



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**SIMULAZIONE DI PROCESSI DI FILAMENT WINDING E
PROGETTAZIONE DI MODULI PER UN IMPIANTO
PILOTA**

PROCESS SIMULATIONS AND MODULES DESIGN FOR A
FILAMENT WINDING PILOT PLANT

Relatore:

Prof. Ing. Michela Simoncini

Tesi di Laurea di:

Mattia Bordi

Correlatore:

Prof. Ing. Archimede Forcellese

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Indice delle figure	6
Indice delle tabelle	11
Introduzione.....	12
Capitolo 1 – Stato dell’arte.....	14
1.1 Materiali compositi	14
1.1.1 Introduzione.....	14
1.1.2 Compositi a matrice polimerica	17
1.1.2 Prepreg	25
1.2 Tecnologie di formatura di parti in composito a matrice polimerica	27
1.3 Filament Winding	30
1.3.1 Introduzione	30
1.3.2 Modalità di impregnazione	31
1.3.3 Metodi di avvolgimento	33
1.3.4 Parametri di processo	36
1.3.5 Filament Winding robotizzato	37
1.3.6 Sistemi di Filament Winding	38
1.4 Software utilizzati.....	48
1.4.1 CADWIND	48
1.4.2 Siemens NX.....	52
1.5 Design for Assembly (DfA).....	56
1.5.1 Introduzione	56
1.5.2 Linee guida per il DfA.....	57
Capitolo 2 – Materiali e metodi.....	59

2.1 Problema ed obiettivi.....	59
2.2 Progettazione della macchina di Filament Winding.....	59
2.2.1 Introduzione.....	59
2.2.2 Base di supporto.....	61
2.2.3 Rotazione del mandrino.....	61
2.2.4 Traslazione del carro mobile.....	63
2.2.5 Traslazione della testa di deposizione.....	65
2.2.6 Rotazione della testa di deposizione.....	67
2.2.7 Percorso del towpreg.....	69
2.3 Dimensionamento dei motori.....	71
2.3.1 Introduzione.....	71
2.3.2 Dimensionamento del motore per la rotazione del mandrino.....	74
2.3.3 Dimensionamento del motore per la traslazione della testa di deposizione.....	75
2.3.4 Dimensionamento del motore per porre in rotazione la testa di deposizione.....	76
2.3.5 Dimensionamento del motore per garantire la traslazione del carro mobile.....	76
2.4 Valutazione dei parametri di processo.....	78
2.4.1 Introduzione.....	78
2.4.2 Creazione del modello del mandrino.....	78
2.4.3 Parametri di processo.....	78
Capitolo 3 – Risultati e discussione.....	80
3.1 Risultati della progettazione della macchina di Filament Winding.....	80
3.1.1 Introduzione.....	80
3.1.2 Base di supporto.....	80
3.1.3 Rotazione del mandrino.....	82
3.1.4 Traslazione del carro mobile.....	85
3.1.5 Traslazione della testa di deposizione.....	92

3.1.6 Rotazione della testa di deposizione	93
3.1.7 Percorso del towpreg	97
3.1.8 Assemblato finale.....	101
3.2 Risultati del dimensionamento dei motori	104
3.2.1 Calcoli per il dimensionamento del motore per la rotazione del mandrino	104
3.2.2 Calcoli per il dimensionamento del motore per la traslazione della testa	105
3.2.3 Calcoli per il dimensionamento del motore per porre in rotazione la testa.....	106
3.2.4 Calcoli per il dimensionamento del motore per movimentare il carro mobile ..	107
3.3 Ciclo di assemblaggio	108
3.4 Risultati relativi alla valutazione dei parametri di processo	112
3.4.1 Creazione del modello del mandrino	112
3.4.2 Parametri di processo	114
3.5 Discussione	123
Capitolo 4 – Conclusioni.....	124
Bibliografia.....	126
Sitografia	128
Ringraziamenti.....	129

Indice delle figure

Figura 1.1 Rappresentazione del rinforzo: a fibra lunga, corta e particellare. Fonte:[1]	16
Figura 1.2 Rappresentazione di una tipica microstruttura di PMC fibro-rinforzati. Fonte: [1].....	18
Figura 1.3 Rappresentazione del processo di polimerizzazione delle resine termoindurenti. Fonte: [1].....	19
Figura 1.4 Rappresentazione schematica dei meccanismi di adesione fibra-matrice e dei promotori di adesione. Fonte: [1]	24
Figura 1.5 Illustrazione schematica del processo di impregnazione in soluzione. Fonte: [1]	25
Figura 1.6 Rappresentazione schematica del processo di impregnazione a caldo (hot melt). Fonte: [1].....	26
Figura 1.7 Rappresentazione schematica del processo di wet Filament Winding. Fonte: [7]	32
Figura 1.8 Rappresentazione schematica del processo di dry Filament Winding. Fonte: [1]	32
Figura 1.9 Illustrazione dell'angolo di avvolgimento. Fonte: [1].....	33
Figura 1.10 Metodi di avvolgimento: (a) elicoidale, (b) polare, (c) circonferenziale. Fonte: [1].....	33
Figura 1.11 Rappresentazione delle intersezioni tra le fibre durante il processo di avvolgimento. Fonte: [1].....	34
Figura 1.12 Illustrazione della soluzione per eseguire l'avvolgimento polare. Fonte: [1] .	36
Figura 1.13 Rappresentazione della macchina Pultrex Labwinder. Fonte: [a]	38
Figura 1.14 Rappresentazione della macchina Pultrex Miniwinder. Fonte: [a].....	39
Figura 1.15 Rappresentazione della macchina 2X-23 di X-Winder. Fonte: [b].....	39
Figura 1.16 Rappresentazione della macchina 4X-23 di X-Winder. Fonte: [b].....	40
Figura 1.17 Illustrazione della macchina SC Filament Winder. Fonte: [c]	40
Figura 1.18 Illustrazione della macchina SC+ Filament Winder. Fonte: [c]	41
Figura 1.19 Rappresentazione del sistema SM Filament Winder. Fonte: [c]	41

Figura 1.20 Rappresentazione del sistema SM durante la fabbricazione di un manufatto. Fonte: [c]	42
Figura 1.21 Illustrazione schematica del layout di una macchina di wet-FW a 2 g.d.l. e della corrispondente legenda. Fonte: [9]	43
Figura 1.22 Rappresentazione di una macchina di wet-FW a 2 g.d.l. realizzata. Fonte: [9]	43
Figura 1.23 Illustrazione del disegno meccanico di una macchina di FW a 3 g.d.l. Fonte: [10]	44
Figura 1.24 Rappresentazione di una macchina di FW a 3 g.d.l. in funzione. Fonte: [10].	44
Figura 1.25 Illustrazione schematica di una macchina di FW a 3 g.d.l. controllabile mediante connessione wireless. Fonte: [7]	45
Figura 1.26 Rappresentazione di un sistema di FW a 4 g.d.l. Fonte: [11]	46
Figura 1.27 Illustrazione schematica di una macchina di FW utilizzando prepreg termoplastici e della corrispondente legenda. Fonte: [12]	47
Figura 1.28 Rappresentazione all'interno del software CADWIND di una tipica parte dalla geometria assialsimmetrica. Fonte: [d]	50
Figura 1.29 Rappresentazione all'interno del software CADWIND di una tipica parte dalla geometria non assialsimmetrica. Fonte: [d]	50
Figura 1.30 Visualizzazione dello spessore di un laminato attraverso la scala a colori disponibile in Cadwind. Fonte: [d]	52
Figura 1.31 Rappresentazione dei principali comandi disponibili all'interno del software Siemens NX nell'ambiente Modeling	56
Figura 1.32 Rappresentazione dei principali comandi disponibili all'interno del software Siemens NX nell'ambiente Assembly	56
Figura 2.1 Rappresentazione in vista isometrica del modello 3D del profilato in alluminio	60
Figura 3.1 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del sottoassieme Base di supporto	81
Figura 3.2 Rappresentazione, in vista dal basso (piano xy), del modello CAD del sottoassieme Base di supporto	82
Figura 3.3 Rappresentazione del modello CAD del sottoassieme Rotazione del mandrino posizionato al di sopra della base di supporto	84

Figura 3.4 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del sottoassieme Rotazione del mandrino posizionato al di sopra della base di supporto	85
Figura 3.5 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD della base del carro .	87
Figura 3.6 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del telaio del carro mobile.....	88
Figura 3.7 Rappresentazione del modello CAD del sistema di supporto sinistro del carro	89
Figura 3.8 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del sistema di supporto destro del carro	90
Figura 3.9 Rappresentazione, posteriormente al carro, del modello CAD del sottoassieme Traslazione del carro mobile posizionato sulla base di supporto	91
Figura 3.10 Rappresentazione, in vista isometrica, del sottoassieme Traslazione del carro mobile posizionato sulla base di supporto.....	91
Figura 3.11 Rappresentazione del modello CAD del sottoassieme Traslazione della testa di deposizione assemblato al telaio del carro	93
Figura 3.12 Illustrazione, in vista trimetrica, del modello CAD del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione.....	95
Figura 3.13 Illustrazione del modello CAD del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione	96
Figura 3.14 Illustrazione del modello CAD del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione assemblato al telaio del carro	97
Figura 3.15 Illustrazione del dettaglio del sottoassieme Percorso del towpreg assemblato al telaio: Bobina di towpreg	99
Figura 3.16 Illustrazione del dettaglio del sottoassieme Percorso del towpreg assemblato al telaio: rullo posteriore	100
Figura 3.17 Illustrazione del dettaglio del sottoassieme Percorso del towpreg assemblato alle piastre di supporto per la traslazione della testa: rullo anteriore per lo scorrimento del towpreg.....	101
Figura 3.18 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'assieme della macchina di Filament Winding.....	102
Figura 3.19 Rappresentazione, posteriormente al carro, del modello CAD dell'assieme della macchina di Filament Winding	103

Figura 3.20 Rappresentazione, in vista da destra, del modello CAD dell'assieme della macchina di Filament Winding.....	104
Figura 3.21 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'accoppiamento tra il supporto destro del mandrino e la barra a sezione tripla anteriore	109
Figura 3.22 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'assemblaggio tra il sistema di supporto destro e sinistro del carro, le barre trasversali e longitudinali	110
Figura 3.23 Rappresentazione del modello CAD dell'assemblaggio tra il mandrino e le proprie aste con i rispettivi supporti.....	111
Figura 3.24 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'assemblaggio tra: barre posteriori, base e telaio del carro, Traslazione della testa di deposizione, Rotazione della testa di deposizione e Percorso del towpreg.....	112
Figura 3.25 Rappresentazione della finestra relativa ai parametri necessari per la creazione del modello del mandrino.....	113
Figura 3.26 Rappresentazione, in vista prospettica, del modello del mandrino	114
Figura 3.27 Illustrazione dei valori utilizzati per i parametri presenti nella sezione Material parameter	114
Figura 3.28 Illustrazione dei valori utilizzati per i parametri di avvolgimento nella sezione Winding parameter.....	115
Figura 3.29 Illustrazione dei patterns individuati dal software CADWIND	116
Figura 3.30 Rappresentazione di una fase della simulazione del processo di avvolgimento	117
Figura 3.31 Illustrazione, in vista frontale isometrica a 135°, del mandrino avvolto alla fine della simulazione del processo di avvolgimento	118
Figura 3.32 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista frontale isometrica a 135°, con color scale relativa allo spessore dello strato	119
Figura 3.33 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista posteriore isometrica a 135°, con color scale relativa allo spessore dello strato	120
Figura 3.34 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista frontale, con color scale relativa allo spessore dello strato	121
Figura 3.35 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista posteriore, con color scale relativa allo spessore dello strato	122

Figura 3.36 Rappresentazione della scheda Calculation results presentante il Production time123

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 Distinta di base del sottoassieme Base di supporto.	81
Tabella 3.2 Distinta di base del sottoassieme Rotazione del mandrino	83
Tabella 3.3 Distinta di base del sottoassieme Traslazione del carro mobile.	86
Tabella 3.4 Distinta di base del sottoassieme Traslazione della testa di deposizione.	92
Tabella 3.5 Distinta di base del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione.	94
Tabella 3.6 Distinta di base del sottoassieme Percorso del towpreg.	98

Introduzione

I materiali compositi sono dei sistemi di materiali eterogenei, ottenuti combinando due o più materiali omogenei. Sono stati sviluppati con l'obiettivo di sopperire alla mancanza di adeguate proprietà degli stessi materiali tradizionali omogenei per determinate applicazioni strutturali (principalmente nel settore aeronautico, aerospaziale, della difesa e dello sport). Tipicamente, possiamo considerare tali sistemi di materiali come costituiti da due fasi distinte dal punto di vista chimico, con caratteristiche fisiche e meccaniche differenti ed insolubili l'una nell'altra. Queste due fasi, denominate come matrice e rinforzo, sono separate da un'interfaccia riconoscibile che costituisce una terza zona intermedia.

Grazie alle innumerevoli peculiarità, tali materiali garantiscono la possibilità di realizzare soluzioni innovative e di poter essere impiegati pressoché in qualsiasi applicazione.

Tra le varie tipologie di materiali compositi, quelli a matrice polimerica (PMC) sono indubbiamente i più utilizzati, ricoprendo la maggioranza delle applicazioni industriali.

Essi consentono di combinare le prestazioni dei polimeri (resistenza chimica, durabilità e leggerezza) con quelle della fase di rinforzo (rigidezza, resistenza meccanica e resistenza all'usura). Tra i PMC, i più diffusi sono quelli rinforzati tramite fibre di carbonio, per via delle loro caratteristiche.

Una delle tecnologie di formatura di manufatti in composito a matrice polimerica che consente di realizzare parti caratterizzate da proprietà meccaniche elevate e ripetibili, grazie alla possibilità di automatizzare il processo, è quella di Filament Winding. Essa permette di ottenere parti dalla superficie esterna assimilabile a quella di un solido di rivoluzione. La modalità di impregnazione del rinforzo permette di classificare i processi di formatura per avvolgimento di fibre in processi di avvolgimento per via umida (wet-FW) e processi di avvolgimento di preimpregnati (dry-FW); invece, il metodo di avvolgimento consente di classificarli in avvolgimento elicoidale ed avvolgimento polare.

In dettaglio, in tale studio, mediante il software Siemens NX, è stata progettata con successo una macchina di dry-Filament Winding a quattro gradi di libertà. Essi sono: rotazione del mandrino, traslazione del carro mobile, traslazione della testa di deposizione e rotazione della stessa.

Nella progettazione è stato incluso anche il dimensionamento dei motori necessari per i gradi di libertà descritti.

La macchina è stata suddivisa nei seguenti sei moduli principali: Base di supporto, Rotazione del mandrino, Traslazione del carro mobile, Traslazione della testa di deposizione, Rotazione della testa di deposizione e Percorso del towpreg.

Il tutto rispettando i vincoli di: semplicità, economicità ed ingombro (in scala di laboratorio). Inoltre, è stato brevemente descritto il ciclo di assemblaggio del sistema progettato.

In seguito, mediante il supporto di CADWIND, un software di simulazione del processo di avvolgimento, è stata eseguita una valutazione dei parametri del processo di avvolgimento per un singolo strato di laminato.

Infine, è stato anche calcolato il tempo di produzione di quest'ultimo.

Capitolo 1 – Stato dell’arte

1.1 Materiali compositi

1.1.1 Introduzione

I materiali compositi sono dei sistemi di materiali eterogenei, ottenuti combinando due o più materiali omogenei. Sono stati sviluppati con l’obiettivo di sopperire alla mancanza di adeguate proprietà degli stessi materiali tradizionali omogenei per determinate applicazioni strutturali (principalmente nel settore aeronautico, aerospaziale, della difesa e dello sport). I compositi, infatti, si basano sul principio delle azioni combinate, secondo il quale, combinando adeguatamente le proprietà dei propri costituenti, è possibile ottenere un componente finale con le stesse proprietà ottimizzate. Tipicamente, possiamo considerare tali sistemi di materiali come costituiti da due fasi distinte dal punto di vista chimico, con caratteristiche fisiche e meccaniche differenti ed insolubili l’una nell’altra (per questo si parla di sistemi eterogenei). Queste due fasi, denominate come *matrice* e *rinforzo*, sono separate da un’*interfaccia* riconoscibile che costituisce una terza zona intermedia.

Matrice e rinforzo assolvono compiti differenti: la prima, continua, funge da legante, permette di distribuire i carichi uniformemente al rinforzo e lo protegge dagli effetti dell’ambiente; il secondo, disperso nella matrice, ha proprietà fisiche e meccaniche nettamente superiori alla prima, conferendo al composito, resistenza, rigidità ed altre proprietà. Comunemente, il rapporto tra il modulo di elasticità del rinforzo e quello della matrice è pari o superiore a quattro.

Grazie alle innumerevoli peculiarità, tali materiali garantiscono la possibilità di realizzare soluzioni innovative e di poter essere impiegati pressoché in qualsiasi applicazione.

Sulla base della matrice e del rinforzo, i compositi vengono classificati su più livelli:

- primo livello, ovvero basato sulla tipologia di matrice;
- secondo livello, cioè basato sulla forma del rinforzo.

La *classificazione di primo livello* prevede la suddivisione dei compositi in tre famiglie: CMC (compositi a matrice ceramica), MMC (compositi a matrice metallica), PMC (compositi a matrice polimerica). Nei CMC, diversamente dai PMC e MMC, non si denota

una rilevante differenza in termini di modulo elastico tra le due fasi, perciò, per essi, la fase di rinforzo svolge un'azione tenacizzante, con il fine di limitare la fragilità propria della matrice ceramica.

La fase di rinforzo, indipendentemente dalla forma, è caratterizzata da almeno una dimensione nell'ordine dei micrometri. Il rinforzo può assumere due geometrie: *fibrosa* o *particellare*. Questo permette, quindi, di individuare due macro-famiglie di compositi (*classificazione di secondo livello*):

- compositi rinforzati con particelle (*particle composites*);
- compositi rinforzati con fibre (*fibrous composites*).

Siccome le particelle possono assumere un'orientazione casuale o preferenziale, i *particle composites* subiscono un'ulteriore divisione.

Invece, nel caso di rinforzo fibroso, vi sono altri aspetti che permettono di classificare ulteriormente i *fibrous composites*:

- numero degli strati: compositi a singolo strato e compositi multistrato (laminati ed ibridi);
- lunghezza delle fibre: fibre corte o *discontinue* (lunghezza nell'ordine del millimetro o inferiore) e fibre lunghe o *continue* (lunghezza pari alla massima dimensione del componente da fabbricare);
- collocazione delle fibre: unidirezionale, bidirezionale e spaziale.

Di seguito, nella Figura 1.1 vengono rappresentate tre tipologie di rinforzo: a fibra lunga, corta e particellare.

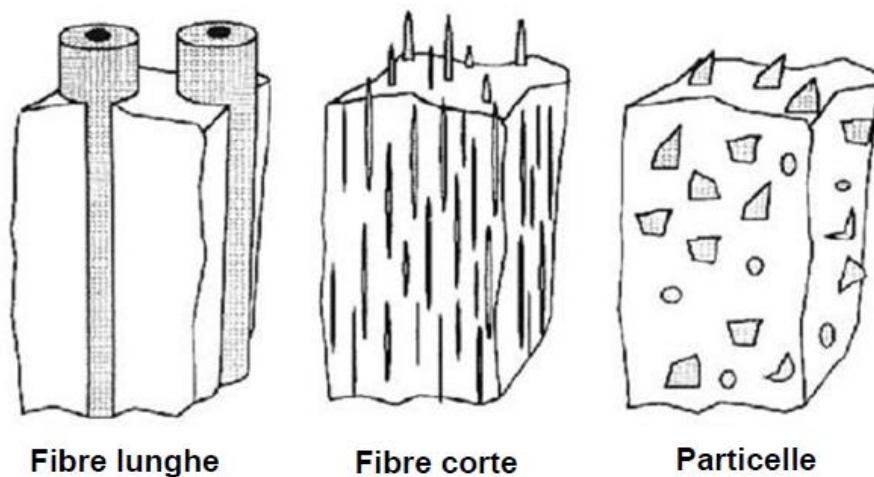


Figura 1.1 Rappresentazione del rinforzo: a fibra lunga, corta e particellare. Fonte:[1]

Le proprietà dei compositi dipendono fortemente dal tipo, dimensione forma, concentrazione, distribuzione, orientamento dei componenti che li costituiscono e le loro caratteristiche meccaniche sono influenzate dai meccanismi di trasferimento degli sforzi tra matrice e rinforzo. Più il trasferimento è efficace, più le prestazioni dei compositi aumentano. Dato che l'aumento di tale efficacia è ottenibile sia attraverso un'interfaccia efficiente, che mediante una superficie di contatto tra le fasi più estesa, si ottengono dei compositi con prestazioni superiori quando vengono rinforzati con fibre lunghe. Esse, inoltre, per via delle loro proprietà e della possibilità di controllarne l'orientazione, consentono di ottimizzare la struttura del composito. Le fibre principalmente utilizzate sono quelle di vetro, di carbonio, aramidiche e naturali.

Annegando, nei compositi, sensori dediti alla verifica dell'integrità strutturale del materiale durante l'esercizio, si ottengono strutture definite smart (*compositi smart*).

Altra tipologia innovativa di compositi sono gli *auto-riparanti*, che sfruttano resina non polimerizzata contenuta all'interno di microsferi o fibre cave. Nel caso di rottura, entrando a contatto con particelle catalitiche contenute nella matrice solida, la resina indurisce. Questo meccanismo consente di riparare, parzialmente o totalmente, un'eventuale rottura in modo autonomo. [1], [2]

1.1.2 Compositi a matrice polimerica

Tra le varie tipologie di materiali compositi, quelli a matrice polimerica (PMC) sono indubbiamente i più utilizzati, ricoprendo la maggioranza delle applicazioni industriali. [1] Come affermato nell'articolo di Kumar Sharma et al. [3], per via delle loro qualità e per una maggior facilità di lavorazione, sono i più comuni tra i materiali compositi, superando la concorrenza dei CMC e MMC nel settore automobilistico, edilizio, biomedicale, aeronautico; tale tendenza dovrebbe confermarsi nel futuro, sia per le caratteristiche dei PMC, sia per il loro potenziale in termini di sostenibilità.

I PMC consentono di combinare le prestazioni dei polimeri (resistenza chimica, durabilità e leggerezza) con quelle della fase di rinforzo (rigidezza, resistenza meccanica e resistenza all'usura). Pertanto, si ottengono strutture che:

- integrano varie funzioni e proprietà;
- non sono ottenibili con i materiali tradizionali;
- sono caratterizzate da un'elevata resistenza specifica (rapporto tra la resistenza meccanica ed il peso) e da un'elevata rigidezza specifica (rapporto tra la rigidezza specifica ed il peso);
- accrescono l'efficienza energetica;
- subiscono meno gli effetti di degrado dovuti all'ambiente, rispetto alle stesse strutture ottenute con materiali tradizionali, comportando un ampliamento del ciclo di vita di tali manufatti.

I compositi a matrice polimerica vengono suddivisi ulteriormente, a seconda della tipologia di polimero utilizzato per la matrice, in:

- compositi a matrice termoindurente;
- compositi a matrice termoplastica.

Prendendo in considerazione i PMC fibro-rinforzati, di cui si riporta un esempio della microstruttura nella Figura 1.2, è necessario che la resina abbia una ridotta viscosità, una

buona capacità di bagnare le fibre durante l'impregnazione e la formatura, e che solidifichi in breve tempo per conferire le caratteristiche finali al manufatto.

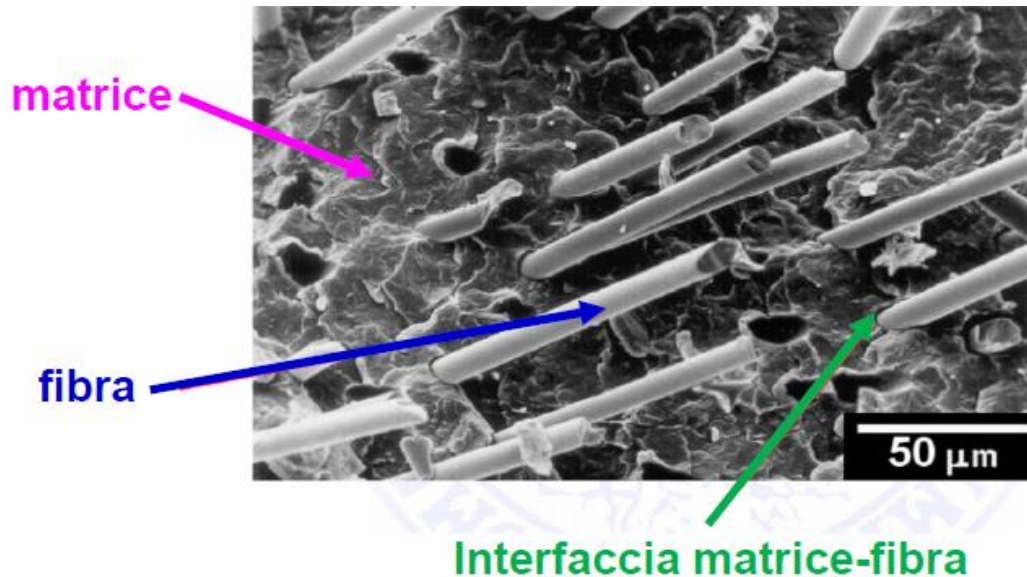


Figura 1.2 Rappresentazione di una tipica microstruttura di PMC fibro-rinforzati. Fonte: [1]

Se il composito viene sollecitato in direzione perpendicolare alla disposizione delle fibre, le proprietà meccaniche di esso dipendono esclusivamente dalle proprietà della matrice e dell'interfaccia. La stessa matrice, a causa della fragilità del rinforzo, ha il compito di assorbire l'energia (ad esempio dovuta ad impatti) ed è quindi essa che conferisce tenacità al materiale composito.

Le *resine termoindurenti* sono le più utilizzate nei PMC. Si trovano, di solito, allo stato liquido a temperatura ambiente. Questo risulta essere un vantaggio, poiché permette di realizzare il processo di impregnazione a tale temperatura.

Esse induriscono mediante il processo di *polimerizzazione* o cura, che può essere attivato mediante calore (attivazione termica) o mediante indurente (attivazione chimica), è esotermico e genera trasformazioni chimiche irreversibili. Durante la polimerizzazione, infatti, si genera un reticolo tridimensionale tra i monomeri di partenza (reticolazione), che consente loro di raggiungere permanentemente lo stato solido.

Come rappresentato in Figura 1.3, la gelificazione e la vetrificazione sono le principali trasformazioni che avvengono durante la reticolazione e precisamente, la prima riguarda il

passaggio dallo stato liquido a quello gommoso, la seconda riguarda il passaggio dallo stato gommoso a vetroso che determina la fine della reticolazione.

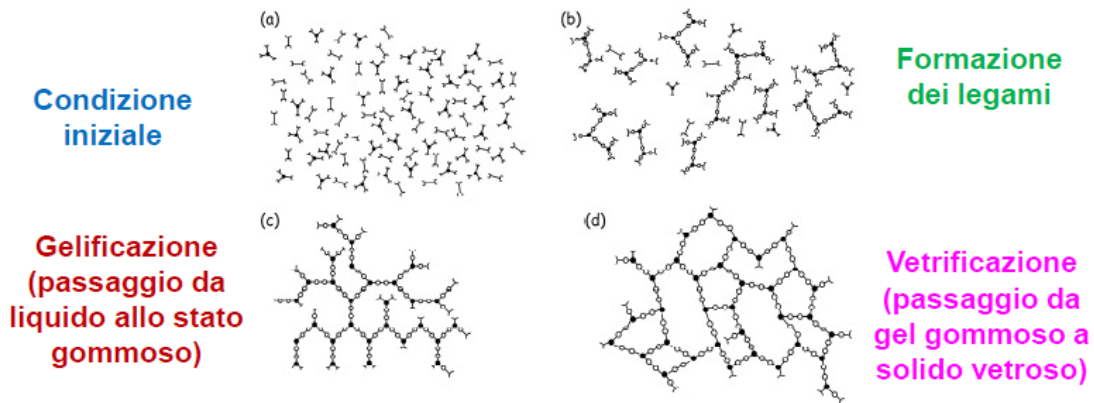


Figura 1.3 Rappresentazione del processo di polimerizzazione delle resine termoindurenti. Fonte: [1]

Tali resine hanno una struttura vetrosa, perciò non presentano un punto di fusione. Pertanto, se riscaldate alla temperatura di transizione vetrosa, dopo la polimerizzazione, rammolliscono, con conseguente degrado delle proprietà. Di fatto, la temperatura di transizione vetrosa è una caratteristica fisica fondamentale di tali resine, infatti:

- a temperatura inferiore, la resina reticolata è rigida, resistente e poco deformabile;
- a temperatura superiore, la resina assume le proprietà caratteristiche di una gomma, ovvero una rigidità molto bassa ed elevata deformabilità;
- limita la massima temperatura alla quale il composito può essere sottoposto in esercizio.

Il tipo di resina, di indurente e le condizioni di processo influenzano il tempo necessario per completare la polimerizzazione. Il tempo di cura deve essere adeguato, perché, sia in caso di un tempo non sufficiente che eccessivo, si presentano problematiche. Se il tempo di cura dovesse essere troppo breve, si rischierebbe di rendere difficoltose le operazioni di impregnazione, comportando una non completa impregnazione del rinforzo ed una non formazione dell'interfaccia. Se i tempi di cura dovessero essere troppo lunghi, si otterrebbe

una bassa produttività del processo tecnologico, che risulterebbe essere economicamente svantaggioso. Data l'impossibilità di poter rieseguire il ciclo, risulta impossibile separare la matrice termoindurente dal rinforzo. Questo comporta un'importante problematica in termini ambientali, ovvero un complicato smaltimento dei rifiuti.

Le principali resine termoindurenti utilizzate come matrici per l'ottenimento di compositi a matrice polimerica ad elevate prestazioni sono: poliestere, epossidiche (caratterizzate dalle migliori proprietà), fenoliche, siliconiche, vinil estere, bismaleimmidiche.

Le *resine termoplastiche*, invece, sono caratterizzate da catene poco ramificate, non legate tra loro. Se portate a fusione mediante riscaldamento, subiscono una diminuzione di viscosità, passando dallo stato vetroso allo stato fluido. Siccome non subiscono variazioni dal punto di vista chimico, il passaggio è reversibile, infatti, se successivamente raffreddate, consolidano. Pertanto, i compositi a matrice termoplastica possono subire più processi di formatura, con un susseguirsi di fusioni e solidificazioni. Ad ogni ciclo, però, la resina subisce una progressiva degradazione che ne limita la lavorabilità. Per tale motivo, le resine termoplastiche rilavorate vengono tipicamente utilizzate in quegli impieghi dove sono richiesti dei requisiti inferiori. Presentano, tipicamente, una struttura amorfa e difficilmente cristallizzano dopo raffreddamento. La cristallizzazione può avvenire, ma non si ottengono mai strutture completamente cristalline, al massimo semicristalline, caratterizzate sia dalla presenza di zone cristalline che amorfè. Pertanto, sia le resine amorfè, che le zone amorfè delle resine semicristalline manifestano la transizione vetrosa. PEI (polieterimmide), PPS (polifenilensolfuro), poliammide-6 (PA-6), polipropilene (PP), polietere etere chetone (PEEK) sono le principali resine utilizzate per l'ottenimento di PMC a matrice termoplastica. Confrontando le due tipologie di resine, le termoplastiche sono più economiche, riciclabili, risentono meno delle condizioni ambientali, possono subire processi di saldatura e, non avendo reticolazioni, non sono soggette a scadenza e sono più tenaci. Di contro le termoindurenti hanno proprietà meccaniche generalmente superiori.

I compositi termoplastici consolidano e vengono formati in tempi brevi, permettono di ottenere, in maniera semplice e veloce, parti dalla geometria complessa; di contro la temperatura che possono sopportare, quando posti in esercizio, è relativamente bassa.

In merito alla fase di rinforzo utilizzata nei PMC, come precedentemente detto, essa può essere di tipo particellare o fibroso. Le fibre sono caratterizzate da un'elevata perfezione strutturale, per via delle dimensioni ridotte. Questo, unito alle caratteristiche tipiche dei

materiali che le costituiscono, garantisce un'elevata resistenza meccanica ed un elevato modulo elastico. Di conseguenza hanno una resistenza specifica (rapporto tra resistenza meccanica e densità) ed un modulo specifico (rapporto tra modulo di elasticità e densità) di gran lunga maggiore rispetto a quelli dei materiali tradizionali.

Come accennato nel sottoparagrafo 1.1.1, le principali tipologie di rinforzi fibrosi utilizzati nei PMC sono le fibre di vetro, carbonio, aramidiche e naturali.

Le *fibre di vetro* sono le più diffuse nel campo dei compositi, poiché forniscono buone proprietà meccaniche in relazione al costo. In commercio ne sono disponibili di varie tipologie (E, S, C, ...), conferendo caratteristiche differenti al composito. Sono, di fatto, le fibre sintetiche con la maggior densità, hanno una ridotta resistenza alla sollecitazione di fatica e sono elettricamente isolanti.

Le *fibre aramidiche*, invece, sono caratterizzate da una bassa densità e dalla più elevata resistenza specifica tra le fibre, hanno un'accentuata anisotropia, un'elevata resistenza al danno da impatto o da altri carichi dinamici ed un coefficiente di espansione termica negativo. A ciò si aggiungono una bassa resistenza a compressione e difficoltà di taglio e lavorabilità. Il Kevlar è sicuramente il nome commerciale più comune tra le fibre aramidiche. Per via del maggior interesse verso le problematiche ambientali e per le normative antinquinamento sempre più stringenti, stanno trovando sempre maggior impiego le fibre naturali. Esse sono suddivise in: vegetali, animali, minerali. Indubbiamente, rispetto alle altre tipologie di fibre, garantiscono una maggior sostenibilità, a costi più bassi, ma come prevedibile, soffrono di numerosi svantaggi quali: bassa stabilità termica e degradazione, idrofilia, proprietà variabili e proprietà meccaniche peggiori tra tutte le tipologie di fibre. Le *fibre naturali* trovano un'interessante applicazione nei biocompositi, ovvero compositi costituiti da una matrice in resina biologica (bioresina) e, appunto, da un rinforzo in fibre naturali (biofibre). Essi garantiscono riciclabilità e tutela dell'ambiente, poiché biodegradabili, ed un aumento delle proprietà meccaniche a fronte di costi contenuti.

Le *fibre di carbonio* vengono prodotte mediante pirolisi e carbonizzazione di precursori, solitamente polimerici. Con carbonizzazione parziale si ottengono, appunto, fibre di carbonio, mentre, con una carbonizzazione totale si ottengono fibre di grafite. Sulla base del materiale del precursore utilizzato, possono essere suddivise in: ex-PAN (più comuni), ex-cellulosa, ex-pitch. La temperatura raggiunta durante il processo influenza

significativamente le proprietà meccaniche di tali fibre. Le fibre ex-PAN sono suddivise ulteriormente in:

- UHM (*Ultra High Modulus*);
- HM (*High Modulus*);
- IM (*Intermediate Modulus*);
- LM (*Low Modulus*);
- HTS (*High Tensile Strength*).

Le fibre di carbonio sono particolarmente anisotrope, con caratteristiche superiori lungo la direzione di sviluppo della fibra.

Garantiscono molteplici vantaggi come resistenza specifica e modulo specifico estremamente elevati, coefficiente di dilatazione termica molto basso, resistenza a fatica e conduttività termica elevate. Di contro, tra gli svantaggi si annoverano un allungamento a rottura ridotto, una resistenza agli urti bassa ed un costo sicuramente elevato. Le fibre di carbonio e le fibre di vetro subiscono dei trattamenti superficiali con i medesimi scopi: protezione, prevenzione delle rotture, miglioramento della lavorabilità ed aumento della compatibilità con la matrice. Pertanto, questi trattamenti si possono suddividere in:

- trattamenti per migliorare la compatibilità tra fibra e matrice;
- trattamenti protettivi della fibra (*sizing*).

Le fibre di carbonio trovano principalmente impiego come fase di rinforzo nei CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*). [1]

Nell'articolo di Zhang et al. [4], i CFRP vengono descritti come dei compositi a matrice polimerica particolarmente adatti per quelle applicazioni in cui sono essenziali caratteristiche di elevata resistenza e basso peso. Nel medesimo articolo viene descritta una forte crescita, a partire dal 2010, dell'utilizzo dei CFRP in campo industriale (senza considerare il settore aerospaziale).

Secondo Chen et al. [5], la maggior parte dei CFRP sono costituiti da un rinforzo fibroso in carbonio e da una matrice in resina termoindurente, inoltre, per Schey et al. [6] sono principalmente disponibili sottoforma di prepreg.

Come precedentemente affermato, le caratteristiche dell'interfaccia fibra-matrice influenzano le proprietà meccaniche del composito e sono specifiche per il sistema matrice-rinforzo preso in considerazione. Di fatto, l'interfaccia rappresenta una zona di *discontinuità* in termini di: natura chimica, struttura e proprietà meccaniche e fisiche. Per ottenere adesione tra le due fasi, è necessario che esse siano portate a stretto contatto, perciò, la bagnabilità, cioè la capacità della matrice di spandersi sulla superficie del rinforzo, diventa un parametro fondamentale. Inoltre, sempre nell'ottica dell'ottenimento di adesione, è fondamentale che si inneschino dei meccanismi.

Il primo meccanismo di adesione è di tipo meccanico ed è correlato alla possibilità che la matrice penetri nelle asperità del rinforzo. Aumentando la rugosità del rinforzo, l'efficacia di tale meccanismo tende ad aumentare. Permette di trasmettere principalmente sforzi di taglio, ma, da solo, non è sufficiente a garantire un'efficiente trasmissione degli sforzi dalla matrice al rinforzo.

Il secondo meccanismo è di tipo fisico ed è il risultato di interazioni elettrostatiche e/o di legami secondari tra matrice e rinforzo. Seppur le interazioni siano deboli, l'adesione fisica sarebbe in grado di garantire ottima adesione in presenza di perfetto contatto tra le fasi. Aspetti, però, come contaminazioni e difetti superficiali ne riducono notevolmente l'efficienza.

L'ultimo meccanismo di adesione è di tipo chimico e garantisce un'efficiente trasmissione degli sforzi. Deriva dalla formazione di legami di tipo chimico tra la matrice ed il rinforzo e più numerosi sono i legami che si formano, migliore è l'adesione chimica. Naturalmente è fondamentale che il rinforzo presenti, sulla sua superficie, gruppi chimici reattivi compatibili con la matrice. Pertanto, i trattamenti che vengono realizzati sulle fibre hanno proprio l'obiettivo sia di migliorarne la bagnabilità che la reattività.

Fondamentali sono anche i promotori di adesione, ovvero, molecole che formano legami forti con i gruppi reattivi presenti sulla superficie del rinforzo e che interagiscono per reazione o interdiffusione con la matrice. Essenzialmente, modificano i meccanismi precedentemente discussi, consentendo, così, di migliorare l'adesione e di conseguenza anche le proprietà generali del composito.

La Figura 1.4 rappresenta schematicamente i meccanismi appena trattati ed i promotori di adesione.

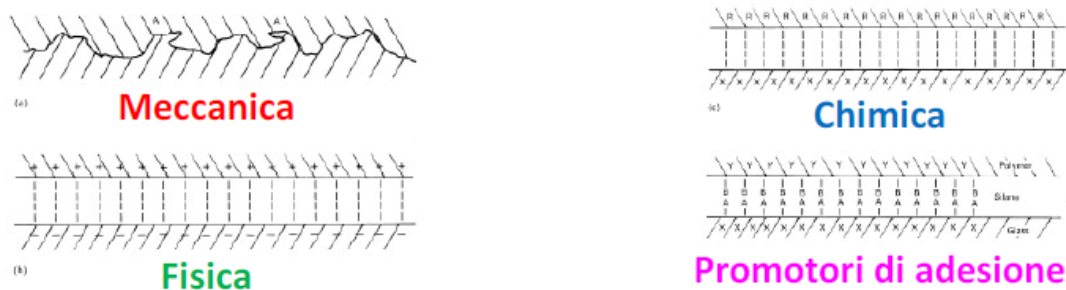


Figura 1.4 Rappresentazione schematica dei meccanismi di adesione fibra-matrice e dei promotori di adesione. Fonte: [1]

Nel contesto dei PMC fibro-rinforzati, grazie alla dispersione di *nanocariche* nella matrice, è possibile arricchire l’interfaccia matrice-rinforzo. Ciò permette l’aumento delle prestazioni meccaniche del composito, in particolare quelle che dipendono dalla matrice, a discapito di un comprensibile aumento dei costi. Le nanocariche sono di interesse per via delle loro eccezionali caratteristiche e dell’elevatissimo rapporto tra superficie e volume. Con esse nascono così i compositi trifase, i più complessi, costituiti da matrice, fibre e nanocariche. Data la presenza di rinforzi a scala differente (dimensioni micrometriche per le fibre e nanometriche per le nanocariche), sono denominati come *compositi multiscala fibro-rinforzati*.

Le nanocariche sono delle particelle con almeno una dimensione al di sotto dei cento nanometri e possono o avere tutte le dimensioni al di sotto dei cento nanometri (zero-dimensionali), o essere di tipo fibroso (mono-dimensionali), oppure presentarsi in forma lamellare (bi-dimensionali). I nanotubi ed il grafene sono tra le nanocariche più interessanti nell’ambito dei compositi.

Il grafene (bi-dimensionale) possiede una struttura esagonale in piano simile alla grafite, ma con spessore di “un atomo”. Di conseguenza è caratterizzato da un rapporto tra superficie e volume elevatissimo. Esistono versioni più economiche ed anche più facili da produrre, come l’ossido di grafene (GO) e l’ossido di grafene ridotto (RGO).

I nanotubi (mono-dimensionali) di carbonio possono essere visualizzati come singoli strati di grafene che vengono arrotolati ottenendo una geometria cilindrica. Sono suddivisi in: nanotubi a parete singola (SWCNT), che presentano eccellenti proprietà, e nanotubi a parete multipla (MWCNT), che sono maggiormente facili ed economici da produrre. [1]

1.1.2 Prepreg

I *prepreg*, che sono utilizzati in tanti processi produttivi, sono ottenuti impregnando il rinforzo con la quantità desiderata di matrice, tipicamente in resina termoindurente per via di una maggior facilità di manipolazione. Sono semilavorati che garantiscono costanza nel rapporto fibre/matrice e, di conseguenza, ripetibilità delle caratteristiche del materiale. Esistono due processi di impregnazione con resina termoindurente: in *soluzione* o a caldo (*hot melt*).

Il primo processo prevede di immergere le fibre in un bagno di resina in soluzione con un solvente che ha il compito di ridurre la viscosità e favorire l'impregnazione del rinforzo. Per eliminare la resina in eccesso, il preimpregnato passa attraverso una serie di rulli e successivamente viene riscaldato in forno per eliminare la maggior parte del solvente. Siccome la reticolazione determina una certa appiccicosità, si utilizzano film distaccanti in polietilene per evitare che i vari strati aderiscano tra loro. La Figura 1.5 seguente illustra schematicamente il processo di impregnazione in soluzione.

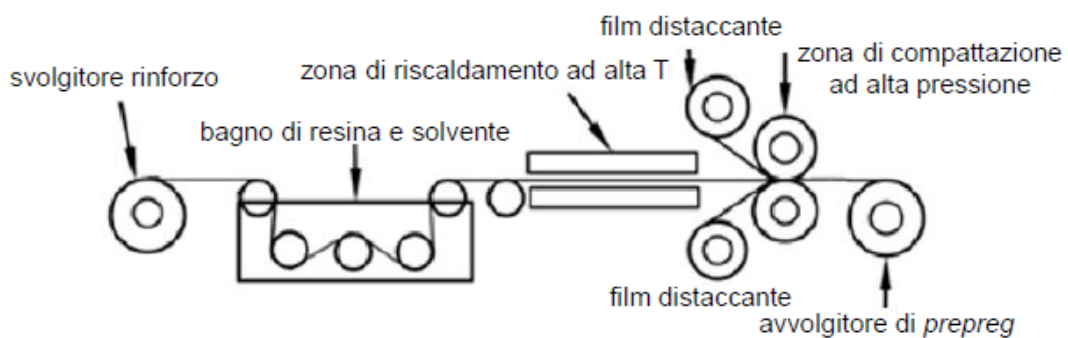


Figura 1.5 Illustrazione schematica del processo di impregnazione in soluzione. Fonte: [1]

La presenza di solvente volatile comporta problematiche ambientali ed operative, mentre la presenza di solvente residuo può interferire con la laminazione, determinando difetti di compattazione e/o vuoti.

Pertanto, nascono i processi di impregnazione a caldo (hot melt) con l'obiettivo di superare questi inconvenienti. Le fibre o i tessuti secchi vengono convogliati tra due film continui di resina supportati da carta siliconata e vengono fatti passare attraverso un sistema di rulli di compattazione riscaldati, che, imponendo pressione, regolano lo spessore. Prima di ottenere il rotolo, il materiale passa attraverso dei rulli di raffreddamento. Tale processo è rappresentato schematicamente nella Figura 1.6 sottostante.

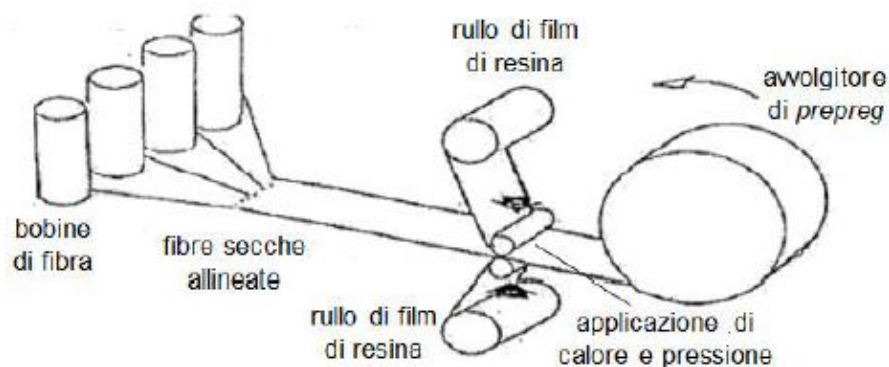


Figura 1.6 Rappresentazione schematica del processo di impregnazione a caldo (hot melt). Fonte: [1]

I preimpregnati sono disponibili con frazione volumetrica delle fibre variabile, con rinforzo fibroso in formato sia unidirezionale che di tessuto, con diverse tipologie di fibra e resina. Sovrapponendo vari strati di prepeg è possibile ottenere lo spessore desiderato. A tal proposito, il grado di appiccicosità (*tack level*) è una caratteristica fondamentale dei preimpregnati con resina termoindurente. Permette ad essi di aderire alle superfici degli stampi ed ai vari strati, evitando movimenti indesiderati. Dipende dal grado di polimerizzazione e dal rapporto resina/fibre.

L'utilizzo di tali semilavorati consente di trarre molti vantaggi, tra cui un miglior controllo del tenore di resina e rinforzo presenti, un'impregnazione più uniforme, l'ottenimento di prestazioni meccaniche superiori, una lavorazione più semplice, rapida e più pulita e la possibilità di utilizzarli per realizzare strutture sandwich. Di contro, la limitata capacità dei

prepreg di conformarsi alla superficie della forma (drappabilità) ne rende difficoltoso l'utilizzo per ottenere parti geometricamente complesse. [1]

1.2 Tecnologie di formatura di parti in composito a matrice polimerica

I PMC vengono formati deponendo il composito sullo stampo che conferisce al materiale la forma desiderata grazie al processo di consolidamento. Le tecnologie di formatura si possono suddividere in due categorie:

- tecnologie basate sulla sovrapposizione di lamine in uno stampo (processi di *lay-up*);
- tecnologie che si basano sulla deposizione a spruzzo di fibre discontinue sullo stampo (processi di *spray-up*).

A loro volta i processi di lay-up si suddivono in:

- tecnologie a *stampo aperto*, di cui ne fanno parte la laminazione manuale, la formatura in sacco (in forno ed in autoclave), il Filament Winding (FW), l'Automated Tape Laying (ATL) e l'Automated Fiber Placement (AFP);
- tecnologie a *stampo chiuso*, ovvero Resin Transfer Moulding (RTM), Resin Infusion under Flexible Tool (RIFT) e la pultrusione.

La *laminazione manuale*, tipicamente eseguita con stampo aperto, prevede di disporre il rinforzo secco in uno stampo femmina nelle direzioni desiderate e di eseguire l'impregnazione con un polimero miscelato con il reticolante utilizzando un pennello. Mediante un rullo si compattano gli strati con l'obiettivo di impregnare correttamente il rinforzo.

Le fibre continue, costituenti le lamine, vengono disposte manualmente sullo stampo, o lungo la stessa direzione (unidirezionali), o in direzioni differenti (tessuti). Si parla di laminazione a umido (*wet lay-up*) quando l'impregnazione delle lamine viene realizzata direttamente nello stampo, mentre, quando l'impregnazione è precedente alla disposizione delle lamine allora si parla di laminazione a secco (*dry lay-up*).

Per ottenere una maggior qualità si può ricorrere all'uso di un film flessibile, con il quale ricoprire lo stampo, ed alla creazione del vuoto. Così la pressione dell'aria assicura una corretta impregnazione delle fibre e compattazione degli strati. Tipicamente, questa tecnologia viene utilizzata per volumi produttivi ridotti.

La *formatura in sacco* consiste nel posizionare il prepreg nello stampo e racchiudere il laminato in un sacco da vuoto. La polimerizzazione viene ottenuta portando il sacco, nel quale è stato creato il vuoto, ad una determinata temperatura, a seconda della tipologia di matrice. Pertanto, viene inserito in un forno se non è prevista l'applicazione di pressione esterna, oppure in un'autoclave se si prevede di combinare una pressione esterna con l'azione del vuoto. Automatizzando la laminazione si ottiene una produzione più veloce, efficiente e ripetibile. Tale tecnologia permette di ottenere parti con elevate proprietà meccaniche.

Il *Filament Winding* permette di ottenere parti come tubazioni e serbatoi attraverso l'avvolgimento fibre impregnate attorno ad un supporto rotante (mandrino).

L'*Automated Tape Laying* e l'*Automated Fiber Placement* sono le principali tecnologie di fiber placement, nate con l'obiettivo di superare i limiti del lay-up manuale. Prevedono il posizionamento di fibre in maniera automatizzata. Queste tecnologie si basano sulla sovrapposizione di strati costituiti da nastri o tow preimpregnati unidirezionali che vengono depositati nella direzione desiderata e compattati mediante un rullo. La testa di deposizione è movimentata da sistemi automatizzati, mentre la presenza di una sorgente di calore solidale ad essa rende possibile la polimerizzazione durante la deposizione. Le tecnologie automatizzate garantiscono importanti vantaggi, come elevate velocità di deposizione, ripetibilità ed ottenimento di manufatti con elevate proprietà meccaniche.

L'ATL permette la deposizione di un unico nastro largo o di pochi nastri simultaneamente sulla superficie di uno stampo. Assicura una produttività elevata ed affidabilità per la realizzazione di laminati piani o con ridotti valori di curvatura.

L'AFP è una tecnologia nata per poter realizzare parti con curvature elevate senza la formazione di grinze, di fatto non ottenibili mediante l'ATL. I sistemi AFP sono in grado di depositare un gran quantitativo di tape simultaneamente, con larghezza di molto inferiore a quella concessa nei sistemi ATL. Il vantaggio che si ottiene è quello di poter posizionare i nastri seguendo traiettorie curvilinee, senza che le fibre si ripieghino su se stesse, in modo

da permettere la realizzazione di parti dalla geometria complessa. Di contro, si ha un sensibile aumento di difetti che si formano tra i nastri, come gli overlap ed i gap.

La tecnologia di *Resin Transfer Moulding* consiste nel posizionare una preforma di fibra secca all'interno dello stampo aperto, chiudere lo stampo, iniettare la resina liquida sotto pressione e polimerizzarla a stampo chiuso mediante il riscaldamento non uniforme di stampo e controstampo. Si ottengono manufatti di dimensioni limitate, con prestazioni meccaniche non particolarmente elevate, ma la possibilità di automatizzare alcune fasi del processo assicurano una buona ripetibilità del processo stesso.

Il processo *RIFT* sfrutta uno stampo chiuso con controstampo costituito da un sacco elastomerico. Deriva dall'RTM e si compone di diverse fasi, come il posizionamento del rinforzo sullo stampo, la formazione del sacco, creazione del vuoto tramite aspirazione dell'aria presente tra sacco e stampo ed afflusso di resina dovuto alla depressione, fino alla completa impregnazione del rinforzo (infusione di resina). Durante il processo, la resina rimane allo stato liquido: l'impregnazione deve essere eseguita in un intervallo di tempo inferiore al tempo necessario per la gelificazione. Similmente a quanto visto per l'RTM, si ottengono manufatti con prestazioni meccaniche non elevate, ma di grandi dimensioni. La possibilità di automatizzare le fasi del processo è moderata, pertanto, non è assicurata una buona ripetibilità. Riduce il contatto dell'operatore con la resina liquida, così come con i suoi componenti volatili emessi durante il processo.

La *pultrusione* è una tecnologia che permette di ottenere profilati caratterizzati da una sezione trasversale costante ed asse rettilineo in maniera continuativa. Per generare la forza di tiro (*pull*) si utilizza un sistema di trascinamento. Le fibre attraversano in un primo momento un bagno di resina e successivamente uno stampo riscaldato (filiera o trafilatura) che permette il verificarsi della polimerizzazione e che conferisce la forma finale richiesta. Durante il processo è poi possibile tagliare a misura il profilo. La formatura per pultrusione richiede un rinforzo fibroso continuo ed una matrice a bassa viscosità. La frazione in volume delle fibre può raggiungere valori elevati, in genere si attesta tra il 40% ed il 70%. Tipicamente la velocità di produzione non può essere troppo alta, di conseguenza le proprietà meccaniche finali del profilato sono prossime a quelle teoricamente ottenibili a seconda del formato di rinforzo utilizzato. Data la possibilità di automatizzare le stazioni presenti nell'impianto di pultrusione, è assicurata la ripetibilità del processo.

I processi di *spray up* sono caratterizzati dall'utilizzo di una pistola dotata di un sistema a lama rotante azionata da aria compressa che taglia le fibre (inizialmente arrotolate in bobine) e le proietta contro lo stampo con il giusto quantitativo di resina mescolata con l'indurente. Depositato uno strato, è prevista l'operazione di rullatura per compattare. Eseguendo più deposizioni si raggiunge lo spessore desiderato. Tali processi sono facili da automatizzare, economici ed affidabili; di contro l'utilizzo di fibre discontinue limita le proprietà meccaniche delle parti ottenute, che sono notevolmente inferiori a quelle dei manufatti prodotti mediante i processi di lay-up. I laminati ottenuti, però, sono isotropi in quanto il rinforzo non è orientato. [1]

1.3 Filament Winding

1.3.1 Introduzione

Il *Filament Winding* è una tecnologia di formatura di parti in composito a matrice polimerica, tipicamente termoindurente, che consente di ottenere manufatti dalla superficie esterna assimilabile a quella di un solido di rivoluzione.

Le parti realizzate sono caratterizzate da proprietà meccaniche elevate e ripetibili, grazie alla possibilità di automatizzare il processo.

Si basa sull'avvolgimento di fibre impregnate attorno ad un supporto rotante che viene denominato *mandrino*, la cui complessità dipende dalle caratteristiche della parte che si vuole ottenere. Esso influenza aspetti come qualità e costo del prodotto finito, infatti, un'errata progettazione e realizzazione del mandrino possono danneggiare il rinforzo, portare ad errori dimensionali e generare tensioni residue eccessive.

Il mandrino deve essere rigido strutturalmente, indeformabile, resistente al calore, leggero ed economico, inoltre, deve avere un bilanciamento dinamico, un basso coefficiente di espansione termica ed un basso impatto ambientale. I materiali con i quali realizzare il mandrino sono molteplici, dai metalli ai materiali termoplastici; la scelta dipende dalle esigenze, come la forma o la produttività.

Quando è possibile eseguire l'estrazione del mandrino, tirando il manufatto in direzione assiale con estrattori, si utilizzano mandrini *permanenti*; quando non può essere estratto, rimanendo all'interno della parte, si utilizzano mandrini *collassabili*.

Oltre al mandrino, una macchina di Filament Winding prevede la presenza anche di un *carro mobile* dotato di un moto rettilineo alternativo in direzione parallela all'asse del mandrino stesso e sul carro stesso è posizionata la *testa di deposizione* che guida le fibre durante il processo di avvolgimento.

La modalità di impregnazione del rinforzo permette di classificare i processi di formatura per avvolgimento di fibre in processi di avvolgimento per via umida (*wet-FW*) e processi di avvolgimento di preimpregnati (*dry-FW*); invece, il metodo di avvolgimento consente di classificarli in avvolgimento *elicoidale* ed avvolgimento *polare*. [1]

1.3.2 Modalità di impregnazione

L'*avvolgimento per via umida* è la soluzione maggiormente adottata e prevede che l'impregnazione delle fibre, solitamente sottoforma di *roving*, venga eseguita prima del loro avvolgimento attorno al mandrino.

Esse passano attraverso un bagno di resina; una serie di rulli che eliminano la resina in eccesso ed un pettine che ne evita la reciproca sovrapposizione. Affinché si possano avvolgere le fibre sul mandrino, è necessario che tali strumenti vengano montati su un carro mobile.

Per evitare la formazione di bolle nella struttura è previsto l'utilizzo di resine termoindurenti a basso contenuto di sostanze volatili. Per agevolare l'impregnazione delle fibre, tali resine dovrebbero essere caratterizzate anche da una bassa viscosità ed elevata bagnabilità a temperatura ambiente. Durante il passaggio del rinforzo fibroso nella vasca, potrebbero essere liberate delle bollicine con rischio di coalescenza. Pertanto, l'impiego di sistemi di eliminazione dell'aria permette di evitare tale problematica.

La Figura 1.7 rappresenta schematicamente il processo di Filament Winding per via umida.

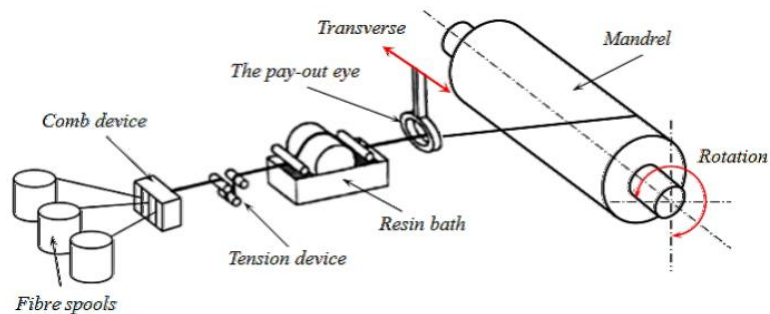


Figura 1.7 Rappresentazione schematica del processo di wet Filament Winding. Fonte: [7]

L'avvolgimento di preimpregnati prevede di utilizzare in partenza del nastro unidirezionale preimpregnato che viene avvolto direttamente sul mandrino.

L'utilizzo di prepreg, anziché di rinforzo secco, elimina la fase critica di impregnazione, che in tale processo non avviene. Pertanto, non dovendo avere le caratteristiche descritte in precedenza nel wet Filament Winding., le resine utilizzabili sono molteplici.

La Figura 1.8 seguente mostra il processo di avvolgimento di preimpregnati.

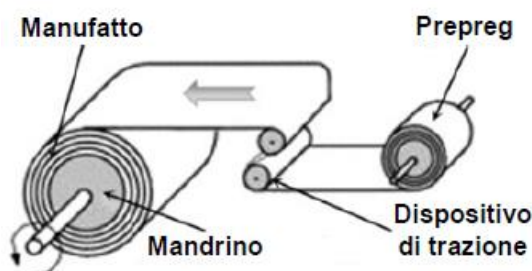


Figura 1.8 Rappresentazione schematica del processo di dry Filament Winding. Fonte: [1]

Tale processo assicura un'elevata qualità dei prodotti, un'elevata ripetibilità, un ottimo controllo del contenuto di resina ed uniformità in termini di larghezza e spessore del nastro. A questi vantaggi si aggiungono la possibilità di automatizzare facilmente il processo e produttività elevata.

Per via di queste caratteristiche tale processo è particolarmente indicato alla fabbricazione di parti ad elevate prestazioni e qualità.

Di contro, l'elevato costo d'acquisto ed i notevoli costi di immagazzinamento della materia prima utilizzata rendono il dry-FW molto costoso.

Il wet-FW, invece, richiede minori tempi di preparazione e costi, ma non consente di ottenere né manufatti qualitativi, né una buona velocità di produzione. A questi svantaggi si somma un difficile dosaggio della resina. [1]

1.3.3 Metodi di avvolgimento

Come anticipato nel sottoparagrafo 1.3.1, si possono distinguere due metodi di avvolgimento: elicoidale e polare. Precisamente, esiste anche una variante dell'avvolgimento elicoidale denominata come avvolgimento circonferenziale.

La differenza tra queste tecniche risiede nel valore assunto dall'*angolo di avvolgimento*, ovvero l'angolo compreso tra la direzione dei filamenti e la tangente al meridiano del mandrino. Tale angolo è illustrato nell'immagine 1.9 sottostante.

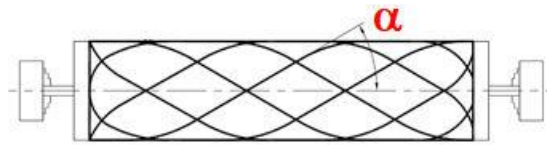


Figura 1.9 Illustrazione dell'angolo di avvolgimento. Fonte: [1]

Quando l'angolo di avvolgimento assume valori compresi tra 20° e 85° allora si parla di elicoidale, quando i valori ricadono tra 0° e 20° si parla di avvolgimento polare ed infine quando l'angolo raggiunge valori di circa 90° si parla di avvolgimento circonferenziale. La Figura 1.10 seguente evidenzia le differenze tra le tre tecniche di avvolgimento.

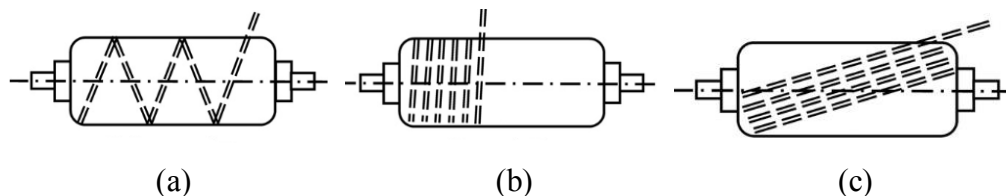


Figura 1.10 Metodi di avvolgimento: (a) elicoidale, (b) polare, (c) circonferenziale. Fonte: [1]

Grazie alla combinazione tra la rotazione del mandrino attorno al proprio asse ed al moto rettilineo del carro mobile in direzione parallela al mandrino è possibile ottenere il *moto elicoidale*. Pertanto, si possono avvolgere prepreg o roving sulla superficie del mandrino seguendo una traiettoria elicoidale con un valore del passo prefissato. Attraverso la variazione della velocità con cui avanza il carro mobile e della velocità con cui ruota il mandrino si riesce ad ottenere l'angolo di avvolgimento desiderato.

Invece, l'angolo di avvolgimento, la larghezza del nastro depositato e la lunghezza del manufatto influenzano il numero di rotazioni che il mandrino compie ad ogni corsa della testa di deposizione.

Durante l'avvolgimento, dato che, nella corsa di andata del carro mobile, le fibre hanno un'orientazione differente rispetto all'orientazione nella corsa di ritorno, si verificano delle intersezioni (*crossover*). Pertanto un singolo strato è formato da una specie di tessuto nel quale i fasci di fibre si intrecciano seguendo due direzioni caratterizzate dal medesimo angolo di avvolgimento in valore assoluto, ma con segno opposto ($+\alpha$ e $-\alpha$).

Il laminato che si ottiene a fine processo risulta essere equilibrato, in quanto le fibre unidirezionali assumono angoli uguali e contrari rispetto all'asse del mandrino; di contro, data la tortuosità del percorso che le fibre devono seguire, il manufatto non può raggiungere le massime proprietà meccaniche.

La Figura 1.11 evidenzia le intersezioni che si formano tra le fibre durante la fabbricazione del laminato.

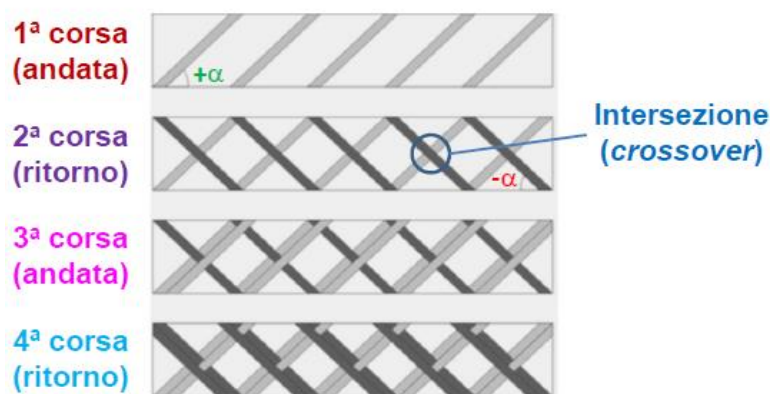


Figura 1.11 Rappresentazione delle intersezioni tra le fibre durante il processo di avvolgimento. Fonte: [1]

Per eliminare la formazione di difetti, quali sovrapposizioni (*overlap*) o vuoti (*gap*) è fondamentale deporre le fibre in posizione adiacente a quelle della passata precedente. Ciò è reso possibile dalla traslazione della testa di deposizione, lungo la direzione longitudinale, di una quantità proprio pari alla larghezza della banda.

Nell'avvolgimento per via umida, sapendo che la larghezza della banda è ottenuta moltiplicando il numero di roving per la larghezza del singolo roving, si riesce ad ottenere un'elevata produttività depositando simultaneamente un numero di roving elevato. Invece, nell'avvolgimento di preimpregnati, per raggiungere un'alta produttività si depositano nastri con una larghezza maggiore.

L'avvolgimento *circonferenziale*, come accennato all'inizio del sottoparagrafo, è una variante dell'avvolgimento elicoidale, ma viene utilizzato per deporre uno o pochi roving. Il carro mobile, ad ogni giro del mandrino, avanza di una quantità pari alla banda depositata che, essendo costituita da pochi roving, ha dimensioni ridotte. Pertanto, anche l'avanzamento del carro è limitato. Con questa metodologia di avvolgimento non è possibile avvolgere le fibre né sulle calotte del mandrino presenti alle estremità, né su parti con superfici cilindriche, poiché le fibre tendono a scivolare.

L'avvolgimento *polare* può essere ottenuto attraverso due soluzioni. La prima soluzione prevede l'utilizzo della medesima macchina utilizzata per l'avvolgimento elicoidale. La differenza sostanziale è che, grazie al ridotto valore assunto dall'angolo di avvolgimento, le fibre possono essere depositate sia su superfici cilindriche che sulle calotte laterali. Di conseguenza questa tecnica consente di fabbricare strutture chiuse. Anche in questo caso si ottengono laminati equilibrati, in quanto lo strato completo è composto da due lamine unidirezionali orientate opportunamente. La seconda soluzione, invece, consiste nell'utilizzo di una macchina costituita sempre da un mandrino che ruota attorno al proprio asse e da un braccio di alimentazione delle fibre, anch'esso rotante. Combinando i moti di rotazione dei due componenti attorno ai rispettivi assi, è possibile realizzare tale avvolgimento, a patto che gli assi di rotazione del mandrino e del braccio siano complanari e formino un angolo compreso tra 0° e 90° . Questa seconda soluzione è illustrata nella Figura 1.12 di seguito. [1]

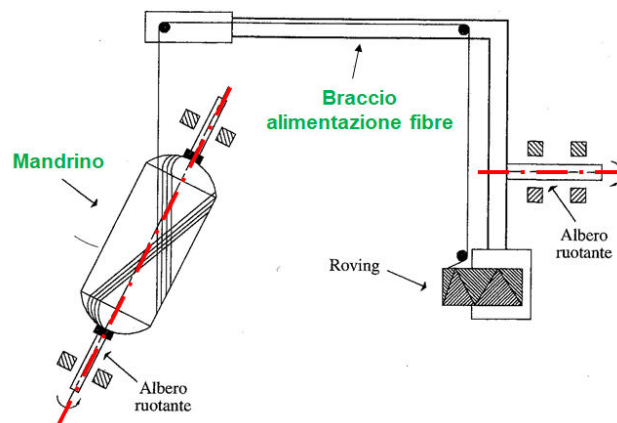


Figura 1.12 Illustrazione della soluzione per eseguire l'avvolgimento polare. Fonte: [1]

1.3.4 Parametri di processo

Nei processi di Filament Winding esistono dei parametri al variare dei quali si ottengono manufatti con caratteristiche differenti.

Un parametro fondamentale è sicuramente la *tensione* di avvolgimento delle fibre, la quale influenza: larghezza della banda depositata, allineamento delle fibre e compattazione. Di conseguenza la tensione impatta sulle proprietà meccaniche del manufatto e sulla loro uniformità.

Infatti, sebbene le direzioni di deposizione delle fibre vengano definite in fase di progettazione, è possibile che lungo queste direzioni si generino difetti, come corrugamenti ed ondulazioni, che permangono nel prodotto finito. Per ridurre ed eventualmente eliminare la presenza di tali difetti è necessario un aumento della tensione. Inoltre, aumentando il tensionamento, si determina un aumento anche della componente che schiaccia le fibre sul mandrino o sugli strati già depositati. Ciò contribuisce alla riduzione degli spazi vuoti tra le fibre con un conseguente aumento della densità del prodotto. [1]

Però, il tensionamento delle fibre deve essere gestito correttamente, infatti, come riportato nell'articolo di Blachut et al. [8], un elevato tensionamento determina un'eccessiva abrasione delle fibre e le rende sensibili tanto da aumentarne il rischio di scivolamento durante l'avvolgimento in corrispondenza delle cupole. Il medesimo studio evidenzia anche come una tensione eccessiva possa favorire il manifestarsi di difetti all'interfaccia fibra-matrice.

Come visto in precedenza, le principali problematiche che si riscontrano nel wet-FW sono dovute al processo di impregnazione. Un eventuale aumento della velocità di avvolgimento comporterebbe la non completa eliminazione dell'aria dalla vasca. Le fibre, di fatto, verrebbero impregnate da una sorta di emulsione resina-fibra con il conseguente rischio di coalescenza delle microporosità in porosità di maggiori dimensioni, fino a vuoti macroscopici.

Si possono adottare molteplici soluzioni per evitare tale inconveniente, come ridurre la velocità di avvolgimento permettendo all'aria di uscire; mantenere la vasca sotto vuoto per facilitare l'eliminazione dell'aria dalla resina ed impregnare le fibre per contatto su un rullo solo parzialmente immerso nella vasca.

Fondamentalmente però, la scelta della soluzione ottimale dipende dai parametri progettuali e tecnologici, come il grado di porosità accettato, la dimensione del mandrino, la quantità di fibre da impregnare e la velocità di produzione. [1]

1.3.5 Filament Winding robotizzato

Tipicamente le macchine utilizzate sono molto simili al tornio e presentano solo 2 gradi di libertà, pertanto, se si volessero ottenere delle strutture più complesse, con presenza anche di concavità, il processo di FW tradizionale non risulterebbe essere adeguato. Questo ha portato allo sviluppo di *celle robotizzate* (RFW) con più di 2 gradi di libertà, concettualmente identiche, ma applicate per generare traiettorie complesse.

Le soluzioni adottabili prevedono, o di porre in rotazione il mandrino mediante una macchina simile al tornio e manipolare la testa con il robot, oppure di far assumere una posizione fissa alla testa e manipolare e mettere in rotazione il mandrino con il robot. La cella robotizzata è quindi costituita da un robot antropomorfo dotato di un sistema di alimentazione e deposizione per posizionare le fibre impregnate sul mandrino. Di fatto sostituisce l'operatore per la realizzazione di parti complesse. Ad esempio, grazie al RFW è possibile generare strutture cave con concavità stratificando le fibre in direzione trasversale alla curvatura locale. Con il FW tradizionale, invece, si genererebbe un "ponte in fibra" per mancata adesione delle fibre stesse alla superficie del mandrino. [1]

1.3.6 Sistemi di Filament Winding

Ad oggi sono disponibili tante soluzioni che permettono di ottenere manufatti in composito attraverso la formatura per avvolgimento di fibre; alcuni acquistabili commercialmente, altri consultabili in pubblicazioni scientifiche. Comprensibilmente, l'aumento del numero di gradi di libertà determina l'aumento della complessità del sistema e della parte ottenibile.

Le soluzioni a 2 g.d.l. sono le più semplici e, come precedentemente spiegato, implementano la traslazione del carro mobile in direzione parallela all'asse del mandrino e la rotazione del mandrino attorno al proprio asse. In aggiunta a questi moti appena descritti, tipicamente, i sistemi a 3, 4 e 5 g.d.l. possono implementare anche il controllo della traslazione della testa di deposizione in direzione ortogonale all'asse del mandrino; la rotazione della testa di deposizione attorno al proprio asse e l'imbardata della testa stessa.

Ad esempio l'azienda Pultrex, come riportato all'interno del loro sito [a], ha sviluppato due macchine di Filament Winding. Una soluzione è la Pultrex Labwinder, progettata appositamente per attività di ricerca e sviluppo e per le Università ed è caratterizzata dalla possibilità di controllare 2 assi. Essa viene raffigurata nella Figura 1.13 seguente.



Figura 1.13 Rappresentazione della macchina Pultrex Labwinder. Fonte: [a]

Invece, l'altra soluzione, fino a 4 g.d.l., è la Pultrex Miniwinder che, a differenza della precedente, viene impiegata in ambito industriale e presenta una capacità di 500 millimetri di diametro e fino a 4 metri di lunghezza. La Figura 1.14 mostra la macchina appena descritta.



Figura 1.14 Rappresentazione della macchina Pultrex Miniwinder. Fonte: [a]

Anche X-Winder ha realizzato due macchine commercialmente disponibili a 2 e 4 gradi di libertà, secondo il proprio sito [b]. La versione a 2 g.d.l. è riportata nella Figura 1.15, mentre quella a 4 g.d.l., denominata 4X-23, è raffigurata nella Figura 1.16.

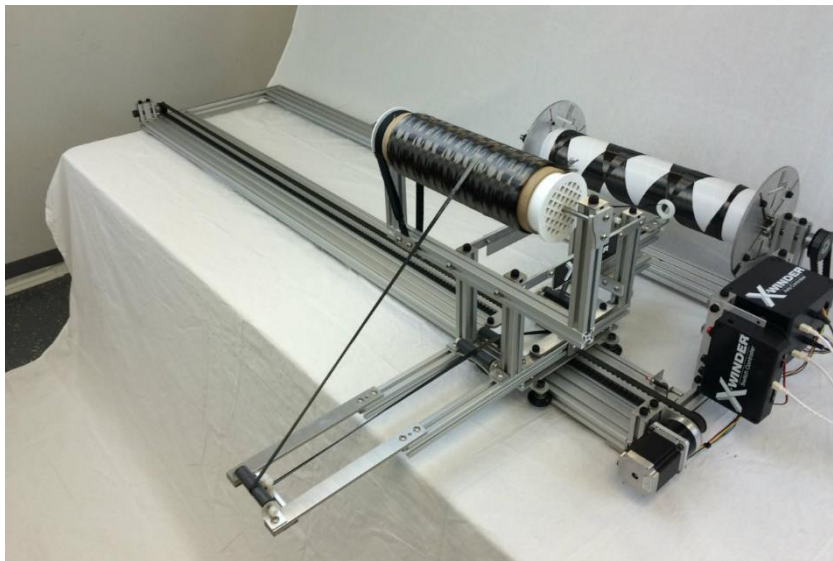


Figura 1.15 Rappresentazione della macchina 2X-23 di X-Winder. Fonte: [b]



Figura 1.16 Rappresentazione della macchina 4X-23 di X-Winder. Fonte: [b]

Altre soluzioni acquistabili commercialmente sono offerte dalla Engineering Technology Corporation. Secondo il proprio sito [c], sono disponibili macchine da 2 fino a 5 g.d.l.. La macchina a 2 g.d.l. è la SC ed è illustrata nella Figura 1.17.



Figura 1.17 Illustrazione della macchina SC Filament Winder. Fonte: [c]

Continuando, la SC+ è la variante a 3 o 4 g.d.l.; essa è ideale per una produzione su scala ridotta ed è mostrata nella Figura 1.18.



Figura 1.18 Illustrazione della macchina SC+ Filament Winder. Fonte: [c]

Infine, si giunge ai molteplici sistemi a 5 g.d.l., selezionabili a seconda delle proprie esigenze, tra cui il modello SM, ovvero una soluzione economica per poter realizzare parti di medie dimensioni su larga scala. La Figura 1.19 e la Figura 1.20 mostrano il sistema SM e, più precisamente, la seconda lo rappresenta durante la fabbricazione di un manufatto.

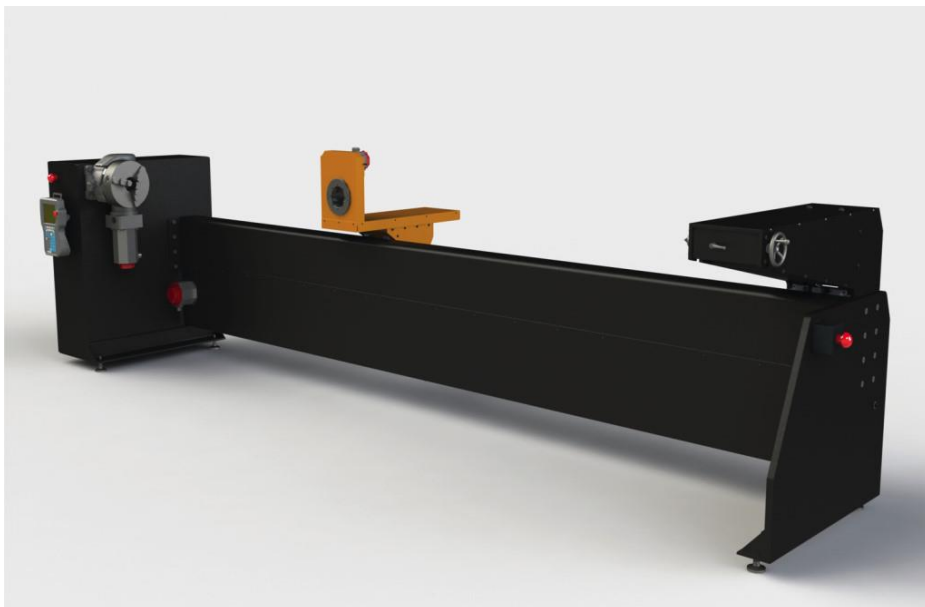


Figura 1.19 Rappresentazione del sistema SM Filament Winder. Fonte: [c]



Figura 1.20 Rappresentazione del sistema SM durante la fabbricazione di un manufatto. Fonte: [c]

Anche in letteratura sono presenti numerosi articoli riguardanti tentativi di progettazione e fabbricazione di sistemi di Filament Winding.

Abdalla et al., come riportato nel proprio report [9], hanno realizzato una macchina di wet-FW a 2 g.d.l. simile ad un tornio; la Figura 1.21 e la Figura 1.22 rappresentano rispettivamente il layout schematico della macchina con la legenda e la macchina a completa realizzazione.

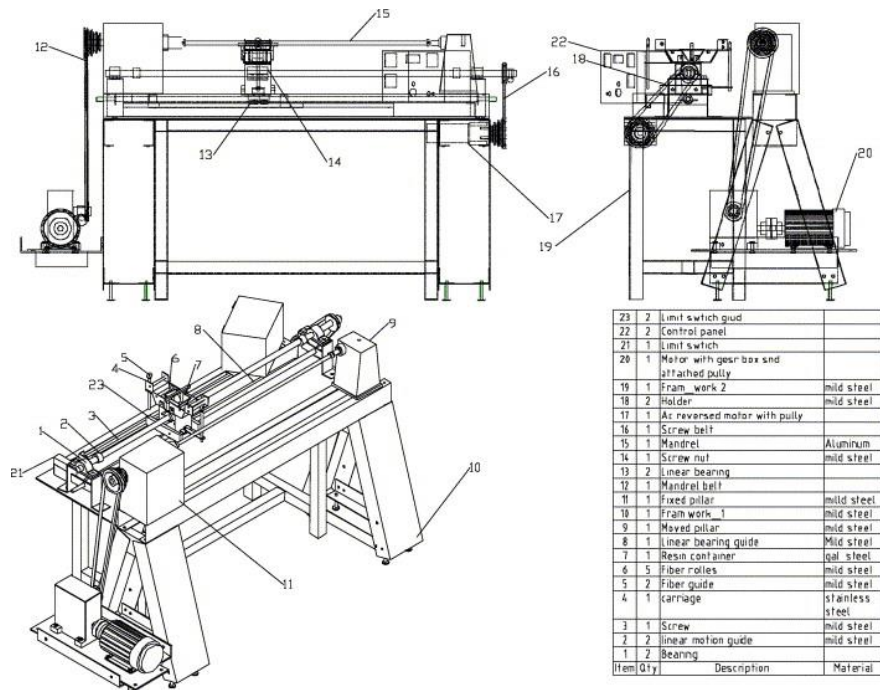


Figura 1.21 Illustrazione schematica del layout di una macchina di wet-FW a 2 g.d.l. e della corrispondente legenda. Fonte: [9]



Figura 1.22 Rappresentazione di una macchina di wet-FW a 2 g.d.l. realizzata. Fonte: [9]

Invece, l'articolo di Quanjin et al. [10] riporta la riuscita progettazione e fabbricazione di una macchina di FW a 3 g.d.l., di dimensioni ridotte e caratterizzata da un sistema di

controllo a basso costo. Il medesimo studio riporta la presenza ancora di alcuni limiti della soluzione ottenuta, tra cui un sistema di supporto non adattabile a mandrini dalla forma differente. Le Figure 1.23 e 1.24 mostrano rispettivamente il disegno meccanico di tale macchina ed essa stessa a montaggio completato.

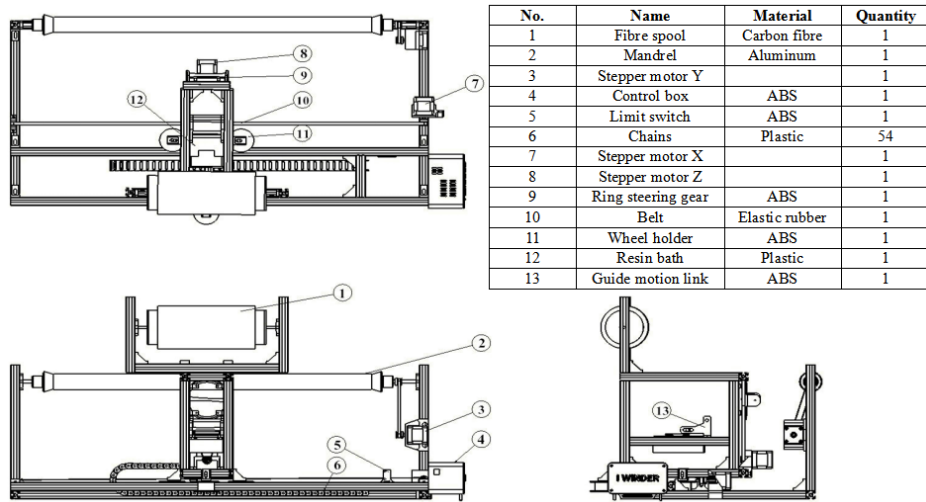


Figura 1.23 Illustrazione del disegno meccanico di una macchina di FW a 3 g.d.l.. Fonte: [10]

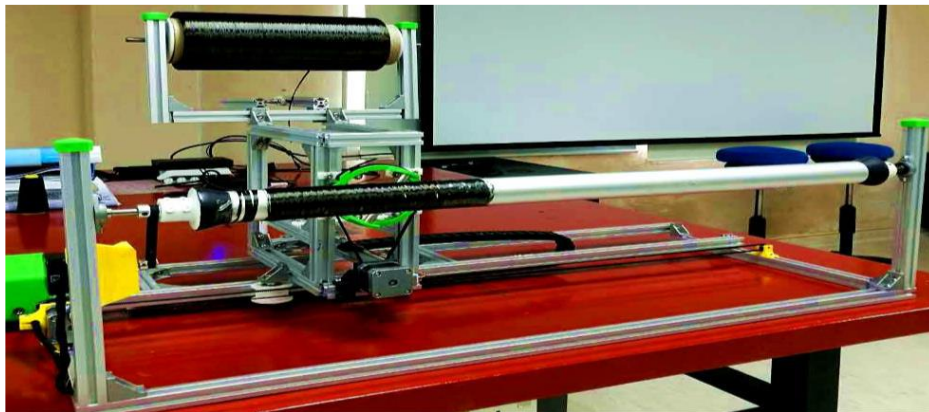


Figura 1.24 Rappresentazione di una macchina di FW a 3 g.d.l. in funzione. Fonte: [10]

Un'altra soluzione a 3 g.d.l. è stata sviluppata da Quanjin et al., ma come riportato nel loro articolo [7], a differenza delle macchine tradizionali di Filament Winding essa è controllata mediante connessione wireless, più precisamente, attraverso un'apposita applicazione per cellulari. Secondo gli autori, infatti, dovrebbe garantire una maggiore affidabilità e mobilità.

La Figura 1.25 sottostante illustra in maniera schematica la macchina e ne evidenzia la possibilità di controllo senza fili.

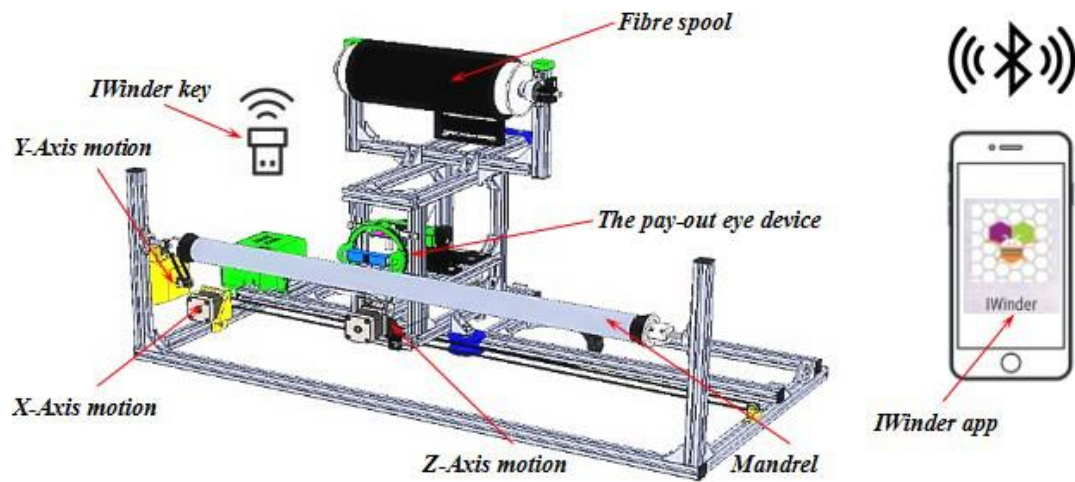


Figura 1.25 Illustrazione schematica di una macchina di FW a 3 g.d.l. controllabile mediante connessione wireless. Fonte: [7]

Nell'articolo [11] di Andrianov et al. si discute di come, nonostante i molteplici studi sulla possibilità di utilizzare attrezzatura da laboratorio per il Filament Winding, vi sia una carenza di trattazioni che mettano in risalto il problema dei costi; se presenti, generalmente essi fanno riferimento a macchinari a soli 2 o 3 g.d.l. che, di conseguenza, limitano la possibilità di ottenere parti dalla geometria più complessa. Pertanto, in tale articolo si riporta la realizzazione di un sistema di FW a basso costo a 4 g.d.l. che permette di realizzare parti assialsimmetriche in materiale composito. Esso viene rappresentato nella Figura 1.26.

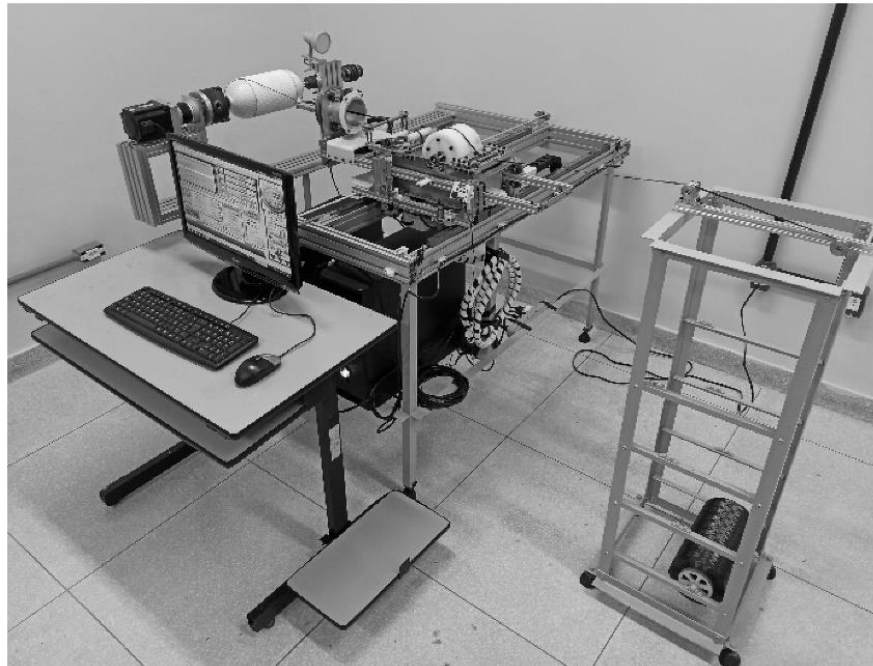
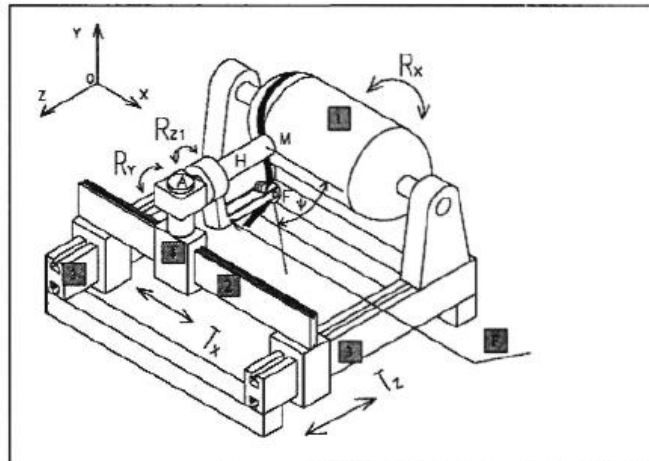


Figura 1.26 Rappresentazione di un sistema di FW a 4 g.d.l.. Fonte: [11]

Purtroppo, sono disponibili pochi articoli scientifici trattanti macchine di FW a 5 g.d.l.; infatti, è stato possibile solamente visionare un sistema che non utilizza resine termoindurenti, bensì termoplastiche. Precisamente, l'articolo in questione [12] di Ateba et al. parla dell'ottenimento di una macchina a 5 g.d.l., con la presenza di un sistema di riscaldamento per i prepreg termoplastici, ottenuta a partire da una a 3 g.d.l.. La Figura 1.27 sottostante rappresenta schematicamente il layout della macchina e la corrispondente legenda.



Legend:

- M: deposit point,
- H: ultrasound heating head,
- F: feed-eye,
- Rx: rotation of the mandrel around (o, x) axis,
- Ry: rotation of both the heating head H and the feed-eye F around the vertical axis (A, y),
- Rz1: the rotation of the feed-eye around the heating head axis.
- ψ : the winding angle, the direction of the fibre relatively to the meridian.

Figura 1.27 Illustrazione schematica di una macchina di FW utilizzando prepreg termoplastici e della corrispondente legenda. Fonte: [12]

Nel dettaglio, il medesimo articolo afferma che il carrello consente la traslazione del sistema di riscaldamento e della testa di deposizione in direzione longitudinale lungo l'asse x e trasversale lungo l'asse y; che entrambe possono ruotare attorno ad un asse verticale e che la testa può ruotare attorno all'asse del sistema di riscaldamento. Assieme alla rotazione del mandrino attorno al proprio asse, si ottengono i 5 g.d.l..

1.4 Software utilizzati

1.4.1 CADWIND

CADWIND è un software nato nel 1985 in Germania come progetto di ricerca, in un periodo in cui il Filament Winding era una tecnica costosa e principalmente utilizzata nell'industria aerospaziale. Da quel momento tale tecnologia ha registrato un aumento delle sue applicazioni, in vari ambiti ed in varie regioni del Mondo, tra cui l'Italia. Di pari passo anche CADWIND si è evoluto, divenendo uno standard industriale per i processi di avvolgimento di fibre, dalle applicazioni più semplici a quelle più complesse ed all'avanguardia e, ad oggi, grazie alla sua flessibilità si può adattare ad un elevato grado di automazione. [13]

Fondamentalmente, CADWIND consente di *simulare*, sulla base di un modello fisico, i processi di avvolgimento al computer; calcolare il percorso delle fibre ed il metodo di avvolgimento per mandrini di qualsiasi geometria e generare in output in maniera automatica il part program, al fine di poter produrre la parte su qualsiasi macchina o robot di FW. Inoltre, permette di esportare la struttura finale del laminato in un software per l'analisi FEA (*Finite Element Analysis*) per calcolarne le caratteristiche meccaniche. [d]

Il concetto di simulazione risulta essere molto più potente delle comuni formule geometriche analitiche, infatti, esso include anche la *modellazione dell'attrito* che si genera tra la fibra e la superficie del mandrino, il quale determina la deviazione della fibra dalla traiettoria geodetica. Pertanto, offre più possibilità in termini di progettazione e produzione.

Sin dall'inizio di CADWIND, la ricerca si è incentrata sul miglioramento del modello fisico; sulla valutazione della possibilità di realizzare parti dalla geometria complessa ed in seguito sul post processing. Per poter essere implementato nell'ambito industriale come uno strumento pratico, tale software deve necessariamente generare un part program che possa essere utilizzato da qualsiasi tipologia di macchina o controllore, indipendentemente dalla loro complessità. Altro obiettivo della ricerca è stato quello di riuscire a migliorare la dinamica del movimento della macchina, così da ottimizzare i dati di controllo riguardanti vari aspetti, tra cui la riduzione del tempo di produzione, l'avvolgimento a velocità costante del mandrino o l'avvolgimento con velocità di uscita costante.

La versione di CADWIND rilasciata nel 2006, pur mantenendo un'interfaccia semplice e stabile, ha introdotto innovazioni importanti nella progettazione ed analisi dei manufatti; nella simulazione ed automazione delle macchine e nel FW robotizzato. Infatti, in passato,

la progettazione di componenti ottenuti per avvolgimento di fibre prevedeva la realizzazione di prototipi che venivano testati e, sulla base di questi test, migliorati, seguendo una politica di *trial-and-error*.

Invece, ad oggi, utilizzando CADWIND unitamente a programmi specifici per l'analisi di laminati, come il software COMPOSITE STAR di MATERIAL o programmi di analisi agli elementi finiti (FEA), è possibile prevedere il comportamento meccanico di questi manufatti quando ad essi viene applicato un carico. Ciò permette di ridurre il numero di prototipi da realizzare e di evitare continui cicli di fabbricazione e testing.

Se precedentemente al 2006 non era possibile simulare graficamente il processo di FW sul computer, tale aggiornamento ha dato la possibilità all'utente di osservare il processo come animazione in tempo reale sullo schermo, permettendogli di visionare i movimenti, la dinamica ed il raggio d'azione delle macchine; se la testa di deposizione collida o meno con il mandrino; se il programma di avvolgimento funzioni correttamente e se i parametri di post-processing scelti siano ottimali o meno per l'applicazione. [13]

CADWIND al suo interno integra un generatore di modelli che permette, appunto, di generare mandrini dalle geometrie più comuni per il FW, come quelle assialsimmetriche, non assialsimmetriche, presentanti curve ed a T. Inoltre, può importare anche mandrini provenienti da altri software in formato DXF. [d]

A tal proposito, le Figure 1.28 e 1.29 seguenti rappresentano rispettivamente una tipica parte dalla geometria assialsimmetrica e non assialsimmetrica.

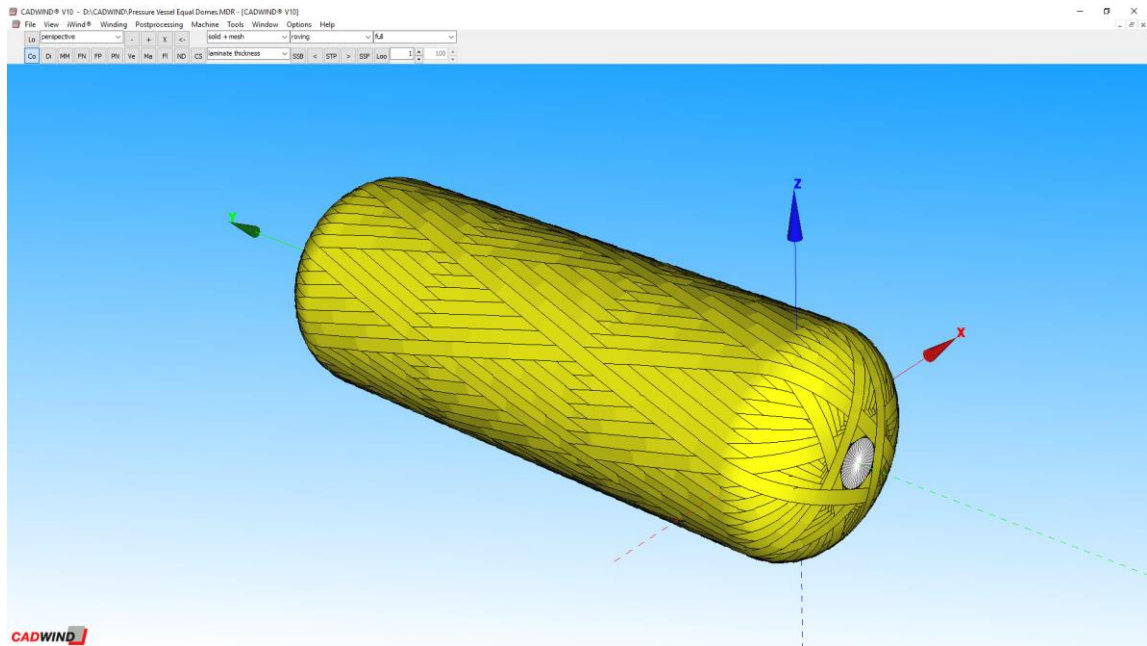


Figura 1.28 Rappresentazione all'interno del software CADWIND di una tipica parte dalla geometria assialsimmetrica. Fonte: [d]

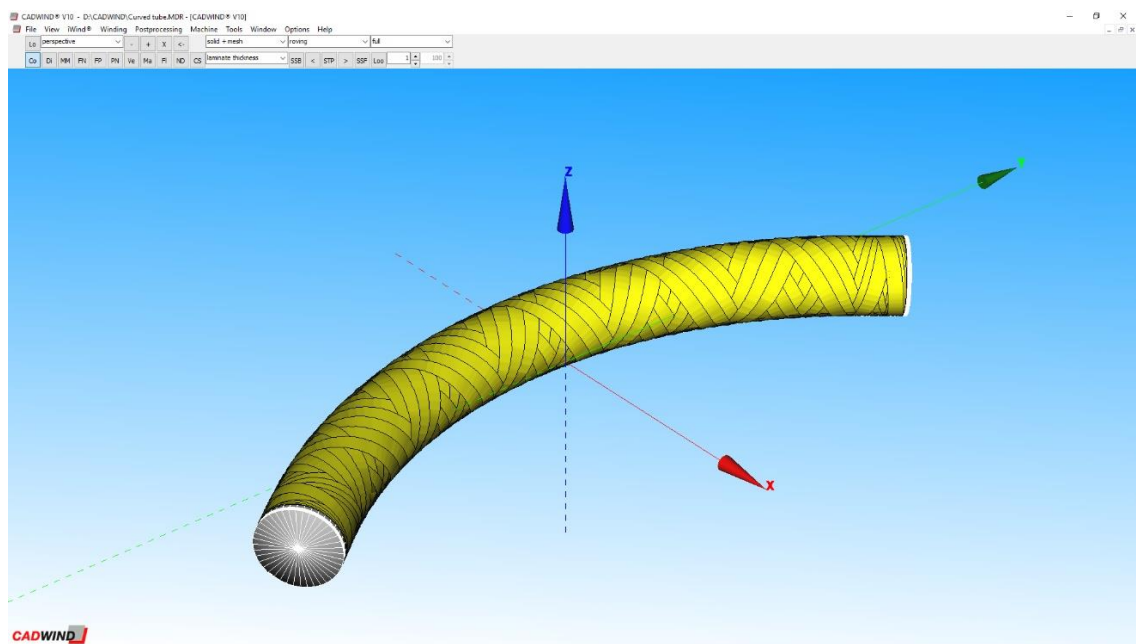


Figura 1.29 Rappresentazione all'interno del software CADWIND di una tipica parte dalla geometria non assialsimmetrica. Fonte: [d]

A seconda dei parametri di avvolgimento che l'utente inserisce, viene calcolato ed ottimizzato continuamente il percorso che la fibra compie sul modello tridimensionale del mandrino. [13]

I parametri necessari affinché l'algoritmo implementato da CADWIND (iWind) possa simulare il processo di avvolgimento sono:

- la posizione in corrispondenza della quale iniziare l'avvolgimento e la direzione sul mandrino;
- quale area della superficie del mandrino debba essere avvolta;
- l'orientazione delle fibre (l'angolo di avvolgimento);
- il coefficiente d'attrito per poter modellare l'attrito stesso;
- la larghezza della fibra depositata.

CADWIND consente anche di calcolare lo spessore ed il peso del laminato a partire da parametri come:

- la densità dei filamenti e della resina o matrice;
- la frazione volumetrica o massica delle fibre;
- la densità lineare del filamento o del roving.

Dato che i laminati ottenuti per FW sono costituiti tipicamente da più strati e che ad ogni strato depositato il mandrino aumenta di dimensioni e varia di forma, se necessario, CADWIND offre la possibilità di aggiornare la forma stessa del mandrino per lo strato successivo.

Inoltre, grazie alla modellazione dell'attrito è possibile modulare l'angolo di avvolgimento delle fibre lungo la parte, in modo da poter variare la rigidità della struttura da zona a zona. A seconda del valore assunto dall'angolo, il laminato sarà caratterizzato da uno spessore maggiore o minore, precisamente, più l'angolo aumenta più il laminato si inspessisce. Come mostrato dalla Figura 1.30, CADWIND mette a disposizione una scala a colori con la quale valutare graficamente aspetti già citati come l'angolo di avvolgimento e lo spessore del laminato.

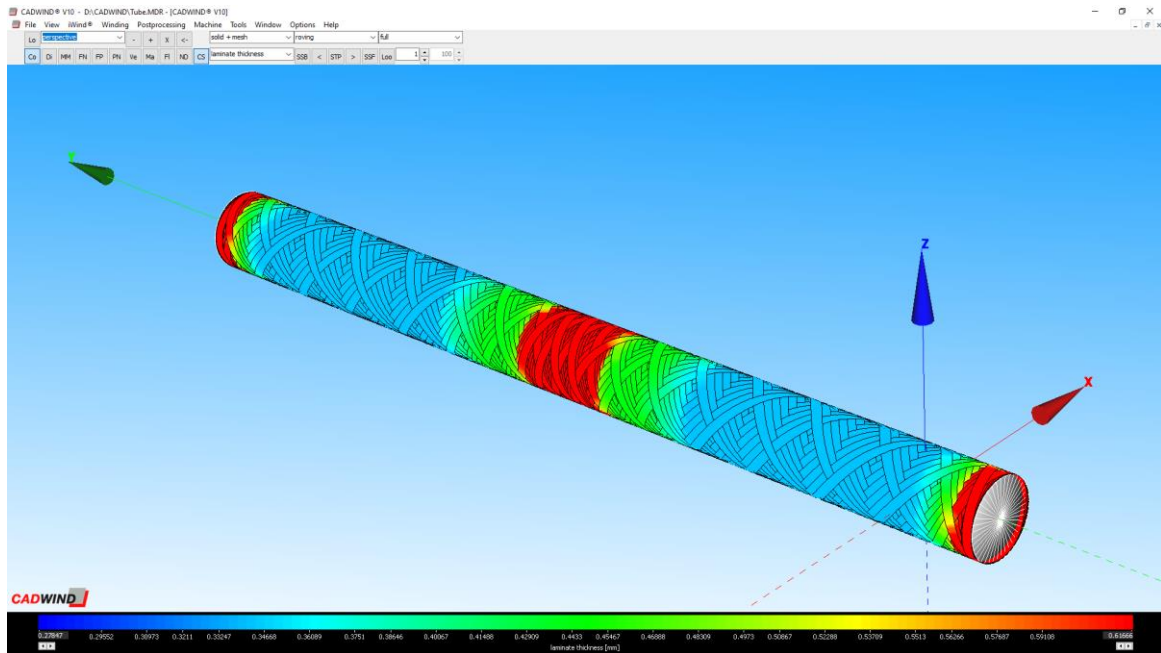


Figura 1.30 Visualizzazione dello spessore di un laminato attraverso la scala a colori disponibile in Cadwind. Fonte: [d]

CADWIND integra al suo interno un'altra funzione, denominata Live View, utile per comprendere appieno il processo di FW. Essa, infatti, se attivata, permette di vedere graficamente gli effetti generati da una modifica dei parametri.

In conclusione, si può affermare che CADWIND è uno strumento che consente di ottimizzare i processi di avvolgimento di fibre, ridurre i costi legati ai materiali e ridurre i tempi produttivi. [d]

1.4.2 Siemens NX

Siemens NX è un software che può essere considerato come una soluzione integrata, potente e flessibile e che permette di realizzare prodotti in maniera rapida ed efficiente. La nuova generazione di soluzioni di progettazione, simulazione e produzione offerte da NX permette alle aziende di realizzare il valore del Digital Twin.

Il suddetto software *supporta* tutti gli aspetti riguardanti lo sviluppo dei prodotti, a partire dal design del concept alla progettazione ed alla fabbricazione. Inoltre, grazie ad un apposito

set di strumenti integrato, NX è in grado di coordinare le discipline, preservare sia l'integrità dei dati che la finalità della progettazione ed, infine, semplificare l'intero processo. [e]

NX consente di ottimizzare il lavoro sotto vari punti di vista, poiché fornisce una comprensione più approfondita del design ed una comunicazione maggiormente efficace; valuta immediatamente l'impatto di eventuali modifiche di progettazione; migliora le funzionalità per ridurre i tempi necessari per la progettazione ed integra gli ultimi aggiornamenti all'interno del flusso di lavoro diminuendo la curva di apprendimento.

Le potenzialità di NX si esplicano in:

- Ambiente di modellazione più produttivo;
- Generative Design;
- Additive Manufacturing;
- Electromechanical Design;
- Progettazione e gestione collaborativa;
- Simulazione e produzione integrate.

Sono gli investimenti tecnologici costanti a consentire l'ottenimento di un *ambiente di modellazione* altamente *produttivo*. Infatti, in esso è possibile apportare modifiche complesse tramite delle funzioni organizzate che permettono sia la modifica che l'aggiornamento locale del progetto. Inoltre, una volta apportate modifiche al progetto, NX è in grado di aggiornare automaticamente i dati relativi alle proprietà di massa, risparmiando tempo nella gestione di quest'ultime.

Invece, nel contesto del *Generative Design*, NX mette a disposizione un insieme completo di strumenti con i quali importare e preparare i dati relativi a nuvole di punti ed eseguirne il meshing in una geometria convergente, fornendo all'utente la possibilità di lavorarci appena dopo l'importazione.

Tramite *NX Industrialize Additive Manufacturing* è possibile raggiungere un'efficienza elevatissima per via di un'interfaccia utente interattiva ed intuitiva che riduce al minimo il tempo necessario per passare dall'idea alla realizzazione del modello. A ciò si aggiungono la possibilità di personalizzare il supporto, di eseguire analisi FEM, di alleggerire la struttura reticolare e la capacità di ottimizzare l'orientamento di stampa della parte sulla base di

requisiti di progettazione e produzione. Di conseguenza Siemens NX assicura che ciascun pezzo venga stampato correttamente e con precisione.

Invece, per quanto concerne l'*Electromechanical Design*, NX permette non solo di rappresentare completamente pannelli costituiti da più circuiti stampati (PCB), ma anche di fornire simultaneamente dati per più PCB. In aggiunta, elimina la necessità di dover definire manualmente i corpi rigidi.

Inoltre, si può parlare di *progettazione e gestione collaborativa* in quanto NX ottimizza la comunicazione a valle, favorendo la collaborazione con il fornitore, con il team di produzione, controllo qualità, assemblaggio e servizio e con coloro che richiedono l'accesso al modello 3D.

Infine, è l'unico software in grado di passare senza problemi dalla progettazione alla simulazione, fino alla produzione, offrendo funzionalità CAD, CAM, CAE e PLM evolute che permettono di supportare qualsiasi aspetto riguardante lo sviluppo del prodotto. [f]

Siemens NX rientra nella categoria dei sistemi CAD ibridi parametrici di alta gamma, cioè sistemi basati su caratteristiche che permettono di gestire contemporaneamente sia superfici complesse che volumi solidi. [14]

Esso mette a disposizione più ambienti, ovvero delle aree specifiche costituite da un insieme di strumenti che consentono all'utente di svolgere determinate attività di progettazione in quella precisa area. Tra gli ambienti essenziali si annoverano:

- Modeling;
- Shape Studio;
- Drafting;
- Assembly;
- Sheet Metal.

Modeling è l'ambiente in cui si possono modellare i solidi che, come requisito minimo, richiedono la realizzazione di uno sketch. Per disegnare lo sketch è sufficiente utilizzare gli strumenti disponibili sia nella scheda Home che nella scheda Curva. Mentre si realizza uno sketch, vi sono dei vincoli e delle quote che vengono applicati in automatico, altri possono essere inseriti manualmente. Dopo aver realizzato lo sketch è necessario convertirlo in una

feature utilizzando appositi tools presenti nell'ambiente. In esso si può anche eseguire l'assegnazione del materiale ai modelli.

Shape Studio, invece, è l'ambiente in cui modellare le superfici. I tools sono simili a quelli presenti nell'ambiente precedentemente descritto, con l'unica differenza che qui sono specifici per la realizzazione di superfici semplici o complesse. Inoltre, consentono di manipolare le superfici stesse per ottenere la forma desiderata. Tipicamente *Shape Studio* viene molto utilizzato per la progettazione concettuale ed industriale.

L'ambiente di *Assembly* viene impiegato per assemblare i componenti tramite dei vincoli appositi. Esistono due strategie di assemblaggio in NX, ovvero, Bottom-up e Top-Down. Nel primo caso si assemblano componenti precedentemente creati, mentre nel secondo è prevista la loro realizzazione direttamente in tale ambiente. Con *assembly* è inoltre possibile assemblare degli assiemi già presenti con l'assieme corrente ed utilizzare dei tools di analisi per evidenziare eventuali interferenze o giochi.

Un ulteriore ambiente è quello di *Drafting* che consente di documentare parti o assiemi creati in precedenza attraverso delle viste in disegno ed ulteriori dettagli. Anche in questo caso, esistono due tecniche di drafting, ovvero il *generative drafting* e l'*interactive drafting*. Il primo viene impiegato per generare automaticamente le viste. Inoltre, quando si aggiungono delle quote parametriche al componente nell'ambiente di Modeling esse vengono direttamente aggiornate nelle viste stesse. Il secondo, invece, lavora in maniera bidirezionale, infatti se si modificano delle quote nell'ambiente di Drafting anche il modello si aggiorna e viceversa. In aggiunta, con esso è possibile stilare anche la BOM cioè la *Bill of Material*.

Infine, *Sheet Metal* permette di modellare le lamiere. Tale ambiente viene tipicamente impiegato per progettare parti caratterizzate da regioni con piegature cilindriche, oltre che coniche e ricurve. [15]

Siccome per questo studio sono stati utilizzati principalmente gli ambienti di Modeling ed Assembly, di seguito vengono illustrati i principali comandi disponibili nel primo e nel secondo ambiente, rispettivamente nella Figure 1.31 e 1.32.

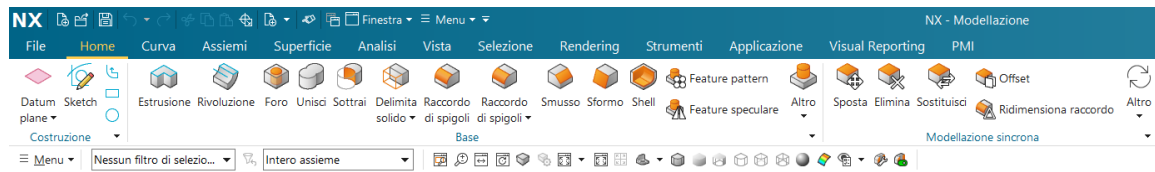


Figura 1.31 Rappresentazione dei principali comandi disponibili all'interno del software Siemens NX nell'ambiente Modeling

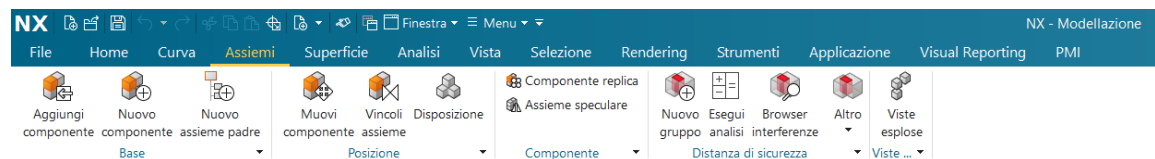


Figura 1.32 Rappresentazione dei principali comandi disponibili all'interno del software Siemens NX nell'ambiente Assembly

1.5 Design for Assembly (DfA)

1.5.1 Introduzione

Il Design for Assembly si pone come obiettivo di sviluppare un prodotto che sia:

- facilmente assemblabile;
- costituito dal minor numero possibile di componenti;
- semplice da movimentare, posizionare e fissare.

Il DfA prevede, se possibile, l'unione di più componenti tra loro in un'unica parte, in modo da creare un'architettura integrata e non modulare (*part consolidation*). Tale metodologia si compone di due fasi: l'analisi della sequenza di assemblaggio e la valutazione degli step di assemblaggio. A sua volta, quest'ultima è suddivisibile in:

- *Handling*, cioè prelevare il componente ed orientarlo in maniera corretta;
- *Insertion*, ovvero posizionamento, allineamento ed inserzione del componente.

Tramite un indice denominato *Dfa Index* si può valutare la facilità di assemblaggio di un prodotto. Esso può assumere un valore compreso tra 0 ed 1, in particolare, il diminuire di tale valore indica un aumento della complessità dell'assemblaggio. A partire da 0.2 si può affermare che il prodotto presenta una buona assemblabilità. Di seguito, è riportata la formula per il calcolo di tale indice:

$$DfA\ Index = \frac{t_{min} * N_{min}}{TA},$$

dove:

- t_{min} indica il tempo minimo di assemblaggio per operazione, tipicamente è posto pari a 3 sec;
- N_{min} rappresenta il numero minimo teorico di parti;
- TA indica il tempo di effettivo di assemblaggio.

Seguendo delle specifiche linee guida è possibile massimizzare tale indice, migliorando l'assemblabilità del prodotto. Una parte di esse verrà citata nel sottoparagrafo seguente. [14]

1.5.2 Linee guida per il DfA

Le linee guida sopracitate trattano differenti aspetti, come:

- la minimizzazione del numero di parti;
- la manipolazione dei componenti;
- l'inserimento ed il fissaggio dei componenti;
- il miglioramento dell'assemblaggio e del disassemblaggio;
- gli elementi di fissaggio, quali rivetti (elementi deformabili), viti e saldature.

Nel condurre tale studio, durante la fase di progettazione, sono state seguite molteplici norme, tra cui:

- incorporare guide, boccole e cuscinetti;
- usare tecnologie che consentono di ottenere delle geometrie complesse, minimizzando il numero di parti;
- evitare componenti che si incastrano tra di loro;
- realizzare componenti simmetrici con estremità smussate;
- preferire accoppiamenti filettati con viti mordenti;
- evitare oggetti taglienti e con spigoli vivi;
- standardizzare gli elementi di assemblaggio relativamente a fornitori e parti;
- in fase di montaggio, creare dei sottoassiemi premontati, i quali saranno successivamente montati tra loro;
- cercare di ridurre il numero di posizionamenti del prodotto durante l'assemblaggio al fine di renderlo più veloce;
- sulla base della sequenza di assemblaggio, realizzare la distinta base su più livelli;
- evitare l'utilizzo di parti deformabili e flessibili;
- utilizzare asole per favorire un corretto posizionamento;
- far in modo che i componenti siano simmetrici;
- prendere in considerazione, durante la progettazione, l'accessibilità dell'utensile;
- realizzare fori non eccessivamente grandi, per permettere un corretto serraggio;
- prediligere viti con testa ad esagono incassato e viti con intaglio a croce. [14]

Capitolo 2 – Materiali e metodi

2.1 Problema ed obiettivi

Lo studio condotto nasce dall'esigenza di dover analizzare le proprietà meccaniche di parti ottenute mediante l'avvolgimento di preimpregnati, in particolare towpreg in fibra di carbonio e matrice in resina epossidica. Tali manufatti oltre a dover avere dimensioni ridotte, devono essere sufficientemente complessi.

Pertanto, gli obiettivi che questa trattazione si pone di raggiungere sono due.

Il primo obiettivo consiste nel progettare una macchina di dry-FW con un quantitativo di gradi di libertà sufficiente ad ottenere prodotti dalla complessità geometrica richiesta.

Inoltre, il sistema da sviluppare deve rispettare i vincoli di:

- *semplicità*, per poter essere facilmente assemblato, regolato e modulato;
- *economicità*;
- *ingombro*, in quanto deve essere in scala di laboratorio (circa 500x1000x1000 mm).

Per questa prima parte è necessario il supporto del software Siemens NX.

Il secondo obiettivo, invece, riguarda la valutazione dei parametri di processo, una volta definite le caratteristiche del mandrino. Questa seconda parte richiede l'utilizzo di un secondo software, ovvero CADWIND.

2.2 Progettazione della macchina di Filament Winding

2.2.1 Introduzione

Sulla base delle considerazioni fatte, si è deciso di realizzare una macchina a 4 g.d.l.:

- rotazione del mandrino attorno al proprio asse;
- traslazione del carro mobile in direzione parallela all'asse del mandrino;
- traslazione della testa di deposizione in direzione ortogonale all'asse del mandrino;
- rotazione della testa di deposizione attorno al proprio asse.

Questo perché con un numero di gradi di libertà inferiore non sarebbe possibile realizzare parti dalla complessità geometrica sufficiente, mentre, con un numero di gradi di libertà superiore la struttura risulterebbe essere più complicata, costosa e potenzialmente più ingombrante.

Come elemento fondamentale della struttura è stato scelto un profilato in alluminio, di cui si riporta un'illustrazione del modello 3D in vista isometrica attraverso la Figura 2.1.

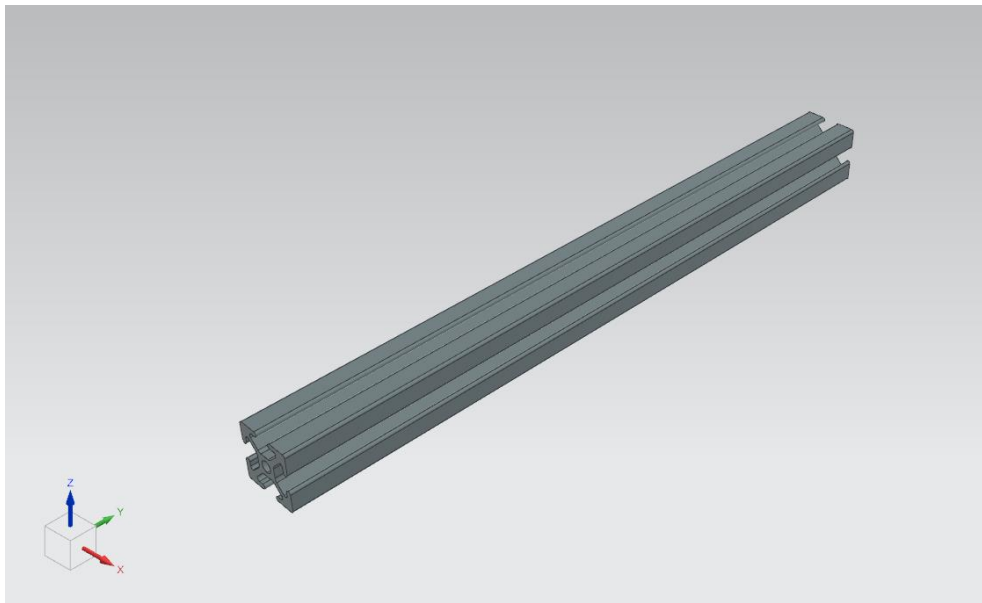


Figura 2.1 Rappresentazione in vista isometrica del modello 3D del profilato in alluminio

Infatti, esso è un prodotto economico che semplifica la fase di assemblaggio e quella di modulazione, sia durante la progettazione del modello CAD, che durante la realizzazione della struttura stessa. Questo è possibile anche grazie alla disponibilità in commercio di minuteria metallica compatibile ad esso, che, inoltre, evita di dover utilizzare collegamenti permanenti, come saldature.

In questo paragrafo verranno illustrati i processi logici alla base della progettazione effettuata.

2.2.2 Base di supporto

Inizialmente, la prima funzione che si è deciso di implementare è stata quella di supporto della struttura. Pertanto, come anticipato in precedenza, sono stati utilizzati dei profilati, i quali sono stati posizionati in modo da creare una base su cui poggiare la struttura stessa.

In dettaglio, sono state utilizzate due barre a sezione tripla, posizionate longitudinalmente, per la parte posteriore ed una barra a sezione tripla, anch'essa posizionata longitudinalmente, per la parte anteriore.

Per collegare la parte anteriore e posteriore sono state utilizzate due barre a sezione singola, poste a destra ed a sinistra in direzione trasversale.

Con questa configurazione, i profilati sarebbero stati liberi di muoversi reciprocamente, pertanto, sono state modellate appositamente delle piastre ottenibili mediante lavorazioni per asportazione di truciolo.

Per accoppiare le piastre e le barre sono state utilizzate delle viti che attraversano i fori passanti delle piastre stesse, si inseriscono tra le scanalature del profilato e sono state serrate mediante delle T-Nut filettate.

Per irrigidire le barre longitudinali ed evitarne una possibile flessione sono state realizzate delle piastre centrali, anch'esse ottenibili mediante delle lavorazioni per asportazione di truciolo. Come per le precedenti, l'accoppiamento con le barre è stato ottenuto attraverso l'utilizzo di viti e T-Nut.

Per rialzare la struttura ed evitare che dei componenti avessero potuto toccare il piano di appoggio sono stati utilizzati dei piedi in gomma, accoppiati alle piastre mediante viti e fori filettati realizzati sulle piastre stesse.

2.2.3 Rotazione del mandrino

Per prima cosa è stato modellato il mandrino, sul quale viene avvolto il towpreg. Esso è ottenibile mediante tecnologie di Additive Manufacturing ed è caratterizzato, in corrispondenza delle calotte, da due fori filettati, nei quali sono state avvitate due aste. A questo punto è stato necessario progettare due sottoassiemi per il sostenimento e la rotazione del mandrino stesso. Entrambi sono stati collocati sopra la barra anteriore a sezione tripla.

Partendo dal sottoassieme di sinistra (*supporto sinistro del mandrino*), per alzare l'asse del mandrino ad una determinata altezza dalla base di supporto, si è fatto ricorso nuovamente ad

un profilato in alluminio, a sezione doppia e non singola, per via della snellezza del secondo. In seguito, per permettere lo scorrimento longitudinale della barra di supporto e fissarla nella posizione desiderata, si è fatto ricorso all'utilizzo di viti, T-Nut e staffe con asole. In dettaglio, le viti passano attraverso le asole e vengono serrate grazie all'avvitamento sulle T-Nut filettate. Sono state utilizzate delle staffe con asole in modo da permettere un corretto allineamento di viti e T-Nut con le scanalature del profilato.

Successivamente, in direzione longitudinale è stato eseguito un foro ad un'altezza pari a quella voluta per l'asse del mandrino ed è stato modellato un albero, ottenibile per tornitura, filettato ad un'estremità ed accoppiato con il sistema di afferraggio. Quest'ultimo è filettato all'estremità sinistra, mentre l'altra estremità è caratterizzata da un'apertura variabile all'interno della quale si inserisce l'asta avvitata nella calotta sinistra del mandrino. In questo modo il sistema di afferraggio si può adattare ad aste di varie dimensioni.

Al fine di ridurre l'attrito tra l'albero rotante nella barra di supporto ed essa stessa, sono state incastrate in corrispondenza del foro passante, alle due estremità, delle bronzine, entro le quali l'albero ruota.

Per evitare possibili slittamenti dell'albero in direzione assiale, sono stati modellati dei collari, con diametro interno pari al diametro dell'albero, che sono stati incastrati e pertanto, resi solidali ad esso.

Per limitare l'attrito generato dal moto angolare relativo tra le bronzine ed i collari, tra essi, sono state frapposte delle rondelle in nylon.

Infine, a fini estetici, la parte superiore della barra è stata chiusa mediante una piastra modellata e realizzabile mediante lavorazioni per asportazione di truciolo. L'accoppiamento tra le due è stato ottenuto mediante viti e la filettatura realizzata nei fori caratterizzanti il profilato.

In merito al sottoassieme di destra (*supporto destro del mandrino*), è stata di nuovo utilizzata una barra a sezione doppia, che è stata filettata superiormente, per l'accoppiamento a fini estetici con piastra e viti citate in precedenza, ed inferiormente, per fissarne la posizione sulla base di supporto, mediante viti e clip alate. Serrandole, si genera compressione tra i profilati. Avendo forato la base in corrispondenza della testa di quest'ultime viti, esse sono facilmente accessibili dal lato opposto del profilato.

Anche in questo caso è stato eseguito un foro passante sulla barra, sono state inserite delle bronzine all'interno delle quali ruota, come in precedenza, un albero collegato ad un'estremità al sistema di afferraggio dell'asta destra del mandrino.

Questa volta, per bloccare la possibile traslazione assiale dell'albero è stato modellato un solo collare, in quanto, all'altra estremità questa mansione è stata assegnata ad una puleggia con profilo B, avente diametro del foro pari a quello dell'albero e solidale ad esso. Il collare e la puleggia sono stati separati dalle rispettive bronzine con le medesime rondelle in nylon. A questo punto è stato necessario implementare la rotazione del mandrino, per ottenere il primo grado di libertà della macchina. Pertanto, si è deciso di far utilizzo di un sistema di trasmissione, costituita da pulegge e cinghia dentate, che trasferisce la coppia generata dal motore all'asse del mandrino stesso. Siccome in commercio sono presenti cinghie di lunghezza variabile, si è riscontrata la necessità di poter variare la distanza relativa le due pulegge, a seconda della lunghezza cinghia scelta. Ciò è stato ottenuto modellando un'apposita piastra, realizzabile mediante delle lavorazioni per asportazione di truciolo, ed accoppiandola sia con la flangia del motore mediante viti e dadi, che con la barra di supporto attraverso viti ed una T-Nut doppia. Così il motore e la rispettiva puleggia possono assumere più configurazioni lungo l'altezza del profilato, consentendo un corretto tensionamento della cinghia stessa.

2.2.4 Traslazione del carro mobile

In primo luogo, è stata riscontrata la necessità di una *base* che permettesse la *traslazione del carro mobile*. Pertanto, è stata modellata una prima piastra presentante fori passanti, filettati e non, ed asole ed, in seguito, due piastre uguali accoppiate alla prima mediante viti e fori passanti e filettati. A quest'ultime sono state collegate delle ruote attraverso viti e dadi, i quali distanziano le ruote dalle piastre ed impediscono alla ruota di muoversi lungo la vite. Per poter adattare la base del carrello a profilati di larghezza differente, come anticipato in precedenza sono state realizzate delle asole sulla prima piastra, che permettono di variare la distanza tra le coppie di ruote. Le ruote scelte si adattano alle scanalature del profilato. La base può traslare lungo le due barre posteriori a sezione tripla.

Al di sopra di essa è stato posizionato un *telaio*, che, come sarà discusso in sottoparagrafi successivi, sostiene e permette, assieme ad altri componenti, di conferire alla testa due gradi di libertà.

Esso è costituito da due barre orizzontali, ciascuna assemblata con due barre verticali accoppiate con viti e clip alate. Per fissare quest'ultime sulle prime, sono stati realizzati dei fori passanti sulle barre orizzontali. Le precedenti barre citate sono a sezione singola e sono state coperte a fini estetici con piastre e viti.

Per accoppiare il telaio alla base, sempre sulle barre orizzontali, sono stati praticati altri fori passanti nei quali si inseriscono delle viti serrate mediante fori filettati eseguiti sulla prima piastra.

Siccome il telaio deve essere opportunamente rialzato, sono stati utilizzati dei distanziatori nei quali sono state inserite le viti trattate in precedenza.

Anche in questo caso, per trasferire la coppia motrice dal motore all'utilizzatore (carro mobile), è stato impiegato un sistema di trasmissione costituito da due pulegge ed una cinghia aperta dentate.

Una delle due fa parte del *sistema di supporto sinistro del carro*, costituito da molteplici componenti, in cui ognuno di essi svolge specifiche funzioni.

Infatti, per sostenere la puleggia, è stata utilizzata una barra a sezione doppia che è stata forata ad altezza adeguata, nel quale ruota un albero modellato in precedenza. Per ridurre l'attrito, come trattato nel sottoparagrafo precedente, sono state utilizzate delle bronzine che si incastrano nel profilato.

Per impedire lo slittamento assiale dell'albero, è stato modellato un collare ed è stato inserito ad un'estremità dell'albero, mentre all'estremità opposta è stata utilizzata la puleggia sopraccitata con profilo B.

Sia tra la bronzina ed il collare, che tra la puleggia e l'altra bronzina, sono state interposte delle rondelle per limitare l'attrito tra i componenti.

I componenti accoppiati all'albero sono solidali ad esso stesso, ad esclusione delle bronzine. Tale sottoassieme è stato fissato alla barra trasversale sinistra a sezione singola, presentante opportuni fori passanti, grazie all'utilizzo di viti, clip alate e fori filettati.

Il *sistema di supporto destro del carro*, invece, è costituito semplicemente da una barra a sezione doppia, accoppiata allo stesso modo della precedente, con l'altra barra trasversale della base di supporto.

Per allineare la puleggia motrice alla precedente, il motore è stato accoppiato ad una piastra, appositamente modellata, mediante viti e dadi; inoltre, essa può scorrere lungo il profilato, in direzione verticale, attraverso viti e T-Nut doppia.

Entrambe le barre a sezione doppia di quest'ultimi due sottoassiemi sono state ricoperte con piastre e viti per migliorare l'estetica degli assemblati.

In seguito, per rendere solidale la cinghia al carro, si è deciso di farla passare al di sotto della base dello stesso e comprimerla alle estremità mediante piastre, viti e T-Nut doppia posizionate sulle due barre orizzontali del telaio.

Per limitare il range relativo alla traslazione del carro, sulle barre posteriori della base di supporto sono state posizionate delle piastre, opportunamente modellate, accoppiate a viti e T-Nut ed ospitanti dei bottoni che, se premuti dal carro, determinano il fine corsa.

2.2.5 Traslazione della testa di deposizione

Per implementare la *traslazione della testa di deposizione* è stata utilizzata una barra a sezione doppia movimentata attraverso un motore ed un sistema di trasmissione composto da due pulegge uguali ed una cinghia dentata.

Per convertire il moto rotatorio in traslatorio, rendendo solidale la barra con la cinghia, è stata utilizzata una piastra di bloccaggio fissata alla barra stessa tramite viti, fori passanti e filettati.

In questo modo, facendo passare la cinghia sotto tale piastra e tra le viti, e serrandole, la cinghia viene compressa tra la piastra e la barra stessa.

Per sostenere tale barra sono stati modellati degli sliders, ottenibili attraverso processi di Additive Manufacturing. Un'estremità di ognuno è stata inserita all'interno delle scanalature del profilato, svolgendo la funzione di guida per esso. Per tale motivo, come materiale per questi sliders è stato scelto il PC PTFE (Policarbonato Teflonato), che, essendo caratterizzato da un basso coefficiente d'attrito, ne agevola lo scorrimento.

L'altra estremità di una fila di sliders è stata inserita in fori quadrati appartenenti alla piastra destra di supporto specificamente modellata.

Invece, l'estremità dell'altra fila di sliders è stata inserita sempre in fori quadrati, però relativi alla piastra sinistra di supporto, anch'essa opportunamente progettata.

Per comprimere gli sliders di entrambe le piastre di supporto, sono state utilizzate due piastre identiche tra loro fissate alle prime mediante viti, fori passanti e filettati.

Per permettere la traslazione in direzione verticale delle piastre di supporto e di tutta la struttura trattata in questo sottoparagrafo, in esse sono stati praticati ulteriori fori in cui sono state inserite delle viti accoppiate con T-Nut doppie. Quest'ultime sono state inserite dentro le scanalature delle barre verticali del telaio.

Il motore è stato fissato sulla relativa piastra mediante viti, fori passanti e dei fori filettati sulla flangia stessa del motore. Su questa piastra è stata ricavata un'asola, la quale, assieme a viti e fori filettati realizzati sulla piastra sinistra di supporto, ha permesso un accoppiamento con quest'ultima.

La piastra sinistra di supporto è stata modellata in modo da tale da presentare uno scavo in corrispondenza del motore. Questo ha consentito di posizionare il motore leggermente più avanti, garantendo un corretto allineamento tra la puleggia motrice e quella utilizzatrice.

Inoltre, l'asola sulla piastra di montaggio del motore consente ad esso stesso ed alla rispettiva puleggia di traslare trasversalmente all'asse del mandrino, per tensionare opportunamente la cinghia dentata.

Per far coincidere l'asse della puleggia utilizzatrice a quello della puleggia motrice, in termini di altezza rispetto alla barra traslante, essa è stata montata su un albero, il quale è stato inserito tra i fori passanti di due piastre: la sopracitata piastra sinistra di supporto e la piastra di supporto di tale albero.

Per ridurre l'attrito dell'albero rotante all'interno di tali fori, sono state utilizzate delle boccole incastrate in essi.

Al fine di evitare il movimento assiale dell'albero, è stato modellato un collare posto a contatto con la boccia della piastra di supporto dell'albero ed è stato scelto un profilo di tipo B per la puleggia utilizzatrice posta all'estremità opposta.

Alla fine di entrambe le piastre di supporto, sinistra e destra, sono stati posizionati ulteriori sliders in PC PTFE differenti dai precedenti. Quello di destra svolge semplicemente la funzione di ulteriore guida per la barra a sezione doppia, mentre, quello di sinistra adempie anche alla funzione di supporto alla piastra sostenente il sensore di fine corsa relativo alla traslazione della barra. Quest'ultima è stata fissata allo slider mediante fori passanti, viti parzialmente filettate ed una T-Nut doppia. Inoltre, per porli relativamente ad una corretta

distanza, evitando la collisione della testa di deposizione con il telaio, sono stati modellati e posizionati dei distanziatori coassialmente alle viti.

Infine, è stata modellata una piastra, ottenibile combinando lavorazioni per asportazione di truciolo e saldatura, per azionare il sensore di fine corsa precedentemente citato.

Quest'ultima piastra è stata progettata anche per ospitare il sensore di fine corsa relativo alla rotazione della testa, di cui si parlerà nel sottoparagrafo successivo.

Tramite l'accoppiamento tra viti e fori filettati, tale piastra è stata bloccata sulla barra traslante.

Le piastre di supporto sinistra e destra, lo slider finale di destra e la piastra di supporto dell'albero della puleggia sono stati dotati di fori passanti per inserirvi delle viti accoppiate a T-Nut doppie, che possono scorrere all'interno delle scanalature delle barre verticali del telaio, permettendo la regolazione in altezza della struttura prima dell'inizio del processo di avvolgimento del towpreg. Questo permette di regolare l'altezza dell'asse della testa in base all'altezza dell'asse del mandrino, rendendoli complanari (piano parallelo alla base di appoggio).

2.2.6 Rotazione della testa di deposizione

Per implementare la *rotazione della testa di deposizione*, si è deciso, dapprima, di modellare un tubo, realizzabile per estrusione, il quale è stato inserito all'interno di una piastra in alluminio, appositamente modellata ed ottenibile tramite lavorazioni per asportazione di truciolo.

Essa sostiene la testa grazie all'utilizzo di ulteriori componenti. In dettaglio vi sono delle viti che attraversano i fori passanti realizzati sulla piastra, i fori passanti delle piastre in PC PTFE. Esse sono state serrate attraverso dei dadi.

Le piastre sopracitate, realizzabili in Additive Manufacturing, sono in PC PTFE, per ridurre l'attrito con il tubo stesso che ruota all'interno di esse. Per distanziarle correttamente sono stati impiegati dei distanziatori in nylon coassiali alle viti.

Per evitare la traslazione del tubo in direzione assiale, è stato utilizzato un primo anello di bloccaggio, posizionato posteriormente all'ultima piastra in PC PTFE, poiché dotato di viti di fermo. Esso, di conseguenza risulta essere solidale al tubo.

Un secondo anello di bloccaggio è stato interposto tra altri due componenti: l'anello in PC PTFE e la piastra per la determinazione del fine corsa della rotazione della testa di deposizione.

Quest'ultima piastra, infatti, ruotando tocca il sensore posizionato sulla piastra descritta nel sottoparagrafo precedente.

All'estremità del tubo è stata posizionata una piastra con bracci, sostenenti il rullo di deposizione, fabbricabile combinando delle lavorazioni per asportazione di truciolo alla saldatura.

Il rullo concavo, comprensivo di cuscinetti, è stato posizionato tra i due bracci, coassialmente alla vite inserita tra i fori presenti sui bracci stessi. Tale vite, filettata solamente dove non vi è la presenza del rullo, è stata serrata mediante l'utilizzo di un apposito dado.

Tra queste ultime due piastre è stata interposta una puleggia con profilo A. Essa è stata accoppiata ad un'ulteriore puleggia (motrice) mediante una cinghia dentata, per ottenere un sistema di trasmissione per la riduzione dei carichi e delle inerzie.

Il secondo anello di bloccaggio, la piastra per la determinazione del fine corsa, la puleggia utilizzatrice e la piastra con bracci sono stati forati per inserire delle viti in modo da evitare possibili movimenti reciproci. Più precisamente, i fori realizzati sull'anello di bloccaggio sono stati filettati per serrare le viti e comprimere tali componenti.

Tutti questi ultimi componenti, in tale modo, sono stati resi solidali al tubo.

Per evitare che le estremità di queste viti avessero potuto toccare la piastra sostenente la testa generando attrito, tra le prime e quest'ultima è stato frapposto un ulteriore anello in PC PTFE, anch'esso solidale al tubo.

Sia quest'ultimo anello che il rullo sono realizzabili mediante processi di manifattura additiva.

La puleggia motrice è stata montata sull'albero del corrispettivo motore ed il motore stesso è stato accoppiato ad una piastra mediante viti serrate attraverso fori filettati sulla propria flangia. Sulla medesima piastra sono stati realizzati dei fori passanti per delle viti ed una T-Nut doppia. In questo modo, avendo inserito quest'ultime viti all'interno dell'asola della prima piastra in alluminio, il motore è movimentabile verticalmente, garantendo un corretto tensionamento della cinghia dentata.

Infine, la piastra di fissaggio in alluminio è stata bloccata sulla barra di traslazione della testa di deposizione attraverso delle viti avvitate nei fori filettati della barra stessa.

2.2.7 Percorso del towpreg

In questo sottoparagrafo verrà discusso il *percorso del towpreg*, dalla bobina fino alla testa di deposizione, e le funzioni svolte dai componenti che esso incontra durante il suddetto tragitto.

Inizialmente è stata modellata un'asta attraversante assialmente la bobina di towpreg, posizionata su un apposito supporto. Essendo stata incastrata in essa, le due ruotano assieme solidalmente.

Per sostenere l'asta e quindi la bobina, sono state modellate ed impiegate due piastre identiche. Il loro profilo è stato realizzato in modo da permettere l'alloggiamento e la rotazione dell'asta stessa. Ad esse sono state accoppiate ulteriori piastre, identiche tra loro, per evitare che l'asta potesse muoversi in direzione assiale. L'accoppiamento è stato ottenuto mediante viti, fori passanti non filettati e T-Nut doppie inserite nelle scanalature di due barre a sezione singola verticali. Di conseguenza le due piastre possono traslare verticalmente, consentendo la regolazione in altezza della bobina stessa.

Le due barre sono state assemblate ad una barra orizzontale attraverso viti, fori filettati e clip alate, accessibili dal lato opposto del profilato.

Inoltre, quest'ultima è stata forata per permettere il passaggio di viti, che accoppiandosi a loro volta con T-Nut posizionate nelle scanalature delle barre verticali del telaio del carro, consentono un'ulteriore regolazione in altezza del sottoassieme appena descritto.

Per tensionare il towpreg è stata impiegata una soluzione commercialmente già utilizzata. Infatti, è stata modellata una piastra con la quale bloccare il nastro in velcro, il quale genera attrito sul supporto della bobina. Per permettere la traslazione di tale piastra lungo la barra orizzontale, sulla piastra stessa sono stati praticati fori passanti non filettati ed impiegate viti ed una T-Nut doppia. Aumentando il tensionamento del velcro, si genera un maggior attrito sul supporto della bobina causando un incremento della tensione del towpreg.

Anche le barre verticali appartenenti a questo sottoassieme sono state ricoperte a fini estetici. Per permettere al towpreg di raggiungere la testa di deposizione, è stato realizzato un ulteriore sottoassieme.

Infatti, è stato adoperato un rullo posizionato posteriormente e sostenuto dall'azione combinata di una vite passante tra i fori di due piastre identiche ed un dado.

La presenza di cuscinetti all'interno del rullo stesso ne favorisce la rotazione riducendo l'attrito con la vite.

Le piastre di sostegno sono state montate su ulteriori due piastre che accoppiate a degli sliders in PC PTFE, inseriti nelle scanalature delle barre orizzontali del telaio del carro, che ne permettono lo scorrimento lungo esse. Per evitare una possibile flessione degli sliders sono state modellate delle piastre caratterizzate dalla presenza di fori filettati, le quali sono state posizionate al di sotto degli sliders. Ciò, unitamente all'utilizzo di viti, permette di comprimere gli sliders tra le piastre.

Per autoregolare la tensione sono state impiegate due molle, posizionate all'interno delle scanalature delle barre orizzontali del telaio, che si comprimono tra l'ultima coppia di sliders (destra e sinistra) e viti e T-Nut. Anche questa soluzione è stata precedentemente implementata in altri sistemi commerciali.

Per direzionare il towpreg in uscita dal rullo posteriore, davanti ad esso sono stati assemblati tra loro e posti: viti, dadi ad alette e distanziatori in nylon. Siccome sono stati accoppiati ad una piastra sulla quale è stata ricavata un'asola, essi possono scorrere ed essere regolati ad una distanza dipendente dalla larghezza del towpreg stesso.

Su tale piastra sono stati praticati anche dei fori passanti filettati. Grazie ad essi, ai fori passanti non filettati ed all'impiego di viti, è stata posta a contatto con le piastre ospitanti gli sliders.

Per evitare un movimento non simultaneo del lato destro e di quello sinistro di tale sottoassieme, i due sono stati collegati grazie all'impiego di: un'ulteriore piastra posta trasversalmente, viti, fori passanti filettati e non.

Per indirizzare correttamente il towpreg verso la testa di deposizione è stato utilizzato, anteriormente, un rullo rivestito in poliuretano, montato su una vite e dotato di opportuni cuscinetti.

Per allineare il rullo alla testa di deposizione, la vite è stata inserita tra i fori passanti e non filettati di due piastre coincidenti precedentemente modellate, sulla cui estremità è stato avvitato un dado.

Sulle due piastre sono stati realizzati molteplici fori, in modo da adattare l'altezza del rullo a quella della testa di deposizione. Queste due piastre sono state successivamente assemblate rispettivamente alle piastre, destra e sinistra, di supporto della barra dedicata alla traslazione della testa attraverso fori passanti filettati e non ed opportune viti.

Inoltre, su quest'ultime piastre sono stati realizzati ulteriori fori passanti filettati per poter avvicinare il rullo alla testa di deposizione o allontanarlo, a seconda delle necessità.

2.3 Dimensionamento dei motori

2.3.1 Introduzione

Se nel paragrafo precedente è stata illustrata la progettazione della macchina, in questo sottoparagrafo è previsto un richiamo teorico necessario per il dimensionamento dei quattro motori, adattandolo al caso specifico. Si supponga di considerare sistemi a 1 g.d.l., ovvero sistemi in cui il moto e la dinamica di essi possono essere descritti in funzione di un'unica coordinata libera. Sebbene possano essere caratterizzati da una complessità più o meno elevata, tipicamente vengono schematizzati efficacemente in:

- *motore*, che consente di sviluppare forze o coppie motrici, introducendo potenza meccanica nel sistema stesso;
- *trasmissione*, che trasferisce la potenza motrice al carico adattandone le caratteristiche;
- *utilizzatore* (o *carico*), il quale genera forze o coppie resistenti, che compiono lavoro negativo.

Poco frequentemente l'utilizzatore viene collegato direttamente al motore; il modello dinamico di questo sistema si riduce a:

$$M_m(\omega) - M_u(\omega) = (J_m + J_u)\dot{\omega} \quad (1)$$

dove si è ipotizzato che la coppia che il motore eroga e quella che il carico assorbe dipendano esclusivamente dalla velocità angolare ω . Ad oggi, però, per favorire l'adattamento del carico al motore si predilige l'utilizzo di una trasmissione rispetto all'uso di un accoppiamento diretto. Nonostante la complessità della trasmissione, se il sistema ha

solamente un grado di libertà è comunque possibile ricondurre lo studio all'accoppiamento diretto tra motore ed utilizzatore.

Considerando una trasmissione in cui un motore pone in rotazione un carico mediante un riduttore con un rapporto di trasmissione costante τ ed un rendimento η e siano M_m la coppia del motore e ω_m la velocità angolare del motore stesso, J_m e J_u rispettivamente il momento d'inerzia del rotore e del carico, è possibile ottenere:

$$\eta M_m - M_u \omega_u = \eta \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_m \omega_m^2 \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_u \omega_u^2 \right) \quad (2)$$

Siccome $\tau = \frac{\omega_u}{\omega_m}$ è un valore costante è possibile eliminare o la velocità angolare del motore (ω_m) o quella del carico (ω_u).

In dettaglio, ponendo $\omega_u = \tau \omega_m$, si ottiene l'equazione di moto della macchina *ridotta al motore* (albero veloce):

$$M_m - \frac{\tau}{\eta} M_u = \left(J_m + \frac{\tau^2}{\eta} J_u \right) \dot{\omega}_m \quad (3)$$

Nella (3) compare solamente l'accelerazione angolare del motore e non quella relativa al carico. Il secondo termine a primo membro viene definito *coppia resistente ridotta al motore*, invece, il termine all'interno delle parentesi è definito *inerzia ridotta al motore*.

Nella (2) inserendo $\omega_m = \omega_u / \tau$ si ottiene l'equazione di moto della macchina *ridotta al carico* (albero lento):

$$\frac{\eta}{\tau} M_m - M_u = \left(\frac{\eta}{\tau^2} J_m + J_u \right) \dot{\omega}_u \quad (4)$$

In essa, a differenza della (3) compare esclusivamente l'accelerazione angolare del carico. Il primo termine è definito *coppia motrice ridotta al carico*, mentre il termine tra le parentesi è definito *inerzia ridotta al carico*.

La (3) e la (4) sono due equazioni del tutto equivalenti.

Può anche presentarsi il caso in cui in una macchina il carico sia costituito da una massa m_u che trasla con velocità v_u a cui è applicata una forza F_u , ovvero la proiezione della forza \vec{F} lungo la direzione della velocità v_u . Pertanto, la potenza resistente è ottenuta dalla formula $P_u = F_u v_u$.

Conseguentemente, la (2) può essere riscritta come:

$$\eta M_m - F_u v_u = \eta \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_m \omega_m^2 \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m_u v_u^2 \right) \quad (5)$$

Anche in questo caso è possibile individuare un costante $r = v_u / \omega_m$ con la quale poter esprimere v_u in funzione di ω_m .

Riducendo la (5) al motore si ottiene:

$$M_m - \frac{r F_u}{\eta} = \left(J_m + \frac{r^2}{\eta} m_u \right) \dot{\omega}_m \quad (6)$$

Riducendo la (5) al carico, invece, si raggiunge:

$$\frac{\eta M_m}{r} - F_u = \left(\frac{\eta J_m}{r^2} + m_u \right) \dot{v}_u \quad (7)$$

Nella (7) viene definito *massa ridotta* (o *apparente*) *traslante* il termine tra le parentesi.

Se il rapporto di trasmissione τ risulta essere adimensionale, in quanto ottenuto mediante il rapporto tra le due velocità angolari, il rapporto di velocità r dimensionalmente è una lunghezza, poiché rapporto tra una velocità lineare ed una angolare.

Si può trattare analogamente anche il caso in cui il motore sia lineare e produca una forza F_m che trasla con una velocità pari a v_m .

Infine, si può affermare che, quando sono presenti molteplici organi che ruotano o traslano, la massa/inerzia e la forza/coppia ridotte devono essere calcolate mediante il flusso di potenza attraverso tutti i corpi ed, in seguito, esprimere tutte le velocità in funzione dell'albero rispetto al quale si desidera ridurre il moto. [16]

Dato che per il calcolo di tutte le coppie motrici è stato scelto un coefficiente di sicurezza abbastanza elevato ($k = 2.5$), il rendimento del sistema di trasmissione (η) è stato approssimato al 100% (considerando anche che le cinghie dentate hanno un rendimento estremamente elevato [17]) ed, inoltre, in quanto limitato, è stato trascurato il momento d'inerzia intrinseco al motore.

I motori scelti appartengono alla famiglia dei motori passo-passo, in quanto, non avendo adottato per la macchina un sistema di controllo ad anello chiuso, consentono di conoscere comunque in maniera accurata la posizione assunta. La ricerca del motore con la coppia adeguata all'applicazione è stata eseguita principalmente su STEPPERONLINE [g].

Inoltre, i valori relativi ad accelerazioni e velocità, sia angolari che lineari, sono stati definiti o consultando la letteratura scientifica o utilizzando il software CADWIND.

2.3.2 Dimensionamento del motore per la rotazione del mandrino

Per il dimensionamento del motore che permette la rotazione del mandrino, è stata utilizzata la (4), ma riformulata per lo specifico caso, ottenendo:

$$M_m = M_u \cdot \tau + \left(\frac{J_m}{\tau} + J_u \tau \right) \dot{\omega}_u \quad (8)$$

dove:

- M_m è la coppia complessiva che il motore deve erogare, sulla quale viene eseguito il dimensionamento;
- M_u è la coppia resistente generata dal prepreg che viene avvolto sulla superficie del mandrino con una determinata tensione;
- τ è il rapporto tra i denti della puleggia solidale all'albero motore (z_1) ed i denti della puleggia solidale all'albero lento (z_2);
- J_m è il momento d'inerzia relativo alla puleggia del motore;
- J_u è il momento d'inerzia complessivo del carico, fornito dai singoli momenti d'inerzia: della puleggia relativa al mandrino, del mandrino con il materiale composito avvolto, delle due aste che sostengono il mandrino, dei due sistemi di

afferraggio delle aste, dei due alberi, dei relativi tre collari di bloccaggio e delle quattro rondelle;

- $\dot{\omega}_u$ è la massima accelerazione angolare che il carico deve raggiungere.

2.3.3 Dimensionamento del motore per la traslazione della testa di deposizione

Per dimensionare il motore che permette alla testa di deposizione di traslare ortogonalmente rispetto all'asse del mandrino, sono state utilizzate la (7), opportunamente riformulata, e la (8).

In particolare, dalla (7) è stata ricavata:

$$M_m = F_u r + \left(\frac{J_m}{r} + m_u r \right) \dot{v}_u \quad (9)$$

dove:

- M_m è una parte della coppia complessiva che il motore deve erogare, ovvero quella necessaria a far traslare il carico;
- F_u è la forza di attrito tra la barra, che permette la traslazione della testa, ed i vari sliders;
- r è il raggio della primitiva della puleggia dentata collegata al motore;
- J_m è il momento d'inerzia relativo alla puleggia del motore;
- m_u è la massa complessiva che deve essere traslata, costituita dalla somma della massa: della testa di deposizione, delle relative piastre e viti, della barra traslante, del motore che pone in rotazione la testa e della relativa puleggia, supponendo, per precauzione, che il motore sia un NEMA 17 (in quanto la massa da traslare è relativamente contenuta) che eroga la massima coppia disponibile;
- \dot{v}_u è l'accelerazione massima lineare che il carico deve raggiungere.

Alla coppia motrice precedente deve essere sommata la coppia motrice ottenuta dalla (8), dove:

- M_m è la rimanente parte della coppia complessiva che il motore deve erogare, cioè quella necessaria a vincere l'inerzia del carico rotante;
- M_u è la coppia resistente generata dal carico ed in questo caso è stata posta pari a zero;
- τ è il rapporto di trasmissione tra le due pulegge, che è stato posto pari a 1, poiché esse hanno il medesimo numero di denti;
- J_m è il momento d'inerzia relativo alla puleggia del motore e coincide con J_u , in quanto le pulegge sono identiche;
- $\dot{\omega}_u$ è l'accelerazione angolare massima che le pulegge devono raggiungere per garantire la massima accelerazione lineare del carico traslante.

2.3.4 Dimensionamento del motore per porre in rotazione la testa di deposizione

Al fine di dimensionare il motore che permette la rotazione della testa di deposizione, è stata utilizzata solamente la (8), in cui:

- M_m è la coppia complessiva che il motore deve erogare, tramite la quale viene eseguito il dimensionamento;
- M_u è la coppia resistente generata dal carico, anche in questo caso è stata posta pari a zero;
- τ è il rapporto di trasmissione del sistema di riduzione;
- J_m è il momento d'inerzia relativo alla puleggia del motore;
- J_u è il momento d'inerzia complessivo del carico che ruota, costituito dalla somma dei momenti d'inerzia dei seguenti componenti: la puleggia della testa di deposizione, il rullo, le varie piastre che ruotano, minuteria metallica come viti e dadi, l'anello a basso coefficiente d'attrito, l'elemento tubolare ed i morsetti;
- $\dot{\omega}_u$ è la massima accelerazione angolare che il carico deve raggiungere.

2.3.5 Dimensionamento del motore per garantire la traslazione del carro mobile

Infine, per dimensionare il motore che permette al carro mobile di traslare in direzione parallela all'asse del mandrino, si è fatto ricorso alla (8) ed alla (9).

In dettaglio, nella (8):

- M_m è la parte della coppia complessiva che il motore deve erogare per vincere l'inerzia del carico rotante;
- M_u è la coppia resistente generata dal carico, posta pari a zero;
- τ è il rapporto di trasmissione tra le due pulegge, che, essendo caratterizzate dallo stesso numero di denti, è stato posto pari a 1;
- J_m è il momento d'inerzia relativo alla puleggia del motore;
- J_u è il momento d'inerzia del carico che ruota, il quale, trascurando alcuni componenti, è costituito dalla sola puleggia non motrice;
- $\dot{\omega}_u$ è l'accelerazione angolare che le pulegge devono raggiungere per garantire la massima accelerazione lineare del carro mobile.

Invece, nella (9):

- M_m è la restante parte della coppia che il motore deve generare per garantire la traslazione del carro mobile;
- F_u è la forza di attrito volvente che si manifesta tra le ruote del carro mobile ed il profilato;
- r è il raggio della primitiva della puleggia dentata collegata al motore;
- J_m è il momento d'inerzia relativo alla puleggia del motore;
- m_u è la massa che il motore deve movimentare linearmente, composta dalla somma delle masse dei molteplici componenti, tra cui piastre, minuteria metallica, pulegge, motori, profilati e bobina di preimpregnato;
- \dot{v}_u è l'accelerazione massima lineare che il carico mobile deve raggiungere.

2.4 Valutazione dei parametri di processo

2.4.1 Introduzione

In questo paragrafo verrà presentato il processo logico che ha permesso di eseguire la valutazione dei parametri del processo di avvolgimento per un singolo strato di laminato, con opportuni richiami teorici relativi al software CADWIND. In seguito, si tratterà di come sia stato possibile ricavare il tempo necessario per realizzare tale strato avvolto sulla superficie del mandrino, con le medesime caratteristiche di quello considerato durante la fase di progettazione.

2.4.2 Creazione del modello del mandrino

Dopo aver scelto di creare un modello del mandrino a sezione circolare, sono stati immessi i valori relativi ai seguenti parametri:

- *Cross section Diameter*: diametro della parte cilindrica del mandrino;
- *Length*: lunghezza della parte cilindrica del mandrino;
- *Front pole cap e back pole cap*: tipologia delle calotte del mandrino;
- *Pole openings diameter*: apertura, in corrispondenza delle calotte, per le aste;
- *Pole caps Length*: lunghezza delle calotte;
- *Number of frames*: numero dei frames del mandrino. [18]

2.4.3 Parametri di processo

Definito il mandrino, è stato necessario stabilire il *Winding angle*, ovvero l'angolo che si viene a creare tra l'asse attorno al quale il mandrino ruota e la direzione di deposizione delle fibre [18], considerando anche la necessità di dover stratificare sulle calotte. Ulteriormente, per la scelta di tale angolo, è stato tenuto in considerazione il fatto che, scendendo a valori troppo bassi, si sarebbero potute presentare delle problematiche durante il processo di avvolgimento.

Stabilito ciò, sono stati modificati i parametri presenti all'interno del software con l'obiettivo di avvolgere il mandrino fino all'apertura dei poli.

Superiormente, nella sezione *Winding parameter*, si trovano:

- *Start frame*: il frame, appartenente al mandrino, in corrispondenza del quale l'avvolgimento ha inizio e fine;
- *Start position*: la posizione circonferenziale, coincidente con il parametro precedente, in cui si inizia ad avvolgere;
- *Start winding direction*: la direzione di avvolgimento, che può essere *forward* o *backward* a seconda della direzione, lungo l'asse Y, d'inizio avvolgimento;
- *Turning zones*: zone di suddivisione del mandrino (*Front turning zone*, *Centre winding zone*, *Back turning zone*) tramite le quali controllare la posizione in cui le fibre girano per tornare al centro del mandrino.
- *Friction factor*: il coefficiente di attrito che si genera tra la fibra e la superficie del mandrino;
- *Total bandwidth*: larghezza totale dei vari rovings/tow depositati.
- *Coverage range*: vicinanza tra le bande depositate (perfettamente adiacenti, *gap* o *overlap*). [18]

Inferiormente, nella medesima sezione, vengono mostrati i risultati, cioè i possibili patterns [18].

Invece, nella sezione *Material parameter* sono presenti i parametri relativi al materiale depositato che, però, non influenzano il percorso di avvolgimento [18]. Essi sono stati lasciati di default.

Capitolo 3 – Risultati e discussione

3.1 Risultati della progettazione della macchina di Filament Winding

3.1.1 Introduzione

Dopo aver evidenziato il processo logico alla base della progettazione della macchina nel paragrafo 2.2, in questo paragrafo ne verranno riportati i risultati costituiti da distinte di base (*Bill Of Materials*) ed immagini necessarie per illustrare i vari sottoassiemi e l'assemblato finale.

Inoltre, si definirà quali componenti sono stati modellati attraverso NX e quali, invece, sono stati scaricati da siti commerciali e quindi acquistabili.

I siti che sono stati consultati per la ricerca dei componenti sono:

- MISUMI [h];
- 80/20 [i];
- Trace Parts [j].

3.1.2 Base di supporto

La seguente Tabella 3.1 mostra la distinta di base del sottoassieme *Base di supporto*.

Tabella 3.1 Distinta di base del sottoassieme Base di supporto.

NOME COMPONENTE	QTY	COMMERCIALE
BARRA LONGITURINALE A SEZIONE TRIPLA ANTERIORE	1	X
BARRA TRASVERSALE A SEZIONE SINGOLA	2	X
BARRA LONGITUDINALE A SEZIONE TRIPLA POSTERIORE	2	X
PIEDE DI GOMMA	15	X
SHBT VITE COMPLETAMENTE FILETTATA M4X0.7X16MM	15	X
T-NUT M6X1MM	30	X
VITE M6X1X12MM	28	X
PIASTRA AD ANGOLO	6	
PIASTRA CENTRALE	1	
PIASTRA CENTRALE LUNGA	1	
PIASTRA LIMITATRICE	2	
BHSCS M6X1X10MM	2	X

Invece, di seguito, nelle Figure 3.1 e 3.2 è illustrato il modello CAD del sottoassieme *Base di supporto* rispettivamente in vista isometrica e dal basso.



Figura 3.1 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del sottoassieme Base di supporto

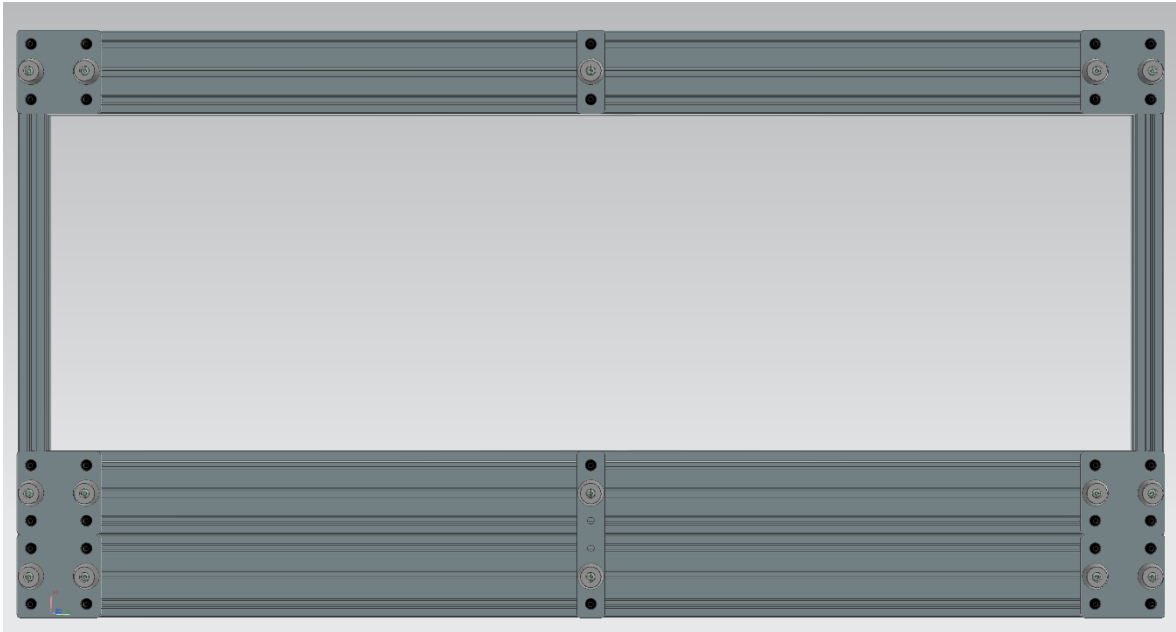


Figura 3.2 Rappresentazione, in vista dal basso (piano xy), del modello CAD del sottoassieme Base di supporto

3.1.3 Rotazione del mandrino

Di seguito è riportata La Tabella 3.2 che mostra la distinta di base del sottoassieme *Rotazione del mandrino*.

Tabella 3.2 Distinta di base del sottoassieme Rotazione del mandrino

NOME COMPONENTE	QTY	COMMERCIALE
BARRA DI SUPPORTO	2	X
PIASTRA BARRA DI SUPPORTO	2	
ALBERO	2	
RONDELLA IN NYLON	4	X
BRONZINA	4	X
COLLARE ALBERO	3	
SISTEMA DI AFFERRAGGIO	2	X
THUMB SCREW M5X0.8X15MM	4	X
BHSCS M6X1X10MM	8	X
T-NUT M6X1MM	6	X
STAFFA AD L CON ASOLE	3	X
CLIP ALATA	2	X
BHSCS M5X0.8X10MM	2	X
ATP16L050-B-H13_B (PULEGGIA MANDRINO)	1	X
MOTORE NEMA23 MANDRINO	1	X
DADO M5	4	X
ATP10L050-B-H12_B (PULEGGIA MOTORE MANDRINO)	1	X
BHSCS M5 MOTORE MANDRINO	4	X
PIASTRA MOTORE MANDRINO	1	
TNUT DOPPIA M6	1	X
ASTA MANDRINO	2	
MANDRINO	1	

Invece, nelle seguenti Figure 3.3 e 3.4, è illustrato il modello CAD del sottoassieme *Rotazione del mandrino*, posizionato sulla base di supporto, di cui la seconda in vista isometrica.

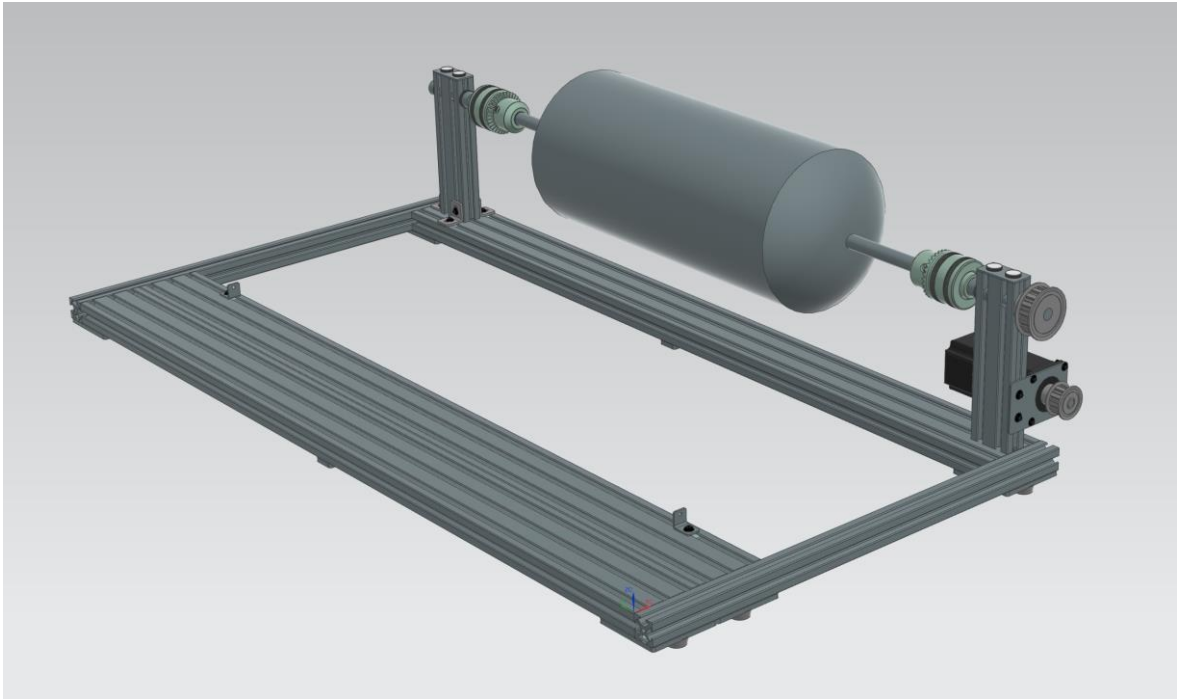


Figura 3.3 Rappresentazione del modello CAD del sottoassieme Rotazione del mandrino posizionato al di sopra della base di supporto

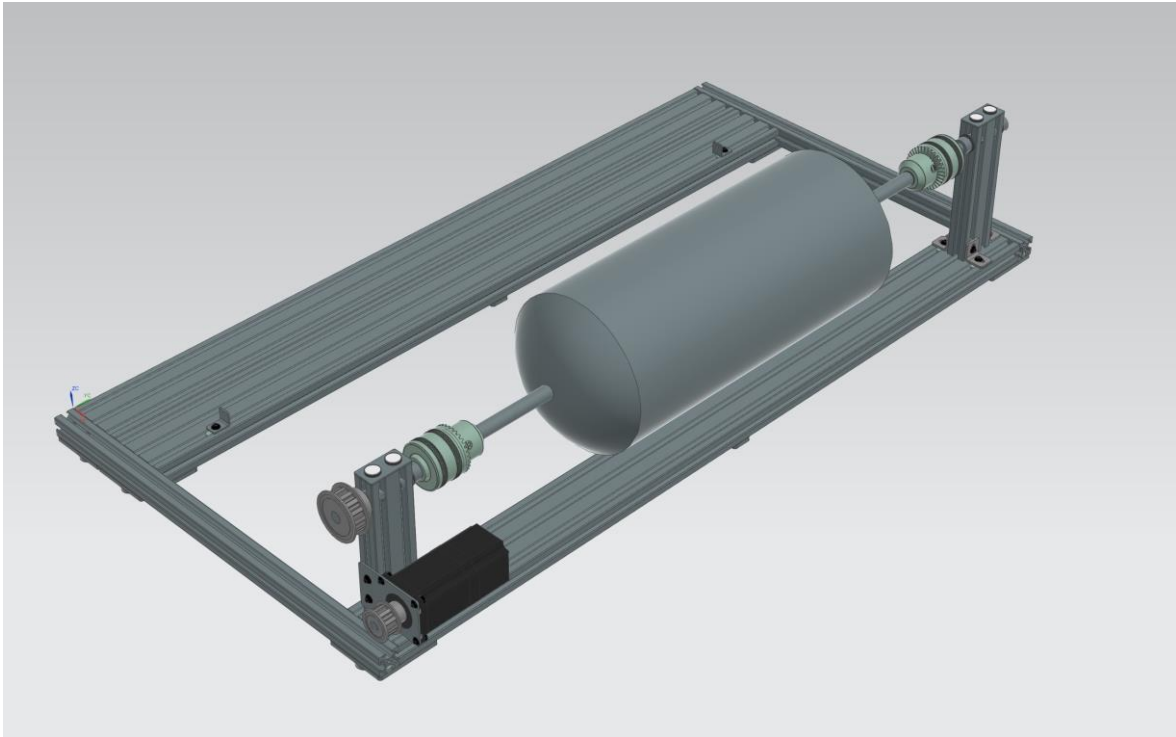


Figura 3.4 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del sottoassieme *Rotazione del mandrino* posizionato al di sopra della base di supporto

3.1.4 *Traslazione del carro mobile*

Relativamente al sottoassieme *Traslazione del carro mobile*, la Tabella 3.3 ne riporta la distinta di base.

Tabella 3.3 Distinta di base del sottoassieme Traslazione del carro mobile.

NOME COMPONENTE	QTY	COMMERCIALE
BASE CARRO MOBILE 1	1	
BASE CARRO MOBILE 2	2	
VITE M6X1X12MM	8	X
RUOTA DEL CARRO MOBILE	4	X
DADO M8	12	X
VITE M8X1.25X45MM	4	X
THUMB SCREW M5X0.8X15MM	10	X
PIASTRA BARRA SEZIONE SINGOLA	6	
BARRA ORIZZONTALE TELAIO	2	X
BARRA VERTICALE TELAIO	4	X
PIASTRA APPOGGIO VITE M6X1X53MM	4	
VITE COMPLETAMENTE FILETTATA CON INCASSO A CROCE M6X1X53MM	4	X
DISTANZIATORE BASE CARRO MOBILE E TELAIO	4	X
PIASTRA SERRAGGIO CINGHIA	4	
TNUT DOPPIA M6	3	X
CLIP ALATA	8	X
BHSCS M5X0.8X10MM	12	X
BARRA DEL SISTEMA DI SUPPORTO DESTRO DEL CARRO	1	X
PIASTRA DEL SISTEMA DI SUPPORTO DEL CARRO	2	
MOTORE NEMA 23 CARRO	1	X
PIASTRA MOTORE CARRO	1	
DADO M5	4	X
ATP10L050-B-H12_B (PULEGGIA MOTOTRE CARRO)	1	X
BHSCS M6X1X10 MM	2	X
BARRA DEL SISTEMA DI SUPPORTO SINISTRO DEL CARRO	1	X
ALBERO DEL SISTEMA DI SUPPORTO SINISTRO DEL CARRO	1	
BRONZINA	2	X
RONDELLA IN NYLON DEL SISTEMA DI SUPPORTO DEL CARRO	2	X
COLLARE ALBERO DEL SISTEMA DI SUPPORTO SINISTRO DEL CARRO	1	
ATP10L050-B-H13_B (PULEGGIA CARRO MOBILE)	1	X

Inoltre, nelle Figure 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 vengono rappresentati i modelli CAD della base, telaio, sistema di supporto sinistro e destro del carro, di cui le prime due e l'ultima in vista isometrica.

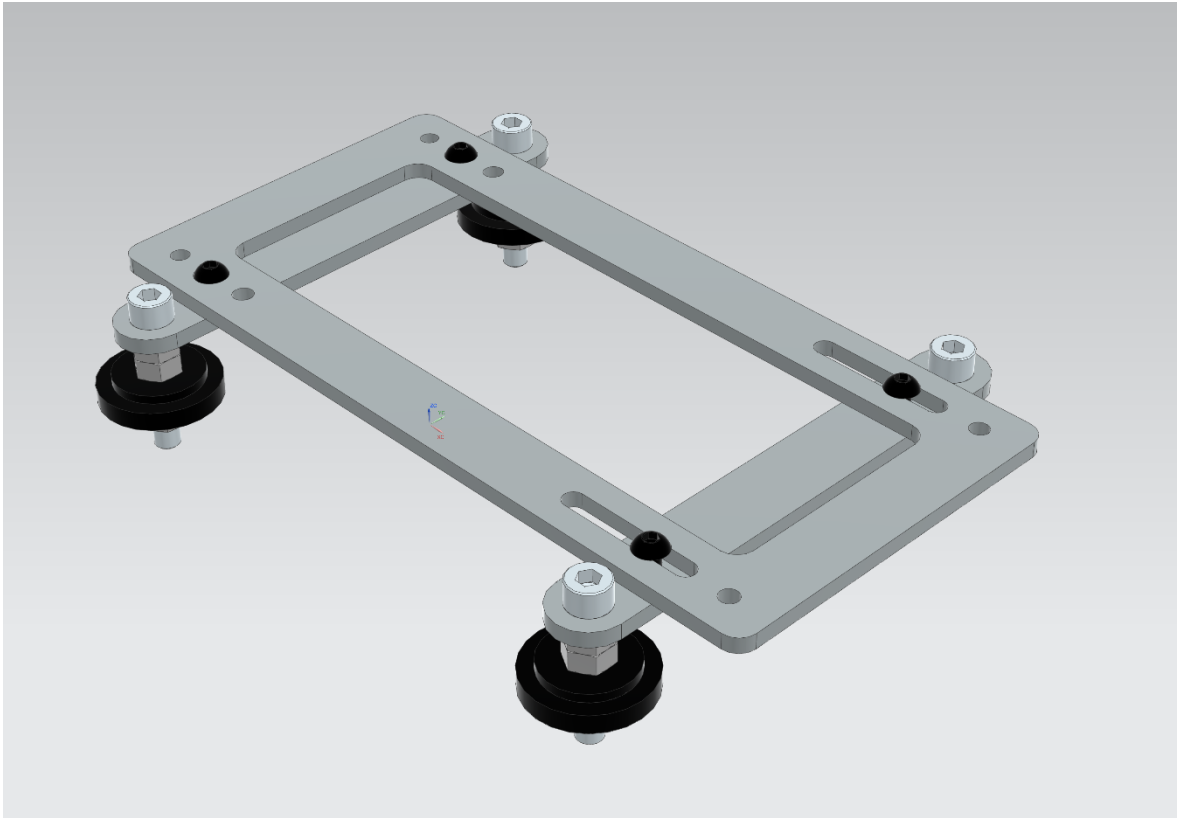


Figura 3.5 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD della base del carro

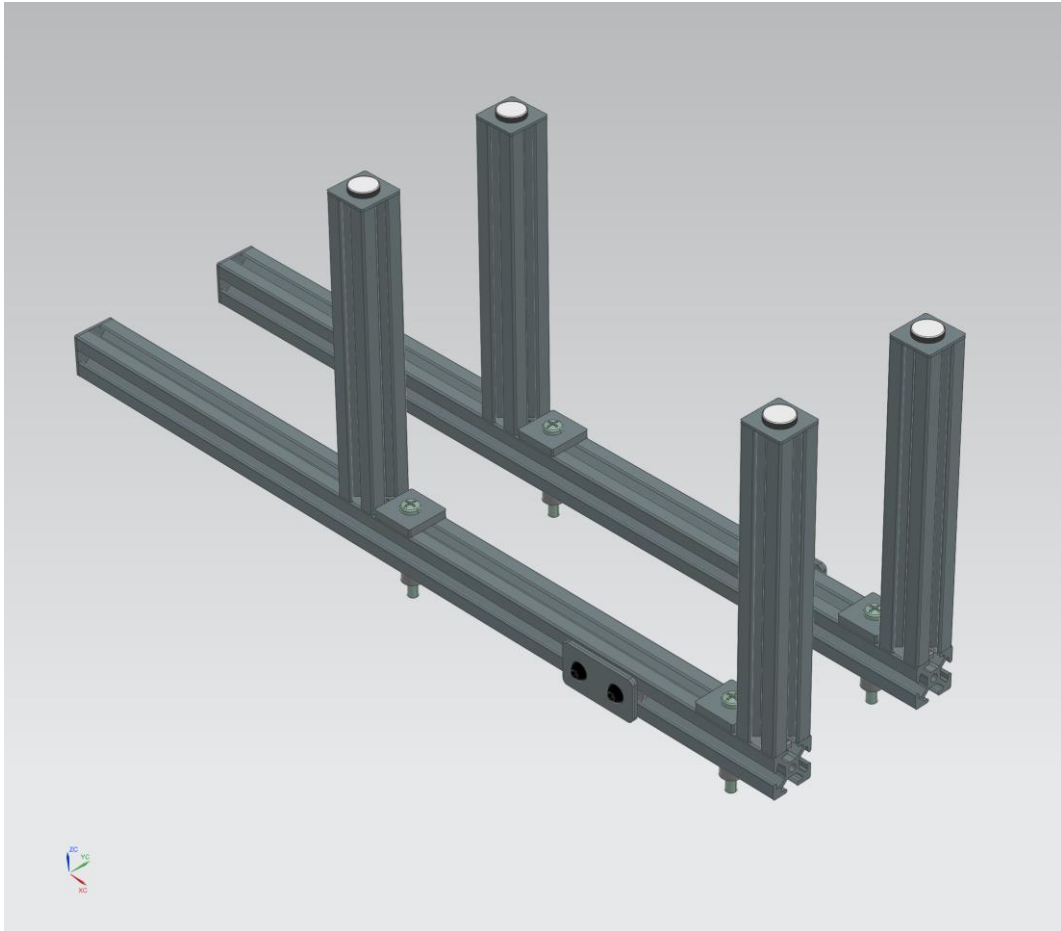


Figura 3.6 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del telaio del carro mobile

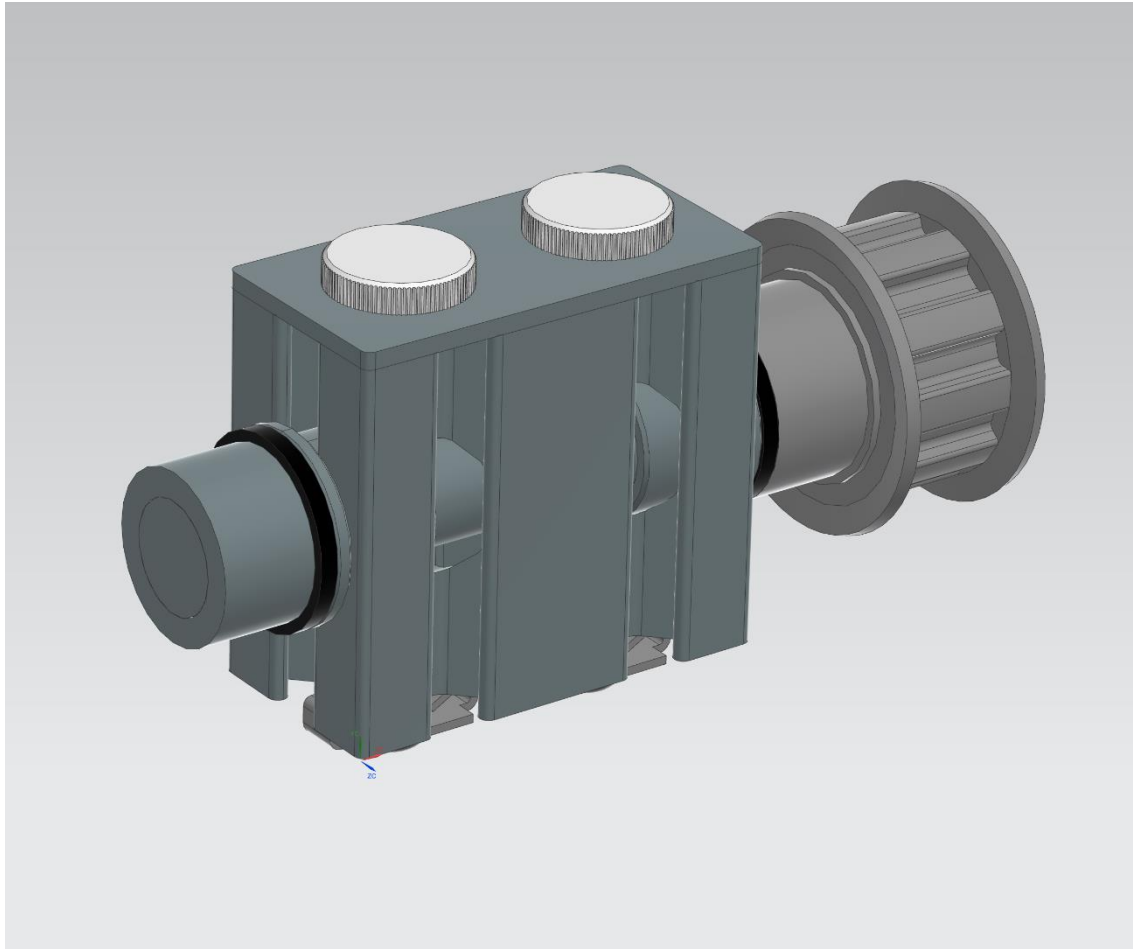


Figura 3.7 Rappresentazione del modello CAD del sistema di supporto sinistro del carro

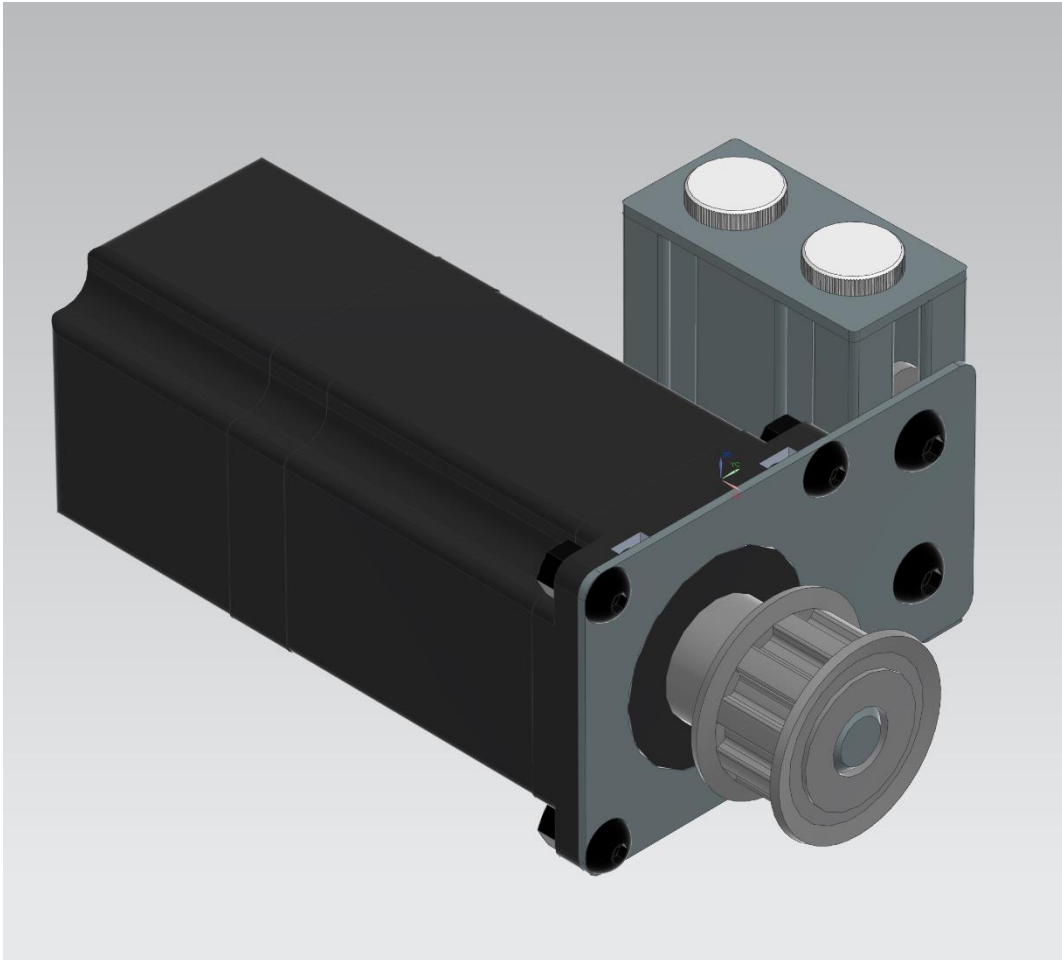


Figura 3.8 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD del sistema di supporto destro del carro

Infine, le Figure 3.9 e 3.10 rappresentano il modello CAD del sottoassieme *Traslazione del carro mobile* posizionato sulla base di supporto, rispettivamente posteriormente al carro ed in vista isometrica.

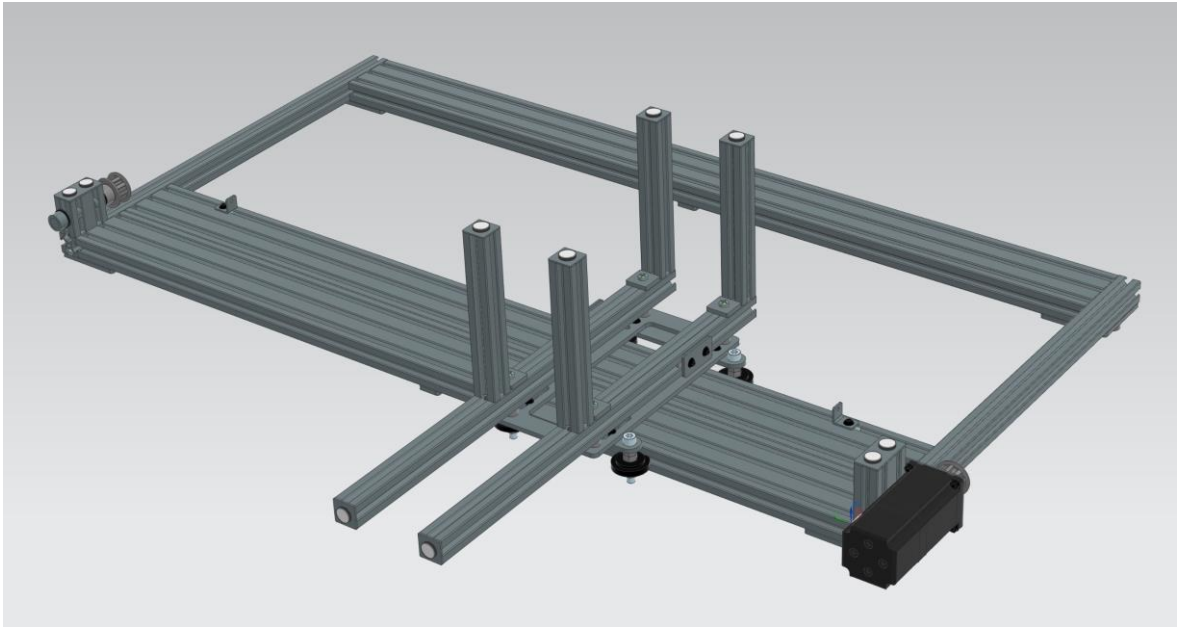


Figura 3.9 Rappresentazione, posteriormente al carro, del modello CAD del sottoassieme Traslazione del carro mobile posizionato sulla base di supporto

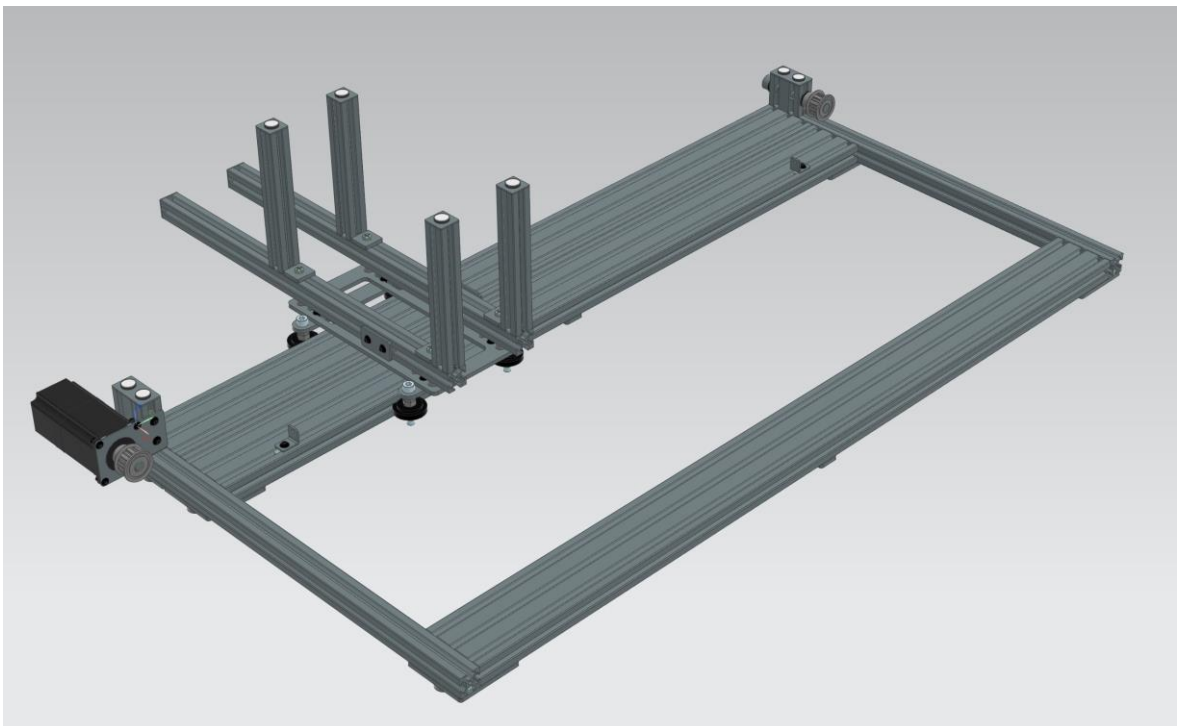


Figura 3.10 Rappresentazione, in vista isometrica, del sottoassieme Traslazione del carro mobile posizionato sulla base di supporto

3.1.5 Traslazione della testa di deposizione

Di seguito, si riporta la distinta di base del sottoassieme *Traslazione della testa di deposizione* attraverso la Tabella 3.4.

Tabella 3.4 Distinta di base del sottoassieme *Traslazione della testa di deposizione*.

NOME COMPONENTE	QTY	COMMERCIALE
SLIDERS SENSORE IN PC PFTE	2	
BOLT M6X1X60 MM	2	X
DISTANZIATORE PER SENSORE	2	
BOCCOLA D.I.8 MM	2	X
BHSCS M5 MOTORE TRASLAZIONE TESTA	2	X
VITE BOMBATA CON INTAGLIO M3X8MM	4	X
SLIDERS IN PC PFTE	12	
PIASTRA BLOCCAGGIO SLIDER	2	
VITE M6X1X12MM	24	X
ATP16XL037-B-H8_B (PULEGGIA TRASLAZIONE TESTA)	2	X
TNUT DOPPIA M6	7	X
PIASTRA DESTRA SUPPORTO TRASLAZIONE TESTA	1	
ALBERO PULEGGIA TRASLAZIONE TESTA	1	
PIASTRA SUPPORTO ALBERO PULEGGIA	1	
PIASTRA PER SENSORE ROTAZIONE E FINE CORSA	1	
PIASTRA SENSORE FINE CORSA TRASLAZIONE TESTA	1	
BARRA TRASLAZIONE TESTA	1	X
MOTORE NEMA 17 TRASLAZIONE TESTA	1	X
PIASTRA SINISTRA SUPPORTO TRASLAZIONE TESTA	1	
COLLARE ALBERO PULEGGIA TRASLAZIONE TESTA	1	
PIASTRA BLOCCAGGIO CINGHIA	1	X
PIASTRA MONTAGGIO MOTORE NEMA 17 TRASLAZIONE TESTA	1	
CBS4-10	4	X

In aggiunta, nella Figura 3.11 viene rappresentato il modello CAD del sottoassieme *Traslazione della testa di deposizione* assemblato al telaio del carro.

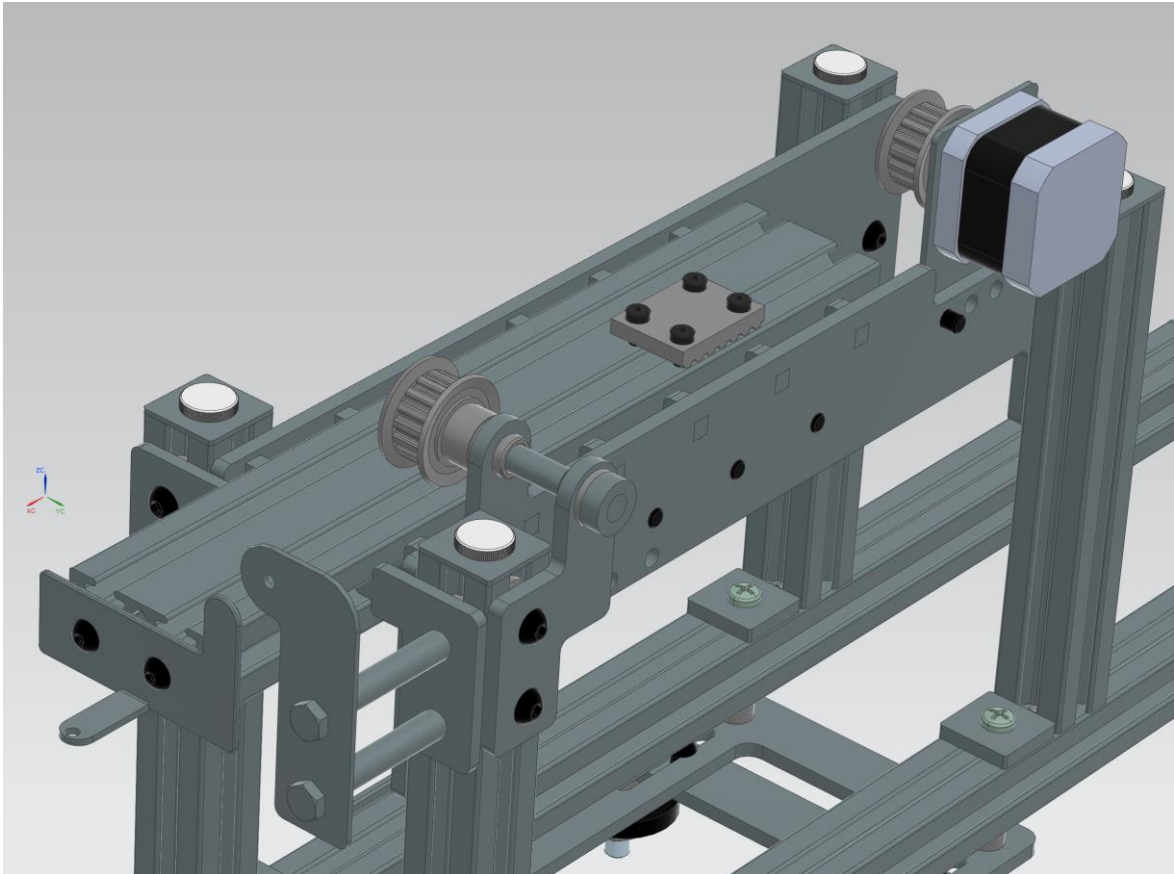


Figura 3.11 Rappresentazione del modello CAD del sottoassieme *Traslazione della testa di deposizione* assemblato al telaio del carro

3.1.6 Rotazione della testa di deposizione

Mediante la Tabella 3.5 si riporta la distinta di base del sottoassieme *Rotazione della testa di deposizione*.

Tabella 3.5 Distinta di base del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione.

NOME COMPONENTE	QTY	COMMERCIALE
TUBO DI ROTAZIONE	1	
PIASTRA SUPPORTO ROTAZIONE IN PC PTFE	2	
PIASTRA CON BRACCI TESTA DI DEPOSIZIONE	1	
ATP36XL037-A-H40_B (PULEGGIA ROTAZIONE TESTA)	1	X
PIASTRA ROTAZIONE TESTA PER FINE CORSA	1	
ANELLO DI BLOCCAGGIO ROTAZIONE TESTA FORATO	1	X
HEXAGON SOCKET SET SCREW WITH FLAT POINT DIN 913 - M6X5	4	X
SHBT VITE COMPLETAMENTE FILETTATA M4X0.7X40MM	4	X
ANELLO IN PC PTFE	1	
VITE M8X1.25X60MM PARZIALMENTE FILETTATA	4	X
DISTANZIATORE IN NYLON 8.2X30MM	4	X
DADO M8	4	X
ANELLO DI BLOCCAGGIO ROTAZIONE TESTA	1	X
BOLT M6X1X60 MM	1	X
DADO M6	1	X
RULLO CONCAVO	1	
PIASTRA FISSAGGIO TESTA	1	
ATP16XL037-B-H8_B (PULEGGIA MOTORE ROTAZIONE TESTA)	1	X
MOTORE NEMA17 ROTAZIONE TESTA	1	X
VITE BOMBATA CON INTAGLIO M3X8MM	4	X
VITE M6X1X12MM	2	X
TNUT DOPPIA M6	1	X
PIASTRA MOTORE ROTAZIONE TESTA	1	

Oltre a ciò, nelle Figure 3.12, 3.13 e 3.14 viene illustrato il modello CAD del sottoassieme *Rotazione della testa di deposizione*, di cui la prima in vista trimetrica e l'ultima con esso assemblato al telaio del carro.

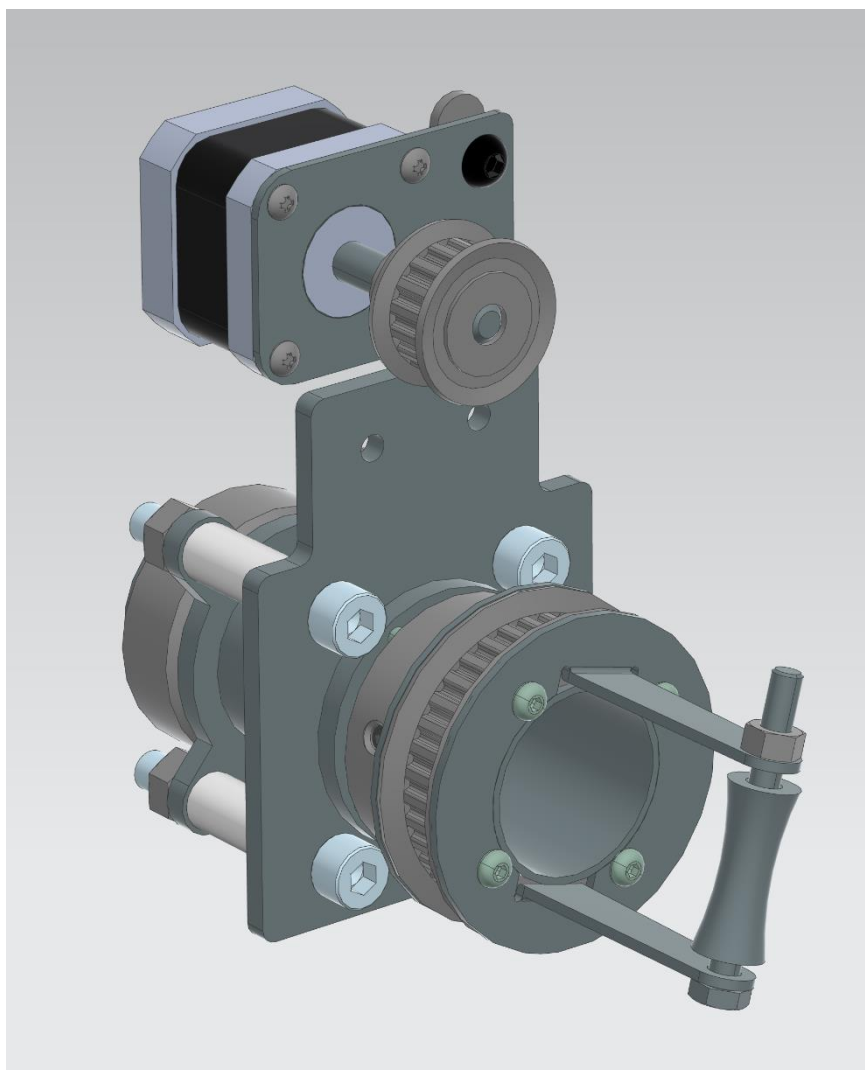


Figura 3.12 Illustrazione, in vista trimetrica, del modello CAD del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione

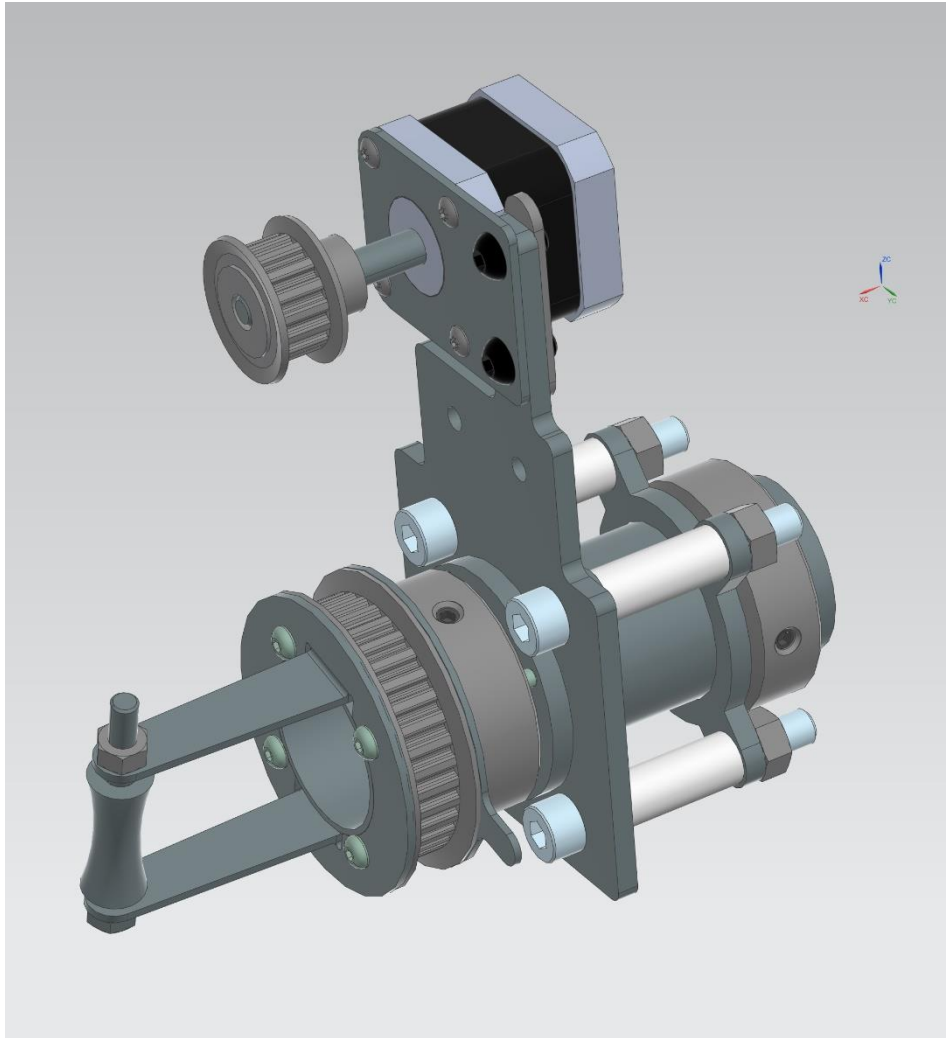


Figura 3.13 Illustrazione del modello CAD del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione

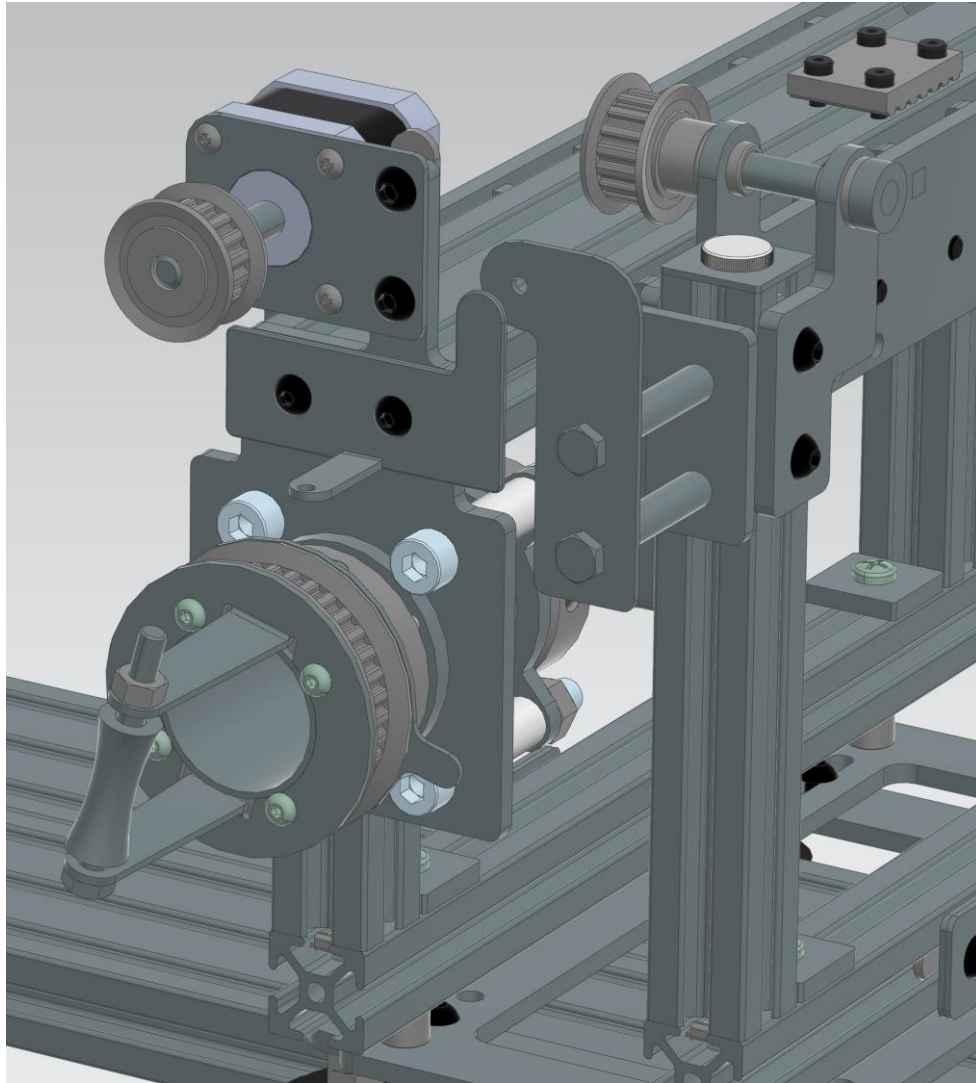


Figura 3.14 Illustrazione del modello CAD del sottoassieme Rotazione della testa di deposizione assemblato al telaio del carro

3.1.7 Percorso del towpreg

Relativamente al sottoassieme *Percorso del towpreg*, si riporta, attraverso la Tabella 3.6, la distinta base dello stesso.

Tabella 3.6 Distinta di base del sottoassieme Percorso del towpreg.

NOME COMPONENTE	QTY	COMMERCIALE
PIASTRA TRASLAZIONE RULLO POSTERIORE	2	
PIASTRA TRASVERSALE RULLO POSTERIORE	1	
VITE M6X1X12MM	10	X
SLIDER TRASLAZIONE RULLO POSTERIORE	4	
PIASTRA FISSAGGIO SLIDER RULLO POSTERIORE	2	
BHSCS M6X1X16MM	4	X
PIASTRA SCORRIMENTO DISTANZIATORI	1	
PIASTRA SOSTEGNO RULLO POSTERIORE PERCORSO TOWPREG	2	
THUMB SCREW M6X1X35 MM	2	X
DISTANZIATORE DI NYLON M6 18 MM	2	X
DADO AD ALETTE M6X1	2	X
BOLT M8X1.25X90MM PARZIALMENTE FILETTATA	1	X
DADO M8	1	X
RULLO PERCORSO TOWPREG	1	X
CUSCINETTO RULLO PERCORSO TOWPREG	2	X
PIASTRA SUPPORTO RULLO SCORRIMENTO TOWPREG	2	
VITE AD ESAGONO INCASSATO PARZIALMENTE FILETTATA M6X1X95 MM	1	X
DADO M6	1	X
RIVESTIMENTO IN GOMMA RULLO SCORRIMENTO TOWPREG	1	X
RULLO SCORRIMENTO TOWPREG	1	X
CUSCINETTO RULLO SCORRIMENTO TOWPREG	2	X
MOLLA AUTOREGOLAZIONE TENSIONE TOWPREG	2	X
THUMB SCREW M6X1X8 MM	2	X
T-NUT M6X1MM	4	X
BARRA ORIZZONTALE SEZIONE SINGOLA BOBINA TOWPREG	1	X
CLIP ALATA	2	X
BHSCS M5X0.8X10 MM	2	X
PIASTRA SUPPORTO ASTA BOBINA DI TOWPREG	2	
PIASTRA CHIUSURA DELLA PIASTRA DI SUPPORTO ASTA BOBINA DI TOWPREG	2	
THUMB SCREW M5X0.8X15 MM	2	X
PIASTRA BARRA SEZIONE SINGOLA	2	
BARRA A SEZIONE SINGOLA SUPPORTO BOBINA DI TOWPREG	2	X
TBOLT VITE M6X1X14MM	4	X
TNUT DOPPIA M6	3	X
PIASTRA TENSIONAMENTO VELCRO	1	
ASTA BOBINA TOWPREG	1	
VITE M6X1X32MM	2	X
BOBINA DI TOWPREG	1	X
SUPPORTO BOBINA DI TOWPREG	1	X

In aggiunta, nelle Figure 3.15, 3.16 e 3.17 si riporta l'illustrazione del modello CAD del sottoassieme *Percorso delle fibre*, rispettivamente i dettagli: della bobina di towpreg, del rullo posteriore e del rullo anteriore per lo scorrimento del towpreg; precisamente i primi

due assemblati al telaio del carro, l'ultimo alle piastre di supporto per la traslazione della testa.

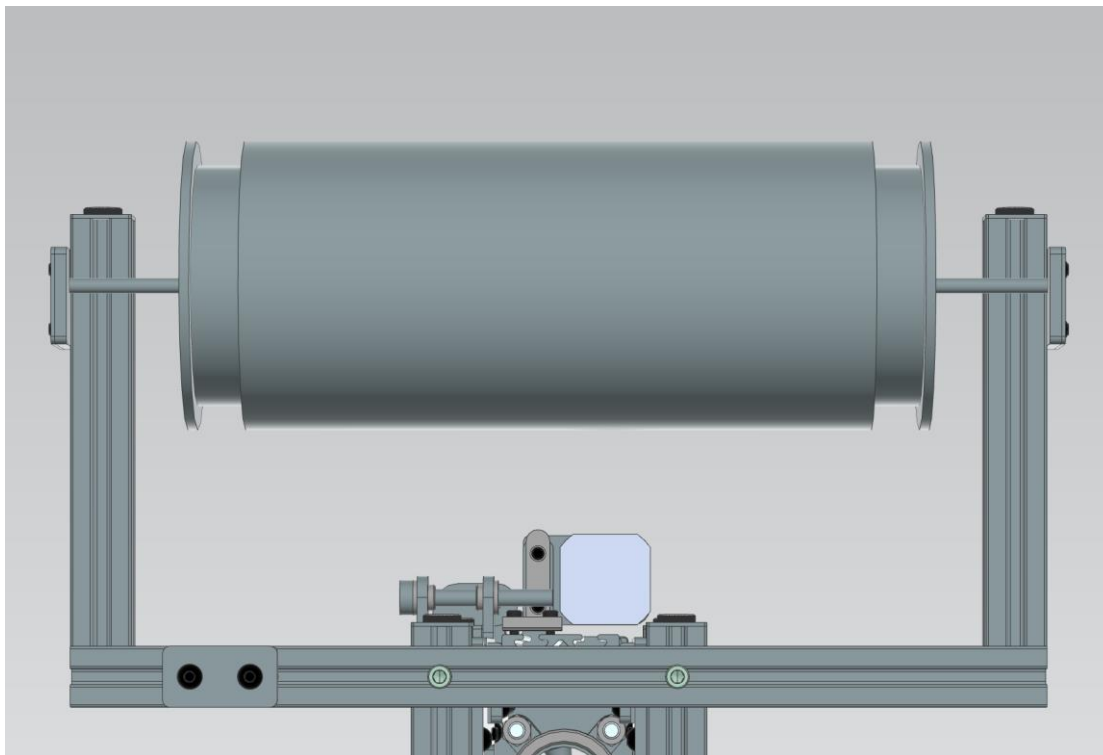


Figura 3.15 Illustrazione del dettaglio del sottoassieme Percorso del towpreg assemblato al telaio: Bobina di towpreg

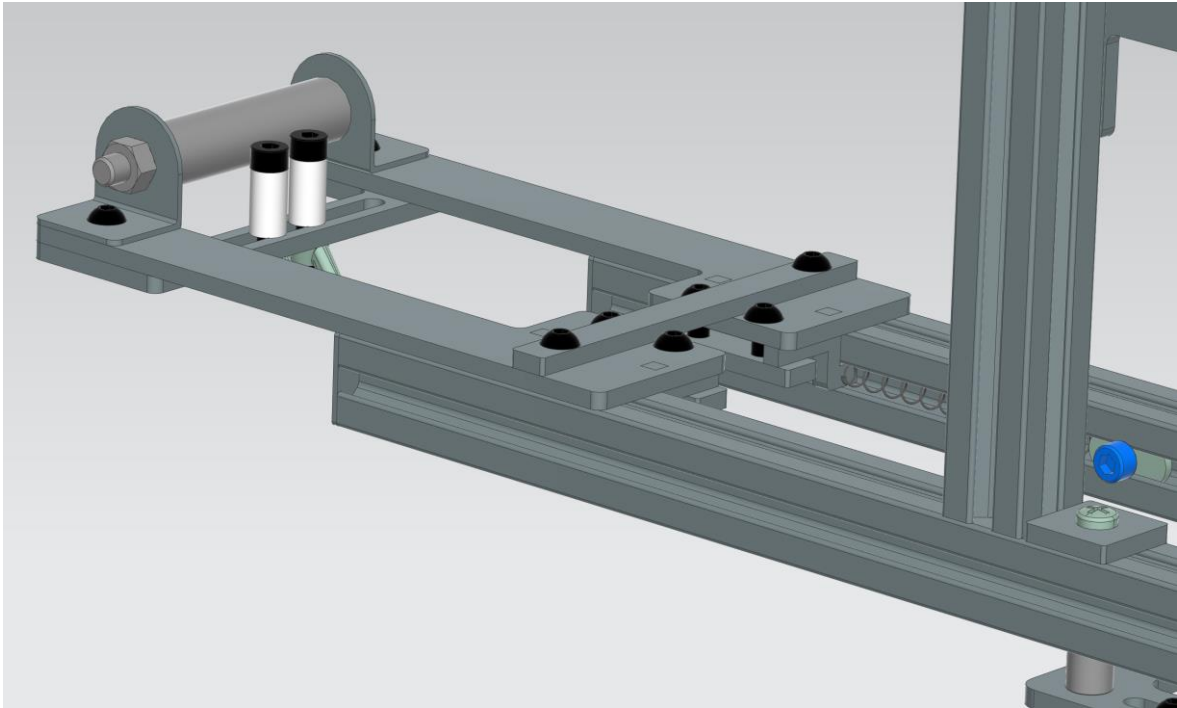


Figura 3.16 Illustrazione del dettaglio del sottoassieme Percorso del towpreg assemblato al telaio: rullo posteriore

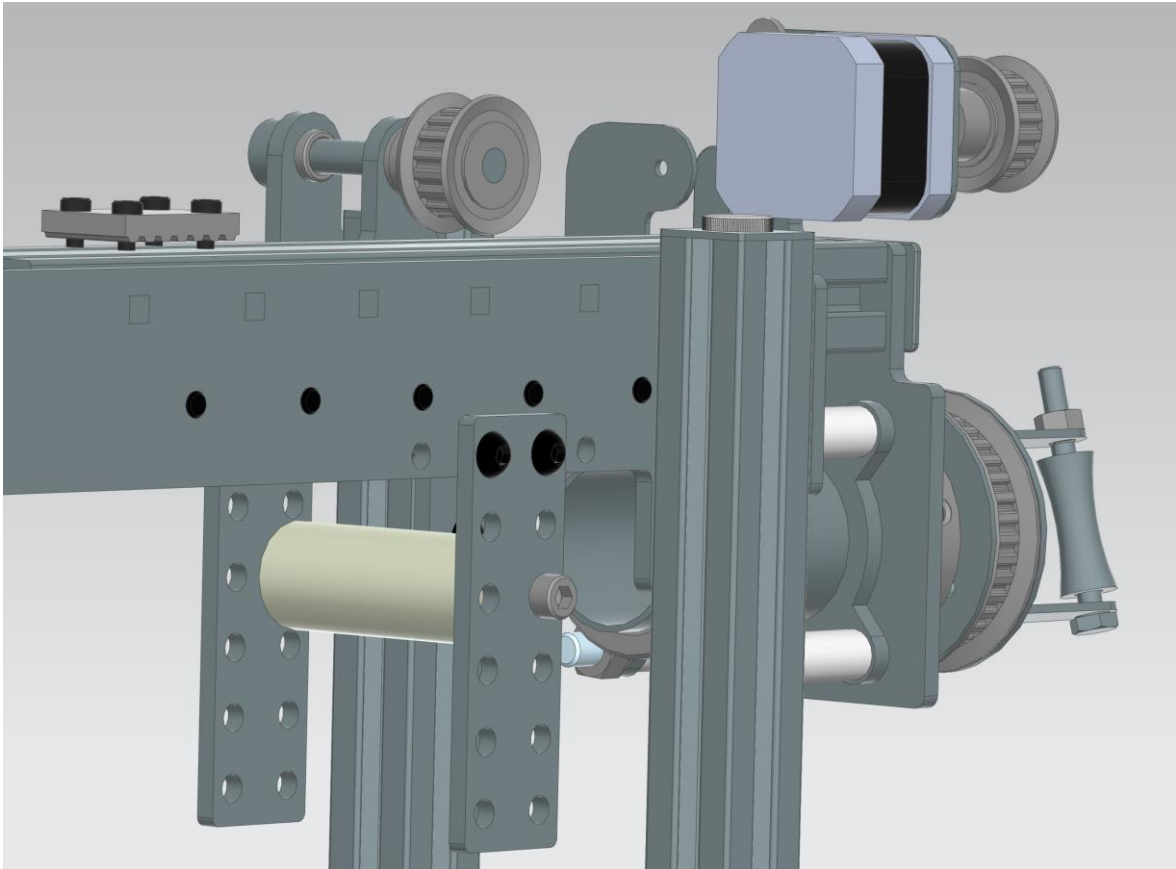


Figura 3.17 Illustrazione del dettaglio del sottoassieme Percorso del towreg assemblato alle piastre di supporto per la traslazione della testa: rullo anteriore per lo scorrimento del towreg

3.1.8 Assemblato finale

Assemblando tra loro i sottoassiemi, discussi dettagliatamente nei sottoparagrafi precedenti, è stato possibile ottenere il modello CAD dell'assieme relativo alla macchina di Filament Winding a quattro gradi di libertà.

Di seguito, nelle Figure 3.18, 3.19 e 3.20 viene rappresentato tale modello rispettivamente in vista isometrica, posteriormente al carro e da destra.

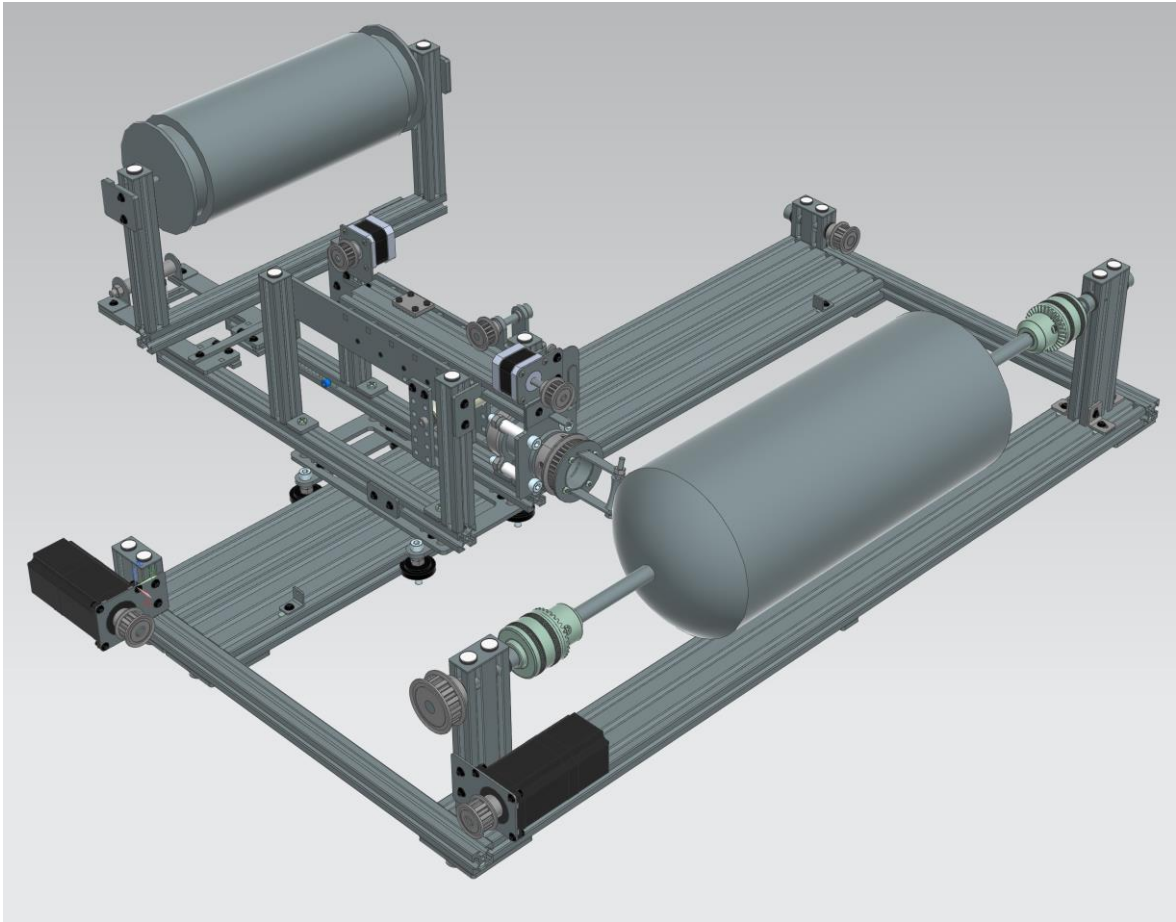


Figura 3.18 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'assieme della macchina di *Filament Winding*

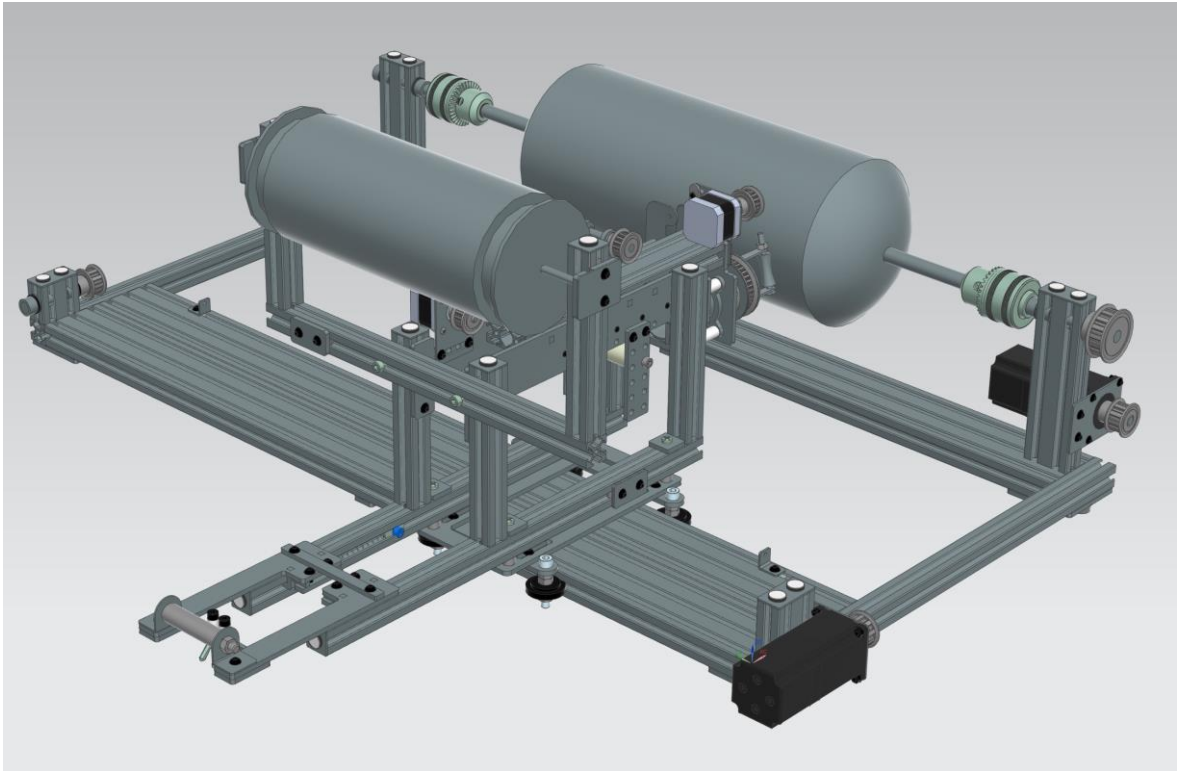


Figura 3.19 Rappresentazione, posteriormente al carro, del modello CAD dell'assieme della macchina di Filament Winding

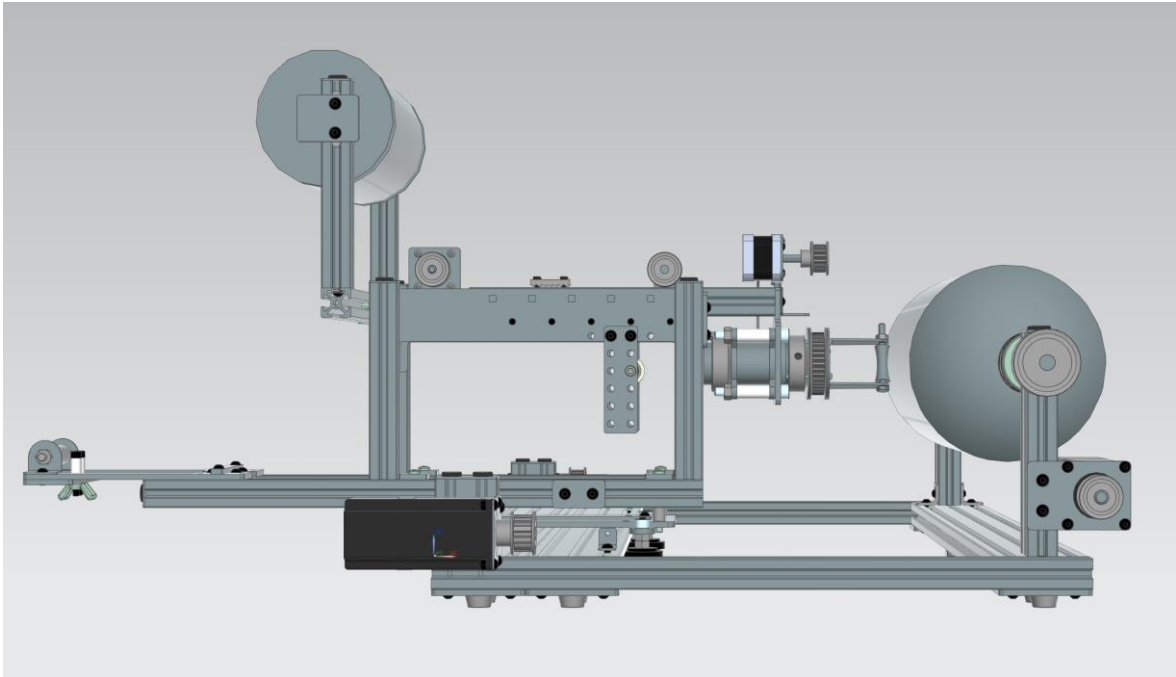


Figura 3.20 Rappresentazione, in vista da destra, del modello CAD dell'assieme della macchina di Filament Winding

3.2 Risultati del dimensionamento dei motori

3.2.1 Calcoli per il dimensionamento del motore per la rotazione del mandrino

Come definito nel sottoparagrafo 2.3.2, per dimensionare il motore del mandrino è stata utilizzata la (8).

Il valore di J_m è pari a 4.38 kg mm^2 .

Si è considerato un mandrino cavo con le seguenti specifiche (nelle condizioni “peggiori”):

- spessore di 5 mm ;
- diametro esterno di 200 mm ;
- lunghezza di 455 mm .

Dato che il materiale preimpregnato avvolto forma un serbatoio da 5 mm di spessore, è stato calcolato il momento d'inerzia complessivo del mandrino e del serbatoio, pari a 43007.25 kg mm^2 .

Sommando tale momento d'inerzia ai momenti d'inerzia degli altri componenti si è ottenuto il valore di: $J_u = 43155.8 \text{ kg mm}^2$.

Siccome $z_1 = 10$ e $z_2 = 16$, $\tau = 0.625$.

Avendo considerato una velocità angolare massima del mandrino pari a 50 rpm (ovvero 5.24 rad/s), come definito nel report di Chougule [19], una velocità angolare minima pari a 0 rpm ed un intervallo di tempo Δt di 0.4 s, è stata ottenuta un'accelerazione angolare $\dot{\omega}_u$ di 13.1 rad/s^2 .

La coppia M_u è stata calcolata moltiplicando la tensione di avvolgimento del towpreg di 10 N, come riportato nell'articolo di Blachut et al. [8], per il raggio esterno del mandrino, ottenendo di conseguenza: $M_u = 1 \text{ N m}$.

Con questi dati è stata ricavata la coppia motrice: $M_m = 0.98 \text{ N m}$.

Avendo considerato $k = 2.5$, si è ottenuta la coppia motrice minima richiesta: $M_m = 2.45 \text{ N m}$.

Valutando i motori disponibili in commercio è stata trovata una corrispondenza con i motori NEMA 23, in quanto includono modelli che possono erogare una coppia fino a 3 N m.

3.2.2 Calcoli per il dimensionamento del motore per la traslazione della testa

Come anticipato nel sottoparagrafo 2.3.3, il dimensionamento è stato realizzato mediante la (8) e la (9).

A partire dalla (8), non è stata considerata M_u in quanto non presente in questo specifico caso.

Inoltre, come motivato precedentemente nel medesimo sottoparagrafo, il rapporto di trasmissione τ è stato posto pari a 1.

$$J_m = J_u = 2.1 \text{ kg mm}^2.$$

Per calcolare $\dot{\omega}_u$ è stata definita innanzitutto la velocità massima lineare che la massa traslante deve raggiungere (v_{max}), ovvero 166.7 mm/s , e quella minima (v_{min}) pari a 0 mm/s . Avendo definito $\Delta t = 0.3 \text{ s}$, è stato trovato: $\dot{v}_u = 555.7 \text{ mm/s}^2$.

E siccome:

- $z_1 = z_2 = z = 16$;
- $p = XL = 5.08 \text{ mm [h]}$;
- $r = (pz)/(2\pi) = 12.94 \text{ mm}$;

allora:

- $\dot{\omega}_m = \dot{\omega}_u = 42.9 \text{ rad/s}^2$.

Di conseguenza è stata ricavata la prima parte della coppia totale.

In particolare: $M_m = 1.8 * 10^{-4}$.

Relativamente alla (9), è stata calcolata la massa m_u pari a 1.49 kg .

Considerando $\mu_d = 0.18 \text{ [k]}$, è stata ricavata F_u .

Utilizzando i valori di J_m , r e \dot{v}_u precedentemente ricavati, è stata ottenuta la rimanente coppia: $M_m = 0.045 \text{ N m}$.

Sommando i due contributi e moltiplicando la somma per $k = 2.5$, è stata trovata la coppia motrice minima richiesta pari a 0.113 N m .

Valutando i motori commercialmente disponibili si è optato per un NEMA 17.

3.2.3 Calcoli per il dimensionamento del motore per porre in rotazione la testa

Facendo riferimento alla (8), come precedentemente affermato, M_u è stata posta pari a 0.

Siccome $z_1 = 16$ e $z_2 = 36$, $\tau = 0.44$.

$$J_m = 2.1 \text{ kg mm}^2.$$

Considerando i vari momenti d'inerzia dei componenti posti in rotazione, si è calcolato il valore: $J_u = 225 \text{ kg mm}^2$.

Definiti:

- $\omega_{u_max} = 100 \text{ rpm} = 10.47 \text{ rad/s [19]}$;
- $\omega_{u_min} = 0 \text{ rpm} = 0 \text{ rad/s}$;
- $\Delta t = 0.1 \text{ s [19]}$;

allora:

- $\dot{\omega}_u = 104.7 \text{ rad/s}^2$.

Di conseguenza: $M_m = 1.1 * 10^{-2} \text{ N m}$.

Considerando $k = 2.5$, la coppia motrice minima richiesta è di $2.7 * 10^{-2} \text{ N m}$.

Valutando la coppia erogata dai motori passo-passo disponibili in commercio, si è optato anche in questo caso per un NEMA 17.

3.2.4 Calcoli per il dimensionamento del motore per movimentare il carro mobile

Per quest'ultimo dimensionamento, si è fatto ricorso alla (8) ed alla (9).

Iniziando dalla (8), anche in questo caso M_u è stata posta pari a 0.

Dato che entrambe le pulegge sono caratterizzate da $z = 10$, allora: $\tau = 1$.

$J_m = 4.38 \text{ kg mm}^2$ e $J_u = 4.32 \text{ kg mm}^2$.

Definiti:

- $v_{max} = 10 \text{ m/min} = 166.7 \text{ mm/s}$;
- $v_{min} = 0 \text{ m/min}$;
- $\Delta t = 0.3 \text{ s}$;

allora:

- $\dot{v}_u = 555.7 \text{ mm/s}^2$.

Siccome:

- $p = L = 9.525 \text{ [h]}$
- $r = (pz)/(2\pi) = 15.17 \text{ mm}$;

quindi:

- $\dot{\omega}_m = \dot{\omega}_u = 36.63 \text{ rad/s}^2$.

Di conseguenza è stata ottenuta la prima parte della coppia necessaria.

Essa è: $M_m = 3.19 * 10^{-4} \text{ N m}$.

Proseguendo con la (9), è stata identificata la massa da movimentare: $m_u = 16.93 \text{ kg}$.

I valori di J_m , r e \dot{v}_u corrispondono a quelli ricavati precedentemente.

Avendo considerato un coefficiente di attrito volvente μ_v pari a 0.03 [1], pertanto, si è ottenuto: $F_u = 4.98 \text{ N}$.

In seguito, è stata ricavata la rimanente coppia: $M_m = 0.22 \text{ N m}$.

La coppia motrice minima da erogare è stata calcolata sommando i due contributi e moltiplicando per $k = 2.5$, ottenendo il valore di: $55.1 * 10^{-2} \text{ N m}$.

In questo caso, data la coppia appena menzionata, si è optato per i motori NEMA 23 disponibili in commercio.

3.3 Ciclo di assemblaggio

Per l'assemblaggio della macchina si consiglia di comporre il *supporto destro del mandrino* e di accoppiarlo alla barra a sezione tripla anteriore, come riportato nella Figura 3.21 seguente.

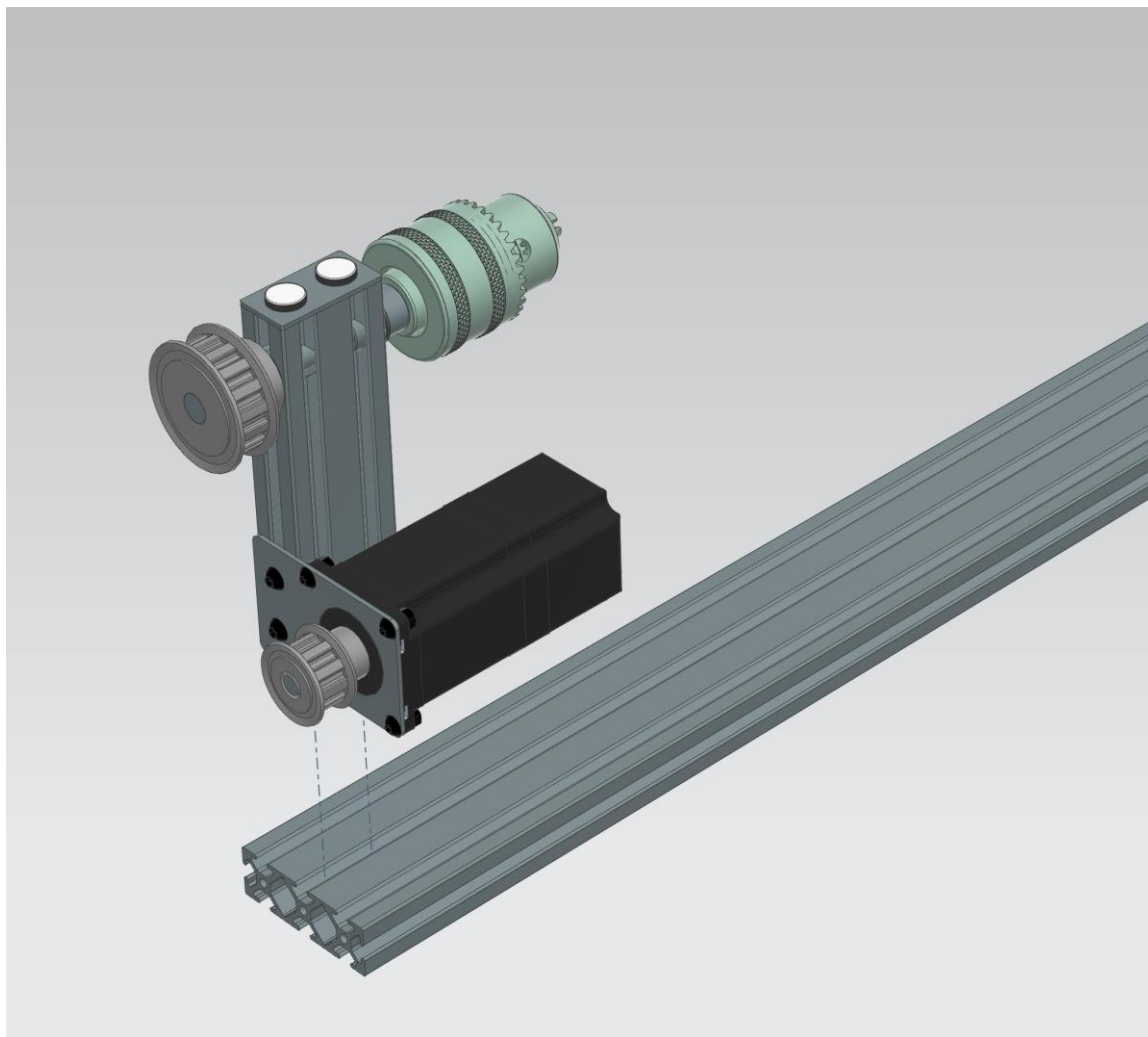


Figura 3.21 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'accoppiamento tra il supporto destro del mandrino e la barra a sezione tripla anteriore

Successivamente si dovrebbe assemblare il *sistema di supporto destro del carro* con la barra destra a sezione singola trasversale ed accoppiare tale barra con quella appena trattata.

In seguito, andrebbero eseguite le medesime operazioni con il *sistema di supporto sinistro del carro*, la barra sinistra e la stessa barra anteriore.

Inoltre, si dovrebbero assemblare le due barre a sezione tripla posteriori alle barre trasversali, ottenendo l'assemblato illustrato nella Figura 3.22.

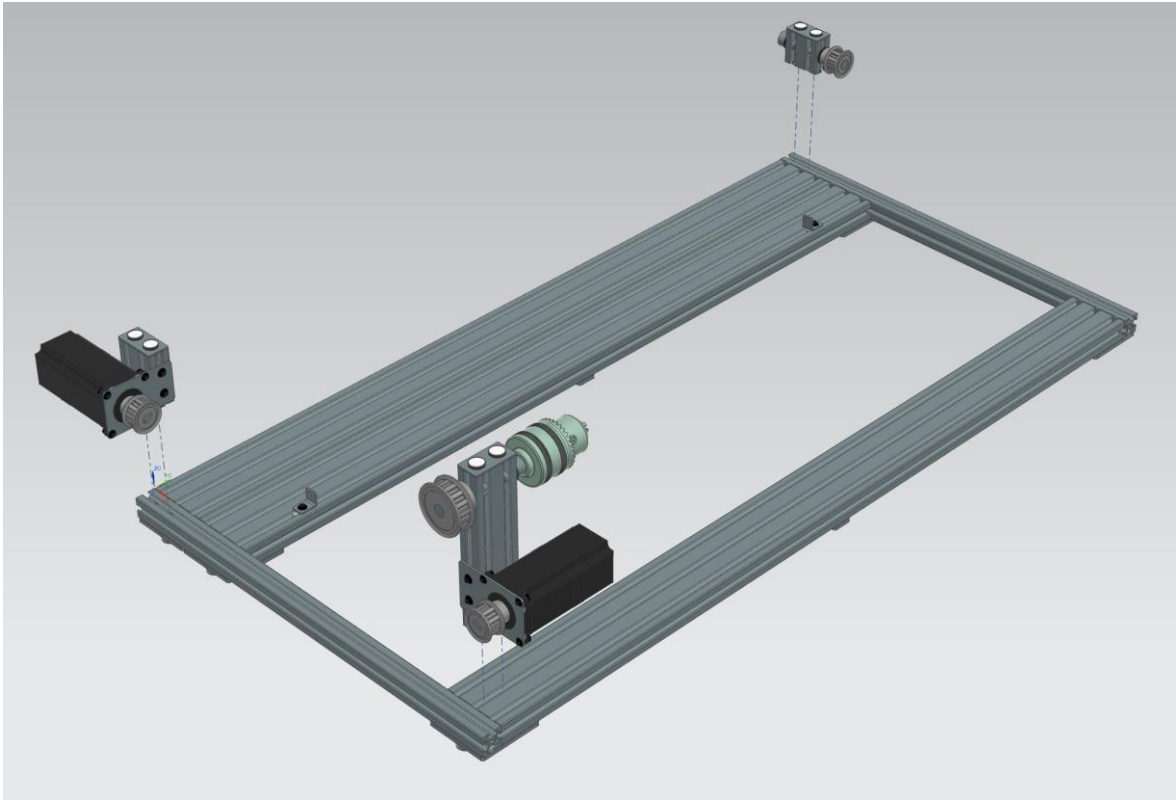


Figura 3.22 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'assemblaggio tra il sistema di supporto destro e sinistro del carro, le barre trasversali e longitudinali

A questo punto si dovrebbero assemblare le aste del mandrino ad esso stesso, posizionare un'asta nell'apertura del sistema di afferraggio del *supporto destro del mandrino* e posizionare l'altra asta all'interno dell'apertura del sistema di afferraggio del *supporto sinistro del mandrino*. Ciò viene raffigurato nella Figura 3.23 sottostante.

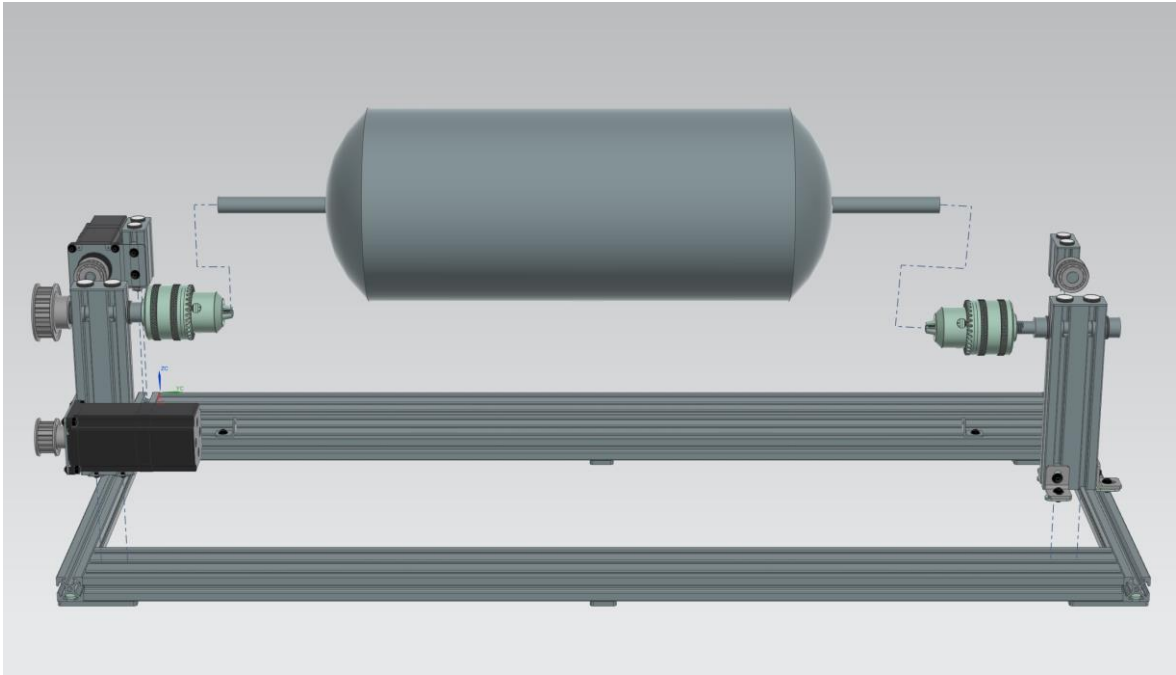


Figura 3.23 Rappresentazione del modello CAD dell'assemblaggio tra il mandrino e le proprie aste con i rispettivi supporti

Infine, dovrebbe essere posizionata la base del carro sulle barre posteriori, per poi assemblare ad essa il telaio del carro ed i sottoassiemi: *Traslazione della testa di deposizione, Rotazione della testa di deposizione e Percorso del towpreg*. Il risultato di ciò viene rappresentato nella Figura 3.24.

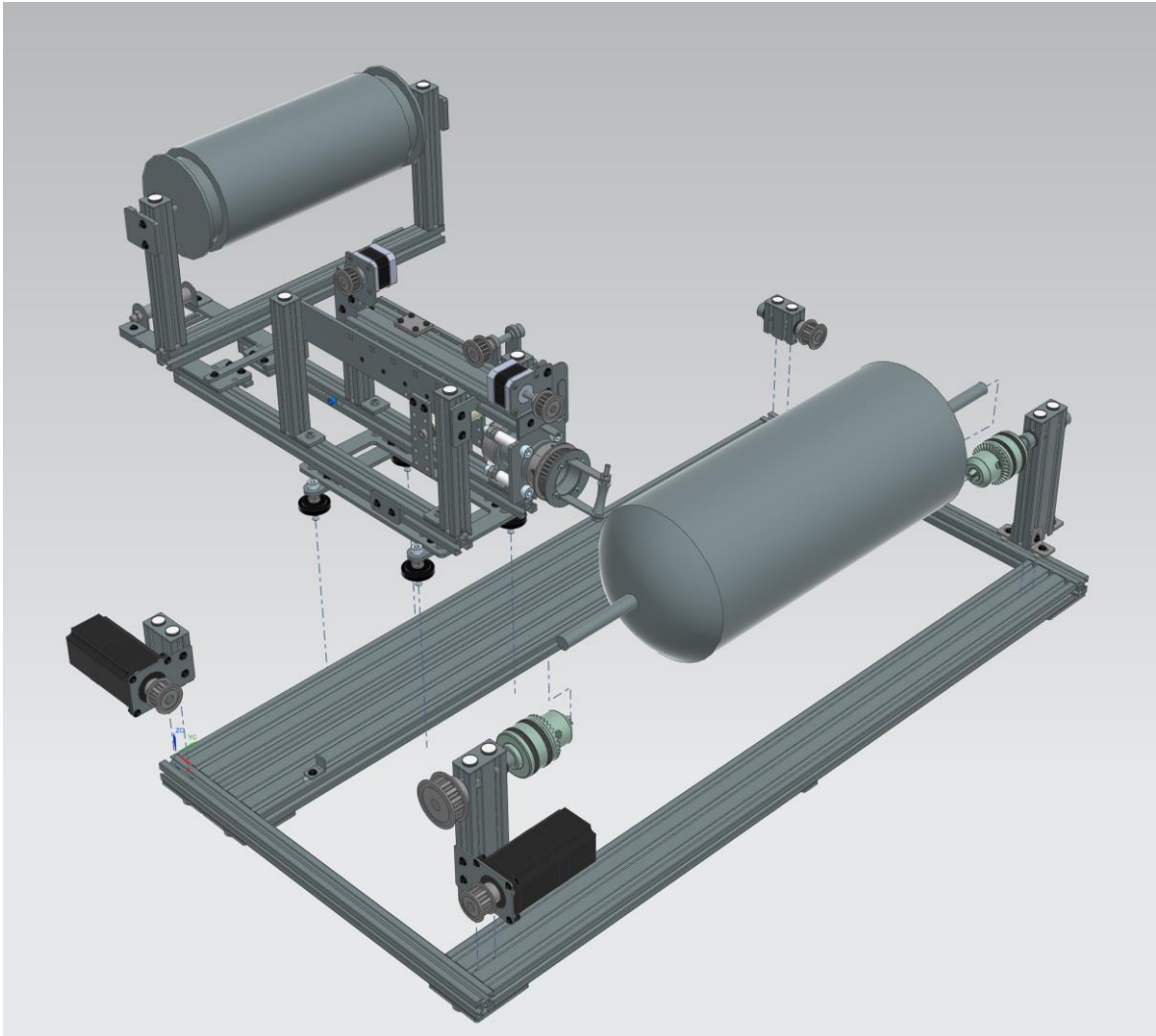


Figura 3.24 Rappresentazione, in vista isometrica, del modello CAD dell'assemblaggio tra: barre posteriori, base e telaio del carro, Traslazione della testa di deposizione, Rotazione della testa di deposizione e Percorso del towpreg

3.4 Risultati relativi alla valutazione dei parametri di processo

3.4.1 Creazione del modello del mandrino

Tramite la Figura 3.25 vengono mostrati i valori utilizzati per la creazione del modello del mandrino.

Circular cross-section

Cross section
 Diameter [mm]: 200

Length
 Length [mm]: 375

Pole caps
 Front pole cap: Ellipsoid Back pole cap: Ellipsoid
 Pole opening diam. [mm]: 16 Pole opening diam. [mm]: 16
 Length [mm]: 40 Length [mm]: 40

Number of frames
 use individually spaced frames
 Main section: 45
 Front pole cap: 40 Back pole cap: 40

Load parameter... Save parameter...

OK Cancel

Figura 3.25 Rappresentazione della finestra relativa ai parametri necessari per la creazione del modello del mandrino

A seguito dell'inserimento di tali valori, è stato ottenuto il mandrino raffigurato nella Figura 3.26 sottostante.

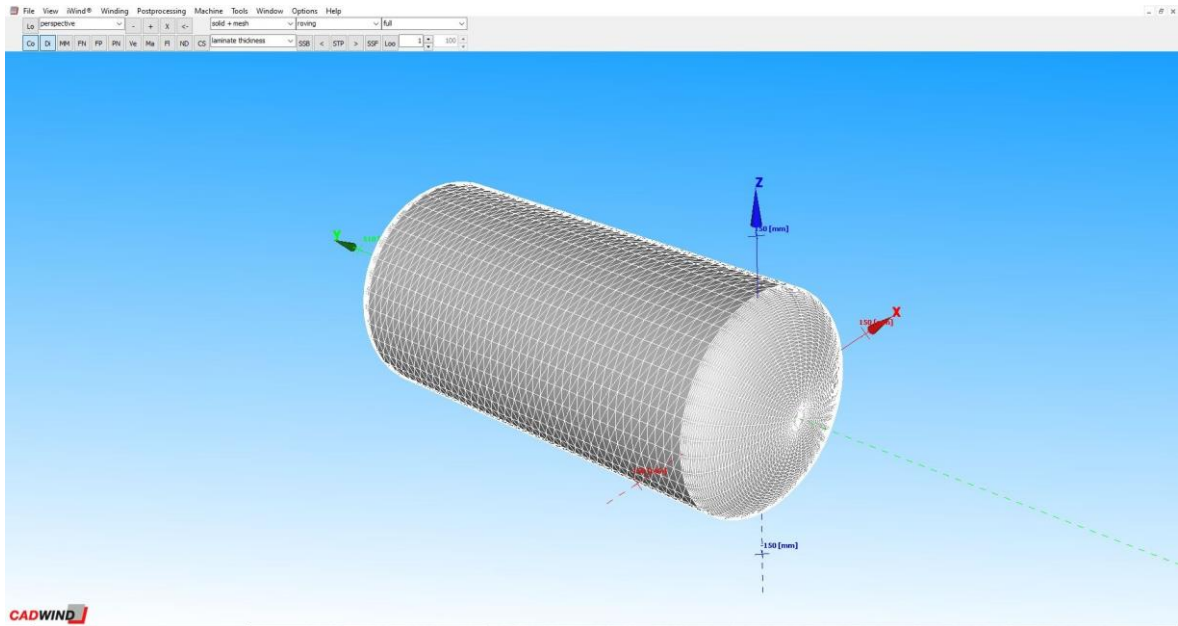


Figura 3.26 Raffigurazione, in vista prospettica, del modello del mandrino

3.4.2 Parametri di processo

Nella Figura 3.27 seguente vengono riportati i valori utilizzati nella sezione *Material parameter*.

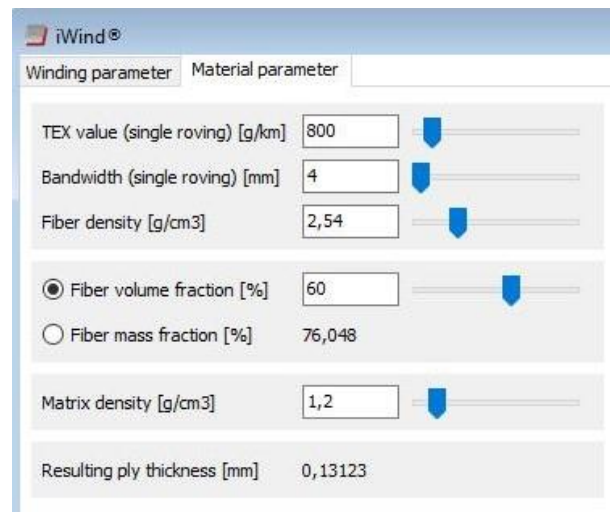


Figura 3.27 Illustrazione dei valori utilizzati per i parametri presenti nella sezione Material parameter

Invece, mediante la Figura 3.28, vengono illustrati i valori utilizzati relativamente ai parametri di avvolgimento.

The screenshot shows the 'iWind' software window with the 'Winding parameter' tab selected. The parameters are as follows:

Parameter	Value
Start frame	51
Start position [%]	0
Start winding direction	Forward
Turning zone front to	4
Turning zone back from	121
Winding angle [°]	15
Friction factor	0,3
Total bandwidth [mm]	13
Calculate first cycle only	<input type="radio"/>
Calculate patterns	<input checked="" type="radio"/>
Pattern search strength	Basic
Coverage range	<input checked="" type="radio"/>
Number of cycles range	<input type="radio"/>
Minimum (Coverage range)	100
Maximum (Coverage range)	150
Minimum (Number of cycles range)	47
Maximum (Number of cycles range)	70

Figura 3.28 Illustrazione dei valori utilizzati per i parametri di avvolgimento nella sezione *Winding parameter*

A seguito dell'inserimento di tali valori, come rappresentato nella Figura 3.29, il software ha individuato possibili patterns.

Patterns found: 14 / Selected pattern #: 13

Drag a column header here to group by that column - Click a column header to sort by that column - Control click to unsort

#	Cycles	Coverage [%]	Pattern		% of friction limit	Winding length [mm]			Path length [m]		Weight [kg]	Thickness [mm]		
			+/-	Pattern		Skip	Front	Back	Total	1st cycle		Total	Min	Max
1	61	130,8	+	57	14	97,49	0,1	0,3	454,6	1,236	75,373	0,258	0,343	11,240
2	61	130,8	-	4	1	97,49	0,1	0,3	454,6	1,236	75,373	0,258	0,343	11,240
3	65	139,4	+	61	15	97,49	0,1	0,3	454,6	1,236	80,318	0,275	0,366	11,977
4	65	139,4	-	4	1	97,49	0,1	0,3	454,6	1,236	80,318	0,275	0,366	11,977
5	69	148,0	+	65	16	93,97	0,1	0,2	454,6	1,236	85,261	0,291	0,388	12,935
6	69	148,0	-	4	1	93,97	0,1	0,2	454,6	1,236	85,261	0,291	0,388	12,935
7	57	122,2	+	53	13	84,92	0,1	0,2	454,6	1,236	70,428	0,241	0,321	10,596
8	57	122,2	-	4	1	84,92	0,1	0,2	454,6	1,236	70,428	0,241	0,321	10,596
9	62	132,9	+	29	7	77,39	0,0	0,2	454,5	1,235	76,583	0,262	0,349	10,752
10	62	132,9	-	33	8	77,39	0,0	0,2	454,5	1,235	76,583	0,262	0,349	10,752
11	54	115,8	+	25	6	74,87	0,0	0,2	454,5	1,235	66,694	0,228	0,304	9,262
12	54	115,8	-	29	7	74,87	0,0	0,2	454,5	1,235	66,694	0,228	0,304	9,262
▶ 13	67	143,7	+	21	5	68,84	0,0	0,2	454,5	1,235	82,735	0,283	0,377	14,367
14	67	143,7	-	46	11	68,84	0,0	0,2	454,5	1,235	82,735	0,283	0,377	14,367

Save laminate data... Save iLAM data... Load parameter... Save parameter...

Figura 3.29 Illustrazione dei patterns individuati dal software CADWIND

Come evidenziato, è stato scelto il tredicesimo pattern, per via di un ridotto valore di % of *friction limit*. In questo modo le traiettorie seguite sono più vicine a quelle geodetiche, riducendo la possibilità di scivolamento del towpreg [18].

Dopo aver inserito anche i parametri della macchina precedentemente progettata, è stato possibile simulare il processo di avvolgimento, di cui è rappresentata una fase nella Figura 3.30 sottostante.

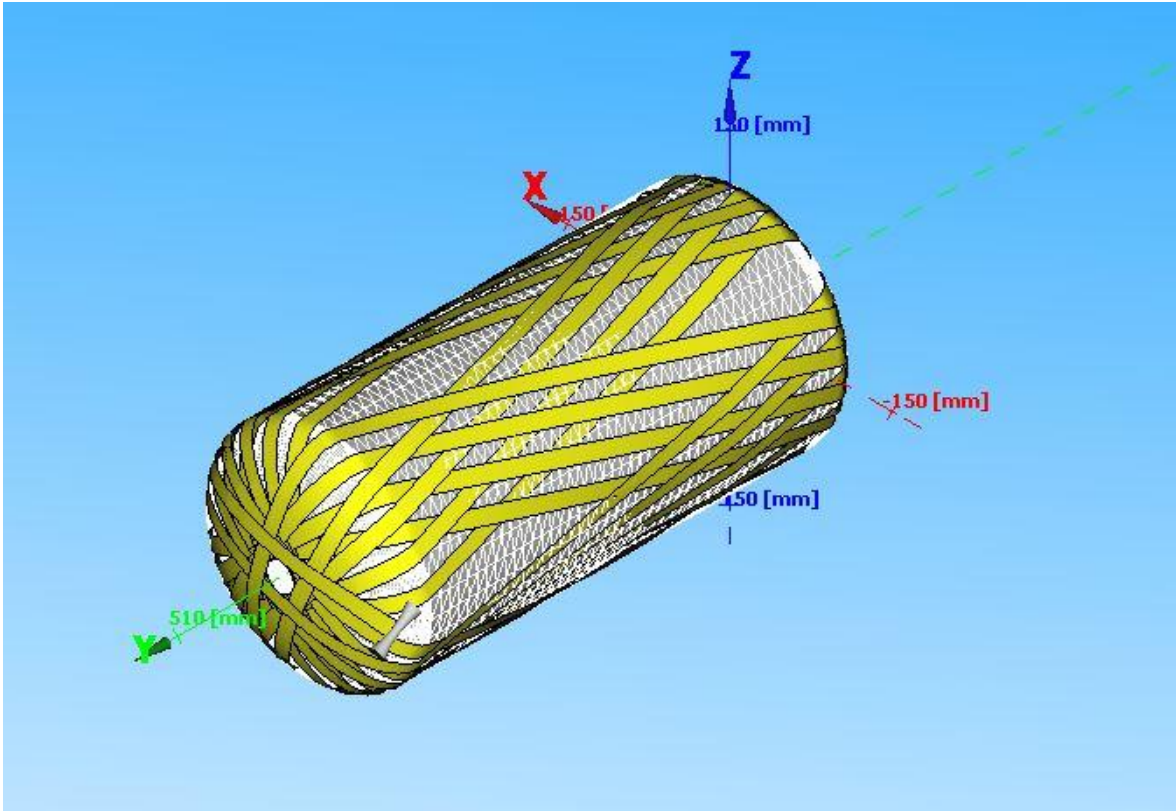


Figura 3.30 Rappresentazione di una fase della simulazione del processo di avvolgimento

Alla fine del processo, come illustrato nella Figura 3.31, si è ottenuto un mandrino così avvolto.

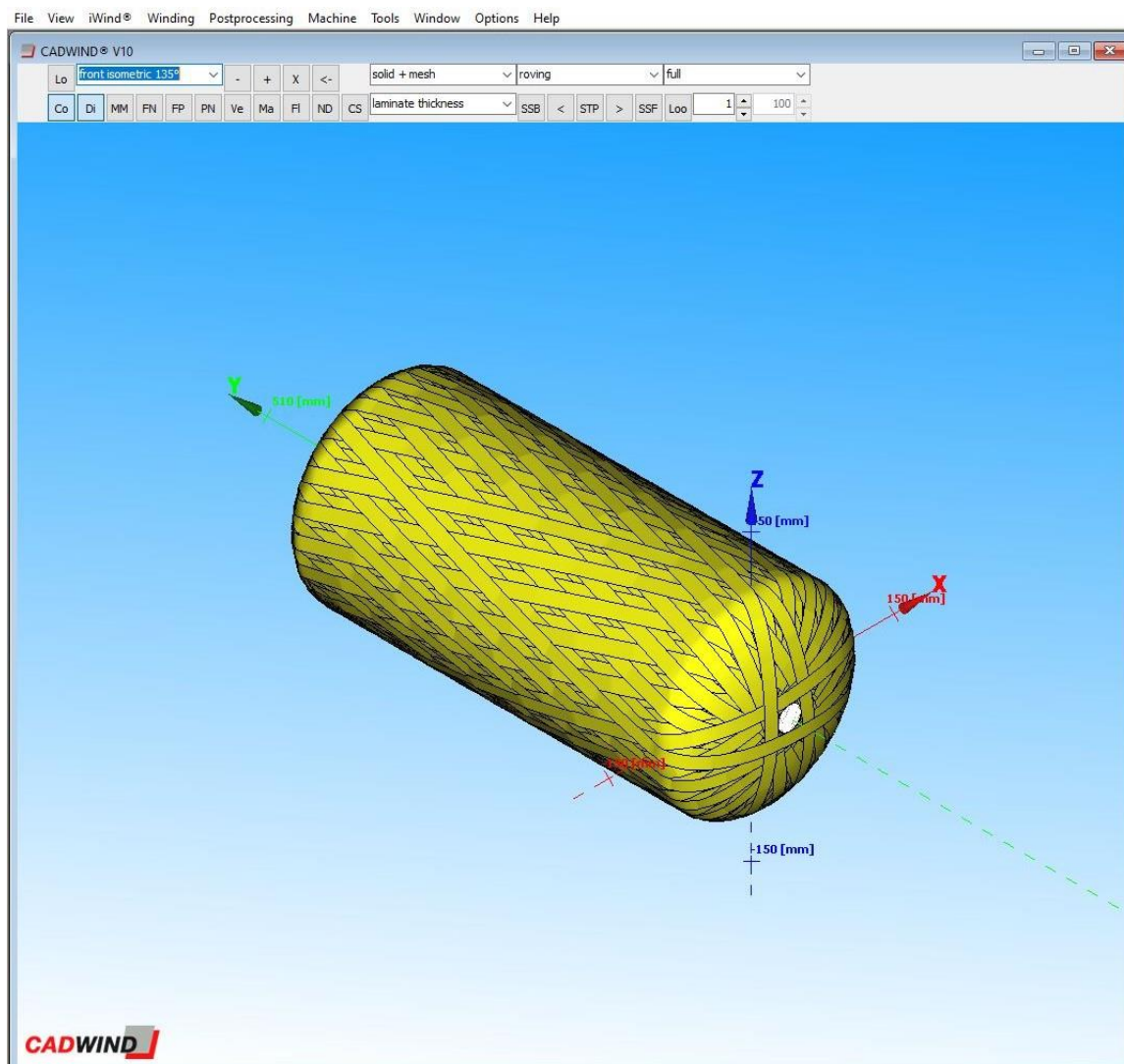


Figura 3.31 Illustrazione, in vista frontale isometrica a 135°, del mandrino avvolto alla fine della simulazione del processo di avvolgimento

Esso, nelle Figure 3.32, 3.33, 3.34 e 3.35, viene illustrato, con annessa color scale, rispettivamente in vista frontale isometrica a 135°, posteriore isometrica a 135°, frontale e posteriore.

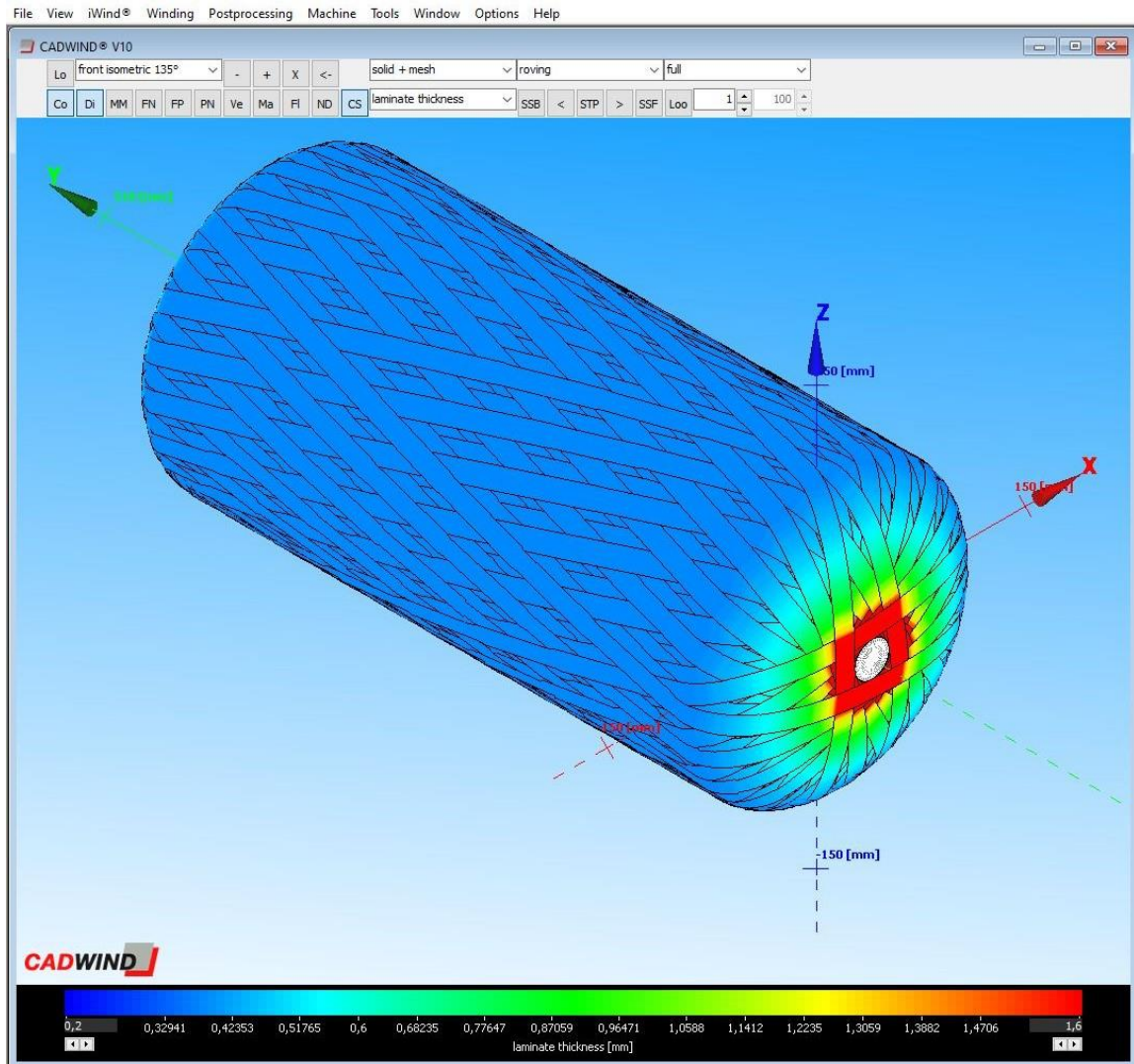


Figura 3.32 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista frontale isometrica a 135°, con color scale relativa allo spessore dello strato

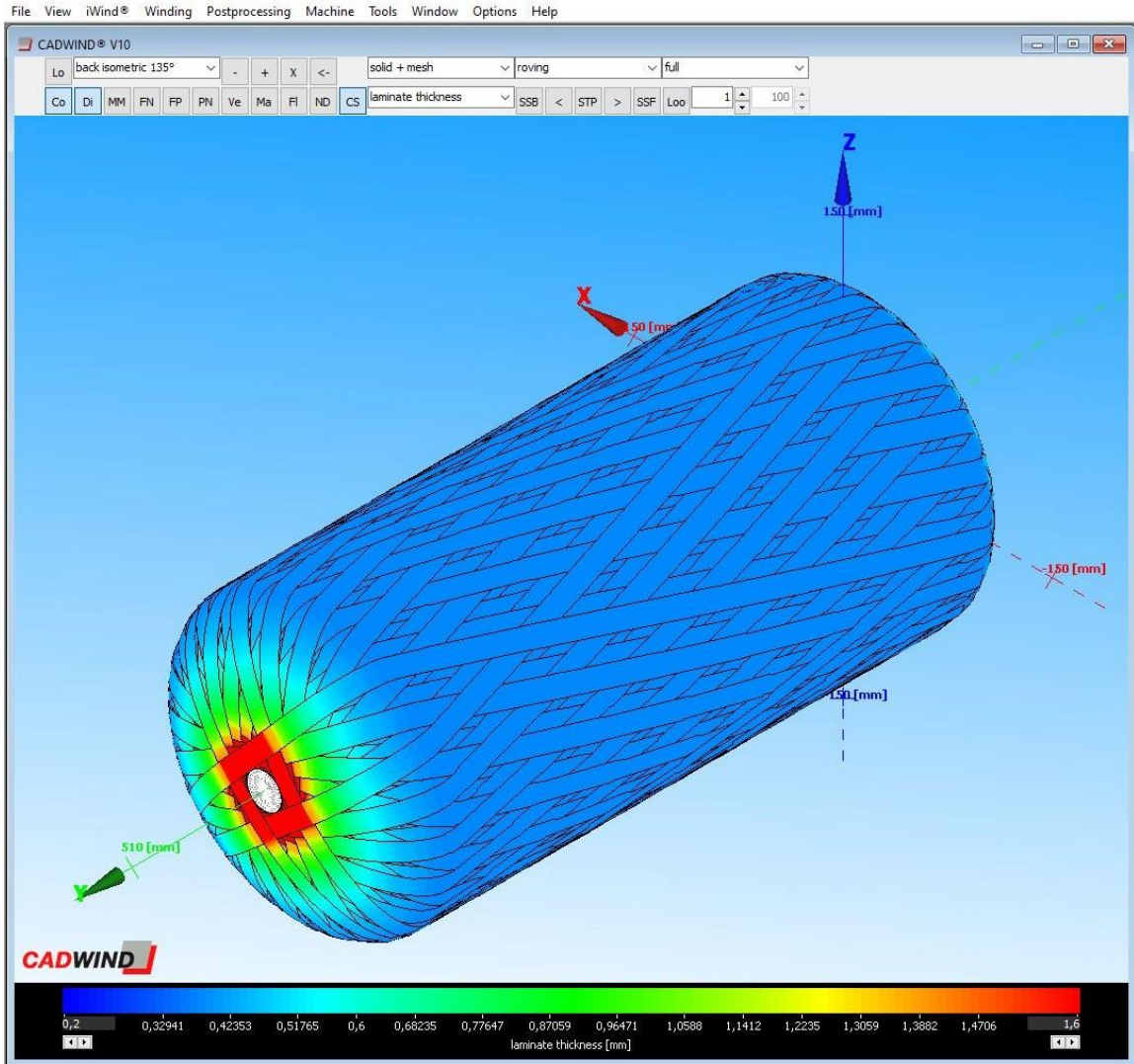


Figura 3.33 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista posteriore isometrica a 135°, con color scale relativa allo spessore dello strato

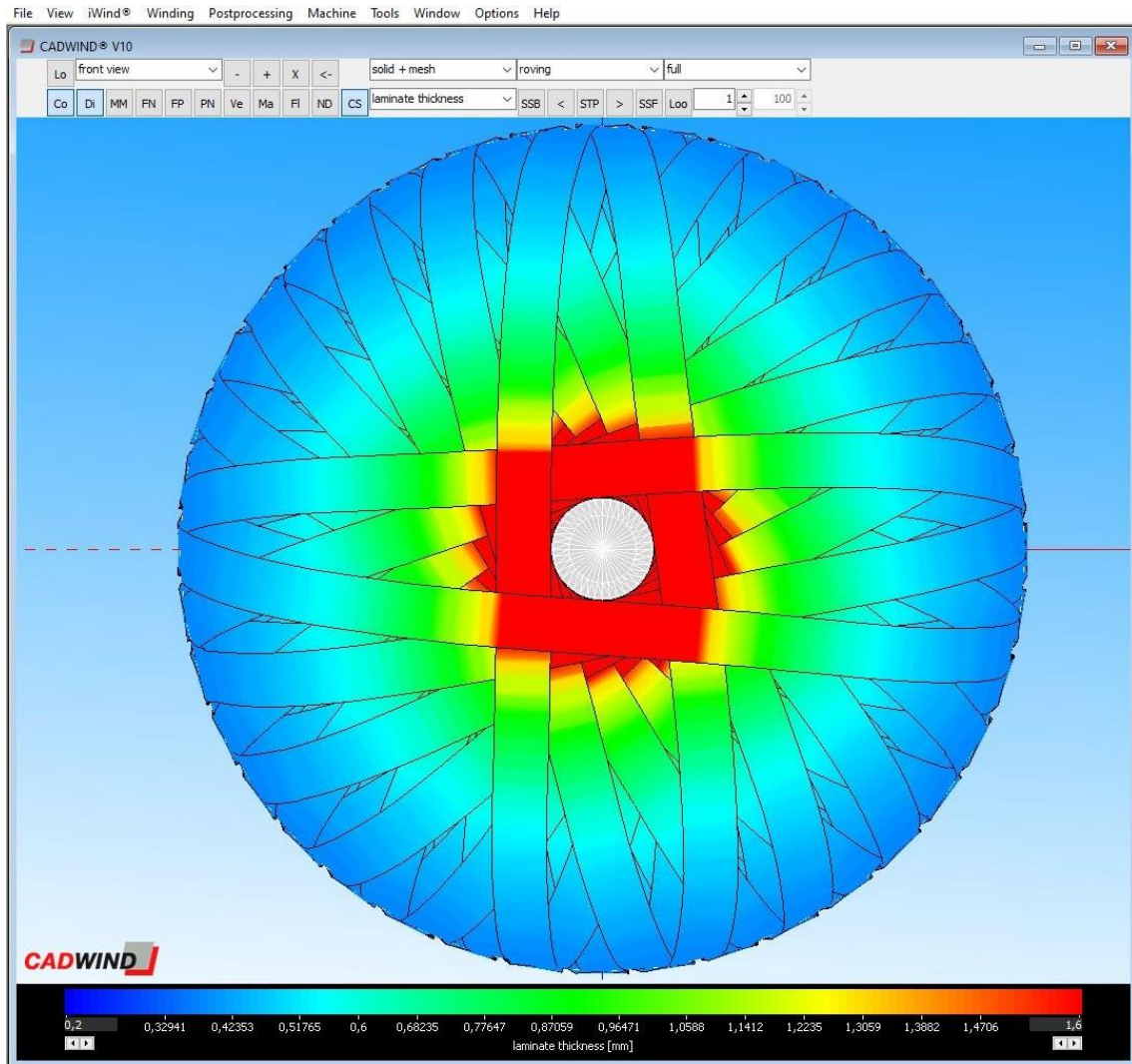


Figura 3.34 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista frontale, con color scale relativa allo spessore dello strato

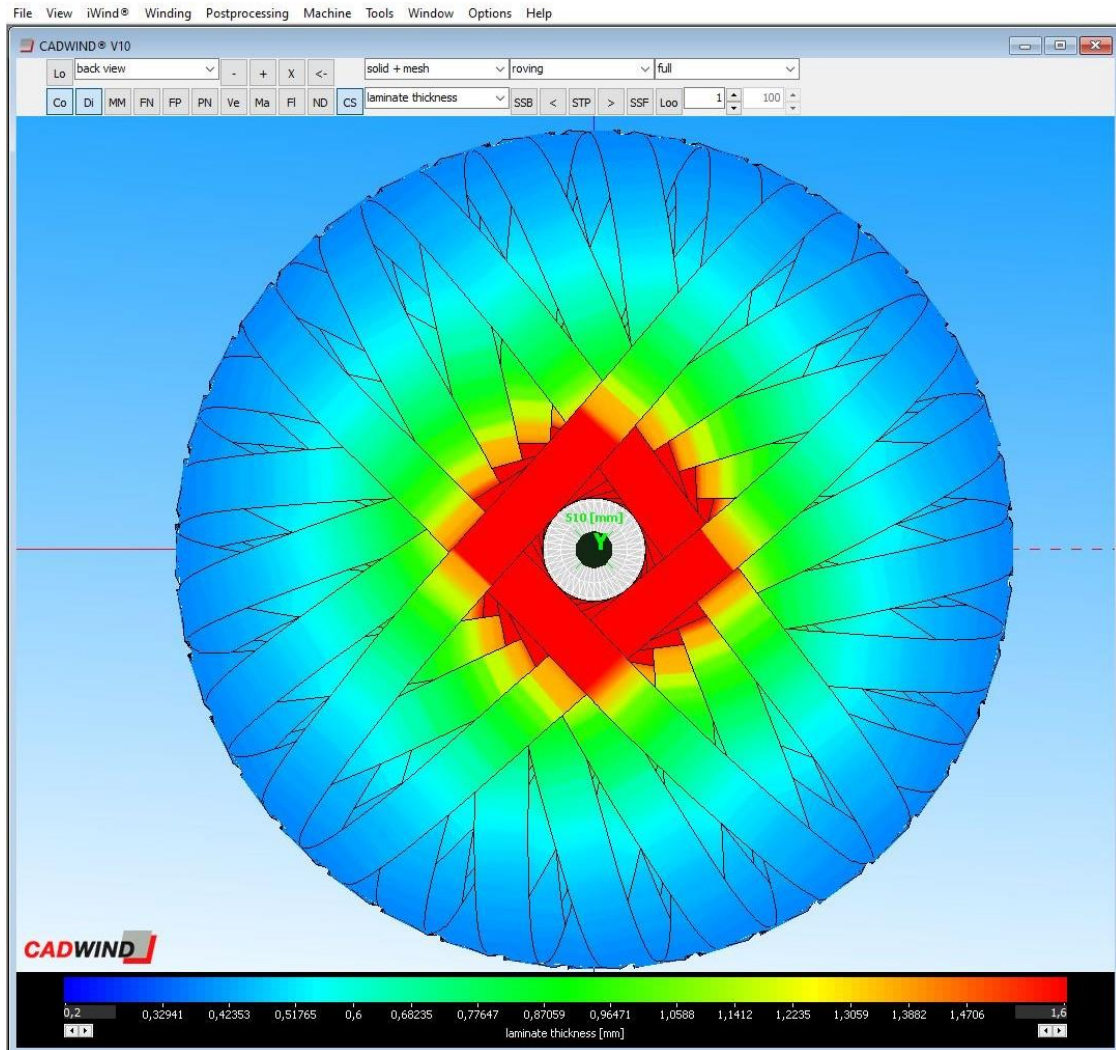


Figura 3.35 Illustrazione del mandrino avvolto, in vista posteriore, con color scale relativa allo spessore dello strato

A questo punto è stato ricavato il tempo necessario per la realizzazione di tale strato. Esso viene mostrato nella Figura 3.36.

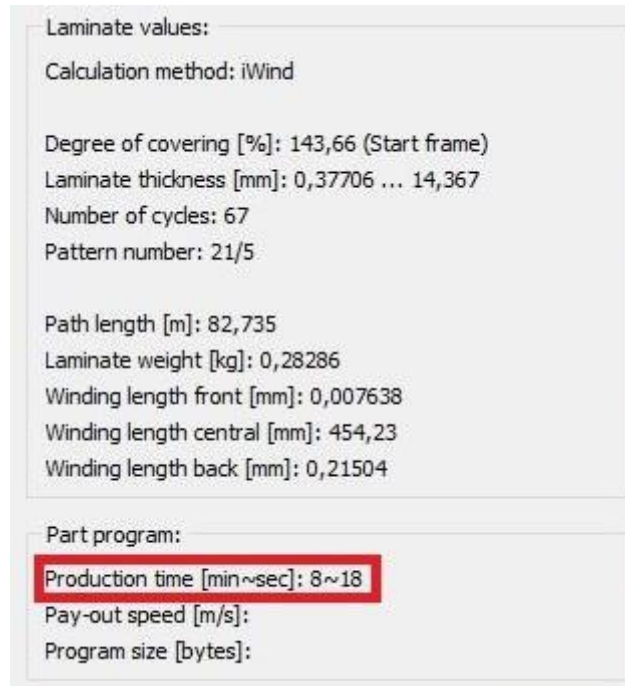


Figura 3.36 Rappresentazione della scheda Calculation results presentante il Production time

Dalla conoscenza del numero di strati costituenti il laminato e del tempo di produzione di ciascuno di essi, sarebbe possibile dedurre il tempo di fabbricazione della parte.

3.5 Discussione

Come precedentemente evidenziato in questa trattazione, è stata ottenuta una macchina di Filament Winding a quattro gradi di libertà, costituita da 477 componenti e suddivisa nei seguenti sei moduli principali: *Base di supporto*, *Rotazione del mandrino*, *Traslazione del carro mobile*, *Traslazione della testa di deposizione*, *Rotazione della testa di deposizione* e *Percorso del towpreg*.

L'ingombro della sopraccitata macchina progettata è:

- altezza: 446 mm;
- larghezza: 1110 mm;
- profondità: 980 mm.

Capitolo 4 – Conclusioni

Come già stabilito nel paragrafo 2.1, il primo obiettivo che questo studio si è posto di raggiungere è stato quello di progettare una macchina di dry-FW con un numero di gradi di libertà adeguato alla complessità geometrica delle parti da realizzare. Questo nel rispetto dei vincoli di:

- *semplicità*, per poter essere facilmente assemblata, regolata e modulata;
- *economicità*;
- *ingombro* (circa 500x1000x1000 mm).

Pertanto, tramite il software Siemens NX, è stata progettata una macchina a 4 g.d.l.. Essi sono:

- rotazione del mandrino attorno al proprio asse;
- traslazione del carro mobile in direzione parallela all'asse del mandrino;
- traslazione della testa di deposizione in direzione ortogonale all'asse del mandrino;
- rotazione della testa di deposizione attorno al proprio asse.

Per rispettare tali vincoli sono stati principalmente impiegati profilati in alluminio e minuteria metallica ad essi dedicata. In questo modo, è stata ottenuta una macchina costituita da sei moduli: *Base di supporto*, *Rotazione del mandrino*, *Traslazione del carro mobile*, *Traslazione della testa di deposizione*, *Rotazione della testa di deposizione* e *Percorso del towpreg*. Inoltre, la struttura progettata può essere facilmente modificabile, adattandosi a varie esigenze lavorative, come mandrini di lunghezza e diametro variabile e cinghie dentate di lunghezza differente.

Dato che sono stati utilizzati primariamente parti commerciali a basso costo, è stato realizzato, al termine, un sistema caratterizzato da una relativa economicità.

In aggiunta, compatibilmente a quanto richiesto, è stato ottenuto un ingombro della macchina risultante pari a: 446x1110x980 mm.

Per guidare chi dovrà assemblare la macchina è stato sommariamente definito, nel paragrafo 3.3, il ciclo di assemblaggio. Da esso si può dedurre la semplice assemblabilità della stessa.

Invece, il secondo obiettivo della trattazione è stato quello di valutare i parametri di processo, mediante CADWIND, un software di simulazione del processo di Filament Winding. Ciò è stato raggiunto definendo l'angolo di avvolgimento e monitorando l'effetto della variazione dei restanti parametri sull'avvolgimento del mandrino.

Dopo aver inserito i parametri della macchina, è stato possibile calcolare il tempo di produzione di un singolo strato del laminato.

Nell'ottica di un miglioramento del progetto, sarebbe interessante:

- progettare il sistema di controllo della macchina;
- inserire la vasca d'impregnazione delle fibre.

Infatti, per completare il progetto e, quindi, rendere operativa la macchina, è necessario implementare il primo punto sopraelencato.

Mentre, grazie allo spazio presente nel telaio del carro, sarebbe possibile inserire una vasca, contenente della resina, per offrire la possibilità di eseguire anche il wet-FW. Ciò permetterebbe di scegliere uno dei due processi (dry-FW o wet-FW) a seconda delle esigenze relative alla specifica applicazione, considerando i vantaggi e svantaggi di entrambi.

Bibliografia

- [1] Forcellese Archimede, «Slides del corso di “Tecnologie di fabbricazione di manufatti in composito”, A.A. 2020/2021».
- [2] Bellezze Tiziano, «Slides del corso di “Tecnologia delle materie plastiche e dei compositi”, A.A. 2021/2022».
- [3] A. Kumar Sharma, R. Bhandari, C. Sharma, S. Krishna Dhakad, e C. Pinca-Bretotean, «Polymer matrix composites: A state of art review», *Mater Today Proc*, vol. 57, pagg. 2330–2333, gen. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.12.592.
- [4] J. Zhang, G. Lin, U. Vaidya, e H. Wang, «Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications», *Compos B Eng*, vol. 250, pag. 110463, feb. 2023, doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2022.110463.
- [5] C. H. Chen, C. L. Chiang, J. X. Wang, e M. Y. Shen, «A circular economy study on the characterization and thermal properties of thermoplastic composite created using regenerated carbon fiber recycled from waste thermoset CFRP bicycle part as reinforcement», *Compos Sci Technol*, vol. 230, pag. 109761, nov. 2022, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2022.109761.
- [6] M. Schey, T. Beke, K. Owens, A. George, E. Pineda, e S. Stapleton, «Effects of debulking on the fiber microstructure and void distribution in carbon fiber reinforced plastics», *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 165, pag. 107364, feb. 2023, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2022.107364.
- [7] M. Quanjin, M. R. M. Rejab, M. S. Idris, B. Zhang, M. N. M. Merzuki, e N. M. Kumar, «Wireless technology applied in 3-axis filament winding machine control system using MIT app inventor», in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 469, n. 1. doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012030.
- [8] A. Błachut *et al.*, «Influence of fiber tension during filament winding on the mechanical properties of composite pressure vessels», *Compos Struct*, vol. 304, pag. 116337, gen. 2023, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116337.
- [9] F. H. Abdalla *et al.*, «Design and fabrication of low cost filament winding machine», *Mater Des*, vol. 28, n. 1, pagg. 234–239, gen. 2007, doi: 10.1016/J.MATDES.2005.06.015.
- [10] M. Quanjin *et al.*, «Design of portable 3-axis filament winding machine with inexpensive control system», *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 12, n. 1, pagg. 3479–3493, mar. 2018, doi: 10.15282/jmes.12.1.2018.15.0309.

- [11] A. Andrianov, E. K. Tomita, C. A. G. Veras, e B. Telles, «A Low-Cost Filament Winding Technology for University Laboratories and Startups», *Polymers (Basel)*, vol. 14, n. 5, 2022, doi: 10.3390/polym14051066.
- [12] J. A. Ateba, G. Verchery, e S. Aivazzadeh, «A 5-axes filament winder with software control», *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 11, n. 4, 2004, doi: 10.1515/secm.2004.11.4.259.
- [13] C. Laval, «CADWIND 2006 – 20 years of filament winding experience», *Reinforced Plastics*, vol. 50, n. 2, pagg. 34–37, feb. 2006, doi: 10.1016/S0034-3617(06)70913-4.
- [14] Mandolini Marco, «Slides del corso di “Ingegnerizzazione di prodotto”, A.A. 2020/2021».
- [15] Sham Tickoo, *Siemens NX 12.0 for Designers, 11th Edition*.
- [16] Callegari Massimo, Fanghella Pietro, e Pellicano Francesco, *Meccanica applicata alle macchine*, Terza edizione.
- [17] Budynas G. Richard, Nisbett J. Keith, Amodio Dario, e Santucci Giovanni, *Shigley. Progetto e costruzione di macchine*, Terza edizione.
- [18] MATERIAL SPRL, «CADWIND V10 User Manual».
- [19] Chougule Pranav, «DESIGN OF A 4-AXIS COMPOSITE FILAMENT WINDING MACHINE BY MODIFYING MANUAL LATHE MACHINE», Mumbai, 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.11033.16489.

Sitografia

[a] <https://pultrex.com/miniwinder-and-lab-winding-machines/>

[b] <https://xwinder.com/>

[c] <https://etcwinders.com/filament-winders/standard-filament-winders/>

[d] <https://www.material.be/cadwind/>

[e] <https://www.plm.automation.siemens.com/global/it/products/nx/>

[f] <https://team3d.it/product/nx-siemens/>

[g] <https://www.omc-stepperonline.com/it>

[h] <https://it.misumi-ec.com/>

[i] <https://8020.net/>

[j] <https://www.traceparts.com/en>

[k] <http://gbaldi.altervista.org/>

[l] <https://www.mhi.org/>

Ringraziamenti

A questo punto, credo di dover dedicare quest'ultima parte dell'elaborato a tutti coloro che mi hanno accompagnato durante questo lungo percorso.

Innanzitutto, vorrei ringraziare la Prof.ssa Ing. Michela Simoncini ed il Prof. Archimede Forcellese per avermi dato la possibilità di svolgere tale attività di tirocinio presso il DIISM e per avermi guidato con estrema professionalità e competenza, fornendomi tutti gli strumenti necessari.

Inoltre, vorrei ringraziare il Carissimo Prof. Ing. Carlo Bruni per aver quotidianamente alleggerito la pesantezza del lavoro da svolgere con consigli ed aneddoti.

Ringrazio in particolar modo il carissimo e simpaticissimo Iacopo per avermi seguito in questi mesi con professionalità e disponibilità, per aver risposto in modo esaustivo ad ogni mio singolo quesito, sottraendo tempo prezioso ai suoi progetti, per aver sempre creduto nelle scelte da me fatte in questi mesi, per avermi incoraggiato e per aver condiviso con me interessi che esulano da questo studio.

Vorrei anche ringraziare tutte le altre persone del dipartimento, nel dettaglio: Chiara, Luciano, Serena e Tommaso per avermi fatto sentire parte del loro bel gruppo e per avermi sopportato in questi mesi.

Ringrazio, inoltre, i miei genitori, mia sorella, i miei nonni, Lizzie e Kiki per avermi supportato, sopportato ed aiutato quando necessario.

Ringrazio tutti i miei amici, di sempre e non, per aver avermi accompagnato in questo percorso.

Un grazie va anche a tutti i miei zii, zie, cugini e cugine per aver sempre creduto in me.

Infine, ringrazio anche me stesso per essere riuscito a terminare questo lungo ed impegnativo percorso, sperando di aver reso orgogliosi tutti, anche chi non c'è più.