



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Automatizzazione e industrializzazione di un impianto di riciclaggio di prepregs

Automatization and industrialization of a prepregs recycling machinery

Relatore

Prof. Ing. Palpacelli Matteo Claudio

Correlatori

Ing. Specchi Roberto

Ing. Alessi Valerio

Tesi di Laurea di:

Viviani Francesco

Alla mia famiglia

INDICE

I CAPITOLO – I MATERIALI COMPOSITI	11
1.1 CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI.....	12
1.1.1 I COMPOSITI A MATRICE CERAMICA.....	13
1.1.2 I COMPOSITI A MATRICE METALLICA.....	14
1.1.3 I COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA.....	15
1.2 LA MATRICE.....	18
1.3 LE RESINE.....	18
1.3.1 LE RESINE TERMOINDURENTI.....	19
1.3.1.1 LA RETICOLAZIONE DELLE RESINE TERMOINDURENTI.....	21
1.3.1.2 IL GRADO DI CURA E LA VELOCITA' DI CURA.....	23
1.3.1.3 IL RITIRO DELLE RESINE TERMOINDURENTI.....	25
1.3.2 LE RESINE TERMOPLASTICHE.....	25
1.4 I RINFORZI.....	27
1.5 LE FIBRE.....	28
1.5.1 FIBRE DI VETRO.....	28
1.5.2 FIBRE DI CARBONIO.....	29
1.5.3 FIBRE ARAMMIDICHE.....	32
1.5.4 FIBRE NATURALI.....	32
1.5.5 NANOCARICHE.....	33
1.6 L'INTERFACCIA FIBRA – MATRICE.....	34
II CAPITOLO – L'ARCHITETTURA, I LAMINATI, I PREPREGS	36
2.1 LE FIBRE.....	36
2.2 LAMINATI COMPOSITI.....	37
2.2.1 L'ARCHITETTURA LINEARE.....	37
2.2.2 L'ARCHITETTURA BIDIMENSIONALE.....	38
2.2.3 L'ARCHITETTURA TRIDIMENSIONALE.....	40
2.2.4 L'ARCHITETTURA RANDOM.....	40
2.3 I PREPREGS.....	41
III CAPITOLO – LE PROPRIETA' MECCANICHE DEI MATERIALI COMPOSITI	43
3.1 LA MICRO-MECCANICA DEI COMPOSITI.....	43

3.1.1 IL MODULO DI ELASTICITA' LONGITUDINALE.....	44
3.1.2 LA RESISTENZA A TRAZIONE LONGITUDINALE.....	45
3.1.3 IL MODULO DI ELASTICITA' TRASVERSALE.....	47
3.1.4 LA RESISTENZA A TRAZIONE TRASVERSALE.....	48
3.2 LA MACRO-MECCANICA DEI COMPOSITI.....	49
IV CAPITOLO – I PROCESSI DI FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI.....	50
4.1 I PROCESSI DI LAY – UP.....	50
4.1.1 LA LAMINAZIONE MANUALE.....	50
4.1.2 LA FORMATURA IN SACCO.....	51
4.1.3 IL FILAMENT WINDING.....	52
4.1.4 L'AUTOMATED TAPE LAYING E L'AUTOMATED FIBER PLACEMENT.....	54
4.1.5 IL RESIN TRANSFER MOULDING.....	56
4.1.6 IL RESIN INFUSION UNDER FLEXIBLE TOOLING.....	58
4.1.7 LA PULTRUSIONE.....	58
4.2 I PROCESSI DI SPRAY – UP.....	59
V CAPITOLO – IL PROGETTO LIFE CIRCE.....	60
5.1 GLI OBIETTIVI DEL PROGETTO CIRCE.....	62
5.1.1 I PARTNER DEL PROGETTO CIRCE.....	62
5.2 I PRODOTTI REALIZZATI CON I PREPREGS RICICLATI.....	64
5.2.1 I RINFORZI STRUTTURALI IN CARBON LOOK.....	64
5.2.2 I DISCHI FRENO CARBOCERAMICI.....	64
5.2.3 I PUNTALI PER SCARPE ANTINFORTUNISTICHE.....	65
5.3 IL MATCHING TRA GLI ATTORI DEL PROGETTO.....	66
5.4 LE CONDIZIONI DI INPUT AL CENTRO DI RECUPERO.....	66
5.5 LE CONDIZIONI DI OUTPUT DAL CENTRO DI RECUPERO.....	68
5.6 LE INFORMAZIONI SALIENTI PER LA PROGETTAZIONE DELLA LINEA.....	69
VI CAPITOLO – LE MACCHINE.....	70
6.1 LE MACCHINE ESISTENTI E L'OTTIMIZZAZIONE.....	71
6.1.1 LA TAGLIERINA.....	71
6.1.1.1 LE MODIFICHE ALLA TAGLIERINA.....	75
6.1.2 LA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA.....	77
6.1.2.1 LE MODIFICHE ALLA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA.....	78

6.2 LE NUOVE MACCHINE E ATTREZZATURE	80
6.2.1 IL NASTRO RETRATTILE	80
6.2.1.1 LE MODIFICHE AL NASTRO RETRATTILE	83
6.2.2 IL SETACCIO ROTATIVO	84
6.2.3 LA DEFOGLIATRICE	84
6.2.4 IL SISTEMA DI VISIONE	86
6.2.5 IL NASTRO A DOPPIA PENNA	90
6.2.5.1 LE MODIFICHE AL NASTRO A DOPPIA PENNA.....	92
6.2.6 LA CONFEZIONATRICE VERTICALE	93
6.2.7 IL NASTRO SCATOLE	94
VII CAPITOLO – L’AUTOMATIZZAZIONE DELLA LINEA DI RICICLAGGIO	102
7.1 IL BLOCCO 1	103
7.1.1 LA DISPOSIZIONE DELLE MACCHINE	103
7.1.2 I CIRCUITI PNEUMATICI.....	104
7.1.2.1 LO SCHEMA PNEUMATICO DEL NASTRO RETRATTILE	108
7.1.3 LA SICUREZZA DELLE TAGLIERINE	113
7.1.4 IL QUADRO ELETTRICO DEL BLOCCO 1	116
7.1.5 IL LAYOUT COMPLESSIVO DEL BLOCCO 1	117
7.2 IL BLOCCO 2	120
7.2.1 L’AUTOMATIZZAZIONE DELLA SPELLICOLATRICE E LO SCHEMA PNEUMATICO.....	120
7.2.1.1 IL CICLO DI FUNZIONAMENTO DELLA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA	128
7.2.2 L’ATTREZZATURA DELLA DEFOGLIATRICE	129
7.2.3 IL SISTEMA DI CONTROLLO	130
7.2.3.1 LE NOZIONI GENERALI DEI SISTEMI DI VISIONE.....	130
7.2.3.1.1 L’OTTICA	130
7.2.3.1.2 LA FORMAZIONE DELLE IMMAGINI.....	135
7.2.3.1.3 LE TELECAMERE.....	138
7.2.3.1.4 L’ILLUMINAZIONE	141
7.2.3.2 LA SCELTA DELL’OTTICA, LE VERIFICHE DEL SENSORE E DELL’ILLUMINATORE	144
7.2.3.3 IL LAYOUT PROTOTIPALE DEL SISTEMA DI VISIONE	147
7.2.3.4 IL SET UP DEL SISTEMA DI VISIONE	154
7.2.4 IL QUADRO ELETTRICO DEL SOTTOBLOCCO 1 DEL BLOCCO 2	162
7.2.5 IL LAYOUT COMPLESSIVO DEL SOTTOBLOCCO 1 DEL BLOCCO 2.....	163

VIII – LE CONCLUSIONI	166
8.1 IL BLOCCO 1	166
8.1.1 LE TAGLIERINE	166
8.1.2 IL NASTRO RETRATTILE	167
8.1.3 LA CONFIGURAZIONE DI FUNZIONAMENTO DELLA STAZIONE DI TAGLIO	167
8.2 IL BLOCCO 2	169
8.2.1 LA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA	169
8.2.2 LA DEFOGLIATRICE	171
8.2.3 IL SISTEMA DI VISIONE	172

INTRODUZIONE

I materiali compositi sono il futuro.

Nell'ultimo decennio, i materiali compositi si sono diffusi in modo deciso in numerosi settori che vanno dall'aviazione, all'aerospazio, alla difesa, fino alle costruzioni civili, passando per l'automotive, il settore sportivo e delle energie rinnovabili (wind energy).

Con l'avvento di questi materiali sono nati nuovi processi produttivi che permettono l'ottenimento di manufatti in composito di diverse dimensioni, forme e geometrie e con diverse proprietà meccaniche ed estetiche.

Le indagini di mercato sull'utilizzo di materiali compositi indicano una crescita significativa nei prossimi anni. E' per questo motivo che molti imprenditori stanno valutando di entrare a far parte di tale mercato che si prospetta, per quanto detto, redditizio.

I compositi sono materiali costituiti da due o più fasi chimicamente distinte (rinforzo e matrice), con caratteristiche fisico-meccaniche diverse, separate da un'interfaccia riconoscibile. Esistono quindi diverse tipologie di materiali compositi in base al tipo di rinforzo e matrice che si utilizza.

I manufatti in composito più diffusi sono a matrice polimerica, rinforzati con fibre che possono essere di carbonio, di vetro, aramidiche o naturali.

Attualmente sono molto utilizzati i preimpregnati, in inglese, prepregs. Questi sono dei fogli ottenuti impregnando il rinforzo, che può essere costituito da fibre unidirezionali, nastri o tessuti, con la quantità desiderata di matrice.

I fogli di prepregs, nella produzione industriale di manufatti in composito, sono tagliati in base alla forma del prodotto che si deve ottenere e all'orientamento delle fibre richiesto e definito in fase di progetto. Dopodiché tali porzioni di prepregs, chiamate dime, vengono utilizzate nel processo di stratificazione, che consiste nel sovrapporre su uno stampo tanti strati di preimpregnato, l'uno sull'altro, fino ad ottenere lo spessore e le proprietà meccaniche desiderate. A questa operazione segue la fase di cura in cui la resina indurisce, che può avvenire in forno o in autoclave.

E' evidente che l'operazione di taglio comporta la nascita di sfrido che deve essere il più possibile ridotto. Si fa notare infatti che i prepregs, e in generale i materiali compositi, sono molto costosi, come lo è anche il loro smaltimento.

Per tali ragioni risulta fondamentale ottimizzare al massimo l'utilizzo dei fogli di prepregs. Ciò è possibile eseguendo l'operazione di taglio tramite software di nesting, ovvero programmi che permettono di ridurre al minimo lo spreco di materie prime, tramite il posizionamento preventivo virtuale degli elementi da realizzare a partire da un unico foglio, incastrandoli tra di loro nel piano di taglio.

Nonostante l'utilizzo di software di nesting, si ottiene comunque una certa quantità di sfridi che comporta uno spreco di denaro, dovuto al mancato utilizzo di una materia prima costosa e al suo relativo smaltimento, oltre che ad un danno ambientale.

Dalla volontà di massimizzare i profitti e soprattutto di ridurre l'impatto ambientale dei materiali compositi, visto l'avvento che questi avranno nei prossimi anni, ha origine il progetto europeo LIFE – CIRCE.

CIRCE è un progetto di economia circolare che nasce dalla ricerca sistematica dell'Europa di salvaguardare l'ambiente, ottimizzando l'utilizzo delle risorse naturali. Esso ha l'obiettivo di sviluppare un nuovo impianto di riciclaggio degli sfridi derivanti dai prepregs in fibra di carbonio.

Al progetto fanno parte 5 aziende italiane, tra cui Alci Group, presso cui il sottoscritto ha svolto il tirocinio curriculare e ha collaborato allo sviluppo della linea di riciclaggio.

Nel seguente progetto di tesi sono state affrontate alcune tematiche legate alla realizzazione dell'impianto di recupero dei preimpregnati. In particolare si sono svolte le verifiche sulle macchine esistenti con l'obiettivo di apportarvi alcuni upgrade per migliorarne il funzionamento, oltre che realizzare sistemi che permettessero l'automatizzazione della linea di riciclaggio.

Pertanto sono state eseguite modifiche sia sulle taglierine che sulla spellicolatrice pneumatica, mentre sono stati messi a punto il nastro retrattile, la defogliatrice, il sistema di visione, la confezionatrice verticale e il nastro scatole con l'obiettivo principale di realizzare un impianto di recupero automatizzato. Un aspetto che è stato tenuto in considerazione durante la progettazione, soprattutto della stazione di cutting, è la sicurezza degli operatori.

I CAPITOLO – I MATERIALI COMPOSITI

I materiali compositi sono materiali costituiti da due o più fasi chimicamente distinte, con caratteristiche fisico-meccaniche diverse, separate da un'interfaccia riconoscibile.

Sono costituiti da matrice e rinforzo, che svolgono specifiche funzioni.

La matrice: • tiene insieme il rinforzo

- permette di distribuire i carichi esterni alla fase di rinforzo
- protegge il rinforzo dagli effetti dell'ambiente

Il rinforzo: • è disperso nella matrice

• determina, grazie alle proprietà fisico-meccaniche superiori rispetto a quelle della matrice, rigidità, resistenza, conducibilità elettrica e termica e altre proprietà del composito

In generale, per parlare di materiale composito deve valere il seguente rapporto tra il modulo di elasticità della matrice e del rinforzo:

$$\frac{E_f}{E_m} > 4$$

Si riporta, di seguito, un'altra definizione di materiale composito:

“materiale costituito da una matrice continua che lega e dà forma a un sistema di rinforzo utilizzato per conferire resistenza e/o rigidità. Il rinforzo conferisce al composito oltre alle proprietà meccaniche anche altre proprietà (termiche, elettriche, ecc). In generale, il materiale risultante possiede delle proprietà superiori a quelle dei singoli costituenti”

Si riporta un'immagine ottenuta al microscopio ottico a scansione (SEM) in cui è possibile notare la matrice, le fibre e l'interfaccia.

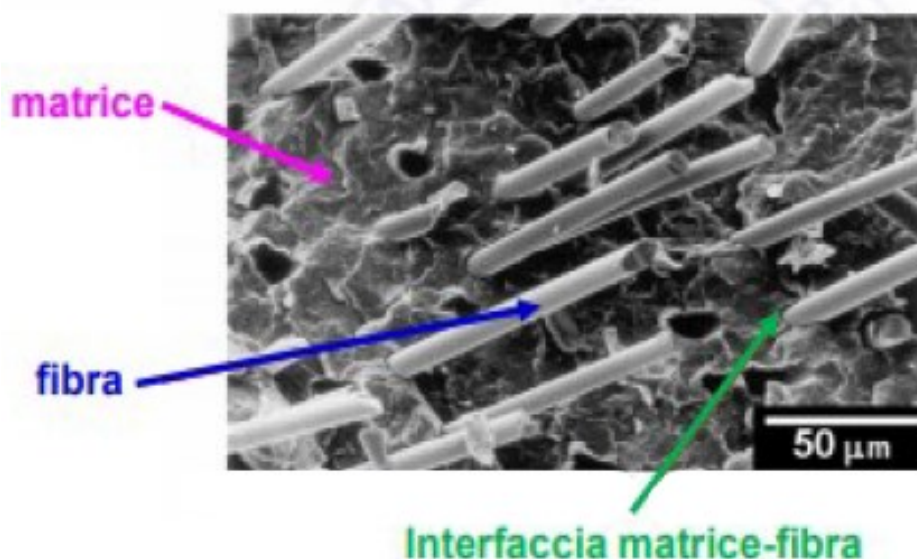


Fig. 1.1 Immagine al SEM di un manufatto in composito PMC

I compositi sono materiali con elevate proprietà meccaniche specifiche, ciò significa che a parità di peso si ha con essi una resistenza maggiore, e viceversa a parità di resistenza, si ottiene una riduzione del peso rispetto ai materiali tradizionali come l'acciaio.

Quindi, offrono al progettista la possibilità di disporre di materiali leggeri, resistenti e che permettono di ottenere parti anche di forma molto complessa.

Per quanto detto si potrebbe dire che tali materiali sono quasi perfetti. Infatti l'unico aspetto negativo, ma di sostanziale importanza che li affligge, è il costo.

1.1 CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI COMPOSITI

I materiali compositi possono essere classificati su diversi livelli. I livelli di classificazione fondamentali sono due.

Il primo livello si basa sul tipo di matrice, mentre il secondo sulla forma/dimensione del rinforzo.

Considerando la classificazione in base al tipo di matrice si possono distinguere:

- Compositi a matrice ceramica (Ceramic Matrix Composites, CMC)
- Compositi a matrice metallica (Metal Matrix Composites, MMC)
- Compositi a matrice polimerica (Polymer Matrix Composites, PMC), i quali possono essere ulteriormente suddivisi in:
 - compositi a matrice termoindurente
 - compositi a matrice termoplastica

I rinforzi invece possono essere divisi in base alla forma, come segue:

- particelle
- fibre

A loro volta i compositi rinforzati con particelle si dividono in base alla loro orientazione che può essere:

- casuale
- preferenziale

Mentre i compositi fibro-rinforzati sono classificati in base a:

- numero degli strati. Il composito può essere a:
 - singolo strato
 - multi-strato (laminati e ibridi)
- lunghezza del rinforzo. Il composito può essere a:
 - fibre corte (discontinue)
 - fibre lunghe (continue)
- collocazione delle fibre. Le fibre possono avere collocazione:
 - unidirezionale
 - bidirezionale
 - spaziale

Si riporta in forma schematica il secondo livello di classificazione dei materiali compositi.

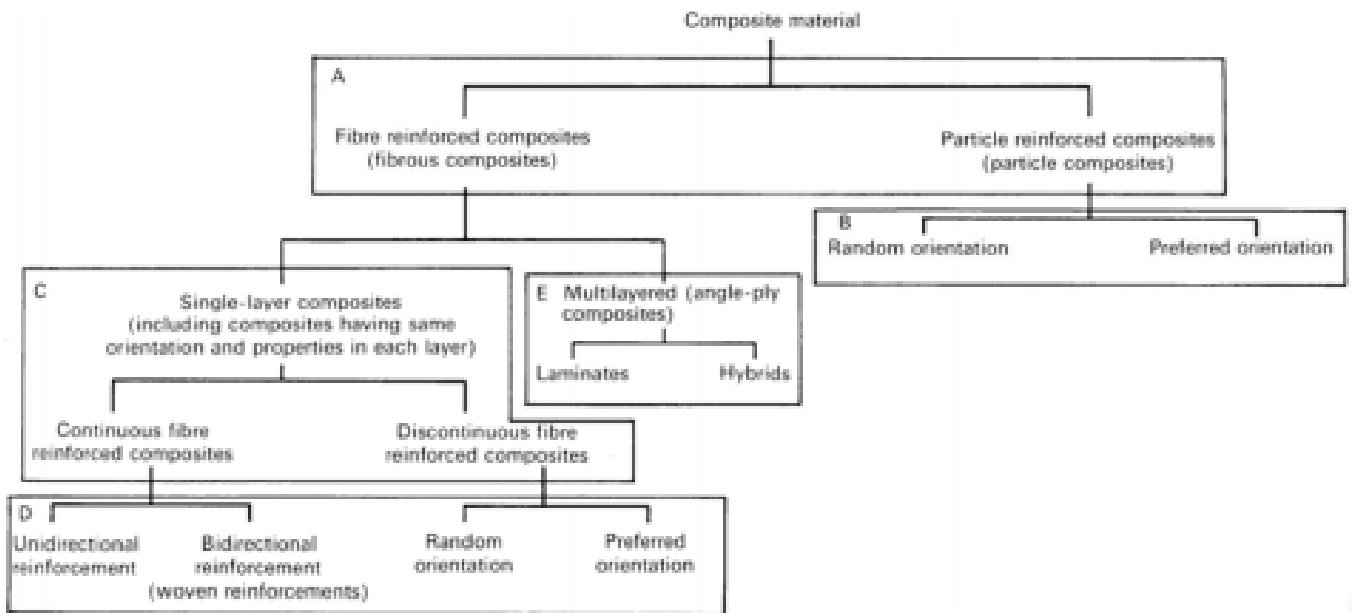


Fig. 1.1 Classificazione di secondo livello dei materiali compositi

1.1.1 I COMPOSITI A MATRICE CERAMICA

I compositi a matrice ceramica (Ceramic Matrix Composites, CMC) sono dei materiali che vengono utilizzati per realizzare manufatti che lavorano ad elevate temperature. Infatti essendo i materiali ceramici caratterizzati da:

- valori elevati di modulo elastico e durezza anche a $T > 1000\text{ °C}$
- caratteristiche elevate di refrattarietà e inerzia chimica

Questi sono in grado di resistere ad elevate temperature.

Tuttavia si evidenzia che essi:

- non permettono lo scorrimento dei piani cristallini
- possiedono un meccanismo di frattura di tipo fragile

Di conseguenza per aumentare le proprietà meccaniche dei materiali ceramici si è pensato di aggiungere una fase con l'obiettivo di aumentarne la tenacità.

Le matrici maggiormente utilizzate CMC sono l'allumina (Al_2O_3) e il nitrato di silicio (Si_3N_4).

Mentre come rinforzo si utilizza il carburo di silicio (SiC), dato che i rinforzi metallici e in fibra di carbonio non possono essere utilizzati a causa, rispettivamente, del diverso coefficiente di dilatazione termica tra metalli e materiali ceramici e dalla degradazione del carbonio per ossidazione.

Si fa notare che anche il carburo di silicio è un materiale ceramico, quindi si ha un composito in cui sia matrice che rinforzo sono ceramici. Di conseguenza è più corretto parlare di fase tenacizzante

più che di fase rinforzante, dato che il suo scopo è quello di aumentare la tenacità della matrice ceramica.

Si riporta un grafico in cui si può notare la resistenza specifica dei materiali compositi a matrice ceramica rispetto ai materiali strutturali più utilizzati, al variare della temperatura.

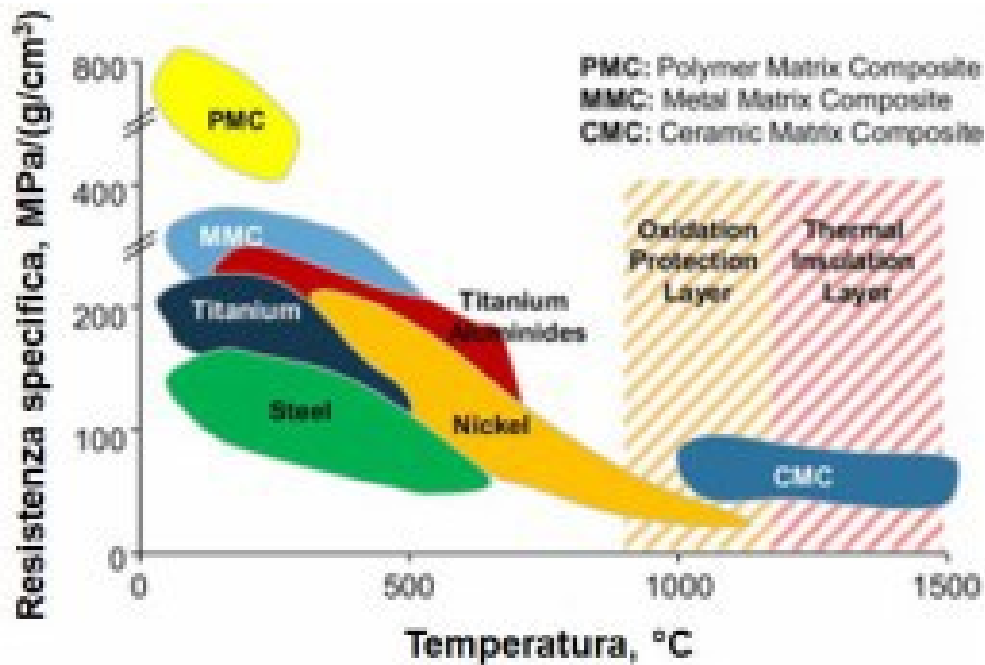


Fig. 1.2 Andamento della resistenza specifica al variare della temperatura per diversi materiali tra cui i materiali compositi a matrice ceramica

1.1.2 I COMPOSITI A MATRICE METALLICA

I compositi a matrice metallica (Metal Matrix Composites, MMC) sono stati sviluppati per migliorare le proprietà dei metalli. In particolare, si vogliono combinare le proprietà dei metalli come:

- elevata duttilità
- basso peso
- elevata conducibilità termica

con quelle dei rinforzi:

- elevata rigidità
- elevata resistenza meccanica
- elevata resistenza all'usura
- basso coefficiente di dilatazione termica

Solitamente, dato che i materiali compositi devono la loro fortuna al ridotto peso, si utilizza come matrice l'alluminio (Al), ma anche altre leghe ultraleggere come le leghe di magnesio e titanio.

Come rinforzi invece si utilizzano solitamente delle particelle ceramiche (Al_2O_3 , SiC), le quali permettono di ottenere un'elevata resistenza e rigidità, tipica dei materiali ceramici, sia a temperatura ambiente che a temperature più elevate.

Di conseguenza si ottiene, rispetto alle caratteristiche della matrice, il miglioramento di rigidità, durezza, resistenza all'usura, resistenza a fatica e resistenza a compressione. Di contro, il rinforzo comporta la riduzione della duttilità e della tenacità del composito e, durante la loro lavorazione, la rapida usura dell'utensile dovuta agli urti per la presenza di una fase dura e abrasiva.

Si fa notare che nonostante i rinforzi continui (fibre) siano più performanti, tra i MMC sono più diffusi i materiali compositi con rinforzi discontinui (particelle). Ciò è dovuto al fatto che in questo modo è possibile, entro certi limiti, lavorare i materiali con le normali operazioni che si eseguono sui materiali metallici. Quanto detto non sarebbe possibile in caso di MMC a fibre lunghe.

Si riportano di seguito alcuni manufatti in materiali compositi a matrice metallica.



Fig. 1.3 Manufatti in compositi a matrice metallica

1.1.3 I COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA

I materiali compositi a matrice polimerica (Polymer Matrix Composites, PMC) sono i materiali più diffusi.

Con tali materiali si riescono a combinare le proprietà dei polimeri:

- resistenza chimica
- durabilità
- leggerezza

con quelle dei rinforzi:

- rigidità

- resistenza meccanica
- resistenza all'usura

In questo modo si ottiene un materiale leggero e resistente.

La matrice utilizzata nei PMC può essere fondamentalmente di due tipi:

- resine termoindurenti. Le quali:

- sono più comuni
- sono usualmente allo stato liquido a Tamb
- consolidano grazie alla reticolazione (processo detto di polimerizzazione o cura), rimanendo allo stato solido in modo permanente
- se portate a temperature elevate dopo il consolidamento subiscono una degradazione delle proprietà

Quindi, una volta che avviene la reticolazione, ovvero che la resina passa dallo stato liquido allo stato solido, non può più avvenire il contrario. La reticolazione è una trasformazione irreversibile.

- resine termoplastiche. Le quali:

- sono allo stato solido a Tamb
- diventano liquide a temperature elevate
- consolidano quando raffreddate a Tamb (la solidificazione avviene senza reazioni chimiche)
- se scaldate a temperature elevate tornano liquide (si stanno sviluppando per favorire la sostenibilità ambientale)

Tale ciclo può essere ripetuto all'infinito, tuttavia ad ogni ciclo successivo la matrice tende mano a mano a degradare. Quindi la solidificazione è una trasformazione reversibile. Si capisce bene che le resine termoplastiche, dal punto di vista ambientale, sono migliori dato che i manufatti possono essere riciclati facilmente a differenza dei manufatti realizzati con resina termoindurente.

Purtroppo i processi produttivi sono molto più semplici per le resine termoindurenti essendo queste liquide a Tamb. Per tali ragione, le resine termoindurenti sono le più diffuse anche se i manufatti realizzati con esse non possono essere riciclati. Ciò ha comportato la nascita di numerosi relitti di barche e aerei in materiale PMC.

I rinforzi utilizzati nei PMC possono essere di diverso materiale, forma e dimensione.

Per quanto riguarda la forma si distinguono i rinforzi in:

- fibra
- particella

Ovviamente con i rinforzi in fibra si ottengono materiali anche con un elevato grado di anisotropia mentre con i rinforzi in particella si ottengono materiali più omogenei.

Si evidenzia che i rinforzi in fibra lunga (continui) permettono di ottenere proprietà meccaniche più elevate rispetto ai rinforzi in fibra corta (discontinui), grazie alla migliore aderenza che si instaura all'interfaccia tra la matrice e la fibra stessa.

Si riporta una figura in cui si notano le tre tipologie di rinforzo.

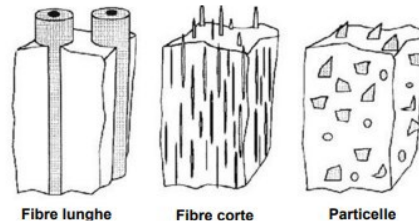


Fig. 1.4 Tipologie di rinforzo

I rinforzi fibrosi, come già detto, si suddividono anche in base al tipo di materiale. Si distinguono 5 tipi di rinforzi:

- fibre di vetro
- fibre di carbonio
- fibre aramidiche
- fibre naturali
- nanocariche (fase rinforzante con almeno una dimensione nanometrica)

I materiali compositi a matrice polimerica permettono di realizzare strutture con elevati valori di rigidità specifica e resistenza specifica. Permettono quindi di ridurre il peso dei manufatti fino al 50 % rispetto all'acciaio e fino a 25 % rispetto all'alluminio.

Inoltre permettono di realizzare manufatti che altrimenti non sarebbero ottenibili con i materiali tradizionali o sarebbero ottenibili con la combinazione di diversi materiali. Ciò è possibile, da un punto di vista strutturale, grazie alla possibilità di ottenere prodotti altamente anisotropi con elevate proprietà meccaniche in specifiche direzioni, ma anche da altri punti di vista come ad esempio la conducibilità termica, elettrica, o il coefficiente di dilatazione termica, grazie alla combinazione di due fasi differenti.

Da un punto di vista ambientale i materiali compositi presentano dei vantaggi ma anche delle criticità.

In particolare, i materiali compositi permettono di accrescere l'efficienza energetica grazie alla riduzione del peso. Ad esempio, sostituendo alcuni componenti di un'automobile in materiale tradizionale con componenti in PMC si otterrebbe una cospicua diminuzione del peso e di conseguenza dei consumi di carburante dell'auto.

Un altro vantaggio che si ottiene utilizzando i materiali compositi a matrice polimerica è l'aumento della vita utile dei componenti dovuta al fatto che i PMC sono poco soggetti a fenomeni di degrado ambientale, come la corrosione, rispetto a quelli realizzati con materiali tradizionali.

L'utilizzo dei PMC ha altri aspetti positivi, tuttavia è doveroso evidenziare che questi sono soggetti a due problematiche non trascurabili.

La prima è l'elevato costo. Infatti attualmente le materie prime dei materiali compositi e alcuni processi produttivi sono abbastanza costosi da non permetterne un uso massivo.

Il secondo aspetto negativo, ma non per questo meno importante, anzi, è la gestione del fine vita dei manufatti in composito. Infatti, per quanto si è già detto in precedenza, i manufatti in PMC a resina termoindurente sono difficili da riciclare a causa della reticolazione irreversibile della resina. Ciò introduce delle difficoltà significative nella separazione del rinforzo dalla matrice.

Finora si è definito cos'è un materiale composito e si è riportata la modalità di classificazione dei manufatti. A questo punto si vogliono fornire delle informazioni di massima sulla matrice, i rinforzi e come questi incidono sulle proprietà meccaniche del materiale finale. Di seguito si parlerà di manufatti in composito a matrice polimerica fibro-rinforzati, i quali sono i materiali più diffusi e oggetto di studio nell'elaborato di tesi.

1.2 LA MATRICE

La matrice ha il compito di tenere assieme le fibre, trasferire e distribuire il carico alle fibre e proteggerle dagli agenti ambientali.

Per capire l'importanza della matrice si tratta di seguito il caso in cui essa non fosse presente.

Se si avesse un fascio di fibre, non legate (senza matrice), sollecitato a trazione si otterrebbe che il carico non si distribuisce in maniera omogenea su tutte le fibre, ma la maggior parte di questo sarebbe sopportato dalle fibre meglio allineate rispetto alla sollecitazione, ciò comporterebbe un'entità della deformazione diversa da fibra a fibra e quindi una rottura prematura del manufatto.

Invece, legando le fibre con una matrice, il carico verrebbe distribuito in maniera omogenea e di conseguenza si avrebbe una deformazione equivalente e un manufatto più resistente.

Si evidenzia che la matrice ha il compito di distribuire il carico alle fibre che costituiscono la fase resistente del materiale. Risulta quindi fondamentale che si instauri un'interfaccia tale da permettere un trasferimento dei carichi ottimale dalla matrice al rinforzo.

Un'altra funzione significativa della matrice è quella di aumentare la tenacità del manufatto. Infatti le fibre sono solitamente molto fragili; è quindi compito della matrice aumentare la resistenza del manufatto a rotture fragili e impatti.

Di seguito si riportano informazioni sulle resine polimeriche essendo queste quelle maggiormente utilizzate nei materiali compositi.

1.3 LE RESINE

La resina è un prodotto organico, di origine naturale o sintetica, senza un preciso punto di fusione, con peso molecolare elevato.

La resina deve essere caratterizzata da:

- bassa viscosità e buona capacità di bagnare le fibre durante l'impregnazione e la formatura

- elevata velocità di solidificazione per conferire al manufatto le caratteristiche finali

Esistono fondamentalmente due tipi di resine:

- termoindurenti
- termoplastiche

1.3.1 LE RESINE TERMOINDURENTI

Le resine termoindurenti sono le resine maggiormente utilizzate nei PMC dato che solitamente sono liquide a temperatura ambiente. Ciò permette un processo di impregnazione delle fibre molto più facile, rispetto alle resine termoplastiche che invece sono solide a temperatura ambiente.

Si fa notare che in realtà l'impregnazione avviene riscaldando un po' la resina termoindurente per diminuire la viscosità e permettere un'ancor più semplice impregnazione delle fibre. Si evidenzia inoltre che per elevate temperature la viscosità della resina aumenta perché inizia la fase di reticolazione.

Una volta eseguita tale fase, (a T_{amb} o quasi) si procede all'indurimento della resina attraverso il processo di polimerizzazione (o cura), durante il quale avviene la reticolazione con la conseguente formazione di legami tridimensionali tra i monomeri di partenza a formare una catena macromolecolare.

Il processo di polimerizzazione è attivato termicamente (mediante calore, scaldando il materiale) e/o chimicamente (mediante indurente). Nella pratica il calore è sempre fornito per aumentare la velocità di polimerizzazione e quindi la produttività del processo che altrimenti sarebbe molto lento.

Si afferma inoltre che la polimerizzazione:

- avviene con sviluppo di calore (reazione di tipo esotermico)

Quanto detto fa ben capire che si deve fare attenzione al calore fornito dall'esterno, dato che questo fa avvenire la cura che a suo volta comporta un'ulteriore sviluppo di calore. Infatti in alcuni punti del composito si potrebbero raggiungere delle temperature più elevate di quelle che ci si aspettano che possono danneggiare il manufatto stesso.

- provoca trasformazioni chimiche irreversibili

Ciò significa che non si può più ottenere la resina in fase liquida una volta che è avvenuta la cura.

La reticolazione è una fase molto delicata del processo ed è bene controllare diversi parametri affinché si possa ottenere un manufatto con buone proprietà meccaniche.

Il reticolo che si forma ha una natura tale da non consentire la formazione di strutture cristalline bensì di una struttura amorfa (anche detta vetrosa).

Una volta avvenuta la polimerizzazione e quindi una volta che si è formata la struttura vetrosa, dato che questa non presenta un punto di fusione preciso (a differenza dei materiali cristallini), se si aumentasse la temperatura non accadrebbe nulla fino ad una certa temperatura detta di transizione vetrosa (T_g) alla quale si verificherebbe il rammollimento della resina.

Quindi in base alle condizioni di lavoro del manufatto si hanno diversi comportamenti, nello specifico se:

- $T < T_g$: resina reticolata rigida, resistente e poco deformabile
- $T > T_g$: resina con rigidità molto bassa e deformabilità elevata (proprietà tipiche di una gomma)

Pertanto, la temperatura di transizione vetrosa T_g è molto importante dato che indica il limite massimo di temperatura per l'impiego del manufatto in composito per non perdere caratteristiche di rigidità e resistenza

La T_g dipende dalla:

- struttura e composizione chimica della resina
- tempo e temperatura del processo di reticolazione

Per determinare la T_g si utilizza una tecnica sperimentale detta calorimetria differenziale a scansione (DSC).

Le resine maggiormente utilizzate come matrici dei compositi alto-prestazionali sono:

- poliesteri
- epossidiche
- fenoliche
- siliconiche
- vinil estere
- bismaleimmidiche

Si riporta le temperature massime di servizio per le diverse resine.

Matrici polimeriche	T_g (T_m) (°C)	Max temperatura di servizio (°C)
<i>Termoindurenti</i>		
Epossidica DGEBA	180	125
Epossidica TGDDM	240-260	190
Bismaleimmide	230-320	232
Polimmide acetilen-terminata (ACTP)	320	280
Polimmide PMR-15	340	316

Fig. 1.5 Temperature massime di servizio per diverse resine termoindurenti

1.3.1.1 LA RETICOLAZIONE DELLE RESINE TERMOINDURENTI

Il processo di reticolazione delle resine termoindurenti risulta essere una fase molto importante per l'ottenimento di manufatti in composito PMC performanti. Inoltre lo studio del processo di cura permette di ottenere informazioni importanti anche sullo stoccaggio dei prepregs. Si riporta di seguito una trattazione approfondita del processo di polimerizzazione delle resine.

La reticolazione potrebbe avvenire anche a temperatura ambiente ma in questo modo sarebbero richiesti dei tempi molto lunghi, non compatibili con le esigenze di produttività delle aziende, per questo nella pratica industriale viene fatta avvenire sempre fornendo calore.

Quindi si porta il manufatto alla temperatura detta di polimerizzazione (T_{pol}) e lo si mantiene a tale temperatura fino al completamento della reticolazione.

Durante la reticolazione si verificano due trasformazioni principali:

- gelificazione: passaggio dallo stato liquido allo stato gommoso con la conseguente formazione di un gel elastico, dovuto allo sviluppo del reticolo tra le molecole con grado di avanzamento della reazione di polimerizzazione relativamente basso. Alla gelificazione il sistema è già costituito da un'unica molecola sottoforma di gel con caratteristiche meccaniche tipiche di un elastomero

Il gel elastico presenta diverse caratteristiche:

- Tg bassa
- possibilità di subire elevate deformazioni con sforzi limitati
- impossibilità di fluire come un liquido se non a seguito della rottura dei legami formatisi durante la reazione.

Quindi per la corretta riuscita del processo di formatura, prima della gelificazione è necessario che:

- avvenga il flusso della resina all'interno dello stampo
- le fibre siano bagnate e impregnate dalla resina

Proseguendo col processo di reticolazione, aumenta la densità di reticolazione e di conseguenza aumenta la Tg. Quando la Tg raggiunge la T di cura avviene la:

- vetrificazione: passaggio da gel gommoso a solido vetroso con conseguente ottenimento delle caratteristiche di resistenza e rigidità della resina indurita. In pratica, la vetrificazione rappresenta l'istante in cui il materiale termina la reticolazione e può essere quindi estratto dallo stampo.

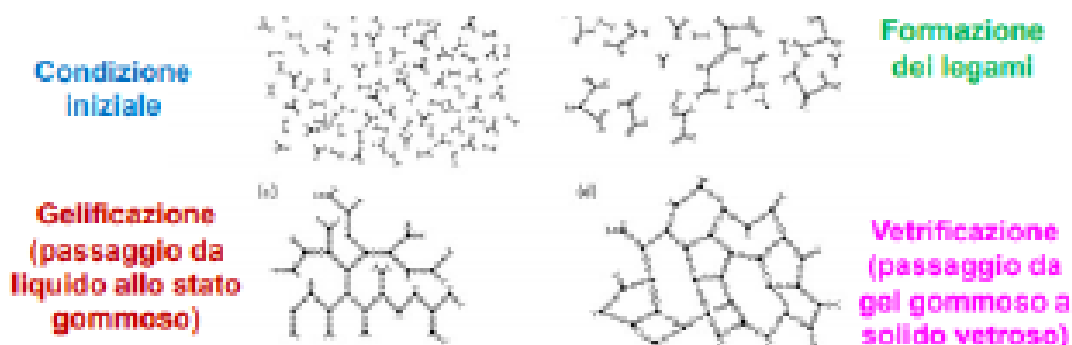


Fig. 1.6 Evoluzione della struttura di una resina termoindurente durante la reticolazione

Si riporta un grafico in cui è possibile notare come variano la viscosità e la temperatura con il tempo durante la reticolazione di una resina termoindurente.

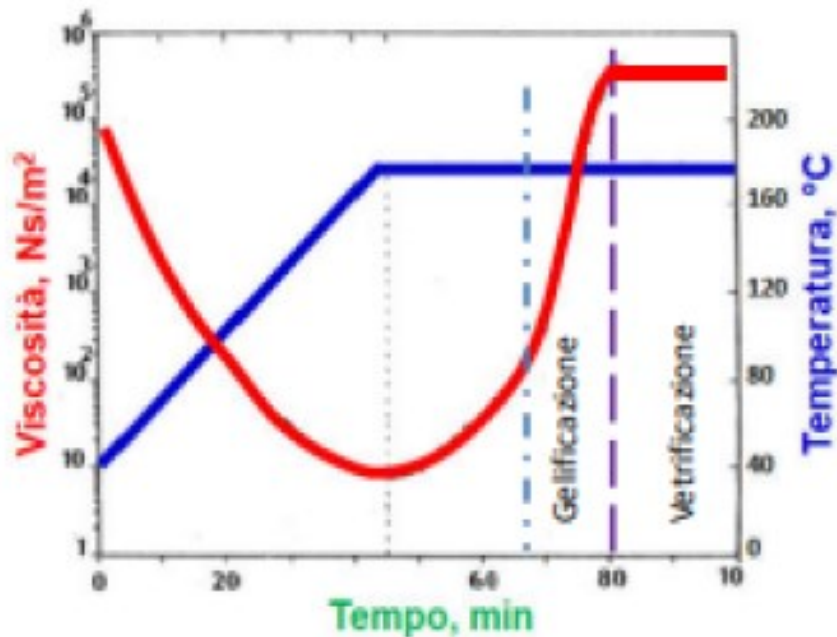


Fig. 1.7 Andamento di temperatura e viscosità nel tempo durante la reticolazione di una resina termoindurente

Un diagramma molto importante per definire le condizioni di processo ottimali per ottenere la corretta reticolazione è il diagramma TTT.

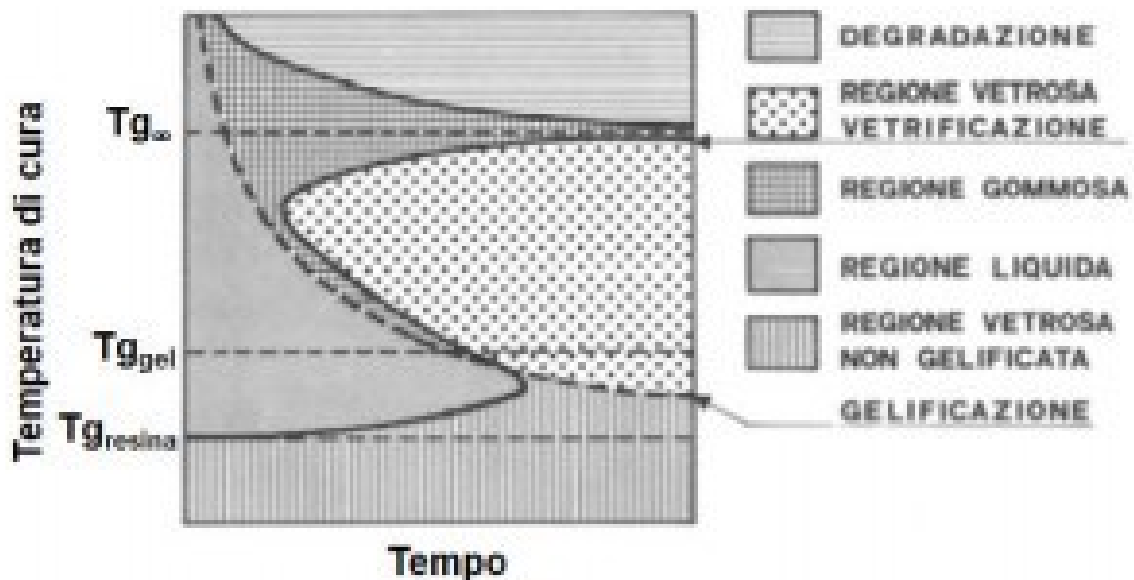


Fig. 1.8 Diagramma temperatura-trasformazione-tempo di una resina termoindurente

Dal diagramma TTT si possono estrarre numerose informazioni. Infatti:

- se $T < T_{g_{resina}}$: resina non reticolata allo stato vetroso. A basse temperature ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) la velocità di reazione è praticamente nulla, di conseguenza non si hanno trasformazioni. Questa è condizione ottimale per la conservazione della resina e dei preregs

- se $T_{g_{resina}} < T < T_{g_{gel}}$: resina allo stato liquido che dopo un certo tempo tende a reticolare. Questa è la condizione di una non corretta conservazione della resina
- se $T_{g_{gel}} < T < T_{g_{\infty}}$: resina allo stato liquido che dopo un certo tempo evolve allo stato gommoso e poi a quello vetroso. Si nota che per avere la completa reticolazione sono necessari tempi infiniti
- se $T > T_{g_{gel}}$: resina si degrada

Le considerazioni che possono essere fatte sono le seguenti:

- la resina deve essere conservata ad una temperatura inferiore a $T_{g_{resina}}$
- la cura deve essere svolta in prossimità del ginocchio, in modo da far avvenire la reticolazione in tempi più brevi possibili (aumento della produttività). Si nota che in questo modo non si ottiene la completa reticolazione, che comunque richiederebbe tempi infiniti. Tuttavia se si vogliono ottenere proprietà meccaniche ottime si può eseguire un successivo ciclo di riscaldamento ad una temperatura maggiore di quella di cura, detto ciclo di post-cura. Si evidenzia che in questo caso si ottengono comunque produttività elevate perché nel post-cura non è necessario lo stampo, che quindi può essere utilizzato per ottenere nuove parti, dato che il manufatto ha già acquisito rigidità.

1.3.1.2 IL GRADO DI CURA E LA VELOCITA' DI CURA

Il grado di cura (α_c) è il rapporto tra i legami formati tra i monomeri dopo un dato intervallo di tempo e il numero massimo di legami che si possono formare al completamento della polimerizzazione.

$$\alpha_c = \frac{H}{H_R}$$

con:

$$H = \int_0^t \left(\frac{dQ}{dt} \right) dt \text{ calore rilasciato al tempo } t \text{ [J/t]}$$

$$H_R = \int_0^{t_f} \left(\frac{dQ}{dt} \right) dt \text{ calore rilasciato al completamento della reazione di polimerizzazione [J/t]}$$

$\frac{dQ}{dt}$ velocità di generazione del calore

t_f tempo necessario per il completamento della reazione di polimerizzazione

La scelta del grado di cura è importante dato che influenza le proprietà della matrice e quindi del composito. In particolare, per quanto riguarda la resina, può influenzare:

- densità
- temperatura di transizione vetrosa
- capacità termica
- resistenza meccanica
- conduttività termica
- modulo di elasticità
- allungamento a rottura

La velocità di cura $\frac{d\alpha_c}{dt}$ è la variazione del grado di cura nel tempo.

$$\frac{d\alpha_c}{dt} = (k_1 + k_2\alpha_c^m)(1 - \alpha_c)^n \text{ Modello di Kamal – Sourour}$$

con:

k_1 e k_2 costanti dipendenti dalla temperatura di cura

m e n costanti che non dipendono dalla temperatura di cura

Si riportano i valori delle costanti per alcune resine.

Resin	Temperature,				
	°C (°F)	k_1 (per min)	k_2 (per min)	m	n
Polyester	45 (113)	0.0131	0.351	0.23	1.77
	60 (140)	0.0924	1.57	0.40	1.60
Low-profile polyester (with 20% polyvinyl acetate)	45 (113)	0.0084	0.144	0.27	1.73
	60 (140)	0.0264	0.282	0.27	1.73
Vinyl ester	45 (113)	0.0073	0.219	0.33	1.76
	60 (140)	0.0624	1.59	0.49	1.51

Fig. 1.9 Costanti del modello di Kamal – Sourour per alcune resine termoindurenti

Si riportano gli andamenti del grado di cura e della velocità di cura nel tempo.

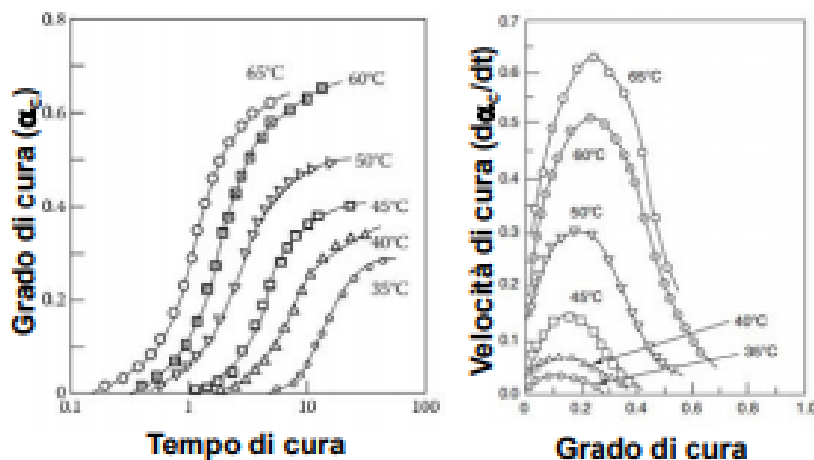


Fig. 1.10 Andamento del grado di cura e della velocità di cura di una resina termoindurente nel tempo

Si nota come il grado di cura α_c :

- aumenta all'aumentare del tempo, all'inizio bruscamente poi in maniera lieve (a parità di T)
- aumenta all'aumentare della temperatura (a parità di t)

Si nota come la velocità di cura:

- ha un andamento crescente fino ad un massimo e poi decrescente (a prescindere dalla T)
- aumenta all'aumentare della temperatura (a parità di grado di cura)

La fase discendente della velocità di cura corrisponde al tratto in cui il grado di cura tende asintoticamente al valore massimo nel grafico $\alpha_c - t$.

1.3.1.3 IL RITIRO DELLE RESINE TERMOINDURENTI

Durante il processo di cura la resina termoindurente subisce una contrazione volumetrica (ritiro), dovuta alla riduzione dello spazio occupato dalle molecole.

L'entità dipende dal tipo di resina (1÷5% per le epossidiche, 5÷12% per le poliestere e vinilestere).

L'effetto può essere limitato dalla presenza delle fibre, infatti attraverso una buona scelta di orientazione delle stesse, si possono ottenere manufatti in composito con coefficienti di dilatazione nulli, e dall'aggiunta di additivi.

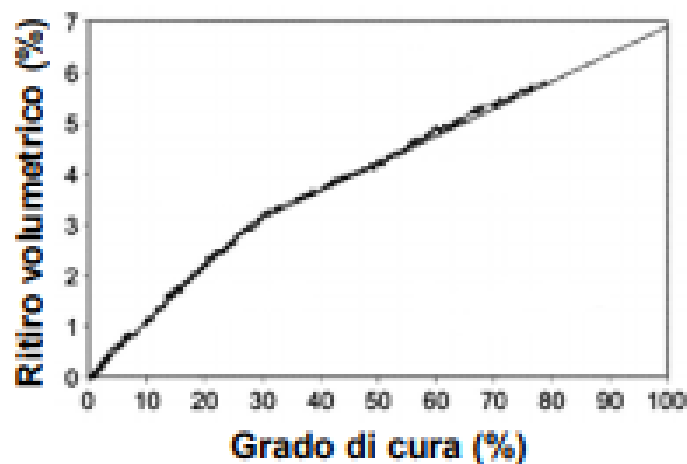


Fig. 1.11 Andamento del ritiro volumetrico al variare del grado di cura

Il ritiro è un 'buon' effetto dato che facilita l'estrazione dallo stampo ma può portare a perdite di precisione.

1.3.2 LE RESINE TERMOPLASTICHE

Le resine termoplastiche sono resine solide a temperatura ambiente. E' evidente quindi che per eseguire la formatura e l'impregnazione delle fibre è necessario innalzare la temperatura per portarle allo stato liquido. Dopodiché, tornando a temperatura ambiente, si verifica la trasformazione liquido-solido che permette l'ottenimento del manufatto.

Quindi si può dire che le resine termoplastiche offrono dei vantaggi rispetto alle resine termoindurenti ma anche degli svantaggi significativi.

I manufatti in resina termoplastica sono riciclabili facilmente, dato che la separazione tra matrice e rinforzo è possibile aumentando la temperatura fino a portare la resina allo stato liquido. Ciò è possibile perché il passaggio dallo stato vetroso a quello fluido avviene in maniera reversibile, senza variazioni della resina a livello chimico.

E' bene evidenziare che, nonostante in linea teorica il passaggio da solido a liquido e viceversa possa avvenire un numero infinito di volte, ad ogni ciclo si verifica un degrado della resina. Di conseguenza,

la resina termoplastica riciclata dovrà essere utilizzata per manufatti che devono possedere proprietà inferiori rispetto a quelle che avevano i manufatti da cui la resina stessa proviene.

Altri aspetti positivi delle resine termoplastiche sono l'economicità, la velocità di consolidamento (dato che non devono avvenire reazioni chimiche come la cura), la possibilità di eseguire su di esse processi di saldatura.

La possibilità di riciclaggio dei manufatti è l'aspetto positivo più importante delle resine termoplastiche. Tuttavia, nonostante nella società odierna si è sempre alla ricerca della minimizzazione degli impatti ambientali, le resine termoplastiche sono poco utilizzate. Ciò è dovuto a diverse complicanze che queste introducono nei processi produttivi.

La problematica più importante delle resine termoplastiche è che queste, essendo solide a temperatura ambiente, necessitano di essere riscaldate per eseguire l'impregnazione delle fibre e la successiva formatura.

Inoltre tali resine risultano avere, anche a temperature elevate, una viscosità di diversi ordini di grandezza maggiore rispetto a quella delle resine termoindurenti che rende molto complessa la fase di impregnazione delle fibre.

Si riportano le caratteristiche di alcune resine termoplastiche.

Materiale	Temperatura inflessione (1.82MPa) [°C]	Resistenza a trazione [MPa]	Modulo elastico trazione [GPa]	Resistenza impatto [J/m]	Densità [g/cm ³]	Costante dielettrica @60Hz
ABS	99	41	2.3	347	1.18	3.0
LDPE	43	11.6	0.17	NB	0.92	2.3
HDPE	74	38.2	—	373	0.96	2.3
PP	102	35.8	1.6	43	0.90	2.2
PS	93	45.1	3.1	59	1.05	2.5
PVC- rigido	68	44.4	2.75	181	1.4	3.4
PVC- flessibile	—	9.6	—	293	1.4	5.5
PMMA	92	72.4	3	21	1.19	3.7
LCP	311	110	11	101	1.70	4.6
Nylon6	65	81.4	2.76	59	1.13	3.8
Nylon6/6	90	82.7	2.83	53	1.14	4.0
PBT	54	52	2.3	53	1.31	3.3
PC	129	69	2.3	694	1.20	3.2
PEEK	160	93.8	3.5	59	1.32	—
PEI	210	105	3	53	1.27	3.2
PES	203	84.1	2.6	75	1.37	3.5
PET	224	159	9.96	101	1.56	3.6
PPS	260	138	11.7	69	1.67	3.1
PSU	174	73.8	2.5	64	1.24	3.5

Fig. 1.12 Caratteristiche fondamentali di alcune resine termoplastiche

1.4 I RINFORZI

Il rinforzo conferisce proprietà in termini di:

- resistenza e rigidità
- densità
- conducibilità elettrica e termica
- coefficiente di dilatazione termica

Il rinforzo indipendentemente della forma, è caratterizzato da almeno una dimensione dell'ordine di grandezza del μm .



Fig. 1.13 Tipologie di rinforzi

Il tipo di rinforzo influenza in maniera significativa anche il costo del manufatto che si vuole realizzare. Il materiale più costoso che può essere utilizzato per realizzare un rinforzo è la fibra di carbonio.

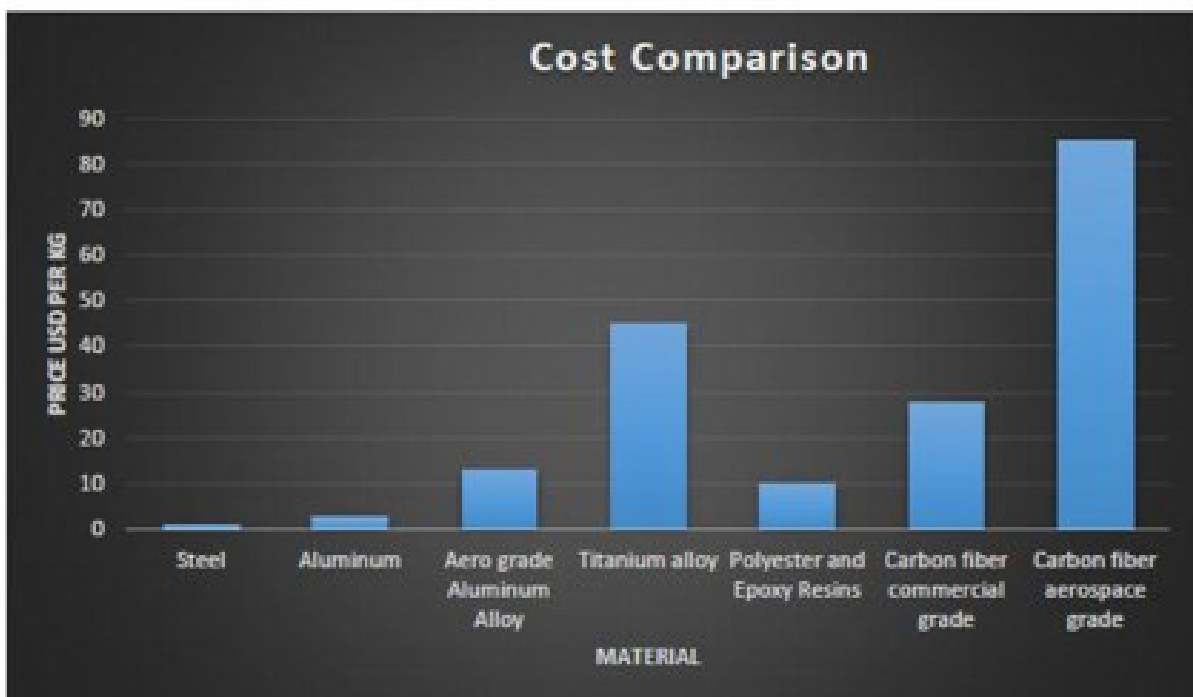


Fig. 1.14 Differenza di costo tra i diversi materiali che possono essere utilizzati come rinforzo in un materiale composito

I rinforzi che permettono di ottenere maggiori qualità meccaniche sono i rinforzi continui in fibra di carbonio. Per tale motivo di seguito si tratteranno le fibre.

1.5 LE FIBRE

E' noto dalla metallurgia che i materiali privi di difetti presentano delle proprietà meccaniche molto più elevate rispetto a quelli reali. Di conseguenza è facile intuire che per aumentare le proprietà meccaniche di un materiale reale si devono ridurre al minimo i difetti.

Le fibre, avendo la sezione trasversale nell'ordine dei micron, quindi dimensioni estremamente ridotte, presentano un numero di difetti molto basso (perfezione strutturale), di conseguenza hanno delle proprietà meccaniche molto elevate prossime a quelle teoriche.

Tale caratteristica (geometrica) garantisce, assieme alle proprietà intrinseche dei materiali che le costituiscono:

- elevata resistenza meccanica
- elevato modulo elastico

Le fibre utilizzate nei compositi a matrice polimerica possono essere di diversi materiali. Le più utilizzate sono:

- Fibre di vetro
- Fibre di carbonio
- Fibre aramidiche
- Fibre naturali

1.5.1 FIBRE DI VETRO

Le fibre di vetro sono le fibre maggiormente diffuse nei materiali compositi a matrice polimerica grazie alle loro buone proprietà meccaniche rispetto al costo non troppo elevato.

Le fibre di vetro possiedono un'elevata densità e una scarsa resistenza alle sollecitazioni di fatica.

Esistono diverse tipologie di fibre di vetro e in base alle caratteristiche desiderate si distinguono in:

- E (E-glass): forma standard
- S (S-glass): più resistenti rispetto all'E-glass
- C (C-glass): più resistenti agli attacchi chimici
- M (M-glass): modulo elastico più elevato
- D (D-glass): ottime caratteristiche elettriche
- L (L-glass): realizzano una buona protezione alle radiazioni, grazie al loro contenuto di piombo, e possono essere usate come traccia per il controllo dell'allineamento delle fibre mediante raggi X

I principali settori nei quali le fibre di vetro sono utilizzate sono il settore marino e delle energie rinnovabili, mentre sono sempre meno utilizzate nell'aerospazio dato che stanno lasciando il posto alle fibre di carbonio.

Le fibre di vetro sono prodotte filando una massa di vetro fuso attraverso crogioli di platino.

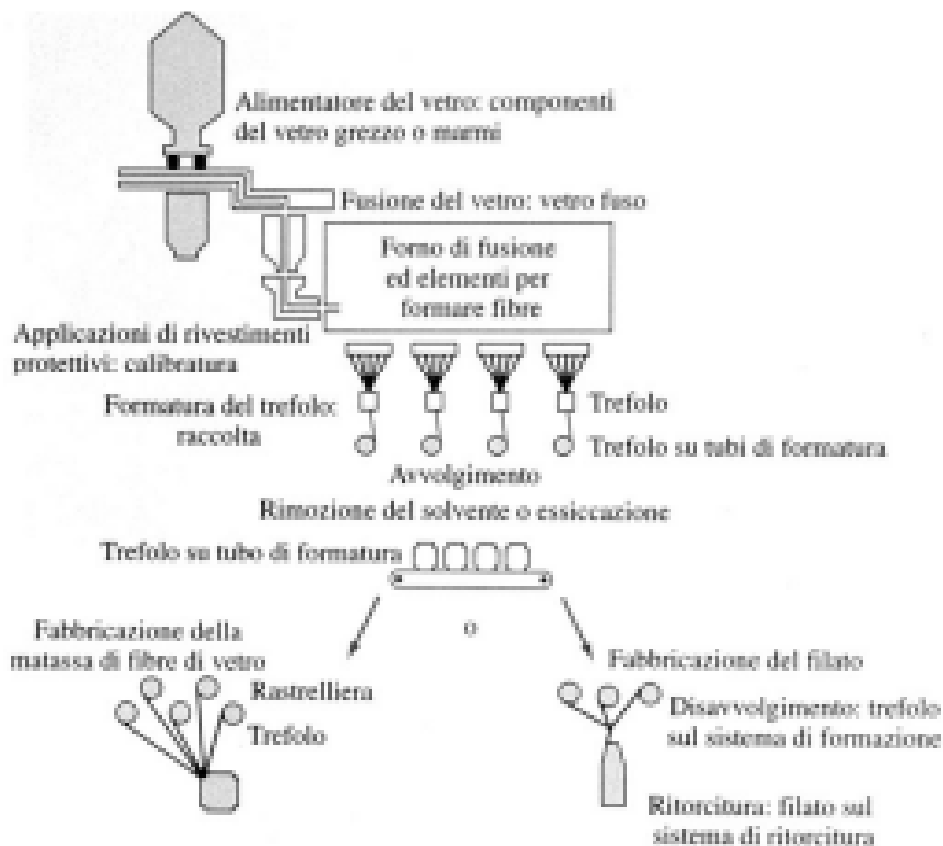


Fig. 1.15 Schema dell'impianto di produzione di fibre di vetro

1.5.2 FIBRE DI CARBONIO

Le fibre di carbonio sono le fibre più resistenti presenti sul mercato. Esse sono state introdotte agli inizi degli anni '60 per soddisfare la richiesta di materiali compositi con proprietà meccaniche sempre più elevate.

Esistono diversi tipi di fibre di carbonio in base alla modalità con la quale queste vengono realizzate. Per tale ragione, di seguito si spiega a grandi linee il processo di produzione delle stesse.

Sono prodotte a partire da precursori, tipicamente polimerici, sottoposti a processo di pirolisi e conversione in carbonio:

- parziale (fibre di carbonio)

- totale (fibre di grafite)

I precursori sono costituiti principalmente da fibre polimeriche:

- PAN, poliacrilonitrile (più usato)
- cellulosa
- pece (pitch), ottenuta nei processi di distillazione del petrolio, per applicazioni particolari

Le fibre quindi sono suddivise, in base al materiale del precursore, in:

- ex-PAN (90% mercato)

- ex-cellulosa
- ex-pitch

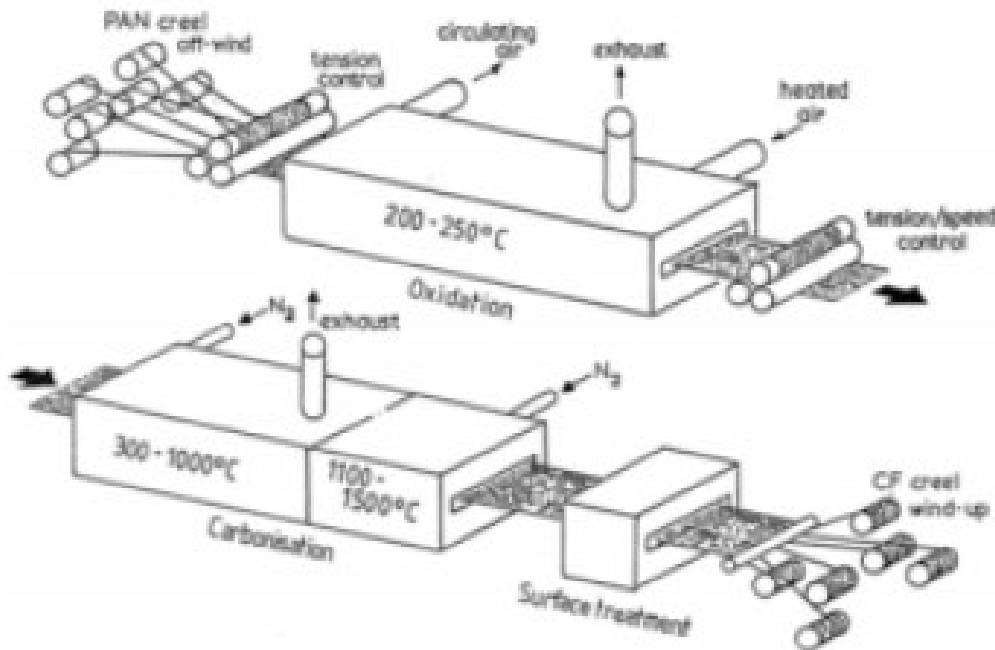


Fig. 1.16 Schema dell'impianto di produzione di fibre di carbonio

La temperatura del processo di pirolisi influenza in maniera significativa sia le proprietà meccaniche dei rinforzi che si ottengono sia il costo del processo.

In particolare, all'aumentare della temperatura aumenta la resistenza del rinforzo dato che cresce la regolarità e la cristallinità della struttura grafitea.

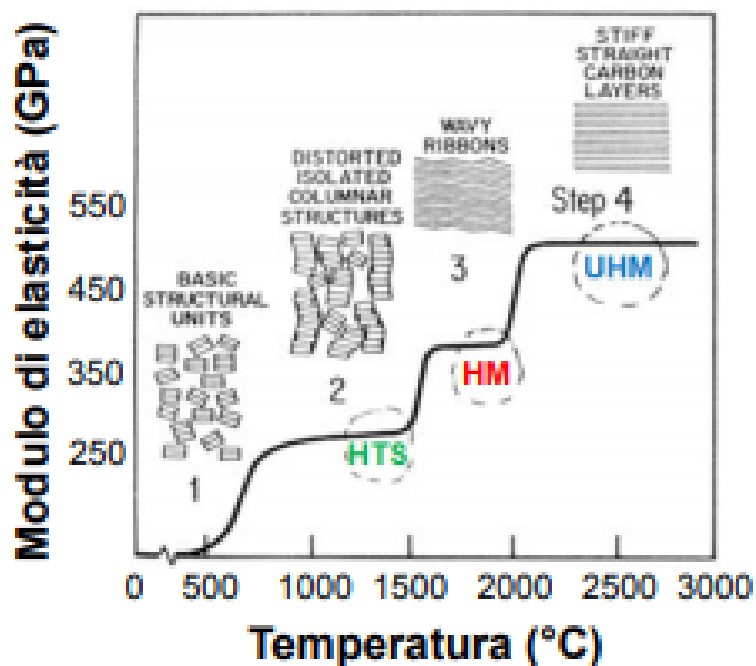


Fig. 1.17 Variazione del modulo di elasticità e della struttura cristallina della fibra di carbonio rispetto alla temperatura di pirolisi

Le fibre ex-PAN sono classificate in:

- UHM (Ultra High Modulus): modulo superiore a 500 GPa, resistenza di circa 3,5 GPa e allungamento a rottura pari a circa 0.5%
- HM (High Modulus): modulo di 350÷500 GPa, resistenza di circa 2 GPa e allungamento a rottura pari a circa 0.5%
- IM (Intermediate Modulus): modulo pari a circa 300 GPa, resistenza simile alle HM e allungamento a rottura pari a 1.5%
- LM (Low Modulus): modulo minore di 100 GPa e bassa resistenza
- HTS (High Tensile Strength): resistenza maggiore di 4 GPa, modulo di circa 250 GPa, allungamento a rottura di 1.5÷1.9%

Essendo le fibre di carbonio, più resistenti ma anche più costose, sono utilizzate solo in applicazioni per cui la performance è l'unico aspetto che si considera. Per quanto detto, i settori che fanno uso di materiali compositi in fibra di carbonio sono:

- aerospace
- racing
- attrezzature sportive
- costruzioni civili (ad esempio per il recupero di edifici esistenti)



Fig. 1.18 Esempi di utilizzo di CFRP nel racing

Si riportano i principali vantaggi e svantaggi delle fibre di carbonio.

Vantaggi:

- resistenza specifica e modulo specifico eccezionalmente elevati
- coefficiente di dilatazione termica molto basso

- resistenza a fatica elevata
- conduttività termica elevata (superiore a quella del Cu)

Svantaggi:

- allungamento a rottura basso (UTS solitamente inferiori all'1%)
- resistenza agli urti bassa (conseguenza della poca duttilità)
- costo elevato

1.5.3 FIBRE ARAMMIDICHE

Le caratteristiche principali delle fibre aramidiche sono:

- Bassa densità e alta resistenza specifica (la più alta tra le fibre)
- Spiccata anisotropia
- Elevata tolleranza al danno da impatto o da altri carichi dinamici
- Coefficiente di espansione termica negativo
- Bassa resistenza a compressione e difficoltà di taglio e lavorabilità

La fibra aramidica più usata è il Kevlar.

Esempi di applicazioni in cui tali fibre vengono utilizzate sono i giubbotti anti-proiettile.

1.5.4 FIBRE NATURALI

Grazie all'aumento dell'interesse verso la sostenibilità ambientale, si sta iniziando ad utilizzare le fibre naturali. Queste possiedono dei vantaggi ma anche degli svantaggi.

Vantaggi:

- basso costo
- elevata disponibilità
- sicurezza per l'ambiente e per gli operatori
- densità paragonabile alle fibre di carbonio (bassa)
- minore abrasività rispetto alle altre fibre
- biodegradabilità, biocompatibilità e riciclabilità

Svantaggi:

- proprietà meccaniche in valore assoluto più basse rispetto alle altre fibre
- bassa stabilità termica e degradazione

- idrofilia
- variabilità delle proprietà

Fibra	Densità (g/cm ³)	Allungamento (%)	Resistenza alla trazione (MPa)	Modulo elastico (GPa)	Prezzo/(\$US/kg); fibre grezze (mat/tessuti)
Cotone	1.5-1.6	7.0-8.0	400	5.5-12.6	1.5-2.2
Iuta	1.3	1.5-1.8	393-773	26.5	0.35(1.5/0.9-2)
Lino	1.5	2.7-3.2	500-1500	27.6	1.5(2/4)
Canapa	1.47	2-4'	690	70	0.6-1.8(2/4)
Kenaf	1.45	1.6	930	53	---
Ramiè	N / A	3.6-3.8	400-938	61.4-128	1.5-2.5
Sisal	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22	0.6-0.7
Coir	1.2	30	593	4.0-6.0	0.25-0.5
Vetro-E	2.5	0.5	2000-3500	70	1.3(1.7/3.8)

Fig. 1.19 Caratteristiche delle fibre naturali confrontati con una fibra di vetro di tipo E

1.5.5 NANOCARICHE

Ultimamente si stanno sviluppando dei materiali compositi tri-fase, costituiti quindi non solo da due fasi bensì da tre.

Questi materiali sono caratterizzati dalla presenza nella matrice di rinforzi con dimensioni dell'ordine dei nanometri, detti nanocariche, oltre ai rinforzi standard di cui si è già parlato. In tal modo si ottengono i cosiddetti compositi multiscala caratterizzati da proprietà meccaniche elevatissime.

Le nanocariche sono classificate come:

- zero-dimensionali: particelle con tutte le dimensioni inferiori a 100 nm
- mono-dimensionali: particelle di tipo fibroso
- bi-dimensionali: particelle in forma di sottili lamelle

Le nanocariche di interesse per il settore dei compositi sono due:

- nanotubi (mono-dimensionali): si possono immaginare come ottenuti arrotolando singoli strati di grafene in una geometria cilindrica. Sono suddivisi in:
 - nanotubi a parete singola (SWCNT)
 - nanotubi a parete multipla (MWCNT)

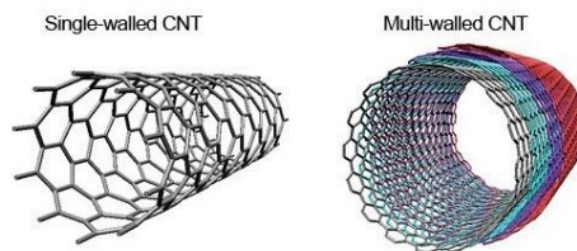


Fig. 1.20 Nanotubi

- grafene (bi-dimensionale): presenta la stessa struttura esagonale in piano della grafite ma spessore di “un atomo”. Le tipologie più facili da realizzare sono: - ossido di grafene (GO)
- ossido di grafene ridotto (RGO)

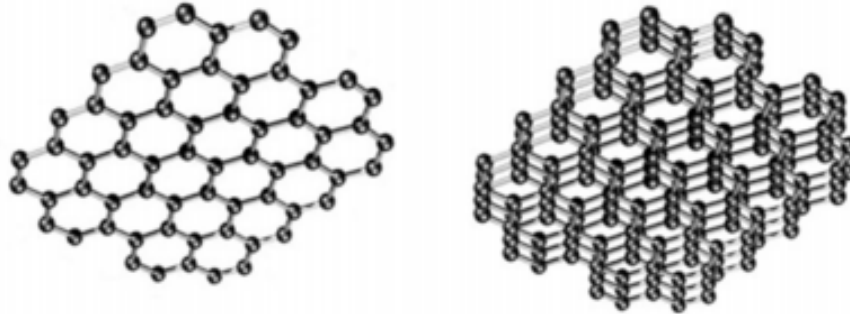


Fig. 1.21 Grafene

1.6 L'INTERFACCIA FIBRA – MATRICE

Per ottenere un manufatto in composito con proprietà elevate, oltre a considerare i materiali di matrice e rinforzo, risulta essere fondamentale l'interfaccia fibra – matrice. Infatti è quest'ultima che permette il trasferimento dei carichi dalla matrice al rinforzo.

L'interfaccia matrice-rinforzo può essere costituita da una fase distinta in base alle reazioni chimiche che si instaurano tra matrice e rinforzo e rappresenta una zona di discontinuità in termini di:

- natura chimica
- struttura
- proprietà meccaniche e fisiche

Per ottenere una buona interfaccia è necessario che durante il processo produttivo matrice e rinforzo arrivino a stretto contatto. Questo è possibile solo con un'elevata bagnabilità (capacità della matrice di spandersi sulla superficie del rinforzo).

L'elevata bagnabilità permette di garantire:

- il flusso della matrice liquida sul rinforzo in modo da ricoprire le asperità e le valli della sua superficie
- il perfetto contatto della matrice con il rinforzo rimuovendo l'aria presente

Una volta che la matrice ha bagnato il rinforzo si ha l'adesione tra le due fasi. L'adesione avviene tramite diversi meccanismi che avvengono contemporaneamente. In particolare, si verificano tre meccanismi di adesione:

- meccanica: penetrazione della matrice all'interno delle asperità del rinforzo
- chimica: formazione di legami chimici tra matrice e rinforzo
- fisica: interazioni elettrostatiche e/o di legami secondari tra matrice e rinforzo

Inoltre per migliorare l'adesione si possono utilizzare i promotori di adesione, i quali sono costituiti da molecole in grado di:

- formare legami forti con i gruppi reattivi sulla superficie del rinforzo
- interagire per reazione o interdiffusione con la matrice

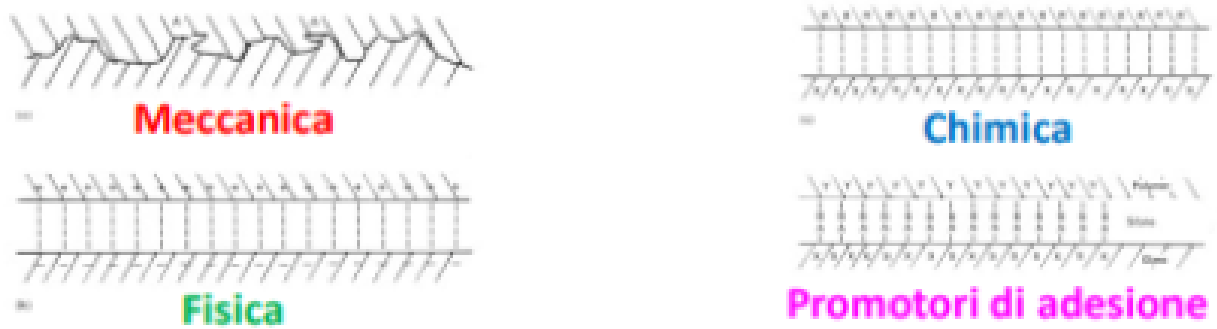


Fig. 1.22 Meccanismi di adesione

II CAPITOLO – L'ARCHITETTURA, I LAMINATI, I PREPREGS

L'architettura delle fibre rappresenta la disposizione delle fibre all'interno di un composito. In generale la disposizione delle fibre può essere:

- unidirezionale
- bidirezionale
- spaziale

La tipologia di architettura è molto importante dato che influenza aspetti significativi come l'impregnazione del rinforzo, la lavorabilità del composito ma anche i meccanismi di rottura e le proprietà meccaniche dello stesso.

2.1 LE FIBRE

Le fibre sono dei filamenti continui molto sottili (micron) di difficile manipolazione. Per questo le fibre presenti sul mercato sono disponibili in diverse forme:

- mono filamento (mono-filament)
- fascio di filamenti (tow)
- filato (yarn)
- trefolo (roving)

Il mono-filamento è costituito da una singola fibra continua di diametro dell'ordine di 10 micron.

Il fascio di filamenti (tow) è costituito da un numero elevato di filamenti, paralleli tra loro, assemblati senza torsione. Il tow può contenere da 1000 (1K) a 50000 (50K) filamenti.

Il filato (yarn) è costituito da un numero elevato di filamenti assemblati mediante torsione. Lo yarn può essere ottenuto attorcigliando un tow su se stesso. Al fine di conferire stabilità nei confronti dello sfaldamento, ad ogni pollice di lunghezza dello yarn corrisponde un giro d'attorcigliamento.

Il trefolo (roving) è ottenuto assemblando, senza torsione, un certo numero di yarn, disposti parallelamente tra loro.

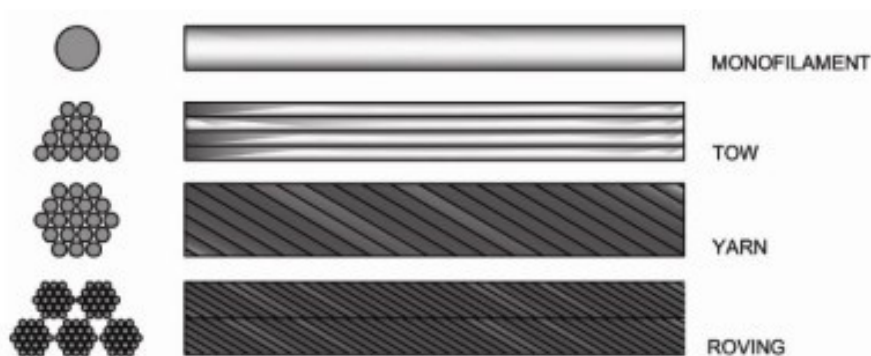


Fig. 2.1 Tipologie di formati di fibre in commercio

2.2 LAMINATI COMPOSITI

Generalmente i manufatti in composito sono ottenuti sovrapponendo diverse lamine l'una sull'altra fino ad ottenere lo spessore desiderato (processo di laminazione). Per lamina si intende il singolo strato di matrice e rinforzo. Di conseguenza si può parlare di laminati.

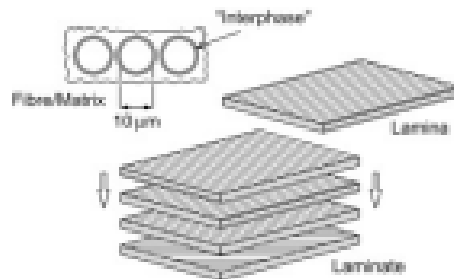


Fig. 2.2 Lamine e laminato

I laminati sono caratterizzati da un codice dal quale si possono ricavare informazioni sulla direzione delle fibre. Il codice consiste nel riportare la sequenza degli angoli di orientazione delle fibre di ciascuno strato, designando una delle direzioni come 0°.

In caso di laminati costituiti da tanti strati, il codice può risultare troppo lungo, per questo si sono introdotte delle regole per renderne più veloce la lettura. In particolare, si usano dei pedici ognuno dei quali ha un diverso significato. I pedici utilizzati sono:

- "S" per la simmetria
- "N" (è un numero) per le ripetizioni dello stesso ordine di impilaggio
- "T" per indicare l'assenza di simmetrie e ripetizioni (è la sequenza totale)

Codice laminato:

- $[0/-45/90/45/0/0/45/90/-45/0]_T$
- $[0/-45/90/45/0]_S$

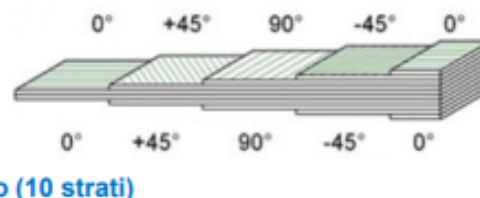


Fig. 2.3 Esempio di codifica di un laminato

2.2.1 L'ARCHITETTURA LINEARE

Si parla di architettura lineare quando tutte le fibre su una singola lamina sono orientate nella stessa direzione.

In base all'orientazione delle diverse lamine si ottengono diversi tipi di laminati come:

- laminati unidirezionali
- laminati angle-ply
- laminati cross-ply

- laminati simmetrici
- laminati quasi-isotropici

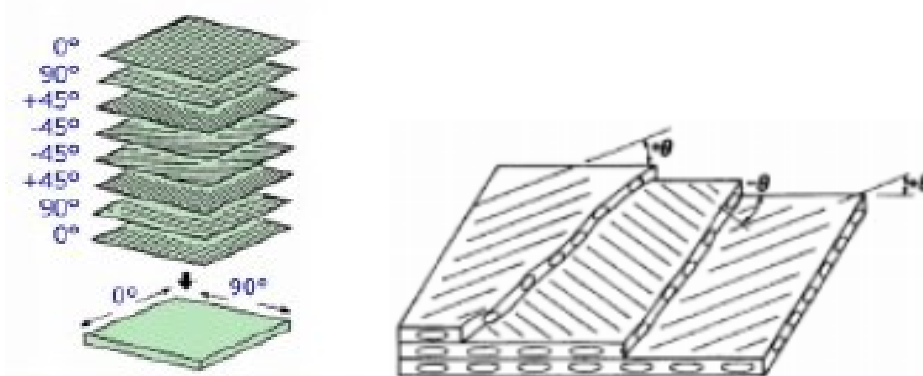


Fig. 2.4 Esempi di architettura lineare

2.2.2 L'ARCHITETTURA BIDIMENSIONALE

Si parla di architettura bidimensionale quando le fibre sulla singola lamina sono orientate in più direzioni. In questo caso si parla di tessuti, che si distinguono in:

- tessuto (woven fabric)
- tessuto a maglia (knitted fabric)
- tessuto intrecciato (braided fabric)

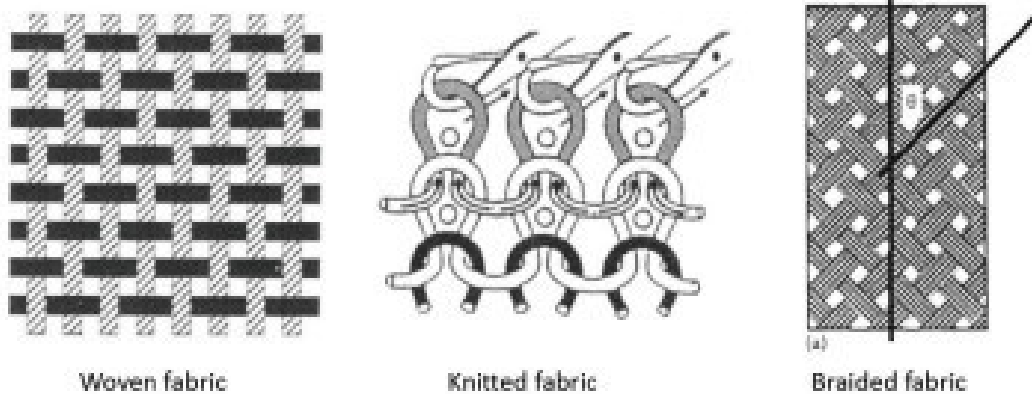


Fig. 2.5 Tessuti

Con l'architettura dimensionale si riescono ad ottenere sul singolo strato proprietà meccaniche confrontabili su ogni direzione. In questo modo si supera il limite dell'architettura lineare nella quale per avere le stesse proprietà nel complesso era necessario sovrapporre più strati.

I tessuti più utilizzati sono quelli biassiali (woven fabric). Questi sono ottenuti intrecciando le fibre in modo ortogonale. Si possono distinguere due diverse direzioni:

- ordito: direzione parallela alla lunghezza del tessuto
- trama: direzione perpendicolare alla lunghezza del tessuto a formare la larghezza del tessuto

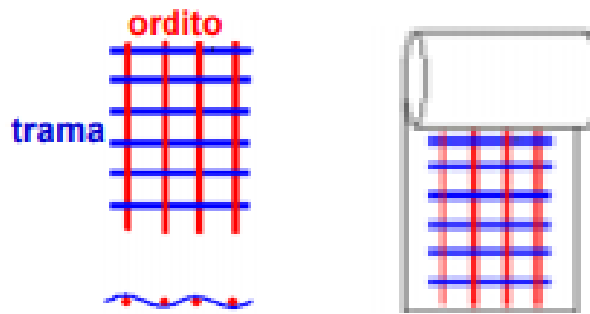


Fig. 2.6 Direzioni fondamentali nei tessuti biassiali

Esistono vari tipi di tessitura. Quelli più utilizzati sono:

- plain weave (armatura): realizzato facendo passare ciascun filo di trama alternativamente sopra e sotto i fili di ordito
- twill weave (saia): realizzato facendo passare ciascun filo di trama alternativamente sopra e sotto due o più fili di ordito
- n-Satin weave (raso): simile al twill, ma con intrecci più distanziati (con n numero di fili tra le intersezioni pari a 4, 5 o 8)
- basket weave (panama): simile al plain weave, ma con gruppi di due o più fili di trama e ordito che si intrecciano alternativamente

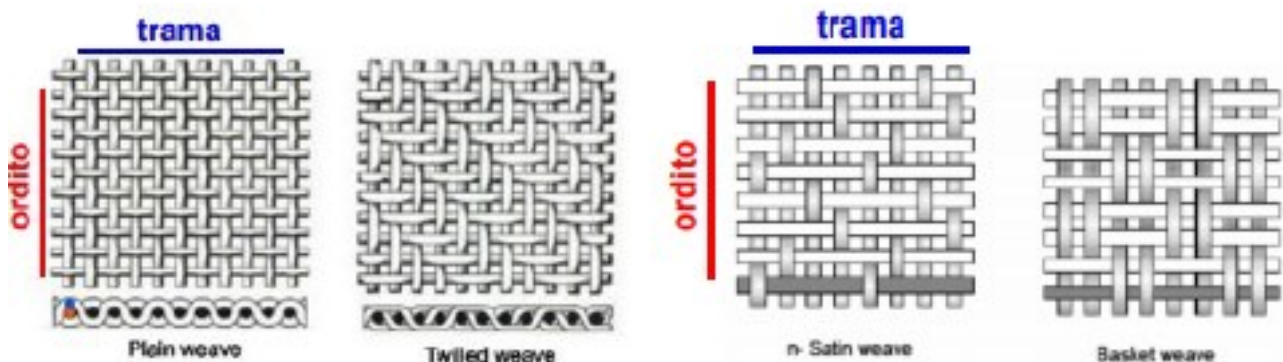


Fig. 2.7 Tipologie di tessitura

Il tipo di tessitura influenza diverse proprietà come:

- drappabilità: capacità del tessuto di adattarsi alla superficie dello stampo, specialmente agli angoli. Il tessuto meno drappabile è il plain wave, mentre il più drappabile è l'8 satin wave. Si evidenzia che più la forma da ottenere è complessa più è necessaria elevata drappabilità
- stabilità: legata allo spostamento della fibra nel piano del tessuto durante il flusso della resina o il drappeggio. Il tessuto più stabile è il plain wave, mentre il meno stabile è l'8 satin wave
- porosità: dipende dalla quantità e grandezza degli spazi tra i fasci e influenza la permeabilità del tessuto. Il tessuto meno permeabile è il plain wave mentre quello più permeabile è l'8 satin wave
- disallineamento (crimp): ondulazione fuori dal piano delle fibre (sempre presente nei tessuti) e influenza negativamente la resistenza delle fibre. Ovviamente l'8 satin wave è il tessuto più resistente perché è meno soggetto al fenomeno del crimp

Tra i tessuti bidimensionali si possono trovare i tessuti non crimpati, non – crimp fabrics (NCFs). Essi sono costituiti da diversi strati di fibre rettilinee legati tra loro con dei punti di cucitura detti stich. Solitamente il filo per la cucitura è costituito da fibre polimeriche (poliestere, nylon e polietilene).

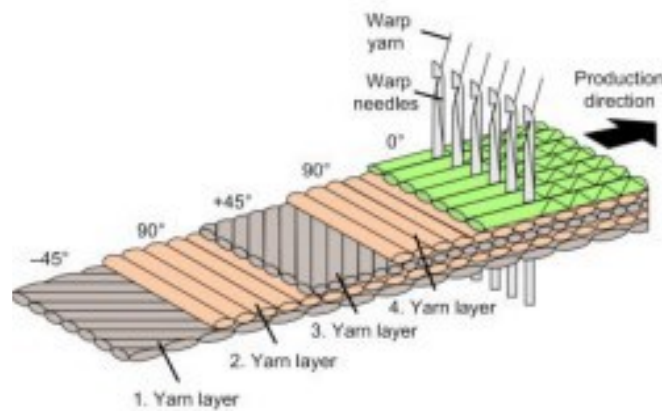


Fig. 2.8 Non – crimp fabrics

2.2.3 L'ARCHITETTURA TRIDIMENSIONALE

Le architetture tridimensionali sono realizzate mediante tessitura o cucitura nella direzione dello spessore di un tessuto.

Un composito con architettura 3D presenta buone proprietà anche nella direzione ortogonale al piano. Inoltre l'architettura 3D comporta anche un aumento della resistenza alla delaminazione (staccamento di una lamina rispetto all'altra), all'impatto e alla fatica. Di contro, i valori di rigidità/resistenza sono tendenzialmente più bassi rispetto a quelli di una architettura 2D.

2.2.4 L'ARCHITETTURA RANDOM

Le architetture random sono realizzate disponendo in maniera casuale le fibre su di una lamina. In questo modo si riescono ad ottenere tessuti isotropi nel piano. Tali tipologie di tessuti prendono il nome di tessuto non tessuto o MAT. Nello specifico esistono due tipologie di MAT:

- CSM (chopped strand mat): con fibre tagliate
- CFM (continuos filament mat): con fibre continue

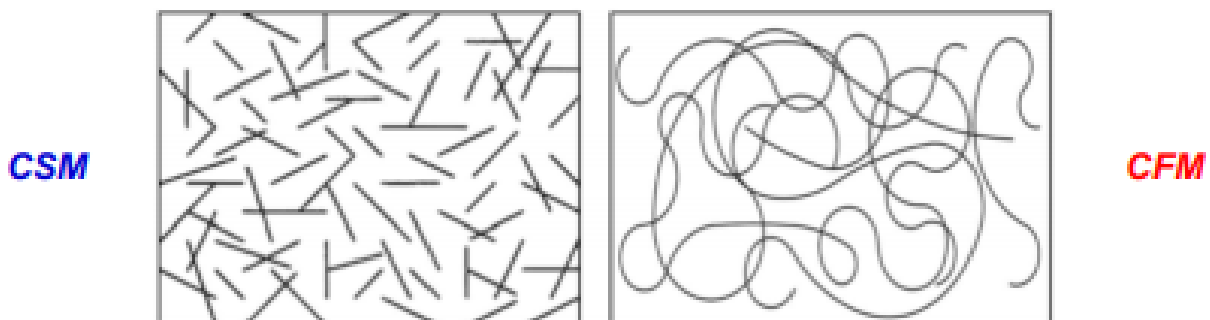


Fig. 2.9 Tessuti MAT

2.3 I PREPREGS

I preimpregnati sono ottenuti impregnando il rinforzo con la quantità desiderata di matrice. La matrice può essere in resina termoplastica o termoindurente mentre il rinforzo è costituito da fibre unidirezionali, nastri o tessuti.

I prepregs sono sempre più utilizzati perché con essi si riesce a velocizzare il processo produttivo di manufatti in composito e soprattutto si riesce ad avere un controllo assai più preciso di diversi parametri di processo. Utilizzando i preimpregnati si è in grado di garantire la costanza del rapporto fibre/matrice indispensabile per la ripetibilità delle caratteristiche del materiale, si ha un processo più pulito e si ottengono manufatti con proprietà meccaniche più elevate. Si fa notare che i preimpregnati possiedono un costo maggiore rispetto al costo che si dovrebbe sostenere nel caso in cui si acquistassero matrice e rinforzi separatamente. Nonostante questo il costo del prodotto finito risulta essere comunque più basso dato che con i prepregs si riesce ad aumentare in maniera significativa la produttività dei processi produttivi.

I preimpregnati a matrice termoindurenti sono i preimpregnati più diffusi dato che, essendo la resina liquida a temperatura ambiente, con essi risulta più semplice il processo di formatura.

Di seguito si parlerà dei processi produttivi che sono utilizzati per la produzione di prepregs a matrice termoindurente.

La matrice è generalmente costituita da resina termoindurente parzialmente indurita per facilitarne la manipolazione. Con resina parzialmente indurita (reticolata) si intende una resina in cui è iniziato il processo di cura ma che non è ancora arrivata alla fase di gelificazione. Ciò è dovuto al fatto che la resina deve possedere una certa appiccicosità (tack level).

L'impregnazione con resina termoindurente è realizzata tramite processo:

- in soluzione
- a caldo (hot melt)

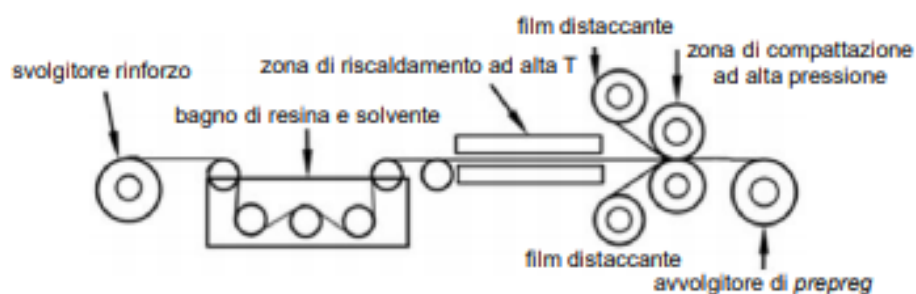


Fig. 2.10 Schema dell'impianto di produzione in soluzione di prepregs a matrice termoindurente

I prepreg sono disponibili con:

- con V_f (frazione volume fibre) variabili
- con fibre in formato sia unidirezionale che di tessuto
- in differenti tipologie di fibra (carbonio, vetro, ecc)
- con diversi tipi di resina (epossidica, fenolica, ecc)

I rotoli di preimpregnato con resina termoindurente sono conservati in celle frigorifere, a temperature comprese tra -15 e -20°C, per inibire la polimerizzazione. Il raggiungimento della Tamb può essere raggiunto solo dopo il prelievo dalla cella frigo.

Il completamento della stratificazione delle lamine deve avvenire entro 16÷72 ore per evitare l'inizio della polimerizzazione. Il materiale non utilizzato entro tale periodo è rimesso nella cella tenendo conto nelle successive applicazioni del tempo di permanenza a Tamb.

III CAPITOLO – LE PROPRIETA' MECCANICHE DEI MATERIALI COMPOSITI

La meccanica dei materiali compositi è molto complessa rispetto a quella dei materiali tradizionali dato che i primi sono costituiti da più fasi differenti.

Per studiare la meccanica dei materiali compositi si possono prendere in considerazione la micro-meccanica e la macro-meccanica.

La micro-meccanica studia l'interazione tra la matrice e i rinforzi a fibra lunga di una lamina unidirezionale. Questa scienza permette di determinare le proprietà meccaniche della lamina una volta note le proprietà meccaniche dei singoli materiali che la costituiscono.

La macro-meccanica invece considera la lamina come un materiale omogeneo e tramite prove meccaniche permette di determinare le leggi costitutive del materiale.

3.1 LA MICRO-MECCANICA DEI COMPOSITI

La micro-meccanica prevede la definizione di un sistema di riferimento sulla lamina per andare a determinare le diverse proprietà. Nello specifico si definiscono tre assi:

- 1: asse parallelo alle fibre (longitudinale)
- 2: asse perpendicolare alle fibre (trasversale)
- 3: asse dello spessore

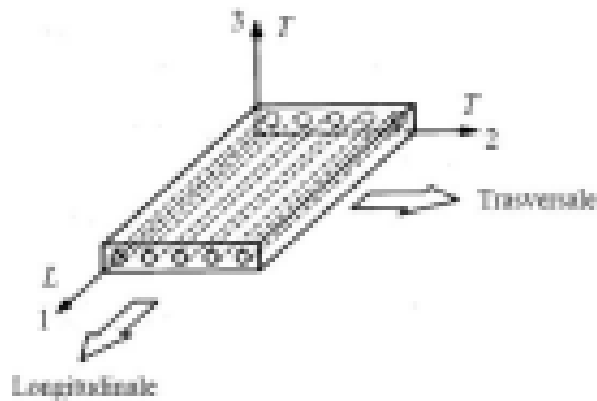


Fig. 3.1 Assi di riferimento su una lamina unidirezionale di materiale composito

Note le proprietà meccaniche della matrice e dei rinforzi, la micro-meccanica permette di definire in maniera approssimativa:

- modulo di elasticità longitudinale
- resistenza a trazione longitudinale
- modulo di elasticità trasversale
- resistenza a trazione trasversale
- ecc

3.1.1 IL MODULO DI ELASTICITA' LONGITUDINALE

Modulo di elasticità longitudinale (E_{11}) rappresenta il modulo valutato nella direzione 1 con forza (P) applicata lungo tale direzione.

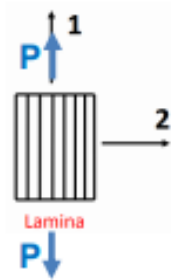


Fig. 3.2 Schema di carico per il calcolo del modulo di elasticità longitudinale

Prima di procedere con il calcolo si introducono di seguito delle ipotesi che devono essere necessariamente rispettate:

- matrice e rinforzo possiedono comportamento linearmente elastico (nella realtà il rinforzo ha un comportamento lineare fino a rottura mentre la matrice dopo un certo valore perde la linearità ma ciò può essere trascurato)
- fibre caratterizzate da stesso valore di E
- fibre caratterizzate da cilindricità, parallelismo e continuità
- perfetta adesione all'interfaccia tra fibre e matrice

Dall'ultima ipotesi si ha che:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_1$$

Ipotizzando il comportamento Hookeriano di fibre, matrice e composito si ha:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m} \quad \varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1}$$

Considerando che fibre e matrice hanno la stessa deformazione per l'ipotesi di perfetta adesione si ottiene:

$$\frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_f}{E_f}$$

La forza totale esterna applicata alla lamina si distribuisce sulle fibre e sulla matrice quindi vale:

$$P = P_m + P_f$$

Essendo la lamina sottoposta a trazione si ha per la relazione precedente:

$$\sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

con A : area sezione trasversale del composito

Sostituendo le tensioni si ottiene:

$$\varepsilon_1 E_{11} A = \varepsilon_f E_f A_f + \varepsilon_m E_m A_m$$

Dato che le deformazioni sono le stesse per l'ipotesi di perfetta aderenza si semplificano le ϵ , quindi:

$$E_{11}A = E_f A_f + E_m A_m$$

Dividendo per A e esprimendo le frazioni in volume di fibre e matrice in funzione delle aree (è possibile dato che si è fatta l'ipotesi di continuità ovvero la matrice e le fibre hanno stessa lunghezza), si ottiene:

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad V_m = \frac{A_m}{A}$$

con

$$V_f + V_m = 1$$

Da cui si ottiene:

$$E_{11} = E_f V_f + E_m V_m$$

Quindi si è ottenuta la formula per determinare il modulo di elasticità longitudinale tramite la cosiddetta formula della miscela.

3.1.2 LA RESISTENZA A TRAZIONE LONGITUDINALE

La resistenza a trazione longitudinale (σ_1) rappresenta la resistenza nella direzione 1 con forza di trazione (P) applicata nella stessa direzione.

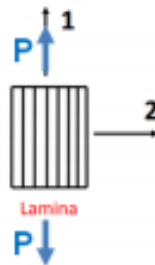


Fig. 3.3 Schema di carico per il calcolo della resistenza a trazione longitudinale

Per il calcolo della σ_1 si deve assumere, oltre alle ipotesi già fatte in precedenza, la condizione che le fibre sono tutte caratterizzate dalla stessa resistenza.

Quindi la forza totale applicata alla lamina vale:

$$P = P_m + P_f$$

Da cui si ottiene:

$$\sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$$

Dividendo per A e ricordando le frazioni in volume si ottiene (regola della miscela):

$$\sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

La tensione media sulla lamina è pari alla media delle tensioni su fibra e matrice, pesate secondo le rispettive frazioni in volume.

In realtà la relazione precedente e, in generale la regola della miscela, è valida fino al punto di prima rottura del composito (si parla di prima e seconda rottura perché il composito è costituito da due fasi differenti che in generale si rompono in istanti differenti. Nello specifico essendo le fibre meno duttili si rompono prima).

Si vuole determinare il punto di prima rottura.

Si ipotizza che la prima rottura si ottiene al raggiungimento dell'allungamento massimo di una delle due fasi. In questo istante avviene il cedimento della fase e di conseguenza il carico viene riversato tutto sull'altra fase. Ciò comporta l'aumento della sollecitazione agente sulla fase ancora integra. A questo punto si possono verificare due situazioni:

- se $\sigma >$ della tensione a rottura della fase integra \rightarrow cedimento istantaneo del composito
- in caso contrario, la fase integra continua a sostenere il carico fino al cedimento

I valori tipici dell'allungamento a rottura sono:

- fibre: 0.6% (boro) ÷ 3.5% (vetro)
- matrici: > 4% (resine poliestere ed epossidiche)

Per l'ipotesi fatta in precedenza si ha:

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m$$

Quindi è facile capire che la prima rottura della lamina è dovuta al cedimento delle fibre e si ha per valori di deformazione pari ha:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{rf} = \frac{\sigma_{rf}}{E_f}$$

dove: • ε_{rf} : allungamento a rottura delle fibre

- σ_{rf} : tensione a rottura delle fibre

Quindi la tensione di prima rottura della lamina vale:

$$\sigma_{1r}^* = \sigma_{rf}V_f + \sigma_m^*V_m$$

dove σ_m^* è la tensione agente sulla matrice al momento della rottura delle fibre.

Nel caso di comportamento elastico – lineare di fibre e matrice, almeno fino a che $\varepsilon_1 = \varepsilon_{rf}$ (la matrice ha comportamento lineare fino alla deformazione a rottura delle fibre), la tensione di prima rottura della lamina sarà:

$$\sigma_{1r}^* = \varepsilon_{rf}(E_fV_f + E_mV_m) = \varepsilon_{rf}E_{11}$$

Per il calcolo della resistenza a compressione longitudinale non può essere utilizzata la regola della miscela perché non è nota la resistenza a compressione delle fibre (risulta difficile eseguire prove sperimentali a causa della geometria intrinseca delle fibre, troppo sottili).

Si può affermare che una lamina unidirezionale sottoposta a compressione nella direzione longitudinale può manifestare 3 tipi di rottura: • per cedimento a compressione delle fibre

- per instabilità delle fibre
- per rottura del composito in direzione trasversale

Nella pratica il cedimento a compressione non si verifica frequentemente a differenza degli altri due fenomeni di rottura, ciò è dovuto al fatto che la matrice ha proprietà meccaniche di molto inferiori a quelle delle fibre. Di conseguenza deformandosi può innescare l'instabilità delle fibre ma anche la nascita di tensioni in direzione trasversale che portano alla rottura del composito, dato che in quella direzione i rinforzi fibrosi non danno nessun contributo di resistenza.

3.1.3 IL MODULO DI ELASTICITA' TRASVERSALE

Il modulo di elasticità trasversale (E_{22}) è il modulo valutato lungo la direzione 2 con forza di trazione applicata nella stessa direzione.

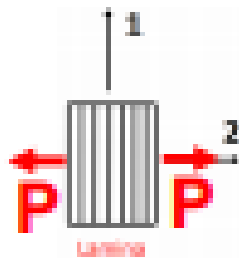


Fig. 3.4 Schema di carico per il calcolo del modulo di elasticità trasversale

Si ipotizza che lo sforzo in direzione 2 sul composito è uguale sia allo sforzo sulle fibre che allo sforzo sulla matrice, quindi vale:

$$\sigma_f = \sigma_m = \sigma_2$$

L'allungamento del composito nella direzione degli sforzi è pari alla somma degli allungamenti di fibre e matrice, ovvero:

$$\Delta l_c = \Delta l_f + \Delta l_m$$

Dato che:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Si ottiene:

$$l_c \varepsilon_c = l_f \varepsilon_f + l_m \varepsilon_m$$

Ipotizzando che l'area perpendicolare allo sforzo non cambi (piccoli spostamenti) dopo che questo sia stato applicato ed assumendo unitaria la lunghezza del composito, si ha:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m$$

Applicando la legge di Hooke si ottiene:

$$\frac{\sigma_2}{E_{22}} = \frac{\sigma_f}{E_f} V_f + \frac{\sigma_m}{E_m} V_m$$

Per la prima ipotesi si ottiene:

$$\frac{1}{E_{22}} = \frac{1}{E_f} V_f + \frac{1}{E_m} V_m$$

Da cui si ottiene:

$$E_{22} = \frac{E_f E_m}{V_f E_m + V_m E_f}$$

3.1.4 LA RESISTENZA A TRAZIONE TRASVERSALE

La resistenza a trazione trasversale (σ_2) rappresenta la resistenza nella direzione 2 con forza di trazione applicata nella stessa direzione.

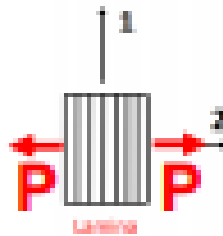


Fig. 3.5 Schema di carico per il calcolo della resistenza a trazione trasversale

Il calcolo di σ_2 è estremamente complesso a causa di diversi motivi come:

- la presenza di concentrazioni di tensione all'interfaccia fibra – matrice
- la presenza di microvuoti
- la presenza di interfacce lungo le quali si può sviluppare la frattura
- la presenza di difetti dovuti al processo produttivo
- la presenza di concentrazioni di tensione
- il comportamento anisotropo delle fibre la cui resistenza in direzione 2 è minore di quella in direzione 1

Per quanto detto, nella pratica, la resistenza a rottura di una lastra unidirezionale sottoposta a trazione nella direzione trasversale è calcolata in funzione di quella della matrice come segue:

$$\sigma_{2r} = \frac{\sigma_{mr}}{k}$$

con $k (>1)$: fattore correttivo che considera le problematiche descritte (la resistenza del composito è minore rispetto a quella della matrice per le considerazioni precedenti).

In generale il valore di k cresce con:

- V_f (comporta un disallineamento delle fibre quindi concatenazione di stati tensionali)
- % di vuoti presenti nel composito

- accuratezza del processo di fabbricazione della parte
- indebolimento del legame d'interfaccia fibra-matrice

Il calcolo della resistenza a compressione in direzione trasversale risulta essere ancor più complesso per gli stessi motivi illustrati nel calcolo della resistenza a compressione in direzione longitudinale.

3.2 LA MACRO-MECCANICA DEI COMPOSITI

La macro-meccanica permette di ricavare l'equazione costitutiva in una direzione arbitraria e quindi le costanti ingegneristiche partendo dalle costanti elastiche della lamina. Con tali informazioni si riescono a ricavare le leggi costitutive del materiale.

IV CAPITOLO – I PROCESSI DI FORMATURA DEI MATERIALI COMPOSITI

I processi di formatura sono tutti quei processi che permettono di ottenere la forma desiderata del manufatto. Per quanto riguarda i materiali compositi esistono due macro categorie di processi di formatura, i processi di lay-up e i processi di spray-up.

I processi di lay – up sono tutti quei processi che prevedono la sovrapposizione di più lamine su di uno stampo mentre i processi di spray – up sono caratterizzati dall'uso di una pistola che spruzza contemporaneamente sullo stampo resina e rinforzo discontinuo.

Generalmente i processi di lay – up sono quelli più comuni e permettono di ottenere manufatti con proprietà meccaniche maggiori dato che in essi si utilizzano fibre lunghe a differenza dei processi di spray – up.

4.1 I PROCESSI DI LAY – UP

Come già detto i processi di lay – up in generale sono basati sulla deposizione di diverse lamine su di uno stampo fino ad ottenere le proprietà geometriche e strutturali richieste.

I processi di lay – up possono essere suddivisi in:

- tecnologie a stampo aperto - Laminazione manuale
 - Formatura in sacco (in forno e in autoclave)
 - Filament Winding (FM)
 - Automated Tape Laying (ATL)
 - Automated Fiber Placement (AFP)
- tecnologie a stampo chiuso - Resin Transfer Moulding (RTM)
 - Resin Infusion Under Flexible Tool (RIFT)
 - Pultrusione

4.1.1 LA LAMINAZIONE MANUALE

La laminazione manuale è il processo più semplice e economico che si può utilizzare per ottenere un manufatto in composito.

Questa tecnologia prevede la deposizione del rinforzo secco su uno stampo femmina dove, successivamente, si versa la resina miscelata con l'indurente che poi verrà compattata con un rullo, con lo scopo di favorire la corretta impregnazione del rinforzo.

E' evidente che la compattazione con solamente l'uso del rullo non è ottimale, quindi per aumentare la qualità del manufatto si è pensato di introdurre lo stampo in un sacco e creare all'interno il vuoto.

In questa maniera si riesce ad eliminare quasi completamente le porosità e quindi ad ottenere un prodotto con elevate proprietà meccaniche.



Fig. 4.1 Schema di processo di laminazione manuale

4.1.2 LA FORMATURA IN SACCO

Il processo appena visto possiede delle problematiche, di cui la più significativa è la bassa ripetibilità. Risulta infatti molto difficile ottenere manufatti simili dato che è complesso il controllo della resina depositata sullo stampo. Per eliminare tale problema attualmente si utilizzano i preimpregnati. Quindi invece di depositare il rinforzo secco sullo stampo e successivamente versare la resina, si deposita direttamente il foglio di prepregs sullo stampo. Ovviamente se ne posizionano tanti fogli quanti sono necessari per ottenere lo spessore desiderato.

A questo punto lo stampo femmina con i vari fogli di prepregs è chiuso in un sacco dove si crea il vuoto. Tale tecnologia è detta processo di formatura in sacco.

Si riporta un'immagine in cui si possono notare tutti i vari strati che compongono il sacco.

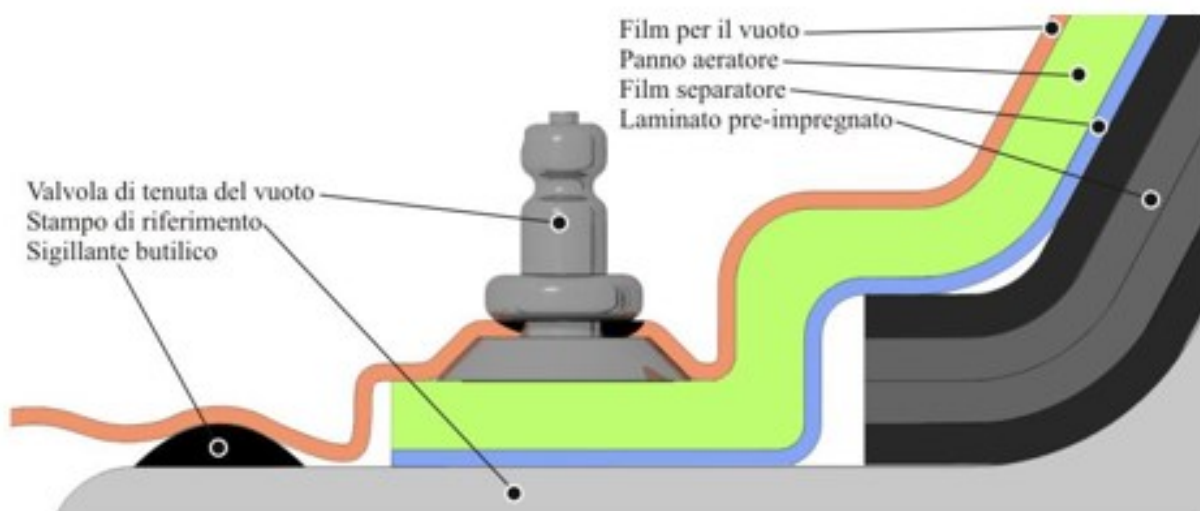


Fig. 4.2 Strati che compongono il sacco

Ovviamente è necessario far avvenire la polimerizzazione della resina. Per farlo si possono utilizzare due modalità:

- polimerizzazione in forno
- polimerizzazione in autoclave

Nella polimerizzazione in autoclave, oltre ad innalzare la temperatura del manufatto per innescare la cura della resina polimerica termoindurente, si applica una pressione positiva, che sommandosi a quella negativa ottenuta dalla creazione del vuoto nel sacco, permette l'evacuazione di bolle d'aria o altre sostanze volatili che erano intrappolate tra i vari strati di prepregs e la compattazione ottimale del manufatto sullo stampo femmina. Pertanto, con il processo di formatura in sacco con polimerizzazione in autoclave si riescono ad ottenere manufatti in composito con elevate proprietà meccaniche e buone finiture superficiali.

4.1.3 IL FILAMENT WINDING

Il processo di Filament Winding permette la realizzazione di parti come tubazioni e serbatoi. Le principali fasi del processo sono:

- impregnazione delle fibre mediante passaggio in un bagno di resina
- avvolgimento delle fibre impregnate intorno a uno stampo rotante (mandrino)

I processi di Filament Winding sono classificati in base alla modalità di impregnazione del rinforzo in wet-FW e dry-FW e in base al metodo di avvolgimento delle fibre che può essere polare o elicoidale.

Modalità di impregnazione

Nel wet-FW, le fibre, usualmente in formato di roving, sono impregnate direttamente sulla macchina con la giusta quantità di resina, prima del loro avvolgimento. L'impregnazione è infatti effettuata facendo passare le fibre in:

- un bagno di resina
- una serie di rulli per eliminare l'eccesso di resina
- un pettine per evitare la loro sovrapposizione

Nel dry-FW si utilizzano i preimpregnati, di conseguenza si ha un maggior controllo del processo, dato che non si hanno problemi legati all'impregnazione delle fibre, tuttavia è un processo più costoso dato che i prepregs, essendo semilavorati, sono più cari.

Metodo di avvolgimento delle fibre

Come già detto, in base all'angolo di avvolgimento delle fibre si possono distinguere due tipologie di Filamente Winding.

Si definisce l'angolo di avvolgimento (α) come l'angolo compreso tra la direzione dei filamenti e la tangente al meridiano del mandrino.

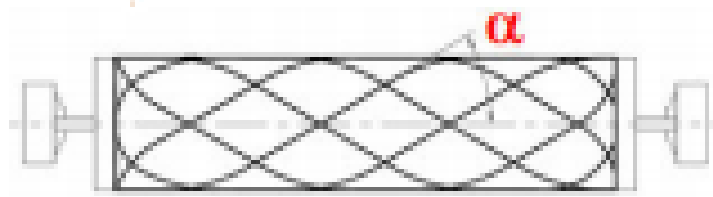


Fig. 4.3 Schematizzazione del processo di Filament Winding e di misurazione dell'angolo di avvolgimento

Se $20^\circ < \alpha < 85^\circ$ si parla di avvolgimento elicoidale mentre se $0^\circ < \alpha < 20^\circ$ di avvolgimento polare.

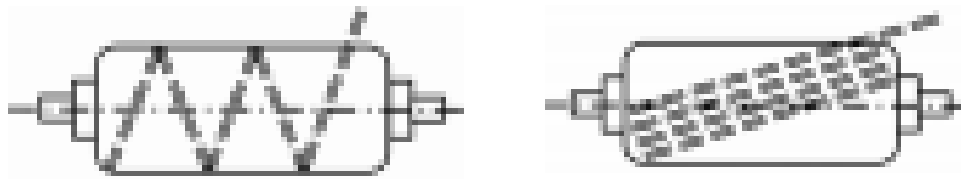


Fig. 4.4 Esempio di avvolgimento elicoidale a sinistra e polare a destra

In base alla forma del manufatto che si vuole realizzare si userà un avvolgimento polare o elicoidale. Per avvolgere le fibre con l'angolo desiderato si devono controllare in maniera ottimale due parametri di processo fondamentali che sono:

- la velocità di avanzamento del carro mobile
- la velocità di rotazione (avvolgimento) del mandrino



Fig. 4.5 Macchina per Filament Winding

Attualmente si sta sviluppando il Filament Winding Robotizzato. Utilizzando un robot antropomorfo si riescono ad ottenere più gradi di libertà rispetto al FW standard (2 gdl, macchina simile al tornio) e di conseguenza manufatti con geometria più complessa.

Si possono adottare due soluzioni:

- mandrino posto in rotazione da una macchina simile al tornio - testa di deposizione manipolata dal robot
- testa di deposizione in posizione fissa - mandrino manipolato e messo in rotazione dal robot



Fig. 4.6 Esempi di applicazioni di Filament Winding Robotizzato

4.1.4 L'AUTOMATED TAPE LAYING E L'AUTOMATED FIBER PLACEMENT

I processi automatizzati di Fiber Placement consistono nella deposizione di nastri stretti o singoli tow preimpregnati in specifiche direzioni grazie a particolari macchine altamente automatizzate.

La possibilità di posizionare le fibre unidirezionali in specifiche posizioni permette di ottenere manufatti di ottima qualità, infatti si riescono ad ottenere elevate proprietà meccaniche nelle direzioni richieste, con basso consumo di materiale e quindi di peso.

Ovviamente il posizionamento di tow o nastri stretti lungo diverse orientazioni è più lento e complesso della deposizione di lamine con orientazione costante, inoltre le macchine che vengono utilizzate in questi processi sono molto complesse e costose. Di conseguenza si deve trovare un compromesso tra i benefici che si ottengono nella parte da realizzare e l'aumento di costo e di tempo.

I vantaggi dei processi automatizzati di Fiber Placement sono:

- riduzione dei costi di manodopera
- miglioramenti in termini di velocità (rispetto alla deposizione manuale di singoli nastri) ed efficienza
- controllo più rigoroso del processo e delle tolleranze delle parti

Gli svantaggi principali sono:

- elevati costi di investimento
- maggiore complessità di funzionamento delle macchine

I principali processi di Fiber Placement automatizzati sono: • Automated Tape Laying (ATL)

- Automated Fiber Placement (AFP)

L'Automated Tape Laying (ATL) è una tecnica che si è sviluppata negli anni '70 per la deposizione di nastri unidirezionali preimpregnati con piccola curvatura su uno stampo, usando una testa di deposizione movimentata da una macchina a controllo numerico computerizzato.

In pratica, corrisponde ad una replica della deposizione manuale, ma con velocità più elevate, su parti più grandi, con riduzione degli sprechi e con maggiore controllo del processo.



Fig. 4.7 Esempio di ATL

Il limite più significativo di tale tecnica è l'impossibilità di realizzare parti con curvature elevate senza formazione di grinze.

Per questa ragione si è sviluppata un'altra tecnica, l'Automated Fiber Placement (AFP). Tali sistemi sono in grado di deporre simultaneamente un numero elevato di tape con larghezza anche di gran lunga inferiore rispetto a quella dei sistemi ATL. Ciò permette di depositare nastri seguendo traiettorie curvilinee senza la formazione di grinze e quindi di ottenere manufatti con geometria più complessa.

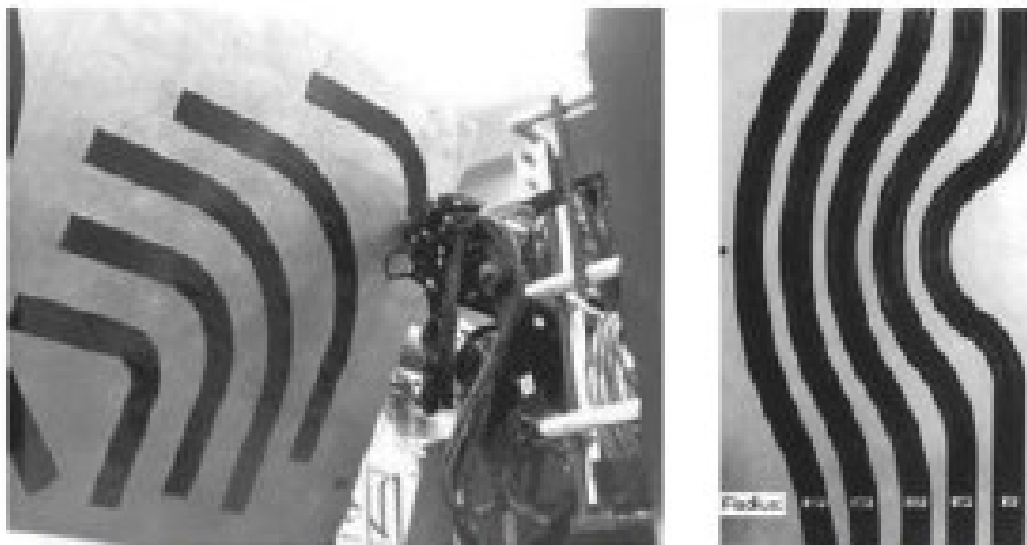


Fig. 4.8 Esempio delle curvature che possono essere raggiunte con la tecnica AFP

I sistemi AFP attualmente disponibili in commercio sono in grado di depositare simultaneamente:

- fino a 32 nastri
- con velocità fino a 1 m/s
- con accelerazioni fino a 2 m/s²



Fig. 4.9 Esempio di AFP

4.1.5 IL RESIN TRANSFER MOULDING

Il processo di Resin Transfer Moulding permette di fabbricare manufatti in composito a matrice polimerica iniettando sotto pressione la resina entro una cavità (ottenuta chiudendo stampo e controstampo), che riproduce la forma del pezzo, al cui interno è stato preliminarmente posizionato il rinforzo fibroso secco (sottoforma di preforma).

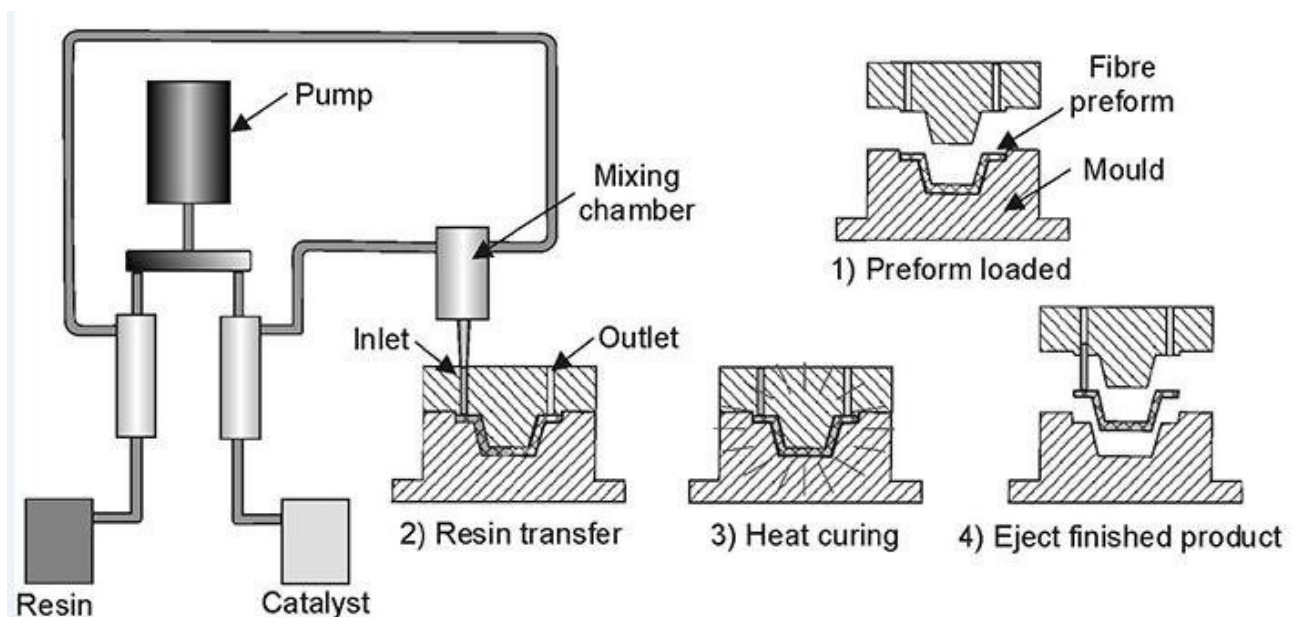
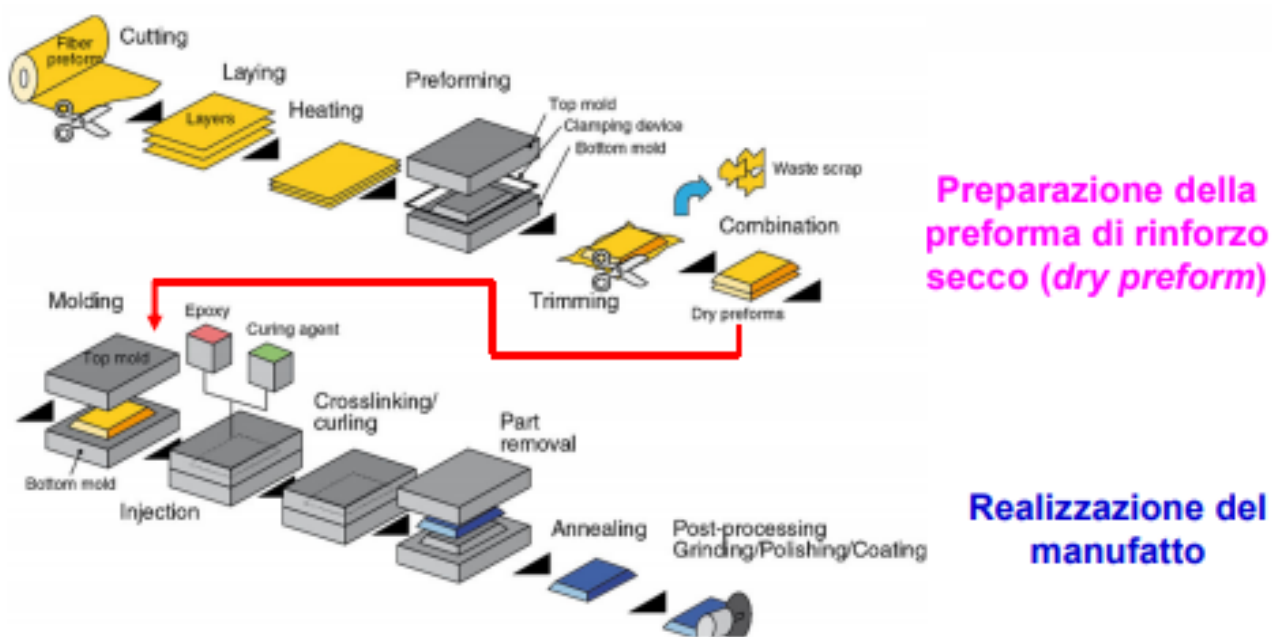


Fig. 4.10 Schema di processo del Resin Transfer Moulding

I vari fogli di fibra secca, una volta che sono stati tagliati a dovere, vengono sovrapposti e cuciti tra loro utilizzando resine termoplastiche che fungono da legante. Una volta fatto ciò si procede alla formatura della preforma di fibra attraverso degli stampi che sono diversi da quelli entro i quali si inietta la resina (di materiale diverso e di forma più semplice).

Ottenuta la preforma la si posiziona sul semi-stampo fisso, si chiude il semi-stampo mobile e si iniettano la resina e l'indurente. Si attende che la cura avvenga per poi aprire lo stampo e estrarre il composito.

In definitiva tali processi sono adatti quando i volumi di produzione sono elevati (50'000 parti) dato che si prestano ben all'automazione. Di contro essi non permettono di ottenere qualità elevate come nei processi in autoclave.



4.11 Fasi del processo di Resin Transfer Moulding

I parametri che devono essere controllati per l'ottenimento di manufatti di buona qualità sono il tempo e la pressione di iniezione. Questi dipendono da parametri come:

- sistema d'iniezione
- viscosità della resina
- caratteristiche del rinforzo
- percorso che la resina deve seguire all'interno della cavità

Esistono diverse tecnologie basate sull'RTM. Tra queste si evidenziano il Vacuum RTM (VA-RTM) e il Compressor RTM (C-RTM).

La formatura per trasferimento di resina sottovuoto (VA-RTM) permette di ottenere manufatti con proprietà geometriche complesse dato che l'iniezione della resina è facilitata grazie al vuoto che si crea nella cavità.

La formatura per trasferimento di resina in compressione (C-RTM) consiste nell'iniettare la resina tra due stampi non completamente chiusi. Una volta conclusa la fase di iniezione si procede alla chiusura completa dei due stampi. La pressione che si genera sulla resina permette di ottenere manufatti di qualità migliore e di ridurre il tempo-ciclo.

4.1.6 IL RESIN INFUSION UNDER FLEXIBLE TOOLING

Il processo di Resin Infusion Under Flexible Tooling consiste nel posizionare un rinforzo secco sul semi-stampo inferiore mentre la funzione del semi-stampo superiore è svolta da un sacco elastomerico. All'interno del sacco si crea il vuoto, in questo modo la depressione richiama la resina che fluisce sullo stampo tramite un sistema di distribuzione precedentemente posizionato.



Fig. 4.12 Esempio di RIFT

4.1.7 LA PULTRUSIONE

Il processo di Pultrusione consiste nel tirare delle fibre secche, prima in un bagno di resina, poi all'interno di una filiera riscaldata che conferisce la sezione trasversale desiderata al manufatto oltre ad innescare la reazione di polimerizzazione della resina termoindurente.

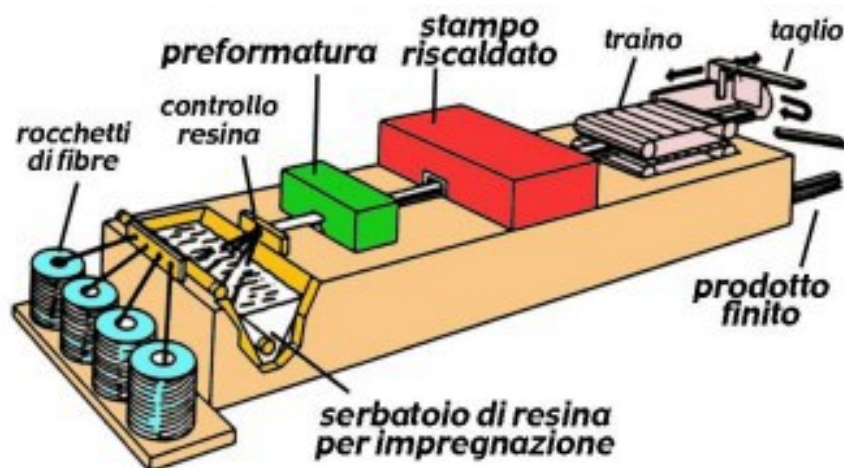


Fig. 4.13 Schema di impianto del processo di Pultrusione

Tale processo permette di ottenere barre, tubi, travi e profilati, con percentuali di rinforzo anche molto elevate, fino al 70%.

La Pultrusione permette di ottenere prodotti con:

- elevate proprietà meccaniche

- resistenza a corrosione
- isolamento elettrico
- basso peso

Il processo di pultrusione inoltre è facilmente automatizzabile (buona ripetibilità, riduzione costi di manodopera). Ciò permette di ottenere:

- buona velocità di produzione (elevata produttività)

- profilati anche molto lunghi
- un'ampia varietà di forme, anche molto complesse



Fig. 4.14 Esempi di sezioni ottenibili con il processo di Pultrusione

4.2 I PROCESSI DI SPRAY – UP

I processi di spray – up sono tecniche che prevedono la deposizione a spruzzo sullo stampo di fibre discontinue (con una pistola) che è realizzata contemporaneamente a quella della resina. Una volta depositato lo strato si procede alla compattazione tramite un rullo. Si esegue nuovamente la stessa operazione fino all'ottenimento dello spessore desiderato.

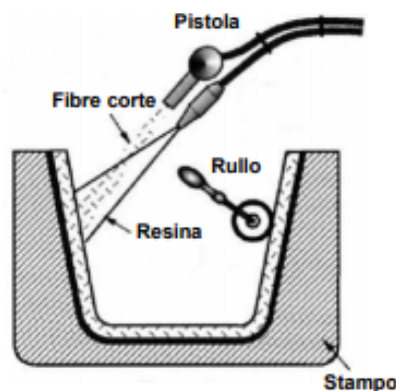


Fig. 4.15 Schema del processo di spray – up

V CAPITOLO – IL PROGETTO LIFE CIRCE



Fig. 5.1 Logo progetto Life-Circe

“Circe is a circular economy project born to develop a new recycling system for industrial scraps deriving from carbon fiber prepregs.”

Il progetto LIFE – CIRCE è un’iniziativa europea che ha l’obiettivo di realizzare una linea di riciclaggio automatizzata di sfridi di prepregs in fibra di carbonio provenienti da processi di taglio delle dime. A questo progetto partecipano 5 aziende italiane, ognuna delle quali svolge un ruolo fondamentale che va dalla progettazione del sistema di riciclaggio all’utilizzo dello stesso per l’ottenimento di nuovi manufatti.

“Five Italian companies come together to give life to a big dream made of ambition and responsibility: to make greener the composite materials industry, and therefore the planet.”

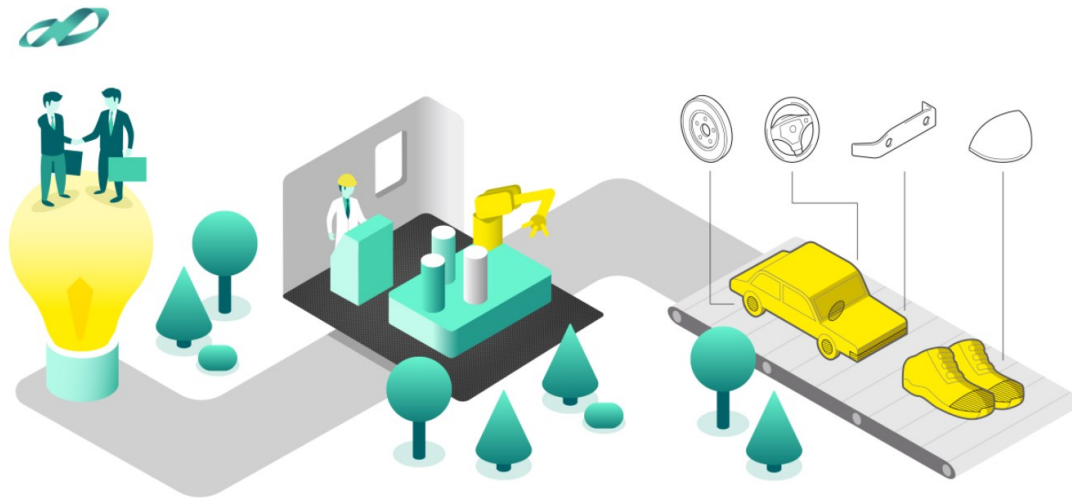


Fig. 5.2 Progetto Life-Circe

Il progetto Circe è finanziato da LIFE, un fondo di finanziamento europeo per il sostenimento di nuove iniziative volte alla tutela dell’ambiente.



Fig. 5.3 Logo Life

The Circe Project in five steps

1 CFRP production

The carbon fiber reinforced polymers are innovative and ultralight materials, increasingly appreciated and applied in the automotive, motorsport, shipbuilding, aerospace, industrial and design sectors.

2 Where the scraps end up

During the production of carbon fibre composites, waste and scraps of industrial material are generated. Wastes that - in the best scenario - end up in landfills or inside incinerators, with important repercussions in terms of pollution. Today, due to the technical complexity required by the recovery process, no effective system for recycling such industrial waste exists.

3 The idea behind the Circe project

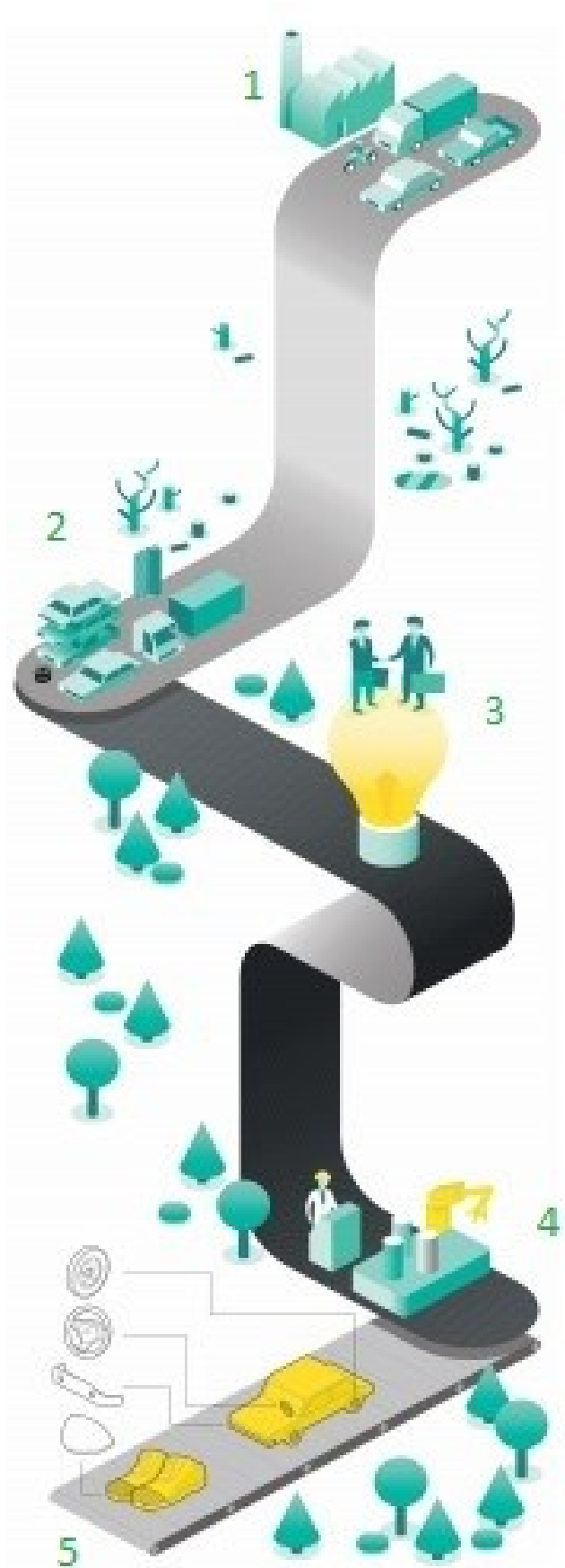
From the imperative need of safeguarding the environment and optimizing the use of natural resources, an ambitious idea is born: Circe. Five Italian companies for a project intending to redesign the industrial recycling chain through innovation.

4 The means to reach the goal

The Circe team will develop two innovative machines that will allow to select, resize and process carbon fiber scraps for their re-use.

5 Reuse to create new products

The re-processed carbon fibre prepreg scraps will be used to produce automotive components, brake discs, toecaps for safety work shoes and other types of applications.



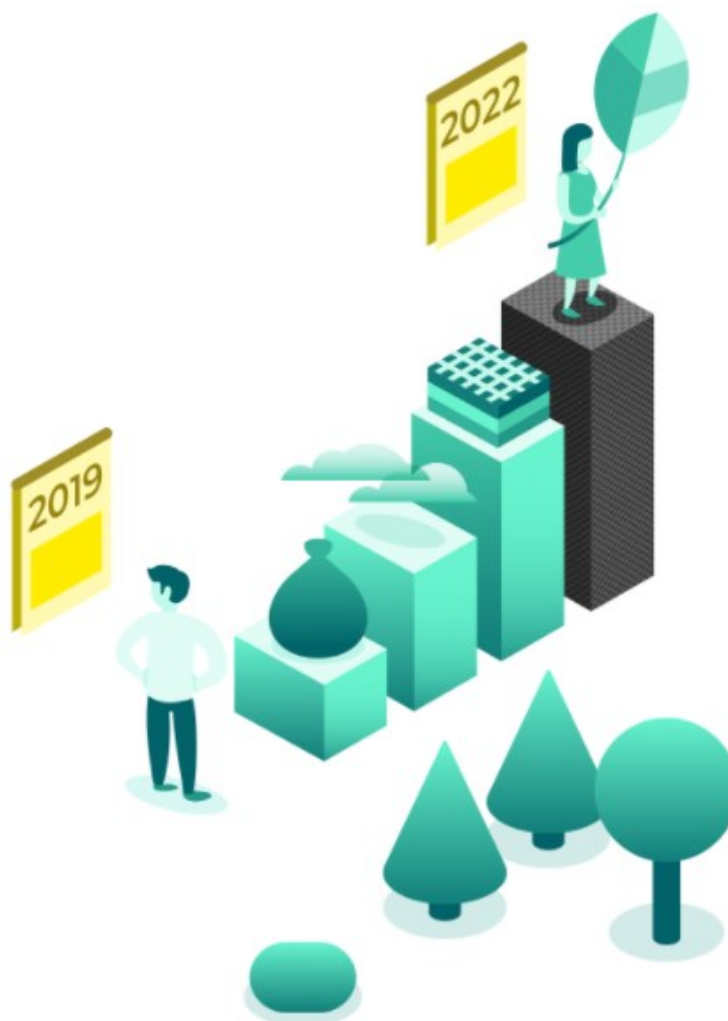
5.1 GLI OBIETTIVI DEL PROGETTO CIRCE

Il progetto Circe si propone di raggiungere obiettivi grandiosi nell'arco di tre anni, dal 1 settembre 2019 al 31 agosto 2022, nell'ambito del programma europeo LIFE (fondo di finanziamento europeo per progetti che hanno come obiettivo la tutela dell'ambiente). Tali obiettivi spaziano dalla riduzione degli impatti ambientali dei rifiuti industriali, all'ottimizzazione dell'uso delle risorse naturali; dallo sviluppo di una mobilità più snella e meno inquinante, alla nascita di un paradigma virtuoso del riciclo dedicato al settore della fibra di carbonio.

Al 31 agosto 2022 si prevede di ridurre di:

- 10 tonnellate all'anno i prepregs in fibra di carbonio inviati in discarica;
- 550 le tonnellate di CO₂ per ogni tonnellata di preimpregnato, con un'enorme riduzione delle emissioni in atmosfera e un notevole risparmio dal punto di vista energetico;

Ciò sarà possibile grazie al recupero di 5.000 tonnellate all'anno di preimpregnato in fibra di carbonio.



5.1.1 I PARTNER DEL PROGETTO CIRCE

HP COMPOSITES

HP Composites è leader mondiale nella produzione di componenti in fibra di carbonio per i settori motorsport e automotive. HP composites sorge in Ascoli Piceno ed è il driver del progetto dato che è un produttore di manufatti in composito e quindi fornisce gli scarti di prepregs in fibra di carbonio. Inoltre è utilizzatore finale del materiale riciclato; nello specifico userà il prodotto finale recuperato per realizzare rinforzi strutturali per componenti estetici in carbon look.



ALCI GROUP

Alci Group è un'azienda che svolge automazione industriale e non solo. Ubicata in Ascoli Piceno, realizza macchine automatiche e linee di produzione personalizzate per diversi settori come: food, chemical cosmetic, pharma & biotech, MPE. Nel progetto CIRCE, Alci segue la progettazione del prototipo pilota della linea di riciclaggio.



PETROCERAMICS SPA

Petroceramics S.p.A. produce componenti in materiale ceramico avanzato oltre a sviluppare soluzioni innovative per i settori dell'automotive, aerospace, difesa, ambiente e progettazione architettonica. Sita a Stezzano, in provincia di Bergamo, il suo ruolo nel progetto è quello di utente finale che, dal materiale recuperato dalla linea di riciclaggio, produce dischi per freni.



BASE PROTECTION SRL

Base Protection S.R.L. realizza dispositivi di protezione individuale (DPI). Nello specifico progetta calzature antinfortunistiche. Con sede a Barletta, per il progetto CIRCE corrisponde al cliente finale che ha l'obiettivo di utilizzare il materiale recuperato per realizzare un puntale per scarpe antinfortunistiche in fibra di carbonio.



CETMA

CETMA è un'Organizzazione di Ricerca e Tecnologia (RTO) sita a Brindisi. Si occupa di sviluppo sperimentale e trasferimento tecnologico di materiali avanzati (compositi, polimeri, bio-based e riciclati), ICT (sviluppo di software specializzato per ingegneria, produzione e servizi). CETMA partecipa al progetto collaborando con BASE PROTECTION fornendo supporto con il suo Advanced Materials and Processes Consulting Department (AMP), il cui principale punto di forza è la disponibilità di competenze integrate nel campo dei compositi.



5.2 I PRODOTTI REALIZZATI CON I PREPREGS RICICLATI

Il materiale proveniente dall'impianto di riciclaggio viene smistato alle diverse aziende utenti finali che successivamente procederanno al suo utilizzo per la produzione di nuovi manufatti.

Con le aziende partecipanti al progetto si sono definite finora almeno quattro modalità di riutilizzo dei prepregs riciclati:

- rinforzi strutturali per componenti estetici in carbon look per il settore dell'automotive (HP composites)
- laminati di diversa geometria con tecniche di stampaggio a pressa (HP composites) (*vedi capitolo 4.1.5*)
- dischi freno ad alte prestazioni in materiale carboceramico (Petroceramics SPA) (*vedi capitolo 4.1.5*)
- puntali per scarpe antinfortunistiche (Base Protection SRL)

5.2.1 I RINFORZI STRUTTURALI IN CARBON LOOK

Gli sfridi di prepregs recuperato possono essere riutilizzati per realizzare rinforzi strutturali per componenti estetici in carbon look.

HP composites svolgerà prove sperimentali dedicate con l'obiettivo di estrapolare dati significativi per mettere a punto un modello virtuale che rispecchi fedelmente il comportamento del materiale nella realtà. Ciò permetterà di definire i parametri di processo ottimali dello stampaggio a compressione per realizzare i suddetti manufatti senza svolgere esperimenti dispendiosi.



Fig. 5.4 Componenti Automotive in Carbon Look

5.2.2 I DISCHI FRENO CARBOCERAMICI

Petroceramics ha l'obiettivo di sostituire parzialmente o se possibile totalmente le fibre di carbonio vergini attualmente utilizzate nei dischi freno con quelle recuperate dalla linea di riciclaggio. Essendo componenti destinati ad auto di lusso, si devono riuscire a mantenere le prestazioni degli stessi elevate pur utilizzando materiali secondari.

La produzione di questi manufatti avviene in tre fasi fondamentali: la modellatura mediante stampaggio a compressione a caldo, la pirolisi e l'infiltrazione di silicio. Nella prima fase, fibre di

carbonio vergini, prepregs riciclati e resina fenolica in polvere, vengono miscelati insieme e stampati a caldo ad una temperatura di 140 – 160 °C. A questo punto si procede con la seconda fase che prevede la pirolisi, in atmosfera inerte, ad una temperatura di 700 – 900 °C. Durante questa fase, la resina si trasforma in carbone attivo, formando così una preforma porosa. Infine per ridurre la porosità e conferire proprietà meccaniche elevate al manufatto si procede con l'infiltrazione del silicio liquido (LSI) nella preforma. Si ottiene quindi un manufatto densificato composto dal punto di vista chimico da carbonio, silicio e carburo di silicio.

Durante il progetto verranno svolte diverse prove sperimentali col fine di determinare i parametri di processo ottimali per ottenere manufatti di ottime qualità. I parametri di processi più significativi che saranno studiati sono: percentuali dei componenti della miscela, temperatura e pressione di processo.



Fig. 5.5 Dischi Freno Carboceramici

5.2.3 I PUNTALI PER SCARPE ANTINFORTUNISTICHE

I dispositivi di protezione individuale (DPI) devono essere leggeri, comodi e flessibili ma allo stesso tempo abbastanza robusti per resistere ad eventuali situazioni di pericolo per l'uomo. Per quanto detto i materiali compositi sono ottimali per realizzare i DPI.

Base Protection, in collaborazione con Cetma, svilupperà un nuovo puntale in materiale composito in fibra di carbonio per scarpe antinfortunistiche. L'obiettivo è la sostituzione parziale o completa delle fibre vergine con il materiale proveniente dalla linea di riciclaggio tenendo sempre conto delle normative ISO sulla sicurezza.

Cetma ha il compito di sviluppare un modello numerico in grado di prevedere il comportamento del materiale. In base ai risultati ottenuti da quest'ultimo, Base Protection progetterà il nuovo puntale.



Fig. 5.6 Puntali per scarpe infortunistiche in fibra di carbonio

5.3 IL MATCHING TRA GLI ATTORI DEL PROGETTO

Come ampiamente riportato, al progetto partecipano diverse aziende, ognuna delle quali utilizzerà il materiale recuperato in modalità differenti. Per quanto detto, è risultata fondamentale la fase di matching, nella quale le diverse esigenze sono state fatte confluire in un'unica direzione, al fine di realizzare una linea che potesse restituire un materiale adeguato a tutte le possibilità di recupero sopra citate.

Le condizioni che si sono ottenute dalla fase di matching sono le seguenti:

- geometria delle chips prevalentemente rettangolare con dimensione minima e massima dei lati rispettivamente di 10 e 50 mm;
- assenza categorica delle pellicole;
- assenza di cimosa;
- assenza di adesione tra le chips;
- confezionamento in buste di polietilene da 500 g.

5.4 LE CONDIZIONI DI INPUT AL CENTRO DI RECUPERO

Per la progettazione della linea di riciclaggio è stato necessario definire a priori le modalità di ingresso del materiale da recuperare.

Prima di ciò, si vogliono introdurre le principali tecniche di taglio dei fogli di preimpregnato in fibra di carbonio.

Le tecniche di taglio di materiali compositi si dividono in: contact e non contact.

Le tecniche contact, basate su lame rotanti, striscianti, alternative o forbici, sono affette da alcune problematiche rilevanti come l'elevata usura degli utensili, l'innescò di delaminazioni interlaminari nel composito e il riscaldamento/degrado termico della matrice polimerica (rischio fusione se termoplastica). Per questi motivi si sono sviluppate le tecniche non contact. Le principali sono il taglio laser, il taglio a getto d'acqua, il taglio ad ultrasuoni e al plasma.

Nella pratica industriale la tecnica più utilizzata è il taglio automatizzato su plotter a portale con testa tagliante ad ultrasuoni (il materiale che si utilizzerà nella linea è ottenuto tramite taglio con lame alternative).



Fig. 5.7 Plotter di taglio

Per ridurre il più possibile lo spreco di materiale, prima di eseguire il taglio si eseguono operazioni di nesting tramite appositi software. In questo modo si riesce ad ottimizzare la disposizione delle forme da tagliare sul foglio.

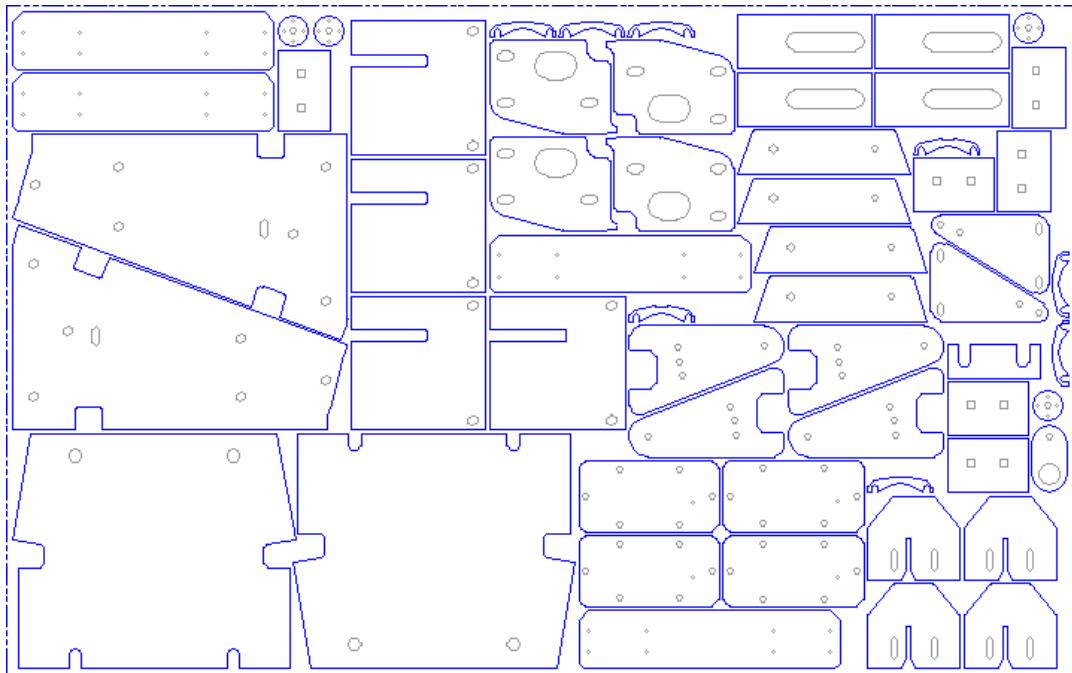


Fig. 5.8 Esempio di nesting

Affrontata questa breve ma fondamentale panoramica sui principali processi di taglio che possono essere utilizzati, si può tornare a parlare delle condizioni di ingresso del materiale nella linea di recupero.

Dalle condizioni derivanti dal matching si può da subito affermare che dal processo di taglio si deve eliminare la cimosa. Infatti, essendo questa priva di resina, non può essere utilizzata per l'ottenimento di manufatti. E' necessario quindi prevedere, nella fase di nesting, la riquadratura del foglio di preregs.

Per definire le modalità con cui eseguire il nesting, si è svolta un'analisi comparata di tre diverse possibilità:

1. Nesting con dime distanti almeno 10 mm;
2. Nesting con resizing del materiale da recuperare per l'ottenimento diretto di chips rettangolari di dimensioni di 10 – 50 mm;
3. Nesting in modo tale che superata una certa dimensione di sfrido il software introduce un taglio aggiuntivo. In questo modo si riescono a sezionare gli sfridi all'interno di una maglia quadrata di circa 200 mm di lato.

La scelta della modalità di nesting è stata fatta in base a diversi fattori. I principali sono, il tempo, il costo e la facilità di recupero degli sfridi.

La prima modalità studiata permette l'ottenimento di maglie di sfridi continue di grandi dimensioni, le quali richiedono macchinari di grande taglia per il loro sezionamento (fase di cutting) ma risultano facilmente processabili per l'eliminazione della pellicola protettiva con un operatore (fase di

peeling). Da un punto di vista economico, si è riscontrato un ridotto aumento del percorso che la testa di taglio deve seguire e quindi un moderato aumento del costo di taglio, tuttavia questa modalità comporta l'introduzione di una fonte di spreco a valle. Infatti eseguendo un nesting, detto a bassa efficienza (forme da tagliare distanti tra loro), si ha un elevato spreco di materia prima. Di conseguenza tale modalità è stata scartata.

La seconda modalità in esame permette di ridurre al minimo gli sprechi. Infatti si esegue un nesting ad elevata efficienza e gli sfridi rimanenti sono sezionati direttamente dal plotter di taglio. Si fa notare che tale modalità non è fattibile nella pratica industriale perché si hanno dei tempi e quindi dei costi di taglio molto elevati. Inoltre in questa maniera risulta complessa la fase di peeling che non può più essere svolta da un operatore. Per quanto detto anche la seconda modalità è stata scartata.

La terza modalità di taglio prevede l'uso di un software di nesting che introduce un taglio aggiuntivo qualora si superasse una certa dimensione degli sfridi. In particolare, si fa in modo che lo sfrido abbia una dimensione massima di 200 mm. Ciò permette di ottenere fogli di sfridi di forma irregolare ma, facilmente processabili nella fase di cutting, con macchine di dimensioni ridotte e facilmente manipolabili per svolgere il peeling. Da un punto di vista economico, il tempo necessario per svolgere il taglio è di poco aumentato rispetto al caso standard e lo stesso hanno fatto i costi. E' evidente che questa è la modalità migliore per svolgere il nesting ed è quella che effettivamente è stata adottata.

Svolgendo un'analisi di ottimizzazione, si è dimostrato che le dimensioni massime che devono avere gli sfridi devono essere di 250 x 250 mm e ciò comporta un aumento dei costi di taglio tra il 30 e il 60% mentre un incremento del tempo di taglio tra il 25 e il 250%. Valori comunque accettabili se si pensa che la percentuale di scarto in condizioni standard di materia prima è del 20%, mentre grazie alla linea di riciclaggio si ha un recupero di materiale vicino al 100%.

Oltre alle dimensioni di ingresso degli sfridi nel centro di recupero si è richiesto all'azienda fornitrice, HP Composites, di inviare alla linea il materiale diviso secondo diversi criteri come tipologia di matrice, tipo di rinforzo, tipologia di tow, tipologia di grammatura, tipologia di tessitura e data di produzione. Si è pattuito infine che il materiale verrà fornito tenendo in considerazione solo tre parametri: tipo di resina costituente la matrice, tipologia di fibra del rinforzo e resistenza a rottura della fibra. Ovviamente il materiale dovrà essere conservato ad una temperatura di -18 °C per inibire la reticolazione della resina termoindurente.

5.5 LE CONDIZIONI DI OUTPUT DAL CENTRO DI RECUPERO

Dal centro di recupero verrà inviato il materiale alle diverse aziende per la produzione dei vari manufatti.

In particolare, ai centri di produzione verranno inviate delle scatole di dimensioni 320 x 650 mm contenenti delle buste termosaldare con all'interno 500 g di materiale recuperato. Il materiale recuperato consiste in chips di forma omogenea di dimensione massima 25 x 25 mm, senza pellicole, con una lieve presenza di talco, utile per evitare la formazione di agglomerati incollati. Ovviamente le chips saranno suddivise per tipologia di resina, di rinforzo e di resistenza.

Il materiale dovrà essere conservato ad una temperatura di circa -18 °C, per i motivi riportati nel *capitolo 1.3.1.1*.

5.6 LE INFORMAZIONI SALIENTI PER LA PROGETTAZIONE DELLA LINEA

In definitiva l'HP Composites fornisce, alla linea di recupero, degli sfridi di sagoma quadrata di dimensione massima 200 x 200 mm ad una temperatura di -18 °C. Questi dovranno essere processati attraverso un processo di cutting, in cui si sezionano gli sfridi in chips rettangolari di dimensioni minime e massime rispettivamente di 12 e 50 mm, e un processo di peeling, in cui si elimina la pellicola protettiva, la quale è sempre presente sui fogli di prepregs.

A questo punto il materiale è pronto per essere imballato in bustine di plastica termosaldade di massimo 500 g l'una, le quali verranno trasportate alle diverse aziende utenti finali in scatoloni, di dimensioni standard 320 x 650 mm, mantenuti a bassa temperatura.

VI CAPITOLO – LE MACCHINE

Il sottoscritto ha partecipato alla progettazione e ottimizzazione della linea di riciclaggio oggetto di tesi presso Alci Group, sostenuto e supportato dall'Ing. Andrea Alessi e dall'Ing. Roberto Specchi.

Al giorno dell'insediamento in azienda, essendo il terzo tirocinante che partecipa al progetto, erano già state sviluppate e realizzate le macchine per il cutting e il peeling, quindi rispettivamente le due taglierine e la spellicolatrice pneumatica.

Il mio compito è stato quello di seguire l'automatizzazione e l'industrializzazione della linea oltre che l'ottimizzazione delle macchine già presenti.

L'impianto di riciclaggio di preimpregnati che si è sviluppato corrisponde ad un prototipo che poi verrà implementato in un contesto industriale automatizzato.

La linea è costituita da due blocchi principali in cui sono presenti diverse stazioni, ognuna delle quali possiede una funzione specifica e fondamentale per la riuscita del processo di recupero del materiale. Si riportano di seguito le diverse stazioni e le loro funzioni principali:

BLOCCO 1

1. stazione di cutting. In questa base si svolgono le operazioni di sezionamento degli sfridi. Secondo i vincoli definiti nelle condizioni di input del materiale nell'impianto di riciclaggio, alla stazione di cutting arrivano fogli irregolari di prepregs in fibra di carbonio, la cui superficie è racchiusa all'interno di una sagoma quadrata di lato 200 mm. Essa è composta da due macchine per il taglio (taglierine) e un nastro di collegamento. Tramite queste si riesce a sezionare il foglio in chips il più possibile regolari, di forma rettangolare di dimensioni 22,5 x 12 mm;
2. stazione di vagliatura. In questa base, tramite un setaccio rotativo, si procede alla vagliatura delle chips a seconda della loro dimensione che può variare in base alla geometria del foglio di prepregs e alla sua orientazione quando viene immesso nella stazione di cutting.

BLOCCO 2

1. stazione di peeling. In questa base si elimina il film protettivo delle chips grazie ad una macchina detta spellicolatrice pneumatica;
2. stazione di defogliazione. In questa base, grazie ad una macchina detta defogliatrice, si eliminano le singole pellicole che sono state separate dalle chips di prepregs dalla spellicolatrice ma che sono rimaste tra il materiale che prosegue lungo la linea;
3. stazione di controllo. In questa base si utilizza un sistema di visione per verificare l'eventuale presenza di chips non spellicate. Nel caso siano presenti si procede alla rimozione delle stesse tramite un sistema automatizzato;
4. stazione di confezionamento. In questa base, tramite una confezionatrice verticale, si imbustano le chips che hanno superato il controllo. Le bustine termosaldate a loro volta vengono immesse in uno scatolone movimentato da un nastro trasportatore.

6.1 LE MACCHINE ESISTENTI E L'OTTIMIZZAZIONE

Le macchine che erano già state realizzate completamente o in parte all'inizio del tirocinio curricolare sono la taglierina e la spellicolatrice pneumatica. Esse derivano da una progettazione accurata in cui si sono studiate le modalità con la quale trattare il materiale per raggiungere il risultato finale.

Di seguito si procede ad una descrizione non esaustiva delle suddette macchine e delle modifiche di ottimizzazione che sono state apportate dal candidato.

6.1.1 LA TAGLIERINA

La taglierina è la macchina progettata per svolgere il cutting dei fogli di prepregs in fibra di carbonio da recuperare. Questa è stata sviluppata dall'Ing. Roberto Specchi in collaborazione con i precedenti tirocinanti.

Il principio di funzionamento su cui la macchina si basa richiama quello delle macchine utilizzate in ambito alimentare per il taglio degli impasti. Le caratteristiche fondamentali che la macchina deve necessariamente avere sono l'elevata produttività, il funzionamento automatico e la possibilità di ottenere chips di forma regolare.

La progettazione è avvenuta in più step. A partire dalla realizzazione di un prototipo virtuale, si è passati alla realizzazione di un prototipo reale semplificato, che ha permesso, tramite prove sperimentali, di apportare le modifiche necessarie per la realizzazione della macchina vera e propria.

Il risultato della progettazione è stato l'ottenimento di due macchine simili: l'unica differenza sta nell'interasse delle lame di taglio. In particolare, la prima taglierina possiede un interasse di 22,5 mm mentre la seconda di 12 mm, in accordo con le cinghie presenti in commercio. Con queste misure si sono soddisfatte tutte le richieste delle aziende partecipanti al progetto.¹

Di seguito si riporta la descrizione della macchina.

Per sezionare i fogli di prepregs in maniera continua e automatica, si è pensato di mantenere fisse le lame da taglio e mettere in movimento il foglio tramite un nastro rigido, così da creare un moto relativo tra i due elementi necessario per ottenere il taglio.

La macchina è composta da due rulli uno motore e uno folle sui quali scorre un nastro rigido. Su quest'ultimo vengono posizionati i fogli di prepregs che sono condotti verso il blocco lame. Per evitare che il foglio possa slittare quando arriva in contatto con le lame sono state previste delle cinghie trapezoidali, le quali hanno il compito di tenere premuto il preimpregnato sul nastro per tutta la durata del taglio.

Le cinghie trapezoidali sono avvolte su tre pulegge in modo da formare un percorso triangolare che si intersechi con l'ingombro del rullo motore del nastro. Queste sono movimentate da una puleggia multipla collegata direttamente al gruppo motore – riduttore.

¹ Petroceramics ha richiesto chips di dimensioni massime inferiori a 15 mm. La complessità geometrica dei fogli derivanti dal nesting comporterà l'ottenimento di chips di tali dimensioni che saranno selezionate grazie al sistema di vagliatura

Il rullo motore sui cui è avvolto il nastro invece è messo in movimento grazie ad un sistema di trasmissione a catena composto da:

1. n° 1 pignone dentato motore passo 1/2" x 5/16" Z = 29
2. n° 2 pignoni dentati di rimando passo 1/2" x 5/16" Z = 31
3. n°1 corona dentata a razze passo 1/2" x 5/16" Z = 95
4. n°1 catena 1/2" x 5/16"

Il pignone motore è direttamente calettato sull'albero del motoriduttore sul quale è anche calettata la puleggia multipla motrice per la movimentazione delle cinghie, di conseguenza le due possiedono la stessa velocità angolare che è definita ovviamente dall'accoppiata motore – riduttore.

La trasmissione è stata introdotta per evitare che vi sia uno scorrimento tra le cinghie trapezoidali e il nastro su cui scorrono i fogli di preimpregnato, in modo da facilitare il taglio ed evitare eventuali inceppamenti della macchina. Pertanto la trasmissione è stata appositamente progettata per ottenere la stessa velocità tangenziale tra cinghie e rullo motore (si è ipotizzato che il nastro non sia soggetto a slittamenti con i rulli e che non ci sia scorrimento tra cinghie e pulegge).

Il sistema è motorizzato da un assieme motore - riduttore formato da:

- n°1 motore asincrono trifase "Bonfiglioli BN 71A 4 230-400-50 IP55 CLF B14" potenza nominale 250 W, regime di rotazione 1380 rpm.
- n°1 riduttore a vite senza fine "Bonfiglioli W 63 UUFC1 45 P71 B14 B3" rapporto di trasmissione 1:45

Le cinghie utilizzate sono trapezoidali di tipo SPB 2360 per la taglierina ad interasse 22,5 mm e di tipo XPZ 2360 per quella ad interasse 12 mm, mentre il nastro del rullo è in poliammide, di tipo Habasit XVT-2249.

Per controllare in maniera accurata il processo di taglio si è previsto un sistema di tensionamento del nastro, un sistema di tensionamento delle cinghie e un sistema di tensionamento della trasmissione a catena.

In particolare tramite una apposita asola è possibile muovere il rullo folle su cui è avvolto il nastro in modo da controllare facilmente la tensione dello stesso, oltre che facilitarne il montaggio. Per quanto riguarda le cinghie, si è fatto in modo che ognuna di queste scorra su due pulegge multiple fisse (una motrice e una condotta) e su un'ulteriore puleggia singola condotta, movimentata in maniera indipendente, in modo da avere un controllo sulla pressione in ogni zona del foglio da tagliare. Per ragioni di ingombro sono stati realizzati due diversi blocchi di pulegge singole. Infine si è previsto un sistema di tensionamento della trasmissione a catena grazie ad un'apposita asola su cui uno dei pignoni folli può scorrere, ciò permette di semplificare il montaggio della catena.

La taglierina con interasse 22,5 mm prevede 11 cinghie e di conseguenza un blocco con 10 lame. La taglierina con interasse 12 mm prevede 20 cinghie quindi un blocco con 19 lame.

Le lame utilizzate sono in acciaio e di forma trapezoidale per permettere di essere facilmente interscambiate una volta che l'usura non consente più un taglio ottimale. Esse sono bloccate su una traversa in alluminio realizzata in modo tale da poter regolare ogni singola lama nella direzione verticale.

Per capire meglio il funzionamento della macchina si riportano alcune viste del prototipo virtuale.

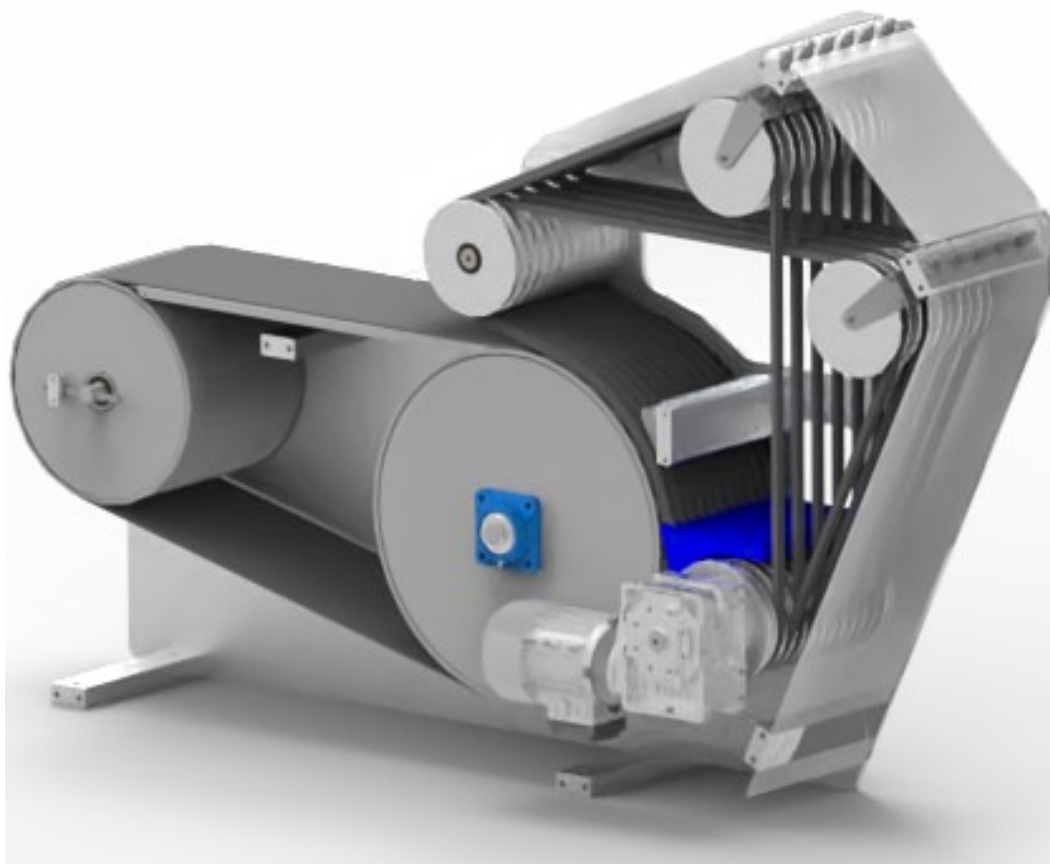


Fig. 6.1 Rendering dell'interno della taglierina lato motore

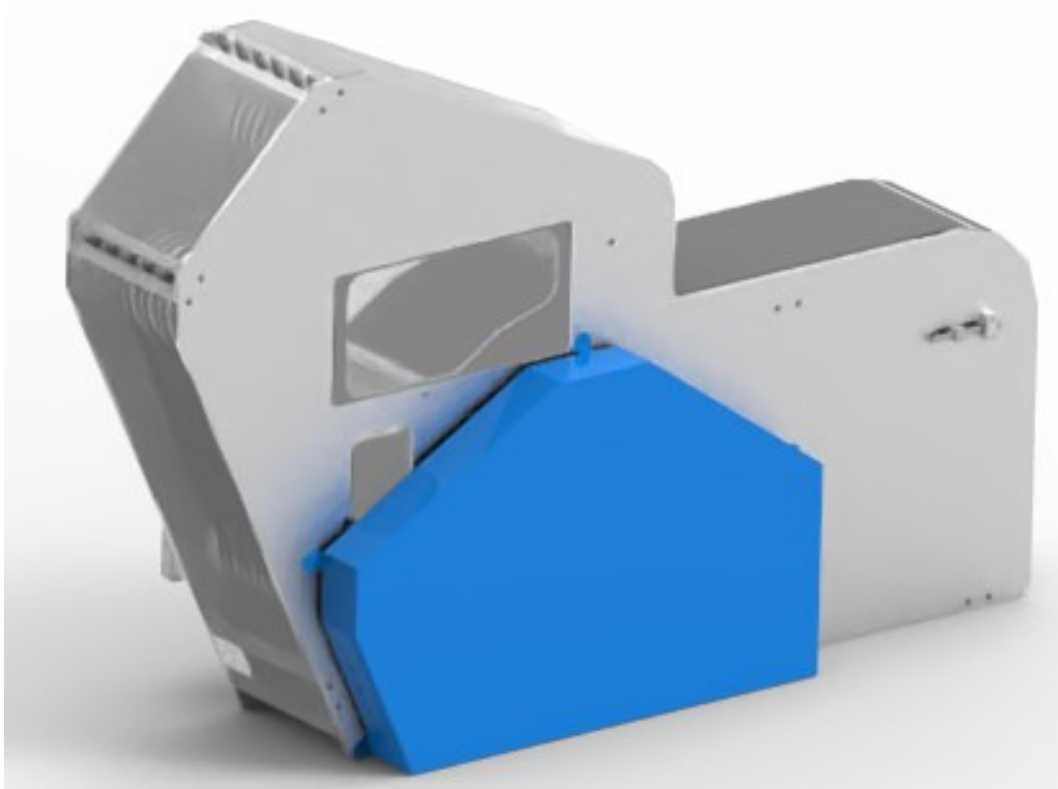


Fig. 6.2 Rendering della taglierina lato trasmissione

Parte fondamentale delle taglierine è il blocco lame. Infatti la linea oggetto di progettazione deve poter trattare indistintamente diversi tipi di preimpregnati.

Di conseguenza si è realizzato un blocco lame che permette di regolare l'altezza delle lame in funzione dello spessore del foglio di prepregs che si elabora.

Il blocco lame è costituito da:

- traversa lame
- supporto lama
- lama trapezoidale
- bloccaggio lama
- viti TCEI
- dado basso
- supporto regolazione lama

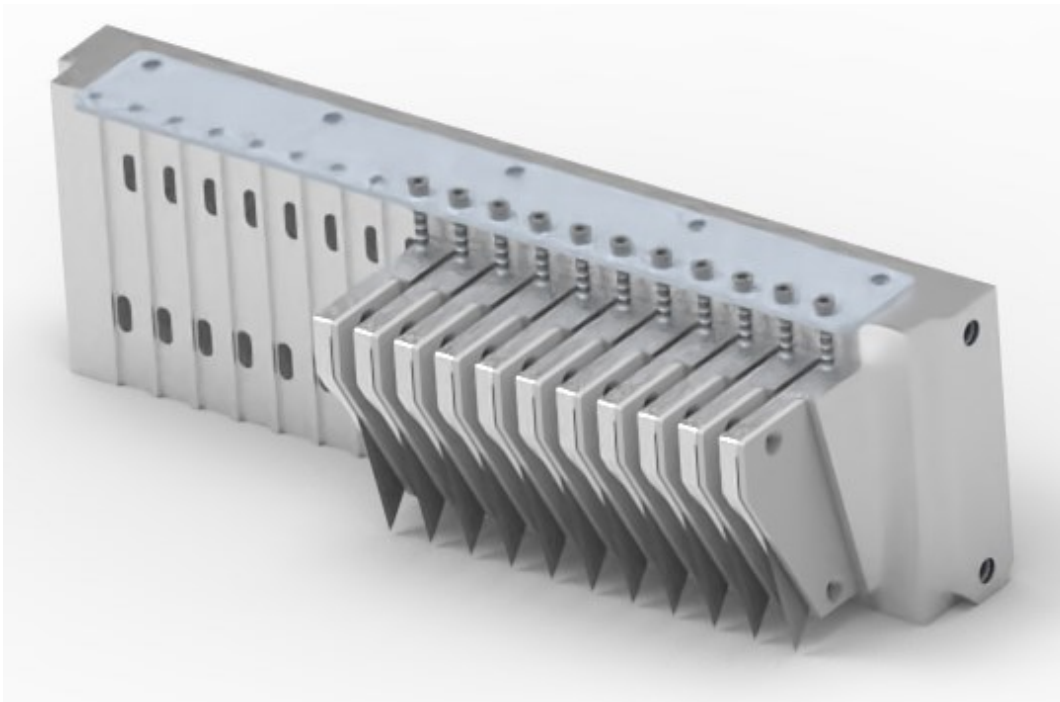


Fig. 6.3 Rendering del blocco lame da 12 mm

La vite TCEI M3 permette di regolare l'altezza del supporto lama e quindi della lama stessa. Ciò è possibile grazie al supporto di regolazione delle lame (piastra in acciaio posizionata nella parte superiore) e ad un dado basso che viene avvitato sulla vite TCEI, in base alla posizione a cui si vuole portare la lama. La traversa lame possiede degli incassi che corrispondono alle sedi dei supporti lama e, delle asole attraverso cui altre viti TCEI M4 possono scorrere. Le viti TCEI M4 sono necessarie per bloccare il supporto lama e quindi la lama alla traversa.

6.1.1.1 LE MODIFICHE ALLA TAGLIERINA

Svolgendo alcune prove per testare il funzionamento della macchina si è notato che non sempre si riusciva ad ottenere un taglio netto, necessario per il completo distacco tra le diverse chips. Ciò avveniva soprattutto per fogli di prepregs di maggior spessore.

Nonostante il sistema di regolazione dell'altezza delle lame, pur portando tutte le lame il più possibile verso il nastro dove vi scorrono i fogli di prepregs, si continuava ad avere il problema sopra citato.

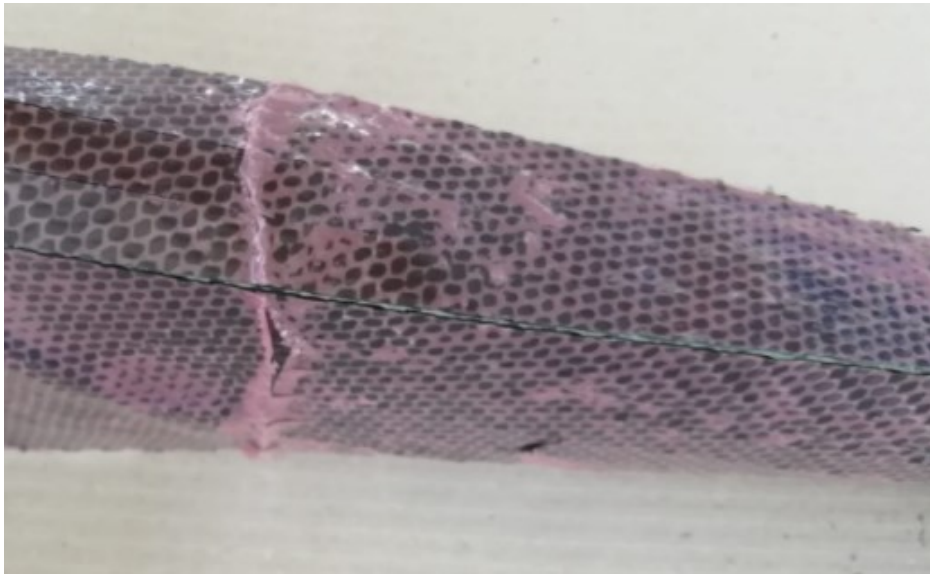


Fig 6.4 Foglio di prepregs uscente dalla taglierina in cui si può notare un distacco incompleto delle singole strisce, sintomo di un taglio non ottimale

Per quanto detto, si è proceduto alla modifica del blocco lame, rettificando gli scassi della traversa in alluminio su cui alloggiavano le lame oltre ad allungare le asole, sedi delle viti di bloccaggio dei supporti lame.

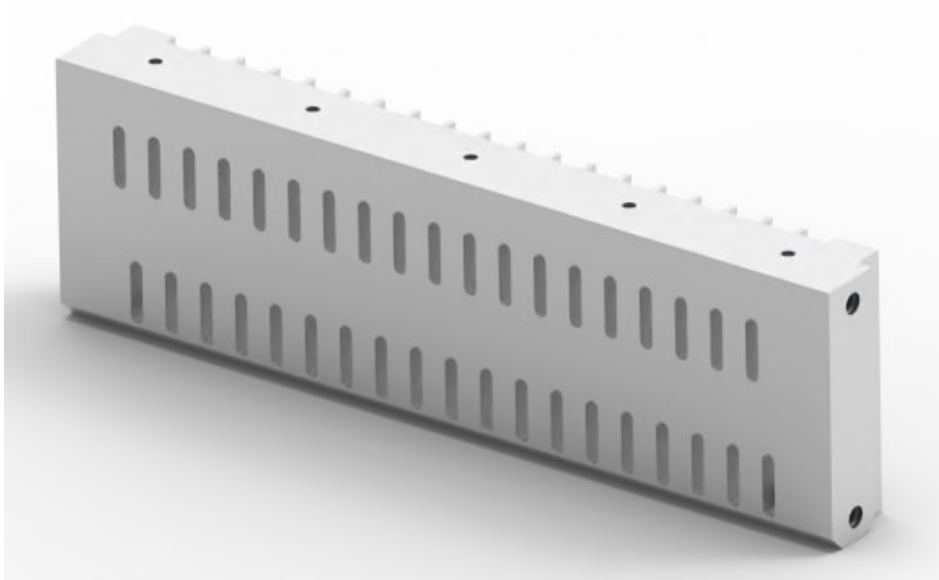


Fig. 6.5 Rendering della traversa del blocco lame 12 mm rettificato



Fig. 6.6 Blocco lame 12 mm rettificato

Le modifiche apportate hanno reso le lame più tangenti al rullo motore e quindi al nastro di movimentazione dei fogli di preregs. In questo modo si è riusciti ad aumentare l'efficienza di taglio della taglierina. Ciò ha permesso inoltre, di ridurre l'usura delle lame considerato che l'azione di taglio non è più svolta solamente dalla punta della lama, ma da una superficie più ampia.

L'usura è un aspetto molto importante se si pensa che tale macchina dovrà lavorare in maniera continuativa molte ore al giorno anche su più turni. Ciò permetterà di ridurre in maniera significativa il fermo macchina per la sostituzione delle lame.

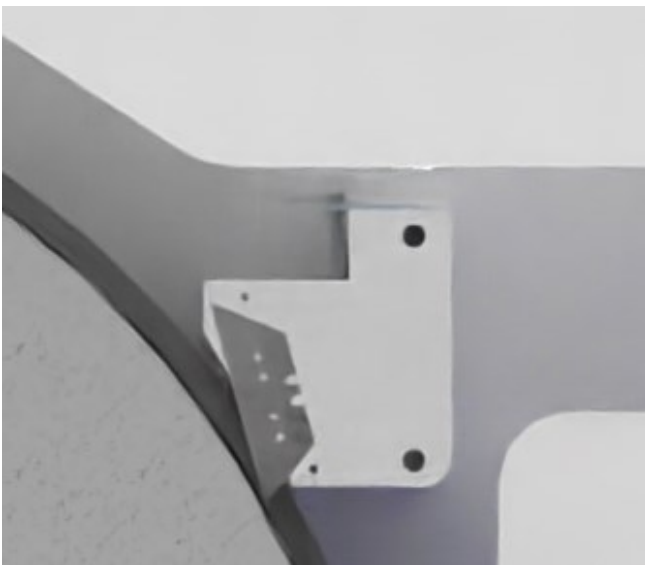


Fig. 6.7 Focus sul blocco lame, dove si può notare l'intersezione tra lama e rullo (a sinistra), chips completamente distaccata uscente dalla taglierina dopo la modifica del blocco lame (a destra)

6.1.2 LA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA

La spellicolatrice è la macchina progettata per eseguire il peeling delle chips di prepregs in fibra di carbonio. Anch'essa è stata sviluppata dall'Ing. Roberto Specchi in stretta collaborazione con i tirocinanti precedenti.

Il principio di funzionamento su cui la macchina si basa consiste nell'utilizzo di un getto d'aria per agitare le chips congelate all'interno di un contenitore di forma tubolare. Ciò permette il distacco della pellicola.

L'idea è nata dal fatto che le chips, quando sono congelate, diventano molto rigide e la viscosità della resina termoindurente diminuisce (*vedi capitolo 1.3.1.1*). In queste particolari condizioni è più semplice distaccare la pellicola plastica.

Di seguito si riporta la descrizione della macchina.

Per spellicolare le chips si è pensato di agitarle all'interno di un contenitore grazie a più getti di aria compressa, sfruttando la riduzione della tack (livello di appiccicosità della resina termoindurente) che si ha quando la resina si trova a basse temperature.

Partendo da un prototipo costituito da un tubolare di altezza di 600 mm e diametro di circa 200 mm, chiuso alle estremità con delle tavole di compensato, si è notato che immettendo una certa quantità di chips da spellicolare all'interno e insufflando aria compressa, si genera un vortice, che mette in rotazione le chips. Le forze aerodinamiche generate fanno distaccare le pellicole, che essendo molto leggere, tendono a migrare verso l'alto a differenza delle chips spellicolate, che essendo più pesanti, si depositano sul fondo. La semplicità del processo e l'elevata efficienza nello svolgere la funzione di peeling ha spinto i progettisti a perseguire tale strada di sviluppo. Si è iniziata quindi la fase di progettazione vera e propria.

La spellicolatrice pneumatica è composta da un tubo cilindrico in acciaio AISI 304 di diametro 273 mm e altezza 600 mm. Il cilindro è chiuso all'estremità inferiore da un fondo in polietilene movimentato, tramite una cerniera, da un cilindro pneumatico, per lo scarico della macchina. L'estremità superiore è invece chiusa da un coperchio in policarbonato dove insiste una tramoggia che consente il caricamento automatico della macchina. Il meccanismo di apertura per il carico delle chips è caratterizzato da una farfalla movimentata anch'essa da un cilindro pneumatico.

Il tubolare cilindrico nella parte inferiore presenta dei fori, sede di 3 ugelli dell'aria compressa. Invece nella parte superiore è presente uno scavo, sede della bocca di aspirazione a cui è collegato l'aspiratore per l'evacuazione delle pellicole. Vi è anche un'ogiva sul fondo in polietilene, sede di ulteriori ugelli d'aria. Quest'ultimi sono utilizzati per evitare la permanenza stazionaria di chips da spellicolare al centro della macchina che si verifica a causa del fatto che gli ugelli d'aria principali, essendo posizionati in modo tangente al cilindro, creano un vortice d'aria solo sulla parte periferica del cilindro stesso e non al centro.

Gli ugelli, l'ogiva e la bocca di aspirazione sono stati realizzati tramite stampante 3D. Gli ugelli principali possiedono un'inclinazione di 6° verso l'alto e di 3° verso l'interno rispetto alla tangente del cilindro. Tale configurazione permette la salita verso l'alto delle pellicole e favorisce il mescolamento di tutte le chips, anche quelle vicine al centro tubo. L'ogiva è stata realizzata in modo tale da creare un vortice inclinato di 70° rispetto alla direzione radiale, nello stesso verso o nel verso

opposto rispetto a quello che viene impartito dagli ugelli principali. Esso, come già detto, viene utilizzato per evitare la permanenza stazionaria delle chips al centro del cilindro. Infine la bocca di aspirazione è stata realizzata in modo tale da risultare tangente al cilindro per favorire l'aspirazione delle chips.

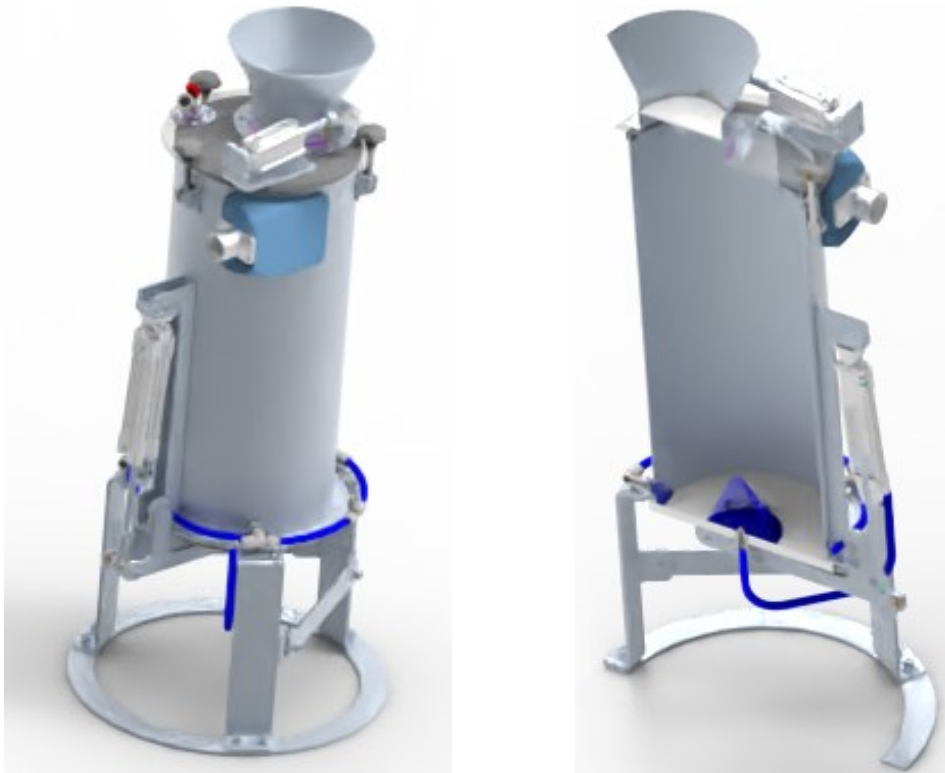


Fig. 6.8 Rendering della spellicolatrice pneumatica

6.1.2.1 LE MODIFICHE ALLA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA

Svolgendo alcune prove sperimentali sulla spellicolatrice pneumatica si è notato che la macchina possiede un'efficienza molto elevata riguardo il processo di peeling. Si riescono infatti a spellicolare quasi completamente 200 g di materiale in circa 30 secondi. L'unica problematica riscontrata sta nell'aspirazione delle pellicole.

Si verifica infatti un intasamento delle pellicole all'ingresso della bocca di aspirazione, nonostante la depressione esercitata dall'aspiratore. Quando il ciclo si conclude queste cadono verso il basso, tra il materiale spellicolato che procede lungo la linea.

Quanto detto non è da trascurare, dato che è stato tassativamente espresso dalle aziende partecipanti al progetto, che non vi devono essere pellicole tra le chips recuperate. Queste infatti conferirebbero discontinuità strutturali ed estetiche ai manufatti che vengono realizzati col materiale recuperato.

Si è quindi provveduto alla reingegnerizzazione della bocca di aspirazione delle pellicole, progettando una bocca che risulta essere meno tangente, e quindi più radiale, al cilindro. Per ottenere le proprietà geometriche del prototipo virtuale si è utilizzata una stampante 3D con la quale si è realizzata la parte in PLA.

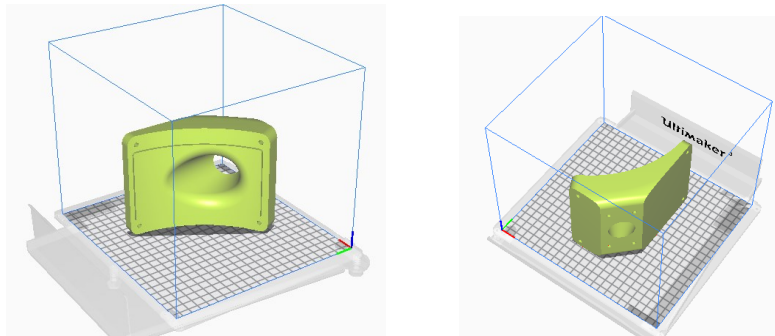


Fig. 6.9 Modello virtuale bocca di aspirazione modificata riportato sul software Ultimaker Cura

Se tale problema dovesse persistere, ciò è comunque accettabile, dato che lungo la linea, subito dopo la spellicolatrice pneumatica, si è prevista un'ulteriore stazione che ha il compito di eliminare completamente le pellicole dal materiale recuperato.

Un'altra modifica apportata dal candidato consiste nella sostituzione dei tubi per l'aria compressa. Nella versione precedente si utilizzavano tubi di diametro \varnothing 8 mm, mentre nella nuova si utilizzano tubi di diametro \varnothing 12 mm. Ciò è stato fatto per scongiurare eventuali intasamenti dei tubi a causa della condensa, trascinata dall'aria compressa, che ghiaccia per le basse temperature, dato che la spellicolatrice pneumatica viene fatta funzionare all'interno di un congelatore ad una temperatura di circa $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (per conferire alla resina epossidica le proprietà richieste per la riuscita del processo).



Fig. 6.10 Spellicolatrice pneumatica

6.2 LE NUOVE MACCHINE E ATTREZZATURE

Eseguita l'ottimizzazione delle macchine già esistenti si è passati alla realizzazione/scelta delle nuove.

Il sottoscritto si è impegnato nella realizzazione di sistemi che permettessero di automatizzare la linea, in particolare sono stati progettati/acquistati:

- nastro retrattile
- setaccio rotativo
- defogliatrice
- sistema di visione
- nastro a doppia penna
- confezionatrice verticale
- nastro scatole

Di seguito si riporteranno i punti salienti delle macchine progettate e i criteri di scelta principali per le attrezzature acquistate che il sottoscritto ha seguito.

6.2.1 IL NASTRO RETRATTILE

Il nastro retrattile è un particolare tipo di nastro trasportatore. Esso può essere utilizzato in diversi ambiti. In questo caso ha la funzione di trasferire le chips di forma rettangolare che sono ottenute dalla prima taglierina alla seconda taglierina in maniera ortogonale. Per svolgere questo compito non può essere utilizzato un semplice nastro trasportatore, in quanto la chips rettangolare uscente dalla prima taglierina, toccando il nastro in movimento della seconda taglierina, la quale è posizionata in maniera ortogonale alla prima, tenderebbe a ruotare. Di conseguenza non sarebbe rispettata la condizione per cui le chips uscenti dalla prima taglierina devono arrivare alle lame della seconda ortogonalmente rispetto alla prima.

Il funzionamento del nastro retrattile può essere capito prendendo ad esempio un pizzaiolo che vuole posare la pizza nel forno con la pala. Il nastro trasportatore in questione poggia la prima parte della chips sul nastro, dopodiché si muove all'indietro prima di poggiare completamente la chips stessa. Ciò è possibile utilizzando dei cilindri pneumatici che movimentano in avanti o all'indietro una slitta che scorre su due guide. Questo meccanismo, opportunamente sincronizzato, permette di trasferire le chips dalla prima taglierina alla seconda nella modalità corretta.

Di seguito si riportano gli aspetti salienti della macchina.

Il nastro retrattile è costituito da due gruppi, uno fisso e uno mobile.

Sulla parte fissa sono presenti 3 rulli, uno motore e due di rinvio folli. Il rullo motore, di diametro \emptyset 60 mm, è collegato direttamente al gruppo motore – riduttore tramite una linguetta. Ogni rullo folle invece, di diametro \emptyset 50 mm, tramite dei cuscinetti a sfera ruota su un perno collegato al telaio della macchina.

I componenti commerciali utilizzati sono:

- n°1 motore asincrono trifase “Motore Bonfiglioli BN 56B 4 230-400-50 IP55 CLF B14” potenza nominale 90 W, regime di rotazione 1350 rpm
- n°1 riduttore a vite senza fine “Bonfiglioli VF 30 F1 15 P56 B14 B3” rapporto di trasmissione 1:15
- n°1 cuscinetto a sfere con flangia quadrata “SKF FY 20 TF” per il rullo motore
- n°4 cuscinetti radiali a sfere “SKF 6004-2RSH” per i rulli folli

Le due spalle in alluminio che costituiscono il telaio sono distanziate da due traverse anch’esse in alluminio. Sulle spalle sono ancorate due guide Hiwin MGNR15R630C su cui scorre la parte mobile della macchina. Infine è presente un’ulteriore traversa su cui sono posizionati due antivibranti Elesa DVA 4-25-20 utili a smorzare le vibrazioni che nascono quando il blocco mobile torna nella configurazione chiusa.

Si può notare nell’immagine seguente che uno dei due rulli folli può scorrere attraverso apposite asole ricavate nelle spalle del telaio. Tale sistema è stato adottato sia per semplificare le operazioni di montaggio del nastro sia per ottenere la tensione ottimale dello stesso affinché non si verificano slittamenti.

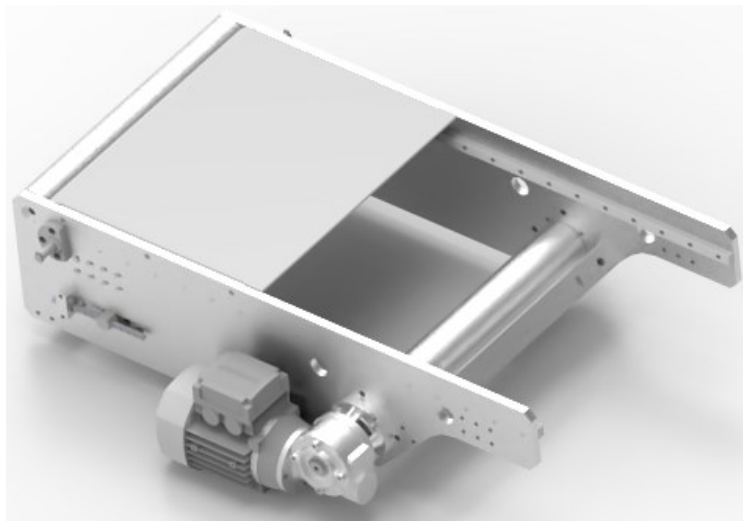


Fig. 6.11 Rendering blocco fisso

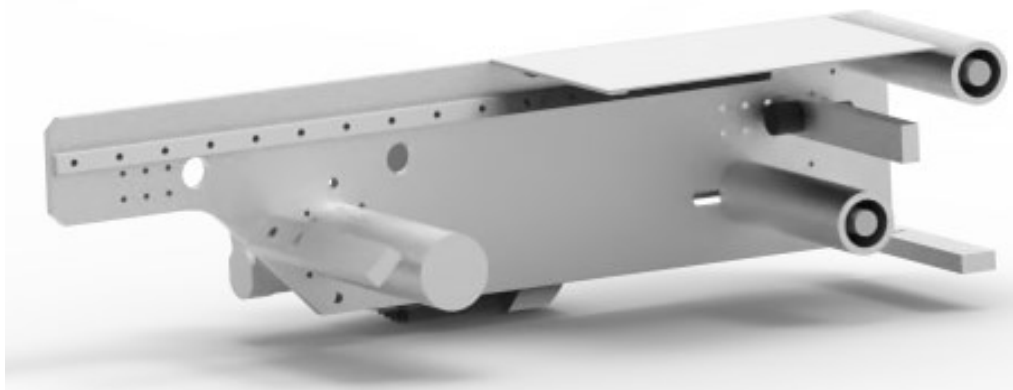


Fig. 6.12 Rendering della sezione del blocco fisso

Infine è presente un piano di appoggio del nastro in acciaio inossidabile AISI 304.

La parte mobile è costituita da 2 rulli di rinvio folli di diametro \varnothing 50 mm. Al telaio è collegata una penna mobile sulla quale sono presenti dei rullini. La penna è movimentata grazie a due cilindri pneumatici a doppio effetto. Inoltre sono posizionate sul telaio 4 pattini Hiwin MGN15CZ0C, 2 su ogni lato, i quali scorrono sulle guide presenti nella parte fissa grazie a 2 cilindri pneumatici anch'essi a doppio effetto.

I componenti commerciali utilizzati sono:

- n°2 cilindri pneumatici a doppio effetto "SMC CD85N16-50C-B" per la movimentazione della penna
- n°2 cilindri pneumatici a doppio effetto "SMC CP96SDB32-250C" per la movimentazione di tutto il blocco mobile

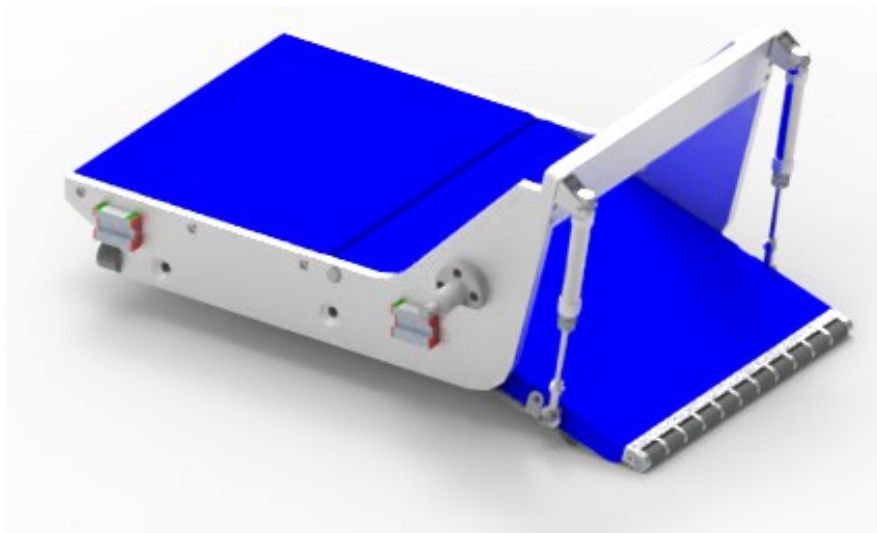


Fig. 6.13 Rendering del blocco mobile

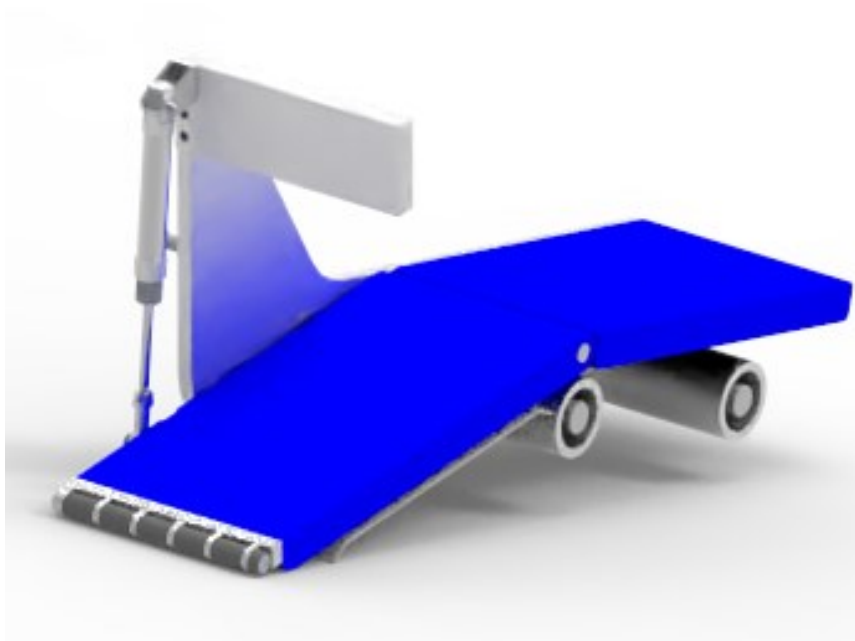


Fig. 6.14 Rendering della sezione del blocco mobile

Si è utilizzato un nastro in PVC che, nella posizione estesa, segue il profilo riportato nell'immagine seguente.

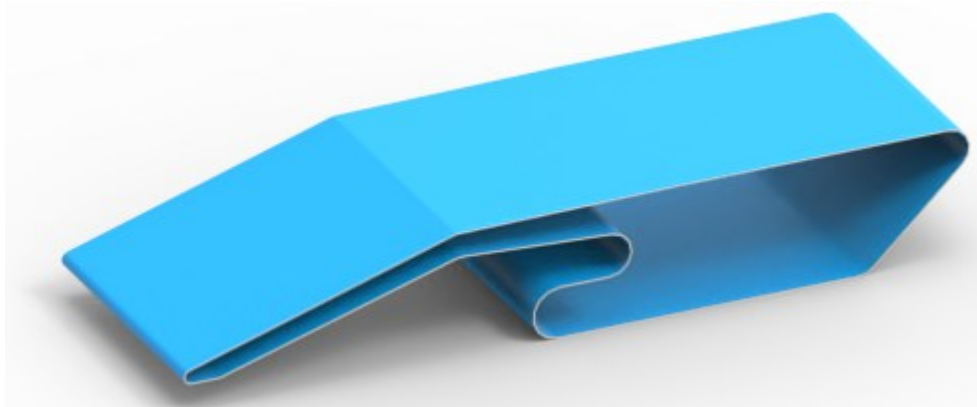


Fig. 6.15 Rendering percorso nastro retrattile nella posizione estesa

Si riporta di seguito la macchina completa.

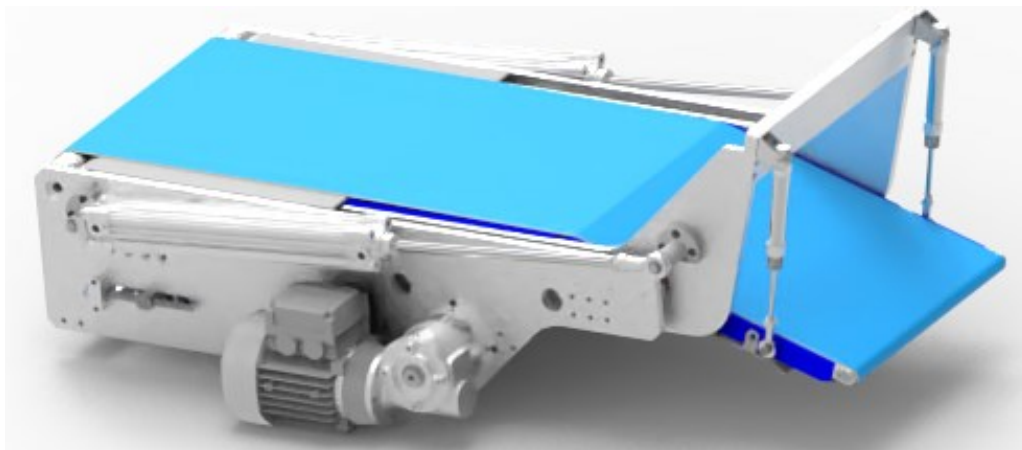


Fig. 6.16 Nastro retrattile di trasferimento chips

6.2.1.1 LE MODIFICHE AL NASTRO RETRATTILE

Svolgendo diverse prove sperimentali si è notato che, a causa dell'elevata finitura superficiale che in fase di produzione era stata conferita ai rulli in alluminio del nastro retrattile, si verificavano slittamenti eccessivi del nastro stesso.

Di conseguenza si sono presi dei provvedimenti. In particolare, per superare il problema, si è deciso di conferire maggior grip al rullo motore eseguendo la godronatura dello stesso.



Fig. 6.17 Esempio di rullo godronato

6.2.2 IL SETACCIO ROTATIVO

Per eseguire la vagliatura delle chips si è pensato di realizzare un setaccio rotativo. Tuttavia tale macchina non è stata ancora realizzata in quanto si ritiene necessario svolgere delle prove sperimentali con attrezzature semplificate per testare la riuscita del processo.

Nel caso in cui le prove diano esito positivo, si procederà al dimensionamento dei vari componenti della macchina. Come spunto si potranno prendere le macchine utilizzate per la vagliatura dei granuli di terra di diverse dimensioni come quella riportata nell'immagine seguente.



Fig. 6.18 Esempio di setaccio rotativo

In principio si era pensato di eseguire la vagliatura con dei nastri a doppia penna. Tuttavia tale idea è stata abbandonata perché poco affidabile.

6.2.3 LA DEFOGLIATRICE

Come già accennato in precedenza, con la spellicolatrice pneumatica non si riescono ad aspirare tutte le pellicole che si generano nel processo di peeling. Di conseguenza, al termine del ciclo, queste ricadono tra le chips spellicolate che proseguono lungo l'impianto di recupero.

Ciò risulta essere un problema, dal momento in cui tutte le aziende utenti finali hanno espressamente indicato che nel materiale recuperato non devono essere presenti pellicole dato che queste introdurrebbero delle discontinuità nel manufatto finale sia da un punto di vista strutturale che estetico.

In relazione a quanto appena detto, si è dovuta trovare una soluzione che permettesse di eliminare le pellicole in maniera automatica, veloce e con elevato rendimento.

Per svolgere tale funzione si è pensato di utilizzare un separatore ad aria, detto defogliatrice.

La defogliatrice è una macchina che permette di separare materiali di peso differente, sfruttando un getto d'aria ottenuto grazie ad una ventola messa in rotazione ad una opportuna velocità da un motore elettrico.

Da un'analisi di fattibilità si è dimostrato che è più conveniente acquistare la macchina direttamente dal mercato piuttosto che realizzarla internamente all'azienda. Per questo motivo si è eseguita una ricerca con l'obiettivo di individuare una macchina che potesse soddisfare le seguenti richieste:

- presenza di un ampio scivolo inclinato in ingresso dove vengono fatte scorrere le chips e/o le pellicole
- bocca di espulsione delle pellicole tale da permettere l'aspirazione delle stesse tramite un condotto tubolare
- bocca di espulsione delle chips spellicolate (conformi) di dimensione simile a quelle dei nastri trasportatori
- macchina in acciaio inox per scongiurare rischi di ossidazione dato che è posta in ambienti a basse temperature
- possibilità di poter regolare la velocità di rotazione della ventola e quindi il flusso d'aria in maniera continua

L'ultima condizione risulta essere la più importante, dato che solo grazie ad essa può essere garantita la riuscita del processo. Infatti, essendoci una differenza di peso minima tra le pellicole e le chips spellicolate (o non spellicolate), risulta fondamentale poter regolare la velocità del flusso d'aria che investe il materiale per permetterne la separazione. Allo stesso tempo tale richiesta è risultata essere la più vincolante, dato che dopo una attenta analisi del mercato, si sono trovate solo poche macchine provviste di potenziometro per la regolazione della velocità di rotazione della ventola.

In conclusione per l'applicazione presente si è scelta la macchina seguente: OLITA AOP0157 Polsinelli.



Fig. 6.19 Macchina defogliatrice Olita AOP0157 con regolatore di velocità

Si riportano le caratteristiche tecniche della macchina.

Sistema di ventilazione forzata dotato di variatore di velocità	Da 0 a 2850 rpm
Potenza	350 Watt
Assorbimento	250 W
Ingombri	110x60x95(h)
Peso	39 kg

6.2.4 IL SISTEMA DI VISIONE

In successione alla defogliatrice si è installata una stazione, che tramite un sistema di visione, permette di verificare, nel dettaglio, una a una, le chips che si stanno muovendo lungo la linea, prima che queste vengano imbustate dalla confezionatrice verticale.

E' possibile, nonostante la spellicolatrice abbia un elevato rendimento, che alcune chips non vengano spellicate. Di conseguenza si è messo a punto un sistema che permette di individuare, e successivamente escludere, tali chips dal materiale conforme.

La funzione è svolta da un apposito sistema di visione. Il principio di funzionamento che si è implementato si basa sulla differenziazione delle chips conformi (spellicate) da quelle non conformi (non spellicate) sulla base della cromatura, la quale è captata dalla telecamera. Ciò è possibile dato che la pellicola che ricopre i fogli di prepregs può essere di svariati colori, che sono però sempre diversi da come appaiono i fogli di prepregs quando sono spellicati.

Dal materiale che è stato fornito da HP Composites si può affermare che le pellicole, in base al tipo di prepregs che si considera, possono essere fundamentalmente di 3 colori diversi: verde, giallo e rosa.

Di seguito si riportano delle immagini da cui si può notare la differenza cromatica tra le chips, spellicate, non spellicate e un foglio in composito senza pellicola protettiva.

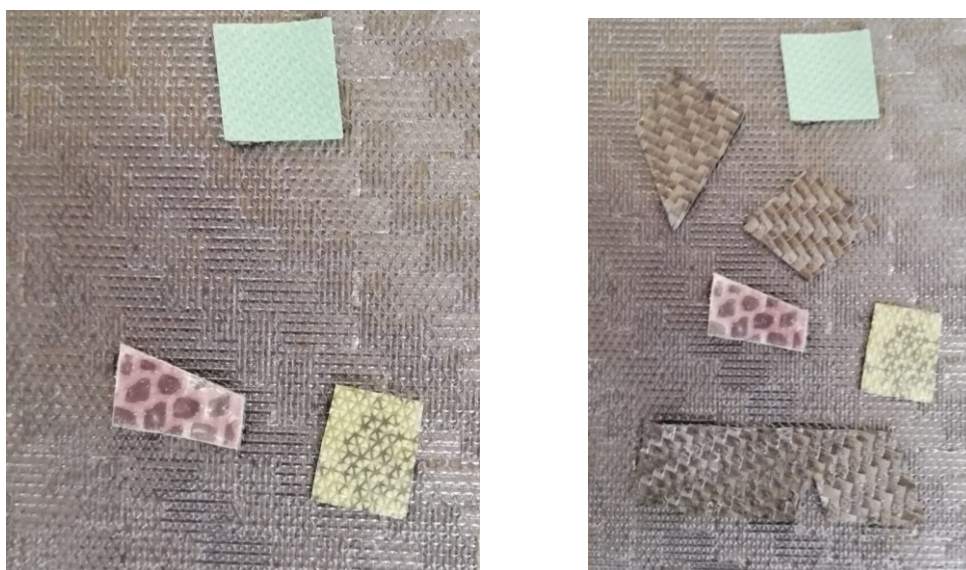


Fig. 6.20 Confronto cromatico tra chips spellicate, non spellicate e foglio in composito vergine senza pellicola protettiva

Il sistema di visione che si è utilizzato per svolgere le prove sperimentali è stato recuperato da una precedente applicazione di Alci Group. Si è poi provveduto all'acquisto di un ulteriore focale per ragioni che verranno spiegate in seguito.

Il sistema di visione è della serie FH di OMRON, ed è composto da:

- Controllore "FH-L550-10"
- Telecamera "FH-SC05R"
- Ottiche di diverse dimensioni
- Illuminatore "HPD2-100SW"

Il controllore FH-L550-10 è dual-core.



Fig. 6.21 Controllore FH-L550-10

Si riportano di seguito le specifiche tecniche del controllore.

Performance	Lite
Processor family	Intel® Atom™
Memory	4 GB RAM (non ECC)
AI Scratch detection filter	NO
AI FineMatching	NO
Number of cameras	4
Integrated monitor	NO
Communication port(s)	EtherNet/IP, EthernetTCP/IP, PROFINETSlave, Serial RS-232C, USB
Output type	PNP/NPN

La telecamera FH-SC05R è di tipo C-MOS rolling shutter.

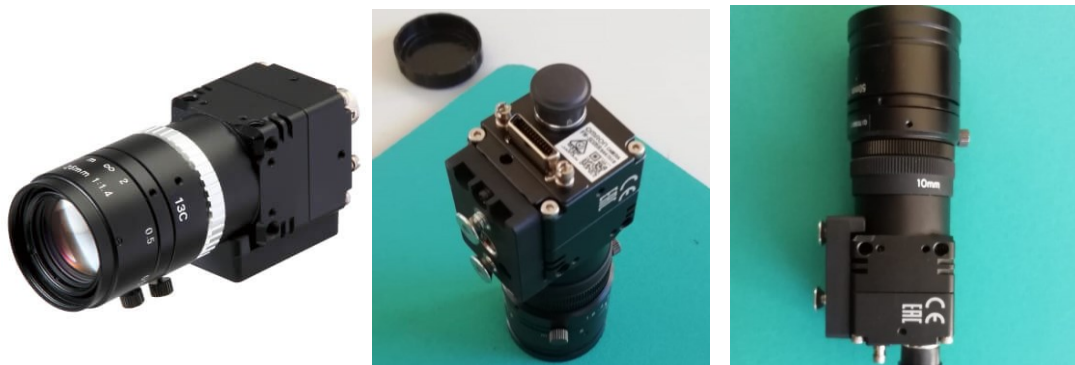


Fig. 6.22 Telecamera FH-SC05R

Si riportano di seguito le specifiche tecniche della telecamera.

Number of pixels	5.0 MP
Autofocus	NO
Camera family	FH/FZ
Camera type	Color
Frame rate	14 fps
Image width	2592 pixels
Image height	1944 pixels
Scan type	Area scan
Shutter type	Rolling
Image sensor format	1/2.5"
Lens mount	C-mount
Lens type	N/A
Pixel size	2.2 μm
Degree of protection (IP)	IP10

Le ottiche attualmente presenti in azienda/acquistate sono:

- 3Z4S-LE SV-5018V
- 3Z4S-LE SV-0814H



Fig. 6.23 Ottiche 3Z4S-LE SV-5018V (a sinistra) e 3Z4S-LE SV-0814H (a destra)

L'illuminatore a plafoniera HPD2-100SW ha un diametro esterno di 116 mm ed interno di 66 mm con un'altezza pari a 57.4 mm.

Si riportano di seguito le specifiche tecniche dell'illuminatore.

Led color	White
Correlated color temperature	6,500 K typ
Input voltage	24 VDC
Power consumption	23 W max
Polarity and signal	1: (+)、2: NC、3: (-)
Case material	Aluminum alloy, Resin
Operating temperature and humidity	Temperature: 0 to 40°C, Humidity: 20% to 85%RH (with no condensation)
Storage temperature and humidity	Temperature: -20 to 60°C, Humidity: 20% to 85%RH (with no condensation)
Cooling method	Natural air-cooling
Input connector	SMR-03V-B
Weight	160 g max
Conformed standards	CE, RoHS, IEC 62471(Low risk)



Fig. 6.24 Illuminatore HPD2-100SW a plafoniera

Infine si riporta l'immagine dell'alimentatore Siemens utilizzato per l'accensione del sistema di visione.



Fig. 6.25 Alimentatore Siemens sitop psu100l

6.2.5 IL NASTRO A DOPPIA PENNA

Il nastro a doppia penna è stato realizzato per eseguire le prove sperimentali del secondo blocco. Infatti nella configurazione finale è previsto un nastro elevatore che, dalla defogliatrice riporta le chips ad quota che consente al sistema di visione di andare a valutare la conformità delle stesse.

Tuttavia prima di procedere alla progettazione del nastro elevatore si è realizzato un nastro a doppia penna con la stessa funzione ma di dimensioni e costi assai ridotti tramite il quale realizzare le prove sperimentali del sistema di visione.

Si vedrà in seguito che il sistema di visione va a riprendere le chips mentre queste scorrono su di uno scivolo. Quindi per ricreare la configurazione della linea finale si è utilizzato un nastro che ha la funzione di portare le chips fino allo scivolo appena citato.

Di seguito si riportano i punti salienti della macchina.

Il nastro a doppia penna è costituito da tre rulli, uno motore e due folli, e da due penne sulle quali si trovano i rullini di rinvio.

Il rullo motore, di diametro \varnothing 60 mm, è in alluminio 6061-T6, ed è collegato direttamente, tramite una linguetta, al gruppo motore – riduttore. All'altra estremità, il rullo poggia su un cuscinetto a sfere con flangia quadrata, direttamente collegato, tramite quattro bulloni, al telaio della macchina.

I rulli folli, di diametro \varnothing 50 mm, sono anche loro in alluminio 6061-T6, e ruotano attorno ad un perno fisso a telaio di diametro \varnothing 20 mm, tramite due cuscinetti radiali a sfere. Il perno (tensionatore) di uno dei due rulli folli può scorrere sul telaio tramite due apposite asole ricavate sulle spalle del telaio stesso. Questo è possibile grazie a due blocchi di contrasto fissati rispettivamente sulle spalle del telaio, all'interno dei quali viene fatta passare una vite TCEI M8 x 100 che si va ad avvitare sul perno tensionatore.

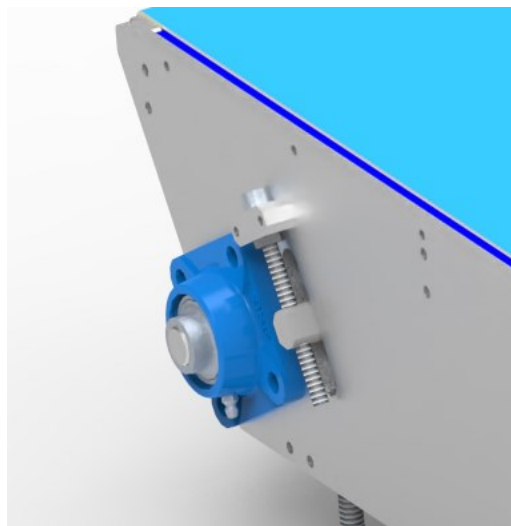


Fig. 6.26 Rendering del nastro a doppia penna dove si notano il perno tensionatore, il blocchetto di contrasto e la vite TCEI M8 x 100, oltre che l'asola sulla spalla del telaio e il cuscinetto a sfere flangiato.

Ogni penna, in alluminio 6061-T6, è stata sezionata in 3 tratti per semplicità di montaggio. Questa è ancorata ad una traversa, la quale è fissata alle due spalle del telaio tramite delle viti TCEI M5 x 20.

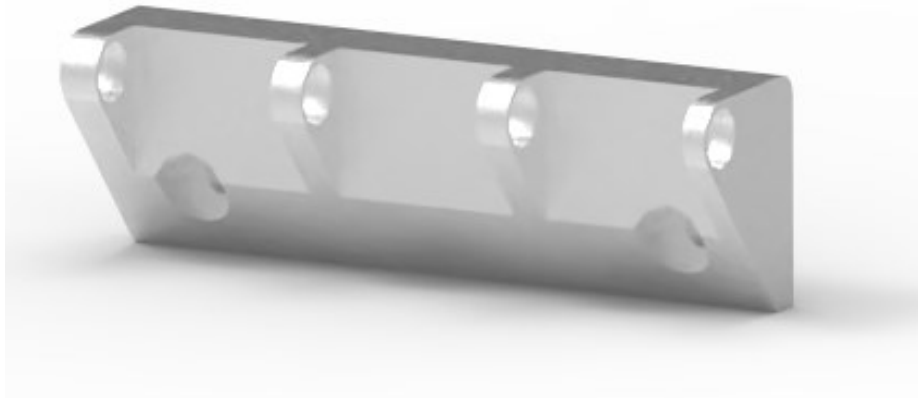


Fig. 6.27 Rendering di un tratto della penna in cui si notano i fori per l'ancoraggio alla traversa del telaio (in basso) e i fori per l'alloggiamento del perno (in alto) sul quale ruotano le boccole cilindriche

Nei fori ricavati nella penna è fatto passare un perno sul quale ruotano i rullini.

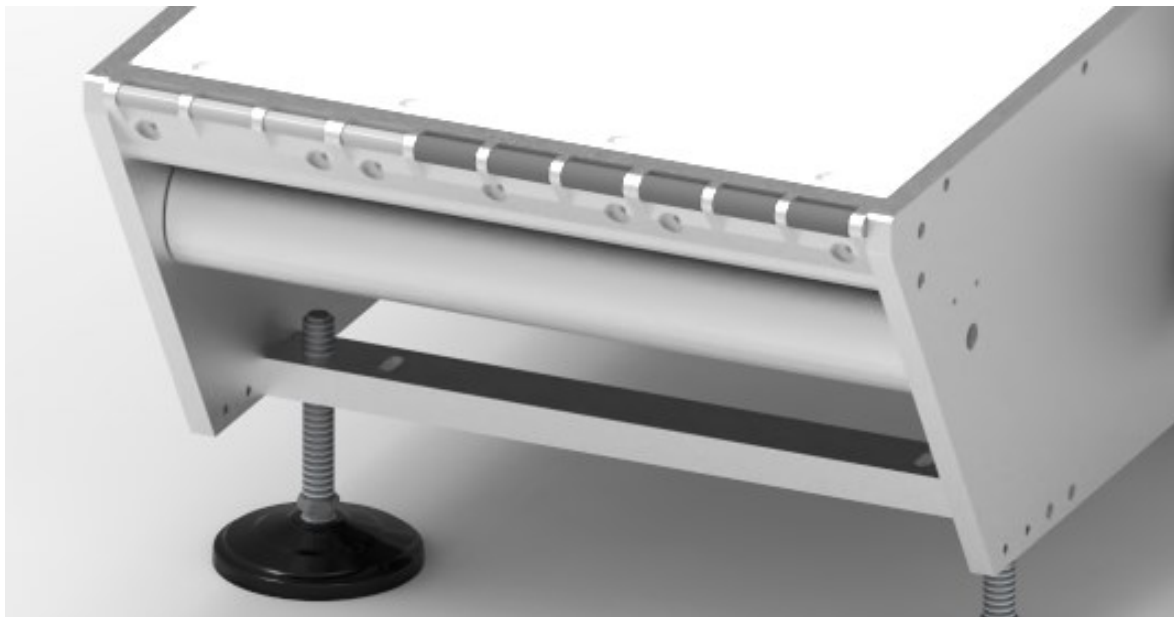


Fig. 6.28 Rendering della penna in cui si notano le boccole cilindriche (in grigio scuro) e il perno (in grigio chiaro). Inoltre è possibile notare il piano di appoggio in polietilene PE 1000 nella parte alta dell'immagine

Come è stato già accennato il telaio, tutto in alluminio 6061-T6, è costituito da due spalle che sono tenute insieme da cinque traverse. Nella parte superiore è stato realizzato un piano di appoggio, in polietilene PE 1000, utile ad evitare flessioni e sbandamenti del nastro, collegato al telaio tramite viti TCEI M4 x 10.

Infine si sono acquistati quattro piedini snodati antivibranti che grazie al gambo filettato sono stati avvitati sulle due traverse inferiori del telaio.

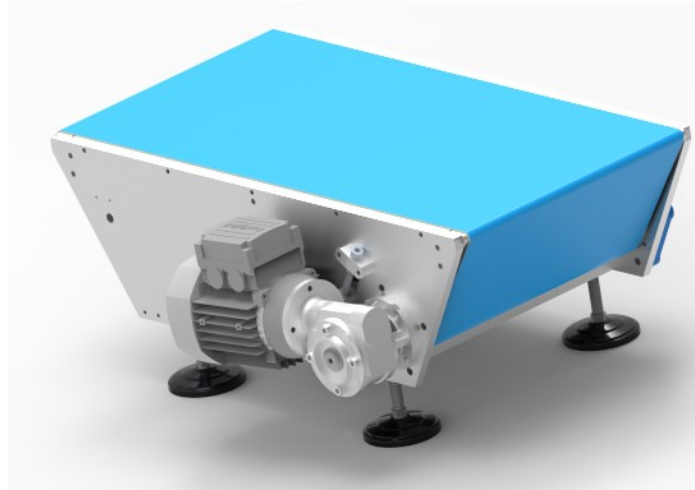


Fig. 6.29 Rendering del nastro a doppia penna

I componenti commerciali che sono stati acquistati per realizzare la macchina sono:

- n°1 motore asincrono trifase "Bonfiglioli BN 56B 4 230-400-50 IP55 CLF B14" potenza nominale 90 W, regime di rotazione 1350 rpm
- n°1 riduttore a vite senza fine "Bonfiglioli VF 30 F2 15 P56 B14 B3" rapporto di trasmissione 1:15
- n°1 cuscinetto a sfere con flangia quadrata "SKF FY 20 TF"
- n°4 cuscinetti radiali ad una corona di sfere "SKF 6004 - 2RSH"
- n°20 boccole cilindriche "Iigus GSM - 0810 - 25"
- n°4 piedini antivibranti "Alutec D80 - M12"
- nastro in PVC

6.2.5.1 LE MODIFICHE AL NASTRO A DOPPIA PENNA

Eseguendo delle prove sperimentali sul nastro a doppia penna si è notato che, essendo troppo ridotto l'angolo di abbraccio del nastro sul rullo motore e sul rullo tensionatore, si verificavano degli slittamenti e di conseguenza un avanzamento intermittente dello stesso.

Per risolvere il problema si è pensato di eseguire la gommatura del rullo motore, facendo così aumentare in maniera significativa l'aderenza del nastro al rullo, evitando gli slittamenti riscontrati durante le prove sperimentali.

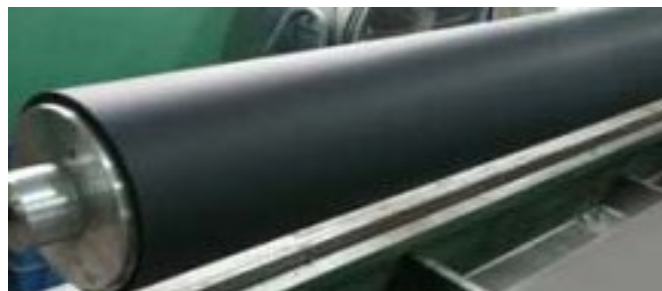


Fig. 6.230 Esempio di rullo gommato

6.2.6 LA CONFEZIONATRICE VERTICALE

Come voluto dalle aziende utenti finali, le chips devono essere imbustate in confezioni in polietilene termosaldate ognuna delle quali contenente 500 g di materiale.

Per poter soddisfare tale richiesta si è pensato di acquistare dal mercato una macchina detta confezionatrice verticale. Essa permette di imbustare automaticamente una certa quantità di materiale in confezioni di plastica di specifiche dimensioni.

Dopo un'attenta ricerca dei diversi modelli presenti sul mercato si è scelta la confezionatrice verticale "Gandaus MICRO VFFS 350" che verrà acquistata nei successivi stati di avanzamento del progetto.

Si riportano di seguito le caratteristiche tecniche della macchina.

Tipo di confezione	a cuscino o fondo quadro con spigoli vivi o raggiati
Max larghezza fascia film	440 mm
Max diametro bobina	300 mm
Materiali	accoppiati PPL, AL/PE, carta/PE, PE e PP coestruso
Produttività meccanica	fino a 35 confezioni/min. (dipendente da tipologia materiale e da lunghezza confezione)
Voltaggio/Alimentazione 400 V 3Ph+N / 380 - 440 – 60 Hz	400 V 3Ph+N / 380 - 440 – 60 Hz
Potenza massima installata	2 KW

Si riporta l'immagine della confezionatrice verticale.



Fig. 6.31 Confezionatrice verticale Gandaus Micro VFFS 350

La ditta Gandaus realizza, oltre alla confezionatrice verticale, anche il sistema di carico della stessa. Per sistema di carico si intende l'accoppiata nastro elevatore – bilancia, i quali permettono rispettivamente di portare alla quota richiesta il materiale che deve essere imbustato, e di pesare la giusta quantità di chips da immettere in ogni busta termosaldata. Nei successivi stati di avanzamento del progetto si deciderà se acquistare direttamente dalla ditta Gandaus il sistema di carico, oppure se realizzarlo direttamente in azienda.



Fig. 6.32 Sistema di confezionamento completo

6.2.7 IL NASTRO SCATOLE

Il nastro scatole è un nastro trasportatore progettato per movimentare gli scatoloni riempiti con le bustine termosaldate contenenti il materiale da recuperare.

Esso dovrà trasportare 5 scatoloni di dimensione 650 x 320 x 400. Si è prevista la presenza di un operatore che ha il compito di poggiare sullo stesso gli scatoloni aperti e di scaricarli una volta che sono stati riempiti dalla confezionatrice verticale.

Il nastro scatole è costituito da 4 pulegge: la puleggia motrice, la puleggia condotta e le due pulegge di ritorno, realizzate tutte in alluminio 6061-T6.

Sono presenti inoltre due sponde in lamiera che hanno la funzione di facilitare il posizionamento corretto degli scatoloni sul nastro, oltre che inibire sbandamenti durante il riempimento degli stessi. Su di esse si sono eseguiti dei fori per l'alloggiamento degli stopper pneumatici, i quali sincronizzati con la confezionatrice grazie a delle fotocellule, consentono agli scatoloni di procedere o meno lungo la direzione di scorrimento del nastro, assicurando così la corretta posizione durante il loro caricamento.

Le sponde in lamiera sono ancorate al telaio della macchina. Quest'ultimo è costituito da due spalle tenute insieme da due distanziali.

Di seguito si riportano gli aspetti chiave che hanno riguardato la progettazione.

La puleggia motrice corrisponde ad un rullo di diametro \varnothing 80 mm. Su di essa è stato ricavato uno scasso che sarà la sede della linguetta che consente il trasferimento del moto al nastro tramite il gruppo motore – riduttore. Il rullo in questione poggia sulle spalle del telaio per mezzo di due cuscinetti radiali a sfere SKF W 61906-2RS1.

La puleggia condotta di diametro esterno \varnothing 80 mm e interno \varnothing 42 mm ruota attorno ad un perno, che è fissato alle spalle del telaio, per mezzo di due cuscinetti radiali a sfere SKF 6004-2RSH. I cuscinetti sono distanziati dal telaio tramite degli anelli in ottone per evitare strisciamenti indesiderati del rullo. Tutto il gruppo della puleggia condotta, tramite un meccanismo composto da due viti TCEI M8 x 80 mm e un blocchetto tensionatore, può essere spostato nella direzione di scorrimento del nastro. Tale sistema permette il montaggio del nastro oltre che il tensionamento dello stesso.

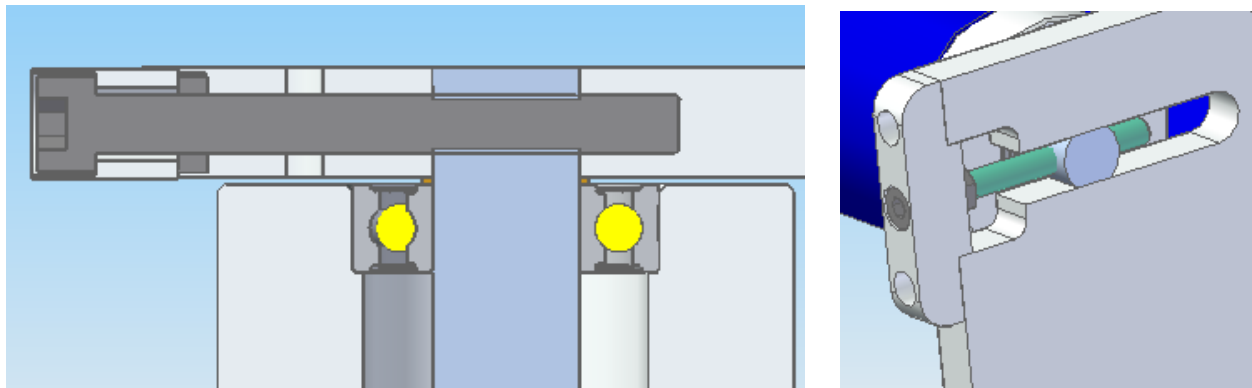


Fig. 6.33 Sistema tensionamento nastro

Le pulegge di ritorno consistono in due rulli di diametro \varnothing 40 mm ognuno dei quali ruota attorno ad un perno fissato alle spalle del telaio tramite due viti TCEI M8 x 50 mm. Per distanziare i rulli dal telaio, anche in questo caso sono stati utilizzati, ambo i lati di ogni rullo, dei distanziali circolari in ottone. La rotazione di ogni rullo è permessa grazie a due cuscinetti radiali a sfere W 6003-2RS1.

La puleggia motrice è movimentata tramite un gruppo motore – riduttore Bonfiglioli.

Si riportano i codici dei componenti commerciali:

- n°1 motore asincrono trifase “Bonfiglioli BN 56B 4 230-400-50 IP55 CLF B14” potenza nominale 90 W, regime di rotazione 1350 rpm
- n°1 riduttore a vite senza fine “Bonfiglioli VF 30 P1 70 P56 B14 B3” con rapporto di trasmissione 1:70
- n°1 braccio di reazione “Bonfiglioli Braccio Reazione VF30”
- n°2 cuscinetti radiali ad una corona di sfere “SKF W 61906-2RS1”
- n°2 cuscinetti radiali ad una corona di sfere “SKF 6004-2RSH”

- n°4 cuscinetti radiali ad una corona di sfere "SKF W 6003-2RS1"

Come già detto, gli scatoloni si muovono sul nastro sotto il controllo di stopper pneumatici. In particolare si utilizzano 4 cilindri pneumatici, 2 su ogni lato, per ogni scatolone. Ciò è stato fatto per evitare che lo scatolone si possa ribaltare a causa del movimento continuo del nastro.

Gli stopper sono fissati sulle sponde in lamiera in AISI 304, tramite dei supporti appositamente disegnati. Per evitare un carico laterale eccessivo, il pistoncino viene fatto scorrere su una guida Igus.



Fig. 6.34 Stopper pneumatico SMC CDJP2B16-15D-B (a sx), fotocellula Sick GTE6-P4212 (a dx)

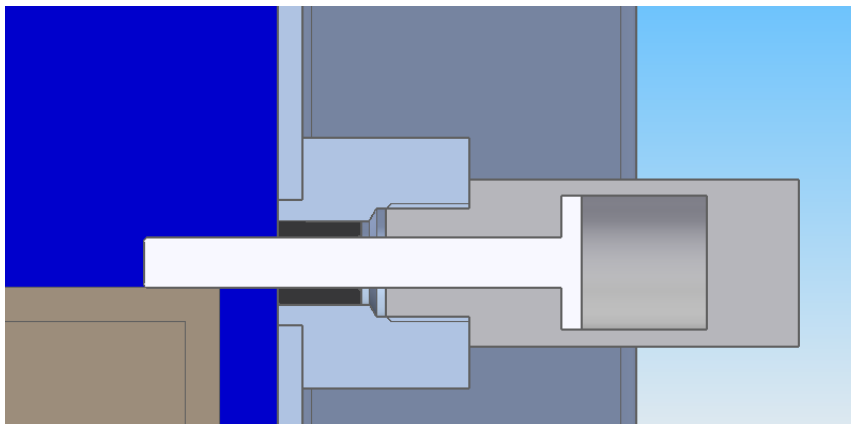


Fig. 6.35 Sezione in cui si può notare lo stopper pneumatico, il supporto in grigio, la guida Igus in nero e la superficie dello scatolone

Il sincronismo tra movimento del pistone e azionamento della confezionatrice è eseguito tramite delle fotocellule anch'esse fissate sulle sponde in lamiera tramite appositi supporti.

Si riportano i codici dei componenti commerciali appena citati:

- n°20 stopper pneumatici "SMC CDJP2B16-15D-B"
- n°20 cuscinetto strisciamento lineare "Igus msm-0610-10"
- n°5 fotocellula "Fotocellula Sick GTE6-P4212"

Si riportano le caratteristiche della fotocellula.

Principio di funzionamento	Sensore fotoelettrico energetico
Distanza max. di rilevamento	≤ 300 mm
Distanza di rilevamento	≤ 250 mm
Filtro polarizzato	No
Sorgente luminosa	LED PinPoint
Natura della luce	Luce rossa visibile
Dimensioni punto luminoso (distanza)	Ø 7 mm (90 mm)
Lunghezza d'onda	650 nm
Tensione di alimentazione UB	10 V DC - 30 V DC
Dimensioni (L x H x P)	12 mm x 31,5 mm x 21 mm
Collegamento	Connettore maschio M8, 4 poli
Peso	20 g
Consumo di corrente	30 mA
Tipo di commutazione	Funzionamento light on/dark on
Temperatura ambiente di funzionamento	-25 °C ... +55 °C

Le spalle del telaio in alluminio 6061-T6 sono tenute insieme da tre traverse anch'esse in alluminio.

Di seguito si riporta il rendering della macchina.

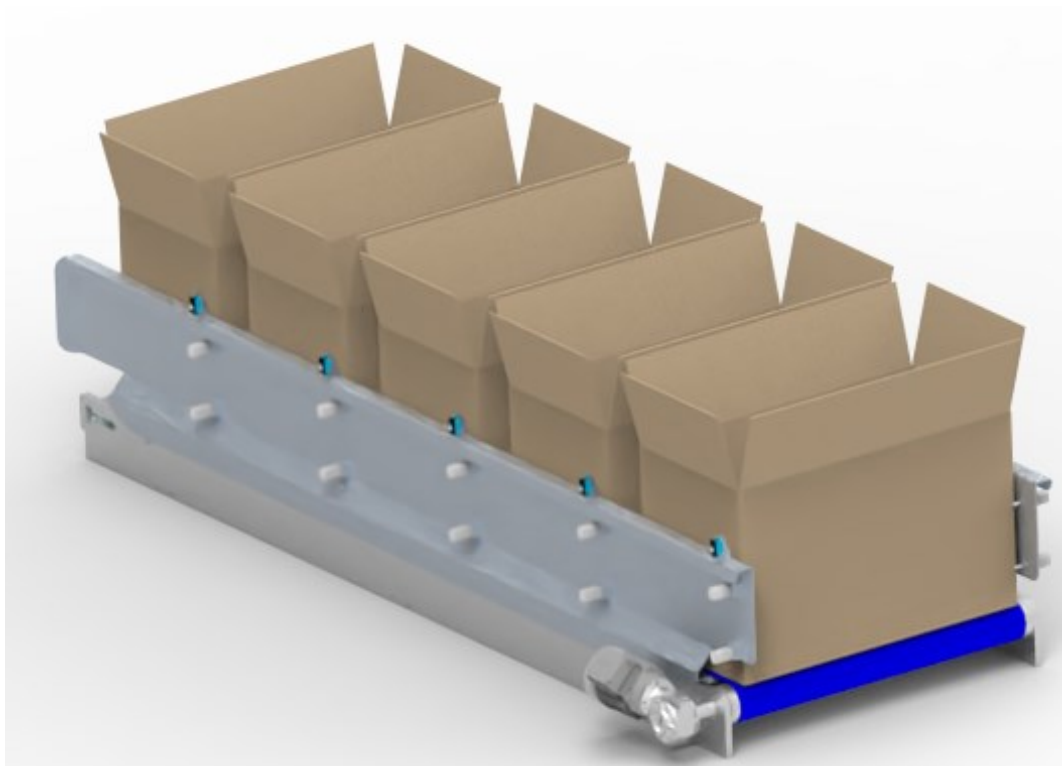


Fig. 6.36 Rendering del nastro scatole

Di seguito si riportano i calcoli che sono stati svolti per la scelta dell'accoppiata motore – riduttore della macchina.

Si è ipotizzato che ogni scatolone viene riempito con 15 buste di chips spellicolate da 500 g. Pertanto il peso totale dello scatolone e delle buste è di circa 8 kg. Essendo solo 3 scatoloni pieni durante la movimentazione, la massa totale è di circa 25 kg. Utilizzando un coefficiente di sicurezza di 1.5, la massa totale utilizzata per il calcolo è di circa 40 kg. Si è posto inoltre come vincolo di progetto che la velocità v a cui deve viaggiare il nastro è di circa 90 mm/s.

Si riportano i dati utilizzati per eseguire il dimensionamento:

- $\mu = 0.4$ coefficiente d'attrito rullo/nastro
- $\eta = 0.8$ rendimento di scorrimento rullo/nastro
- $D = 80$ mm diametro puleggia motrice

Come prima cosa si definisce la velocità angolare $\omega_{2\text{prog}}$ cui deve ruotare il rullo per assicurare una velocità lineare pari a v .

Dato che vale la relazione:

$$v = \omega R = \omega \frac{D}{2}$$

Si ottiene che:

$$\omega = \frac{2V}{D}$$

Inoltre dato che:

$$n = \frac{60}{2\pi} \omega$$

Si ottiene che la velocità angolare, in rpm, a cui deve ruotare la puleggia motrice vale 21,5 rpm.

A questo punto si determina la coppia resistente che deve essere erogata dal riduttore, da cui poi si potrà ricavare la potenza richiesta al motore.

Si determina la forza peso che agisce sul rullo:

$$F_p = m_{tot}g$$

Da cui si ottiene la forza d'attrito che si oppone al movimento del nastro:

$$F_{att} = \mu F_p$$

Si ottiene una forza d'attrito di 160 N.

La coppia resistente C_L vale 6.4 Nm ed è data dalla formula:

$$C_L = F_{att} \frac{D}{2}$$

Considerando le inefficienze inevitabili tra rullo e nastro, si determina la coppia che deve avere all'uscita del riduttore come segue:

$$C_{rid} = \frac{C_L}{\eta} = M_{R2} = 8 Nm$$

A questo punto seguendo le indicazioni riportate nel catalogo Bonfiglioli si determina P_{R1} :

$$P_{R1} = \frac{M_{R2} n_2}{9550 \eta_d}$$

Considerando che il rapporto di riduzione i è di circa 70, si ottiene che il valore di rendimento η_d vale 0.6, da cui si ottiene che P_{R1} vale 0.03 kW.

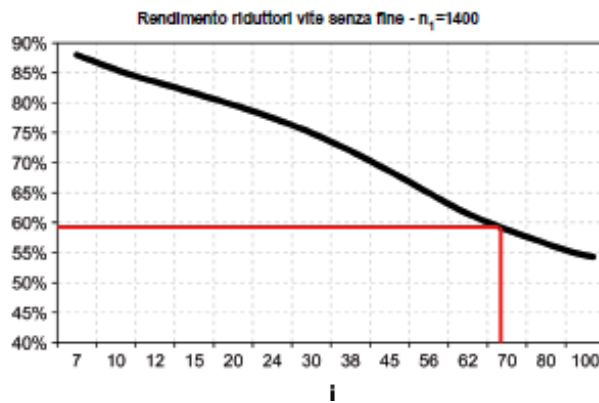


Fig. 6.37 Grafico per la definizione di η_d

Nella tabella "dati tecnici dei riduttori" del catalogo si scegliere un riduttore che per la velocità desiderata n_2 possieda una potenza nominale P_{n1} , tale che:

$$P_{n1} \geq P_{R1} f_s$$

Considerando $f_s = 1.2$ ottenuto dal grafico che segue considerando la natura del servizio, si è scelto un riduttore VF 30-70 con una $P_{n1} = 0.05 kW > 0.03 = P_{R1} f_s$

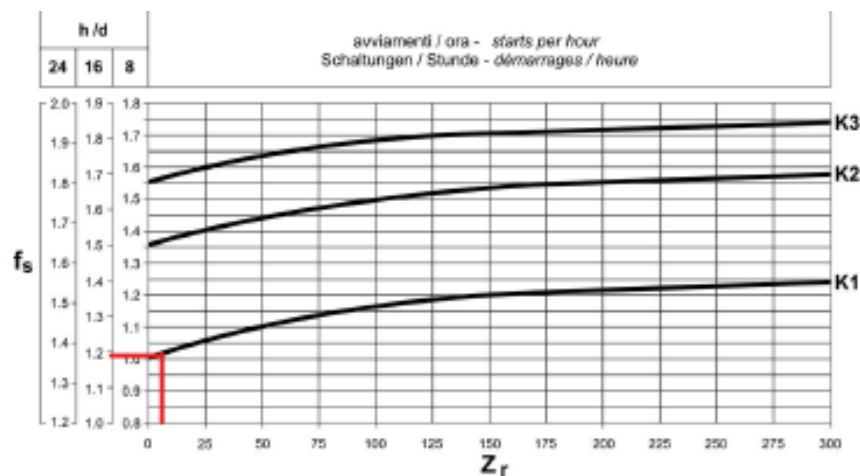


Fig. 6.38 Grafico per la definizione del fattore di servizio in base K^2

² K è un fattore che dipende dalla natura del servizio. In questo caso si è considerato un servizio di natura K1 ovvero uniforme. Gli altri fattori K2 e K3 corrispondono rispettivamente ad un servizio di natura media e pesante

A questo punto si seleziona il motore elettrico verificando che:

$$P_1 \geq P_{R1}$$

Si è scelto il motore BN56B4, con $P_1 = 0.09$ kW e con $n_1 = 1350$ rpm.

Avendo un rapporto di riduzione i pari a 70, considerato che la velocità di rotazione del motore scelto è di 1350 rpm, si ottiene una velocità di rotazione all'uscita del riduttore pari a 19.3 rpm, sufficientemente vicina ai 21.5 rpm richiesti.

Di conseguenza l'accoppiata motore – riduttore scelta soddisfa i requisiti di progetto.

A questo punto si eseguono ulteriori verifiche. Nello specifico si verifica che la coppia massima che il riduttore riesce ad erogare sia maggiore di quella richiesta, considerando il fattore di servizio. Deve valere:

$$M_{n2} \geq M_{c2} = M_{R2} f_s$$

Considerando i dati di targa del riduttore si ha che $M_{n2} = 11$ Nm $>$ $M_{c2} = 9.6$ Nm.

L'altra verifica necessaria è che il motore riesca ad emettere una coppia maggiore di quella richiesta per l'applicazione. Deve valere:

$$M_1 \geq C_{mot} = \frac{C_{rid}}{i \eta_d}$$

Considerando i dati di targa del motore si ha che $M_1 = 0.64$ Nm $>$ $C_{mot} = 0.19$ Nm.

Di seguito si riportano le tabelle utilizzate per la scelta.





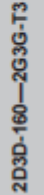





VF 30					11 Nm								
	n_2 min-1	η_s %	η_d %	 IEC	$n_1 = 1400$ min-1				$n_1 = 1400$ min-1				
					M_{n2} Nm	P_{n1} kW	R_{n2} N		M_{n2} Nm	P_{n1} kW	R_{n1} N	R_{n2} N	
VF 30_7	200	69	84	 2D3D-130-2G3G-T4	 2D3D-160-2G3G-T3	10	0.25	630		34			
VF 30_10	140	64	81			10	0.18	770					
VF 30_15	93	58	78			10	0.13	910					
VF 30_20	70	51	73			10	0.10	1030					
VF 30_30	47	41	65			10	0.08	1200					
VF 30_40	35	36	60			10	0.06	1340					
VF 30_60	23	29	51			11	0.05	1540					
VF 30_70	20.0	28	48			11	0.05	1600					

Fig. 6.39 Dati tecnici riduttori serie VF 30

4P		1500 min ⁻¹ - S1												50 Hz												
P _n kW		n min ⁻¹	M _n Nm	IE1	η (100%) %	η (75%) %	η (50%) %	cosφ	I _n 400V A	I _s I _n	M _s M _n	M _a M _n	J _m x 10 ⁻⁴ kgm ²	IM B5 	d.c. brake						a.c. brake					
															FD			FA			FD			FA		
															Mod	Mb Nm	Z _o 1/h	NB	SB	Mod	Mb Nm	Z _o 1/h	IM B5 	J _m x 10 ⁻⁴ kgm ²	IM B5 	J _m x 10 ⁻⁴ kgm ²
0.06	BN 56A	4	0.43	○	46.8	44.2	41.3	0.65	0.28	2.6	2.3	2.0	1.5	3.1	FD 02	1.75	10000	10000	13000	FA 02	1.75	13000	2.6	5.0		
0.09	BN 56B	4	0.64	○	51.7	47.6	42.9	0.60	0.42	2.6	2.5	2.4	1.5	3.1	FD 02	3.5	10000	10000	13000	FA 02	3.5	13000	3.0	5.4		
0.12	BN 63A	4	0.85	○	59.8	56.2	47.0	0.62	0.47	2.6	1.9	1.8	2.0	3.5	FD 02	3.5	7800	10000	10000	FA 02	3.5	10000	3.9	6.6		
0.18	BN 63B	4	1.30	○	54.8	52.9	52.5	0.67	0.71	2.6	2.2	2.0	2.3	3.9	FD 03	5	6000	9400	8000	FA 03	5	9400	8.0	8.3		
0.25	BN 63C	4	1.78	○	65.3	65.0	57.9	0.69	0.80	2.7	2.1	1.9	3.3	5.1	FD 03	7.5	4300	8700	7000	FA 03	7.5	8700	10.2	9.7		
0.25	BN 71A	4	1.73	○	63.7	62.2	59.1	0.73	0.78	3.3	1.9	1.7	5.8	5.1	FD 04	10	4100	8000	6000	FA 04	10	8000	16.6	12.0		
0.37	BN 71B	4	2.6	○	66.8	66.7	63.0	0.76	1.05	3.7	2.0	1.9	6.9	5.9	FD 04	15	4100	7800	5000	FA 04	15	7800	22	13.7		
0.55	BN 71C	4	3.8	○	69.0	68.9	68.8	0.74	1.55	4.1	2.3	2.3	9.1	7.3	FD 04	15	2600	5300	3000	FA 04	15	5300	27	15.1		
0.55	BN 80A	4	3.8	○	72.0	71.3	69.7	0.77	1.43	4.1	2.3	2.0	15	8.2	FD 04	15	4800	8000	6000	FA 04	15	8000	23	16.3		
0.75	BN 80B	4	5.1	●	75.0	74.5	69.3	0.78	1.85	4.9	2.7	2.5	20	9.9	FD 05	26	3400	6000	4000	FA 05	26	6000	32	20.3		
1.1	BN 80C	4	7.5	●	75.5	76.2	70.4	0.78	2.7	5.1	2.8	2.5	25	11.3	FD 05	26	3200	5900	3400	FA 05	26	5900	34	21.8		
1.1	BN 90S	4	7.6	●	76.5	76.2	72.2	0.77	2.70	4.6	2.6	2.2	21	12.2	FD 05	26	3400	6000	4000	FA 05	26	6000	32	20.3		
1.5	BN 90LA	4	10.2	●	78.7	78.5	74.9	0.77	3.6	5.3	2.8	2.4	28	13.6	FD 05	26	3200	5900	3400	FA 05	26	5900	34	21.8		
1.85	BN 90LB	4	12.7	●	78.6	78.9	77.2	0.79	4.3	5.1	2.8	2.6	30	15.1	FD 05	26	3200	5900	3400	FA 05	26	5900	34	21.8		
2.2	BN 100LA	4	14.9	●	81.1	81.4	79.9	0.75	5.2	4.5	2.2	2.0	40	18	FD 05	40	2600	4700	3000	FA 05	40	4700	44	25		
3	BN 100LB	4	20	●	82.6	83.8	83.7	0.77	6.8	5.0	2.3	2.2	54	22	FD 05	40	2400	4400	3000	FA 05	40	4400	58	29		
4	BN 112M	4	27	●	84.4	84.2	81.6	0.81	8.4	5.6	2.7	2.5	98	30	FD 06S	60	1400	107	1400	FA 06S	60	2100	107	42		
5.5	BN 132S	4	36	●	84.7	84.8	82.5	0.81	11.6	5.5	2.3	2.2	213	44	FD 06	75	1050	223	1050	FA 06	75	1200	223	58		
7.5	BN 132MA	4	50	●	86.0	86.3	85.3	0.81	15.5	5.7	2.5	2.4	270	53	FD 06	100	950	280	950	FA 06	100	1000	280	71		
9.2	BN 132MB	4	61	●	86.4	88.6	87.5	0.81	18.8	5.9	2.7	2.5	319	59	FD 07	150	900	342	900	FA 07	150	900	342	77		
11	BN 160MR	4	73	●	87.6	87.8	86.0	0.81	22.4	6.0	2.7	2.5	360	70	FD 07	150	850	382	850	FA 07	150	850	382	88		
15	BN 160L	4	98	●	88.7	88.5	88.4	0.81	30	6.0	2.3	2.1	650	99	FD 08	200	750	725	750	FA 08	200	750	710	128		
18.5	BN 180M	4	121	●	89.3	89.5	89.2	0.81	37	6.2	2.6	2.5	790	115	FD 08	250	700	865	700	FA 08	250	700	850	144		
22	BN 180L	4	144	●	89.9	90.0	90.0	0.80	44	6.4	2.5	2.5	1250	135	FD 09	300	400	1450	400	FA 08	300	400	1450	175		
30	BN 200L	4	196	●	91.4	91.7	91.0	0.80	59	7.1	2.7	2.8	1650	157	FD 09	400	300	1850	300	FA 08	400	300	1850	197		

○ = n.a. ● = IE1

BN

Fig. 6. 40 Dati tecnici motori serie BN 4P

VII CAPITOLO – L’AUTOMATIZZAZIONE DELLA LINEA DI RICICLAGGIO

Nel capitolo precedente si è parlato delle macchine che si sono realizzate/acquistate nella linea di riciclaggio di preimpregnati.

Il compito del sottoscritto è stato di provvedere all’automatizzazione della linea, in particolare alla realizzazione di alcune macchine e sistemi, come gli schemi pneumatici, il nastro scatole e il sistema di visione, necessari per rendere automatico il funzionamento dell’impianto.

Il primo step che si è svolto per eseguire l’automatizzazione è consistito nello studio del layout che l’impianto deve avere. Come già accennato, la linea si compone di due blocchi principali. Il primo blocco ha la funzione di sezionare in chips i fogli di prepregs da recuperare, mentre nel secondo blocco si svolgono più operazioni, tutte con l’obiettivo di eliminare il film protettivo dalle chips che successivamente verranno imbustate.

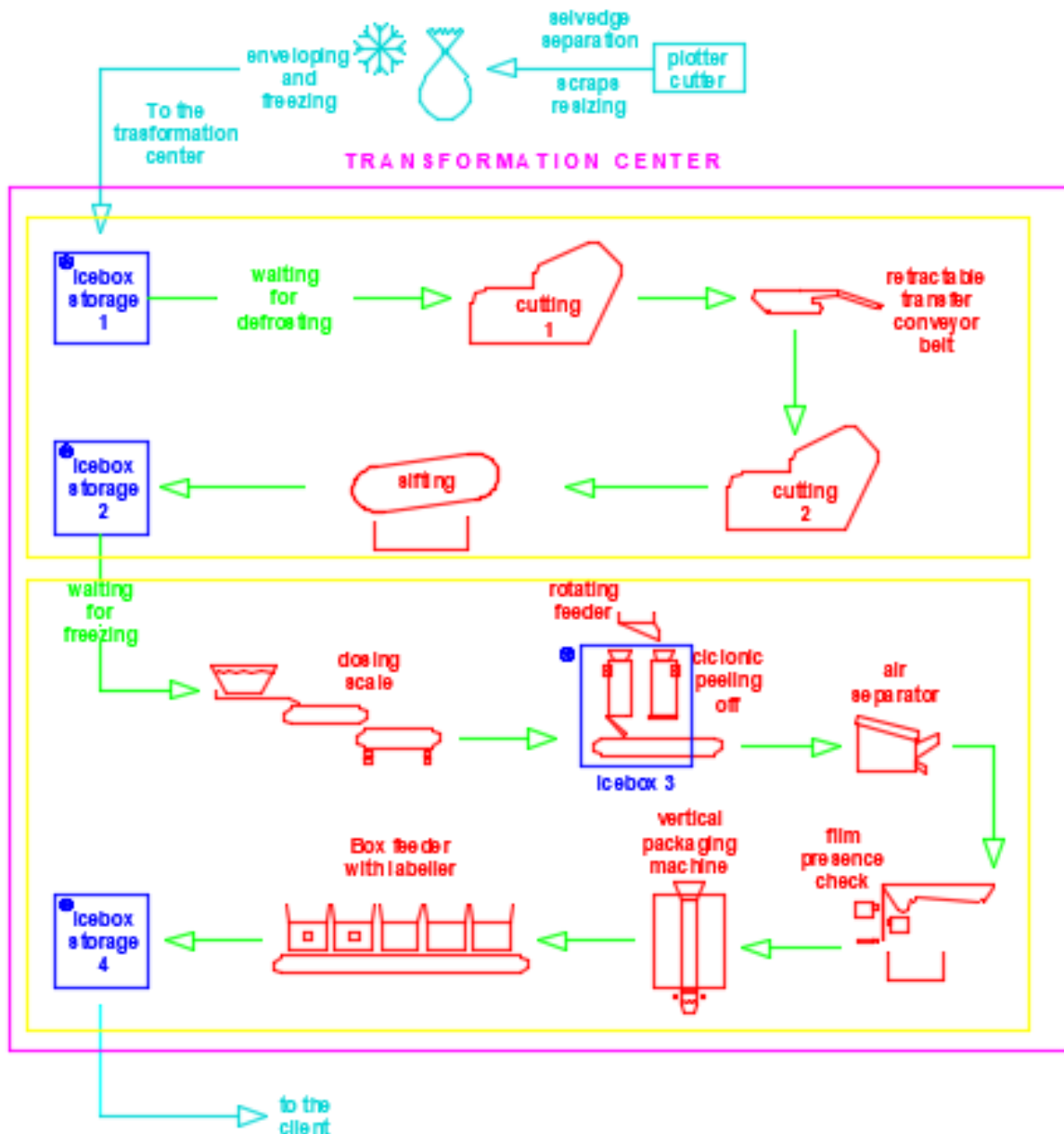


Fig. 7.1 Layout approssimativo linea di riciclaggio

Tramite il plotter di taglio si sezionano gli sfridi rimanenti dal nesting in fogli racchiusi in una sagoma di 200 x 200 mm oltre ad eliminare la cimosa. A questo punto gli sfridi vengono stoccati e congelati per inibire la polimerizzazione della resina prima di entrare al centro di recupero.

Blocco 1

La prima fase del ciclo di recupero consiste nello scongelamento dei fogli di prepregs che successivamente vengono introdotti nella stazione di taglio. Quest'ultima si compone delle due taglierine (cutting) e del nastro retrattile, tramite il quale avviene il trasferimento automatico del materiale. Si procede poi alla vagliatura delle chips ottenute tramite il setaccio rotativo (sifting).

Blocco 2

Le chips una volta setacciate vengono ricongelate per poi essere immesse nelle spellicolatrici pneumatiche (peeling), dopo essere state pesate da un sistema di dosaggio. Si fa notare che le spellicolatrici sono posizionate in un ambiente refrigerato. A questo punto le chips vengono trasferite alla stazione di defogliatura, in cui tramite un separatore ad aria, si eliminano le pellicole che erano rimaste tra il materiale da recuperare. Successivamente il materiale viene introdotto nella stazione di controllo (check) per verificare la conformità della chips. Infine le chips di prepregs spellicolate vengono imbustate tramite una confezionatrice verticale e introdotte in appositi scatoloni, i quali verranno stoccati a basse temperature per inibire la cura della resina termoindurente (*vedi capitolo 1.3.1.1*). Gli scatoloni verranno poi inviati alle aziende utenti finali.

7.1 IL BLOCCO 1

Il blocco 1 è composto fondamentalmente delle due taglierine e del nastro retrattile di trasferimento.

Le operazioni di automatizzazione del blocco 1 sono consistite nella messa a punto di un sistema con il quale eseguire il taglio dei fogli di prepregs, utilizzando le due taglierine e il nastro retrattile, in maniera automatica. In relazione a quanto detto, si è studiata la disposizione con la quale posizionare le macchine, si è realizzato lo schema pneumatico del nastro retrattile e si sono dettate al tecnico elettronico le condizioni che il quadro elettrico doveva avere per il comando dell'intero blocco.

Un altro aspetto che ha interessato il blocco 1, riguardo l'industrializzazione della linea, è la sicurezza. Infatti, data la presenza di macchine da taglio, è stato necessario prevedere sistemi di prevenzione per salvaguardare l'incolumità degli operatori che vi lavorano.

7.1.1 LA DISPOSIZIONE DELLE MACCHINE

Per trasferire le chips uscenti dalla prima taglierina alla seconda in maniera ortogonale, in modo da ottenere chips di forma rettangolare, si è realizzato un telaio a gradoni, che ha permesso di posizionare il nastro retrattile in serie con la prima taglierina, e perpendicolarmente a servizio della seconda.



Fig. 7.2 Blocco 1

Per svolgere correttamente la propria funzione, il nastro retrattile deve essere sincronizzato con l'uscita delle chips dalla prima taglierina.

La sincronizzazione è eseguita in maniera automatica grazie ad apposite elettrovalvole che comandano il movimento dei 4 cilindri presenti sulla macchina. Si è quindi realizzato lo schema pneumatico.

Prima di continuare con la spiegazione dello stesso, si esegue una breve panoramica sui circuiti pneumatici, che risulterà utile anche più avanti.

7.1.2 I CIRCUITI PNEUMATICI

La pneumatica risulta una valida opzione quando si vuole svolgere automazione industriale. Grazie ad essa infatti, si riescono a realizzare impianti automatici semplici da controllare, a basso costo e allo stesso tempo molto efficaci.

Si riporta di seguito uno schema che riassume tutto il percorso che il fluido segue per azionare un impianto automatico.

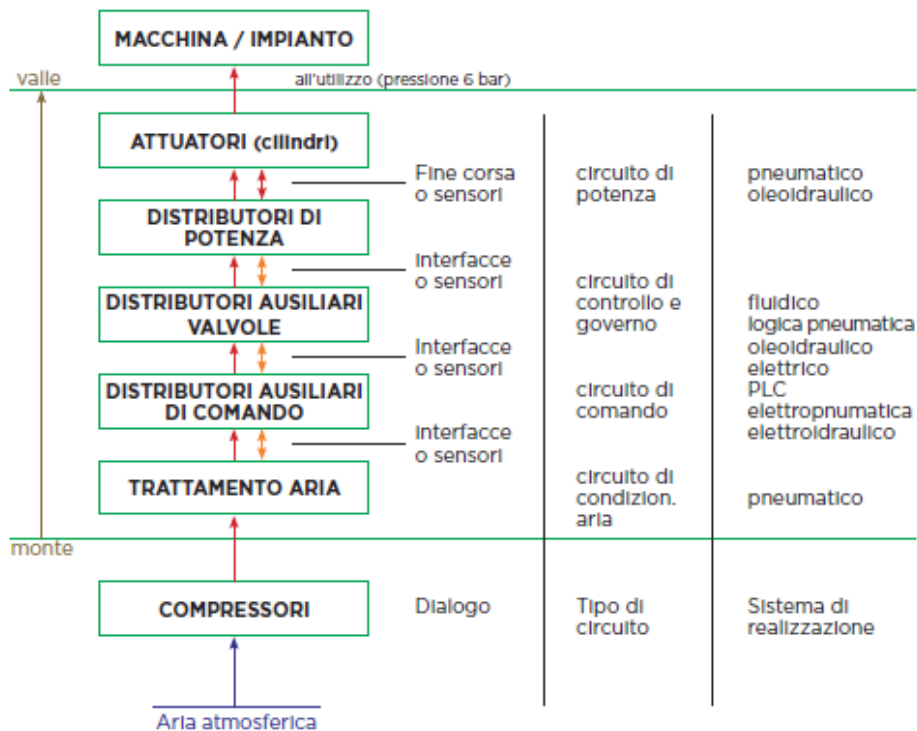


Fig. 7.3 Struttura circuitale di un impianto pneumatico.

Il primo componente di uno schema pneumatico è il gruppo di trattamento dell'aria, detto gruppo FRL (filtro – regolatore – lubrificatore). Infatti l'aria, anche se trattata subito dopo il compressore, nel momento in cui arriva all'utenza, deve essere ulteriormente condizionata affinché sia idonea per le apparecchiature che andrà a servire. Il gruppo FRL ha anche il compito di regolare la pressione in base a quella richiesta dall'applicazione e se necessario lubrificare l'aria.

Ogni componente pneumatico è rappresentato da un simbolo. Ciò facilita la lettura degli schemi pneumatici agli operatori.

Esistono diverse tipologie di gruppi FRL, ovviamente ognuna con un simbolo diverso corrispondente. Si riporta un esempio.



Fig. 7.4 Simbolo gruppo FRL composto da valvola lucchettabile, filtro con scarico manuale, filtro riduttore integrato con elettrovalvola

Dopo il gruppo FRL si trovano le valvole direzionali, le quali permettono di deviare il flusso dell'aria compressa tra le vie interne delle stesse, tramite comandi provenienti dall'esterno.

Le valvole sono caratterizzate da numero di vie, numero di posizioni e tipo di azionamento.

Il numero di vie di una valvola può essere individuato contando il numero di attacchi presenti sul corpo, mentre il numero di posizioni è quello che la valvola può assumere quando azionata dai comandi, compresa la posizione di riposo.

Nella prassi le valvole si indicano con due numeri separati da uno slash (/). Il primo numero indica il numero di vie, mentre il secondo il numero di posizioni.

Si evidenzia che le valvole possono essere monostabili o bistabili. Le valvole monostabili sono così dette perché possiedono una posizione di riposo predefinita a differenza delle valvole bistabili (o a memoria) che ricordano l'ultimo segnale ricevuto dal comando.

Le valvole maggiormente utilizzate sono le:

- 2/2: usate come semplici valvole di intercettazione
- 3/2: usate per comandare cilindri a semplice effetto³
- 5/2: usate per comandare cilindri a doppio effetto

Di seguito si eseguirà un focus sulle valvole 5/2 dato che sono state utilizzate negli schemi pneumatici realizzati per il nastro retrattile e la spellicolatrice pneumatica per comandare i cilindri a doppio effetto.

Per l'azionamento di un cilindro a doppio effetto sono necessarie due vie complementari che alimentano le due camere del cilindro e altre due vie di scarico. A queste si deve ovviamente aggiungere la via di alimentazione. La somma fa 5.

Si parla di due posizioni perché nella prima posizione si alimenta una camera del cilindro e si scarica l'altra, viceversa nella seconda posizione.

Le valvole sono indicate con un numero di quadri quante sono le posizioni. Di seguito si riporta il simbolo di un'elettrovalvola 5/2.

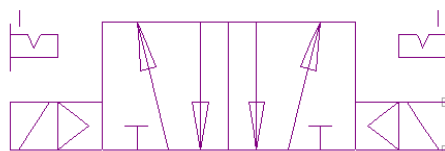


Fig. 7.5 Simbolo elettrovalvola 5/2 in cui si notano le due posizioni

Il tipo di azionamento può essere manuale, meccanico, pneumatico o elettrico.

Il tipo di azionamento più utilizzato è quello elettrico. Si parla in questo caso di elettrovalvole. Esse permettono di trasformare un segnale elettrico in uno pneumatico. Da quanto detto si capisce bene quanto siano utili per realizzare sistemi automatici.

Successivamente alle valvole si trovano dispositivi di controllo delle caratteristiche dell'aria, in termini di pressione e portata.

³ Per le valvole 2/2 e 3/2 è bene specificare la posizione di riposo. Nello specifico queste possono essere normalmente aperte (NA) se l'aria procede attraverso la valvola senza nessun comando oppure normalmente chiuse se è necessario un comando per aprire la valvola e consentire il passaggio del flusso

Si parla in questo caso di regolatori di flusso. Questi elementi permettono di conferire all'aria compressa le proprietà ottimali per far svolgere all'apparecchiatura finale la funzione desiderata.

Il simbolo dei regolatori di flusso è il seguente.

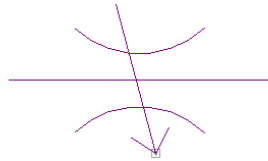


Fig. 7.6 Simbolo regolatore di flusso

Infine si arriva all'apparecchiatura che sfrutta l'aria compressa per svolgere un determinato compito. I componenti più utilizzati negli impianti pneumatici sono ovviamente i cilindri, ma nella pratica industriale stanno prendendo piede anche pinze pneumatiche, ventose, ecc.

I cilindri pneumatici, noti anche come attuatori pneumatici, sono utilizzati per fornire movimento e forza lineare o rotante a sistemi, macchine e processi automatizzati.

Sostanzialmente i cilindri sono costituiti da due testate, una camicia, uno stelo solidale ad un pistone, una bronzina di guida dello stelo e dalle guarnizioni di tenuta del pistone e dello stelo che è anche provvista di un anello raschiapolvere.

Esistono diverse tipologie di cilindri lineari:

- a semplice effetto: sviluppa la spinta in una sola direzione. Lo stelo si riporta nella posizione di riposo per mezzo di una molla;
- a doppio effetto: sviluppa una forza sia in spinta che in trazione in base a quale camera viene alimentata. La forza in spinta e in trazione sono di diversa entità a parità di pressione dato che cambia l'aria per la quota parte dovuta alla presenza dello stelo.

Ovviamente la forza sviluppata da un cilindro è data dalla formula seguente:

$$F = p A$$

In cui p: pressione alimentazione camera

A: superficie della camera

Il base al carico che si deve movimentare, alla geometria richiesta dall'applicazione e al tipo di movimento che si vuole ottenere, si sceglie la taglia del cilindro in termini di alesaggio e corsa.

Negli schemi pneumatici i cilindri sono rappresentati come segue:

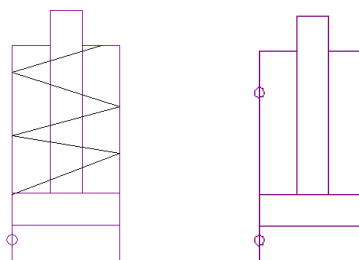


Fig. 7.7 Simbolo cilindro a semplice effetto (a sinistra), simbolo cilindro a doppio effetto (a destra)

7.1.2.1 LO SCHEMA PNEUMATICO DEL NASTRO RETRATTILE

Il nastro retrattile è equipaggiato con 4 cilindri pneumatici che devono essere opportunamente comandati.

Da quanto detto nel capitolo VI, il nastro retrattile è costituito da un blocco fisso e da un blocco mobile. Il blocco mobile viene movimentato per mezzo di due cilindri "SMC CP96SDB32-250C" tramite quattro pattini che si muovono su due guide. In questa maniera si riesce a portare la penna mobile del nastro retrattile in prossimità del nastro della seconda taglierina.

La penna a sua volta è ulteriormente movimentata da due cilindri "SMC CD85N16-50C-B" che hanno il compito di facilitare la posa delle chips sulla seconda taglierina.

Per la movimentazione dei cilindri in questione si è realizzato uno schema pneumatico. In esso sono riportati (a ritroso rispetto alla struttura circuitale di un generico impianto pneumatico riportata in Fig. 7.3) i regolatori di flusso, le elettrovalvole, il gruppo FRL, i diametri nominali dei tubi, oltre che tutti i componenti di raccordo.

Di seguito si riporta lo schema.

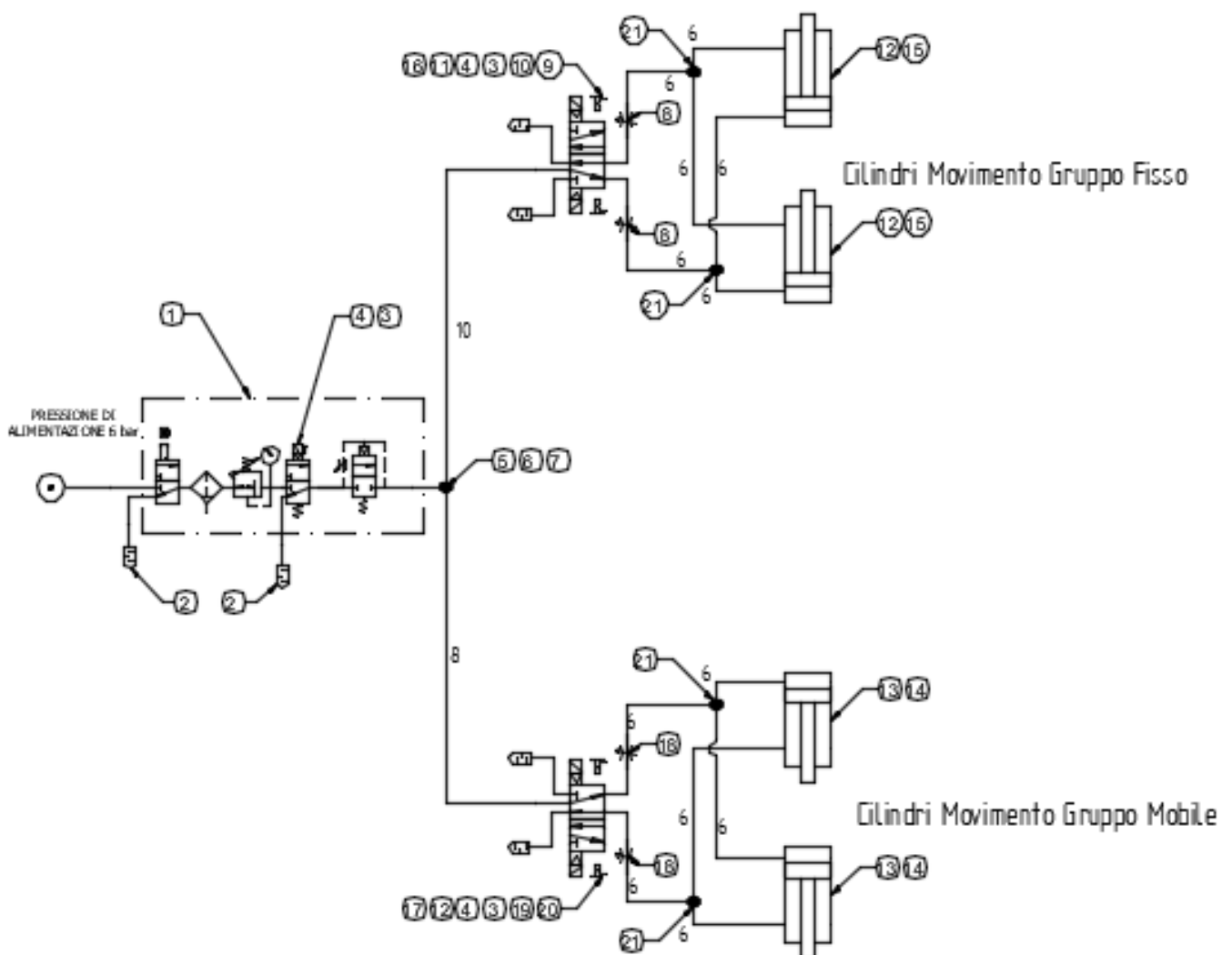


Fig.7.8 Schema Pneumatico nastro retrattile di trasferimento

DATA:	09/04/2021	CODICE ASSIEME: COMPONENTI PNEUMATICI	
POS.	CODICE	DESCRIZIONE	Q.TA
1	MX2-1/2"-V01 MX2-1/2-FR004 MX2-1/2-V16	Gruppo FRL: valvola intercettazione lucchettabile + filtro regolatore + valvola intercettazione G1/2"	1
2	Camozzi 2931 1/2	Silenziatore in polietilene G 1/2"	2
3	Camozzi U7H	Solenoide 24V AC	9
4	Camozzi 122-701	Connettore per solenoidi 24 AC/DC con varistore e led	9
5	Camozzi S6430 12-1/2	Raccordo rapido a T laterale girevole maschio G1/2" tubo ø12	1
6	Camozzi 6800 8-12	Riduzione 8-12	2
7	Camozzi 6800 10-12	Riduzione 10-12	2
8	Camozzi PMCU 706-1/4-6	Regolatore di flusso unidirezionale serie PMCU G1/4" tubo ø6	2
9	Camozzi 354-011-02	El. Valvola 5/2 bistabile, az e riposizionamento pneumatico (G1/4")	1
10	Camozzi 2901 1/4-17	Silenziatore G 1/4"	2
11	Camozzi 6522 6-1/4	Gomito maschio girevole metrico-cilindrico G1/4" tubo ø6	2
12	Camozzi 6522 6-1/8	Gomito maschio girevole metrico-cilindrico G1/8" tubo ø6	6
13	Camozzi 6522 6-M5	Gomito maschio girevole metrico-cilindrico M5 tubo ø6	4
14	SMC CD85N16-50C	Cilindro SMC CD85N16-50C	2
15	SMC CP96SDB32-250C	Cilindro SMC CP96SDB32-250C	2
16	Camozzi 6512 10-1/4	Diritto maschio metrico cilindrico	1
17	Camozzi 6512 8-1/8	Diritto maschio metrico cilindrico	1
18	Camozzi PMCU 706-1/8-6	Regolatore di flusso unidirezionale serie PMCU G1/8" tubo ø6	2
19	Camozzi 2901 1/8	Silenziatore G 1/8"	2
20	Camozzi 358-011-02	El. Valvola 5/2 bistabile, az e riposizionamento pneumatico (G1/8")	1
21	Camozzi 6540 6	T intermedio 6	4

Fig.7.9 Distinta base dei componenti dello schema pneumatico del nastro retrattile di trasferimento

Come si può notare a prima vista sono state utilizzate 2 elettrovalvole direzionali anche se i cilindri da comandare sono 4.

Ciò è stato fatto perché sia i cilindri che movimentano tutto il blocco mobile che quelli che azionano la penna del nastro, devono muoversi contemporaneamente a coppia. Questa condizione è fondamentale per evitare, ad esempio, che i pattini si muovano fuori asse, situazione in cui si potrebbero verificare usure premature o addirittura inceppamenti della slitta.

Pur servendosi di due valvole uguali, risulterebbe estremamente difficoltoso sincronizzare i due cilindri, quindi si è utilizzata un'unica elettrovalvola per ogni coppia. Essendo due le coppie di cilindri per la macchina in questione, si sono utilizzate in tutto 2 elettrovalvole direzionali.

Per far in modo che due cilindri si muovano contemporaneamente in coppia si è collegata la camera di mandata di ognuno con un tubo di uguale lunghezza. A questo punto i due tubi sono fatti confluire in un unico tubo, tramite un raccordo a T intermedio, che a sua volta arriva fino ad una delle due uscite dell'elettrovalvola 5/2. Lo stesso viene fatto per le camere di ritorno.

I cilindri per la movimentazione del nastro non devono vincere forze significative, dato che il peso delle chips può essere considerato trascurabile, di conseguenza la loro scelta si è basata fondamentalmente su aspetti geometrici.

Di seguito si determina il consumo d'aria dei cilindri necessario per la scelta corretta delle elettrovalvole.

CILINDRO SMC CP96SDB32-250C

Diametro $D = 32 \text{ mm}$

Corsa $c = 250 \text{ mm}$

Pressione di lavoro $p = 6 \text{ bar}$

Tempo minimo di percorrenza della corsa $t = 1 \text{ sec}$

Si calcola la superficie di spinta A [mm^2]:

$$A = \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

Da cui si determina il volume della camera di spinta V [mm^3]:

$$V = A c$$

A questo punto si calcola la quantità d'aria che la camera di spinta ospita ad una certa pressione di lavoro:

$$Q = K [V(1 + p)]$$

Con $K = 1.4$ per aria⁴

Trasformando il volume da mm^3 a dm^3 (diviso 100^3) e considerando la pressione in bar si ottiene Q in NI.

A questo punto si può calcolare la portata d'aria richiesta al secondo, essendo noto in quanto tempo il pistone deve eseguire la corsa:

$$Q_{rich} = \frac{Q}{t}$$

Sostituendo i dati, considerando un fattore di sicurezza pari a 3, si ottiene una portata d'aria richiesta al cilindro di 6 NI/s , ovvero 360 NI/min .

Dato che, per quanto già spiegato, con un'elettrovalvola si controllano due cilindri, la portata che essa deve riuscire ad elaborare è pari a circa 720 NI/min .

Dal catalogo Camozzi si è scelta l'elettrovalvola 5/2 bistabile da G1/4 specifica per comandare cilindri a doppio effetto con codice 354-011-02 5/2 G1/4.

Si verifica:

- portata nominale: $Q_{nom} = 1300 \text{ NI/min} > 720 \text{ NI/min} = Q_{rich}$

- pressione di esercizio: range esercizio $1.5 \div 10 \text{ bar}$

L'elettrovalvola scelta rispetta le condizioni di utilizzo riportate nel catalogo.

⁴ 1.4 è un fattore moltiplicativo da considerare dato che attraverso la valvola non si verifica una trasformazione adiabatica quindi non vale la legge di Boyle $P V = \text{cost}$, bensì vale la legge $P V^K = \text{cost}$, con $K=1.4$ per l'aria. Quindi il volume d'aria presente nel cilindro è maggiore rispetto al caso ideale



Fig. 7.10 Elettrovalvola 354-011-02 G1/4 su cui sono montati i solenoidi

CILINDRO SMC CD85N16-50C-B

Diametro $D = 16 \text{ mm}$

Corsa $c = 50 \text{ mm}$

Pressione di lavoro $p = 6 \text{ bar}$

Tempo minimo di percorrenza della corsa $t = 0,5 \text{ sec}$

Eseguendo i calcoli precedenti si ottiene una portata richiesta alla valvola di circa 100 NI/min.

Dal catalogo Camozzi si è scelta l'elettrovalvola 5/2 bistabile da G1/8 specifica per comandare cilindri a doppio effetto con codice 358-011-02 5/2 G1/8.

Si verifica:

- portata nominale: $Q_{nom} = 700 \text{ NI/min} > 100 \text{ NI/min} = Q_{rich}$
- pressione di esercizio: range esercizio $1,5 \div 10 \text{ bar}$

L'elettrovalvola scelta rispetta le condizioni di utilizzo riportate nel catalogo.



Fig. 7.11 Elettrovalvola 358-011-02 G1/8

A valle di ogni elettrovalvola, su entrambe le uscite, sono stati previsti dei regolatori di flusso. Questi permettono di regolare la portata di aria compressa che arriva ai cilindri in maniera rapida anche dall'operatore che gestisce la macchina.

Di seguito si riporta l'immagine di un generico regolatore di flusso.



Fig. 7.12 Regolatore di flusso

Infine si è proceduti alla scelta del gruppo FRL. Il gruppo di trattamento dell'aria compressa è scelto in base alla portata richiesta e alla caduta di pressione che quest'ultimo introduce. La caduta di pressione deve essere compresa tra 0.01 e 1 bar.

Si è utilizzato un gruppo assemblabile composto da valvola di intercettazione lucchettabile, filtro-regolatore e valvola di intercettazione NC da G1/2, con codici rispettivamente di MX2-1/2"-V01, MX2-1/2-FR004, MX2-1/2-V16.

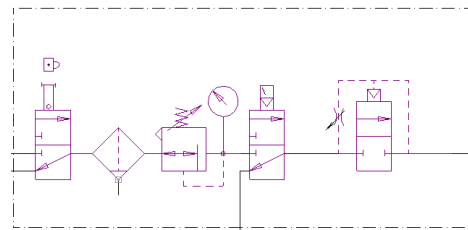


Fig. 7.13 Gruppo FRL

Di seguito si riporta una foto dell'impianto ad aria compressa installato sul nastro retrattile di trasferimento.



Fig. 7.14 Schema pneumatico nastro retrattile

7.1.3 LA SICUREZZA DELLE TAGLIERINE

Un altro aspetto importante che si è dovuto affrontare nel processo di automatizzazione del blocco 1 è la sicurezza. Qualsiasi macchina infatti, per poter essere idonea all'utilizzo, deve rispettare certi criteri di sicurezza, dettati dalle normative vigenti. E' fondamentale quindi equipaggiare le attrezzature potenzialmente pericolose per l'uomo di appositi sensori per scongiurare tutti i possibili rischi.

In questo caso, essendo presenti macchine da taglio che vengono, almeno per adesso, caricate direttamente dall'operatore, si è dovuto progettare un sistema che permettesse di interrompere il funzionamento della taglierina nelle situazioni pericolose.

Ogni taglierina è dotata di appositi carter con lo scopo di rendere inaccessibili all'operatore zone potenzialmente pericolose. Un esempio è il carter in lamiera che racchiude la trasmissione a catena della macchina, oppure le protezioni in lexan/policarbonato fissate in diversi punti della macchina.

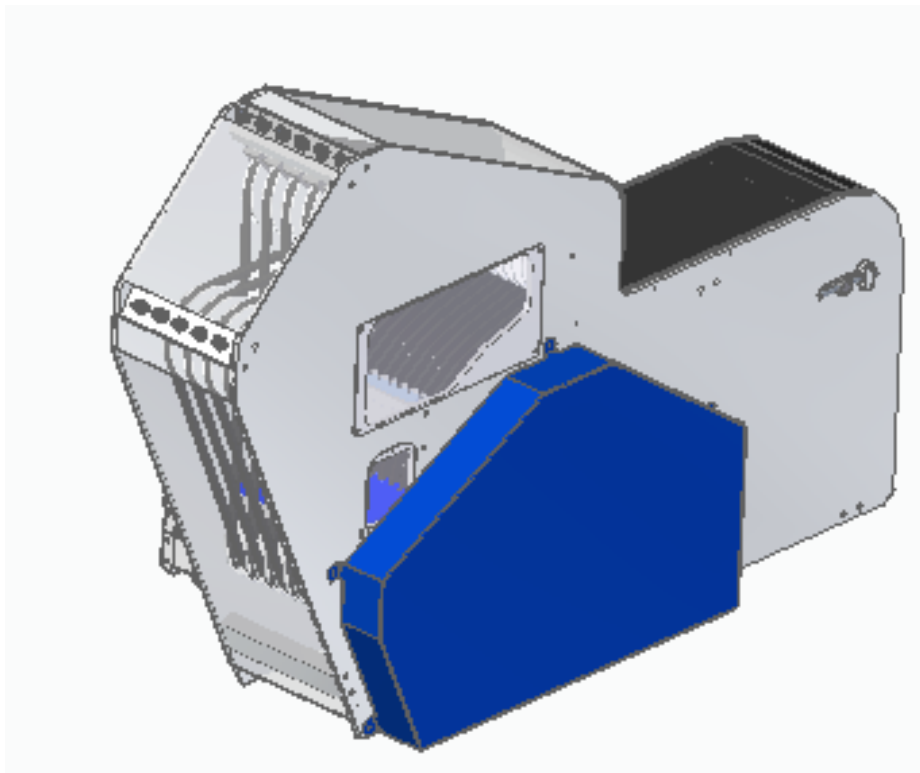


Fig. 7.15 Rendering della taglierina in cui si possono notare i carter in lexan/policarbonato a protezione delle cinghie e il carter in lamiera a protezione della trasmissione

L'unica zona che rimane potenzialmente pericolosa per l'operatore è la feritoia lasciata libera per il passaggio dei fogli di prepregs. Successivamente a tale feritoia, vi è l'incontro del nastro del rullo con le cinghie trapezoidali.

Se per qualsiasi motivo l'operatore dovesse introdurre la mano all'interno della feritoia, questo potrebbe rimanere incastrato tra nastro e cinghie che a loro volta tenderebbero a 'risucchiarlo' verso il blocco lame. E' evidente che tale situazione risulta essere molto pericolosa. Da qui si è partiti per mettere a punto un sistema semplice ma efficace, che possa evitare il verificarsi di queste circostanze.

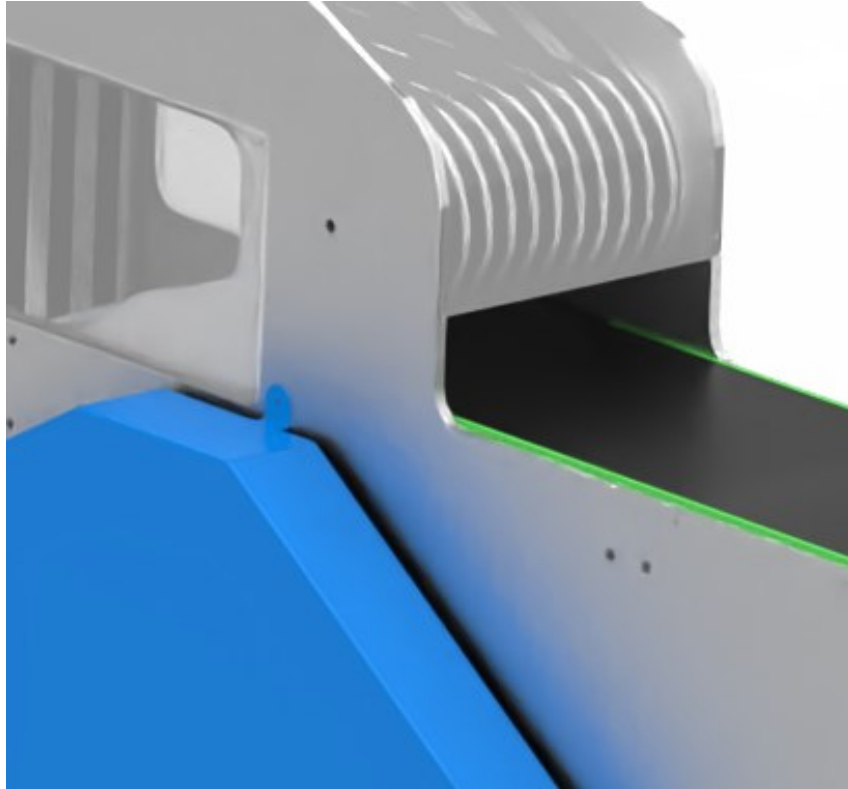


Fig. 7.16 Rendering della taglierina in cui si notano la feritoia di ingresso dei fogli di prepregs e i carter di protezione della trasmissione (in lamiera), delle lame e delle cinghie (in lexan)

Il sistema consiste in un ponte in lexan/policarbonato semplicemente appoggiato sul telaio della macchina tramite 4 viti a colletto, posizionato in prossimità della feritoia. Su di esso è fissato un sensore magnetico.

Se l'operatore o qualsiasi altra persona procede alla rimozione del ponte, o semplicemente prova ad infilare la mano all'interno della feritoia, il ponte per la sua geometria, si solleva scorrendo sulle viti calibrate. A questo punto l'interruttore magnetico si stacca e con esso si interrompe l'alimentazione della macchina.

Di seguito si riporta un'immagine del ponte.

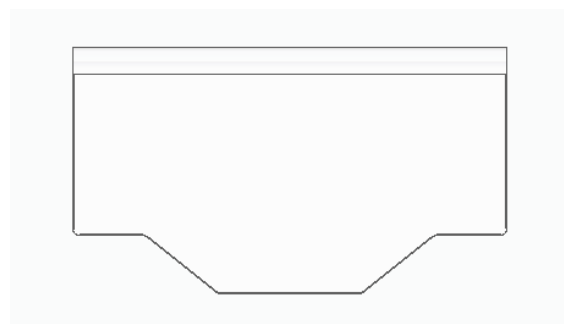
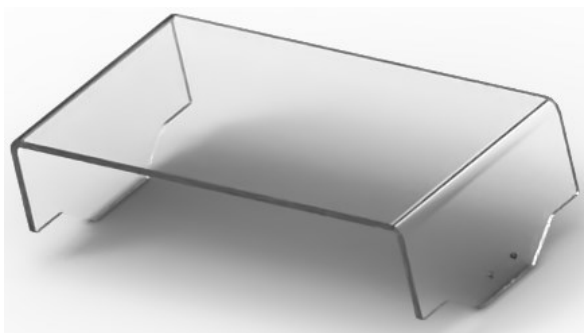


Fig. 7.17 Rendering del ponte in lexan

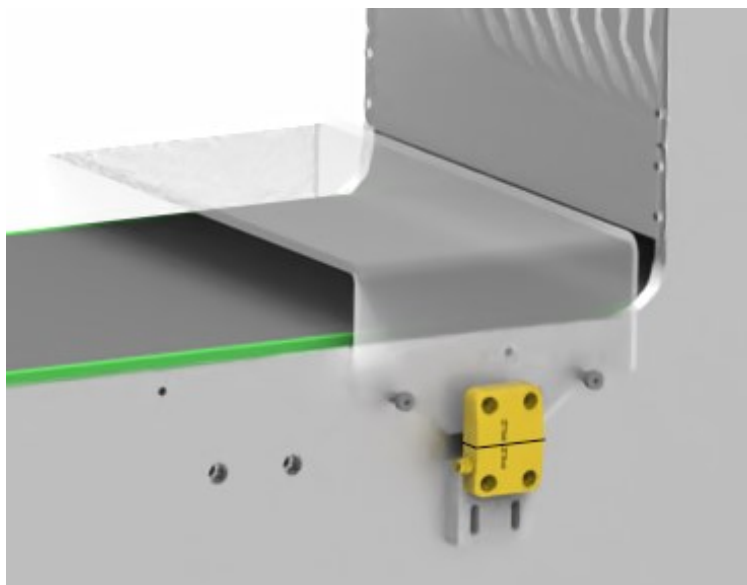


Fig. 7.18 Rendering del sistema di sicurezza sulla taglierina

I componenti commerciali utilizzati per ogni taglierina sono:

- n°4 viti calibrate a colletto “Elesa ISO 7379-5-M4-10”
- n°1 interruttore magnetico “Pilz PSEN 504222 1.1p-22/PSEN 1.1-20/8mm/ix1/ 1unit”

Si riportano le caratteristiche tecniche del sensore magnetico.

Tensione di alimentazione (V)	24 V
Tensione di commutazione	24 V
Temperatura ambiente	-10 - 55 °C
Perm. operating height ASL	2000 m
Tipo di collegamento	M8, 4-pin male
Mater. custodia Parte super	PBT
Altezza	36 mm
Larghezza	26 mm
Profondità	13 mm
Peso netto	36 g
Peso lordo	44 g



Fig. 7.19 Interruttore magnetico Pilz PSEN 504222 1.1p-22/PSEN 1.1-20/8mm/ix1/ 1unit

7.1.4 IL QUADRO ELETTRICO DEL BLOCCO 1

Per il controllo dell'intero blocco 1 si è realizzato un quadro elettrico. Si è optato per un quadro elettro-meccanico, almeno per eseguire le prove sperimentali.

Le informazioni salienti che sono state fornite al tecnico elettronico per realizzare il quadro del blocco 1 sono le seguenti:

- n°2 Motori Taglierina BN 71 A 4 230-400-50 IP55 CLF B14 - Potenza = 0.25 kW. Si necessita del controllo della direzione di avanzamento del nastro (avanti e indietro) e di un inverter per la regolazione della velocità
- n°1 Motore Nastro Retrattile BN 56B 4 230-400-50 IP55 CLF B14 - Potenza = 0.09 kW. Si necessita di un inverter per controllo della velocità. Inoltre si devono poter gestire 2 elettrovalvole 5/2 con solenoidi Camozzi U77 24 V e un gruppo FRL MX con solenoide Camozzi U77 24 V
- n°3 Motori Nastro Doppia Penna (Vagliatura) BN 56B 4 230-400-50 IP55 CLF B14 - Potenza = 0.09 kW. Si necessita di un inverter per controllo della velocità⁵
- n°2 centraline di sicurezza per modulo Pilz PSEN 504222
- Predisposizione attacco setaccio rotativo

L'inverter su taglierine e nastro retrattile è importante perché permette di regolare la velocità dei nastri, fondamentale per sincronizzare le macchine. Sulle taglierine si è deciso di poter controllare la direzione di avanzamento solo per motivi di sicurezza.

Di seguito si riporta la tavola che mostra la facciata del quadro elettro-meccanico.

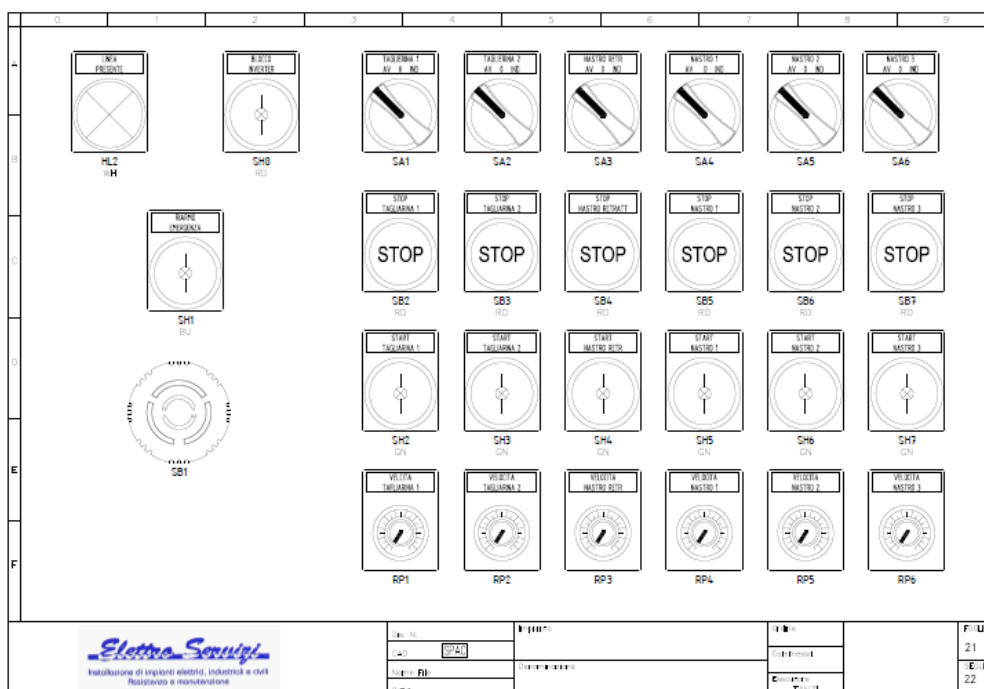


Fig. 7.20 Tavola di rappresentazione del fronte del quadro elettrico del blocco 1

⁵ Essendo presenti 3 nastri a doppia penna, si sono predisposti 3 attacchi sul quadro in modo da poter eseguire delle prove sperimentali per verificare se la vagliatura è possibile con queste macchine

Il quadro elettrico è stato posizionato su un'apposita struttura di sostegno per permettere la fuoriuscita dei cavi dalla parte inferiore. Il cavalletto è stato realizzato tramite saldatura di tubolari 40 x 20 x 2 mm in acciaio S235 verniciati.



Fig. 7.21 Quadro elettrico blocco 1

7.1.5 IL LAYOUT COMPLESSIVO DEL BLOCCO 1

Il blocco 1, come ampiamente spiegato, ha come funzione principale il sezionamento dei fogli di prepregs in chips rettangolari di dimensione 22,5 x 12 mm. Dato che i fogli immessi nelle macchine da taglio possiedono geometrie che possono essere del tutto irregolari, si possono ottenere al termine del processo di taglio, chips di dimensioni troppo piccole/grandi e con forme non accettabili, per questo all'interno del blocco 1 si è previsto inoltre un sistema di vagliatura per la separazione delle chips di geometria e dimensione conformi rispetto a quelle non conformi.

Allo stato attuale sono state realizzate le due taglierine e il nastro retrattile. Di conseguenza l'intera fase di taglio del materiale è già funzionante. Manca invece il sistema di vagliatura che non è stato ancora progettato.

Successivamente si riporta il layout finale del blocco 1, in cui in seguito alla seconda taglierina è presente un nastro elevatore (da realizzare) che riporta in quota il materiale fino al sistema di

vagliatura (il nastro elevatore e il sistema di vagliatura sono stati disegnati in maniera approssimativa dato che devono essere ancora progettati).



Fig. 7.22 Layout complessivo del blocco 1 (vista assonometrica 1)

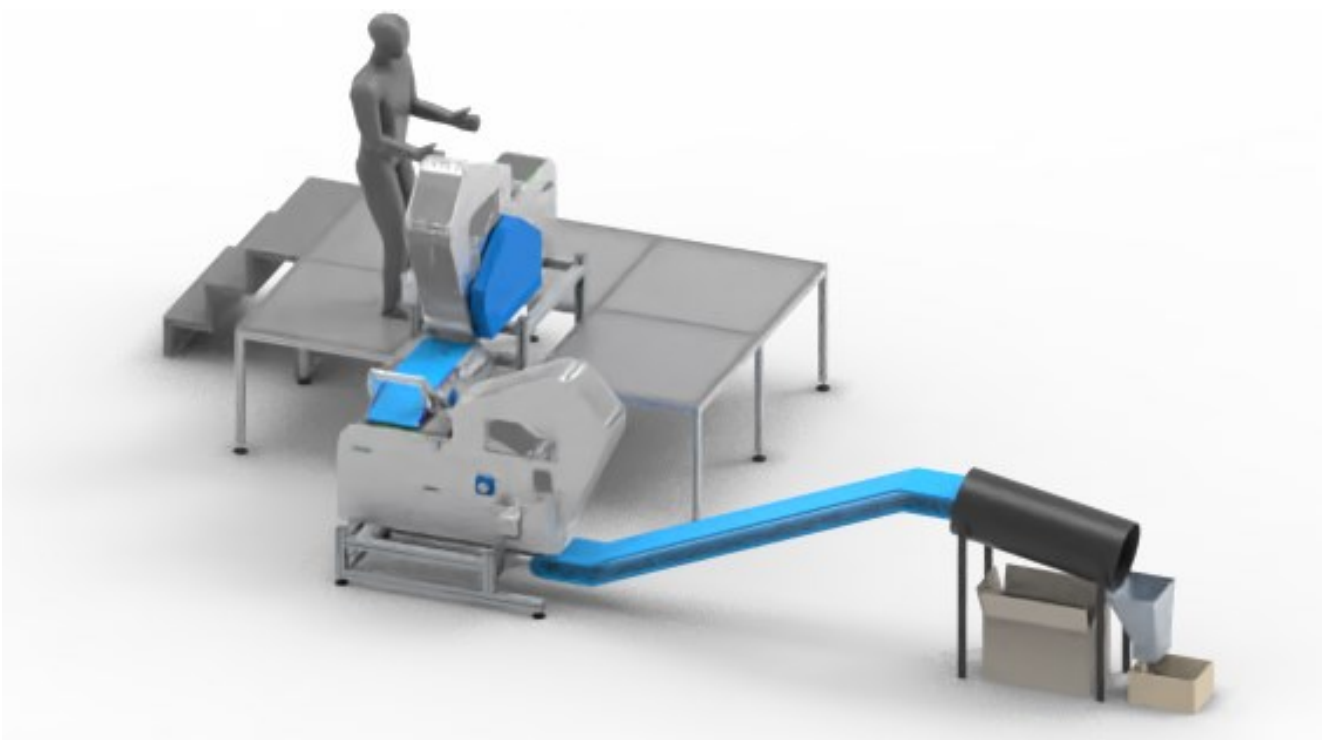


Fig. 7.23 Layout complessivo del blocco 1 (vista assonometrica 2)

Si può notare che è stata disegnata una pedana rialzata per permettere all'operatore di lavorare agevolmente sulla prima taglierina.

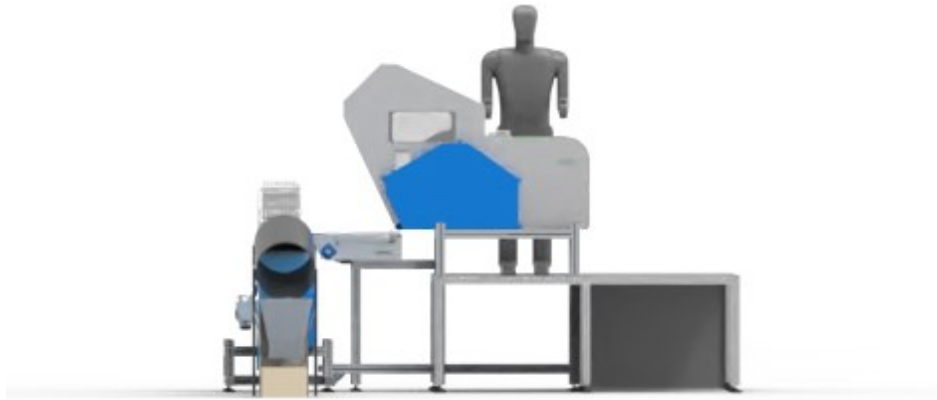


Fig. 7.24 Layout complessivo del blocco 1 (vista frontale)

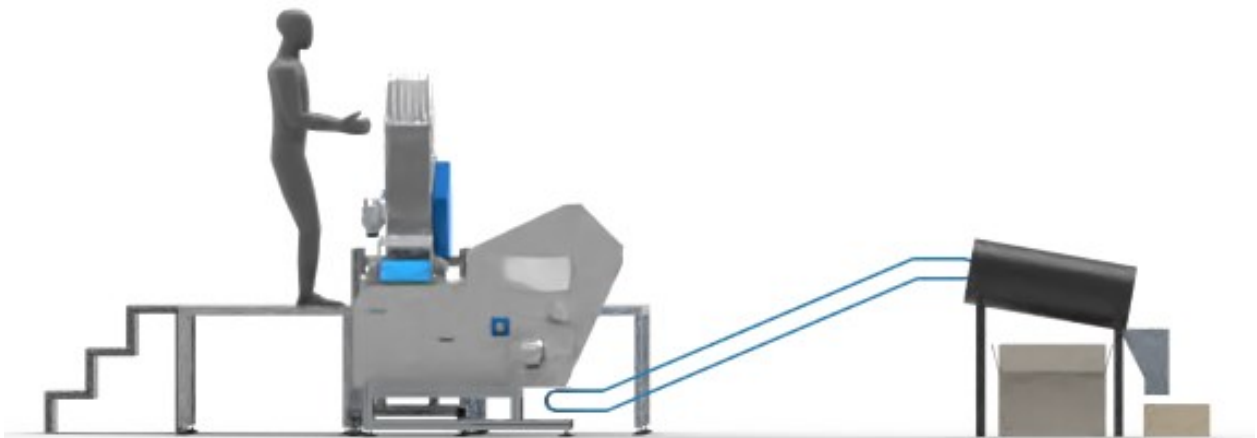


Fig. 7.25 Layout complessivo del blocco 1 (vista laterale)

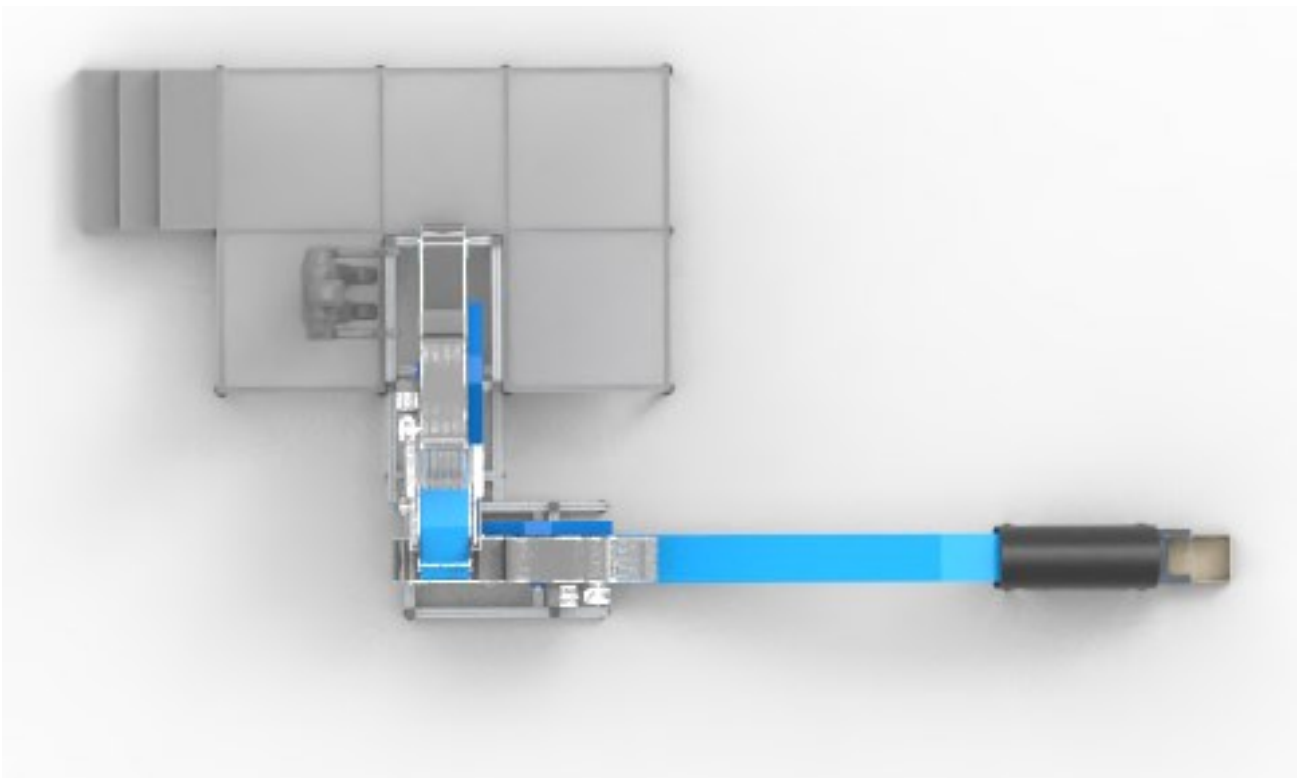


Fig. 7.26 Layout complessivo del blocco 1 (vista dall'alto)

7.2 IL BLOCCO 2

Il blocco 2 è composto da diverse macchine e sistemi. Lo scopo principale del blocco 2 è l'eliminazione del film protettivo dalle chips di prepregs. Tale operazione non risulta banale e considerato che è stato espressamente indicato dalle aziende utenti finali, che le pellicole non devono in alcuno modo essere presenti tra il prodotto recuperato, si sono presi diversi accorgimenti, talvolta anche ridondanti, per rispettare suddetta richiesta.

In sintesi nel blocco 2 si trovano: la spellicolatrice pneumatica, la defogliatrice, il sistema di visione, la confezionatrice verticale e il nastro scatole. Per semplicità si possono considerare due sottoblocchi principali: il sottoblocco per il peeling, costituito da spellicolatrice pneumatica, defogliatrice e sistema di visione e, il sottoblocco di packaging, costituito da confezionatrice verticale con annesso sistema di carico/pesatura e nastro scatole.

Nel periodo di tirocinio curricolare svolto in Alci Group, il sottoscritto, per quanto riguarda l'automatizzazione del secondo blocco, si è dedicato maggiormente alla messa a punto del sottoblocco di peeling rispetto a quello del packaging (di cui si sono comunque scelte/progettate le macchine – confezionatrice e nastro scatole).

Di seguito si riporteranno le fasi salienti che sono state svolte in ottica di automatizzazione della linea.

7.2.1 L'AUTOMATIZZAZIONE DELLA SPELLICOLATRICE E LO SCHEMA PNEUMATICO

Si ricorda che, al giorno di insediamento del sottoscritto in azienda, per quanto riguarda il secondo blocco, era stata realizzata solo in parte la spellicolatrice pneumatica. In particolare vi mancavano da montare la tramoggia di carico della stessa, i cilindri per la movimentazione della farfalla di carico e del fondo e il basamento. Non erano state ancora montate tutte quelle parti che non permettevano alla macchina di entrare nel congelatore commerciale presente in azienda, indispensabile per eseguire le prove sperimentali che avvenivano in maniera manuale.

E' stato compito del sottoscritto procedere alla messa a punto della macchina oltre che ad effettuare le modifiche già introdotte nel capitolo VI.

A livello progettuale, per rendere la macchina automatica è stato realizzato lo schema pneumatico, essendo questa caratterizzata da due cilindri a doppio effetto necessari per eseguire le operazioni di carico/scarico e da due canali di erogazione dell'aria compressa per svolgere la funzione di peeling.

L'aspirazione delle pellicole è eseguita per mezzo di un aspiratore commerciale, non è stata quindi considerata nello schema pneumatico.

Successivamente si è definito il ciclo di funzionamento della macchina e i tempi di azionamento delle elettrovalvole.



Fig. 7.27 Rendering della spellicolatrice pneumatica in cui si notano i due cilindri a doppio effetto e i due canali per l'aria compressa

Di seguito si riportano i calcoli principali eseguiti per la realizzazione del circuito pneumatico. I cilindri a doppio effetto di cui la macchina è equipaggiata sono due, rispettivamente "Festo ADN-32-50-A-P-A" per la movimentazione della valvola di carico e "Festo DSBC-32-100-PPVA-N3" per la movimentazione del coperchio di fondo (scarico).

Per prima cosa si vuole definire la pressione minima di alimentazione dei cilindri affinché questi possano svolgere correttamente le loro funzioni. La verifica è stata eseguita considerando il cilindro "Festo DSBC-32-100-PPVA-N3" dato che è quello maggiormente sollecitato.

Si riporta la geometria con le quote necessarie per svolgere i calcoli.

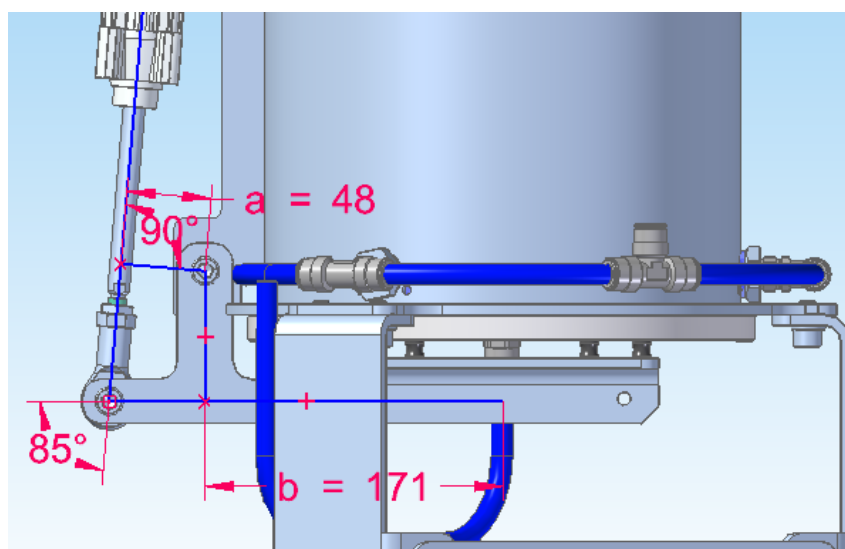


Fig. 7.28 Geometrica di calcolo per dimensionamento impianto pneumatico

Il peso a cui il cilindro deve reagire è dato dalla somma del peso delle chips (si considera un carico ottimistico di 500 g di materiale, supponendo che con le migliorie apportate alla macchina si riescano ad elaborare più chips in un ciclo rispetto a quanto dichiarato in precedenza), del fondo di chiusura in polietilene (circa 1 kg), dai vari raccordi, elementi di smorzamento vibrazione, ecc. (circa 500 g). Si ottiene un peso di circa 2 kg.

Considerando gli attriti sempre presenti che il cilindro deve vincere come 25% del peso totale si ottiene un peso di calcolo di circa 2.5 kg. Quindi una forza peso P di circa 25 N.

Eseguendo l'equilibrio dei momenti, ponendo F la forza del cilindro, si ottiene la seguente equazione:

$$F a = P b$$

Da cui si ottiene $F = 90$ N.

Questa è la forza che il cilindro deve imprimere per mettere in equilibrio il fondo. Tuttavia, dato che dentro il tubo cilindrico verrà insufflata aria compressa, si deve considerare un surplus di forza di serraggio in modo da escludere la nascita di trafilamenti attraverso l'interfaccia tubo cilindrico – fondo. Si è considerata sufficiente una forza pari al doppio di quella di calcolo, quindi 180 N.

Seguendo le indicazioni dei fornitori di cilindri, la forza deve essere maggiorata del 15% per considerare gli attriti delle guarnizioni del cilindro. Si ottiene quindi una forza di calcolo pari a $F_{calc} = 210$ N.

Dato che per motivi geometrici si è scelto il cilindro Festo DSBC-32-100-PPVA-N3 con alesaggio pari a 32 mm. Si determina la pressione minima di alimentazione dello stesso, tramite la formula seguente:

$$p_{min} = \frac{F_{calc}}{A}$$

Dato che la superficie di spinta A è pari a 803 mm², la pressione minima vale 0.26 MPa ovvero 2.6 bar. Considerando un fattore di sicurezza pari a 1.5 si ottiene che la pressione minima di alimentazione p_{min} vale circa 4 bar.

A questo punto si deve verificare che la condizione sul rapporto di carico sia rispettata. Dato che si dispone di una pressione di alimentazione p pari a 6 bar, la forza massima che il cilindro riesce ad erogare vale 482 N. Dato che quella necessaria vale 210 N, si ottiene un rapporto di carico pari al 43% che è minore del 70%, valore consigliato dai fornitori che non si deve mai superare per non incombere in saltellamenti e vibrazioni del pistone durante la sua corsa.

Il cilindro "Festo ADN-32-50-A-P-A" di movimentazione della valvola di carico è sottoposto ad un carico inferiore rispetto a quello appena calcolato, inoltre avendo lo stesso alesaggio ma una corsa minore, una pressione di alimentazione di 6 bar è sicuramente sufficiente per svolgere la funzione richiesta.

A questo punto si passa al dimensionamento delle elettrovalvole direzionali. Infatti la spellicolatrice pneumatica deve poter funzionare in maniera automatica, con tempi di carico, scarico e funzionamento stabiliti in base ai grammi di materiale che sono elaborati in un dato ciclo e al tipo

di preregs utilizzato. Per fare ciò, sono state utilizzate delle elettrovalvole le quali sono comandate a loro volta da un PLC.

Per il dimensionamento delle elettrovalvole, anche in questo caso si è considerato il cilindro “Festo DSBC-32-100-PPVA-N3”.

CILINDRO Festo DSBC-32-100-PPVA-N3

Diametro $D = 32 \text{ mm}$

Corsa $c = 100 \text{ mm}$

Pressione di lavoro $p = 6 \text{ bar}$

Tempo minimo di percorrenza della corsa $t = 1 \text{ sec}$

Eseguendo i calcoli allo stesso modo di quelli svolti nel paragrafo 7.1.2.1, si ottiene che la quantità d’aria che ospita la camera di spinta Q vale:

$$Q = K V(p + 1) = 0.9 \text{ Nl}$$

Da cui si determina la portata richiesta, che l’elettrovalvola deve riuscire ad elaborare dalla formula seguente:

$$Q_{rich} = \frac{Q}{t} = 54 \text{ Nl/min}$$

Considerando un fattore di sicurezza pari a 3 si ottiene che l’elettrovalvola deve riuscire ad elaborare una porta di 170 Nl/min.

Dal catalogo Camozzi si è scelta l’elettrovalvola 5/2 bistabile da G1/8 specifica per comandare cilindri a doppio effetto con codice 358-011-02 5/2 G1/8.

Si verifica:

- portata nominale: $Q_{nom} = 700 \text{ Nl/min} > 170 \text{ Nl/min} = Q_{rich}$
- pressione di esercizio: range esercizio $1.5 \div 10 \text{ bar}$

L’elettrovalvola scelta rispetta le condizioni di utilizzo riportate nel catalogo.



Fig. 7.29 Elettrovalvola 358-011-02 G1/8

Si procede alla verifica del diametro delle tubazioni. Dal catalogo Camozzi, si riprende la procedura per la verifica del diametro delle tubazioni per circuiti pneumatici. In particolare si procede al calcolo della conduttanza che per più elementi posti in serie è data dalla formula seguente:

$$C = \sqrt[3]{\frac{1}{\frac{1}{C_1^3} + \frac{1}{C_2^3} + \frac{1}{C_3^3}}}$$

Considerando che:

$$C_i = \frac{Q_n}{X}$$

Con X coefficiente sperimentale che vale 4.6.

A questo punto si definiscono le portate nominali Q_n di tutti gli elementi principali che si incontrano dal gruppo FRL fino al cilindro:

- tubazione dal gruppo FRL alla valvola di diametro 10/8 e lunghezza 0.3 m: $Q_n = 1600$ NI/min
- elettrovalvola 358-011-02: $Q_n = 700$ NI/min
- tubazione⁶ dall'elettrovalvola al cilindro di diametro 6/4 e lunghezza 5 m: $Q_n = 220$ NI/min

I valori di portata nominale dell'elettrovalvola sono riportati sulle tabelle del catalogo mentre quelli dei tubi si ricavano dai grafici seguenti.

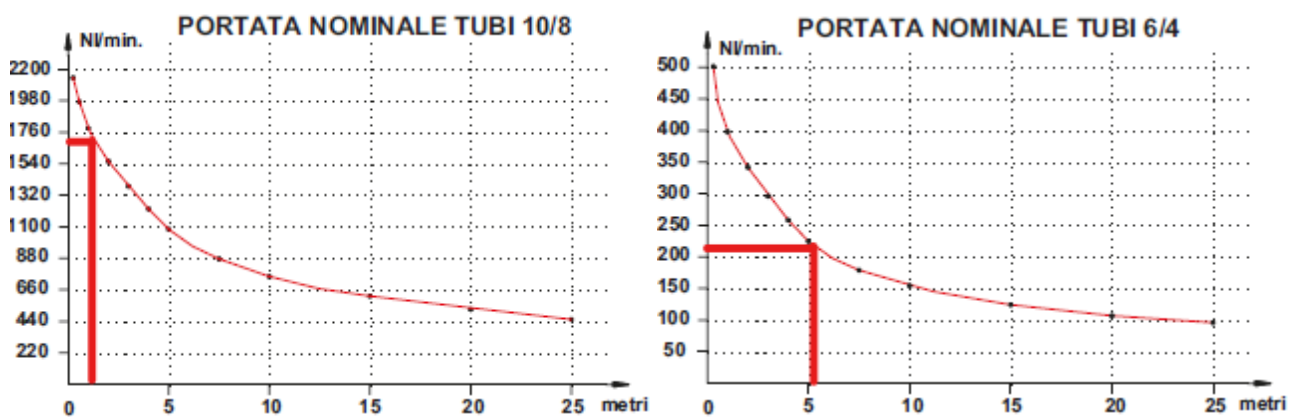


Fig. 7.30 Portate nominali delle tubazioni standard

Si ottiene rispettivamente:

- tubazione dal gruppo FRL alla valvola di diametro 10/8 e lunghezza 0.3 m: $C_1 = 348$ NI/min bar
- elettrovalvola 358-011-02: $C_2 = 152$ NI/min bar
- tubazione dall'elettrovalvola al cilindro di diametro 6/4 e lunghezza 5 m: $C_3 = 48$ NI/min bar

Svolgendo i calcoli si ottiene che la conduttanza totale C vale 47.5 NI/min bar.

⁶ Nelle foto che si riporteranno di seguito il gruppo FRL è posizionato sul basamento della macchina, ciò è stato fatto per testare lo schema pneumatico della macchina (apertura/chiusura cilindri e getti d'aria). In realtà, durante il funzionamento, la macchina sarà posizionata in un ambiente refrigerato (condizione necessaria per la riuscita del processo di peeling) e di conseguenza il gruppo FRL verrà posto al di fuori di esso per evitare mal funzionamenti. Tale considerazione è stata riportata per spiegare il motivo per cui si è eseguito il calcolo della conduttanza con una lunghezza della tubazione a valle dell'elettrovalvola di 5 m

La portata nominale che si riesce ad elaborare dal gruppo FRL fino al cilindro si calcola come segue:

$$Q_n = C X$$

E vale $Q_n = 220 \text{ NI/min}$. Si verifica che tale portata riesce a soddisfare quella richiesta dal cilindro per svolgere la sua funzione. Dato che $Q_n = 220 \text{ NI/min} > 170 \text{ NI/min} = Q_{\text{rich}}$ il circuito è verificato.

Per il cilindro "Festo ADN-32-50-A-P-A" si è utilizzata la stessa elettrovalvola "Elettrovalvola Camozzi 358-011-02 G1/8" e la stessa configurazione di circuito.

Verificati i cilindri e le elettrovalvole, prima di redigere lo schema pneumatico, si sono scelte le elettrovalvole necessarie per l'azionamento automatico dei getti d'aria per la fase di peeling.

Si ricorda infatti che il funzionamento della spellicolatrice pneumatica si basa su un getto d'aria che, appositamente indirizzato tramite ugelli stampati in 3D, crea un vortice grazie al quale il film protettivo (pellicola) delle chips si distacca, salendo verso l'alto dove viene aspirato. Si rammenta che i getti d'aria sono due, uno tangente al tubo cilindrico (per creare il ciclone) e un altro radiale allo stesso (azionato solo per 'sparare' le chips che rimangono al centro verso la periferia del tubo in modo che queste possano essere investite dal getto tangenziale ciclonico).

Quindi per rendere automatica la fase di peeling servono due elettrovalvole (una per ogni getto d'aria) di tipo 2/2, ovvero con una logica di controllo aperto/chiuso.

Essendo un prototipo, non sono state ancora ben definite le portate d'aria necessarie al funzionamento. Di conseguenza si sono scelte due elettrovalvole 2/2 di tipo generico della serie CFB (catalogo Camozzi), le quali sono adatte a trattare elevate portate che possono essere sia di aria che acqua, anche in condizioni gravose.

Per l'applicazione in questione si è deciso di scegliere un'elettrovalvola normalmente chiusa, che ad un determinato comando lascia poi passare il fluido. L'elettrovalvola scelta ha codice CFB-A24N-R1-* 2/2 NC G1/2.

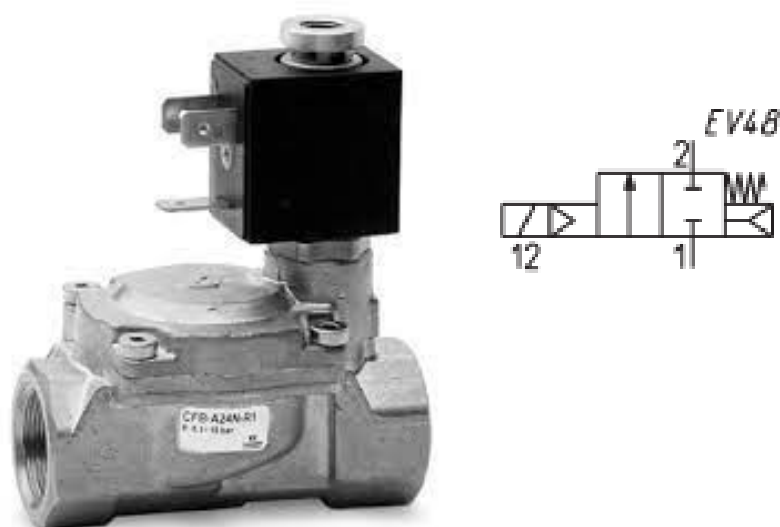


Fig. 7.31 Elettrovalvola CFB-A24N-R1-* 2/2 NC G1/2 con solenoide

Di seguito si riporta lo schema pneumatico della spellicolatrice.

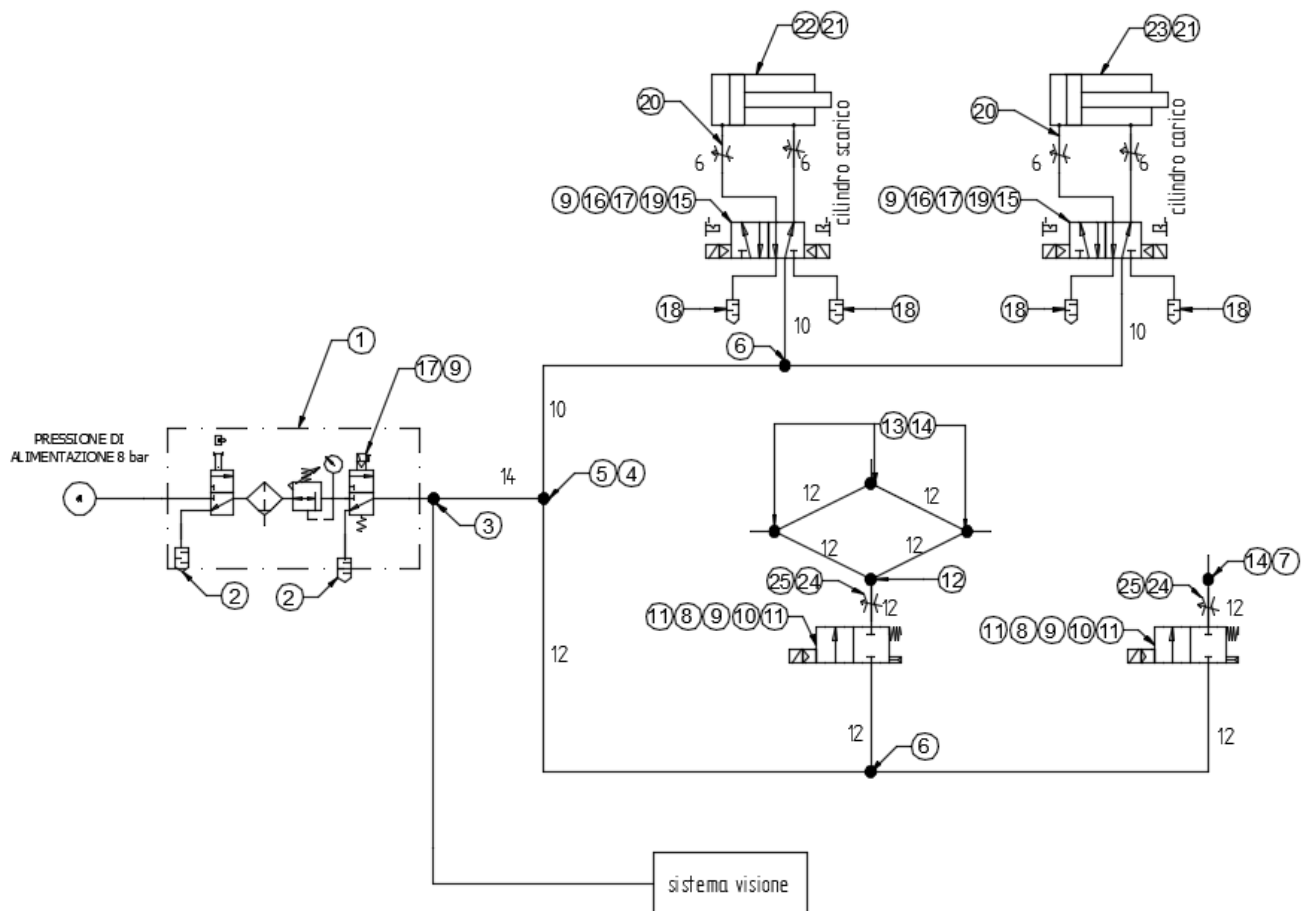


Fig. 7.32 Schema pneumatico spellicolatrice pneumatica

POS.	CODICE	DESCRIZIONE	QUANTITÀ
1	MX2-1/2"-V01 MX2-1/2-FR004 MX2-1/2-V16	Gruppo FRL: valvola intercettazione lucchettabile + filtro regolatore + valvola intercettazione G1/2"	1
2	2931 1/2	Silenziatore	2
3	6432 14-1/2	T maschio girevole metrico	1
4	6800 12-14	Riduzione	2
5	6540 14	T intermedio 14	1
6	6540 12	T intermedio	2
7	X6512 12-1/4	Dritto maschio cilindrico inox	1
8	B7B 24V	Solenioide 24V 50-60Hz	2
9	122-701	Connettore per solenoidi 24 AC/DC con varistore e led	7
10	CFB-A24N-R1-*	E lettrovalvola 2/2 NC az indiretto G1/2"	2
11	S6510 12-1/2	Dritto maschio sprint	4
12	X6540 12	T intermedio inox 12	1
13	X6432 12-1/4	T cilindrico centrale girevole inox	3
14	2521 1/8-1/4	Prolunga Riduzione metrica-cilindrica	4
15	6522 6-1/4	Gomito maschio girevole metrico-cilindrico	4
16	6512 12-1/4	Dritto maschio metrico-cilindrico	4
17	U7H	Solenioide 24V AC	5
18	2901 1/4-17	Silenziatore	4
19	358-011-02	E lettrovalvola bistabile 5/2 int manuale G1/8"	2
20	PMCU 706-1/8-6	Regolatore flusso unidirezionale G1/8"-6	4
21	6520 6-1/8	Gomito maschio girevole metrico-cilindrico	4
22	Festo DSBC-32-100-PPVAN3	Cilindro pneumatico DSBC-32-100-PPVAN3 (G1/8")	1
23	Festo ADN-32-50-A-P-A	Cilindro pneumatico ADN-32-50-A-P-A	1
24	PMCU 708-3/8-12	Regolatore flusso unidirezionale G3/8"-12	2
25	2530 1/2 - 3/8	Raccordo G1/2"-G3/8"	2

Fig. 7.33 Distinta base dei componenti dello schema pneumatico della spellicolatrice pneumatica

Si riportano di seguito alcune considerazioni riguardo allo schema pneumatico della spellicolatrice appena introdotto.

Blocco FRL. Si è utilizzato un blocco FRL composto da valvola di intercettazione lucchettabile, filtro regolatore e valvola di intercettazione NC da G1/2".

A valle del gruppo FRL è stato fatto partire un ramo che muore nella sezione "sistema di visione". Ciò è stato fatto perché in fase sperimentale si è previsto di comandare i getti d'aria del blocco del sistema di visione con lo stesso gruppo FRL utilizzato per la spellicolatrice pneumatica.

Blocco cilindri. A valle delle elettrovalvole 5/2 che comandano i cilindri di carico/scarico della macchina si sono previsti i regolatori di flusso, fondamentali per impostare la velocità ottimale di movimento dei cilindri. Inoltre si sono riportati i componenti necessari all'elettrovalvola per ricevere i comandi dal PLC, come i solenoidi da 24 V e i connettori con varistore led. Infine si possono notare i silenziatori che vengono avvitati sullo scarico delle elettrovalvole.

Blocco getti d'aria. Si possono notare i due rami dei getti d'aria che caratterizzano la macchina. Il primo ramo, a valle dell'elettrovalvola 2/2, ha una forma ad anello chiuso. Infatti il getto d'aria tangenziale è ottenuto per mezzo di 3 ugelli stampati in 3D posizionati equidistanti alla periferia del tubo cilindrico. Il secondo ramo invece va ad alimentare l'ogiva.

Su entrambi i rami, a valle dell'elettrovalvola è stato previsto un regolatore di flusso. Grazie ad esso si riesce a regolare la portata d'aria che entra nel tubo cilindrico in maniera sensibile, in modo da impostare i parametri di processo ottimi con l'obiettivo di aumentare l'efficienza della macchina in termini di quantità di chips che è possibile spellicolare in un ciclo di funzionamento.



Fig. 7.34 Rendering della spellicolatrice pneumatica in cui si può notare l'anello chiuso di alimentazione degli ugelli tangenziali e il ramo di alimentazione dell'ogiva



Fig. 7.35 Schema pneumatico spellicolatrice

7.2.1.1 IL CICLO DI FUNZIONAMENTO DELLA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA

Di seguito si riporta il ciclo che la spellicolatrice pneumatica deve svolgere affinché possa eseguire il peeling automatico delle chips di preimpregnato da recuperare.

La prima fase consiste nel carico della tramoggia. Questa operazione, nella fase sperimentale è eseguita da un operatore che prima di caricare la macchina procede alla pesatura del materiale da introdurre. Tale operazione nella linea finale verrà svolta automaticamente tramite una bilancia e un nastro di carico. Una volta che le chips sono state posizionate sulla tramoggia, si manda un segnale all'elettrovalvola 5/2 che comanda il cilindro a doppio effetto che a sua volta procede all'apertura della valvola a farfalla, la quale viene chiusa subito dopo che il materiale è entrato nella macchina.

Prima di attivare il getto d'aria compressa, viene inserita una certa quantità di talco per evitare che le chips possano appiccicarsi tra loro (nelle successive stazioni⁷), dopodiché il PLC procede all'accensione dell'aspiratore. Ciò è possibile grazie ad un teleruttore previsto nel quadro elettrico. Solo a questo istante si manda il segnale alla valvola 2/2 che gestisce l'apertura del getto d'aria tangenziale della spellicolatrice. Dopo un certo tempo, si invia il segnale all'altra elettrovalvola 2/2 che, rimanendo aperta per un tempo molto breve (segnale impulsivo), tramite l'ogiva, spinge le chips rimaste al centro verso la periferia. A questo punto, tutto il materiale è stato investito dal getto ciclonico e si può interrompere il getto d'aria tangenziale. Una volta interrotto il getto d'aria, si procede allo spegnimento dell'aspiratore e allo scarico della macchina mandando il segnale all'elettrovalvola 5/2 che comanda il cilindro a doppio effetto, che a sua volta procede all'apertura

⁷ Nella stazione di spellicolatura è improbabile che le chips si possano appiccicare tra loro dato che il grado di tack della resina è basso trovandosi la macchina in un ambiente refrigerato

del fondo. Una volta che tutto il materiale processato è “caduto dalla macchina”, si procede alla chiusura del fondo.

7.2.2 L'ATTREZZATURA DELLA DEFOGLIATRICE

La defogliatrice è posizionata in seguito alla spellicolatrice e ha come scopo principale la separazione delle pellicole che non sono state aspirate dalla spellicolatrice, dalle chips di preimpregnato che invece devono proseguire lungo la linea.

La macchina utilizzata per svolgere tale compito è stata acquistata da quelle disponibili in commercio e ha codice OLITA AOP0157 Polsinelli. Tuttavia, a questa si è previsto di aggiungere delle attrezzature per renderla funzionale all'impianto in questione.

Di seguito si spiega come avviene il funzionamento della macchina oltre che indicare le parti che dovranno essere realizzate come equipaggiamento della stessa.

Attualmente, dato che si parla per il blocco 2, di layout prototipale, il caricamento della macchina è eseguito manualmente. In particolare è presente un operatore che prende le chips provenienti dalla spellicolatrice da un recipiente e le posiziona sullo scivolo di carico della macchina. Spingendo il materiale verso l'apposita feritoia, questo viene investito dal flusso d'aria generato dalla ventola della macchina, grazie al quale si verifica la separazione delle pellicole dalle chips di preimpregnato. Le chips di prepregs cadono verso il basso essendo più pesanti, mentre le pellicole vengono spinte dal flusso verso l'alto tramite lo scivolo di scarico.

Dato che la defogliatrice è una macchina concepita per essere utilizzata all'aperto, per separare ad esempio le foglie da un qualsiasi raccolto, questa tende a disperdere lo scarto nell'ambiente circostante. Ciò non è accettabile in una linea industriale, per questo si è previsto di realizzare un tubolare di aspirazione che permette di convogliare le pellicole dallo scivolo di scarico della macchina fino ad un recipiente di raccolta.

Avendo visto che, ponendo una barriera di fronte al flusso d'aria, anche se abbastanza lontana dalla ventola, l'azione di separazione delle pellicole perde efficacia, si è pensato di realizzare un tubolare che per un certo tratto viaggia parallelo allo scivolo per poi virare fino al punto di raccolta.



Fig. 7.36 Rendering della zona di defogliazione dove si nota il convogliatore delle pellicole

7.2.3 IL SISTEMA DI CONTROLLO

Successivamente alla stazione di defogliazione si è prevista la stazione di check, grazie alla quale si riesce ad eseguire un controllo continuo delle chips prima che queste vengano imbustate.

Tramite un sistema di visione e un getto d'aria compressa, si separano le chips non spellicate (non conformi) da quelle spellicate (conformi). Le chips conformi procedono lungo la linea dove successivamente verranno imbustate, mentre quelle non conformi verranno reimmesse nella spellicolatrice pneumatica.

Prima di procedere alla spiegazione del sistema di controllo, si riportano delle nozioni generali riguardanti l'ottica e in generale i sistemi di visione. Queste permetteranno di comprendere le scelte fatte durante la progettazione del sistema in questione.

7.2.3.1 LE NOZIONI GENERALI DEI SISTEMI DI VISIONE

Un'immagine contiene un elevato numero di informazioni e pertanto può essere utilizzate per eseguire misurazioni.

Ad esempio da un'immagine si possono ricavare informazioni sulla forma, dimensione, posizione, colore di un oggetto. Da una serie di immagini in sequenza invece, è possibile definire la velocità, deformazione, spostamento di un oggetto.

Ovviamente in base al tipo di sensore che si utilizza si possono ricavare differenti informazioni.

Si riporta di seguito il diagramma a blocchi che caratterizza i sistemi di visione.

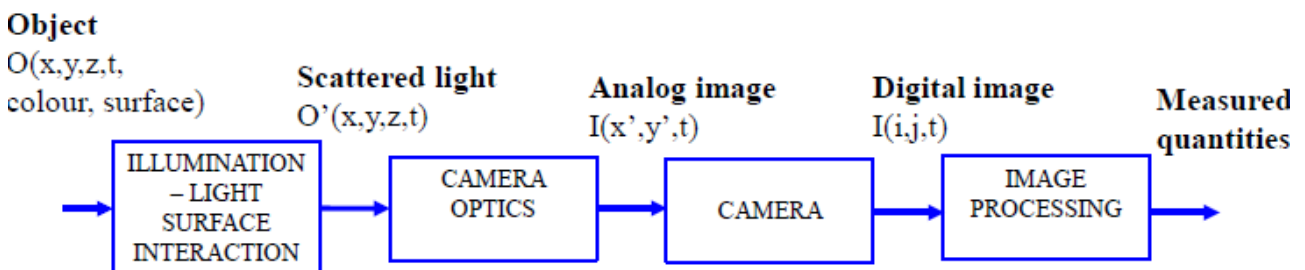


Fig. 7.37 Diagramma a blocchi sistema di visione

Il primo step consiste nell'illuminare l'oggetto per ottenere una luce diffusa, la quale verrà catturata dall'ottica della telecamera. Il sensore della stessa procederà alla trasformazione dell'immagine analogica in digitale.

Ottenuta l'immagine digitale, tramite operazioni di processamento, si riescono a svolgere le misurazioni desiderate.

7.2.3.1.1 L'OTTICA

Per poter procedere alla scelta delle telecamere da utilizzare nei sistemi industriali per eseguire misurazioni, è necessario conoscere le modalità in cui la luce si propaga.

Si afferma che nei mezzi con indice di rifrazione⁸ uniforme (non dipendente dal tempo), la luce viaggia in linea retta.

Fenomeno della riflessione. Un'interfaccia piano riflettente devia la luce in modo simmetrico rispetto alla normale alla superficie.

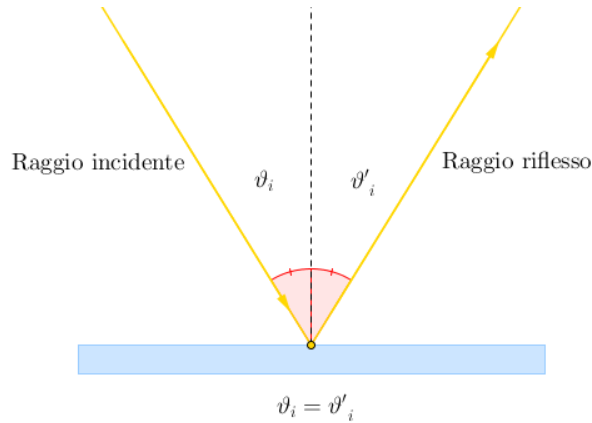


Fig. 7.38 Fenomeno di riflessione su una superficie piana riflettente ideale

In questo caso si parla di specchio, ovvero superfici con rugosità nulla (ideali).

Nella realtà non esistono superfici con rugosità nulla, di conseguenza in base alla finitura superficiale del piano si ottiene il fenomeno della diffusione. Fenomeno per il quale il raggio incidente si diffonde nello spazio in base all'angolo di incidenza, alla rugosità e alla lunghezza d'onda della luce.

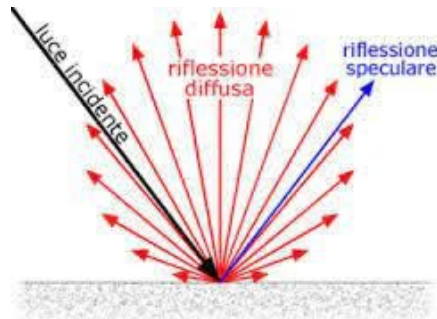


Fig. 7.39 Fenomeno di diffusione

Di seguito si riporta la transizione tra i due casi estremi, dalla riflessione alla diffusione.

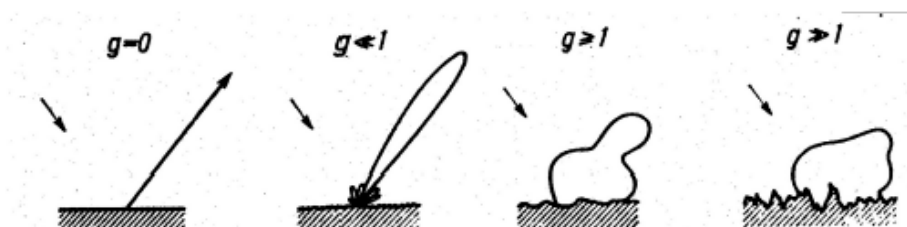


Fig. 7.40 Differenza di propagazione della luce in base alla rugosità del piano riflettente

⁸ indice di rifrazione: grandezza adimensionale che quantifica la diminuzione della velocità di propagazione della radiazione elettromagnetica quando attraversa un materiale. Si definisce come: $n = \frac{c}{v}$

Con c: velocità della luce nel vuoto e v: velocità di fase della radiazione che attraversa il materiale in questione

Si definisce il grado di rugosità relativa rispetto alla lunghezza d'onda λ :

$$g = \frac{R_a}{\lambda}$$

Se $g = 0$ si parla di specchi se $g > 1$ si parla di diffusore.

Nel caso in cui la luce passa da un mezzo all'altro si parla di rifrazione. La rifrazione è la deviazione subita da un'onda quando passa da un mezzo ad un altro, nel quale la sua velocità di propagazione cambia; poiché la frequenza rimane costante cambia la λ .

Si riporta la legge di Snell. Considerando due mezzi trasmissivi con indici di rifrazione n_1 (a sinistra) e n_2 (a destra), in contatto tra loro attraverso un'interfaccia, la relazione che lega gli angoli tra il raggio incidente e quello rifratto è la seguente:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

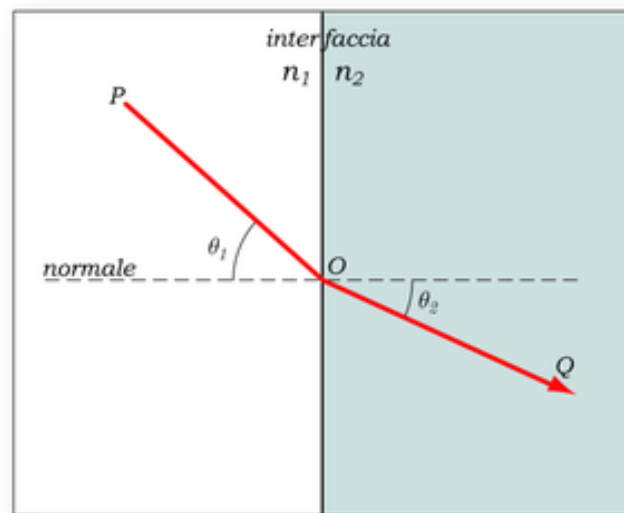


Fig. 7.41 Fenomeno di rifrazione

Si definisce angolo critico, l'angolo θ_1 tale per cui θ_2 è 90° , e vale:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Se $\theta_1 > \theta_c$ si parla di riflessione interna totale (la legge di Snell non vale più).

A questo punto è possibile introdurre le lenti.

La lente è un elemento costituito da due interfacce rifrangenti almeno una delle quali è curva.

Una lente simmetrica ha superfici sferiche o asferiche con simmetria attorno ad un asse comune di rivoluzione detto l'asse ottico.

Ogni superficie curva di una lente ha un centro di curvatura; l'asse ottico delle lenti è la linea che unisce tali centri di curvatura e costituisce una linea di riferimento per l'intero sistema ottico.

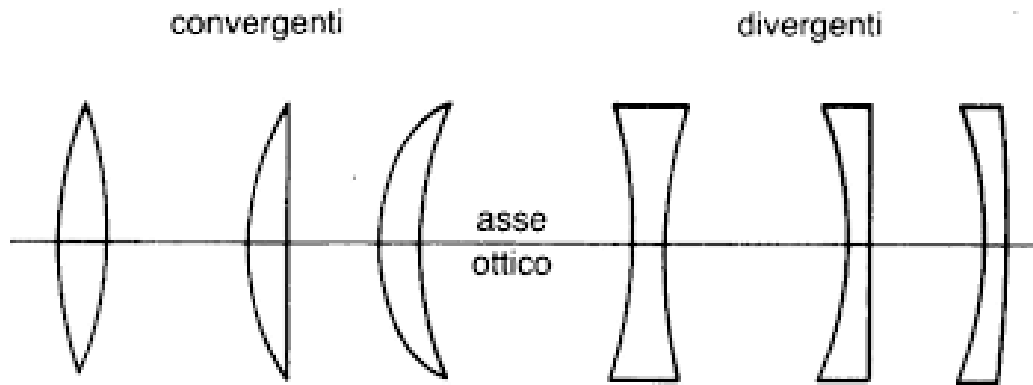


Fig. 7.42 Asse ottico e tipologia di lenti

Esistono fondamentalmente due tipi di lenti:

- Lenti positive (convergenti): se l'oggetto è posto all'infinito, i raggi sono paralleli all'asse ottico e producono un'immagine nel punto focale della lente
- Lenti negative (divergenti): i raggi paralleli divergono da un punto a distanza f dalla lente

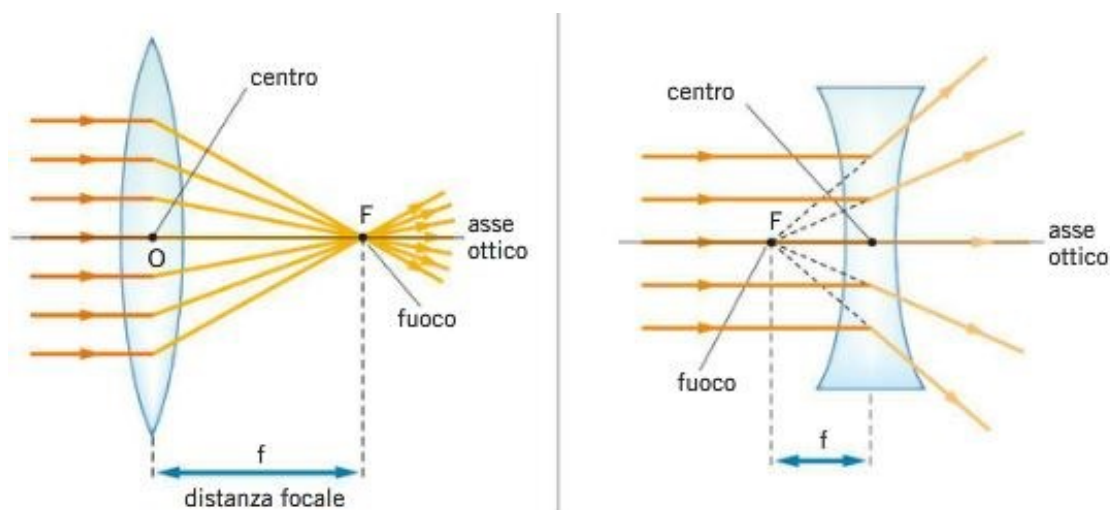


Fig. 7.43 Differenza tra lenti convergenti (a sx) e lenti divergenti (a dx)

Per la rifrazione si ha che:

- Un raggio di luce parallelo all'asse ottico di una lente passerà, dopo la rifrazione, attraverso il fuoco posto a distanza f dal vertice delle lenti
- I raggi di luce che passano attraverso il punto focale di una lente saranno rifratti parallelamente all'asse ottico
- Un raggio di luce passante per il centro della lente non viene deviato

Si fa notare che tutte le lenti, anche se realizzate con estrema precisione, presentano dei comportamenti differenti da quelle ideali. Si parla di aberrazioni.

Esistono diversi tipi di aberrazioni tra cui sferica, cromatica, coma, astigmatismo e curvatura di campo.

La luce. La luce è un'onda elettromagnetica trasversale, ovvero il campo elettrico E e quello magnetico B sono ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda z.

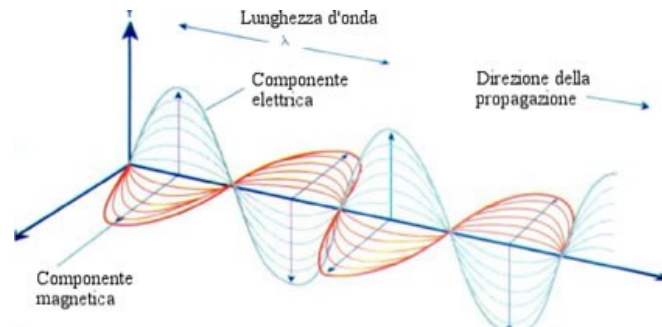


Fig. 7.44 Direzione di propagazione della luce rispetto al campo elettrico e magnetico

L'onda è caratterizzata da 4 parametri fondamentali:

1. Lunghezza d'onda λ
2. Fase ϕ
3. Ampiezza E
4. Polarizzazione

La velocità della luce c è data dalla formula:

$$c = \lambda f$$

Con f: frequenza dell'onda elettromagnetica

Si ha che la velocità della luce nel vuoto vale circa 3×10^8 m/s, mentre l'indice di rifrazione del vuoto n vale 1.⁹

Si fa afferma che:

- La diversa lunghezza d'onda viene percepita dall'occhio come colore
- L'intensità percepita è proporzionale al valore medio del quadrato del campo, ovvero vale la relazione $I \propto |E^2|$

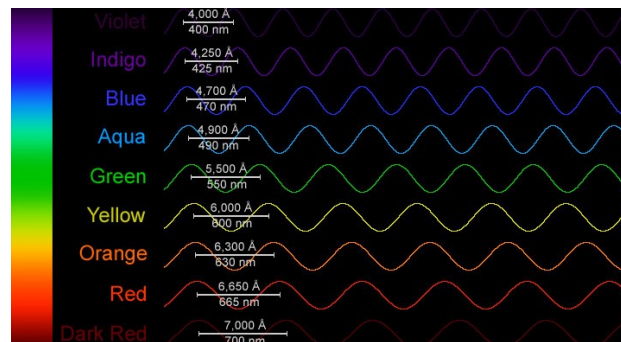


Fig. 7.45 Colori percepiti dall'occhio umano in base alla lunghezza d'onda

⁹ L'aria ha un indice di rifrazione pari a 1.000280. Nella pratica si considera un indice pari a quello del vuoto (n = 1) dato che l'errore che si commette è trascurabile

7.2.3.1.2 LA FORMAZIONE DELLE IMMAGINI

Di seguito si riportano le nozioni principali riguardanti la formazione delle immagini al fine di andare a definire le formule necessarie e fondamentali per la scelta delle lenti da utilizzare nelle applicazioni pratiche.

Si considera una lente positiva.

Si evidenzia che i raggi provenienti da un punto oggetto si incrociano in un punto immagine, quindi mettendo uno schermo in tal punto si riesce a vedere l'immagine a fuoco.

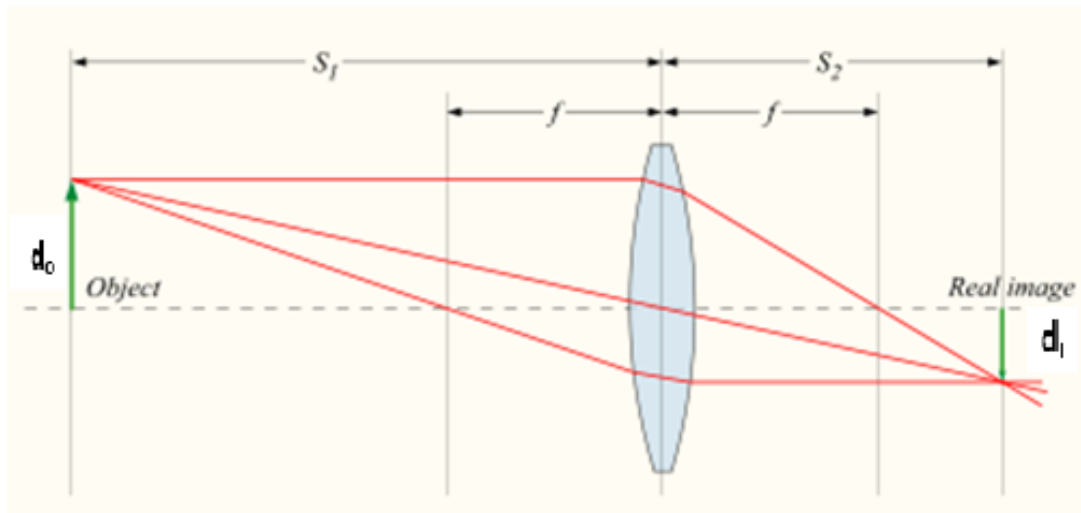


Fig. 7.46 Formazione delle immagini con lente positiva

Considerando i tre raggi principali che partono dal punto P nella Fig. 7.46 si nota che il raggio:

- parallelo asse ottico viene deviato dalla lente nel fuoco posteriore
- passante per il centro della lente attraversa la lente indisturbato
- passante per il fuoco anteriore viene deviato dalla lente che lo rende parallelo all'asse ottico

I raggi che provengono da P si ricombinano in P'. Di conseguenza P' è l'immagine di P che si forma alla distanza S_2 dalla lente.

Per la similitudine dei triangoli si ricava l'equazione di Newton, detta anche delle lenti sottili o formula dell'ottico, che si riporta di seguito:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}$$

Con f: distanza focale della lente

S_1 : distanza dell'oggetto dalla lente

S_2 : distanza dell'immagine dalla lente

Si definisce inoltre il fattore di ingrandimento (M):

$$M = \frac{d_i}{d_o} = \frac{S_2}{S_1}$$

Le due formule appena riportate permettono di andare a definire la distanza a cui posizionare la telecamera una volta note le dimensioni della scena da inquadrare, del sensore e della focale delle lenti.

Per scegliere il sistema di visione servono ulteriori informazioni. Per questo si introduce il fenomeno della diffrazione.

La diffrazione, nella fisica, è un fenomeno associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde quando queste incontrano un ostacolo sul loro cammino. Quindi è un 'errore' dovuto alla natura ondulatoria della luce.

Nel caso ideale un punto nel piano oggetto restituisce un punto nel piano immagine. Nella realtà ciò non avviene. Infatti al posto di un punto, nel piano immagine si hanno una serie di anelli concentrici detti disco di Airy.

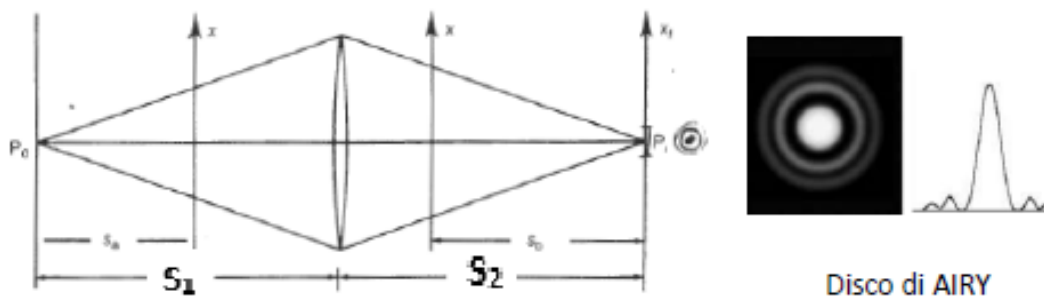


Fig. 7.47 Disco di Airy

Tale fenomeno evidenzia che l'immagine di un punto è un disco che possiede un certo raggio finito. Ciò risulta essere un problema in termini di risoluzione spaziale.

Il raggio del disco di Airy è dato dalla formula seguente:

$$r = 1.22\lambda \frac{S_2}{D}$$

Con D: diametro della lente.

Si deduce che per avere un sistema ideale si deve disporre di una lente con D che tende all'infinito, ovviamente ciò non è possibile. Nella pratica per avere una buona risoluzione spaziale si deve disporre di una lente con grande diametro ma in ogni caso si avrà un certo sfocamento. In definitiva si può dire che la diffrazione limita la capacità di messa a fuoco di una lente, ovvero la capacità di formare immagini dei dettagli.

Si introduce a questo punto la profondità di campo. La profondità di campo rappresenta la zona in cui gli oggetti nell'immagine appaiono ancora nitidi e sufficientemente focalizzati, nonostante il piano a fuoco sia uno soltanto.

Per l'ottica geometrica se un oggetto è posizionato ad una distanza non corretta questo apparirà fuori fuoco.

Si è dimostrato quindi che un errore di posizionamento dell'oggetto rispetto alla lente (o una scena 3D) e il fenomeno della diffrazione provocano entrambi una scena sfocata.

Si utilizza il seguente criterio per definire se si è sufficientemente a fuoco:

“è ammesso uno sfocamento dovuto alla posizione pari allo sfocamento intrinseco dovuto alla diffrazione”

Facendo i calcoli si ottiene che il massimo ΔS_2 ammissibile¹⁰ vale:

$$\Delta S_2 = 2.44 \lambda \left(\frac{S_2}{D} \right)^2$$

Supponendo che l'oggetto sia all'infinito si ha che S_2 coincide con f , di conseguenza la formula diventa:

$$\Delta S_2 = 2.44 \lambda \left(\frac{f}{D} \right)^2$$

Si definisce l'apertura numerica $F\#$ ¹¹:

$$F\# = \frac{f}{D}$$

Quindi si ha che:

$$\Delta S_2 = 2.44 \lambda (F\#)^2$$

In definitiva si nota che se D diminuisce, $F\#$ aumenta e di conseguenza aumenta ΔS_2 , ovvero si riescono a mettere a fuoco oggetti anche se non posizionati sul piano di fuoco. Tuttavia si ottiene, per quanto detto in precedenza, una risoluzione ottica inferiore e un'immagine meno luminosa. E' necessario trovare un compromesso.

Nella pratica per variare la dimensione del diametro della lente D , si agisce sul diaframma. In base all'applicazione per cui la telecamera viene utilizzata si gestisce differentlye il diaframma. In particolare, si deve trovare un compromesso tra profondità di campo e risoluzione ottica.

Operativamente si utilizzano le seguenti nozioni:

- se scena bi-dimensionale, dato che non si devono riprendere oggetti a distanze diverse, si utilizza un diaframma completamente aperto in modo tale da avere un segnale maggiore (immagine più luminosa) e una risoluzione ottica più elevata
- se scena tri-dimensionale, si agisce sul diaframma per trovare un compromesso tra risoluzione ottica, luminosità e profondità di campo

¹⁰ ΔS_2 corrisponde alla profondità di fuoco ovvero alla tolleranza di posizione del sensore che può essere accettata considerando l'errore dovuto alla diffrazione

¹¹ $F\#$ è una caratteristica della lente che dipende dal fuoco e dal diametro della lente. E' la misura della luce che può passare attraverso la lente

7.2.3.1.3 LE TELECAMERE

I sensori attuali sono costituiti da più pixel disposti a matrice o in linea. Un pixel corrisponde ad un elemento fotosensibile che trasforma la luce in una tensione elettrica la quale a sua volta viene trasformata in un numero solitamente ad 8 bit.

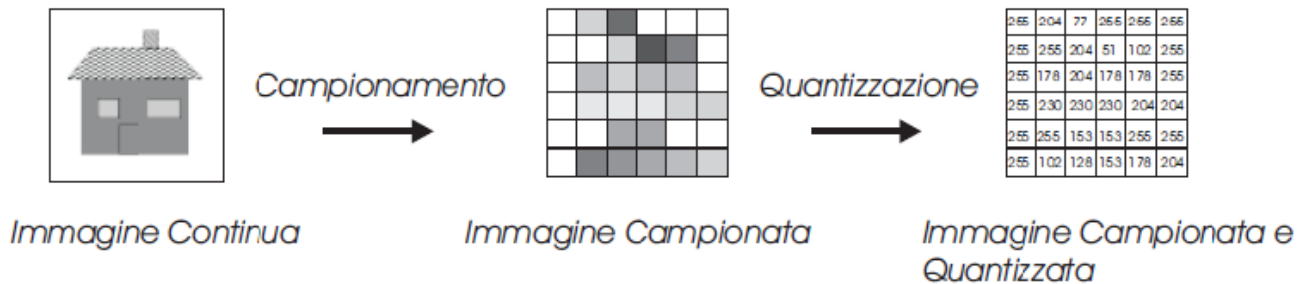


Fig. 7.48 Schema di funzionamento sensore

I sensori in commercio utilizzati per convertire la luce in segnali elettronici sono fondamentalmente di due tipi:

- CCD (charge couple device)
- CMOS (complementary metal oxide semiconductor)

I sensori CCD (dispositivo a coppia caricata) sono costituiti da una complessa scheda elettronica in cui elementi semiconduttori fotosensibili convertono i fotoni (luce) in elettroni. La carica accumulata è proporzionale al tempo di esposizione.

La luce viene raccolta in un pozzo e quindi rilasciata e letta in diversi modi. Sostanzialmente tutte le architetture spostano le informazioni in un registro, a volte passando attraverso un'area passiva per l'archiviazione.

Infine la carica viene amplificata a un segnale di tensione che può essere letto e quantificato.

In un sensore CMOS, la conversione da carica a tensione viene eseguita a livello di pixel. Infatti i sensori CMOS sono concettualmente diversi dai sensori CCD, poiché la lettura può essere eseguita pixel per pixel anziché in modalità sequenziale.

Infatti, il segnale viene amplificato in ogni posizione dei pixel, consentendo di ottenere frame rate molto più elevati e di definire regioni di interesse (ROI) personalizzate per la lettura (non possibile per sensori CCD).

Le dimensioni (o i formati) dei sensori sono generalmente indicate con un valore di frazione ad esempio 1/2". Tuttavia, le dimensioni effettive di un sensore sono diverse dal valore della frazione, il che spesso causa confusione tra gli utenti. Questa pratica risale agli anni '50, ai tempi dei tubi catodici delle televisioni ed è ancora utilizzata.

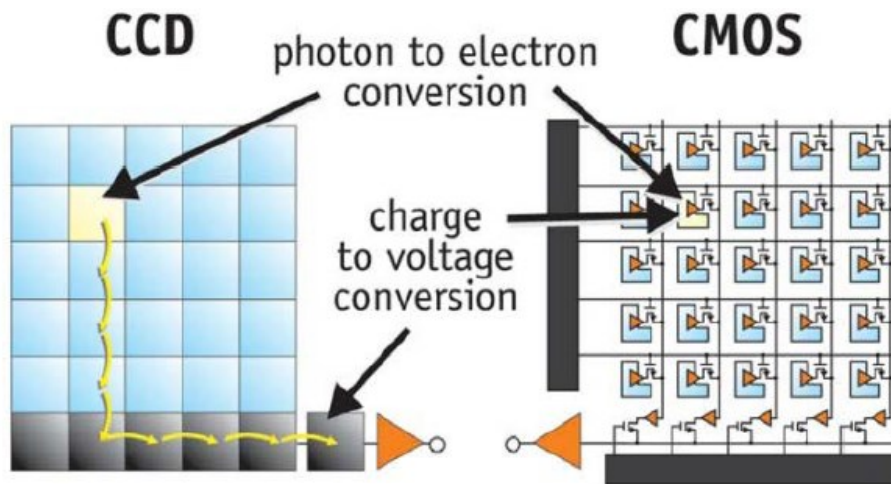


Fig. 7.49 Differenza tra sensore CCD e CMOS¹²

Si riporta in una tabella il confronto tra i due tipi di sensore.

	CCD	CMOS		CCD	CMOS
Pixel Signal:	Electron Packet	Voltage	Uniform:	High	Moderate
Chip Signal:	Analog	Digital	Resolution:	Low-High	Low-High
Fill Factor:	High	Moderate	Speed:	Moderate-High	High
Responsivity:	Moderate	Moderate-High	Power Consumption:	Moderate-High	Low
Noise Level:	Low	Low to High	Complexity:	Low	Moderate
Dynamic Range:	High	Moderate to High	Cost:	Moderate	Low

Fig. 7.50 Confronto tra sensore CCD e CMOS

Un aspetto importante da considerare nel caso di misure di oggetti in movimento è il tempo di esposizione.

Si suppone che sul sensore arriva una quantità di carica Q pari a:

$$Q = k \varnothing \Delta t_e$$

Con k : costante

\varnothing : flusso di fotoni incidenti sul sensore

Δt_e : tempo di esposizione, tempo durante il quale l'otturatore della telecamera rimane aperto per permettere alla luce di raggiungere il sensore

Per vedere l'oggetto in movimento non sfumato, lo spostamento dello stesso nel piano immagine deve essere inferiore o al massimo uguale alla dimensione del pixel della telecamera.

¹² Mentre in un sensore CCD il fotodiodo si comporta come un condensatore la cui carica va letta in sequenza, nel CMOS si comporta come un generatore locale di carica convertita in tensione e letta tramite multiplexer

Quindi se nel piano oggetto, l'oggetto ha una velocità pari a v , lo spostamento nel piano immagine s_{imm} è dato dalla formula:

$$s_{imm} = M v \Delta t_e \leq 1 \text{ pixel}$$

Quindi il tempo di esposizione per non visualizzare un'immagine sfumata ai bordi dell'oggetto vale:

$$\Delta t_{emax} \leq \frac{1 \text{ pixel}}{M v}$$

Tale tempo di esposizione può essere ottenuto direttamente con il sensore (frame rate) oppure se scena troppo veloce è necessario un flash.

Se frame rate richiesto è elevato, si ha che Δt_e della telecamera è basso, di conseguenza è necessario un flusso di fotoni elevato ovvero è necessaria tanta luce per far in modo che la quantità di carica Q che arriva sul sensore sia sufficiente a generare il segnale elettrico.

In definitiva le caratteristiche principali da considerare per la scelta di un sensore sono:

- Numero di pixel $N \times M$
- Dimensione del chip
- Dimensione del pixel
- Frame rate

Telecamere a colori. Le immagini che si ottengono dai sensori sono monocromatiche (solo intensità). La percezione del colore può essere simulata sovrapponendo terne di colori fondamentali. Solitamente si usa la terna RGB (red, green, blue). Pertanto occorre acquisire i colori separatamente, scomponendo il fascio luminoso nei suoi tre canali RGB.

Nella pratica possono essere utilizzate due tecniche di colorazione digitale:

- si divide la luce nei suoi componenti con un prisma e successivamente la si indirizza verso tre sensori differenti (3-CCD)
- si usa un filtro a mosaico di colori su un solo CCD (mono-CCD). In questo modo è possibile far acquisire ad ogni pixel l'intensità luminosa di un dato canale

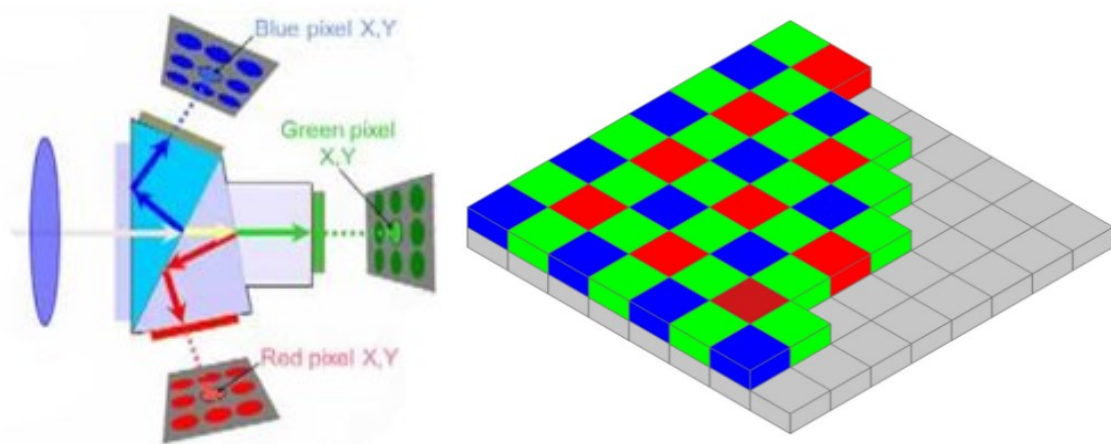


Fig. 7.51 Sensore 3-CCD (a sx) e sensore mono-CCD a destra

7.2.3.1.4 L'ILLUMINAZIONE

L'immagine della superficie di un oggetto è influenzata dall'insieme di luci e ombre create dall'illuminazione. La luce diffusa dalle superfici illuminate varia in intensità e distribuzione spaziale in base a:

- tipo di illuminazione utilizzata: - tipo di sorgente (intensità e spettro)
- direzione di illuminazione
- tipo di materiale: - colore
- rugosità della superficie

La scelta del tipo di illuminazione va fatta considerando diversi criteri come:

- immagini in B/N o a colori
- area e forma da illuminare
- caratteristiche dell'oggetto (colore, rugosità, ecc)
- velocità di acquisizione immagine
- durata del sistema di illuminazione

Esistono fondamentalmente 3 tipi di illuminatori ad uso industriale:

- lampade alogene
- lampade fluorescenti
- sorgenti LED

Il tipo di illuminazione può essere classificato in base alla geometria. Si parla di illuminazione diretta e indiretta.

Illuminazione diretta. Si può parlare di:

- bright field: la luce riflessa dall'oggetto cade nel campo di visuale della videocamera. L'illuminatore è spesso circolare e posizionato attorno alla videocamera stessa

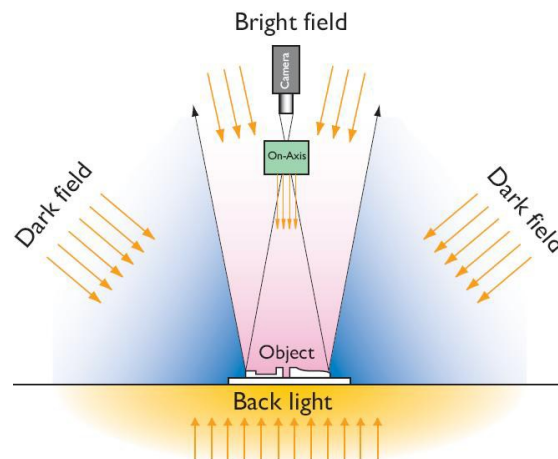


Fig. 7.52 Illuminazione bright-field

- dark field: l'illuminazione è fornita da una fonte luminosa esterna disposta in maniera radente alla superficie principale dell'oggetto. L'immagine viene creata dalle ombre (chiaro-scuro) causate dagli ostacoli incontrati dai raggi sul loro percorso. Tale sistema è particolarmente richiesto nelle analisi di superfici piane rugose, per poterne visualizzare la morfologia ed è particolarmente indicata per oggetti riflettenti. L'illuminatore può essere un anello di grande diametro con luci poco angolate o una sorgente rettilinea/puntiforme

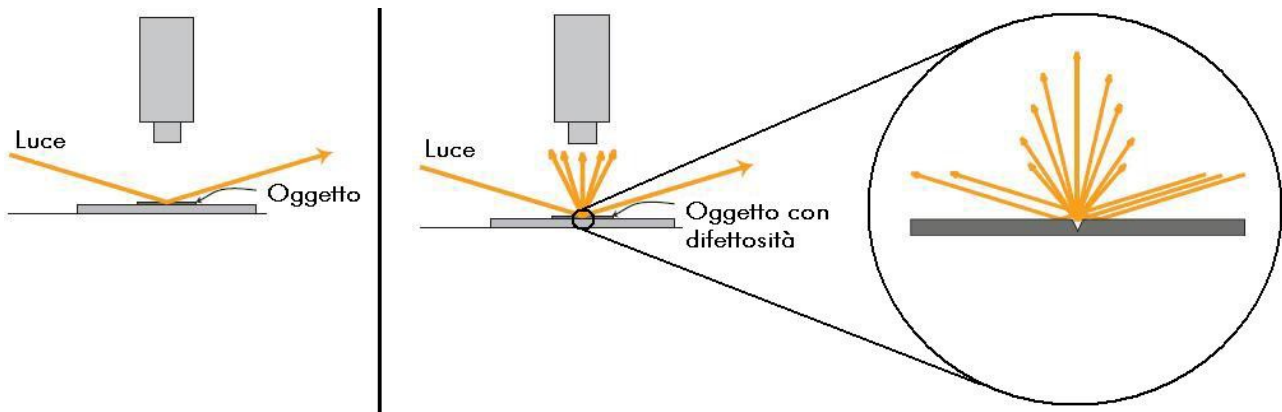


Fig. 7.53 Illuminazione dark-field

Si nota che se l'oggetto non presenta difettosità come graffi, cricche, ecc, la telecamera restituisce un'immagine come se l'oggetto non fosse illuminato, dato che, in questo modo, la luce viene riflessa al di fuori del campo di vista della stessa. Se invece sono presenti difettosità, in quel punto la luce viene deviata in più direzioni e quindi una parte di questa arriva alla lente.

Il vantaggio di un'illuminazione diretta è l'elevato illuminamento, mentre le problematiche principali sono la presenza di ombre e riflessi.

Illuminazione indiretta. Esistono diversi tipi di illuminazione indiretta, tra cui:

- illuminazione a raggi paralleli/coassiale: l'illuminazione è fornita da una fonte luminosa che impatta su uno specchio semiriflettente, ciò permette di ottenere raggi paralleli che incidono perpendicolarmente sull'oggetto. La luce viene riflessa direttamente sul sensore della videocamera tranne che nel punto in cui c'è un'imperfezione, dove la luce viene diffusa in più direzioni e quindi nell'immagine risulterà meno luminosa. Tale illuminazione è usata per visualizzare ammaccature o cricche poco fronde su oggetti piatti riflettenti



Fig. 7.54 Illuminazione a raggi paralleli

- illuminazione anulare: l'illuminazione è fornita da una fonte luminosa predisposta anularmente attorno all'obiettivo. La visione dell'oggetto attraverso l'obiettivo crea un'immagine poco contrastata poiché, sebbene i raggi vengono riflessi e assorbiti in maniera diversa dalle varie superfici, le immagini ottenute sono prive di ombre.

Questo tipo di illuminazione è la più utilizzata perché si adatta alla maggior parte delle superfici di differenti materiali.

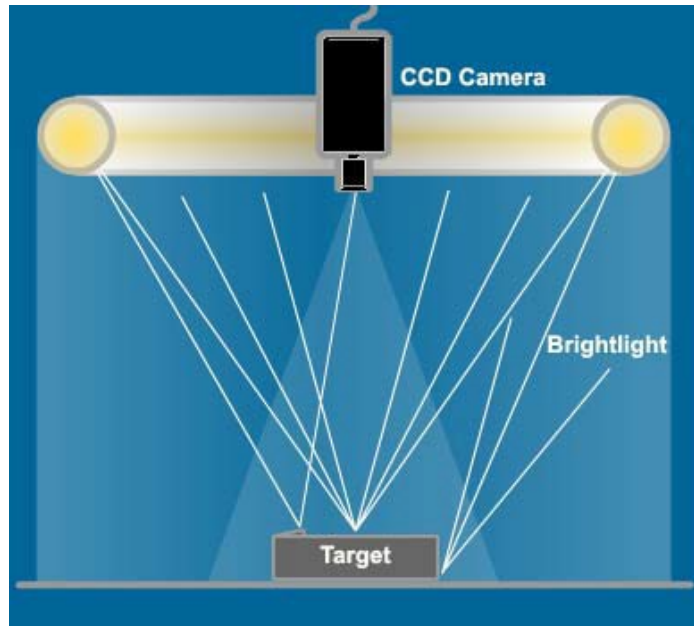


Fig. 7.55 Illuminazione anulare

- illuminazione diffusa: illuminazione uniforme, in grado quindi di eliminare riflessi e ombre. Questo risultato è ottenuto sommando illuminazione sferica diffusa e illuminazione coassiale, così da avere l'oggetto illuminato da tutti gli angoli. E' ottenuta con illuminatori a cupola o a tubo

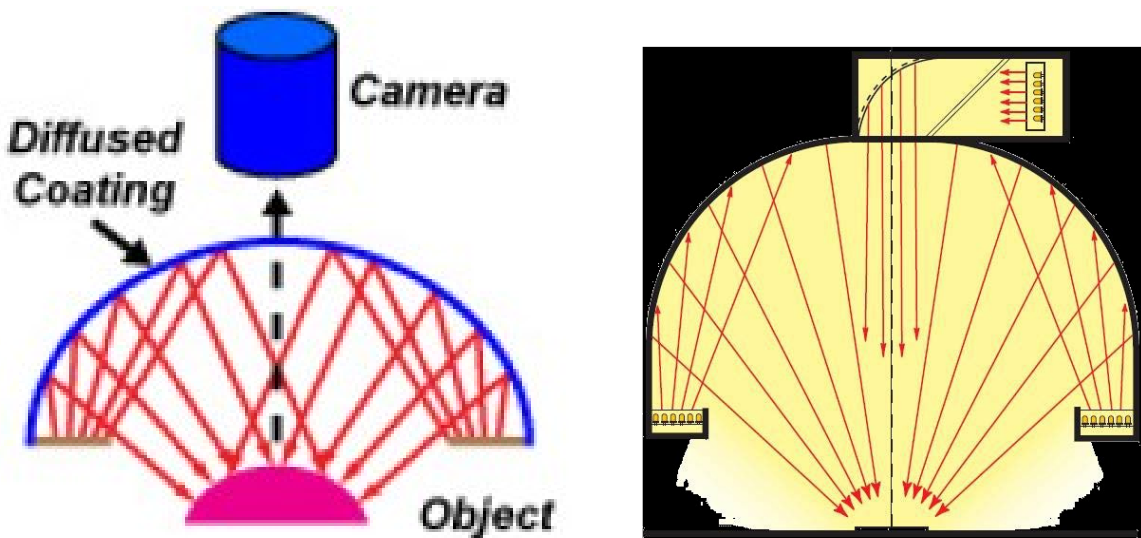


Fig. 7.56 Illuminazione diffusa (o CDI, Cloud Day Illuminator)

7.2.3.2 LA SCELTA DELL'OTTICA, LE VERIFICHE DEL SENSORE E DELL'ILLUMINATORE

Avendo definito brevemente le nozioni principali necessarie alla messa a punto di un generico sistema di visione, di seguito si riportano le considerazioni che sono state fatte dal sottoscritto per la scelta dei componenti del sistema di visione per la linea di riciclaggio in questione.

Si ricorda che, in fase preliminare, per svolgere le prove sperimentali, si è utilizzato un sistema di visione presente già in Alci Group. Questo consiste in:

- Controllore "Omron FH-L550-10"
- Telecamera "Omron FH-SC05R"

E' stata oggetto di studio da parte del candidato, autore di questo elaborato, la verifica delle caratteristiche del sistema di visione sopracitato, oltre che alla scelta delle lenti da utilizzare e della configurazione di posizionamento della telecamera.

Come detto in precedenza, la misurazione avviene mentre la chips, proveniente da un nastro trasportatore, cade su uno scivolo. Il nastro che si è utilizzato per svolgere le prove sperimentali ha una larghezza pari a 300 mm. Di conseguenza la scena che si deve riprendere avrà una larghezza pari ad almeno 300 mm. Inoltre per motivi di ingombro, si è ipotizzato di posizionare la telecamera a non più di 800 mm dallo scivolo di caduta delle chips. Questi sono i vincoli che si sono considerati durante la progettazione del sistema di visione.

Scelta dell'ottica. In Alci Group era presente un'unica lente, la 3Z4S-LE SV-5018V. Essa possiede una distanza focale pari a 50 mm. Dato che il formato del sensore della telecamera a disposizione è di 1/2.5", le dimensioni di quest'ultimo sono di 5.8 x 4.3 mm. Considerando il lato più corto d_i (4.3 mm), una scena d_o di 300 mm e la lente di focale f 50 mm, si calcola la distanza alla quale posizionare la telecamera come riportato di seguito.

Dati:

$$f = 50 \text{ mm}$$

$$d_i = 4.3 \text{ mm}$$

$$d_o = 300 \text{ mm}$$

Si definisce il rapporto di ingrandimento M che la lente deve avere:

$$M = \frac{d_i}{d_o} = \frac{S_2}{S_1}$$

A questo punto si calcola la distanza in cui posizionare la telecamera S_1 , dato che vale la seguente eguaglianza:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}$$

Come segue:

$$S_1 = f \frac{(1 + M)}{M}$$

Si ottiene una distanza S_1 pari a circa 3538 mm. E' evidente che tale distanza è inaccettabile per l'applicazione richiesta.

Per quanto detto si è proceduto all'acquisto di una nuova focale. Ipotizzando di posizionare la telecamera ad una distanza S_1 di circa 500 mm si è calcolata la distanza focale f che la lente deve possedere.

Svolgendo le formule inverse rispetto a quelle sopra riportate si ottiene un valore di f pari a circa 7 mm. A questo punto, si sono cercate le focali adatte alla telecamera OMRON FH-SC05R dal catalogo, che avessero una focale simile a quella calcolata. La lente che si avvicina di più a quella ricercata è la 3Z4S-LE SV-0814H, con distanza focale di 8 mm.

Rieseguendo i calcoli precedenti si ottiene che, avendo una scena di 300 mm, un sensore di formato 1/2,5", una lente con distanza focale di 8 mm, la distanza a cui posizionare la telecamera vale circa 566 mm. Lo stesso risultato può essere facilmente trovato dal grafico presente sul catalogo OMRON che si riporta di seguito.

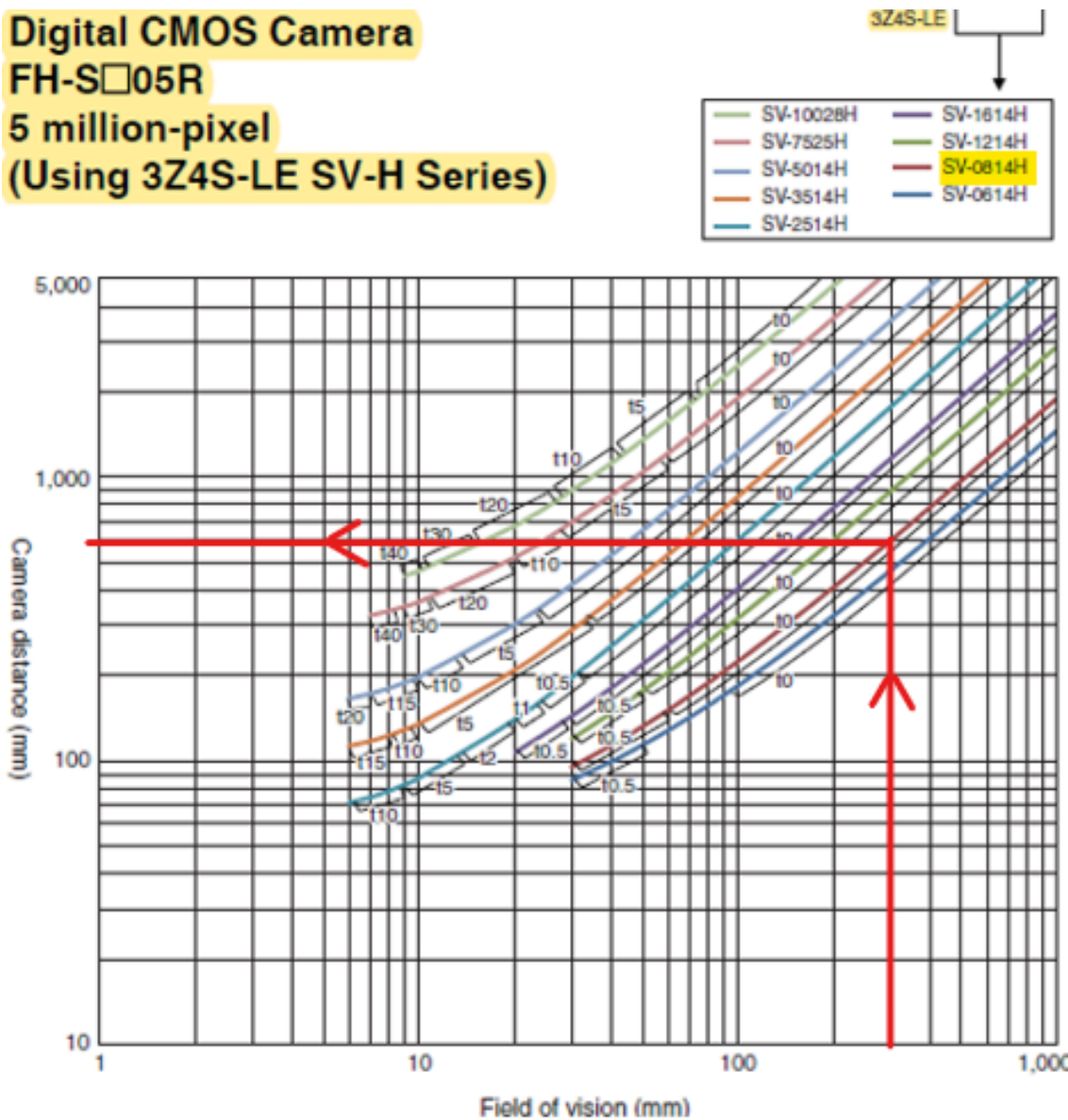


Fig. 7.57 Diagramma per calcolo distanza posizione telecamera rispetto alla scena

Verifica sensore. Si procede alla verifica del frame rate della telecamera, essendo la scena da riprendere in movimento.

Le chips viaggiano su un nastro, che comandato da un quadro equipaggiato con inverter, può variare la sua velocità. La velocità a cui viene fatto viaggiare è di circa 150 mm/s. Dato che le chips cadono su di uno scivolo, subito dopo il nastro, considerando trascurabili gli attriti, anche queste avranno una velocità simile a quella tangenziale a cui viaggia il nastro stesso.

Quindi, considerando una scena di dimensioni 300 (L) x 400 (H) mm circa, se le chips viaggiano ad una velocità di 150 mm/s, queste impiegano un tempo t pari a:

$$t = \frac{H}{v} = 2.67 \text{ s}$$

Dato che la telecamera che si possiede ha un frame rate pari a 14 fps, essa acquisisce un fotogramma ogni 0.07 secondi. Di conseguenza, si acquisiscono circa 40 frame della chips mentre passa sullo scivolo.

A questo punto si vuole verificare se è possibile vedere le chips senza 'sfumature' ai bordi. Per farlo si calcola il tempo di esposizione massimo, come riportato nel paragrafo precedente.

$$\Delta t_{e \max} = \frac{1 \text{ pixel}}{M v}$$

Dalle specifiche tecniche della fotocamera si ricava che la pixel size è di 2.2 μm . Svolgendo i calcoli si determina che $\Delta t_{e \max}$ vale circa 1×10^{-3} secondi. Quindi, per visualizzare le chips in movimento senza avere bordi sfumati è necessario un sensore con un frame rate pari a:

$$\text{frame rate}_{\text{min-no sfum}} = \frac{1}{\Delta t_{e \max}} = 975 \text{ fps}$$

Si può notare che il frame rate minimo richiesto in questo caso è superiore a quello della telecamera, di circa 70 volte. Di conseguenza sarebbe necessario acquistare una telecamera più 'veloce' oppure utilizzare un flash, tuttavia in via sperimentale, per come si è pensato di eseguire la misura, non è richiesto che la chips venga ripresa senza bordi sfocati. Infatti non si devono eseguire misure dimensionali e/o geometriche bensì si deve solamente rilevare la differenza cromatica tra la stessa e il fondo di ripresa.

Dimostrato che la telecamera a disposizione non è ottimale per l'applicazione richiesta ma che è comunque possibile utilizzarla, si procede alla definizione delle attrezzature utilizzate per eseguire le misure sperimentali.

Sistema di illuminazione. Per eseguire le prove sperimentali, inizialmente si è utilizzata la luce naturale del capannone 4 di Alci Group. Si è notato che al cambiare dell'ora in cui le prove venivano svolte, l'illuminazione cambiava anche in maniera significativa. Dato che la linea dovrà funzionare anche su più turni, si è dovuta mettere a punto una configurazione in cui l'illuminazione rimanesse costante. In particolare, si è realizzata una camera buia in cui la luce è fornita dall'illuminatore HPD2-100SW.

7.2.3.3 IL LAYOUT PROTOTIPALE DEL SISTEMA DI VISIONE

Di seguito si riporta la configurazione di posizionamento dei vari componenti del sistema di visione che si è utilizzata per svolgere le prove sperimentali.

Su di un tavolo, realizzato con profili in alluminio Alutec 45 x 45 mm, si è posizionato un nastro a doppia penna comandato da un quadro elettrico dotato di inverter. Sul lato corto del tavolo è stato fissato lo scivolo in acciaio inox per mezzo di due viti M6 x 50 mm, che sono state avvitate su due appositi inserti. Con questo sistema si è riusciti in fase sperimentale a modificare in maniera rapida l'inclinazione dello scivolo al fine di trovare quella ottimale per l'applicazione in questione.

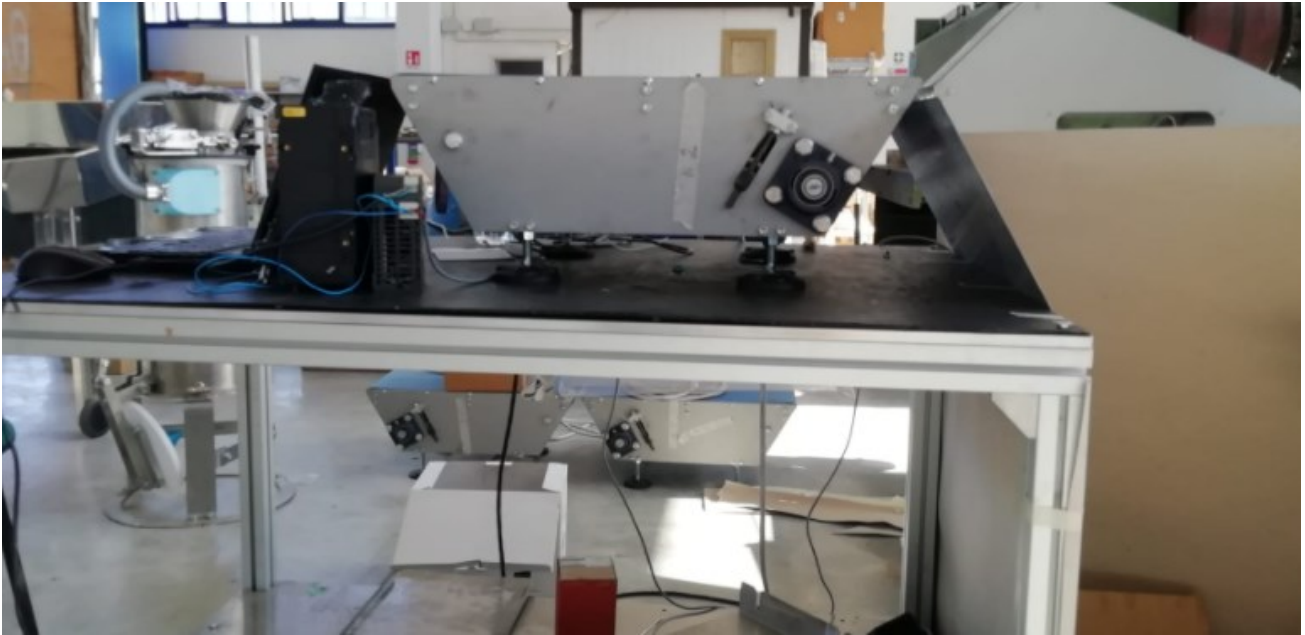


Fig. 7.58 Tavolo di prova con nastro trasferimento

La telecamera è stata posizionata anch'essa su una piccola struttura in profilati Alutec 45 x 45 mm. E' stato inoltre realizzato un supporto in lamiera inox di spessore 2 mm in cui si sono ricavati due fori per fissare la telecamera. Il supporto a sua volta è stato fissato sulla struttura per mezzo di due viti M6 x 40 mm.



Fig. 7.59 Struttura di prova preliminare

Come brevemente spiegato nel capitolo VI, la modalità di controllo utilizzata consiste nell'individuare la differenza cromatica tra le chips conformi e non conformi. Infatti, le chips spellicolate (conformi) possiedono il caratteristico colore nero dei materiali compositi in fibra di carbonio, mentre le chips non spellicolate (non conformi), avendo ancora il film protettivo, appaiono di colori differenti come rosa, giallo o verde.

Per quanto detto, lo scivolo è stato verniciato in nero opaco RAL 9005 (inizialmente si sono svolte prove in cui sullo scivolo veniva incollato un foglio di prepregs vergine che facesse da sfondo per il sistema di visione). In questa maniera, utilizzando appositi filtri, si è cercato di annullare il contrasto tra quest'ultimo e le chips conformi, e viceversa di accentuare quello tra le chips non conformi.

L'illuminatore è stato posizionato sulla parte bassa tramite un supporto in lamiera e delle viti M6 x 40 mm. Mentre la camera buia è stata ottenuta con delle barre di lamiera appositamente piegate su cui sono stati avvolti dei fogli di carta da imballaggio.



Fig. 7.60 Layout di posizionamento preliminare di illuminatore e telecamera

Con questa configurazione si sono svolte delle prove preliminari con lo scopo di verificare che il sistema di visione presente in casa fosse in grado di svolgere la funzione richiesta. Ottenuti dei risultati incoraggianti, si è passati alla progettazione del layout di prova vero e proprio.

Prima di procedere alla spiegazione della configurazione che è stata realizzata per svolgere le prove sperimentali del sistema di visione, si vogliono riportare alcune considerazioni necessarie alla comprensione della stessa.

1. Nel layout prototipale le chips, provenienti dall'accoppiata spellicolatrice pneumatica - defogliatrice, vengono poggiare sul nastro di trasferimento da un operatore. Di conseguenza l'eventuale film protettivo che non è stato rimosso dalla spellicolatrice pneumatica o dalla defogliatrice, potrebbe essere rivolto verso il basso (faccia della chips con pellicola a contatto con il nastro). Di conseguenza, se si verificasse tale situazione, la telecamera non rilevarebbe l'errore. Per quanto detto si è dovuta mettere a punto una configurazione tale per cui vengano riprese entrambe le facce della chips al fine di verificare l'assenza della pellicola su ambo i lati.

2. Una volta che si è eseguita la misura, nel caso in cui si individua una chips non conforme, questa viene eliminata tramite un getto d'aria controllato. In particolare, le chips non conformi verranno 'sparate' contro uno scivolo di scarico, che le convoglierà in un recipiente di raccolta. Successivamente queste saranno reintrodotti nella spellicolatrice pneumatica. Le chips conformi

invece cadranno per gravità all'interno di un recipiente e verranno indirizzate alla confezionatrice verticale per poi essere imbustate.

Il compito del candidato è stato di valutare se il sistema di visione presente in casa fosse in grado di svolgere la funzione richiesta (controllo della presenza della pellicola sulla chips). Non è stato richiesto lo studio approfondito della modalità con cui visualizzare entrambe le facce della chips e con la quale separare quelle non conformi da quelle conformi. Tuttavia si è progettata, a livello qualitativo, una struttura con la quale poter svolgere completamente la funzione richiesta. Sarà oggetto di studio nei successivi stati di avanzamento del progetto verificare se la configurazione realizzata è ottimale o se sono necessarie alcune modifiche.

Di seguito si riporta la stazione di check.



Fig. 7.61 Rendering stazione di check

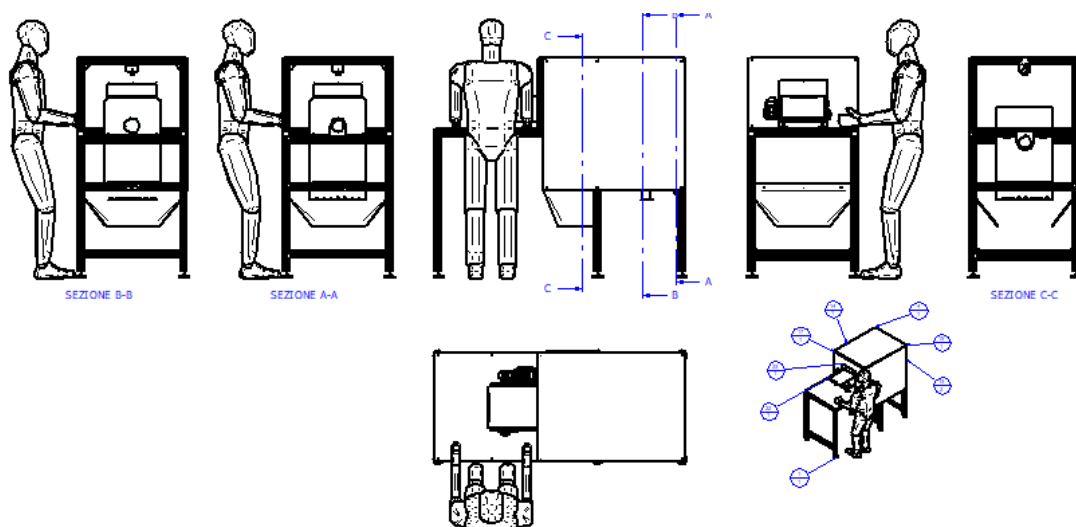


Fig. 7.62 Tavola stazione di check

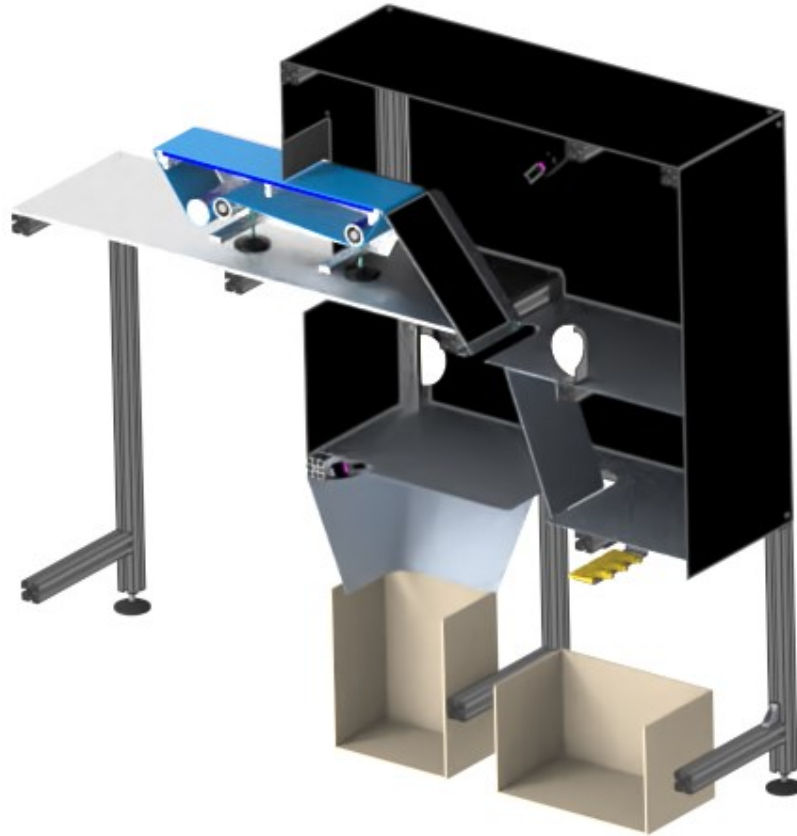


Fig. 7.63 Rendering della sezione della stazione di check (1)

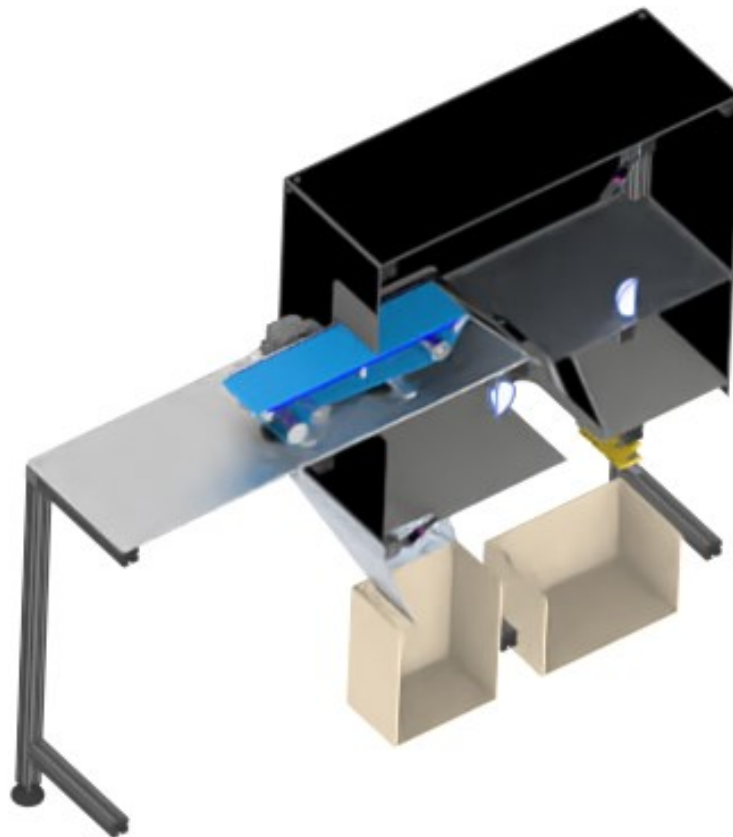


Fig. 7.64 Rendering della sezione della stazione di check (2)

E' stata realizzata una camera buia con dei profilati in alluminio Alutec 45 x 45 mm leggeri. Essa è tamponata con delle lamiere di spessore 1 mm verniciate in nero opaco RAL 9005.

La camera buia è stata divisa in 3 scomparti. Il primo in cui si esegue la misurazione mentre la chips scorre sullo scivolo. Il secondo in cui si riprende l'altra faccia della chips mentre questa è in caduta libera. E infine l'ultimo, in cui, tramite degli ugelli d'aria si eliminano le chips non conformi (non spellicolate).

I tre scomparti sono separati da due lamiere. Così facendo si riescono a separare le due camere di ripresa evitando così che l'illuminazione di uno scomparto influenzi l'altro. Ovviamente si è prevista una feritoia su ogni lamiera per permettere il passaggio delle chips.

Negli scomparti di ripresa, le telecamere sono fissate su dei supporti in lamiera inox di spessore 2 mm appositamente piegati, i quali a loro volta, tramite appositi inserti e viti M6 x 40 mm sono fissati sul telaio della struttura. Gli illuminatori, sono fissati anch'essi al telaio della struttura tramite appositi lamierini in inox di 2 mm. I profilati Alutec su cui questi sono ancorati sono mobili grazie ad una configurazione per cui la testa della vite, avvitata sul foro centrale della sezione del profilato, scorre all'interno della cava degli altri profilati che compongono la struttura. Ciò permette di regolare la posizione degli illuminatori al fine di ottenere l'illuminazione ottimale per svolgere la misura.

L'ultimo scomparto, il terzo, è quello di separazione delle chips. Tramite un lamierino in inox di spessore 2 mm si sono fissati alla struttura degli ugelli d'aria grazie ai quali si eseguirà la separazione delle chips conformi da quelle non conformi.

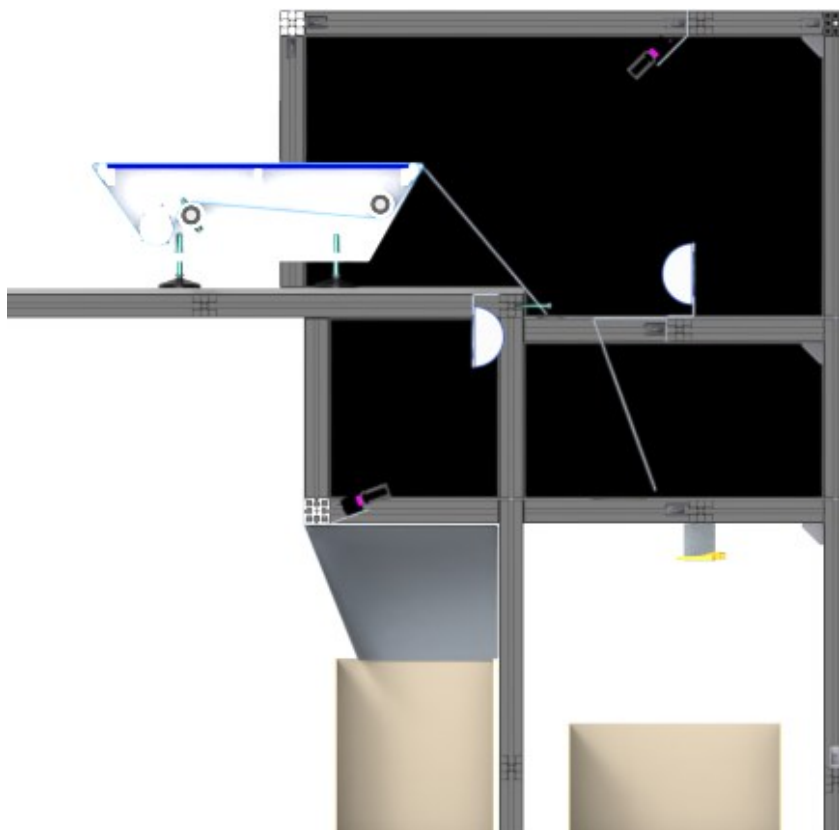


Fig. 7.65 Rendering della sezione laterale della stazione di controllo

In fase sperimentale si è pensato di utilizzare un unico getto d'aria, quindi un'unica elettrovalvola. In questo caso, quando il sensore rileva una chips non conforme, invia il segnale al PLC che a sua volta, dopo un certo intervallo di tempo, attiva l'elettrovalvola. Quest'ultima alimenta tutti gli ugelli disposti in serie sul lamierino, creando così un flusso d'aria piatto che impatta sulle chips che stanno cadendo, indirizzandole contro lo scivolo di scarico delle chips non conformi. Gli ugelli che permettono di ottenere un getto d'aria piatto e collimato sono commerciali con codice "WindJet AA727-1/4-RY-15".



Fig. 7.66 Ugelli WindJet aa727-1/4-15

E' evidente che con questa configurazione si potrebbero eliminare anche chips conformi. Ciò accade nel caso in cui sul nastro viaggiano alla stessa altezza (una affianco all'altra) una chips conforme e una non conforme. In questo caso il sistema di visione individua l'errore a causa della chips non conforme e invia il segnale all'elettrovalvola che a sua volta attiva il getto d'aria. Dato che l'elettrovalvola alimenta tutti gli ugelli, il getto d'aria generato impatterà su entrambe le chips.

Tale problema non è molto rilevante per due motivi fondamentali. Il primo è che la spellicolatrice pneumatica ha un rendimento molto elevato, quindi il numero di chips non conformi che arrivano alla stazione di check è molto ridotto e di conseguenza sarà ridotto anche il numero quelle conformi scartate, qualora si verifichi la situazione sopra descritta.

Il secondo motivo è che le chips non conformi non vanno perse, anzi. Queste sono reimmesse nella spellicolatrice pneumatica con lo scopo di eliminare il film protettivo. Tale aspetto è molto significativo, perché evidenzia che tutto il materiale che entra nel centro di recupero, eccetto quello eliminato nella stazione di vagliatura perché non rispetta i vincoli dimensionali imposti dalle aziende partner, viene convertito in prodotto utile.

Una considerazione importante che può essere fatta, dato quanto già detto, è che le condizioni di verifica delle chips da impostare nel sistema di visione devono e possono essere molto severe.

Devono perché come più volte ripetuto, è stato espressamente indicato dalle aziende partner utenti finali che il materiale recuperato non deve contenere, in maniera categorica, pellicole o chips non spellicolate dato che il film protettivo introduce delle discontinuità strutturali ed estetiche nei manufatti.

Possono perché, essendo i rendimenti della spellicoltrice pneumatica e della defogliatrice molto elevati, le chips non conformi e le pellicole che arrivano alla stazione di check sono in numero molto contenuto rispetto a quelle elaborate. E' quindi accettabile che il sistema di controllo possa commettere errori di rilevazione per eccesso di sicurezza rispetto al caso opposto. Ovvero si può accettare che il sensore rilevi degli errori anche quando non passano chips non conformi (a favore di sicurezza) dato che comunque sia le chips che vengono eliminate, non vengono scartate ma rielaborate nella spellicoltrice pneumatica. Quanto appena detto, facilità e non poco la definizione dei filtri e delle impostazioni da utilizzare nel sensore di visione.

Fatta questa breve parentesi, si fa notare che nelle soluzioni più avanzate sarà possibile prevedere un sistema che permetta di eliminare solamente le chips non conformi. Per fare ciò è necessario avere un sistema di visione che oltre a rilevare l'errore, rilevi anche la posizione (x e y) dello stesso (possibile con quello presente in Alci Group). Discretizzando l'asse x^{13} (larghezza dello scivolo) con diversi ugelli con getto d'aria puntiforme e utilizzando un numero di elettrovalvole pari al numero di ugelli, si riesce ad inviare il segnale di errore (non conformità) tramite il PLC, solamente all'elettrovalvola posizionata alla medesima coordinata di dove è stato individuato l'errore.

Pertanto, in quest'ultima configurazione, non sono più utilizzabili gli ugelli sopra riportati, dato che con essi si ottiene un flusso piatto e largo ma si dovranno utilizzare tanti ugelli puntiformi, posizionati ad una specifica distanza rispetto a dove cadono le chips.



Fig. 7.67 Esempio di ugello puntiforme

Ovviamente più ugelli si riescono a posizionare lungo l'asse x più risulterà precisa l'azione di separazione delle chips conformi da quelle non conformi. Nel caso in cui si verificassero problemi di ingombro sulla lamiera di fissaggio degli ugelli, una soluzione potrebbe essere di utilizzare due porte ugelli a diversa altezza, con ugelli posizionati in maniera sfalsata tra loro, in modo da poter emettere getti d'aria che coprano tutta la larghezza del piano di caduta delle chips. Ovviamente con questa configurazione è necessaria una logica di controllo molto più avanzata.

¹³ Considerando lo scivolo di caduta delle chips, si considera l'asse x l'asse rivolto lungo la larghezza dello scivolo (L) corrispondente alla direzione ortogonale rispetto a quella di caduta delle chips, mentre l'asse y quello rivolto lungo la lunghezza dello scivolo (H), corrispondente alla direzione di caduta delle chips

7.2.3.4 IL SET UP DEL SISTEMA DI VISIONE

Per poter svolgere le misurazioni in maniera corretta si sono definite le impostazioni del sistema di visione. Tramite il software Sysmac Studio, si è impostato il set up ottimale della telecamera affinché siano riconoscibili le chips non conformi.



Fig. 7.68 Sysmac Studio

Di seguito si riportano i passaggi che sono stati svolti per definire la logica di funzionamento del sistema di misura (post-processing).

Per prima cosa il software chiede di definire il nome del nuovo progetto che si andrà a sviluppare e quale periferica si sta utilizzando.

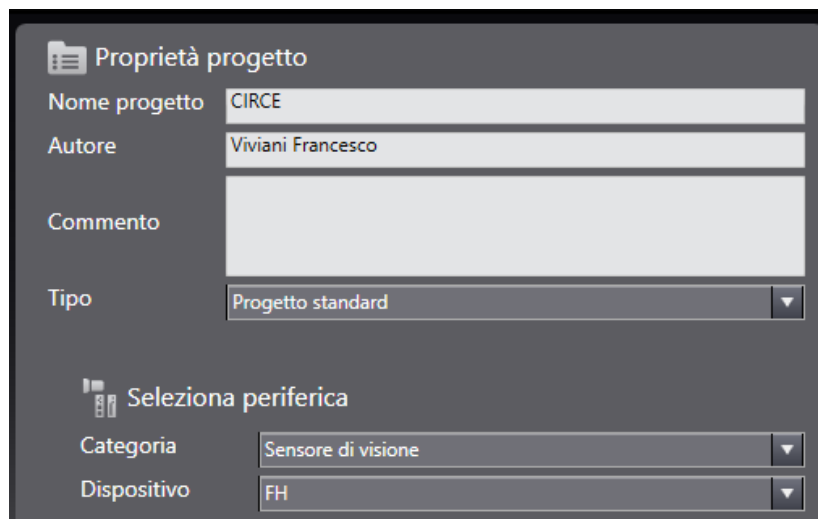


Fig. 7.69 Schermata 1 Sysmac Studio

Dopodiché si procede alla ricerca del sensore e a sua volta del controllore che è stato collegato al PC tramite un cavo ethernet.

A questo punto da *dati scena* si visualizza la scena che sta riprendendo la telecamera e si possono iniziare a definire le impostazioni del sensore.

Come si è già detto, l'obiettivo della misura è mettere in risalto le chips non conformi rispetto a quelle conformi che poggiano sul piano verniciato in nero opaco. Per fare ciò si sono utilizzati diversi filtri in relazione alle indicazioni che sono riportate nel manuale Omron.

Impostazioni sensore di visione:

0. Ingresso immagine telecamera FH

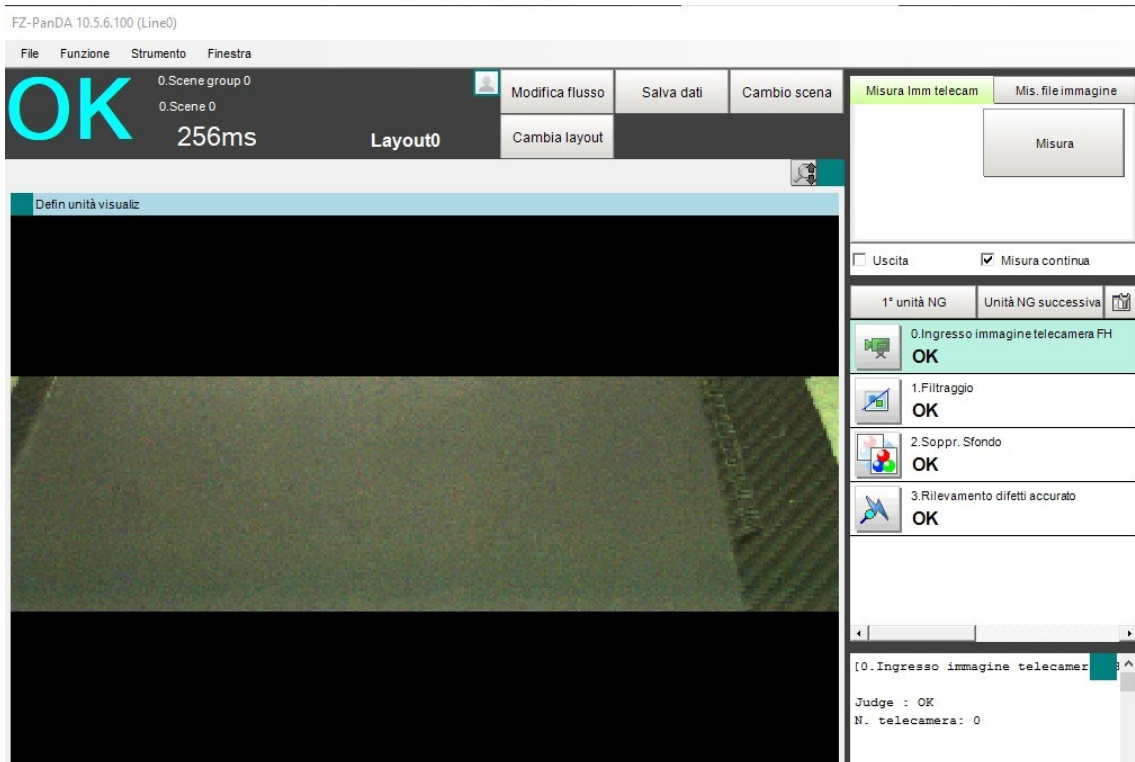


Fig. 7.70 Visualizzazione senza filtri

1. Filtraggio

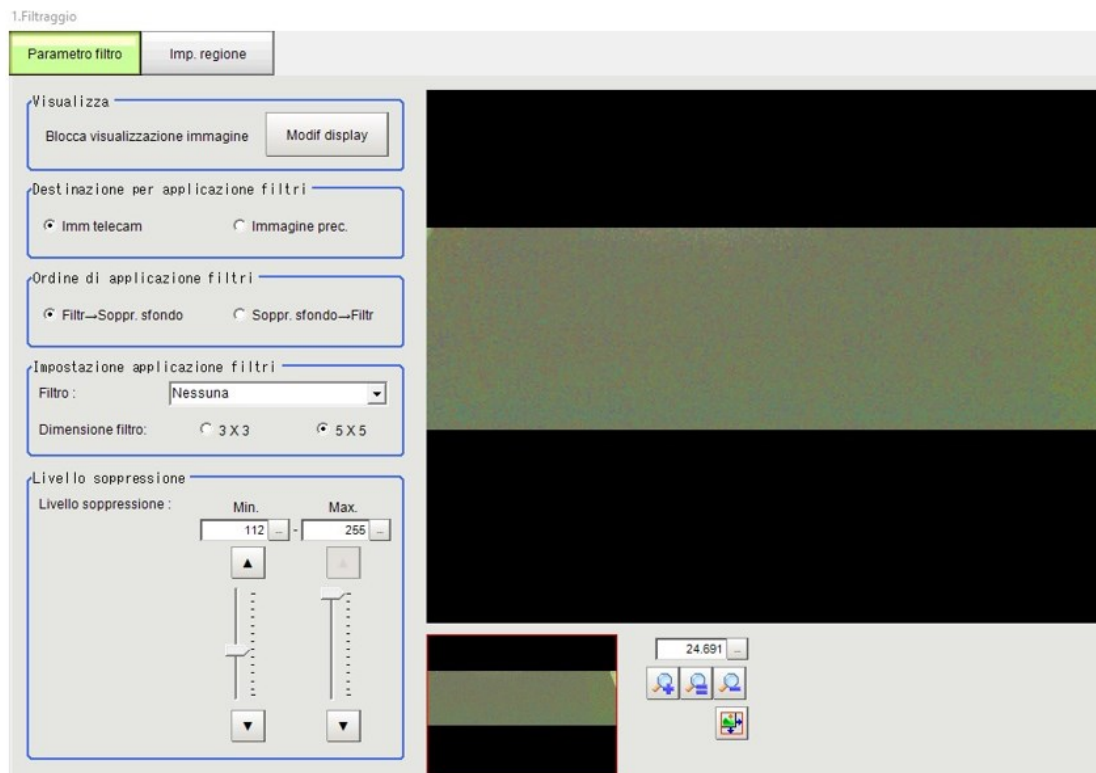


Fig. 7.71 Visualizzazione con 'filtraggio'

2. Soppressione sfondo

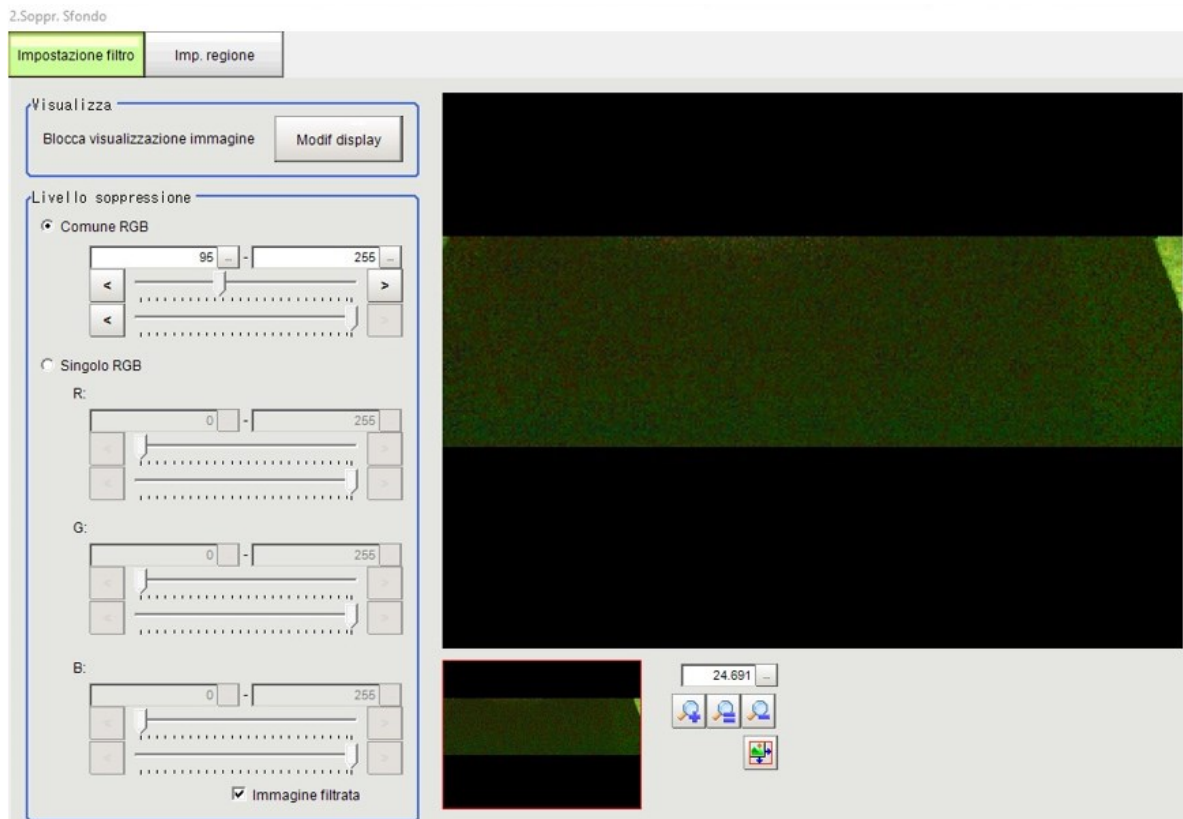


Fig. 7.72 Visualizzazione con 'soppressione sfondo'

3. Rilevamento difetti accurato

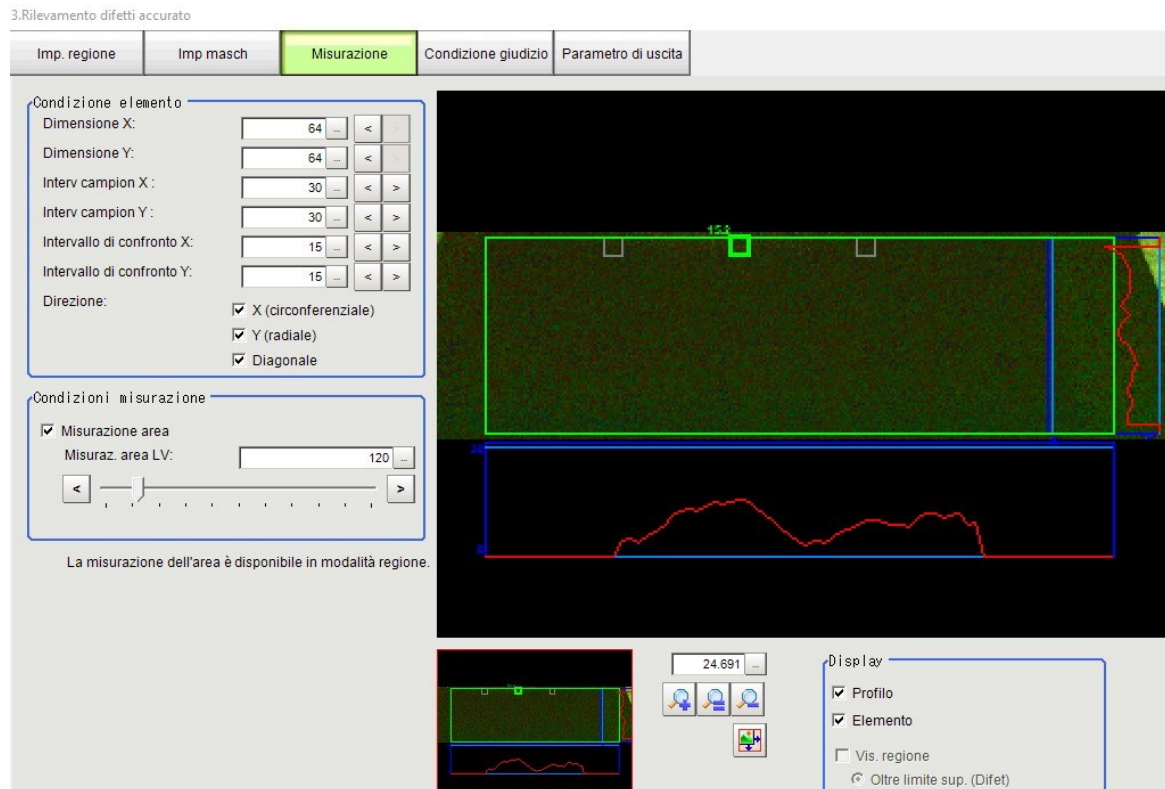


Fig. 7.73 Impostazioni 'rilevamento difetti accurato' (1)

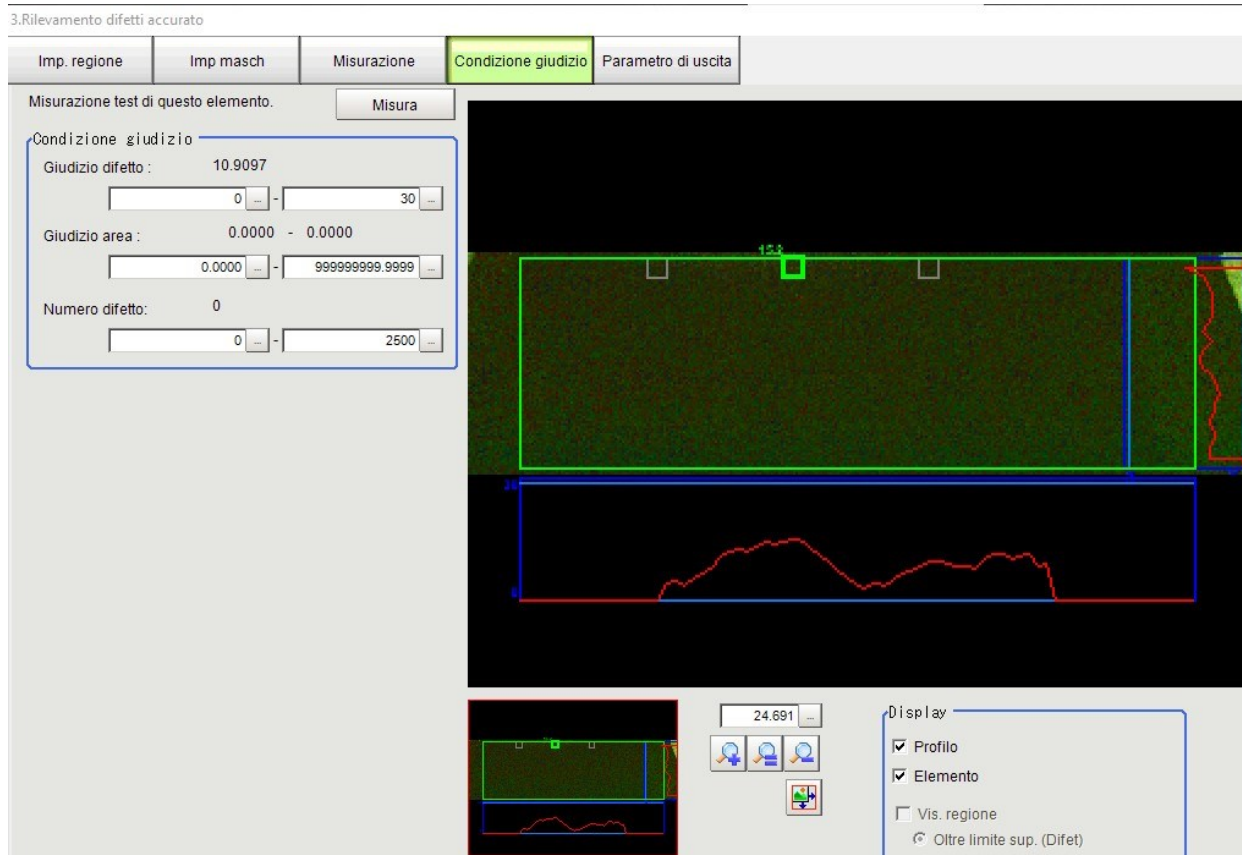


Fig. 7.74 Impostazioni 'rilevamento difetti accurato' (2)

Di seguito si riporta come varia la visualizzazione delle chips con i filtri utilizzati.

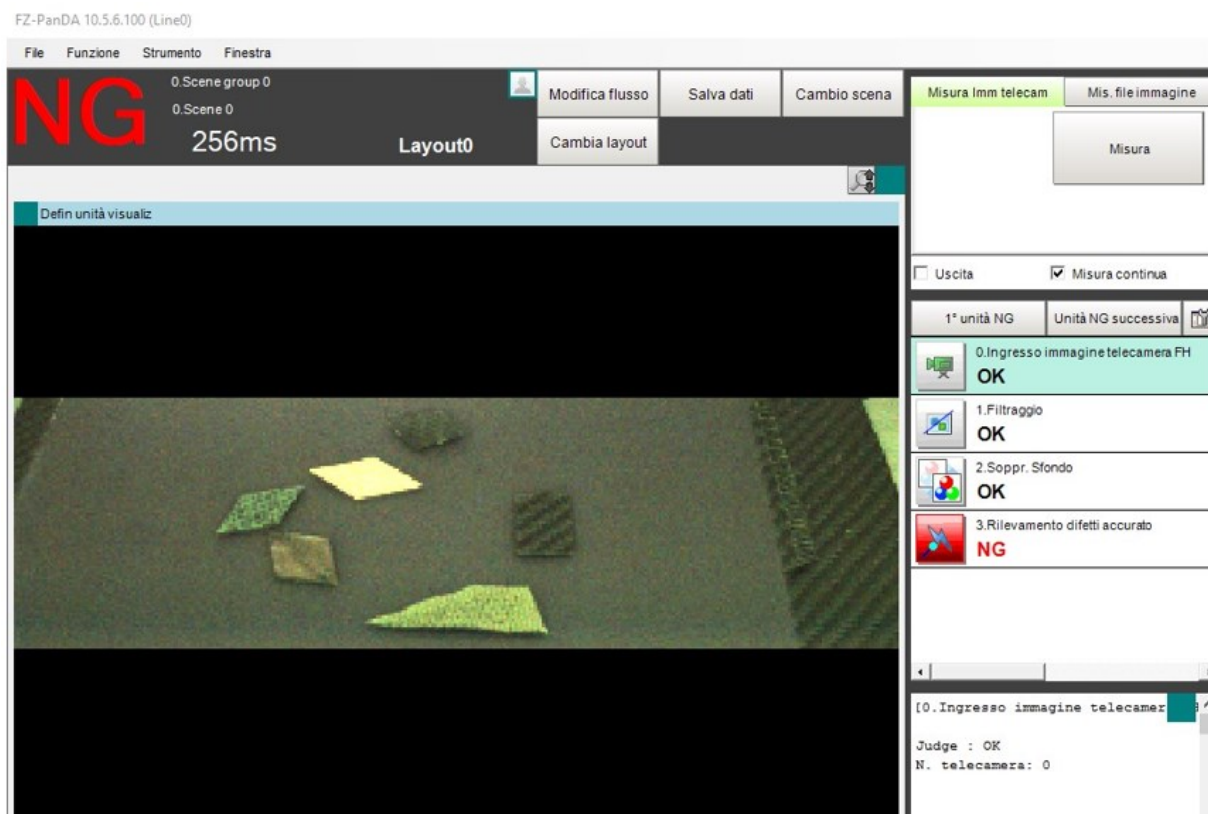


Fig. 7.75 Visualizzazione senza filtri

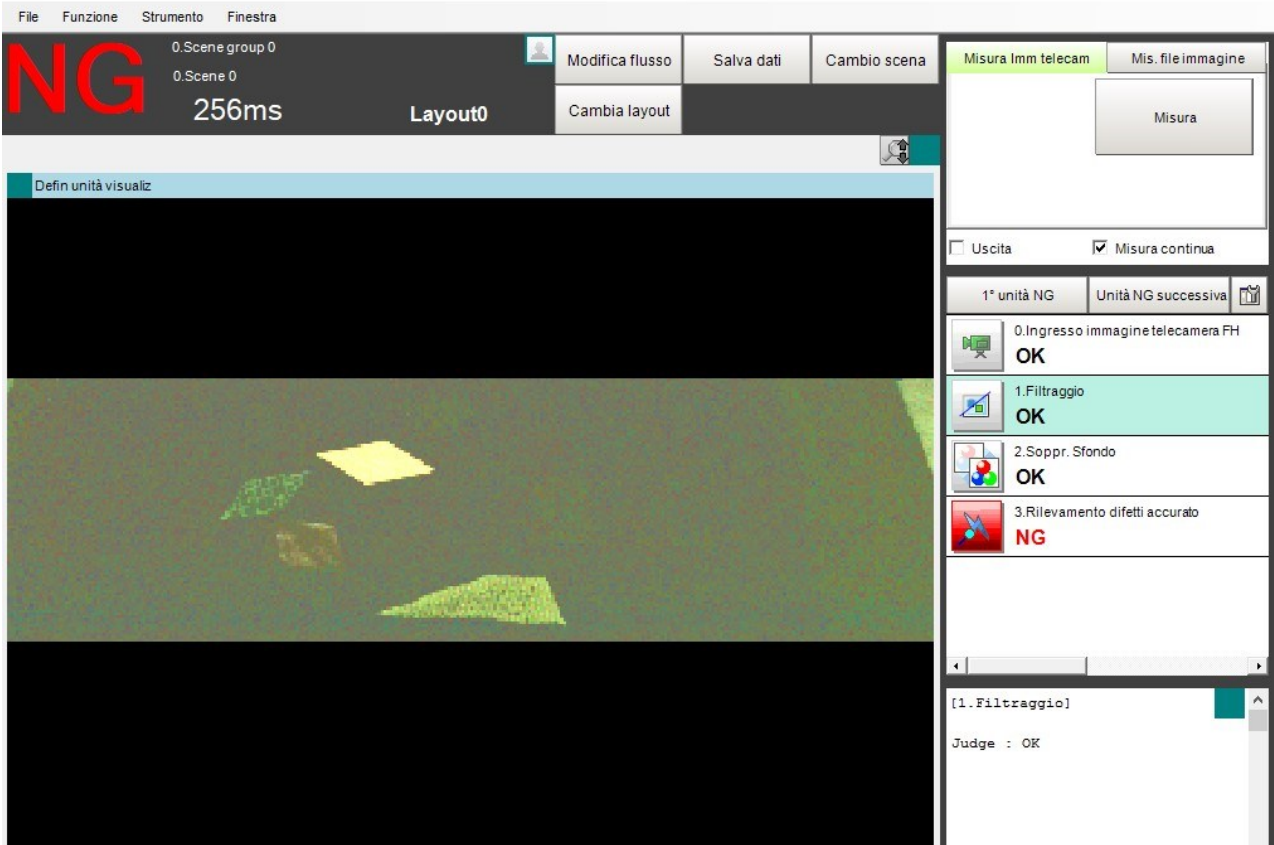


Fig. 7.76 Visualizzazione con 'filtraggio'

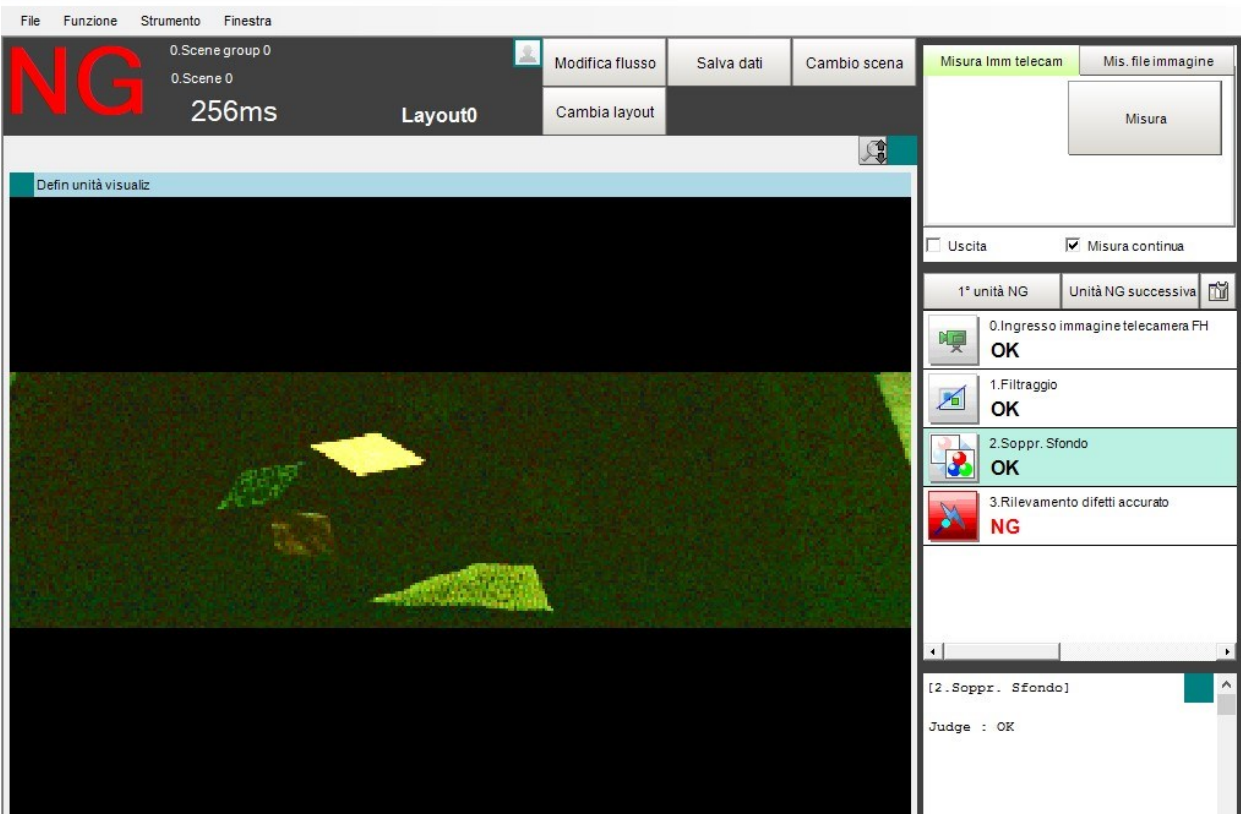


Fig. 7.77 Visualizzazione con 'soppressione sfondo'

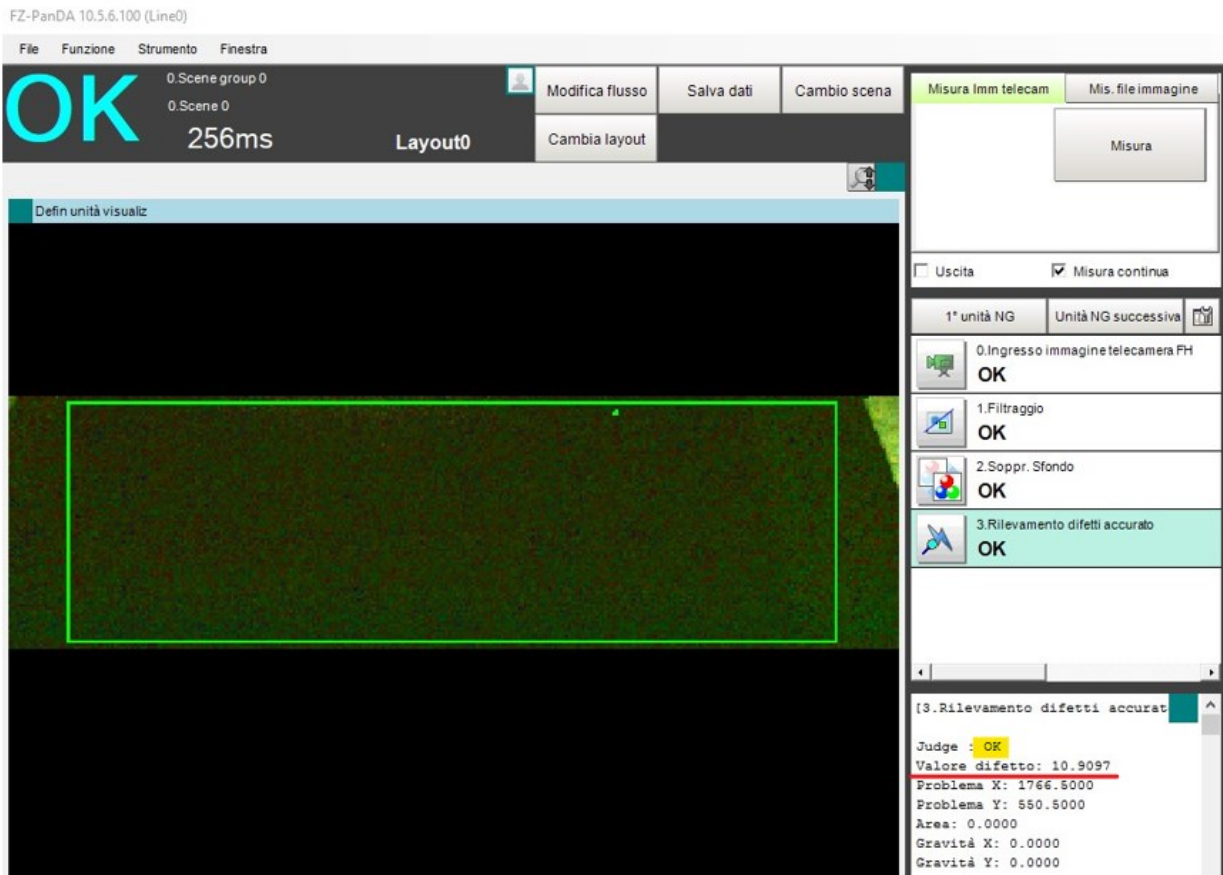


Fig. 7.78 Visualizzazione durante misura, chips conforme

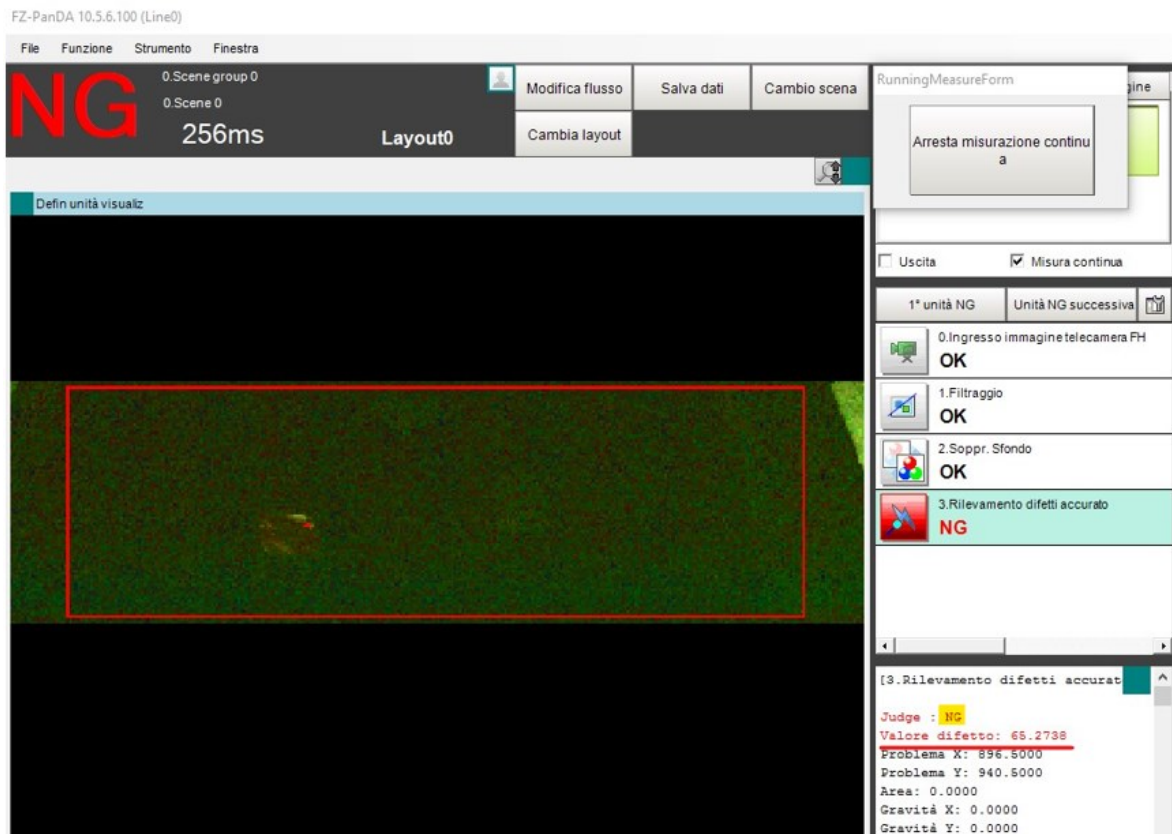


Fig. 7.79 Visualizzazione durante misura, chips non conforme con pellicola rosa

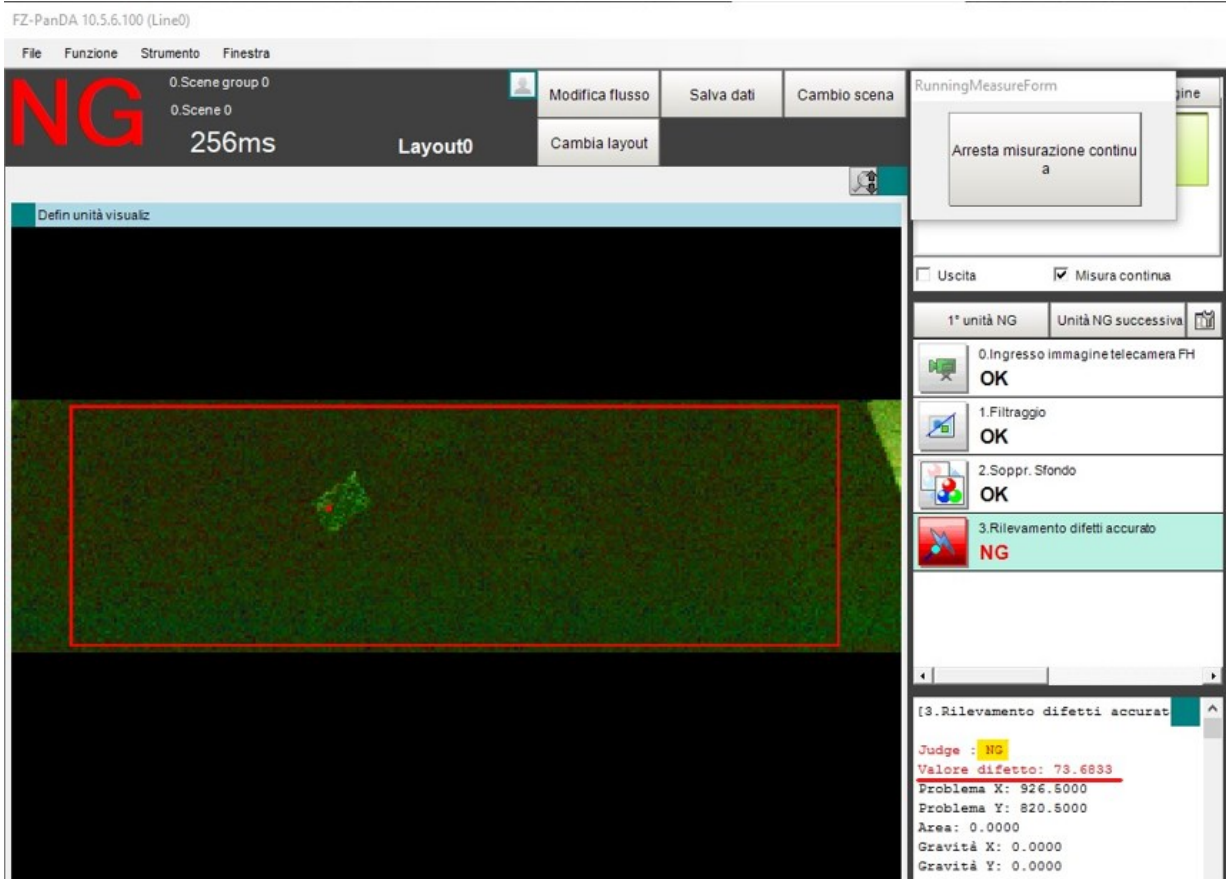


Fig. 7.80 Visualizzazione durante misura, chips non conforme con pellicola verde

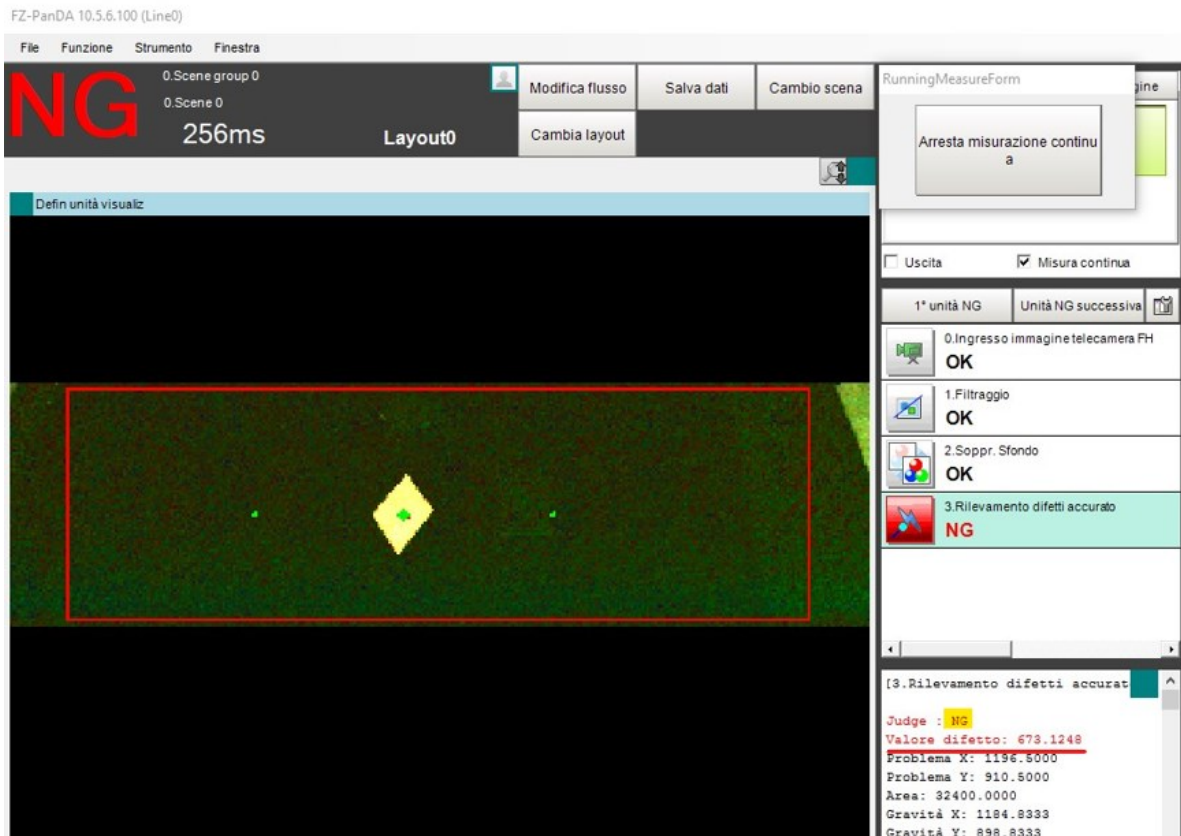


Fig. 7.81 Visualizzazione durante misura, chips non conforme con pellicola gialla

Si riportano le considerazioni che si sono fatte per la scelta dei filtri e del sistema di rilevamento degli errori.

Filtraggio. Tale filtro è stato utilizzato per ridurre al minimo il contrasto tra le chips conformi e lo scivolo verniciato in nero opaco. Dalla Fig. 7.74 si nota che le chips conformi, utilizzando 'filtraggio' con un livello di soppressione min-max pari a 112-255, non sono più visibili (aspetto positivo). Tuttavia si riduce anche il contrasto delle chips non conformi che invece deve essere massimizzato (aspetto negativo).

Soppressione sfondo. Per aumentare il contrasto delle chips non conformi rispetto allo scivolo in nero opaco, a seguito di filtraggio, si è utilizzato il filtro 'soppressione sfondo'. Impostando un livello di soppressione ad RGB comune min-max pari a 95-255 si riescono a mettere in rilevanza le chips non conformi (aspetto positivo), come si nota nella Fig. 7.75.

Rilevazioni difetti accurati. Impostati i filtri per modificare la visualizzazione della scena si è definito il sistema di rilevazione dei difetti. Per l'applicazione in questione, il software 'rilevazioni difetti accurati' è l'ottimale, infatti il manuale Omron afferma che:

"Detect defects and contamination using color variation within the measurement region. This is real color processing, so even if defect and contamination colors change or the background color changes, stable inspection is possible"

Si è quindi impostata l'area di interesse della misurazione e le dimensioni caratteristiche della misurazione. Nello specifico:

- dimensioni X e Y del difetto (64): dimensione dell'asse x e y dei difetti da rilevare
- intervallo di campionamento X e Y (30): intervallo di rilevamento dei difetti (più è piccolo più la misurazione è precisa ma la velocità di elaborazione più lenta)
- intervallo di confronto X e Y (15): numero di elementi vicini in base ai quali viene calcolato il grado di difetto

Infine si è definito il grado di giudizio. Si è visto che in media senza il passaggio delle chips si ha un errore di circa 10, mentre al passaggio delle chips conformi un errore che può arrivare a circa 15. Considerando un fattore di sicurezza pari a 2, si è impostato un grado di giudizio di 30. In questo modo, se il sensore rileva un errore fino a 30 non invia nessun segnale (OK), se invece ne rileva uno oltre 30 invia il segnale NG (no good).

Dalle immagini sopra riportate si può notare che la chips non conforme più critica è quella con la pellicola rosa dato che è poco visibile dopo l'applicazione dei filtri. Tuttavia il sensore al suo passaggio rileva un errore di circa 65 e quindi invia un segnale NG. Le chips più facili da individuare sono invece quelle con film protettivo di colore giallo, in cui si arriva a gradi di errore pari a 670.

Per evitare problematiche, un'ulteriore soluzione potrebbe essere quella di impostare un filtro differente in base alle chips che si stanno elaborando nell'impianto. Infatti, come da accordi, i fogli di prepregs da recuperare sono divisi per tipo di resina, rinforzo e resistenza della fibra. Di conseguenza, nell'impianto è introdotta una sola tipologia di chips alla volta, quindi il sistema di visione si vede arrivare chips con pellicole di un unico colore alla volta. Per quanto detto, si

potrebbero definire tante sequenze di filtri quante sono le tipologie di pellicole da individuare, e ogni volta che si elabora una certa tipologia impostare l'apposita sequenza di rilevamento.

Inoltre potrebbero essere utilizzati dei filtri polarizzati per accentuare il contrasto delle pellicole meno visibili.

7.2.4 IL QUADRO ELETTRICO DEL SOTTOBLOCCO 1 DEL BLOCCO 2

Per il controllo del primo sottoblocco del blocco 2 si è realizzato un quadro elettrico dotato di PLC. In questo modo è stato possibile eseguire le prove sperimentali sulla spellicolatrice pneumatica, quindi modificare i parametri di carico/scarico e di funzionamento della macchina.

Le informazioni salienti che sono state fornite al tecnico elettronico per realizzare il quadro sono:

- n°2 elettrovalvole 5/2 con solenoidi Camozzi U77 24 V
- n°2 elettrovalvole 2/2 con solenoide Camozzi B7B 24 V
- n°1 gruppo FRL MX con solenoide Camozzi U77 24V
- n°3 prese industriali 220 V di cui una comandata da teleruttore
- n°1 alimentatore per sistema di visione
- predisposizione per più spellicolatrici (2-3)
- predisposizione per inverter per nastri di distribuzione/elevazione

Il quadro è dotato di un PLC equipaggiato con un pannello HMI (Uman Machine Interface), grazie al quale si possono modificare i parametri della spellicolatrice pneumatica oltre che ad accendere e spegnere in maniera automatica, tramite un teleruttore, l'aspiratore. Le altre prese 220 V sono necessarie per il collegamento del congelatore della spellicolatrice qualora fosse necessario (in base a dove verrà posizionato il blocco 2, dato che HP Composites dispone di una camera refrigerata) e della defogliatrice.



Fig. 7.82 Quadro elettrico sottoblocco 1 blocco 2

7.2.5 IL LAYOUT COMPLESSIVO DEL SOTTOBLOCCO 1 DEL BLOCCO 2

Si riporta di seguito il layout prototipale del sottoblocco 1 del blocco 2. Si possono notare le diverse stazioni di spellicolazione, defogliazione e controllo. Le stazioni attualmente non sono collegate tra loro e il trasporto di materiale da una all'altra viene svolto manualmente, tuttavia nei successivi stati di avanzamento del progetto si dovrà procedere alla realizzazione di nastri trasportatori e attrezzature per rendere completamente automatica la linea.

Di seguito si riportano i rendering del layout del primo sottoblocco del blocco 2. Si sono disegnate le attrezzature che non sono state ancora realizzate in maniera stilizzata (nastri di collegamento, elevatori e congelatori per spellicolatrici). Ciò è stato comunque utile per definire gli ingombri totali del layout che sono stati richiesti da HP Composites per allestire l'area in cui le macchine andranno posizionate.



Fig. 7.83 Layout prototipale del primo sottoblocco del blocco 2 (vista assometrica 1)

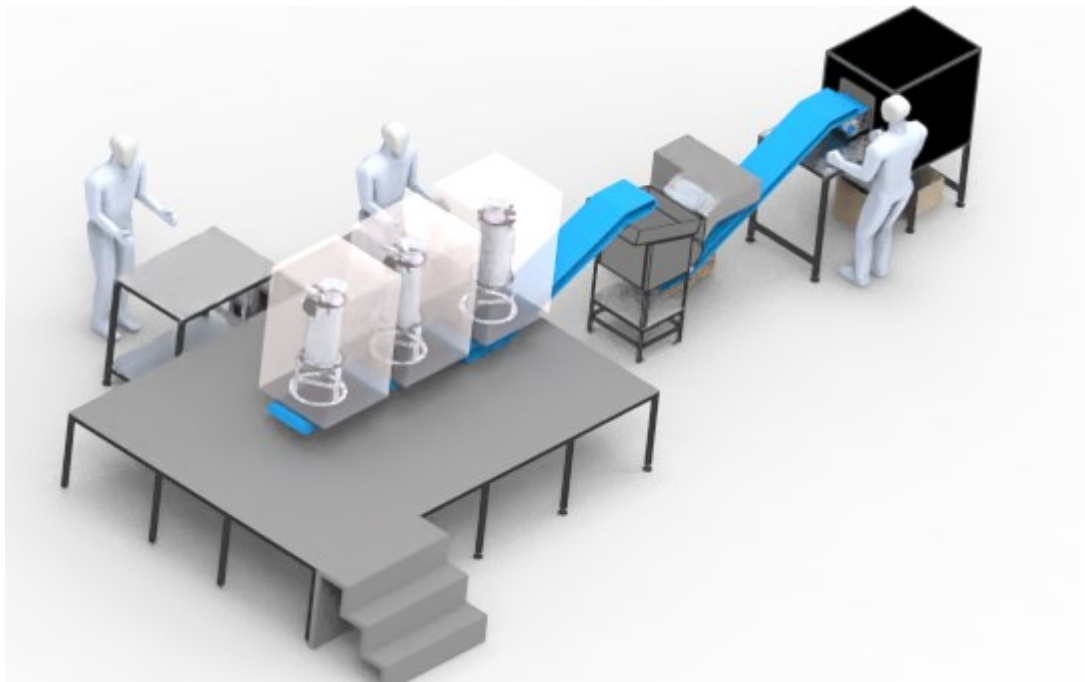


Fig. 7.84 Layout prototipale del primo sottoblocco del blocco 2 (vista assometrica 2)

Si evidenzia che nel layout prototipale sono state previste tre spellicolatrici pneumatiche. Inoltre è possibile notare che la zona di spellicolazione e di defogliazione sono state rialzate rispetto al piano di pavimento. Ciò è stato fatto perché, svolgendo delle prove sperimentali, si è visto che le chips possono essere trasportate su nastri inclinati fino ad un angolo di 28° senza che queste scivolino verso il basso. Dato che nastri con facchini non sono ottimali per il trasporto alla stazione di defogliazione e soprattutto a quella del sistema di visione, per evitare che le diverse stazioni siano posizionate a distanze troppo estese, si è deciso di innalzare le prime due stazioni.

Sul tavolo affianco alla zona di spellicolazione avverrà la pesatura del materiale da elaborare nelle spellicolatrici che attualmente avviene manualmente (successivamente si prevede di introdurre un sistema automatizzato).

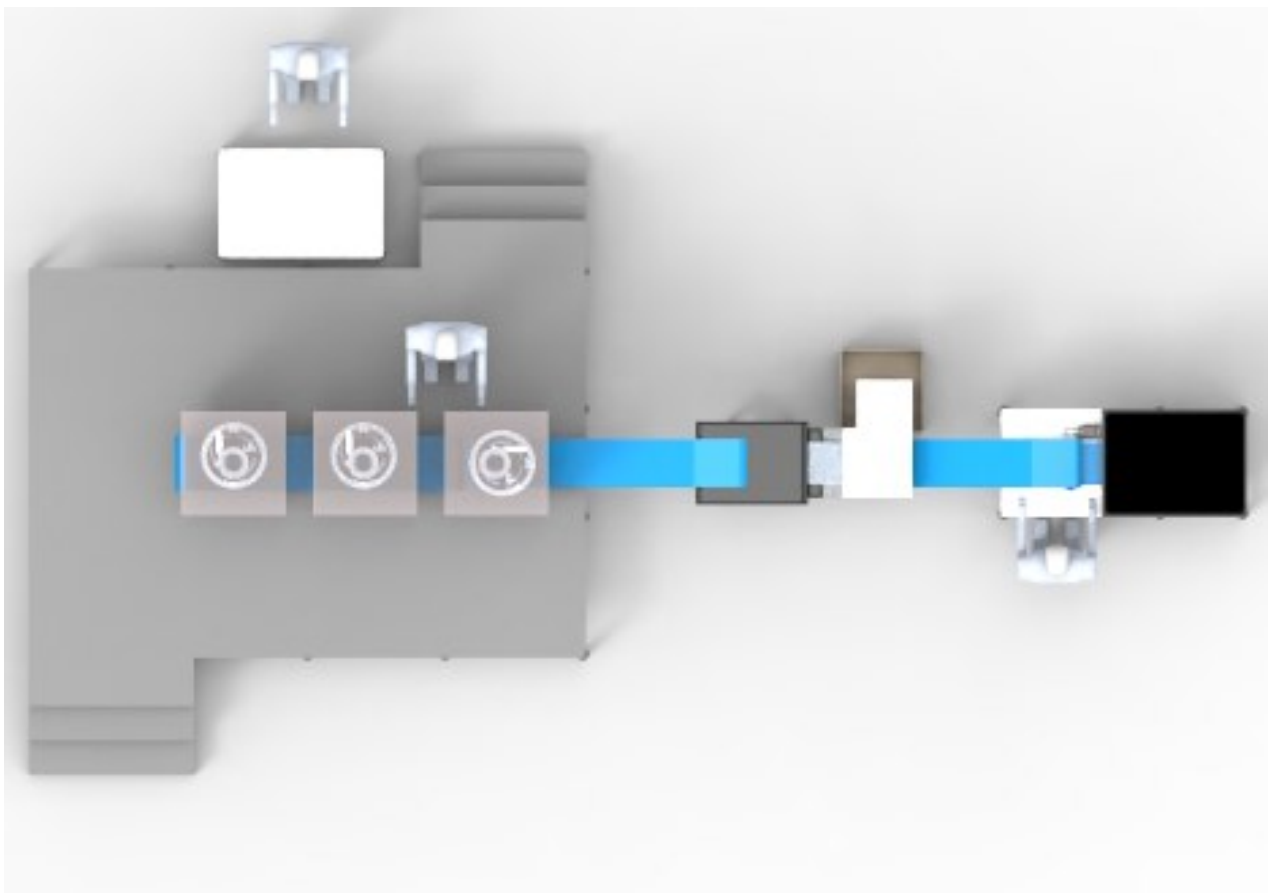


Fig. 7.85 Layout prototipale del primo sottoblocco del blocco 2 (vista dall'alto)

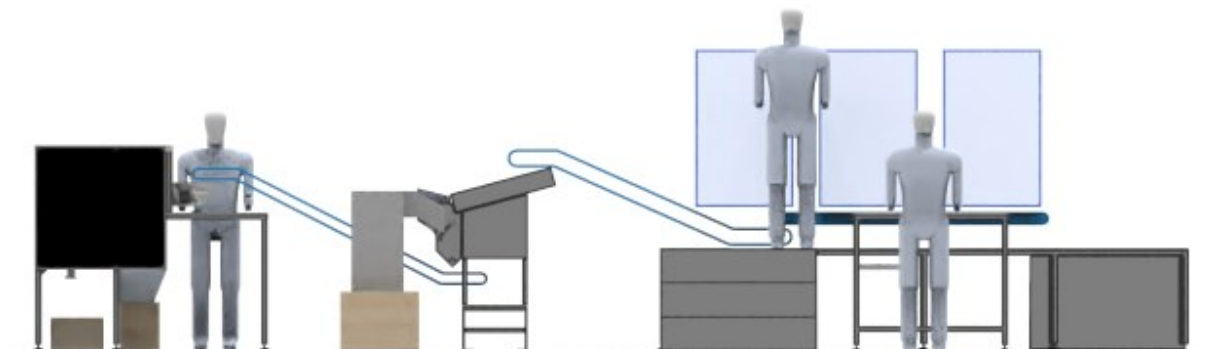


Fig. 7.86 Layout prototipale del primo sottoblocco del blocco 2 (vista laterale)

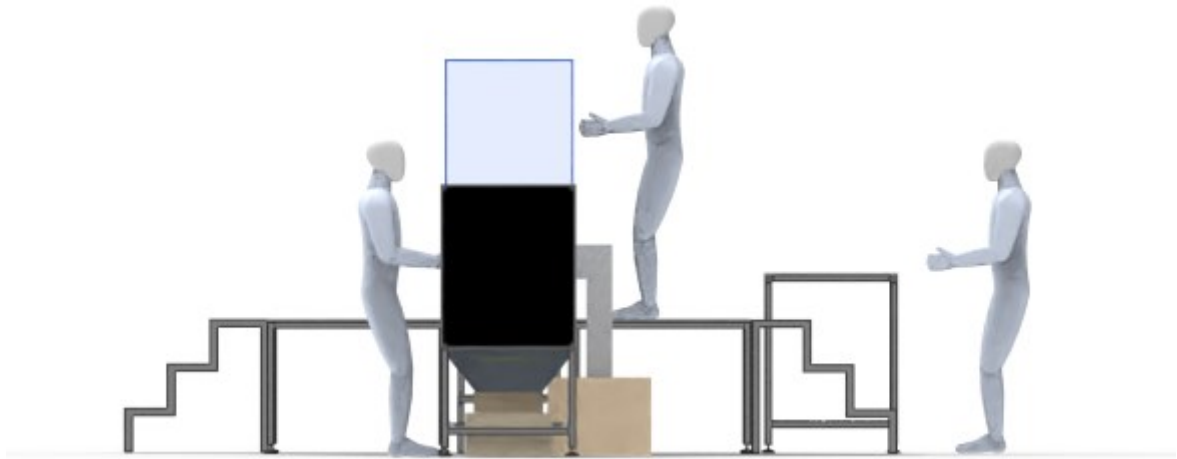


Fig. 7.87 Layout prototipale del primo sottoblocco del blocco 2 (vista frontale)

Di seguito si riporta come appare il materiale all'uscita dell'impianto, una volta che è transitato attraverso tutte le stazioni.

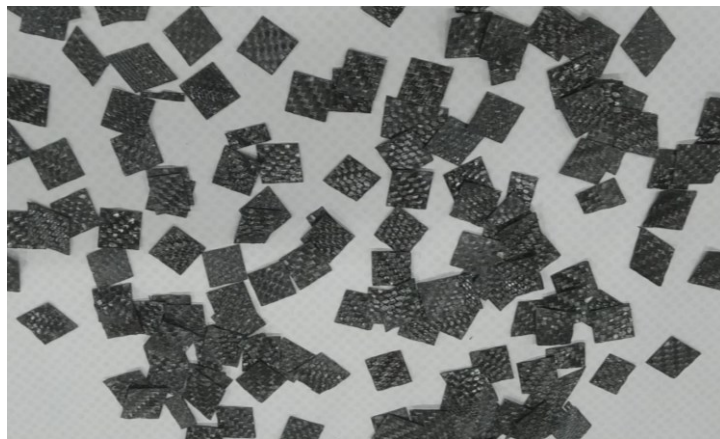


Fig. 7.88 Materiale uscente dall'impianto di recupero

VIII – LE CONCLUSIONI

Il progetto LIFE – CIRCE è un progetto europeo attraverso il quale 5 aziende italiane collaborano per mettere appunto un sistema per il riciclaggio degli sfridi dei prepregs in fibra di carbonio derivanti dal nesting.

Nel presente elaborato si sono affrontati diversi studi che hanno riguardato l'automatizzazione dell'impianto di riciclaggio per preimpregnati.

Il candidato, dapprima ha svolto alcune prove sperimentali sulle macchine esistenti, con lo scopo di individuare le possibili migliorie da apportarvi e, successivamente, ha provveduto alla realizzazione di diversi sistemi/macchine per rendere automatica la linea.

L'impianto si compone di due blocchi principali. Nel primo si svolge il sezionamento del materiale tramite due macchine di cutting, dette taglierine, e un nastro retrattile. Nel secondo invece, si procede alla rimozione della pellicola presente sui fogli di preimpregnato tramite 3 macchine di peeling, dette spellicolatrici pneumatiche. Sono inoltre presenti un separatore ad aria, detto defogliatrice e un sistema di controllo dotato di sistema di visione.

Le fasi di automatizzazione della linea di riciclaggio più significative che sono state svolte dal sottoscritto sono:

- per il blocco 1:
 - modifica del blocco lame e messa in sicurezza delle taglierine
 - automatizzazione del nastro retrattile tramite la messa a punto dello schema pneumatico
 - definizione dell'ottima configurazione di funzionamento del blocco taglierine – nastro retrattile al fine di ottenere un corretto trasferimento (ortogonale) delle chips, dalla prima alla seconda macchina di cutting
- per il blocco 2:
 - automatizzazione della spellicolatrice pneumatica tramite la messa a punto dello schema pneumatico e definizione della sequenza ottima di carico/lavoro/scarico
 - scelta del sistema di defogliazione, dell'attrezzatura annessa e definizione della configurazione ottima di funzionamento
 - messa a punto del sistema di visione per eseguire la fase di check e definizione della modalità di separazione delle chips una volta individuato l'errore
 - progettazione nastro scatole e scelta della confezionatrice verticale (saranno realizzati/acquistati nei successivi stati di avanzamento del progetto)

8.1 IL BLOCCO 1

8.1.1 LE TAGLIERINE

Le taglierine sono le macchine utilizzate per tagliare i fogli di prepregs in chips rettangolari.

La modifica dei blocchi lame di entrambe le taglierine ha permesso di innalzare in maniera significativa l'efficienza della macchina. A seguito di numerose prove sperimentali si è visto che, nell'ultima versione, si riescono a tagliare i fogli di prepregs in maniera netta e precisa, a prescindere dalla grammatura e dal tipo di tessuto.

Si è potuto notare inoltre un minor degrado delle lame, dato che la sollecitazione, nella nuova configurazione, si distribuisce su una zona più ampia invece che solo sulla punta. Tuttavia, si rimanda ad ulteriori studi la definizione delle tempistiche per la sostituzione delle stesse.

Il sistema di sicurezza adottato ha permesso di ridurre al minimo i rischi a cui l'operatore va incontro. Infatti la struttura in lexan/polycarbonato a ponte equipaggiata con il sensore magnetico Pilz PSEN 504222 1.1p-22/PSEN 1.1-20/8mm/ix1/ 1unit permette un agevole utilizzo della macchina e allo stesso tempo, con essa, si riesce a bloccare l'intera stazione di taglio qualora, per qualsiasi motivo, ci si avvicinasse troppo alla bocca di carico della macchina.

Si prevede inoltre di installare, nella zona tra il nastro retrattile e la bocca della seconda taglierina, un'ulteriore carteratura dotata anch'essa di sensore magnetico.

8.1.2 IL NASTRO RETRATTILE

Il nastro retrattile è il nastro utilizzato per trasferire le chips dalla prima taglierina alla seconda in maniera ortogonale.

La messa a punto del circuito pneumatico ha permesso la movimentazione automatica del nastro.

Realizzati tutti i collegamenti, come da schema riportato nel capitolo VII, si sono eseguite diverse prove. Si è riscontrato che il circuito realizzato permette la movimentazione dei cilindri pneumatici a doppio effetto, oltre che un sensibile controllo della velocità degli stessi, fondamentale per il corretto funzionamento della macchina.

Di conseguenza le valvole 5/2 bistabili Camozzi 354-011-02 5/2 G1/4 e 358-011-02 5/2 G1/8 utilizzate per il controllo dei cilindri SMC CP96SDB32-250C e SMC CD85N16-50C-B sono state scelte in maniera corretta, insieme ai diametri dei tubi di collegamento e ai regolatori di flusso. Si ricorda che il nastro retrattile è composto da 2 coppie di cilindri e che i due cilindri di ogni coppia devono muoversi contemporaneamente. La soluzione di utilizzare un'unica elettrovalvola per movimentare una coppia di cilindri, facendo attenzione che la lunghezza dei tubi di mandata e di ritorno di ogni cilindro fosse la stessa, è risultata vincente. Ciò permette di movimentare la macchina senza che si verifichino inceppamenti.

8.1.3 LA CONFIGURAZIONE DI FUNZIONAMENTO DELLA STAZIONE DI TAGLIO

Una volta realizzate le taglierine ed eseguite le doverose modifiche al blocco lame, la problematica principale del blocco 1 consisteva nel realizzare un sistema tramite il quale trasferire le chips elaborate dalla prima taglierina alla seconda in maniera ortogonale e automatica.

Per svolgere tale funzione si è realizzato il nastro retrattile.

Tuttavia si sono dovuti determinare i parametri con cui far funzionare le diverse macchine al fine di ottenere il risultato richiesto, ovvero chips con una forma il più possibile rettangolare.

I parametri fondamentali che entrano in gioco sono i seguenti:

- velocità del nastro della prima taglierina
- velocità del nastro retrattile
- tempistiche di azionamento dei cilindri pneumatici del nastro retrattile
- posizione e inclinazione della seconda taglierina
- velocità del nastro della seconda taglierina

Svolgendo un'ampia campagna di test si è definito che la configurazione ottima, che assicura il corretto trasferimento delle chips dalla prima alla seconda macchina di cutting, è ottenibile impostando i seguenti parametri sul quadro elettrico:

- inverter motore elettrico asincrono trifase taglierina 1 a 40 Hz
- inverter motore elettrico asincrono trifase nastro retrattile a 34 Hz
- cilindri comandati da PLC come segue:
 - t = 0 s salita penna
 - t = 0.5 s slitta mobile avanti
 - t = 1.5 s discesa penna
 - t = 2 s slitta mobile indietro
- taglierina 2 posizionata, considerando i telai delle macchine, a 139,5 mm in direzione x e a 108,5 mm in y dalla taglierina 1 e inclinata di 4° rispetto all'asse y (considerando la vista dall'alto e l'asse y diretto nella direzione della seconda taglierina)
- inverter motore elettrico asincrono trifase taglierina 2 a 38 Hz

Con tale configurazione si riescono a trasferire le chips dalla prima alla seconda taglierina in maniera automatica. Si fa notare che, per la complessità geometrica dei fogli di prepregs derivanti dal nesting, può succedere che le chips cadano dalla prima taglierina sul nastro retrattile, non perfettamente allineate. Ciò comporta un trasferimento non corretto. Per attenuare tale problematica si sono eseguite delle ulteriori modifiche alla taglierina. In particolare, si sono realizzati dei rilievi (3 mm) sullo scivolo di scarico (in fase con le lame) della taglierina e si è spostato il raschiatore più in alto, mantenendo ovviamente la tangenza col nastro. In questo modo si è ridotta drasticamente la percentuale di chips che cadono disallineate, fondamentale per il corretto trasferimento alla seconda taglierina.

Un'altra considerazione importante è la seguente. Dato che in via sperimentale è presente un operatore per il carico della macchina, attualmente non vi è sincronismo tra il carico della prima taglierina e il movimento del nastro retrattile. Dalle prove sperimentali si è visto che ciò risultava essere un problema, dato che alcune chips, arrivavano alla seconda taglierina sfasate rispetto al

tempo di discesa della penna del nastro retrattile¹⁴. La possibilità che si verifichi tale situazione è stata drasticamente ridotta dotando i cilindri di appositi sensori, che hanno permesso di ridurre al minimo il tempo di permanenza della slitta mobile nella posizione arretrata. In questo modo, essendo la velocità di avanzamento della slitta maggiore rispetto a quella di avanzamento del nastro retrattile, l'eventuale chips che stava per essere appoggiata sfasata sulla seconda taglierina, viene riportata indietro sul nastro quando la penna avanza e di conseguenza verrà poi poggiata sul nastro della seconda taglierina correttamente.

Con le modifiche appena riportate si è riusciti ad avere un'efficienza nel trasferimento delle chips in maniera ortogonale pari a circa l'85 %.

Quest'ultima potrà essere ulteriormente aumentata andando a sincronizzare la fase di carico della prima taglierina. Una soluzione potrebbe essere quella di utilizzare un nastro con facchini che serva la taglierina o addirittura un robot seriale che carichi la taglierina con un certo clock in fase col movimento del nastro retrattile.

8.2 IL BLOCCO 2

8.2.1 LA SPELLICOLATRICE PNEUMATICA

La spellicolatrice pneumatica è la macchina utilizzata per dividere e asportare le pellicole dalle chips di preimpregnato.

Per rendere automatico il funzionamento della spellicolatrice pneumatica si è realizzato il circuito pneumatico riportato nel capitolo VII.

Una volta realizzati tutti i collegamenti, si sono svolte le prove sperimentali grazie al PLC installato sul quadro elettrico che gestisce il blocco 2. Si è dimostrato che le elettrovalvole scelte Camozzi 358-011-02 5/2 G1/8 e CFB-A24N-R1-* 2/2 NC G1/2, rispettivamente per i due cilindri a doppio effetto per carico/scarico, Festo DSBC-32-100-PPVA-N3 e Festo ADN-32-50-A-P-A, e per il getto d'aria principale e secondario, sono adatte per l'applicazione in questione, come lo sono i diametri dei tubi e i regolatori di flusso.

Tramite il PLC e svolgendo numerose prove sperimentali, si è definita la sequenza di attivazione dei getti d'aria e dell'aspiratore. In particolare la sequenza ottima, definita finora, che ha permesso di ridurre al minimo il tempo ciclo ed elaborare più chips possibili con buona efficienza è la seguente:

- t = 0 s → apertura carico
- t = 2 s → chiusura scarico
- t = 3 s → accensione aspirazione
- t = 3 s → accensione ugelli esterni
- t = 4 s → impulso (2 sec) ugelli interni

¹⁴ Per trasferire correttamente la chips tra le due macchine di cutting, deve essere appoggiato il primo lembo della stessa sul nastro della seconda taglierina quando il nastro retrattile è in posizione completamente estesa e con la penna abbassata, in modo tale che questo, tornando indietro, poggia il resto della chips

- t = 18 s → impulso ugelli (2 sec) interni
- t = 33 s → spegnimento ugelli esterni
- t = 35 s → spegnimento aspirazione
- t = 35 s → apertura scarico
- t = 37 s → chiusura scarico

Grazie alla sequenza appena riportata e ad un'opportuna regolazione dei getti d'aria interni ed esterni tramite i regolatori di flusso, si riescono a spellicolare in maniera efficiente circa 200 grammi di chips.

Si evidenzia tuttavia che da test sperimentali si è riscontrato che in media il 3 % delle chips non viene spellicolato. Il risultato che si è ottenuto è più che soddisfacente.

Secondo i dati riportati la produttività effettiva (P) della spellicolatrice pneumatica è così calcolata:

$$P = \frac{q_c}{t_c} \eta$$

Dati

$t_c = 37 \text{ s}$ tempo ciclo

$q_c = 200 \text{ g/ciclo}$ quantità processata per ciclo

$\eta = 98 \%$ rendimento

Si ottiene una produttività P di circa 19 kg/h. Per avere un impianto efficiente si è previsto di realizzare più spellicolatrici pneumatiche che lavorano in contemporanea, arrivando così a produttività di circa 57 kg/h per la stazione di peeling.

Inoltre si fa notare che, come già accennato, non tutte le pellicole riescono ad essere aspirate. Tuttavia ciò non risulta una problematica significativa dato che queste verranno eliminate grazie alla defogliatrice.

Un altro aspetto significativo che riguarda la spellicolatrice pneumatica è il consumo d'aria che questa impiega per svolgere il ciclo sopra descritto.

Dalle misurazioni svolte si è riscontrato che il consumo d'aria della spellicolatrice, quando gli ugelli esterni sono accesi, è di circa 54 NI/sec.

Di conseguenza si può stimare che il consumo d'aria in un minuto, considerando che gli ugelli esterni, durante un ciclo, rimangono aperti per 30 secondi, è pari a:

$$54 \frac{NI}{s} \left(30 \text{ s} * 2 \frac{\text{cicli}}{\text{min}} \right) = 3240 \frac{NI}{\text{min}}$$

Considerando il consumo dei cilindri (anche se irrisorio rispetto a quello degli ugelli) e le perdite, si considera per il calcolo un consumo effettivo di 3500 NI/min ovvero 210 Nm³/h.

Ipotizzando di utilizzare un compressore da 55 kW, che fornisca una quantità d'aria di 9.37 Nm³/min ovvero 562 Nm³/h, ad una pressione di 7 bar, con un costo del kWh pari a 0.0625 euro, si calcola il costo che si deve sostenere per il funzionamento della spellicolatrice pneumatica come segue.

Si calcola il costo orario che si dovrebbe sostenere per tenere acceso il compressore con continuità:

$$\text{costo compressore (sempre acceso)} = 55 \text{ kW} * 0.0625 \frac{\text{euro}}{\text{kWh}} = 3.4 \frac{\text{euro}}{\text{h}}$$

Considerando che la spellicolatrice pneumatica consuma 180 Nm³/h e che il compressore fornisce una quantità d'aria di 562 Nm³/h, si calcola la percentuale di funzionamento oraria del compressore per soddisfare la richiesta della spellicolatrice:

$$\frac{210 \text{ Nm}^3/\text{h}}{562 \text{ Nm}^3/\text{h}} = 38 \%$$

Quindi in un'ora il compressore deve rimanere acceso solo il 38 % del tempo ovvero 22.8 minuti. Di conseguenza il costo totale che si deve sostenere per alimentare la spellicolatrice vale:

$$\text{costo compressore (funzionamento spellicolatrice)} = 3.4 \frac{\text{euro}}{\text{h}} * 38 \% = 1.3 \frac{\text{euro}}{\text{h}}$$

Considerando un turno di 8 ore al giorno per 220 giorni lavorativi si ottiene il costo totale annuo di funzionamento pari a circa 2300 euro.

Si vogliono fare delle annotazioni per quanto riguarda la spellicolatrice pneumatica. Svolgendo ulteriori prove sperimentali si è visto che, nel caso in cui il materiale da recuperare è rivestito da un film protettivo di carta (prepregs poco utilizzati), l'azione di spellicolazione perde efficacia.

Ciò può essere spiegato dal fatto che la carta è più rigida delle pellicole in plastica e che questa tende a bagnarsi. Tale problema potrebbe essere risolto facendo lavorare la macchina in un ambiente refrigerato secco (presente in HP Composites), in cui non si verifica condensa. Infatti si è visto che nel congelatore utilizzato per svolgere le prove, il film in carta tende ad inumidire, complicando così la spellicolazione.

Se il problema persiste, una soluzione che potrà essere presa in considerazione nei successivi stati di avanzamento della linea, consiste nel posizionare dei rilievi di spessore 3-5 mm lungo il tubo cilindrico della spellicolatrice, disposti in verticale. In questo modo le chips, che si muovono per mezzo del getto d'aria compressa alla periferia del tubo, urtando contro i rilievi tendono a deformarsi, facilitando così l'asportazione della pellicola.

8.2.2 LA DEFOGLIATRICE

La defogliatrice è la macchina utilizzata per eliminare le pellicole che rimangono tra il materiale da recuperare dopo la stazione di peeling.

Svolgendo le prove sperimentali sulla stazione di defogliazione si è dimostrato che la defogliatrice OLITA AOP0157 è adatta a separare le pellicole di film protettivo dalle chips.

Ovviamente per adempiere alla sua funzione è necessario regolare la velocità di rotazione della stessa. Dalle prove svolte si è determinato che la velocità ottima di rotazione della ventola è di circa

950 rpm. In questa maniera, le forze aerodinamiche che si generano riescono a convogliare le pellicole nello scivolo di scarico mentre le chips, essendo più pesanti, cadono per gravità.

Attualmente alla macchina si deve affiancare un operatore che ha il compito di spingere il materiale dallo scivolo di carico verso l'apposita feritoia.

La produttività che si è stimata corrisponde a circa 46 kg/h.

Può capitare che le chips di ridotte dimensioni (5 x 5 mm), essendo più leggere, vengano espulse insieme alle pellicole, tuttavia ciò non risulta una problema dato che tali chips non sono conformi per le specifiche dettate dai clienti.

Quanto detto potrebbe risultare un aspetto negativo nel caso in cui si decidesse di riciclare anche le pellicole plastiche, dato che queste sarebbero 'contaminate' da chips di prepregs. Tuttavia questa condizione è solo temporanea e non si verificherà più dal momento in cui, nei prossimi stati di avanzamento del progetto, si realizzerà il sistema di vagliatura, dato che queste (le chips non conformi di dimensioni ridotte) saranno eliminate prima che arrivino alla stazione di defogliazione.

8.2.3 IL SISTEMA DI VISIONE

Il sistema di visione presente nella stazione di controllo verrà utilizzato per eliminare le chips non conformi, prima che queste vengano imbustate.

Come si è già ampiamente spiegato, il controllo si basa sull'individuazione della differenza cromatica tra le chips conformi e quelle non conformi. Le chips conformi presentano il colore tipico dei prepregs in fibra di carbonio con resina termoindurente (color nero) mentre le chips non conformi sono quelle in cui il film protettivo non è stato asportato e per tale motivo possono apparire di diverso colore (rosa, giallo, verde) in base al tipo di pellicola, ma comunque sempre differente dal colore delle chips conformi.

Per svolgere le prove sperimentali si è utilizzato il sistema di visione Omron, presente in Alci Group, costituito da controllore "FH-L550-10" e Telecamera "FH-SC05R" con focale "3Z4S-LE SV-0814H".

Con la configurazione geometrica e l'illuminazione utilizzata si sono ottenuti risultati incoraggianti sul funzionamento dello stesso. La sequenza impostata per la rilevazione degli errori costituita da "filtraggio", "soppressione sfondo" e "rilevamento difetti accurato" permette di individuare le chips non conformi con una buona efficienza. Di seguito si riassumono le impostazioni che sono state utilizzate nella sequenza:

- filtraggio → livello di soppressione min/max 112-255
 - soppressione sfondo → comune RGB con livello di soppressione min/max 96-255
 - rilevamento difetti accurato → condizione elemento:
 - dimensione x-y 64-64
 - intervallo di campionamento x-y 30-30
 - intervallo di confronto x-y 15-15
- condizione giudizio: - giudizio difetto 0-30

- numero difetto 0-2500

Dalle prove sperimentali si è visto che il livello di giudizio misurato è compreso tra:

- 5 ÷ 10 senza passaggio di chips
- 8 ÷ 15 al passaggio di chips conformi
- 59 ÷ 183 al passaggio di chips non conformi con pellicola rosa
- 71 ÷ 221 al passaggio di chips non conformi con pellicola verde
- 153 ÷ 694 al passaggio di chips non conformi con pellicola gialla

Può accadere che, a causa di chips troppo piccole, il sistema non riesca ad individuare eventuali errori a causa del ridotto contrasto che si genera a seguito dei filtri. Per evitare tale problematica ed innalzare in maniera significativa l'efficienza della stazione di controllo, una soluzione, come già accennato in precedenza, potrebbe essere quella di realizzare un'apposita sequenza di filtraggio e rilevamento per ogni tipologia di materiale.

Infatti dato che i materiali da recuperare sono divisi in base a resina, rinforzo e resistenza, l'impianto lavorerà una tipologia di materiale, con uno specifico colore della pellicola, alla volta. Impostando a priori la sequenza di filtraggio corretta si riusciranno ad eliminare le chips non conformi in maniera agevole e efficiente.

Bibliografia

- P.K. Mallick, Fiber Reinforced Composites. Materials, Manufacturing, and Design, Third Edition, 2007, Taylor & Francis
- I. Crivelli Visconti, G. Caprino, A. Langella, Materiali Compositi. Tecnologie, Progettazione, Applicazioni, 2009, Hoepli
- Kaw, A. K. Mechanics Of Composite Materials. Boca Raton, Florida: CRC Taylor & Francis, 2006
- R. Coloccini. Tesi di Laurea Magistrale. Progettazione e prototipazione di una macchina per il riciclo di fibre prepregs, Ancona 2019
- G. Marioli. Tesi di Laurea Magistrale. Progettazione ed ingegnerizzazione di una linea per il riciclo di fibre prepreg, Ancona 2020
- UNIVPM A. Forcellese. Corso di Tecnologie e Sistemi di Fabbricazione di Manufatti in Composito, Ancona 2020
- UNIVPM N. Paone. Corso di Misure e Controlli Industriali, Ancona 2020
- D. Bhagwan, L. J. Agarwal. ANALYSIS AND PERFORMANCE OF FIBER COMPOSITES (terza edizione ed.). Daryaganj, New Delhi: Wiley, 2015
- C. Steger, M. Ulrich, C. Wiedemann, ed. Wiley-VCH. Machine vision algorithms and applications, 2016
- K.J.Gasvik, Optical metrology, ed. John-Wiley & Sons, 2002
- Camozzi Competence Center. L'automazione pneumatica: dai principi di base alle tecniche pratiche, 2021

Sitografia

- <https://www.life-circe.eu/about-circe/> Sito Circe, 2021
- <https://wayback.archive-it.org/12090/20210412123959/https://ec.europa.eu/easme/en/> Sito Life, 2021
- <https://www.opto-e.com/> Sito Opto Engineering, 2021
- <https://www.edmundoptics.com/> Sito Edmundoptics, 2021
- <https://industrial.omron.it/it/products/FH-SC05R> Sito Telecamera Omron, 2021
- <https://it.automation.camozzi.com/> Sito Camozzi, 2021

Ringraziamenti

Dopo 5 intensi anni, ho deciso di fermarmi almeno per un attimo, per ringraziare tutte le persone che mi sono state vicino durante questo percorso.

A Mamma e Papà. Grazie. Questo giorno è soprattutto merito vostro. Spero siate orgogliosi di me almeno quanto io lo sono di voi.

A Chiara. Grazie sorellina. Non avere paura del futuro, è tutto nelle tue mani. Ti voglio bene.

Ai miei Amici, di Piane e non, a Bonf, Jack, Cella, Sere, Mike, Giulia, Sara, grazie. Anche nei momenti più difficili siete riusciti a farmi sorridere.

Voglio ringraziare il Professor Palpacelli per avermi dato la possibilità di svolgere la tesi sotto la Sua supervisione. Un grazie va anche a Roberto e Andrea per i preziosi consigli che mi hanno dato.

A Valeria. Mi hai accompagnato lungo tutto questo viaggio. Sopportato e supportato. Grazie per esserci sempre, non lo dimenticherò mai.

A Giorgia. Ci rincontreremo. Nel frattempo cercherò di essere sempre solare e sorridente come lo sei stata tu anche nei giorni più bui.

Francesco