.

3.3 Multi-spring model di Rutman

In letteratura [6] uno dei metodi più conosciuti per la modellazione del giunto è il Multi-spring model di Rutman. Il grande vantaggio di questo metodo è il poter unire diversi strati con un unico giunto. Inoltre, può essere utilizzato sia per materiali metallici che per materiali in composito, utilizzando elementi 2D o 3D a seconda delle necessità. Nel seguito viene proposta una breve trattazione del metodo per il caso di lamine metalliche modellate con elementi 2D.

Il metodo multi-spring di Rutman è un *low fidelity model* in quanto, seguendo le pratiche comuni dell'industria aerospaziale, non considera la frizione tra le parti giuntate ed il precarico del giunto. Inoltre, come vedremo in seguito nel dettaglio, utilizza elementi 1D.

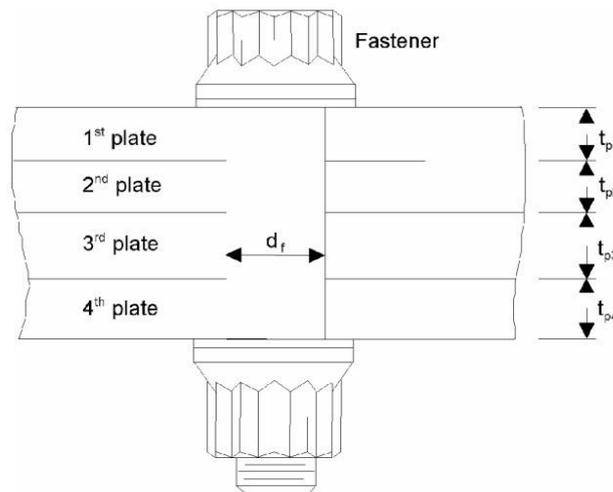


Figura 3.10: giunto con n-strati [6]

Innanzitutto, il bullone presenta sei componenti di rigidità:

- *Translational Plate Bearing Stiffness*
- *Translational Fastener Bearing Stiffness*
- *Rotational Plate Bearing Stiffness*
- *Rotational Fastener Bearing Stiffness*
- *Fastener Shear Stiffness*
- *Fastener Bending Stiffness*

Quando si applica un carico, le piastre tendono a scorrere una sull'altra, causando una deformazione del giunto. Si definisce quindi una *translational bearing flexibility* dell'*i*-esima piastra:

$$C_{btp_i} = \frac{1}{E_{cp_i} * t_{p_i}} \quad (3.1)$$

Dove E_{cp_i} è il modulo di Young a compressione dell'*i*-esima piastra, mentre t_{p_i} il suo spessore.

Allo stesso modo, per l'elemento di fissaggio, vale la seguente relazione:

$$C_{btf_i} = \frac{1}{E_{cf} * t_{p_i}} \quad (3.2)$$

Con E_{cf} modulo di Young a compressione del fastener. Si definisce infine una rigidità che è una combinazione della *translational plate bearing stiffness* e della *translational fastener bearing stiffness*:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{bt_i} = C_{btp_i} + C_{btf_i} \\ S_{bt_i} = \frac{1}{C_{bt_i}} \end{array} \right\} \quad (3.3)$$

La rotazione relativa tra la piastra ed il giunto crea un momento torcente, come mostrato di seguito in *Figura 3.11*:

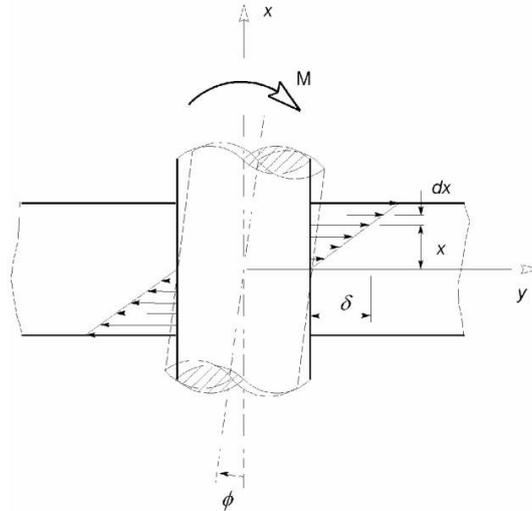


Figura 3.11: momento torcente nel giunto [6]

Si assume una deformazione di tipo lineare causata dal momento M, distribuita lungo lo spessore:

$$\delta = x\phi \quad (3.4)$$

La rigidezza di uno strato dx della piastra dipende dal modulo di Young a compressione:

$$dS_{bt_{p_i}} = E_{cp_i} dx \quad (3.5)$$

Se si applica un carico dF a distanza x, questo genererà un momento dM definito nel seguente modo:

$$dM = xdF = x * \delta dS_{bt_{p_i}} = E_{cp_i} \phi x^2 dx \quad (3.6)$$

Da cui passando alla formulazione integrale si ottiene:

$$M = E_{cp_i} \phi \int_{-\frac{t_{p_i}}{2}}^{\frac{t_{p_i}}{2}} x^2 dx = E_{cp_i} \phi \frac{t_{p_i}^3}{12} \quad (3.7)$$

In modo analogo a quanto visto per la rigidezza traslazionale, si definiscono le flessibilità rotazionali del giunto e della piastra, per poi definire una rigidezza rotazionale combinata:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{br_{p_i}} = \frac{\phi}{M} = \frac{12}{E_{cp_i} t_{p_i}^3} \\ C_{br_{f_i}} = \frac{12}{E_{cf} t_{p_i}^3} \end{array} \right\} \quad \text{da cui } C_{br_i} = C_{rp_i} + C_{br_{f_i}} \quad (3.8)$$

$$\text{Infine, } S_{br_i} = \frac{1}{C_{br_i}}. \quad (3.9)$$

Nella formulazione agli elementi finiti, le rigidezze viste finora (*bearing stiffness*) saranno rappresentate da elementi elastici (*bush*).

Rimangono da analizzare le ultime due rigidezze, la *shear stiffness* e la *bending stiffness* del giunto, che verranno rappresentate con degli elementi rigidi (*beam*).

Il giunto viene dunque modellato tramite elementi CBAR/CBEAM² e CBUSH³.

In *Figura 3.12* si riporta il modello descritto:

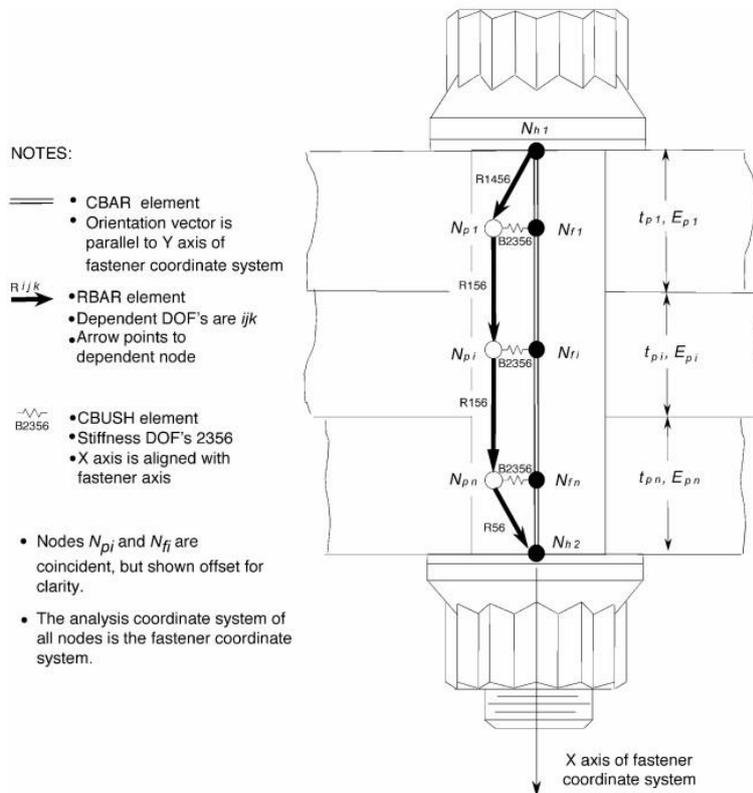


Figura 3.12: modello multi-spring [6]

Ad ogni CBAR/CBEAM corrisponde il relativo PBAR/PBEAM, nei quali vengono inseriti i seguenti parametri:

$$\text{➤ Area del giunto} \rightarrow A = \frac{\pi d_f^2}{4} \quad (3.10)$$

$$\text{➤ Costante torsionale } J \rightarrow J = \frac{\pi d_f^4}{32} \quad (3.11)$$

$$\text{➤ Momenti di inerzia } I_1 \text{ e } I_2 \rightarrow I_1 = I_2 = \frac{\pi d_f^4}{64} \quad (3.12)$$

$$\text{➤ Costanti } K_1 \text{ e } K_2 \text{ (area factors for shear)} \rightarrow K_1 = K_2 = 0.9 \text{ per sezione circolare} \quad (3.13)$$

L'interazione tra giunto e piastra, ovvero le rigidzze di *bearing*, sono modellate invece con gli elementi CBUSH. In particolare, come mostrato in *Figura 3.12*, per ogni strato viene creata una coppia di nodi coincidenti, uniti tra loro con un CBUSH. Si inseriscono quindi nella relativa card PBUSH le rigidzze precedentemente calcolate. Alternativamente ai CBUSH, si possono usare anche gli elementi CELAS2⁴.

² CBAR: rappresenta un elemento trave semplice.

CBEAM: rappresenta un elemento trave.

³ CBUSH: rappresenta un sistema molla-smorzatore.

⁴ CELAS2: rappresenta un elemento molla.

Il *fastener joint model* di Rutman assume le seguenti ipotesi:

- 1) Gli strati sono incompressibili in direzione perpendicolare al piano medio
- 2) I piani medi degli strati rimangono paralleli tra loro dopo che il carico è stato applicato
- 3) Il piano adiacente alla testa del bullone rimane parallelo ai piani medi anche dopo l'applicazione del carico.

Per far rispettare tali ipotesi, nel modello vengono introdotti anche gli elementi RBAR, che garantiscono la congruenza degli spostamenti tra giunto e piastre.

In *Figura 3.13* si riporta un esempio di un'applicazione del modello descritto:

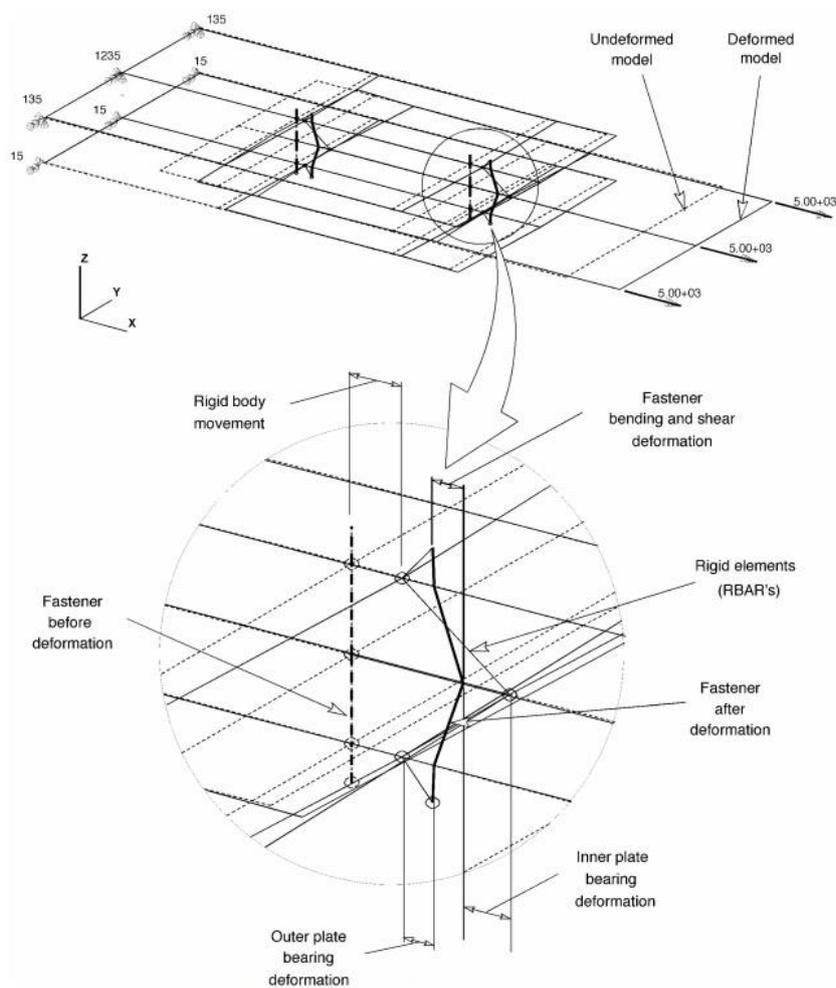


Figura 3.13: esempio modello di Rutman [6]

Come è possibile vedere, l'applicazione di un carico trasversale comporta uno scorrimento a taglio tra gli strati che va a deformare il giunto e gli strati. Questo modello è quindi molto utile per applicazioni in cui si studia il fenomeno della delaminazione tra strati giuntati.

Il modello di Rutman è molto completo ed è in grado di rappresentare in modo esaustivo le caratteristiche di un bullone/rivetto. Però è di difficile applicazione se il numero di giunti è notevole. Inoltre, le mesh dei vari strati devono necessariamente essere congruenti.

3.4 Soluzioni scelte

Il modello che andremo a studiare presenta un gran numero di bulloni; pertanto, le prime soluzioni in cui vengono utilizzati gli RBE oppure modellati i fori ed uniti tramite CBAR risultano essere particolarmente complesse. Si è optato quindi per i CFAST, dato che i bulloni risultano essere allineati e distanziati allo stesso modo, disposti su una o più file.

Un altro metodo molto valido è l'incollaggio, che consente di assemblare in modo rapido diversi componenti di un modello. Tale soluzione viene consigliata da *MSC Softwares* per avere dei risultati affidabili senza dover necessariamente modellare ogni singolo bullone, risparmiando molto tempo.

Inoltre, per il nostro studio, avere due modelli numerici differenti risulta particolarmente utile per poter svolgere un confronto e verificare se vi sono delle discrepanze tra i due *low fidelity models* scelti. Nei seguenti paragrafi verranno quindi approfonditi tali soluzioni nel dettaglio.

3.5 Elementi CFAST

Gli elementi CFAST fanno parte del pacchetto *MSC Connectors* di Patran [9]. In particolare, sono usati per creare un collegamento di tipo flessibile tra due superfici shell. Il vantaggio del CFAST, rispetto ad altri elementi connettori, è dato dalla possibilità di poter utilizzare l'approccio modellistico di tipo *mesh independent fastener* (vedi Figura 3.4). Inoltre, possono essere collegate anche superfici che non sono parallele tra loro, come mostrato in Figura 3.14:

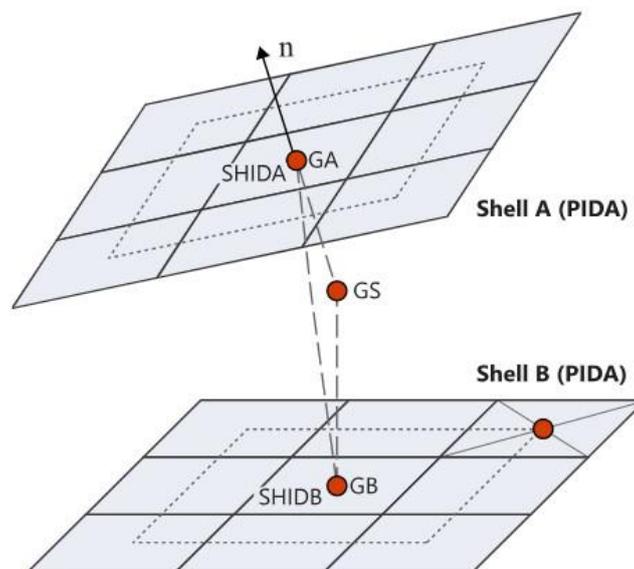


Figura 3.14: collegamento CFAST [7]

Per creare il collegamento vengono definiti due punti, GA e GB, che sono complanari alle due superfici. In alternativa, si può definire un punto GS posizionato tra le due superfici. In questo caso i punti GA e GB verranno individuati dal software in seguito alla proiezione di GS, rispettivamente sulle superfici A e B. Poi, si definisce il diametro del giunto e viene creato il vero e proprio collegamento.

In particolare, per ogni connessione, vengono creati 4 punti ausiliari GHA_i e GHB_i, per ciascuna superficie. La posizione di tali punti, nel caso di QUAD4, viene determinata come segue:

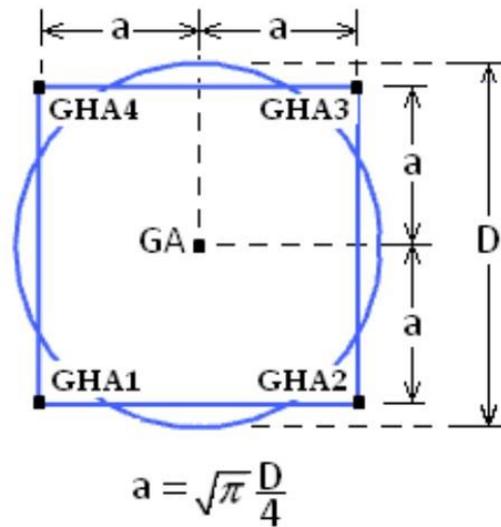


Figura 3.15: punti ausiliari [8]

C'è però un limite alla dimensione massima del diametro, la quale dipende dalla dimensione della mesh. Infatti, se il diametro supera l'area 3x3 costituita dagli elementi finiti, non è possibile creare alcun collegamento (vedi Figura 3.14).

Gli elementi finiti delle superfici possono essere individuati con due modalità:

- *Patch to patch*: si selezionano manualmente gli elementi finiti delle due superfici in corrispondenza di GA e GB.
- *Prop to prop*: si definisce il collegamento mediante le proprietà delle superfici. Si può usare se le due superfici sono state definite con proprietà diverse a cui sono associati gli elementi finiti. Il software, quindi, unirà gli elementi finiti più prossimi ai punti GA e GB.

Infine, si assegnano le proprietà di rigidità traslazionale K_{Ti} e rotazionale K_{Ri} nelle tre direzioni del sistema MCID⁵. Con le proprietà di rigidità, tipiche di una molla, nel momento in cui il comando viene eseguito, il software crea un elemento CBUSH di tipo 1D, il quale è collegato ai punti ausiliari GA_i e GB_i degli elementi finiti. Quest'ultimi si trovano all'interno di un elemento finito e, quindi, i loro gradi di libertà dipendono dalle funzioni di forma dell'elemento.

In Figura 3.16 viene riportato un esempio di quanto descritto:

⁵ Sistema di riferimento *Material Coordinate ID*

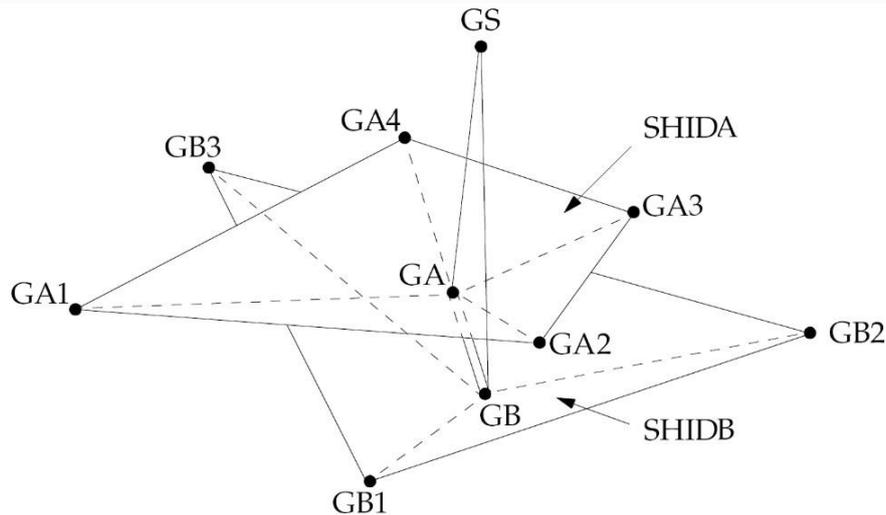


Figura 3.16: connessione QUAD4 – TRIA3 [8]

Per quanto riguarda le rigidzze da assegnare, possono essere utilizzate le seguenti formule, che valgono nell'ipotesi di trave corta e tozza in cui prevale la forza di taglio [9]:

$$K_{T_1} = \frac{EA}{L} \quad K_{T_2} = \frac{G_2 A_s}{L} \quad K_{T_3} = \frac{G_3 A_s}{L} \quad (3.14)$$

$$K_{R_1} = \frac{GJ}{L} \quad K_{R_2} = \frac{EI}{L} + \frac{G_2 A_s L}{3} \quad K_{R_3} = \frac{EI}{L} + \frac{G_3 A_s L}{3} \quad (3.15)$$

dove

- E, G₁, G₂, G sono le proprietà meccaniche del giunto (modulo di Young e moduli di taglio).
- A è la sezione circolare.
- L è la distanza tra GA e GB.
- A_s è data dalla relazione $A_s = \frac{3}{4}A$.
- I è il momento d'inerzia di una sezione circolare piena, dato da $I = \frac{\pi D^4}{64}$.
- J è il momento d'inerzia torsionale di una sezione circolare piena dato da $J = \frac{\pi D^4}{32}$.

I valori vengono calcolati manualmente ed inseriti nell'apposita scheda delle proprietà del CFAST.

In alternativa, si possono usare le formule predefinite presenti nel software. Così facendo, è sufficiente definire il modulo di Young del bullone e selezionare una delle formule presenti nel software [10]:

- Douglas
- Huth Hi-Lok in CFRP⁶
- Huth Hi-Lok in metal
- Huth solid rivet

⁶ Carbon Fiber Reinforced Polymers

La rigidità assiale, per ogni formula selezionata, viene calcolata allo stesso modo:

$$K_{T_1} = \frac{\frac{1}{4}E_f\pi d^2}{L} \quad (3.16)$$

- E_f : modulo di Young del giunto
- d : diametro
- L : somma degli spessori delle due superfici connesse

Le rigidità trasversali, invece, sono definite come segue:

$$K_{T_2} = K_{T_3} = \frac{1}{c} \quad (3.17)$$

Il parametro “ c ” ha due varianti, che dipendono dalla scelta di una delle formule di Huth oppure della formula di Douglas:

$$c_{Douglas} = \frac{a}{dE_f} + b \left(\frac{1}{t_1E_1} + \frac{1}{t_2E_2} \right) \quad (3.18)$$

$$c_{Huth} = \left(\frac{t_1+t_2}{2d} \right)^a \frac{b}{n} \left(\frac{1}{t_1E_1} + \frac{1}{nE_2t_2} + \frac{1}{2t_1E_f} + \frac{1}{2nE_ft_2} \right) \quad (3.19)$$

dove:

	a	b
Rivetti in Alluminio (Douglas)	5.0	0.8
Bulloni in Acciaio (Douglas)	1.67	0.86
Hi – Lock in CFRP (Huth)	0.6667	4.2
Hi – Lock in metallo (Huth)	0.6667	3.0
Rivetto solido (Huth)	0.4	2.2

Tabella 3.1: parametri formule rigidità [10]

Il valore di n vale 1, oppure 2, se si considera, rispettivamente, l'ipotesi di *single shear* o *double shear*.

Le rigidità rotazionali vengono lasciate dal software con valore di default nullo, in quanto è presente un accoppiamento tra i gradi di libertà traslazionali e rotazionali.

Infine, per il caso statico, l'elemento CFAST si comporta come una molla e segue la seguente equazione:

$$\{f_e\} = [K_e]\{u_e\} \quad (3.20)$$

dove $[K_e]$ è la matrice di rigidità 6×6 e $\{u_e\}$ il vettore degli spostamenti relativi tra GA e GB,

$$\{u_e\} = \{u_b\} - \{u_a\}. \quad (3.21)$$

3.6 Connessione con incollaggio

Come riportato nella guida di Patran [10], si possono definire diversi tipi di contatto tra due corpi:

- **General Contact** → durante una simulazione, due corpi possono entrare in contatto in qualsiasi punto e avere uno scorrimento relativo tra loro, con o senza attrito. È previsto anche che possano separarsi nuovamente. L'unico vincolo riguarda la non possibilità dei corpi di compenetrarsi tra loro. Il contatto generico si può applicare per i casi SOL 101, SOL 400, SOL 600 o SOL 700. Per poter applicare correttamente il contatto nel caso statico, bisogna rispettare le ipotesi di piccoli spostamenti e deformazioni, rimanendo nel campo della linearità.
- **Glued Contact** → i due corpi possono entrare in contatto tra loro durante la simulazione e, in seguito, separarsi nuovamente. La differenza rispetto al caso precedente riguarda lo scorrimento relativo durante il contatto, che con il glued contact è impedito. In pratica è come se fosse presente un coefficiente d'attrito infinito. I corpi possono però separarsi se vengono superati dei valori di forza o stress impostati nei criteri di *Breaking Glue*.
- **Permanently Glued Contact** → in questo contatto, la configurazione iniziale viene utilizzata per definire i vincoli. I nodi o segmenti inizialmente in contatto rimarranno in tale condizione per tutta la simulazione. Se durante la simulazione alcune parti vengono in contatto tra loro non si avrà alcun tipo di contatto ed i corpi si compenetreranno. Il contatto permanente si può utilizzare per connettere due mesh di dimensione diversa ed è molto utile nell'assemblaggio di un modello complesso costituito da diversi sottocomponenti. Si può applicare il contatto permanente per le SOL 101, 103, 105, 107, 108, 109, 110, 111, 112, SOL 200 e SOL 400. L'unico vincolo di non applicabilità riguarda il caso di grandi rotazioni.
- **Step Glued Contact** → si può usare solo con la SOL 400. È simile al *Glued Contact*, con alcune differenze. All'inizio di ciascuno step della simulazione, viene verificato quali parti dei due corpi sono in contatto tra loro e viene applicato un *Permanently Glued Contact*. I nodi o segmenti che risultano in contatto, rimangono in tale condizione fino al termine dello step. Se durante uno step alcune parti vengono in contatto tra loro, sarà applicato un *Glued Contact*. Questo tipo di contatto viene utilizzato per grandi spostamenti e deformazioni.

Per poter definire il contatto desiderato, è necessario creare per ogni componente del modello un *Deformable Body* oppure un *Rigid Body*.

Quest'ultimo può essere modellato semplicemente con la geometria, senza necessità degli elementi finiti, in quanto, essendo un corpo rigido, manterrà costante la sua forma, qualsiasi sia il carico applicato. Il movimento del *Rigid Body* può essere controllato con tre metodi:

1. *Velocity controlled*

$$v_a = v_{CGID} + \omega R * r \quad (3.22)$$

2. *Position controlled*

3. *Load Controlled*

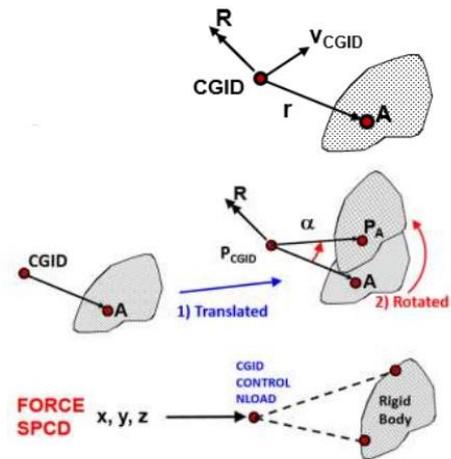


Figura 3.17: rigid body [4]

Il *Deformable Body* si modella, invece, tramite gli elementi finiti e può modificare la propria forma durante una simulazione.

Una volta definiti i corpi presenti nel modello, si può procedere alla creazione del contatto. Esistono due modalità con cui si può procedere:

1. **Contact table method** → è il primo metodo che è stato implementato e consiste nel compilare una tabella. In particolare, prima di procedere all'analisi, nella sezione *Subcase Parameters*, si compila una tabella in cui sono presenti tutti i componenti del modello e si specifica il tipo di contatto. In *Tabella 3.2* viene riportato un esempio:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1:D: A_Layer	G			G				G			
2:D: Clips					T		G				
3:D: Filler_Layer									G	G	
4:D: InSitu_Layer				G				G	G		
5:D: PY						T				G	
6:D: Pad							G			G	
7:D: Rail											T
8:D: SB_Layer									G		
9:D: SSB_Layer										T	
10:D: Sleeper											
11:R: Wheel							T				

Tabella 3.2: Contact Table [11]

2. **Contact Pairs method** → tale metodo consente di creare un accoppiamento tra i diversi componenti, specificando il tipo di interazione. Si può procedere alla creazione degli accoppiamenti manualmente o in modo automatico. In quest'ultimo caso, l'accoppiamento

potrà essere creato tra componenti con diverse proprietà e risulta utile per modelli estremamente complessi.

I due metodi presentati sono del tutto equivalenti. Solitamente, per modelli semplici, è più rapido utilizzare la *Contact Table*, mentre per modelli più complessi si adopera il metodo *Contact Pairs*.

Andremo ora ad analizzare più nel dettaglio come il software riesce a creare il contatto. Esistono due modalità, *Node to Segment* e *Segment to Segment*.

Con la prima modalità, l'utente individua i due componenti da accoppiare, utilizzando uno dei metodi precedentemente descritti. Successivamente, è necessario definire una superficie *master* ed una di tipo *slave*. Quest'ultima corrisponde alla superficie con la mesh più fine tra le due.

In questo modo, vengono identificati i nodi della superficie *slave*, i quali vengono associati alla superficie *master* tramite dei *Constraints*, creando l'accoppiamento, come mostrato in *Figura 3.18*:

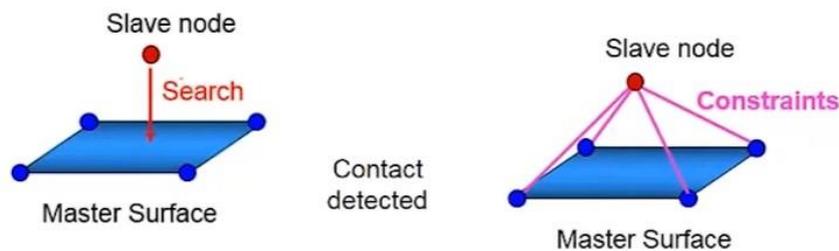


Figura 3.18: node to segment [12]

I nodi delle due superfici hanno una certa distanza tra loro, ma il contatto viene ugualmente creato in quanto è stata impostata una zona di contatto nell'intorno della superficie *master*:

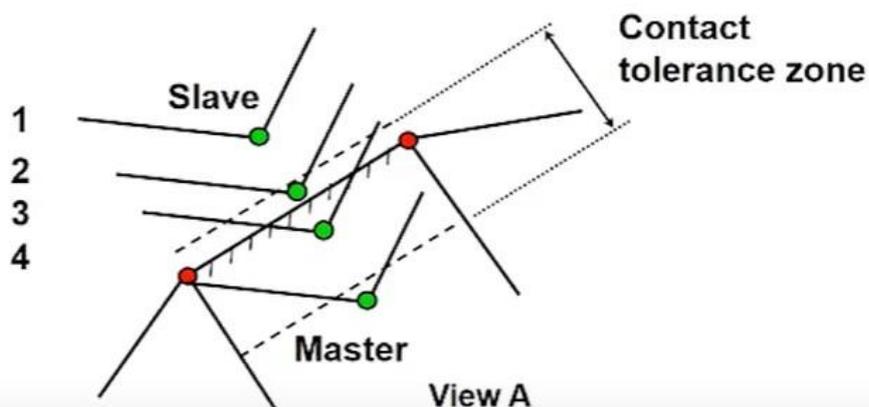


Figura 3.19: contact tolerance zone [12]

Se i nodi *slave* rientrano all'interno della zona di tolleranza, il contatto verrà creato correttamente. In caso contrario, non ci sarà alcun accoppiamento tra le due superfici e sarà necessario rientrare nei casi 2 e 3 della *Figura 3.19*.

Invece, selezionando il contatto con la modalità *Segment to Segment*, il funzionamento è differente e non è necessario selezionare una superficie *slave* ed una *master*. Infatti, il contatto sarà creato

con un accoppiamento tra i segmenti della superficie primaria e della superficie secondaria, come mostrato in *Figura 3.20*:

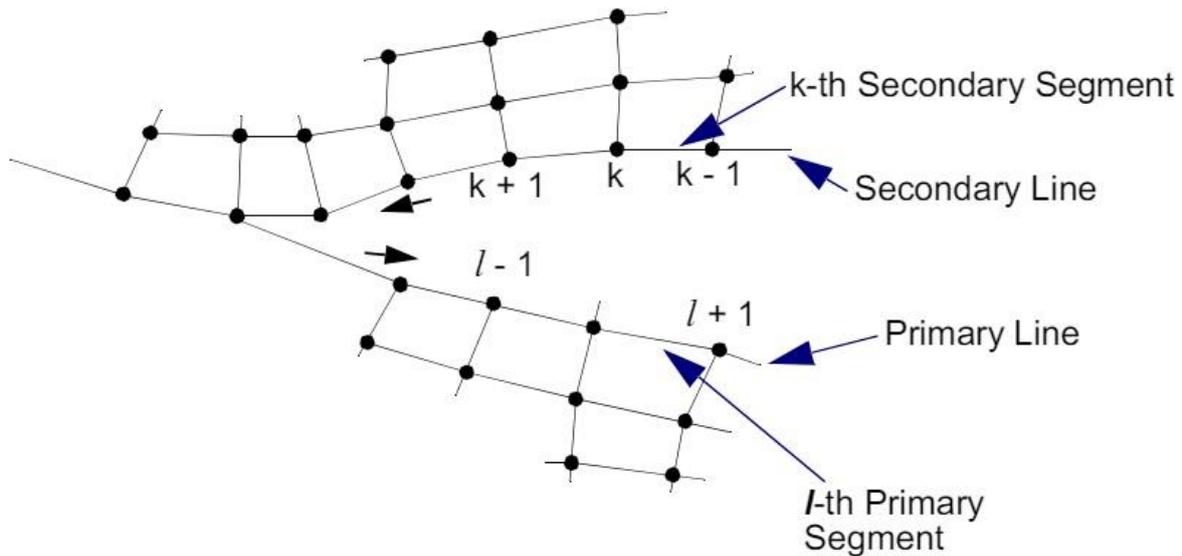


Figura 3.20: segment to segment [9]

L'individuazione dei segmenti primari e dei secondari viene svolta in modo automatico dal software.

In particolare, per ogni segmento della superficie primaria verranno creati dei nodi ausiliari, i quali, se rientrano nel range di tolleranza del contatto, saranno proiettati sul segmento della seconda superficie. In questo modo, verranno create delle linee poligonali (caso 2D) che corrispondono alla zona di contatto.

Si riporta in *Figura 3.21* quanto descritto:

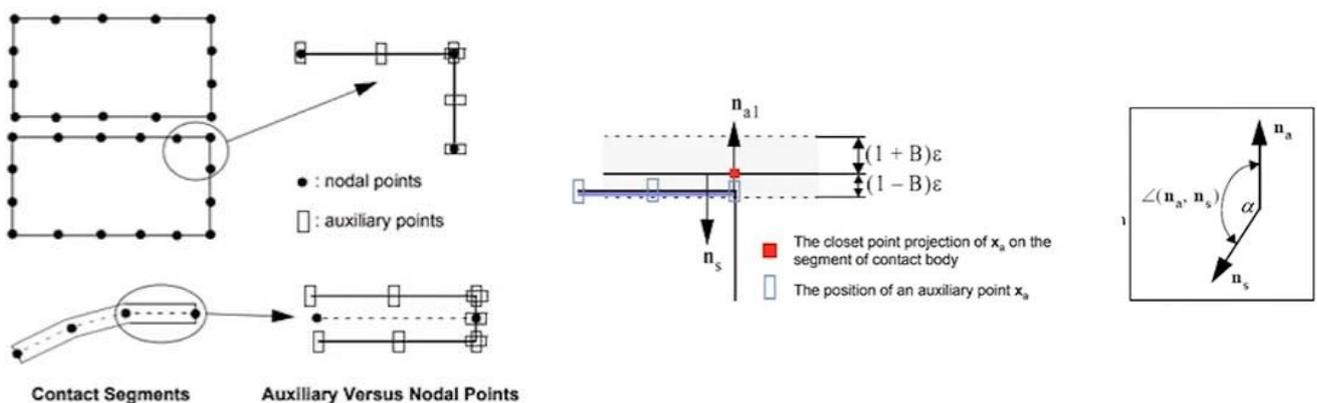


Figura 3.21: contatto segment to segment [12]

Questa modalità è applicabile per ogni tipologia di contatto e presenta un'accuratezza maggiore per quanto riguarda la continuità degli stress.

In *Figura 3.22* è riportato un confronto numerico tra le due modalità di contatto:

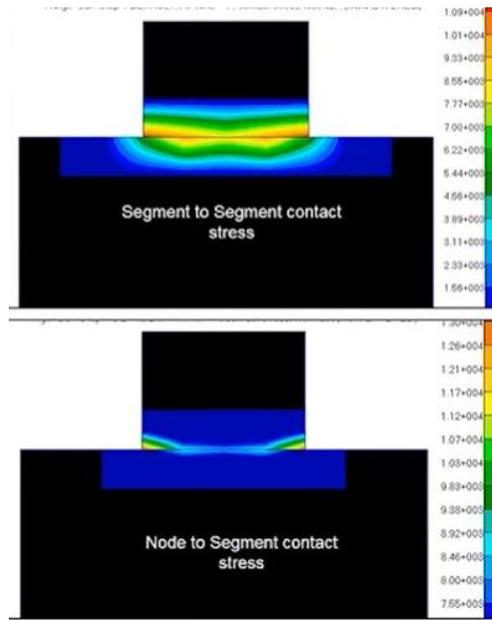


Figura 3.22: confronto tra modalità di contatto [12]

4. Creazione del modello FEM

Dopo aver analizzato nel capitolo precedente diversi *low fidelity models* possibili per simulare la giunzione bullonata, sono emerse due soluzioni applicabili al modello in esame.

La prima soluzione prevede l'utilizzo degli elementi CFAST, con i quali possono essere modellati tutti i bulloni. La seconda scelta è ricaduta sul *Permanently Glued Contact*, grazie al quale si possono assemblare in modo decisamente più rapido i correnti al pannello.

La scelta di queste due metodologie risulta particolarmente adatta al modello in esame, dato l'elevato numero di bulloni presenti, e consente, inoltre, di poter svolgere un confronto tra i due modelli numerici.

In questo capitolo si procederà mostrando le principali fasi nella creazione del modello FEM, in cui sono stati applicati i metodi sopra menzionati, ed i risultati finali ottenuti.

4.1 Geometria

Di seguito verranno mostrate le caratteristiche dimensionali del pannello e dei correnti:

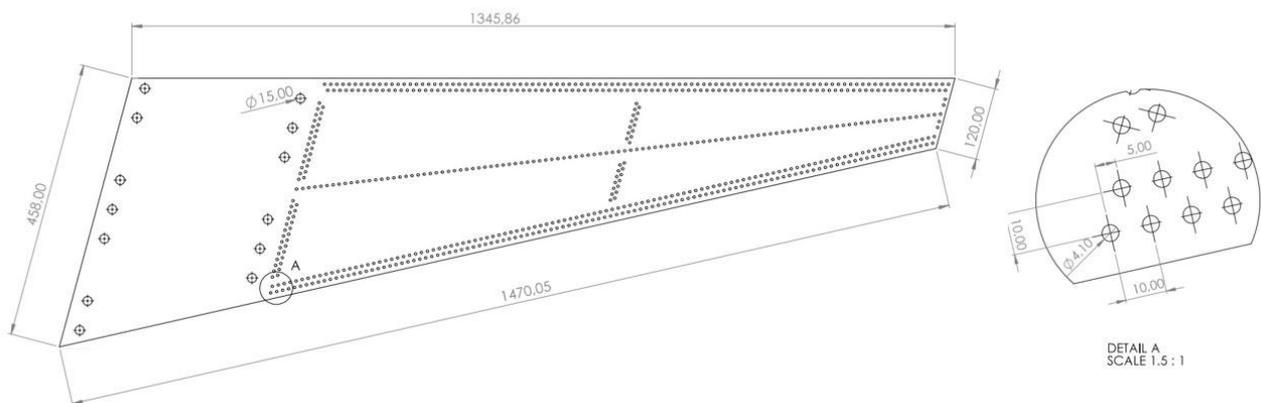


Figura 4.1: pannello (dimensioni in mm) [1]

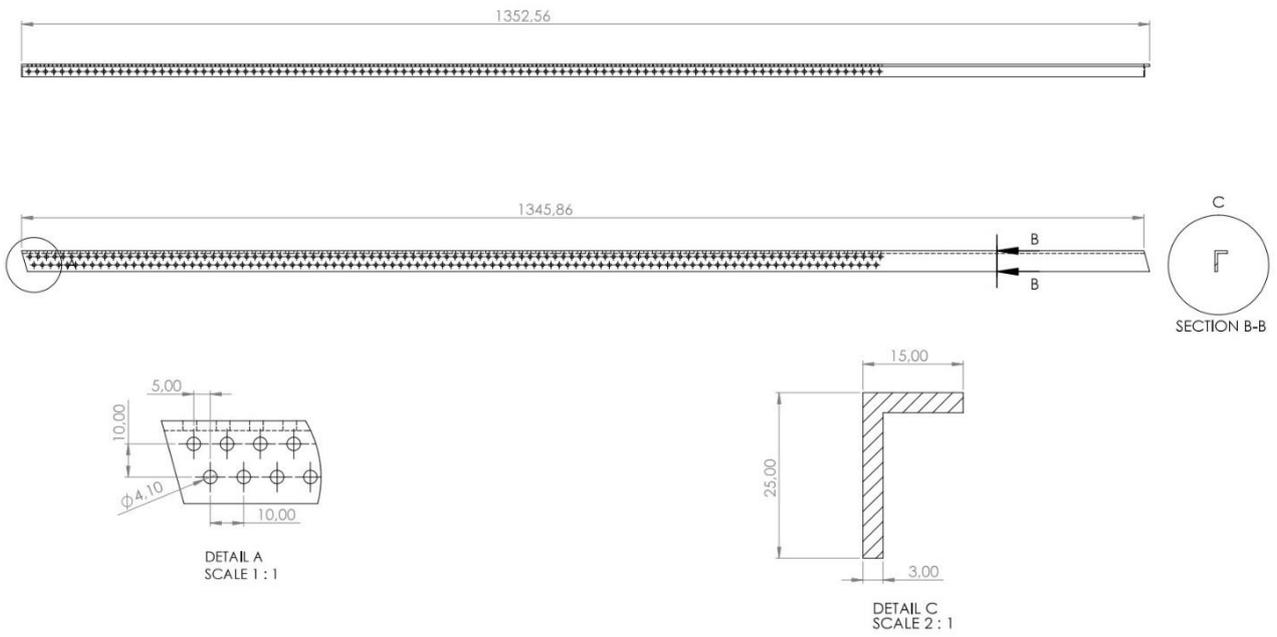


Figura 4.2: corrente angolare superiore [1]

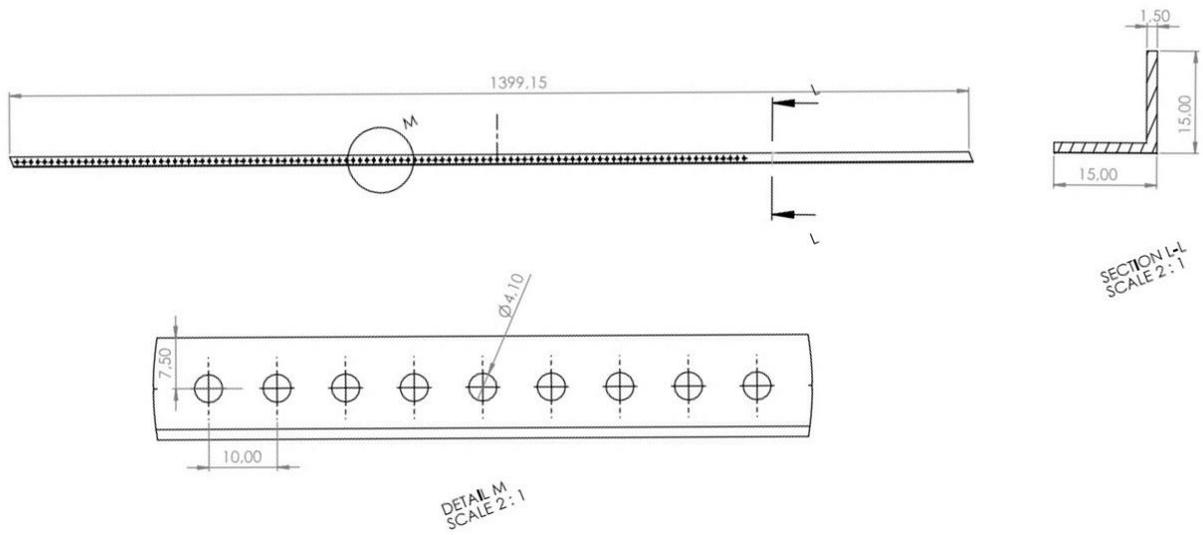


Figura 4.3: corrente centrale [1]

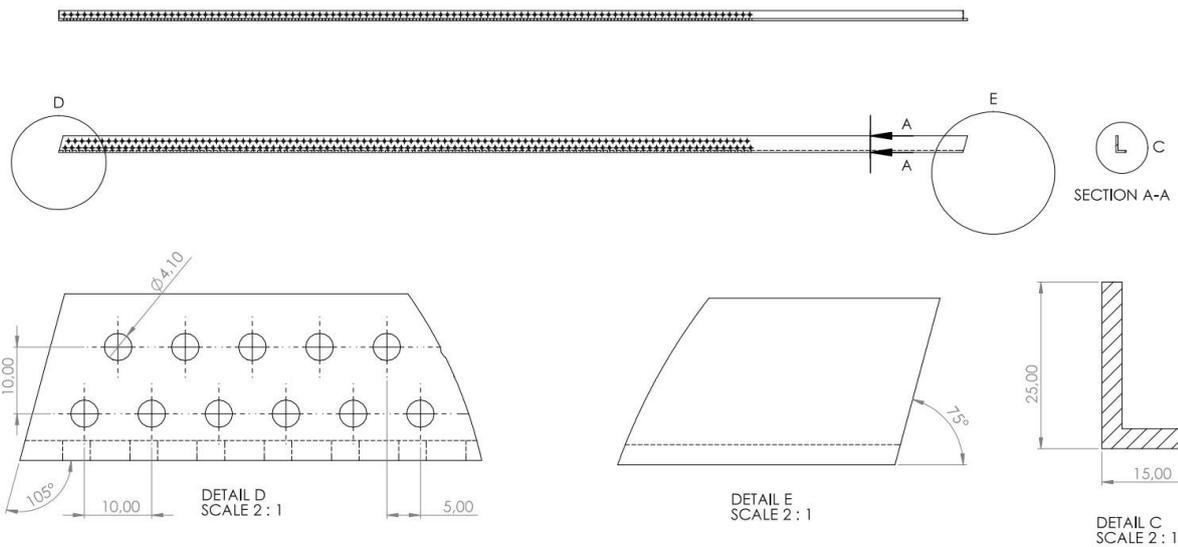


Figura 4.4: corrente inferiore [1]

Si è proceduto quindi alla creazione del modello FEM. Inizialmente si era pensato di non modellare tutti i fori, ma, durante la fase di smontaggio per ottenere il modello fisico del pannello irrigidito, ci si è resi conto che il materiale “mancante” era molto. Per quanto riguarda il pannello, sono dunque stati modellati tutti i fori, ad eccezione di quelli al tip. Infatti, la loro presenza avrebbe causato una distorsione eccessiva della mesh, senza apportare notevoli vantaggi per i risultati.

Per quanto riguarda la regione compresa tra i fori di 15 mm (vedi Figura 4.1), la quale rappresenta l’area d’incastro nel modello fisico, è stata semplicemente rappresentata come una linea, sulla quale verrà poi applicato il vincolo.

In Figura 4.5 si riporta il modello del pannello descritto:

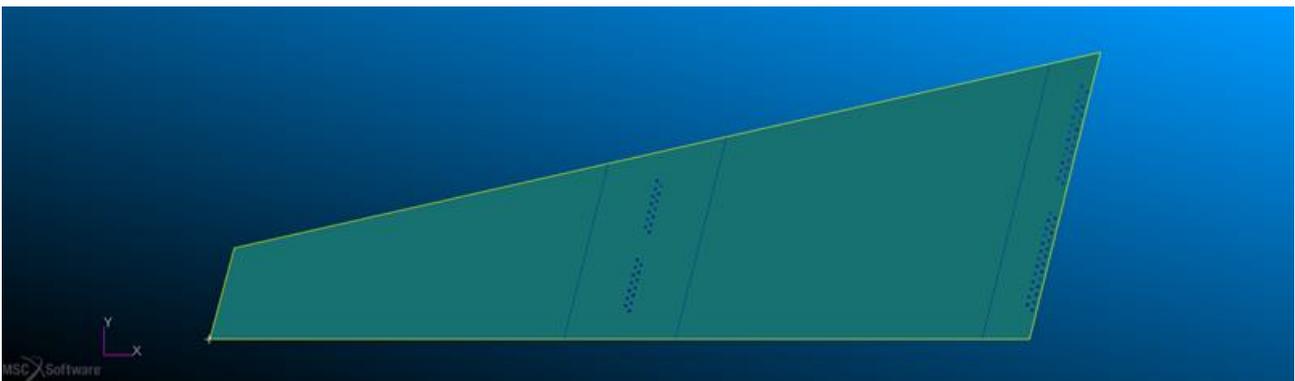


Figura 4.5: modello geometrico del pannello

È possibile notare che il pannello è diviso in quattro superfici. Quest’operazione, come vedremo in seguito, è stata svolta per semplificare la creazione della mesh.

Anche per i correnti, sono state create diverse superfici per rendere più semplice sia la creazione della geometria che quella della mesh.

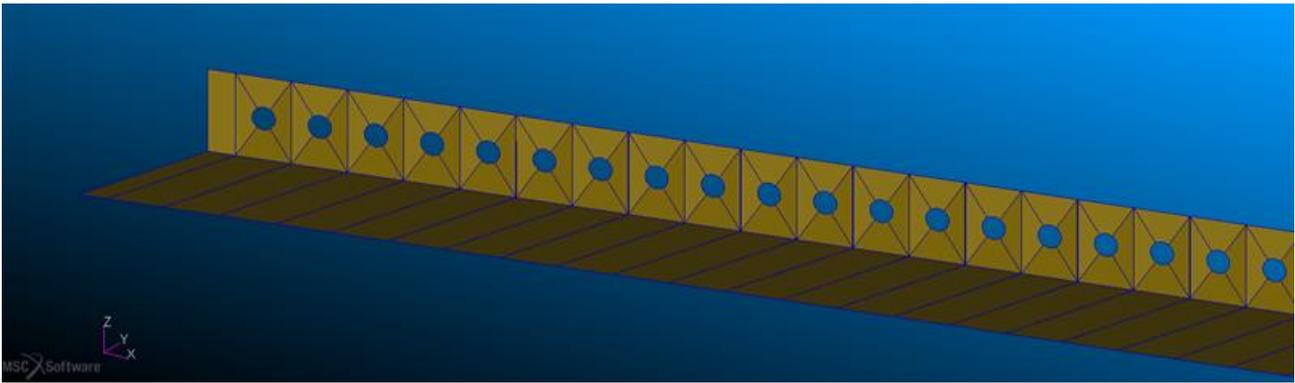


Figura 4.6: modello geometrico dei correnti angolari

Per tutti e tre i correnti, la foratura della superficie a contatto con il pannello non è stata modellata in quanto le due superfici saranno unite tramite incollaggio o CFAST.

Infine, si riporta il corrente centrale:

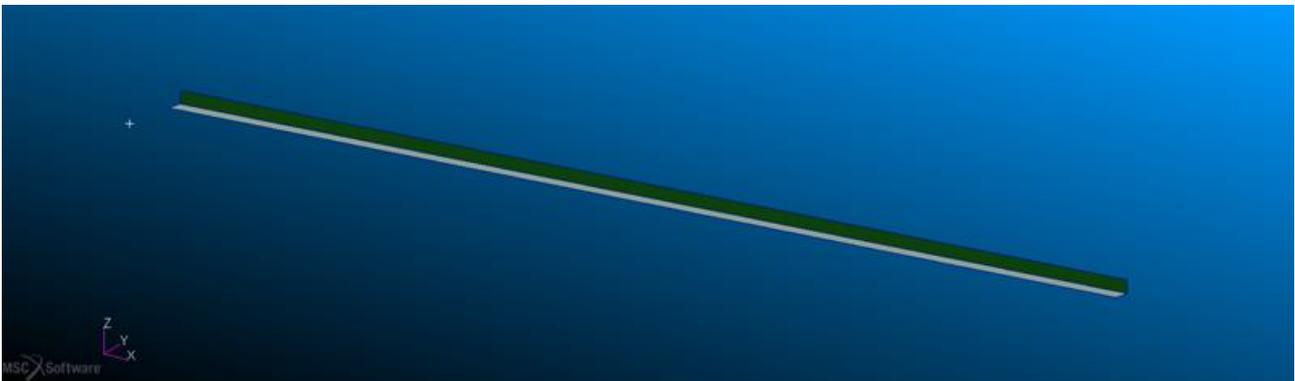


Figura 4.7: modello geometrico del corrente centrale

4.2 Materiali e proprietà

Il modello in analisi presenta due materiali differenti. I correnti a C sono costituiti dalla lega di alluminio **AI-6060**, le cui proprietà sono state derivate in seguito ad esperimenti svolti negli anni passati.

In particolare, era stata svolta una prova di trazione standard, condotta su tre esemplari dello stesso materiale. In *Tabella 4.1* si riportano i risultati che sono stati ottenuti:

	Prova 1	Prova 2	Prova 3	Media
E [MPa]	68100	70000	66000	68033
ν	0.346	0.330	0.328	0.335
ρ [Kg/m ³]	\	\	\	2.7E-09

Tabella 4.1: caratteristiche meccaniche AI-6060 [1]

Il pannello è costituito dalla lega di alluminio **AI-7075**, le cui caratteristiche sono state ricavate in modo analogo al precedente.

In *Tabella 4.2* sono stati riportati i valori medi delle caratteristiche del materiale:

E [MPa]	ν	ρ [Kg/m ³]
72017	0.325	2.81E-09

Tabella 4.2: caratteristiche meccaniche Al-7075 [1]

È stato quindi possibile procedere alla creazione del materiale su Patran. Per entrambi i materiali è stata utilizzata l'impostazione di materiale isotropo, dato che hanno le caratteristiche meccaniche identiche in tutte le direzioni.

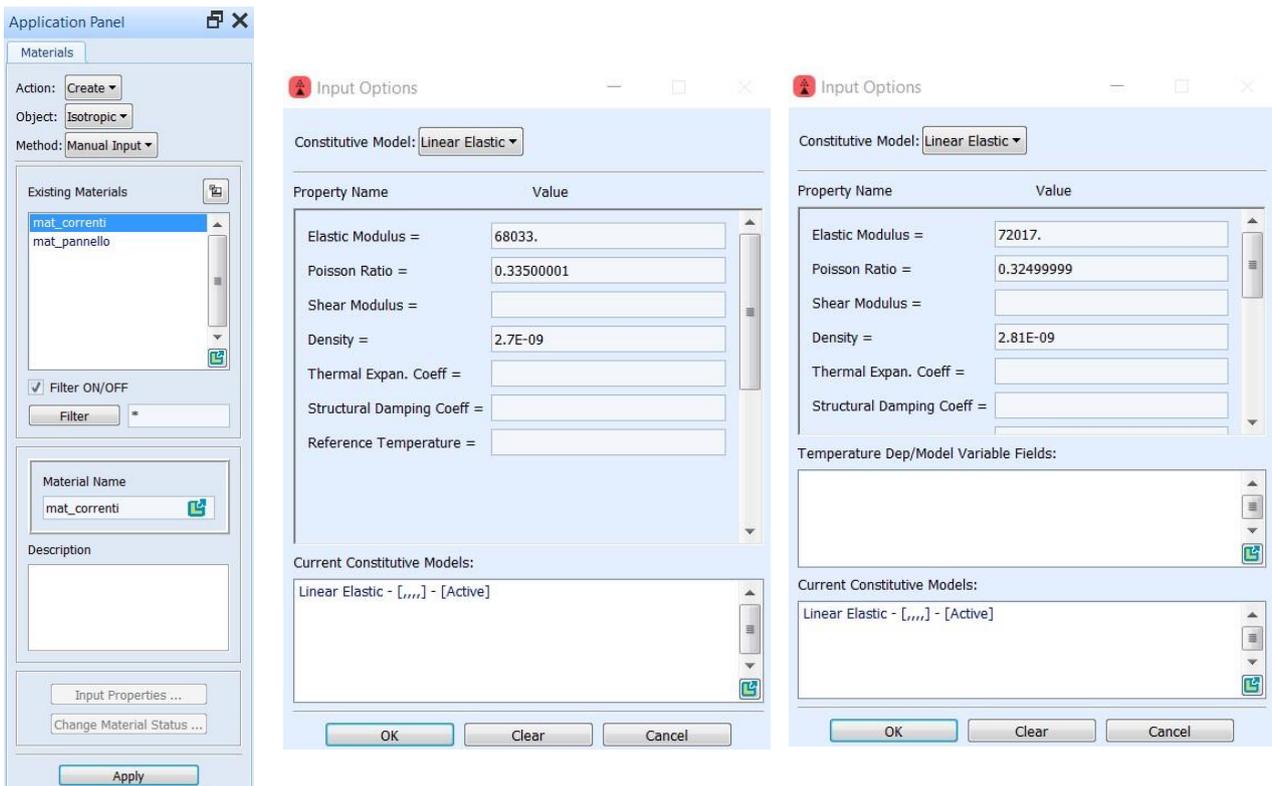


Figura 4.8: creazione materiale isotropo

In seguito, è stato possibile creare le proprietà 2D di tipo shell, in cui si può definire lo spessore e l'offset. Nel caso analizzato è stato modellato il piano medio, con la distanza giusta in modo da non dover inserire alcun valore di offset ed avere un contatto perfetto tra la superficie del pannello e quella dei correnti. In *Figura 4.9* si riporta la creazione delle proprietà shell:

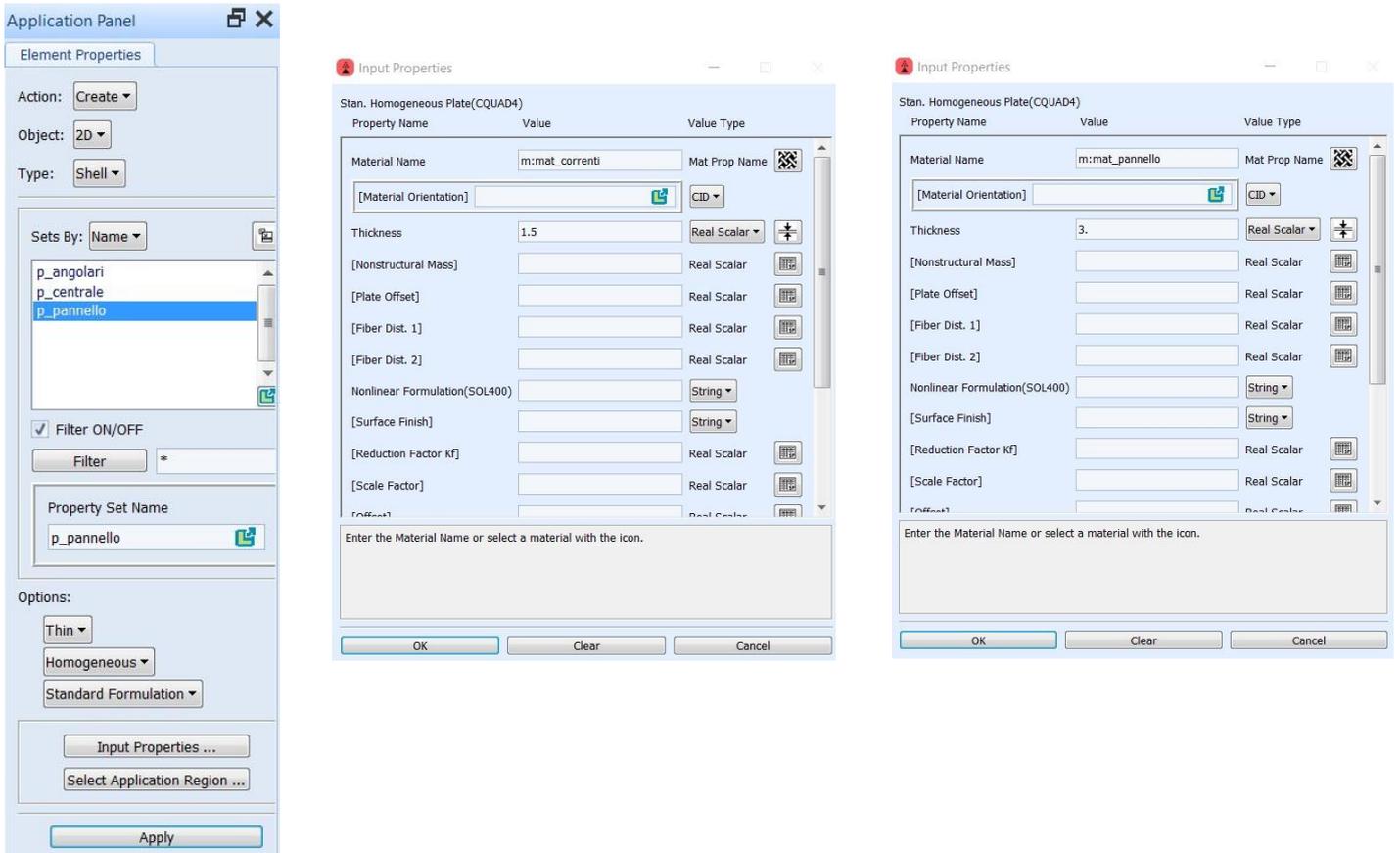


Figura 4.9: proprietà 2D shell

4.3 Mesh

Dopo aver terminato la parte relativa alla geometria ed ai materiali, è stata definita la mesh della struttura.

Per poter avere dei risultati confrontabili tra il modello con incollaggio e quello con CFAST, è stato necessario trovare il giusto compromesso di dimensione e finezza della mesh.

Infatti, con gli elementi CFAST, è necessario che il connettore non sia troppo grande rispetto alla mesh delle superfici sulle quali viene proiettato. Sono quindi state svolte varie prove al fine di determinare una mesh abbastanza fine che garantisse anche la creazione dei CFAST. In questo modo, sarà possibile svolgere un confronto tra i due modelli numerici in cui l'unica differenza è data dalla modellazione dell'elemento connettore.

In *Figura 4.10* si riporta la mesh di dimensione ideale per consentire l'unione tra pannello e corrente:

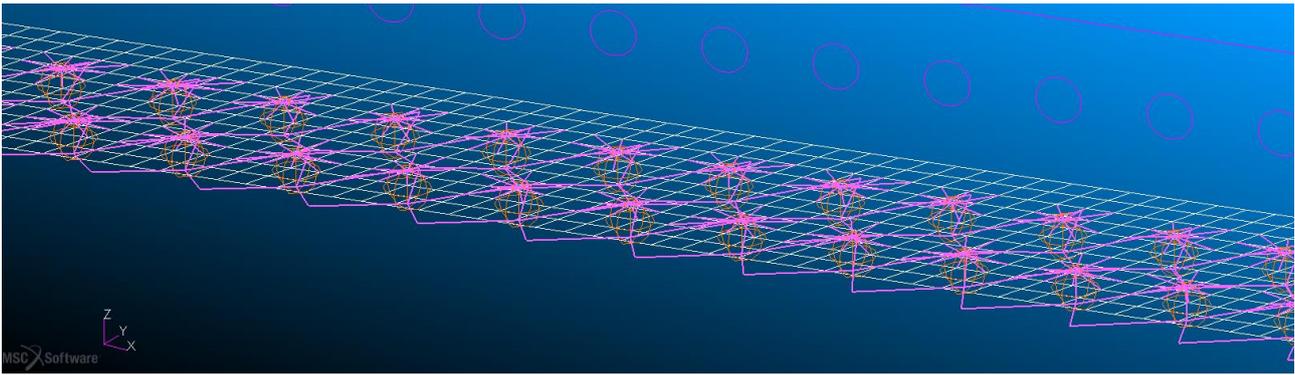


Figura 4.10: isomesh di dimensione 2.6

Dopo aver trovato la dimensione minima della mesh per la superficie a contatto dei correnti, è stato possibile creare gli elementi finiti anche per la superficie forata dei correnti angolari. Questa, non essendo biparametrica, non può essere meshata con Isomesh⁷. Inizialmente, si era pensato di utilizzare il meshatore ibrido, ma il risultato non era soddisfacente. Dunque, si è pensato di dividere la superficie in diverse superfici biparametriche che potessero essere meshate con Isomesh (vedi Figura 4.6). In Figura 4.11 è possibile vedere la mesh della superficie forata:

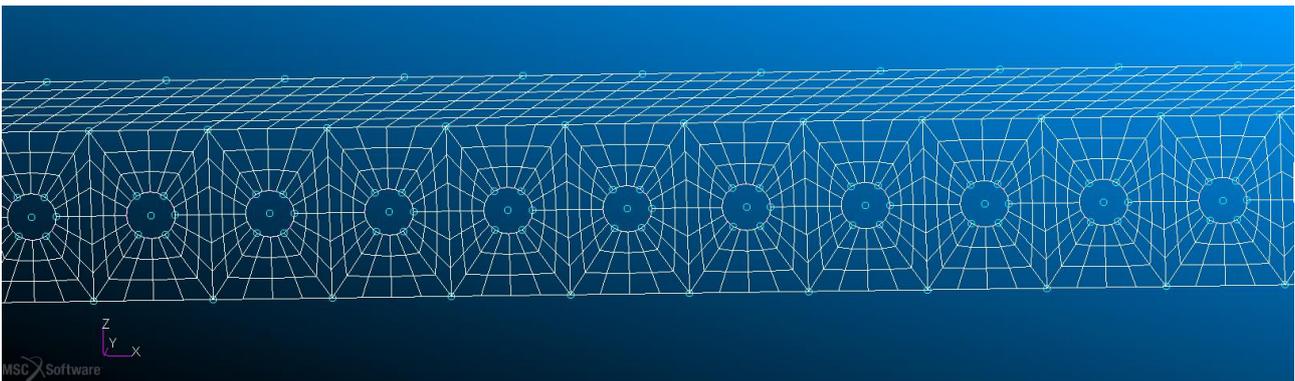


Figura 4.11: mesh superficie forata correnti angolari

Con lo stesso ragionamento, anche il pannello è stato diviso in più superfici per rendere più semplice la creazione della mesh (vedi Figura 4.5).

Le parti non forate del pannello sono state meshate con Isomesh, mentre per le superfici forate è stato definito un mesh seed per ciascun foro e si è proceduto con il meshatore di tipo ibrido.

In Figura 4.12 si riporta la mesh svolta per i fori relativi al pannello:

⁷ Isomesh è un meshatore che divide una superficie biparametrica (chiusa) in elementi finiti.



Figura 4.12: mesh ibrida - fori del pannello

La mesh di tipo ibrido è stata necessaria per via della presenza dei fori. In questo caso, erano presenti due file di fori, molto ravvicinate tra loro, che avrebbero reso molto complicato replicare il metodo utilizzato nei correnti. Dalla *Figura 4.12* e *Figura 4.13* si può vedere, inoltre, che il meshatore ibrido garantisce una perfetta corrispondenza nei nodi di transizione fra una superficie biparametrica ed una forata.

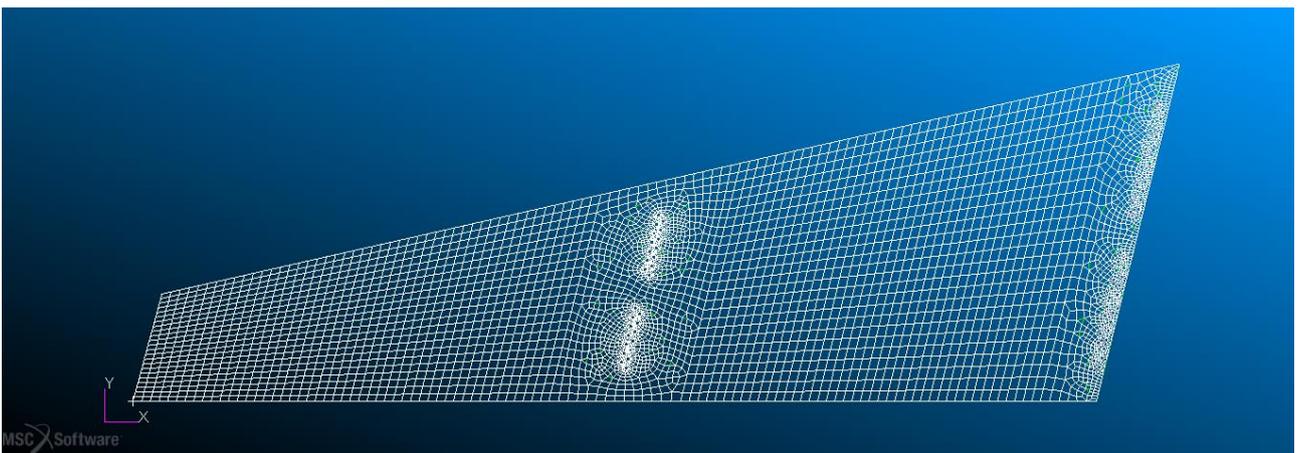


Figura 4.13: mesh pannello

Si riporta infine la mesh in corrispondenza dell'incastro (*Figura 4.14*), in cui la dimensione degli elementi è stata ridotta rispetto al resto del pannello, in modo tale da avere il minor numero possibile di elementi TRIA:



Figura 4.14: pannello - mesh all'incastro

4.4 Connessione tramite CFAST

A questo punto, sono stati creati due differenti modelli che saranno utilizzati per le analisi. Il primo utilizza gli elementi CFAST per creare una connessione tra la superficie del pannello e quella dei correnti.

Innanzitutto, sono stati creati dei punti geometrici allocati nella posizione dei bulloni. Per semplicità, sono stati direttamente creati sulla superficie dei correnti (punti GA).

Dato che la proprietà del pannello differisce da quella dei correnti, si è utilizzato il metodo *projection* con la patch A relativa alla proprietà del materiale del corrente e la patch B relativa a quella del pannello.

In questo modo, sono stati determinati anche i punti sulla superficie del pannello (punti GB) ed il software è riuscito ad unire le due superfici tramite bullonatura, come mostrato in *Figura 4.15*:

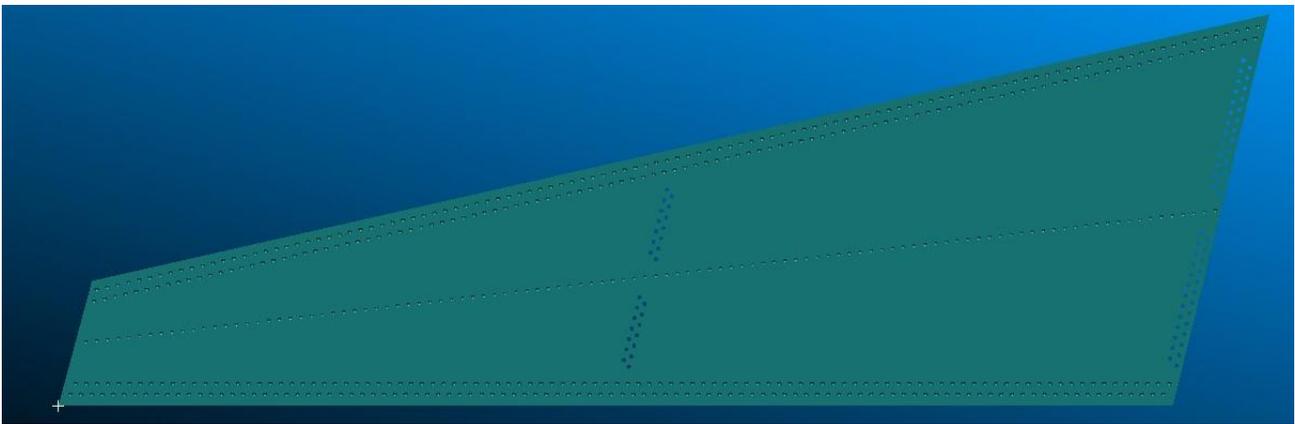


Figura 4.15: bullonatura

Per quanto riguarda le proprietà di rigidità dei bulloni, queste sono state determinate creando un materiale isotropo con le caratteristiche tipiche dell'acciaio, ovvero **modulo di Young** pari a 210 GPa e **coefficiente di Poisson** di 0.3.

In questo modo, nella scheda relativa alle proprietà CFAST, è stato inserito il relativo materiale ed è stata selezionata la **formula di Douglas**, come mostrato in *Figura 4.16*:

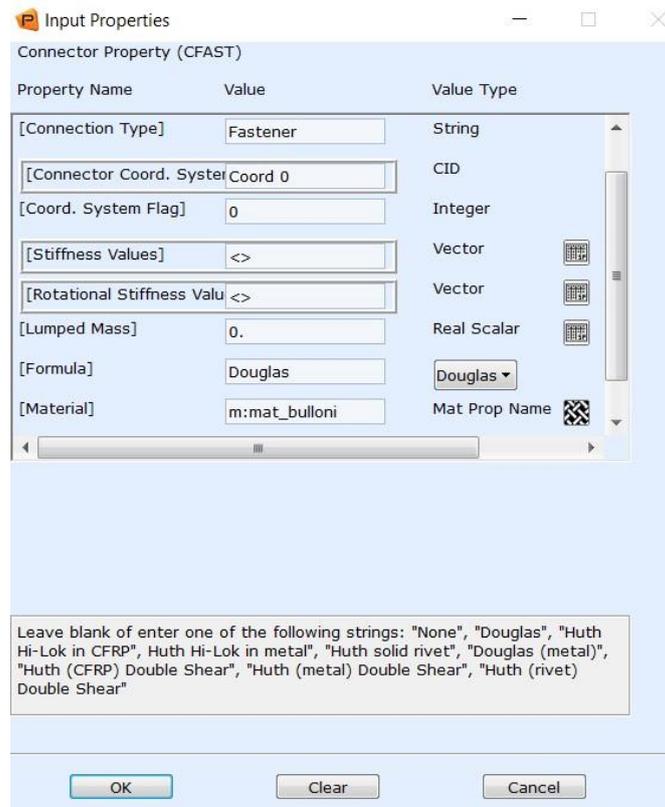


Figura 4.16: proprietà CFAST

Sfruttando le equazioni (3.16) e (3.17), Patran ricava i corretti valori di rigidità da assegnare.

4.5 Connessione tramite incollaggio

Con lo stesso identico modello creato, si è optato per una seconda modalità di unione dei correnti al pannello. Questa modalità è consigliata da MSC Softwares per modellare in modo rapido un assieme, anche molto complesso, in cui sono presenti centinaia di bulloni. Tramite l'incollaggio di tipo *Permanently Glued Contact* è possibile unire due superfici in modo indipendente dalla dimensione degli elementi della mesh. Usando questo metodo, si potrebbe quindi creare una mesh molto più fitta e non incorrere nel problema della dimensione minima relativa ai CFAST.

Inoltre, non è necessario creare centinaia di bulloni ed è un metodo valido per assemblare vari componenti senza però perdere nell'affidabilità dei risultati.

Ci si aspetta però che i risultati ottenuti tramite incollaggio siano coerenti con il modello CFAST.

Per poter creare la connessione, innanzitutto sono state definiti dei *Deformable Body*, uno per ciascuna superficie che dovrà poi essere incollata:



Figura 4.17: deformable body

È stato selezionato un *target element type* 2D e per ciascuno si sono selezionati gli elementi da associare.

A questo punto, si è potuto procedere con l'accoppiamento delle superfici, tramite il comando *Body pair*. Nella scheda relativa a tale comando, sono stati lasciati invariati i parametri preimpostati di Patran ed è stata spuntata l'opzione di *Glued Contact*.

Infine, si è selezionato il metodo *segment to segment* per creare il contatto, dato che risulta maggiormente accurato rispetto al metodo *node to segment*. Inoltre, non è strettamente necessario definire un *master body* ed uno *slave body* per il contatto.

In *Figura 4.18* si riportano le tabelle compilate all'interno del software:

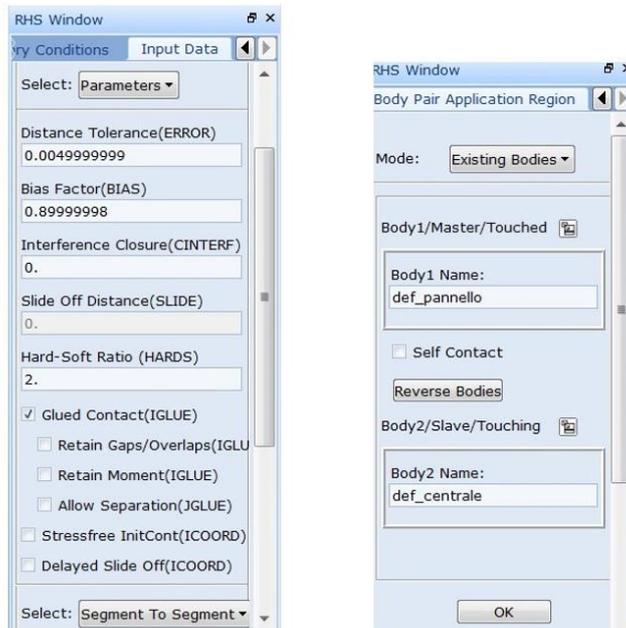


Figura 4.18: body pair

4.6 Definizione dei vincoli e dei carichi

È stato creato un incastro alla radice del pannello alare irrigidito, assegnando dei valori nulli per ciascun grado di libertà:

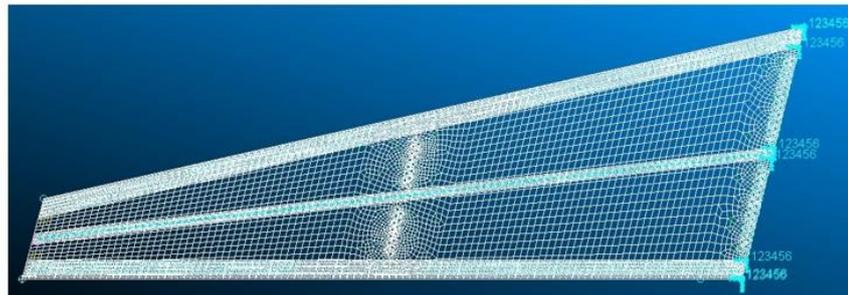
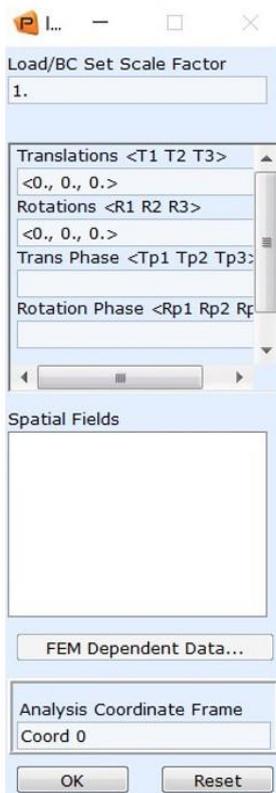


Figura 4.19: vincolo incastro

Successivamente, per svolgere la prova sperimentale, è stato scelto il foro centrale al tip del pannello come punto di applicazione del carico. Dal modello reale è stata quindi identificata la posizione del centro del foro e si è visto all'interno di quale elemento CQUAD del modello numerico ricadeva, per poi procedere alla creazione di un RBE3 per collegarlo ai vertici di quell'elemento finito.

In questo modo, è stato possibile applicare direttamente il carico di 1 Kg al punto scelto, come mostrato in *Figura 4.20*:

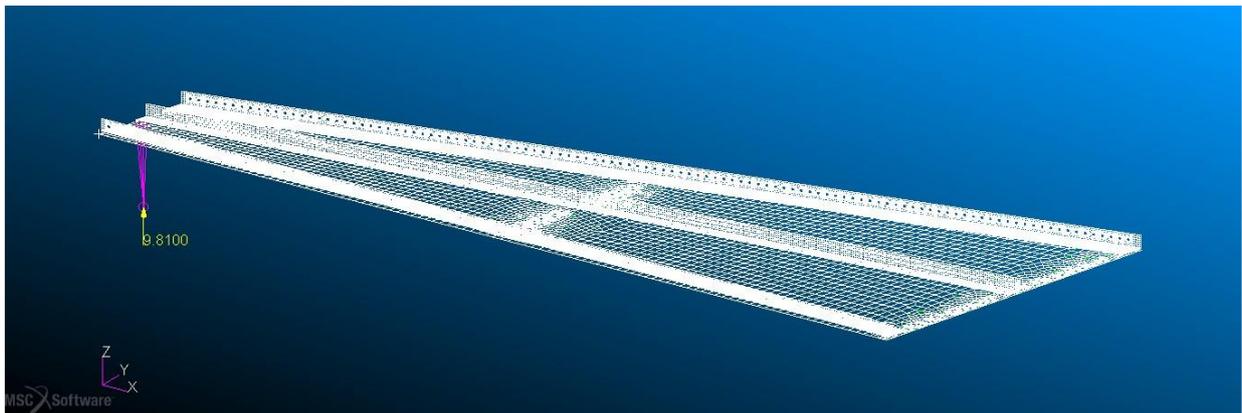


Figura 4.20: carico con RBE3

4.7 Risultati

Applicando un carico di 1 Kg si sono confrontati i due modelli numerici tra loro, ottenendo i seguenti risultati:

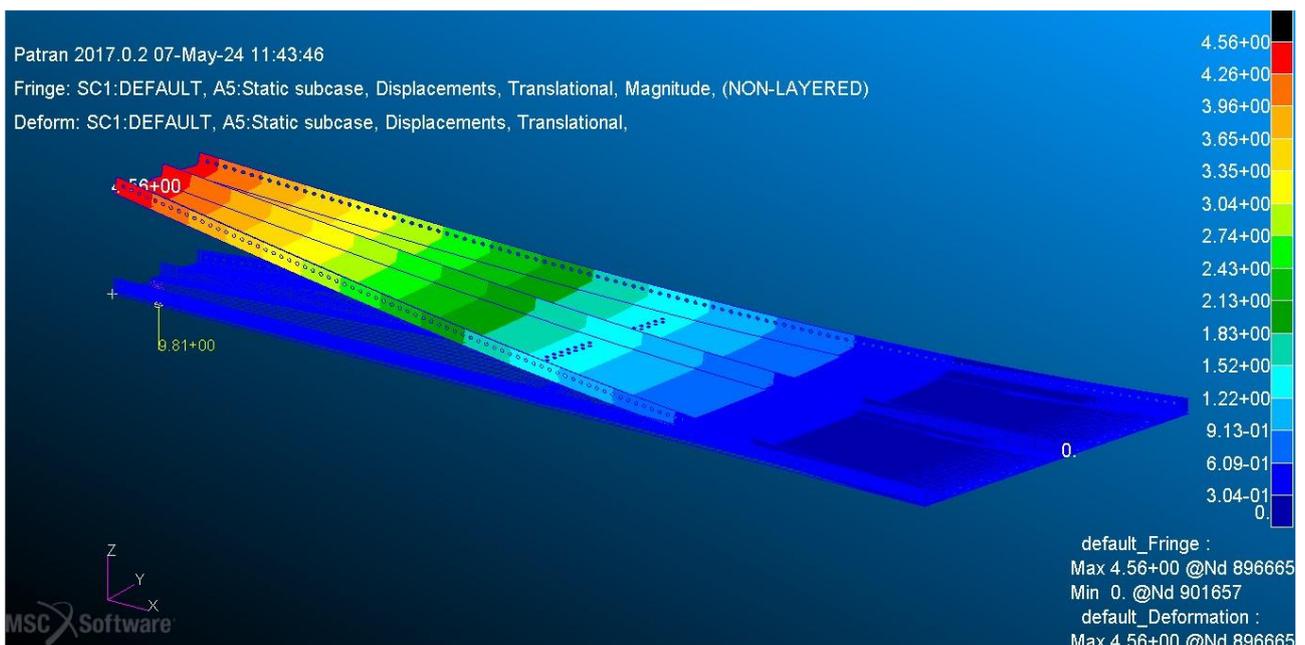


Figura 4.21: freccia - modello CFAST

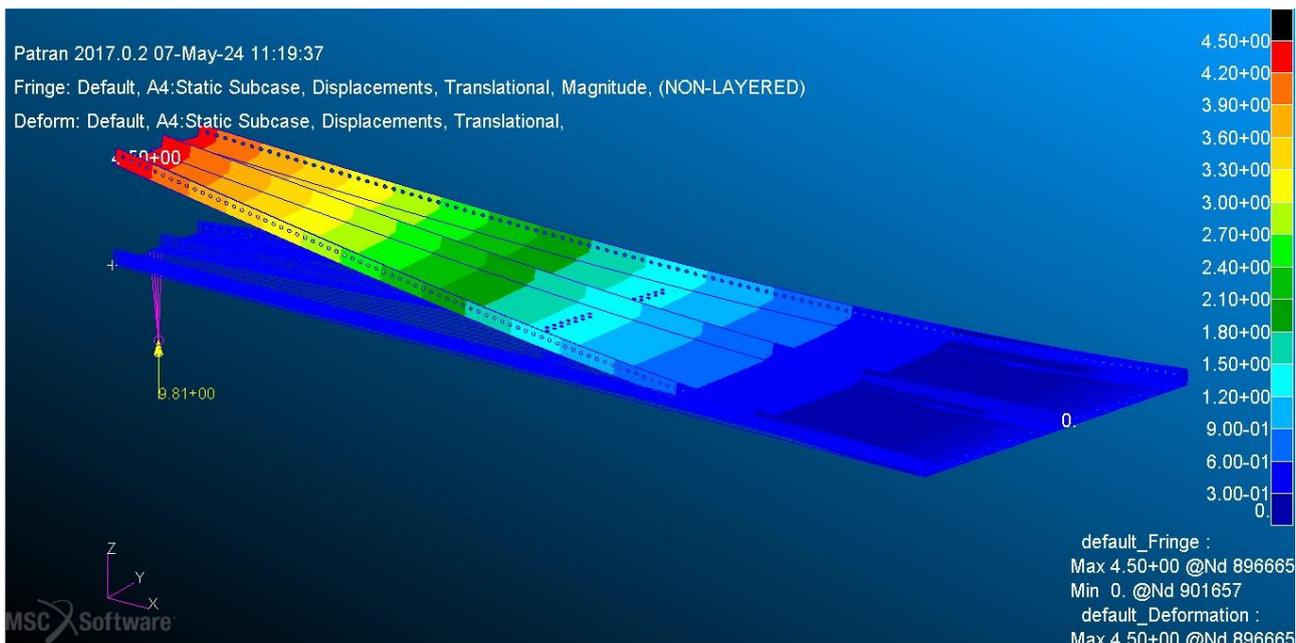


Figura 4.22: freccia - modello glued

I risultati delle frecce sono in millimetri. Come è possibile vedere, i due modelli risultano equivalenti. In particolare, il modello con incollaggio ha una deformazione minore in quanto le superfici vengono unite in più punti di contatto, irrigidendo maggiormente la struttura, mentre nel caso dei CFAST c'è un numero finito di punti di collegamento dato dal numero effettivo di bulloni.

In ogni caso, la differenza tra i due modelli è inferiore all' 1%, dunque si può ritenere il modello con incollaggio una valida alternativa per modelli più complessi in cui vi è un numero decisamente maggiore di bulloni.

Si riporta di seguito un confronto anche per quanto riguarda gli stress di Von Mises [Mpa]:



Figura 4.23: tensore degli stress - modello glued

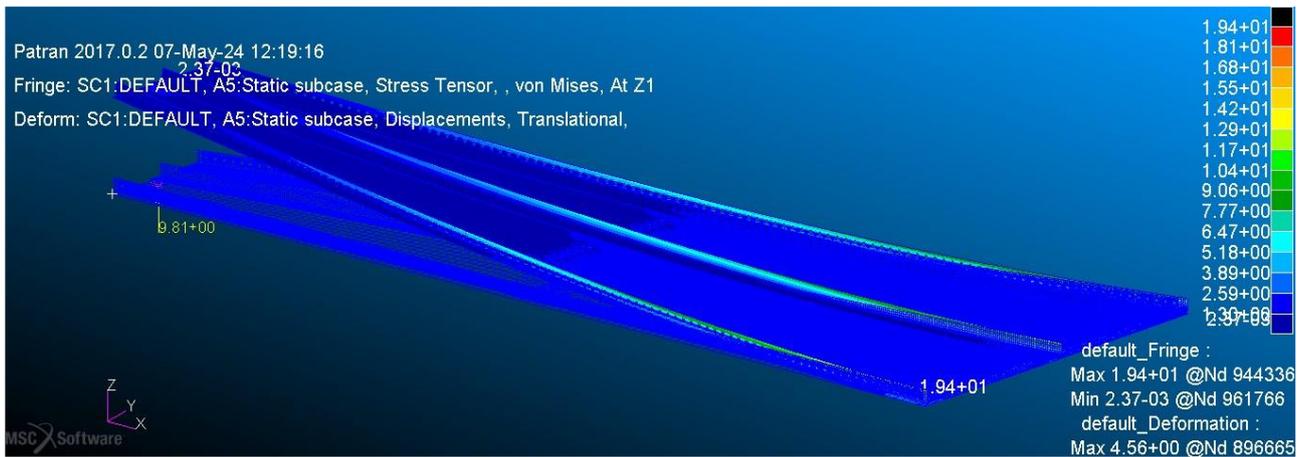


Figura 4.24: tensore degli stress - modello CFAST

Anche in questo caso i due modelli risultano coerenti tra loro. Nel modello CFAST è inoltre possibile vedere anche lo stress per ciascun bullone:



Figura 4.25: stress traslazionale dei bulloni

Il valore massimo si ha in corrispondenza dell'incastro, mentre il valore minimo di stress è a circa un terzo dal tip del pannello.

5. Prove sperimentali

Il lavoro di tesi si conclude con il capitolo dedicato alle prove sperimentali. Sono state svolte varie prove di tipo statico, utilizzando strumenti quali LVDT e DIC e, con i risultati ottenuti, è stato possibile svolgere un confronto con i risultati numerici.

Essendo emerse delle discrepanze tra il modello reale ed i modelli numerici, è stata svolta un'indagine per individuare le fonti d'errore. Uno dei possibili motivi risiede nelle caratteristiche meccaniche del materiale del pannello. Per questo motivo, nel capitolo sarà presentata anche una prova sperimentale e numerica svolta su un longherone dello stesso materiale del pannello.

5.1 Fase di smontaggio

Il modello reale del pannello irrigidito è stato ottenuto in seguito allo smontaggio di un cassone alare presente nei laboratori del Politecnico.

Sono stati rimossi i collegamenti bullonati tra correnti angolari e longheroni e tra centine e pannello, con l'ausilio di una chiave a bussola. Si è ottenuto infine il pannello alare con irrigidimenti bullonati, mostrato in *Figura 5.1* e *Figura 5.2*:



Figura 5.1: pannello alare irrigidito



Figura 5.2: sezione trasversale del pannello irrigidito

5.2 Set - up sperimentale

Per svolgere la prova sperimentale è stato utilizzato un banco di prova in cui il pannello alare irrigidito è stato posizionato e bloccato tra due blocchi di metallo, in modo da creare un incastro:



Figura 5.3: incastro

Lo strumento utilizzato per poter applicare il carico è un'asta, alla quale è possibile applicare un carico. L'asta può essere imbullonata al tip del pannello ed in seguito caricata, come mostrato in *Figura 5.4*.

Infine, sono stati posizionati quattro LVDT⁸ per misurare la deformazione (vd *Figura 5.7*). In particolare, due di questi potevano ottenere misure fino a 2.5 mm, mentre i rimanenti fino a circa 5 mm.

Inoltre, per una maggior precisione nella misurazione, in corrispondenza dello spostamento massimo è usato un LVDT con display integrato.



Figura 5.4: asta



Figura 5.5: LVDT con display integrato

5.3 1^a configurazione

Per poter disporre correttamente gli LVDT, dal modello numerico sono stati individuati quattro nodi. Di seguito, in *Tabella 5.1*, si riporta la loro posizione:

	Nodo 895848	Nodo 895537	Nodo 896688	Nodo 896665
Distanza dal tip [mm]	350.75186	435.0647	0	0

Tabella 5.1: I configurazione

⁸ LVDT è l'acronimo per Linear Variable Displacement Transducer



Figura 5.6: I configurazione

In *Figura 5.6*, per rendere più semplice la visualizzazione, si è riportata solo la posizione dei nodi sul pannello senza graficare la corrispondente mesh.

Si è proceduto quindi con l'esperimento, posizionando adeguatamente il pannello irrigidito nell'incastro, gli LVDT e l'asta per applicare il carico:

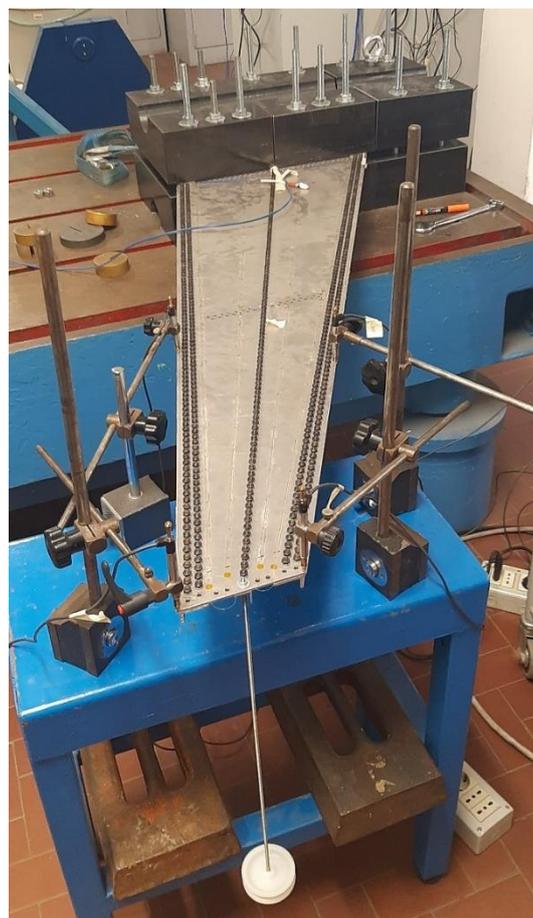


Figura 5.7: prova statica

L'esperimento è stato svolto per due configurazioni di carico, con 0.5 Kg e con 1 Kg. I risultati sono stati registrati tramite un computer dal quale, per ogni istante di tempo, è stato registrato il valore di spostamento relativo al corrispondente LVDT.

5.4 Risultati 1^a configurazione

In *Tabella 5.2* si riportano i risultati sperimentali e numerici per i due carichi, rispettivamente 1 Kg e 0.5 Kg:

	w_896665 [mm]	w_896688 [mm]	w_895848 [mm]	w_895537 [mm]
Test 1	5.73	5.48	2.76	2.34
	2.81	2.70	1.24	1.08
Test 2	5.75	5.58	3.05	2.37
	2.80	2.77	1.50	1.11
Media	5.74	5.53	2.9	2.35
	2.81	2.74	1.37	1.10
Modello CFAST	4.56 (-20.56%)	4.39 (-20.61%)	2.31 (-20.34%)	1.87 (-20.43%)
	2.28 (-18.86%)	2.20 (-19.71%)	1.16 (-15.33%)	0.93 (-15.45%)
Modello GLUED	4.50 (-21.60%)	4.32 (-21.88%)	2.27 (-21.72%)	1.85 (-21.28%)
	2.25 (-19.93%)	2.16 (21.17%)	1.13 (-17.52%)	0.92 (-16.36%)

Tabella 5.2: risultati l prova sperimentale

Si può notare che, nonostante i risultati dei modelli numerici siano congruenti tra loro, ci sono degli errori percentuali notevoli rispetto al modello reale, il quale risulta molto più flessibile. In particolare, l'errore percentuale è sempre maggiore del 15%.

Si è deciso di indagare il motivo di tale discrepanza svolgendo una prova statica su un longherone del cassone alare in lega di Al 7075 per verificare il modulo di Young del materiale. Infatti, da ricerche più approfondite, non sono emersi i dati relativi alle prove di trazione svolte in passato sulla lega di Al 7075, della quale si aveva solamente il valore finale di E.

5.5 Prova sperimentale sul longherone

È stato smontato un longherone del cassone alare, il quale è costituito dello stesso materiale del pannello, ovvero la lega Al 7075. La prova statica è stata svolta in modo analogo al precedente esperimento, con la differenza che l'incastro è stato posizionato in modo da non avere una deformazione del longherone causata dal suo stesso peso.

Si riportano in *Figura 5.8* le caratteristiche geometriche del modello, in mm:

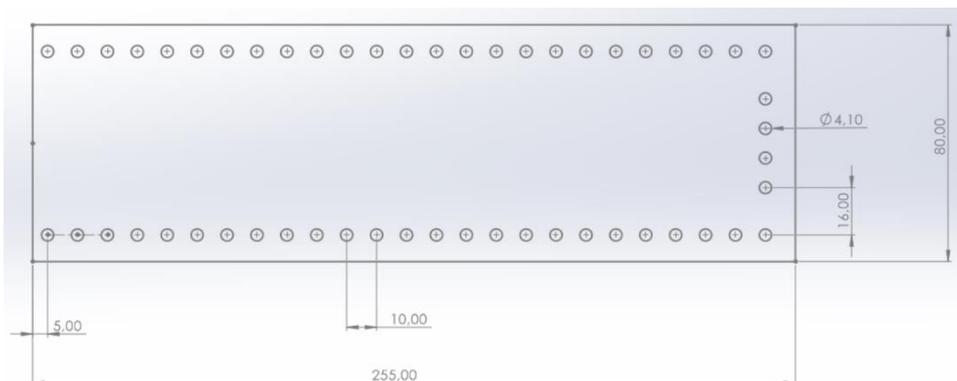


Figura 5.8: geometria longherone

Sono quindi stati posizionati due LVDT in corrispondenza dei vertici ed è stato applicato il carico di 1 Kg nel punto centrale, come mostrato in *Figura 5.9*:



Figura 5.9: prova statica - longherone

Dalla prova sperimentale è emerso un valore di deformazione pari a **4.14 mm**.

In questo modo, si è poi potuto creare un modello numerico assegnando le proprietà geometriche e variando iterativamente il modulo di Young fino a trovare il corrispondente valore di deformazione della prova sperimentale. Si riporta di seguito il modello numerico creato con Patran:

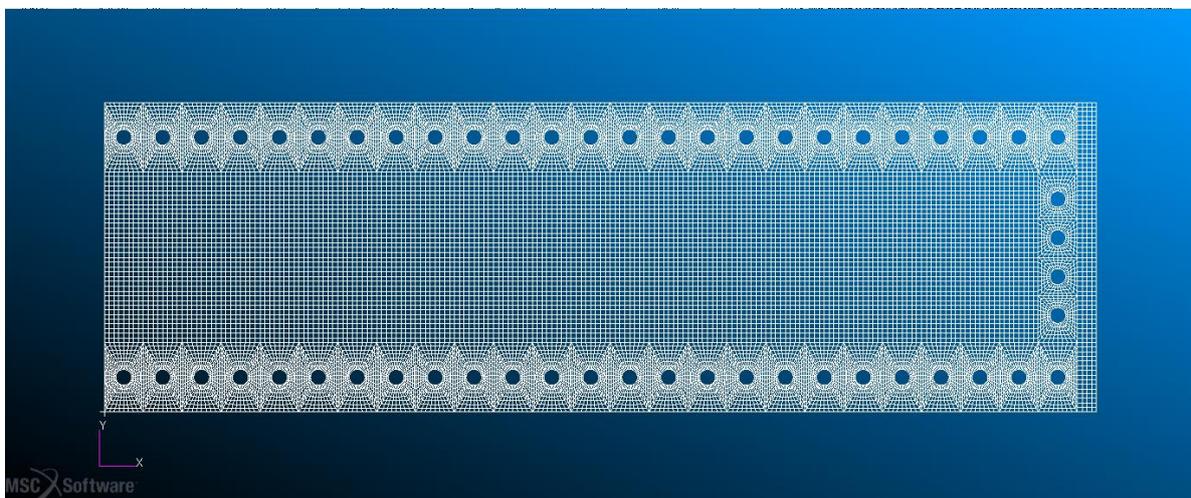


Figura 5.10: mesh del longherone

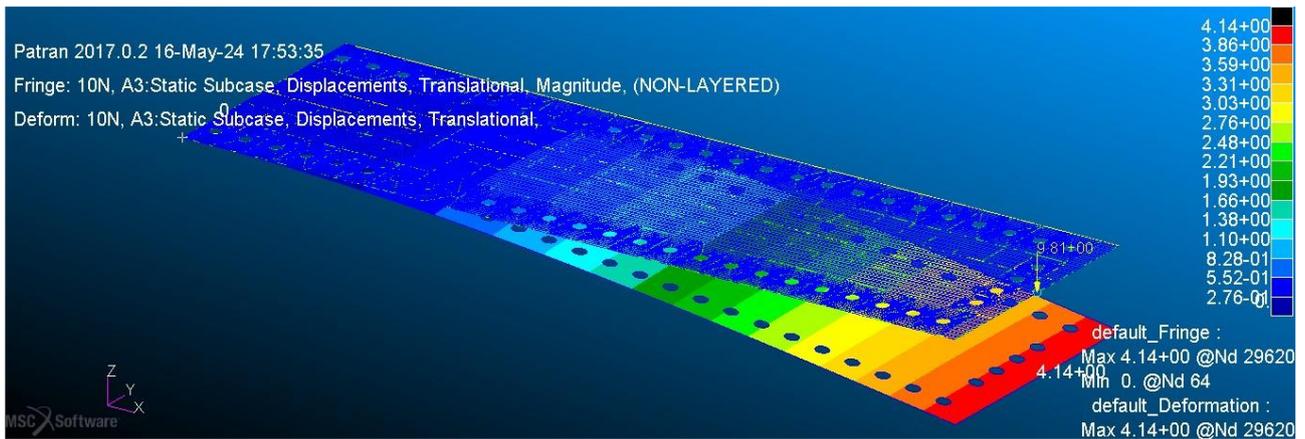


Figura 5.11: prova statica numerica - longherone

Il risultato numerico ottenuto è valido per il valore di modulo elastico pari a **75322 MPa**, +4.59% rispetto al valore originario di 72017 MPa. Il materiale risulta leggermente più rigido di quanto si potesse pensare. Dunque, la causa della flessibilità che porta alla discrepanza tra i risultati numerici e sperimentali non è imputabile al modulo di Young dei materiali, ma è da indagare, per esclusione, nella configurazione sperimentale e nei bulloni.

5.6 2a configurazione

In seguito alla precedente prova sperimentale, si è proceduto ad aggiornare il valore del modulo di Young del pannello, per poi svolgere un'ulteriore prova sperimentale in cui è stata cambiata la configurazione degli LVDT. In *Figura 5.12* la nuova configurazione scelta:



Figura 5.12: Il configurazione

	Nodo 895728	Nodo 897128	Nodo 897115	Nodo 896665
Distanza dal tip [mm]	400	552.40	514.63	0

Tabella 5.3: Il configurazione

In modo analogo alla prima configurazione, si è svolta una prova statica sperimentale con il carico di 1Kg.

5.7 Risultati 2^a configurazione

Il valore del modulo di Young del pannello, essendo aumentato del +4.59%, comporta un aumento di rigidezza per i modelli numerici e, di conseguenza, ci si aspetta un aumento dell'errore percentuale rispetto ai risultati sperimentali. Si riportano in *Tabella 5.4*:

	w_896665 [mm]	w_895728 [mm]	w_897115 [mm]	w_897128 [mm]
Test sperimentali	5.99	3.13	2.06	1.56
Modello CFAST	4.53 (-24.37%)	2.04 (-34.82%)	1.44 (30.10%)	1.31 (-16.03%)
Modello GLUED	4.47 (-25.38%)	1.99 (-36.42%)	1.42 (-31.07%)	1.27 (-18.59%)

Tabella 5.4: risultati II prova sperimentale

A differenza delle prove svolte con la prima configurazione, in questo caso l'errore percentuale dei modelli numerici presenta un range piuttosto ampio.

Inoltre, durante le prove sperimentali della II configurazione, avendo lasciato invariato il punto in corrispondenza della deformazione massima (**w_896665**), ci si è accorti di un problema.

Infatti, a parità di carico applicato, la struttura è risultata essere più flessibile rispetto alle precedenti prove sperimentali svolte nelle settimane precedenti.

In *Tabella 5.5* si riporta il confronto tra i valori sperimentali:

	w_897115 [mm]	w_897128 [mm]	w_895728 [mm]	w_896665 [mm]
Test 2^a configurazione	2.06	1.56	3.13	5.99
Test con LVDT digitale (II configurazione)	-	-	-	6.248
Test 1^a configurazione	-	-	-	5.74 (valore medio)

Tabella 5.5: risultati sperimentali II configurazione

Per maggior precisione, è stato usato anche un LVDT con display integrato, dato che l'LVDT precedentemente utilizzato non poteva misurare correttamente oltre i 6 mm.

È emerso che, lasciando il pannello irrigidito per circa due settimane incastrato senza alcun carico applicato e svolgendo nuovamente una prova statica, la struttura sembrerebbe aver ulteriormente perso la sua rigidità originaria. La discrepanza tra i risultati sperimentali ottenuti nelle due configurazioni è di circa l'8% e potrebbe dipendere effettivamente dagli strumenti e/o dalla loro configurazione. Per escludere tale ipotesi, si è proceduto con una prova sperimentale DIC.

5.8 Digital Image Correlation

Il DIC è un innovativo metodo che consente di misurare deformazioni e spostamenti senza necessità di contatto con la struttura, bensì sfruttando l'ottica. Il suo utilizzo è molto semplice e dai costi bassi, risultando al tempo stesso molto accurato.

Il DIC si basa sulla comparazione di immagini digitali relative alla struttura oggetto di test, le quali si riferiscono a differenti stadi di deformazione. Tramite dei softwares appositi, si può definire e delimitare la zona d'interesse, la quale viene discretizzata in *subset*⁹.

In questo modo, identificando i *subset* della prima immagine, è possibile seguirne l'andamento nelle successive immagini e determinare, tramite degli algoritmi, lo spostamento o deformazione. La tecnica è applicabile sia nel caso 2D che 3D.

I subset monitorati devono poter essere identificati in modo univoco e spesso è necessario trattare la superficie appositamente per poter semplificare l'identificazione da parte del software.

In particolare, la superficie viene verniciata di grigio e ricoperta in modo casuale da pallini neri, i quali vengono utilizzati per il tracciamento, come mostrato in *Figura 5.13*:

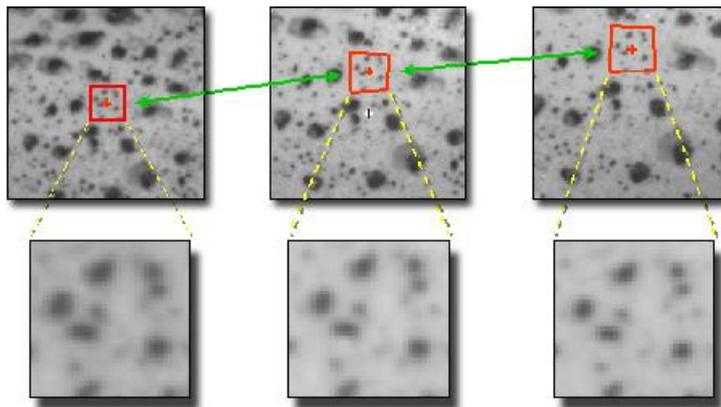


Figura 5.13: tracciamento dei subset [13]

La cattura delle immagini digitali può essere svolta con diversi strumenti, da macchine fotografiche professionali, microscopi, macroscopi e persino smartphones.

Come è possibile vedere dalla *Figura 5.13*, la dimensione minima del subset è determinata dalla qualità del singolo pixel, oltre la quale non è più possibile il tracciamento dei punti neri e l'identificazione della scala di grigio.

Infatti, come detto precedentemente, l'impiego della tecnica DIC presuppone l'utilizzo di immagini che presentino al loro interno variazioni significative di livello di grigio, in modo da rendere possibile e accurata la correlazione. È necessario quindi:

- Ottenere dei forti gradienti nei valori d'intensità luminosa, alterando le zone cromatiche ad elevato contrasto.

⁹ Il subset è una regione quadrata o rettangolare di pixel selezionata intorno a un punto di riferimento all'interno dell'immagine.

- Evitare ambiguità nella ricerca della correlazione tra subset, colorando con dei pallini neri in modo random l'area d'interesse.

Per applicare la tecnica DIC, nel caso 2D, è sufficiente una singola camera, la quale deve essere posizionata con l'asse ottico perpendicolare alla superficie di misura. In questo modo, sfruttando la proiezione centrale prospettica, il sensore ottiene un'immagine 2D dell'area inquadrata.

La non perfetta perpendicolarità dell'asse ottico può causare delle distorsioni ottiche, le quali modificano la posizione delle proiezioni rispetto al caso ideale. Per evitare questo fenomeno, si effettua un processo di calibrazione, mediante il quale si inquadra una griglia in cui sono presenti dei punti neri di cui si conosce la loro distanza relativa.

In *Figura 5.14* si riporta un esempio della griglia di calibrazione:

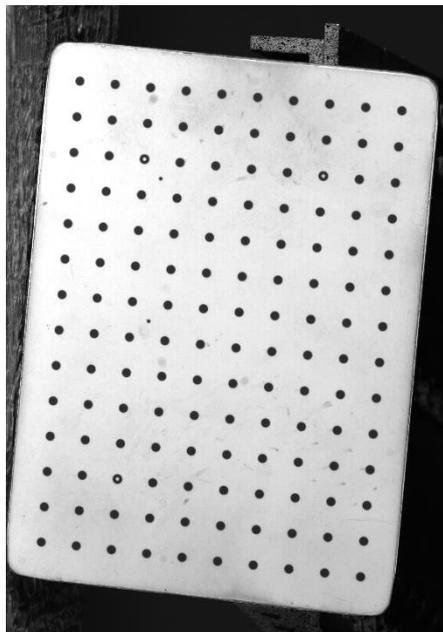


Figura 5.14: griglia di calibrazione DIC

Infine, si richiede che la superficie inquadrata rimanga piana durante lo spostamento/deformazione, altrimenti si rischia di ottenere una mappa degli spostamenti distorta.

Il principio di funzionamento della mappa degli spostamenti per il caso 2D si basa sull'identificazione e tracciamento dei subset. In particolare, con le ipotesi di piccole deformazioni dei subset e acquisizione perpendicolare dell'immagine, si può sfruttare una trasformazione affine 2D¹⁰:

$$x_i^* = x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x}(x_i - x_c) + \frac{\partial u}{\partial y}(y_j - y_c) \quad (7.1)$$

$$y_j^* = y_j + v + \frac{\partial v}{\partial x}(x_i - x_c) + \frac{\partial v}{\partial y}(y_j - y_c) \quad (7.2)$$

¹⁰ Una trasformazione affine dello spazio euclideo è una qualunque composizione di una trasformazione lineare con una traslazione. Per maggiori informazioni si rimanda il lettore a [15].

Le coordinate (x_i, y_j) rappresentano i punti che definiscono il subset, che aggiornate con le immagini seguenti diventano (x_i^*, y_j^*) . Le coordinate (x_c, y_c) sono le coordinate del centro del subset, mentre u e v sono gli spostamenti incogniti.

Il movimento del subset è definito in totale da sei parametri, che possono essere definiti da un vettore \vec{p} così definito:

$$\vec{p} = \left(u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (7.3)$$

Per ciascun subset, la ricerca della corrispondenza viene svolta ottimizzando delle funzioni di costo che dipendono da \vec{p} . In particolare, la somiglianza viene ricercata, ad esempio, nel valore d'intensità della scala di grigio per ogni punto del subset.

Tipicamente, si utilizza la funzione di correlazione incrociata normalizzata:

$$r_{CC} = \frac{\sum_{(i,j)} (F(x_i, y_j) - \bar{F})(G(x_i^*, y_j^*) - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{(i,j)} (F(x_i, y_j) - \bar{F})^2 \sum_{(i,j)} (G(x_i^*, y_j^*) - \bar{G})^2}} \quad (7.4)$$

Le funzioni \bar{F} e \bar{G} sono rispettivamente i valori medi delle matrici d'intensità F e G . A seconda del grado di somiglianza, r_{CC} assume valori compresi tra 0 e 1 (massima somiglianza).

Infine, se il valore è prossimo a 1, dalle funzioni scalari $F(x_i, y_j)$ e $G(x_i^*, y_j^*)$, si ricava il vettore delle incognite \vec{p} , ovvero spostamenti e deformazioni.

In *Figura 5.15* e *Figura 5.16* si riporta di quanto descritto nel paragrafo:

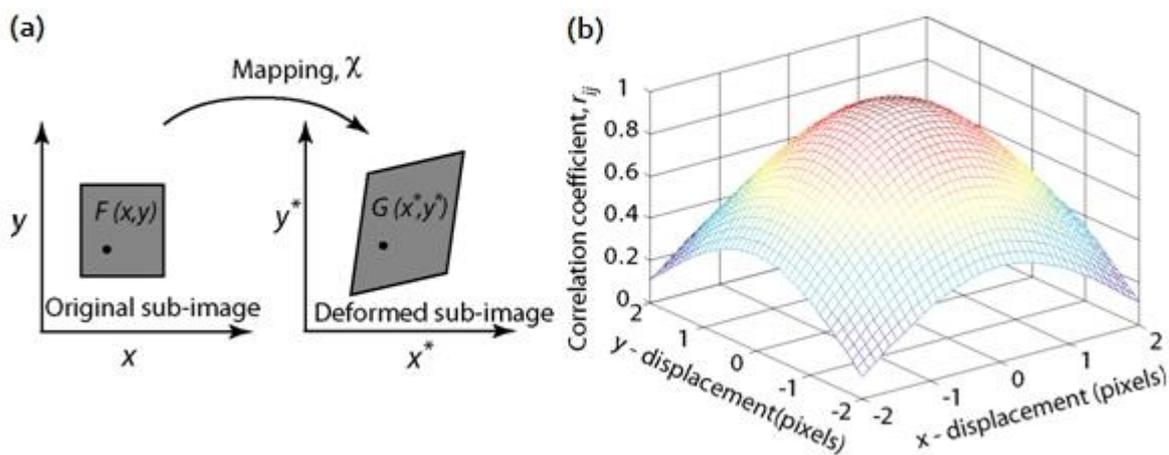


Figura 5.15: (a) deformazione subset – (b) funzione di correlazione [15]

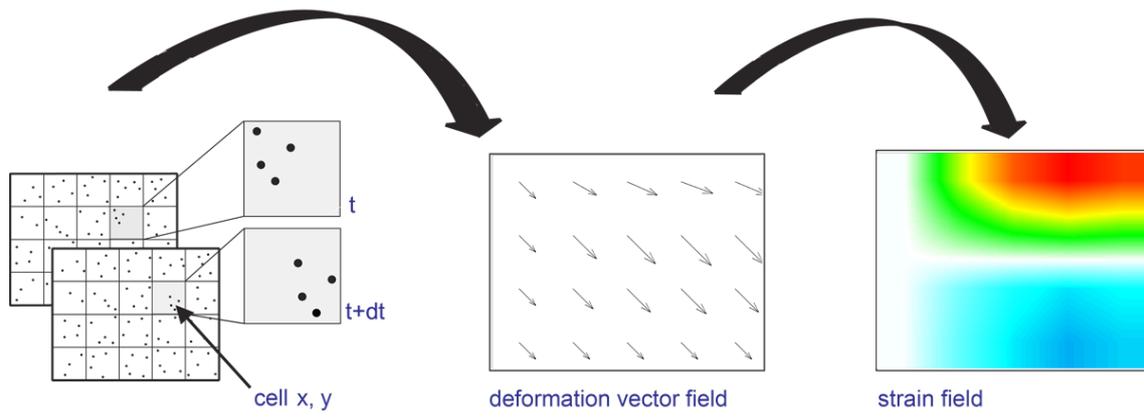


Figura 5.16: monitoraggio e tracciamento del subset [14]

5.9 Prova DIC ed ispezione

Si è svolta una prova DIC di tipo 2D. Per una maggior accuratezza nei risultati sono state utilizzate due fotocamere, in modo da non dover necessariamente disporre l'asse ottico perpendicolare alla superficie. Come descritto nel precedente paragrafo, si è proceduto al trattamento della superficie:



Figura 5.17: trattamento della superficie per prova DIC

Le due fotocamere sono state disposte in modo da inquadrare la sezione al tip. In questo modo, è stato possibile scattare due fotografie, senza carico e con carico applicato, misurando lo spostamento dei punti corrispondenti ai nodi **896665** e **896688** (vd *Figura 5.6*).



Figura 5.18: fotocamere per la prova DIC

In *Figura 5.19* i risultati trovati sperimentalmente con la prova DIC per le configurazioni di 1 Kg e 0.5 Kg:

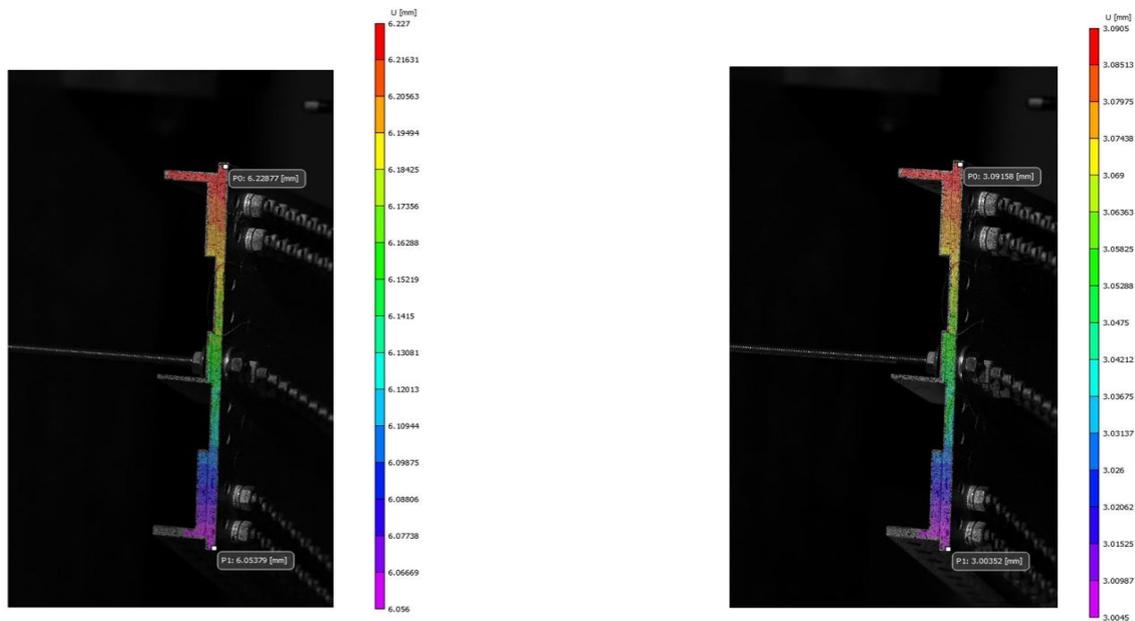


Figura 5.19: risultati prova DIC

I risultati della prova DIC risultano essere congruenti con i risultati della seconda configurazione, svolta un paio di giorni prima. La struttura ha quindi perso ulteriormente rigidità nell'arco di tre settimane circa e la causa non risiede negli strumenti/configurazione, ma sembrerebbe risiedere nei bulloni.

Da un'analisi più approfondita è infatti emerso che molti bulloni risultavano allentati. Inoltre, rimuovendo alcuni di questi, ci si è accorti che era presente una rottura per rifollamento della lamiera (*Figura 2.8*). Molti bulloni, dunque, non sono più in grado di opporsi adeguatamente al carico applicato in quanto i fori sono stati ovalizzati. Di seguito, in *Figura 5.20*, si riporta quanto emerso dall'ispezione:



Figura 5.20: ispezione sui bulloni

6. Conclusioni

Il lavoro di tesi si proponeva come principale obiettivo la ricerca di uno o più metodi per la modellizzazione numerica dei bulloni. Sono stati individuati due metodi applicabili al modello del pannello irrigidito.

Nel primo metodo si sono utilizzati gli elementi CFAST ed è stato possibile modellare tutti i bulloni presenti. Utilizzando questo metodo, però, si deve tener conto della limitazione sulla dimensione degli elementi finiti della mesh dettata dagli elementi CFAST, i quali impongono una dimensione minima che dipende dal diametro del bullone.

Il secondo metodo utilizzato è stato il *Permanently Glued Contact*, con il quale sono state incollate tra loro le parti presenti nel modello, ovvero il pannello con i correnti. In questo caso, c'è il vantaggio di non avere alcuna limitazione sulla dimensione minima degli elementi finiti. Nel modello era stato scelto però di mantenere la stessa mesh del modello CFAST in modo da avere un confronto diretto tra i due modelli senza avere variazioni nei risultati dovuti alla mesh.

Sembrirebbe quindi più vantaggioso utilizzare la seconda soluzione, ma dipende molto dalle analisi che devono essere svolte. Infatti, con gli elementi CFAST, è possibile avere un maggior controllo da parte dell'utente su diversi parametri dei bulloni ed è utile per un'analisi di dettaglio in cui si vuole conoscere, ad esempio, lo stress dei singoli bulloni e per compiere analisi che studino il fenomeno della fatica.

I due metodi, seppur diversi, hanno prodotto dei risultati numerici equivalenti, con l'unica differenza data dalla maggior rigidità del modello con incollaggio (circa 1%), che però risulta giustificata essendo che la giunzione incollata introduce nella struttura una maggior rigidità (2.4 *Giunzioni incollate*).

Successivamente, per validare i metodi, sono state svolte delle prove sperimentali sul modello reale. Dalle prove sperimentali con gli LVDT si evince che, rispetto ai modelli numerici, la struttura del pannello irrigidito è decisamente più flessibile. Inizialmente si è pensato che la causa potesse risiedere nelle proprietà meccaniche dei materiali, in particolare nella lega di Al 7075, di cui è costituito il pannello. Dopo aver svolto una prova statica su un longherone costituito di tale materiale, è emerso che il valore del modulo di Young era leggermente diverso rispetto a quanto pensato, addirittura maggiore.

È stato quindi aggiornato il valore corretto di rigidità del pannello ed è stata svolta una prova sperimentale in cui è stata variata la configurazione degli LVDT. In questo caso è emersa una disuniformità degli errori percentuali e, inoltre, il valore massimo di deformazione al tip è aumentato di circa l'8% rispetto alle prove precedenti.

La causa della discrepanza potrebbe risiedere nella configurazione o strumentazione utilizzata e, pertanto, è stata svolta un'ulteriore prova sperimentale con il metodo DIC.

Con quest'ultima prova, sono stati validati i risultati della seconda configurazione e si ha avuta la conferma dell'aumento di flessibilità del modello reale.

Infine, per esclusione, si è proceduto ad un'ispezione più approfondita sui singoli bulloni, verificando il serraggio. Durante questa verifica, si è scoperto che molti bulloni erano arrugginiti ed allentati. Inoltre, in alcune zone del pannello irrigidito, è emerso che i fori si erano ovalizzati, probabilmente in seguito a prove svolte in passato con il cassone alare completo. Con l'ispezione sui bulloni è stata trovata la principale causa della flessibilità del modello reale.

Dato che i due modelli numerici sono risultati essere equivalenti, nonostante l'approccio al problema di modellizzazione dei bulloni fosse molto diverso e nonostante la differenza emersa con il modello reale, la coerenza tra i modelli numerici fa presupporre la correttezza dei risultati in condizioni ideali.

Pertanto, in futuro il lavoro può essere proseguito andando testare dei componenti bullonati del cassone che non presentino le problematiche sopra descritte. In questo modo, sarà possibile riprendere le tecniche di modellazione numeriche utilizzate in questo lavoro di tesi e, se il modello lo consente, applicare anche altri *low fidelity models* più articolati, quale il *multi – spring model* di Rutman, e verificare la corrispondenza con il modello reale.

7. Bibliografia

- [1] Marco Esposito. *Shape sensing and load reconstruction for aerospace structures*. Tesi di dottorato, RMIT University, 22 October 2021.
- [2] Ing. Isaia Clemente. *Elementi strutturali in acciaio*. Corso di Progetto di Strutture, pp. 125 – 143, a.a. 2020/21.
- [3] Domenico Raffaele. *Le unioni e i collegamenti: tipologie e verifiche*. Politecnico di Bari. Corso di tecnica delle costruzioni 2, a.a. 2019 – 20.
- [4] Ing. Mauro Linari. *Lap joint modeling*. Hexagon workshop. Turin – March 27th and 29th, 2022.
- [5] Enrico Cestino. *Giunzioni e collegamenti*. Politecnico di Torino. Corso di Ingegneria Aerospaziale, a.a. 2021 – 22.
- [6] A. Rutman, A. Viisoreanu, J. Parad. *Fasteners modeling for MSC Nastran finite element analysis*. 2000 World Aviation Conference. 10 - 12 October 2000.
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2000-5585>
- [7] Altair. *Reference Guide 2024*.
- [8] Siemens. NX Nastran 12. *Quick Reference Guide*.
- [9] MSC Nastran 2022.1. *Quick Reference Guide*.
- [10] Patran. *Preference Guide Volume 3: Implicit Nonlinear, 2021*.
- [11] Simteq. *MSC Nastran Contact*.
- [12] MSC Software. *Webinar- Speed Up Your Contact Analysis Process with MSC Nastran*. 28/02/2018.
- [13] Correlated Solutions Europe. *Principle of Digital Image Correlation*.
- [14] Lavision Focusing on Imaging. *Digital Image Correlation (DIC)*.
- [15] Contributori di Wikipedia. *Correlazione digitale di immagini*. Wikipedia, 12 mag 2024.
- [16] İlker Uysal, Murat Süer, İbrahim Özkol. *Finite Element Modelling and Analysis of Simple Lap Joints*. IEEE. Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST2011. 09-11 June 2011. ISBN:978-1-4244-9616-7
- [17] A. Rutman, J. B. Kogan. *Multi-Spring Representation of Fasteners for MSC/ NASTRAN Modeling*. Proceedings of The First MSC Conference for Aerospace Users, Los Angeles, CA, 1997

[18] P. E. Anuta, "Spatial Registration of Multispectral and Multitemporal Digital Imagery Using Fast Fourier Transform Techniques," in *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 353-368, Oct. 1970. DOI: [10.1109/TGE.1970.271435](https://doi.org/10.1109/TGE.1970.271435)

[19] J. Kim, J. C. Yoon, B. S. Kang. *Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints*. Applied Mathematical Modelling, Volume 31, Issue 5, 2007, pages 895-911.

[20] Yu Fan, Yongzhi Han. *Finite Element Analysis of Multiple Bolted Connection between Composites and Metal Materials*. Advances in Engineering Research, volume 141. DOI: [10.2991/icmmcce-17.2017.251](https://doi.org/10.2991/icmmcce-17.2017.251)

[21] Brian D. Foster. *A novel finite element for modeling a fastener in a lap joint assembly*. Doctor of Philosophy, Wichita State University, December 2014