



POLITECNICO DI TORINO

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

***Ottimizzazione della cella smistatrice aeroportuale MBHS®:
modellazione progettuale, analisi di fattibilità e
simulazione FEM del pianale di supporto del nastro
realizzato in materiale composito alternativo***

Relatore:

Chiar.mo Professore Ing. Sandro Moos

Candidata:

Noemi Bisconti

2025-2026

*Alla mia famiglia,
con immensa gratitudine e amore*

Indice

1.	Introduzione	8
2.	Leonardo S.p.A.	10
2.1.	La storia dell'azienda	10
2.2.	Leonardo Automation	14
	Gestione pacchi postali	15
	Gestione bagagli aeroportuali	16
3.	Sistema di smistamento aeroportuale MBHS®	19
3.1.	Sistema di propulsione	20
3.2.	Sistema di controllo.....	20
3.3.	Sensoristica	21
3.4.	Carico del bagaglio sul sorter.....	21
3.5.	Scarico del bagaglio dal sorter	21
3.6.	Consumi energetici.....	22
4.	Cella smistatrice del sorter MBHS®	24
4.1.	Il pianale di scorrimento della cella smistatrice aeroportuale MBHS® ..	28
4.2.	Aspetti critici del gruppo pianale di scorrimento – sostegno.....	33
5.	Materiali alternativi per la fabbricazione del nuovo pianale di scorrimento del nastro.....	38
6.	Il nuovo modello del pianale di scorrimento per la cella MBHS®	44
6.1.	Messe in tavola dei nuovi componenti.....	48
6.2.	Assemblaggio dei nuovi componenti	60
6.3.	Montaggio del pianale di scorrimento e del relativo telaio sulla cella MBHS®	62
6.4.	Analisi di fattibilità economica e confronto delle offerte	67
7.	Analisi FEM del nuovo modello.....	69
	Il metodo degli elementi finiti (FE)	69
	Inizializzazione del modello per l'analisi statica strutturale FEM	72
	Risultati dell'analisi statica strutturale FEM	76

Inizializzazione del modello per l'analisi termica FEM.....	81
Risultati dell'analisi termica transiente.....	84
Risultati dell'analisi strutturale con carico termico	88
8. Validazione del modello CAD tramite assemblaggio dei componenti prototipati.....	91
9. Validazione prestazionale e protocolli di prova	95
TENSIONAMENTO DEL NASTRO e PROVA DI SLITTAMENTO	95
CICLO CONTINUO DI MOVIMENTAZIONE DEL NASTRO.....	97
PROVA TERMICA.....	97
VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE D'ATTRITO	98
Conclusioni	100
Referenze	103

Indice delle figure

Figura 2.1 Logo dell'azienda Leonardo S.p.A [1]	10
Figura 2.2 Dati caratteristici dell'azienda Leonardo S.p.A. [2].....	10
Figura 2.1.1 Radar Air Traffic Control Radar 2 (ATCR-2) di Selenia, Bromma (Svezia) [4]	11
Figura 2.1.2 Lo Spacelab nel vano cargo della navetta spaziale Columbia durante la missione STS-9, 1983 [4]	12
Figura 2.1.3 Il 'Raffaello', uno dei tre moduli cargo Multi Purpose Logistic Module realizzati per la Stazione Spaziale Internazionale [5]	13
Figura 2.1.4 Vista dalla Cupola della Stazione Spaziale Internazionale sulle nuvole e sull'oceano, orbita terrestre bassa (Low Earth Orbit), 2017, foto di Paolo Nespoli, Courtesy NASA e ASI.....	13
Figura 2.1.5 Veivolo a pilotaggio remoto Falco Xplorer [6].....	14
Figura 2.2.1 Aree geografiche nelle quali sono installati impianti automatizzati di Leonardo Automation [7]	15
Figura 2.2.2 Clienti postali di Leonardo Automation [10-19].....	16
Figura 2.2.3 Clienti aeroportuali di Leonardo Automation [20-35]	16
Figura 2.2.4 Carosello di raccolta bagagli aeroportuali, Leonardo S.p.A. [7].....	17
Figura 2.2.5 Nastro trasportatore dotato di un deviatore orizzontale, Leonardo S.p.A. [7].....	18

Figura 2.2.6 Linee di induzione per il caricamento dei bagagli aeroportuali sul sorter principale, Leonardo S.p.A. [7]	18
Figura 3.1 Sistema di smistamento bagagli MBHS® [7]	19
Figura 3.2 Assieme rotaia-carrello-cella smistatrice, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.	20
Figura 4.1 Cella di smistamento aeroportuale, priva di nastro e flappa, Leonardo S.p.A.	24
Figura 4.2 Cella di smistamento aeroportuale, priva di nastro e flappa, Leonardo S.p.A.	25
Figura 4.3 Modello di un assieme composto da due celle smistatrici, con angolo di montaggio di 20°, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.	26
Figura 4.4 Ingombri di una cella smistatrice MBHS®, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.	26
Figura 4.1.1 Pianale di scorrimento e relativo sostegno, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.	28
Figura 4.2.1 Visualizzazione del sistema di fissaggio del pianale di scorrimento al sostegno, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.	33
Figura 4.2.2 Vista A, deformazione del pianale di scorrimento della cella MBHS®, in un impianto di prova, Leonardo S.p.A.	34
Figura 4.2.3 Vista B, deformazione del pianale di scorrimento della cella MBHS®, in un impianto di prova, Leonardo S.p.A.	34
Figura 4.2.4 Vista C, deformazione del pianale di scorrimento della cella MBHS®, in un impianto di prova, Leonardo S.p.A.	34
Figura 6.1 Nuovo modello del gruppo pianale di scorrimento-telaio, realizzato con il software Creo Parametric	44
Figura 6.2 Esploso del nuovo modello del gruppo pianale di scorrimento-telaio, realizzato con il software Creo Parametric	44
Figura 6.1.1 Elementi rimodellati per accogliere il nuovo gruppo pianale di scorrimento-telaio	48
Figura 6.1.2 Messa in tavola del pianale, parte 1	49
Figura 6.1.3 Messa in tavola del pianale, parte 2	50
Figura 6.1.4 Messa in tavola della lamiera di sostegno montata all'estremità del pianale.....	51
Figura 6.1.5 Messa in tavola della lamiera di fissaggio dei cavi di cablaggio	52
Figura 6.1.6 Messa in tavola del particolare 'A' della lamiera di supporto laterale	53
Figura 6.1.7 Messa in tavola del particolare 'B' della lamiera di supporto laterale	54

Figura 6.1.8 Messa in tavola della lamiera omega di sostegno	55
Figura 6.1.9 Messa in tavola della traversa della cella MBHS®	56
Figura 6.1.10 Messa in tavola del distanziale posizionato tra rullo e fianco della cella MBHS®	57
Figura 6.1.11 Messa in tavola del fianco destro della cella MBHS®	58
Figura 6.1.12 Messa in tavola del fianco sinistro della cella MBHS®	59
Figura 6.2.1 Sistema di fissaggio del telaio al pianale.....	60
Figura 6.2.2 Sistema di fissaggio della lamiera all'estremità della cella al pianale	61
Figura 6.3.1 Modello dell'unità di smistamento prima dell'installazione del gruppo pianale di scorrimento-telaio, Creo Parametric	62
Figura 6.3.2 Fase 1 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS®, Creo Parametric	63
Figura 6.3.3 Fase 2 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS®, Creo Parametric	63
Figura 6.3.4 Fase 2 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS®, Creo Parametric	64
Figura 6.3.5 Fase 3 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS®, Creo Parametric	65
Figura 6.3.6 Sistema di fissaggio dei cavi di cablaggio alla lamiera.....	66
Figura 6.3.7 Modello complessivo della nuova cella di smistamento, non dotata di nastro, realizzato con Creo Parametric	66
Figura 7.1 Elemento solido tetraedrico per analisi FEM	70
Figura 7.2 Distanza tra telaio e flappa dell'unità di smistamento adiacente, Creo Parametric	72
Figura 7.3 Casi di studio per la valutazione della massima deformazione del pianale, Creo Parametric	73
Figura 7.4 Vincoli di incastro imposti per l'analisi FEM, Creo Simulate	74
Figura 7.5 Elementi sostitutivi della viteria per la semplificazione dell'analisi FEM, Creo Simulate	74
Figura 7.6 Tipologie di interfacce assegnate per l'analisi FEM – in rosa le superfici saldate, in giallo le superfici a contatto, Creo Simulate.....	75
Figura 7.7 Mesh del modello, con una dimensione massima del lato dell'elemento di 12 mm, Creo Simulate	75
Figura 7.8 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema, CASO 1, Creo Simulate	77
Figura 7.9 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema, CASO 2, Creo Simulate	78

Figura 7.10 Modello sottoposto ad analisi termica FEM, Creo Parametric	83
Figura 7.11 Mappe a colori ottenute dall'analisi termica transiente del nuovo modello, nell'istante temporale in cui almeno un punto del nastro raggiunge la temperatura limite di 80°C, Creo Simulate.....	84
Figura 7.12 Mappa a colori ottenuta dall'analisi termica transiente del modello originario, nell'istante temporale in cui almeno un punto del nastro raggiunge la temperatura limite di 80°C, Creo Simulate.....	87
Figura 7.13 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema causata dal carico termico, Creo Simulate	88
Figura 7.14 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema causata dal carico termico sul modello originario, Creo Simulate.....	90
Figura 8.1 Elementi del telaio di supporto del pianale prototipati.....	91
Figura 8.2 Pianale in laminato ad alta pressione (HPL) e corrispondente telaio di sostegno, assemblati a seguito della loro prototipazione, visuale 1.....	92
Figura 8.3 Pianale in laminato ad alta pressione (HPL) e corrispondente telaio di sostegno, assemblati a seguito della loro prototipazione, visuale 3.....	92
Figura 8.4 Cella di smistamento MBHS con il gruppo pianale-telaio ottimizzato, non dotata di cavi di alimentazione, flappa e nastro, visuale 1	93
Figura 8.5 Focus sui fianchi rimodellati per assicurare il montaggio del nuovo gruppo pianale-telaio	93
Figura 8.6 Distanziali interposti tra rulli e fianco realizzati in ABS tramite stampaggio 3D	94
Figura 9.1 Sistema di tensionamento del nastro montato su uno dei fianchi della cella di smistamento.....	95
Figura 9.2 Illustrazione dei marker da eseguire sul nastro e sul rullo motore per l'esecuzione della prova di slittamento.....	96

Indice delle tabelle

Tabella 4.1 Caratteristiche operative della cella smistatrice MBHS [®] , Leonardo S.p.A.	27
Tabella 4.1.1 Caratteristiche tecniche del polietilene ad alto peso molecolare Habiplast [®] e dell'acciaio FEP02GZ200MA-C [38].....	29
Tabella 4.1.2 Dati caratteristici del pianale di scorrimento del nastro e del relativo sostegno, Leonardo S.p.A.	31
Tabella 5.1 Caratteristiche del materiale CARPLY RA [®] dell'azienda Bellotti S.p.A. [40].....	39

Tabella 5.2 Caratteristiche del compensato di faggio resinato dell'azienda Bellotti S.p.A. [41].....	40
Tabella 5.3 Caratteristiche del materiale N.EXT COMPACT® dell'azienda Puricelli S.p.A. [41].....	41
Tabella 6.1 Dati caratteristici del pianale di scorrimento del nastro e del relativo sostegno riprogettati.....	47
Tabella 7.1 Temperature ammissibili per i materiali selezionati e per il nastro trasportatore della cella aeroportuale [40-46].....	82
Tabella 7.2 Caratteristiche termiche dei materiali analizzati per la realizzazione del pianale di scorrimento.....	85
Tabella 7.3 Resistenza termica dei materiali composite alternativi.....	86

Indice dei grafici

Grafico 3.6.1 Andamento della capacità di smistamento del sorter MBHS® durante la giornata lavorativa, a velocità di movimentazione massima (quella necessaria per garantire lo smaltimento dei pacchi durante la finestra temporale con il massimo traffico) e a velocità variabile, Leonardo S.p.A.....	22
Grafico 7.1 Andamento della deformazione massima del pianale in funzione del numero di elementi	71

1. Introduzione

Secondo i dati raccolti dall'*Ente Nazionale per l'Aviazione Civile* (ENAC), il flusso di passeggeri dei 45 aeroporti italiani aperti al traffico commerciale si è attestato a 218.716.150 unità nel 2024, evidenziando un aumento dell'11% rispetto all'anno precedente e del 13% rispetto al 2019.

Questo costante incremento del traffico aereo e l'esigenza di mantenere elevati i livelli di efficienza e di sicurezza nei processi aeroportuali rendono imprescindibile il miglioramento delle tecnologie di smistamento dei bagagli.

Tali sistemi costituiscono un nodo strategico dell'ambiente aeroportuale, poiché influenzano in modo diretto l'affidabilità e la rapidità delle operazioni di movimentazione, di carico e di scarico del materiale.

Il presente lavoro di tesi nasce da una collaborazione con *Leonardo S.p.A.*, azienda leader nei settori *Aerospace*, *Defence* e *Security*, impegnata nello sviluppo di soluzioni automatizzate per le infrastrutture critiche e per il trasporto. In questo contesto industriale altamente specializzato, il progetto si propone di ottimizzare una cella di smistamento aeroportuale attraverso la riprogettazione del pianale di scorrimento del nastro e del relativo sostegno, valutando l'impiego di materiali alternativi rispetto alle soluzioni tradizionalmente adottate. Una delle principali problematiche del modello originario, infatti, riguarda l'eccessiva deformabilità termica del pianale in polietilene; l'adozione di nuovi materiali mira, perciò, alla realizzazione di un pianale capace di garantire una migliore stabilità dimensionale sotto carico termico.

Un altro obiettivo è ridurre la complessità del sistema di supporto metallico evitando l'incremento dei costi di produzione e garantendo, al tempo stesso:

- il miglioramento delle prestazioni operative della tecnologia di smistamento;
- la riduzione della massa del gruppo pianale di scorrimento – telaio.

La metodologia adottata si articola in diverse fasi.

In primo luogo, è stato individuato il materiale di interesse per la realizzazione del piano e sono state valutate le caratteristiche meccaniche e di comportamento termico.

È stato realizzato, successivamente, il modello tridimensionale del pianale di scorrimento del nastro e del relativo sistema di sostegno, attraverso il software *PTC Creo Parametric*, al fine di definire con precisione la geometria del gruppo e le sue interazioni con gli altri componenti della cella di smistamento.

È stata, poi, condotta un'analisi di fattibilità economica attraverso la richiesta di preventivi per lotti di fornitura standard, considerando le specifiche geometriche definite nel modello CAD ed i trattamenti previsti dalle schede tecniche.

L'efficacia della nuova progettazione è stata validata attraverso delle prove numeriche agli elementi finiti (FEM), fondamentali per emulare le reali condizioni di esercizio:

- analisi statico-strutturali – sono state eseguite simulazioni per verificare la resistenza e la deformabilità dei componenti sotto l'azione dei carichi massimali di esercizio, modellando l'interazione tra il bagaglio aeroportuale e la cella di smistamento, con lo scopo di garantire la stabilità strutturale del sistema;
- analisi termiche transienti – è stato simulato uno scenario di carico termico estremo con l'obiettivo specifico di osservare e valutare le deformazioni indotte dai gradienti di temperatura. Questo approccio ha permesso di confrontare la stabilità dimensionale della nuova configurazione rispetto al sistema originario, verificando che le dilatazioni termiche non compromettano la funzionalità meccanica del nastro.

Queste prove analitiche, supportate dal riscontro dimensionale ottenuto dai prototipi fisici forniti dai partner industriali, sono state essenziali per stimare la risposta della nuova cella di smistamento agli standard di sicurezza e affidabilità richiesti dal settore, fornendo una solida base predittiva per la successiva fase di validazione sperimentale in campo.

2. Leonardo S.p.A.

Leonardo S.p.A. è un gruppo industriale internazionale che realizza capacità tecnologiche in ambito Aerospazio, Difesa e Sicurezza (logo aziendale in *Figura 2.1*).



Figura 2.1 Logo dell'azienda Leonardo S.p.A [1]

Con oltre 60000 dipendenti nel mondo, l'azienda ha una significativa presenza industriale in Italia, Regno Unito, Polonia e Stati Uniti e opera in 150 paesi anche attraverso aziende controllate, joint venture e partecipazioni [2].

In *Figura 2.2* sono riportati alcuni dati relativi alla società.



Figura 2.2 Dati caratteristici dell'azienda Leonardo S.p.A. [2]

2.1. La storia dell'azienda

L'azienda nacque nel 1948 quando, sulla base del decreto legislativo n. 1420/1947 del Capo dello Stato, Enrico De Nicola, l'IRI¹ fondò la *Società Finanziaria Meccanica Finmeccanica*. Lo scopo dell'impresa era la ricostruzione del tessuto economico ed industriale dell'intera nazione, dilaniato in seguito alla Seconda Guerra Mondiale. Al momento della sua fondazione, il controllo si estendeva su quattordici imprese provenienti dall'IRI, che contavano su oltre novantamila dipendenti e che rappresentavano una fetta essenziale del settore manifatturiero

¹ IRI è l'acronimo di Istituto per la Ricostruzione Industriale e rappresenta la holding di stato per le partecipazioni statali.

italiano. Tra queste: l'*Ansaldo*, l'*Alfa Romeo*, la *San Giorgio Società Industriale*, i *Cantieri Navali dell'Adriatico* e la *Filotecnica Salmoiraghi*.

Nel suo primo decennio di attività, *Finmeccanica* si concentrò particolarmente sulla ristrutturazione del settore navale, che nel 1959 fu scorporato e acquisito da una nuova società, la *Fincantieri* [3].

Durante gli anni Sessanta, oltre a gestire le imprese già esistenti promuovendone un continuo rinnovamento, il Gruppo iniziò a creare nuove realtà come *Selenia*, fondata nel 1960 per operare nel settore dei radar. In *Figura 2.1.1* è visibile il radar *Air Traffic Control Radar 2 (ATCR-2)*, progettato nel 1961 per il controllo del traffico aereo civile ed installato nel 1963 presso l'aeroporto di Bromma (Svezia) [4].



Figura 2.1.1 Radar Air Traffic Control Radar 2 (ATCR-2) di Selenia, Bromma (Svezia) [4]

Dopo aver ceduto le aziende meccaniche all'EFIM² e quelle elettroniche alla STET³, *Finmeccanica* si concentrò sui settori automobilistico, termoelettrico e aerospaziale e, nel 1969, nacque *Aeritalia* con un ambizioso progetto: diventare una grande impresa con un ruolo di primo piano nell'aeronautica e nello spazio [3].

Con la crisi energetica del 1973, *Finmeccanica* fu costretta a cedere numerose aziende: in questo contesto le attività di *Alfa Romeo* passarono alla *Fiat* (1986). Nello stesso periodo, le capacità industriali autonome di *Aeritalia* le consentirono di evolvere dal ruolo di subfornitore a quello di partner in programmi di rilievo internazionale. Nel 1974, in particolare, l'azienda partecipò al progetto *Spacelab*: lanciato dalla NASA e dall'*European Space Research Organisation* (ESRO), lo *Spacelab* è il primo laboratorio scientifico installato sullo *Space Shuttle*, capace di ospitare fino a quattro astronauti per condurre esperimenti in orbita (*Figura*

² EFIM è l'acronimo di Ente Partecipazioni e Finanziamento Industria Manifatturiera. EFIM è stata una finanziaria pubblica italiana delle partecipazioni statali istituita nel 1962, con lo scopo di gestire e finanziare aziende nel settore manifatturiero (Treccani)

³ STET è l'acronimo di Società Torinese Esercizi Telefonici. STET è stata un'azienda creata dall'IRI nel 1933 (Treccani)

2.1.2).

Ad *Aeritalia* venne affidata la progettazione e la realizzazione dell'intero modulo di servizio e del sistema di controllo termico [4].



Figura 2.1.2 Lo Spacelab nel vano cargo della navetta spaziale Columbia durante la missione STS-9, 1983 [4]

Nel 1989, le aziende elettroniche che erano state trasferite alla STET (*Selenia*, *SGS Thomson* ed *Elettronica San Giorgio – Elsag*) rientrarono in *Finmeccanica* e fu creata *Alenia*, nata dalla fusione tra *Aeritalia* e *Selenia* [3].

Vide così la luce un grande complesso industriale, attivo nei settori dell'aeronautica, dello spazio, dei sistemi elettronici, delle telecomunicazioni, dei radar, dei missili, del controllo del traffico aereo, dei sistemi elettro-ottici e dei sistemi navali.

Tra il 1994 e il 1996, il Gruppo acquisì da EFIM un insieme di aziende operanti nel settore della difesa. Queste concentrarono all'interno di *Finmeccanica* il 70% della capacità industriale nazionale italiana nei settori aerospaziale e della difesa. Nello stesso periodo la società acquisì rilevanti asset britannici nei settori dell'avionica, delle comunicazioni sicure e del controllo del traffico aereo, dando vita alla nuova famiglia *SELEX*:

- *SELEX Communications*, nel settore delle comunicazioni militari;
- *SELEX Galileo*, nei campi dell'avionica e dell'elettro-ottica;
- *SELEX Sistemi Integrati*, per il controllo e la gestione del traffico aereo [3].

Infine, con la *Space Alliance* (in collaborazione con l'azienda francese *Thales*), *Finmeccanica* conquistò la leadership europea nel settore spaziale, grazie alle joint venture *Telespazio* (servizi satellitari) e *Thales Alenia Space* (produzione spaziale) [3].

Tra le attività di Alenia Space, spicca la costruzione, avviata nel 1996, di tre moduli logistici multifunzionali *Multi Purpose Logistic Module* (MPLM) realizzati per il trasferimento di materiale da e verso la Stazione Spaziale Internazionale (*Figura 2.1.3*). Il primo dei dodici voli dei cargo avvenne nel 2001 [5].



Figura 2.1.3 Il 'Raffaello', uno dei tre moduli cargo Multi Purpose Logistic Module realizzati per la Stazione Spaziale Internazionale [5]

Nel 2010, invece, *Thales Alenia Space* realizzò la Cupola, il modulo che permette agli astronauti di vedere direttamente all'esterno e di controllare l'andamento delle attività extraveicolari dalla Stazione Spaziale Internazionale (*Figura 2.1.4*) [6].



Figura 2.1.4 Vista dalla Cupola della Stazione Spaziale Internazionale sulle nuvole e sull'oceano, orbita terrestre bassa (Low Earth Orbit), 2017, foto di Paolo Nespoli, Courtesy NASA e ASI

Durante il nuovo decennio, *Finmeccanica* aveva acquisito un solido profilo internazionale nei settori Aerospace, Defence e Security, operando su quattro mercati domestici (Italia, Regno Unito, Stati Uniti e Polonia) e consolidando partnership a livello mondiale [3].

Nell'aeronautica, invece, tutte le capacità industriali del Gruppo furono concentrate sotto il nuovo marchio *Alenia Aermacchi*, comprendendo la produzione di aerostutture, aeromobili completi, velivoli addestratori e veicoli aerei senza pilota (UAV) [3]. In *Figura 2.1.5* è riportato Falco Xplorer, uno dei primi veivoli a pilotaggio remoto, presentato nel 2019 [6].



Figura 2.1.5 Veivolo a pilotaggio remoto Falco Xplorer [6]

A seguito della crisi globale del 2009 che costrinse *Finmeccanica* a cedere alcune attività, il 26 Aprile 2016 il Gruppo assunse il nome di *Leonardo*, in onore di Leonardo da Vinci, simbolo universale di creatività e innovazione, e ponte ideale tra la tradizione storica, culturale e scientifica da cui ha origine la società ed il futuro industriale verso cui esso si proietta [3].

2.2. Leonardo Automation

Il settore Automation di *Leonardo S.p.A.* rappresenta una delle aree strategiche dell'azienda dedicate alla progettazione ed alla fornitura di soluzioni tecnologiche avanzate per l'automazione industriale, portuale ed aeroportuale [7].

La Business Unit *Automation* ha la sua sede principale a Genova, in Via Puccini, e vanta una presenza internazionale con uffici di assistenza in paesi strategici per il mercato della logistica e del trasporto. Le principali filiali sono dislocate in Svizzera, Hong Kong, Francia, Inghilterra e Stati Uniti.

Specificamente, grazie ad un consolidato know-how in ingegneria dei sistemi, software ed intelligenza artificiale, il settore sviluppa ed implementa piattaforme automatizzate per la gestione dei flussi merci, l'ottimizzazione dei processi produttivi ed il monitoraggio in tempo reale delle operazioni.

Soluzioni per aeroporti e per la logistica avanzata sono le principali applicazioni gestite da *Leonardo Automation*. Nella figura di seguito sono localizzate le aree geografiche nelle quali il Gruppo fornisce sistemi automatizzati.



Figura 2.2.1 Aree geografiche nelle quali sono installati impianti automatizzati di Leonardo Automation [7]

Nei paragrafi che seguono verrà fatta un'overview delle principali tecnologie offerte da *Leonardo Automation*, rivolgendo particolare attenzione al settore aeroportuale, che è l'ambito nel quale la tesi si snoda.

Gestione pacchi postali

La Business Unit *Automation* è in grado di fornire un portafoglio di soluzioni che va dai sistemi automatizzati di movimentazione e smistamento di pacchi e pacchetti, fino alle piattaforme IT complete ed integrate per la gestione e la governance logistica, e ad una vasta gamma di servizi post-vendita personalizzati [8].

In *Figura 2.2.2* sono indicati alcuni dei clienti che si servono di sistemi automatizzati per lo smistamento e la gestione di materiale postale, progettate ed installate dal gruppo *Leonardo Automation*.



Figura 2.2.2 Clienti postali di Leonardo Automation [10-19]

Nel settore della logistica postale e dei pacchi, Leonardo offre un'ampia gamma di sorter per articoli di qualsiasi formato. Tra tutti, spiccano:

- Multisort 500;
- Multisort 600;
- Multisort 800.

Tali sistemi condividono la stessa tecnologia di base: sono sorter a nastri incrociati. Mentre il primo modello è adatto alla gestione di pacchetti di piccole-medie dimensioni con spessori estremamente ridotti, i Multisort 600 e 800 sono destinati a centri di smistamento più grandi [8].

Gestione bagagli aeroportuali

Leonardo Automation è uno dei principali attori nel mercato dei sistemi di smistamento bagagli ed è uno dei pochi fornitori in grado di progettare, realizzare ed installare soluzioni automatizzate “chiavi in mano”: dal check-in ai controlli di sicurezza, dallo smistamento automatico dei bagagli verso le destinazioni di imbarco alla riconsegna dei bagagli per i voli in arrivo [7].

La *Figura 2.2.3* mostra alcuni clienti che si servono di soluzioni aeroportuali automatizzate, progettate ed installate dal gruppo *Leonardo Automation* [8].



Figura 2.2.3 Clienti aeroportuali di Leonardo Automation [20-35]

Tra i sistemi per la gestione bagagli (Baggage Handling Systems, BHS) offerti da *Leonardo Automation* emergono caroselli per la raccolta e la riconsegna, nastri di trasporto, dispositivi di divergenza e sorter cross-belt MBHS® (Multisorting Baggage Handling System). Queste soluzioni sono progettate per assicurare elevata efficienza, affidabilità e flessibilità operativa nei moderni scali aeroportuali [7].

Di seguito è riportata una breve descrizione delle tecnologie aeroportuali che il gruppo è in grado di fornire.

I caroselli di raccolta e riconsegna sono sistemi meccanici a flap sovrapposti (*overlapping flaps*), configurabili in versione piana o inclinata (vedi *Figura 2.2.4*). Le soluzioni di raccolta consentono il reperimento dei bagagli dai nastri di smistamento e la preparazione degli stessi per il caricamento sugli aeromobili. Nell'ambito della riconsegna, invece, hanno lo scopo di distribuire gli articoli nelle aree aeroportuali *baggage claim*, garantendo un flusso continuo e ordinato per i passeggeri in attesa del ritiro [7].



Figura 2.2.4 Carosello di raccolta bagagli aeroportuali, Leonardo S.p.A. [7]

Leonardo offre anche un'ampia gamma di nastri trasportatori e dispositivi di divergenza (*diverters*) sia in verticale che in orizzontale (*Figura 2.2.5*). I primi connettono i singoli sottosistemi BHS nelle differenti aree aeroportuali, permettendo il trasferimento efficiente dei bagagli. I *diverters*, invece, permettono di deviare i bagagli su percorsi differenti in base alla loro destinazione, ottimizzando il flusso e minimizzando gli urti [7].



Figura 2.2.5 Nastro trasportatore dotato di un deviatore orizzontale, Leonardo S.p.A. [7]

Un altro elemento chiave nel processo di smistamento è rappresentato dalle linee di induzione, che fungono da punto di ingresso ai sorter. Questi elementi sono impiegati per caricare i bagagli in modo ordinato e controllato sul sorter principale, evitando urti e migliorando la precisione del sistema (*Figura 2.2.6*) [7].



Figura 2.2.6 Linee di induzione per il caricamento dei bagagli aeroportuali sul sorter principale, Leonardo S.p.A. [7]

3. Sistema di smistamento aeroportuale MBHS®

Il MBHS® - Multisorting Baggage Handling System – è un sorter a nastri incrociati per la gestione di bagagli aeroportuali. Tale soluzione può essere impiegata sia per instradare i bagagli provenienti dai banchi check-in verso i vari sistemi di controllo (come gli scanner a raggi X), sia per smistare i bagagli imbarcati verso i canali di scarico assegnati ai voli in partenza (*Figura 3.1*) [7].

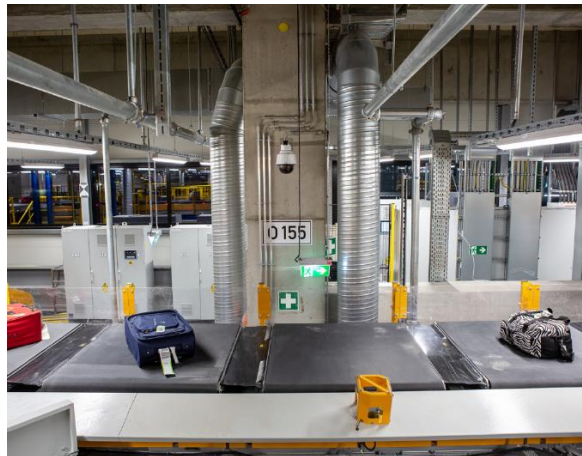


Figura 3.1 Sistema di smistamento bagagli MBHS® [7]

Il sistema di smistamento MBHS® è progettato per la gestione di un'ampia gamma di bagagli: borse con superfici ad alto attrito (avvolte in pellicola di plastica o contenenti parti in gomma), bagagli di forma irregolare, con ruote sporgenti o con lacci ed altri articoli non convenzionali.

L'infrastruttura di trasporto complessiva si compone di un treno di carrelli dotati di celle a nastro incrociato (MBHS®) che si muovono perpendicolarmente alla direzione dei carrelli stessi e facilitano il carico e lo scarico dei bagagli verso la destinazione assegnata.

L'insieme costituito dalla rotaia, dal carrello e dalla cella di smistamento, realizzato tramite il software *Creo Parametric*, è mostrato nella figura di seguito.

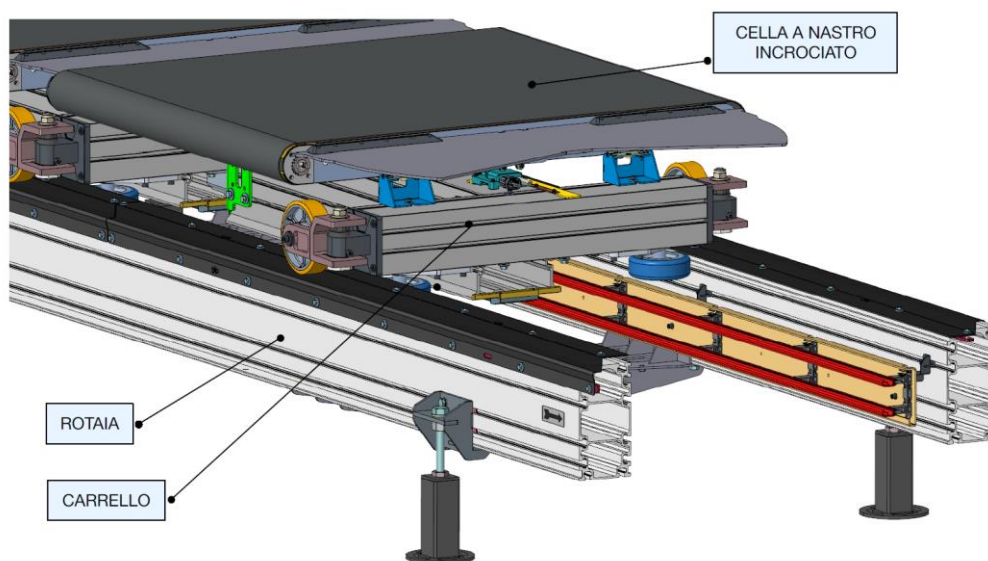


Figura 3.2 Assieme rotaia-carrello-cella smistatrice, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.

La struttura modulare del sistema MBHS® consente una rapida espansione del circuito tramite l'aggiunta di nuove unità, con un conseguente incremento delle capacità di smistamento dei bagagli. Queste caratteristiche di flessibilità e scalabilità riducono i tempi di installazione e minimizzano le interruzioni operative.

3.1. Sistema di propulsione

La tecnologia sfrutta un motore sincrono lineare (LSM) come sistema di propulsione dei carrelli, garantendo una rumorosità ridotta e consentendo regolazioni dinamiche della velocità. La tecnologia ad induzione per il trasferimento di energia evita contatti striscianti o batterie a bordo e riduce gli interventi di manutenzione.

3.2. Sistema di controllo

Eventuali anomalie sono individuate e segnalate in tempo reale dal sistema di controllo del sorter. Il gruppo di trazione è gestito da un circuito ad anello chiuso: la velocità del sorter viene rilevata in modo continuo da un encoder ed i segnali di correzione generati da quest'ultimo sono inviati simultaneamente a tutti i motori.

Ogni treno è equipaggiato con un processore che consente la gestione indipendente di tutte le celle. Ciò significa che, in caso di guasto di una cella, quest'ultima può essere messa fuori servizio senza influire sulle altre. Analogamente, il malfunzionamento di un treno di carrelli comporta la sua sola disattivazione, mantenendo in funzione gli altri sistemi operativi. In questo modo, per ripristinare

la piena funzionalità del gruppo, è possibile posticipare le operazioni di recupero alle finestre di manutenzione programmate.

3.3. Sensoristica

Il sorter MBHS® sfrutta fotocellule, montate su un portale collocato lungo il circuito, che hanno funzioni ed obiettivi specifici.

La fotocellula di rilevamento del carico ha un duplice ruolo: verificare e confermare lo stato delle celle. La *verifica* è un'operazione eseguita su tutte le celle prima del loro ingresso nell'area di carico dell'oggetto. Lo scopo è evitare che l'articolo venga caricato su una cella non vuota. La *conferma* è un'attività da eseguire ogni volta che avviene un'operazione di carico o scarico per etichettare la cella come vuota o occupata.

Il sensore di centraggio è composto da cinque fotocellule: quattro di esse sono montate sulla parte superiore del portale e servono a determinare la posizione dell'oggetto caricato sulla cella, mentre la quinta fotocellula si colloca lateralmente ed è utilizzata per rilevare la presenza di oggetti caricati a cavallo di due celle consecutive.

3.4. Carico del bagaglio sul sorter

I bagagli sono caricati sul sorter tramite un nastro inclinato di 30°- 45°. In questo modo il trasferimento degli articoli sulle celle avviene in modo controllato e ad una velocità relativa pressoché nulla. Inoltre, affinché il bagaglio non subisca danneggiamenti causati da urti violenti, può essere attivata la modalità di 'carico assistito': in questo caso, il nastro della cella viene azionato durante il trasferimento del bagaglio, permettendo un trasferimento accompagnato e delicato.

Gli articoli, indipendentemente da tipo, forma, dimensioni o peso, vengono sempre caricati su una singola cella.

3.5. Scarico del bagaglio dal sorter

Lo scarico avviene tramite l'azionamento controllato del nastro della cella in arrivo alla destinazione desiderata e sulla quale il bagaglio si colloca. L'attivazione non avviene in modo predeterminato e costante, ma attraverso una procedura altamente personalizzata basata su algoritmi di controllo attivi. Questo garantisce una gestione ottimale del bagaglio anche in fase di scarico.

3.6. Consumi energetici

Il MBHS[®] presenta consumi energetici molto limitati. Risparmi significativi possono essere ottenuti riducendo la velocità del sorter e la sua produttività nelle fasce orarie con minor traffico aereo. Sulla base delle tipiche fluttuazioni del traffico giornaliero nei principali aeroporti, si stima che la regolazione della velocità, in base alle reali esigenze operative, possa portare a risparmi energetici superiori al 30% rispetto ai sistemi che funzionano a velocità costante.

Lo studio è stato effettuato su un sorter operativo installato in ambiente aeroportuale, considerando il flusso del traffico del terminal nell'arco di 24 ore e prevedendo un adattamento delle velocità operative alle esigenze rilevate nelle diverse fasce orarie della giornata (aggiustamento ogni 2 ore).

Il grafico che segue mostra la variazione del numero di bagagli smistati ogni ora e, conseguentemente, fornisce la configurazione delle velocità durante le diverse finestre temporali, con l'obiettivo di garantire il trattamento totale degli articoli.

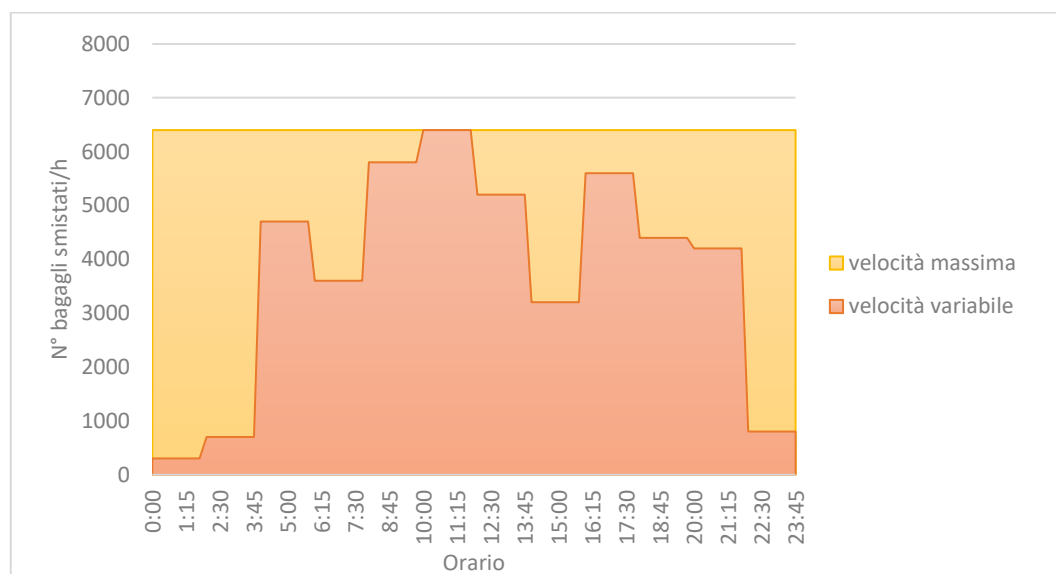


Grafico 3.6.1 Andamento della capacità di smistamento del sorter MBHS[®] durante la giornata lavorativa, a velocità di movimentazione massima (quella necessaria per garantire lo smaltimento dei pacchi durante la finestra temporale con il massimo traffico) e a velocità variabile, Leonardo S.p.A.

Assumendo che il consumo energetico sia direttamente proporzionale alla velocità di funzionamento, si può affermare che l'area gialla, che rappresenta l'andamento a velocità costante (velocità massima richiesta nella giornata), rispetto all'andamento a velocità variabile, costituisce il risparmio energetico ottenibile. Il valore determinato analiticamente nello studio condotto è pari al 33.3%. Si tratta di una stima suscettibile di ulteriori miglioramenti: sarebbe, infatti, più opportuno

prevedere una regolazione più frequente della velocità (per esempio ogni ora) ed eseguire lo studio in più ambienti aeroportuali. Ad ogni modo, è un'analisi significativa dal punto di vista qualitativo, per comprendere l'influenza della velocità di movimentazione sui consumi.

4. Cella smistatrice del sorter MBHS®

La cella di smistamento è costituita da un nastro trasportatore azionato da un motore a tamburo. Il nastro è movimentato esclusivamente tramite comando elettrico, per garantire il carico e lo scarico di materiale, ed il suo sostegno è rappresentato da un pianale di scorrimento e da un telaio. Quest'ultimo permette anche il fissaggio dei cavi di cablaggio per l'attivazione del motorullo.

Di seguito sono riportate delle immagini della cella di smistamento, alla quale è stato rimosso il nastro per mettere in evidenza i suoi principali costituenti.



Figura 4.1 Cella di smistamento aeroportuale, priva di nastro e flappa, Leonardo S.p.A.

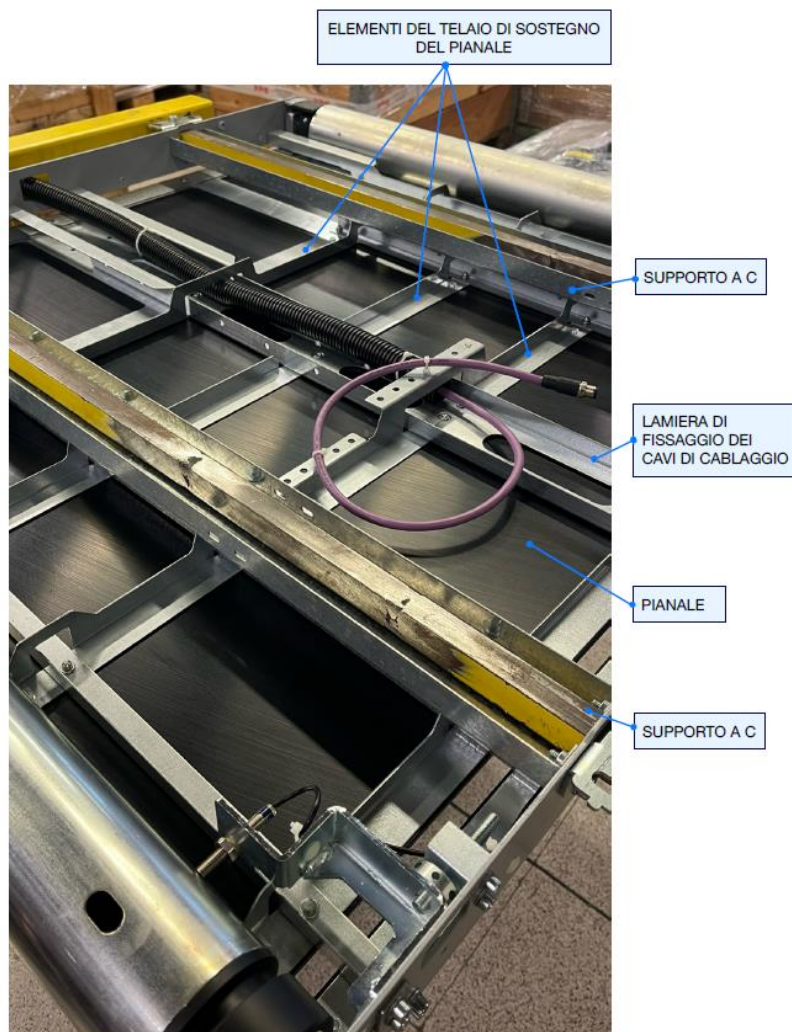


Figura 4.2 Cella di smistamento aeroportuale, priva di nastro e flappa, Leonardo S.p.A

Ciascuna unità è anche dotata di una *flappa*: si tratta di una lamiera fissata su un fianco della cella ed inserita al di sotto del pianale di scorrimento dell'elemento successivo, con lo scopo di garantire la continuità del piano di carico. In questo modo non si generano spazi tra due celle consecutive ed il rischio di impigliamento dei bagagli durante la normale attività del sorter è ridotto al minimo.

Grazie alla particolare forma della flappa, la continuità è mantenuta anche in curva. A riprova di ciò, in *Figura 4.3*, è riportato il modello di due celle di smistamento montate in successione, con un angolo di offset di 20°. Dall'insieme è possibile notare come la flappa riesca ad impedire la generazione di spazi tra le due unità, anche nelle zone non rettilinee del circuito.

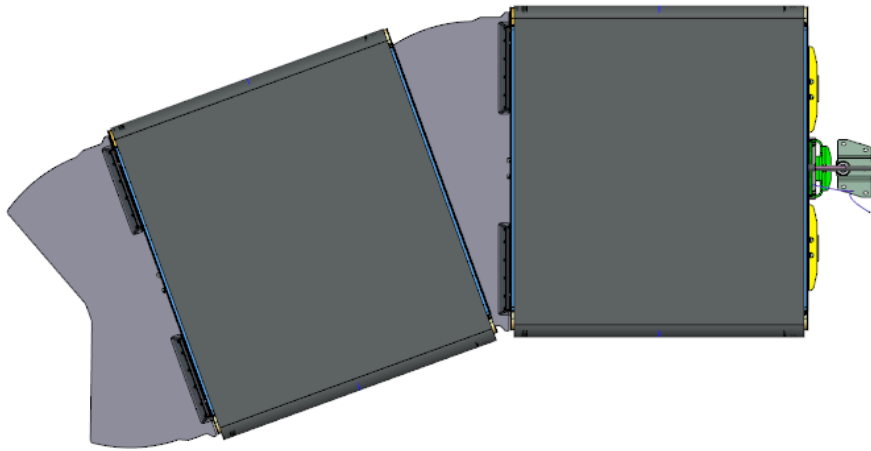


Figura 4.3 Modello di un assieme composto da due celle smistatrici, con angolo di montaggio di 20°, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.

Gli ingombri e le caratteristiche tecniche della cella di smistamento MBHS[®] sono riportate rispettivamente in *Figura 4.4* ed in *Tabella 4.1*.

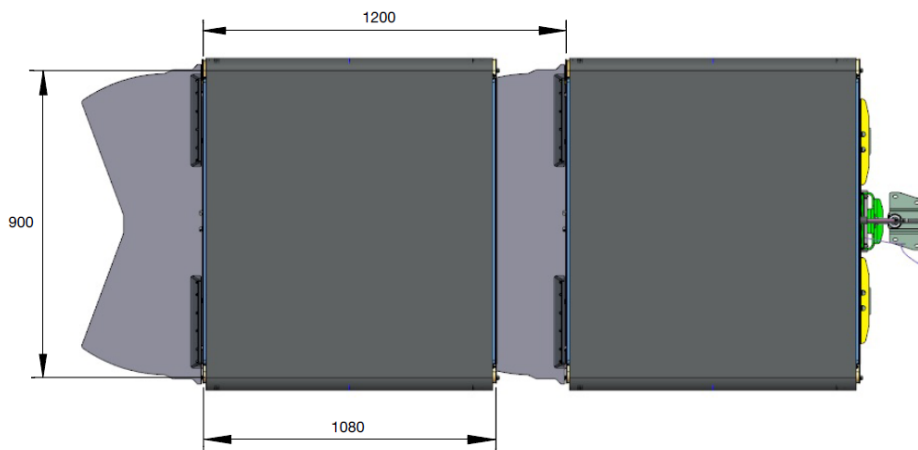


Figura 4.4 Ingombri di una cella smistatrice MBHS[®], Creo Parametric, Leonardo S.p.A.

Dimensione massima del bagaglio [mm] (LxWxH)	900x700x500
Dimensione minima del bagaglio [mm] (LxWxH)	200x200x10
Peso del bagaglio [kg]	0.5 - 60
Velocità di movimentazione [m/s]	< 2.5
Capacità nominale del sorter [bagagli/h]	< 6600
Livelli di rumorosità [dB]	<68
Condizioni ambientali di lavoro	5-45°C

Tabella 4.1 Caratteristiche operative della cella smistatrice MBHS[®], Leonardo S.p.A.

4.1. Il pianale di scorrimento della cella smistatrice aeroportuale MBHS®

Il pianale ed il relativo telaio sono gli elementi della cella di smistamento che offrono supporto al nastro trasportatore, permettendone il suo scorrimento. Il loro modello, realizzato dal reparto *Automation* di *Leonardo S.p.A.* è messo in evidenza in *Figura 4.1.1.*

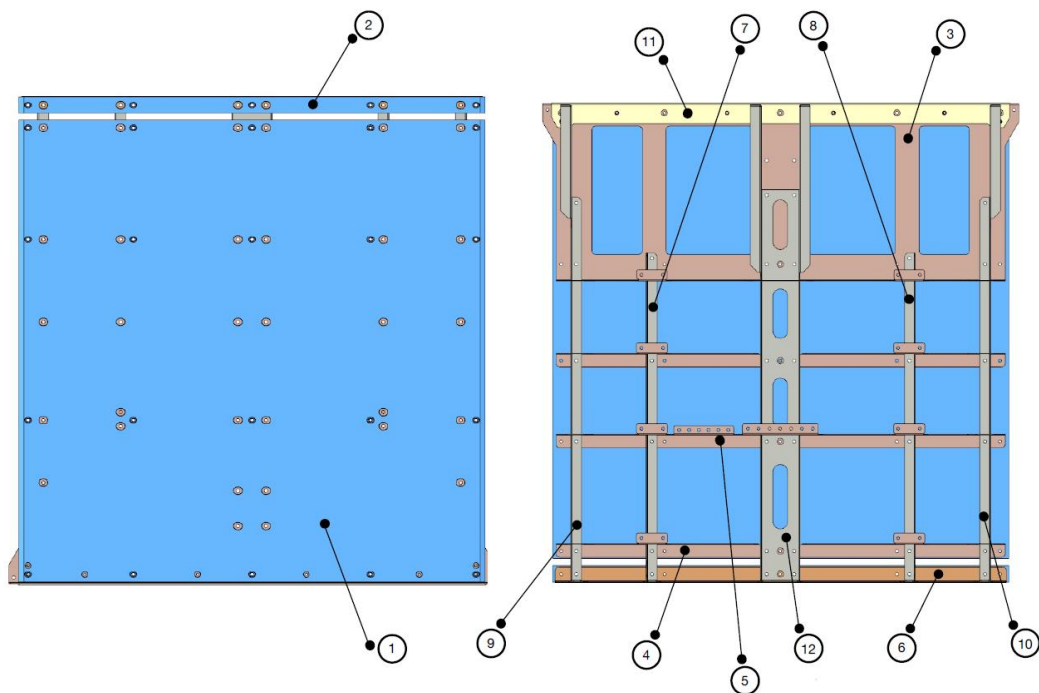


Figura 4.1.1 Pianale di scorrimento e relativo sostegno, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.

Le lamiere che compongono il sostegno sono tutte realizzate in acciaio FEP02GZ200MA-C⁴, mentre il pianale è fabbricato in polietilene HabIPLAST[®] ad elevato peso molecolare, ottenuto mediante un processo di polimerizzazione a bassa pressione. L'adozione di questo tecnopolimero è motivata dalle sue ottime proprietà tribologiche. Il materiale HabIPLAST[®], infatti, si distingue per un coefficiente di attrito estremamente basso, una caratteristica fondamentale che permette di ridurre drasticamente la forza di trazione necessaria al motore per azionare il nastro. Inoltre, il polimero si distingue per possedere:

⁴ Acciaio UNI EN 10142

- buon assorbimento di vibrazioni e rumore;
- elevata resistenza all'usura;
- elevata resistenza chimica;
- nessun assorbimento d'umidità;
- elevata resistenza agli impatti [38].

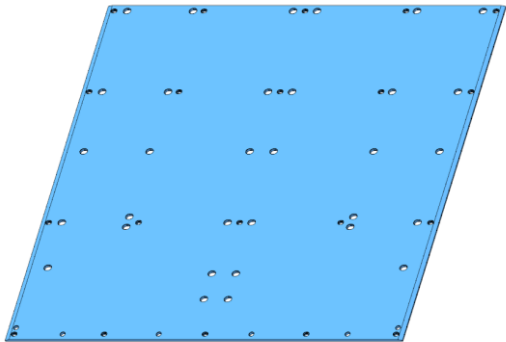

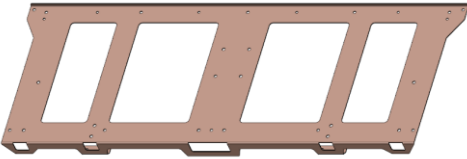
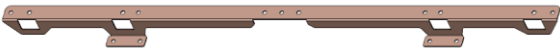
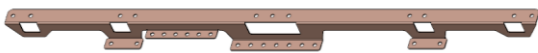
I dati tecnici di maggiore interesse del polimero e dell'acciaio del telaio sono messi in evidenza nella tabella riportata di seguito.

Polietilene Habiplast®	
Densità	930 – 950 kg/m³
Resistenza a flessione	17-28 MPa
Modulo di elasticità	700-950 MPa
Coefficiente di Poisson	0.37
Coefficiente di dilatazione termica lineare	0.2 $\frac{\text{mm}}{\text{m}^\circ\text{C}}$
Capacità termica specifica	1677 J/(kgK)
Conducibilità termica	0.25 W/(mK)
Resistenza al fuoco	Materiale combustibile (salvo additivi) UL94 HB ⁵
Acciaio FEP02GZ200MA-C	
Densità	7850 kg/m³
Modulo di elasticità	210000 MPa
Coefficiente di Poisson	0.27
Coefficiente di dilatazione termica lineare	0.01 $\frac{\text{mm}}{\text{m}^\circ\text{C}}$
Capacità termica specifica	473 J/(kgK)
Conducibilità termica	43.01 W/(mK)

Tabella 4.1.1 Caratteristiche tecniche del polietilene ad alto peso molecolare Habiplast® e dell'acciaio FEP02GZ200MA-C [38]

⁵ Un materiale con una classe di resistenza al fuoco UL94 HB è combustibile e non è autoestingente. Tuttavia, la velocità di propagazione è relativamente ridotta (inferiore a 40 mm/min per spessori superiori a 3 mm).

Sulla base dei materiali costituenti e delle loro caratteristiche integrate in ambiente *Creo Parametric*, in *Tabella 4.1.2* è riportato il peso di ciascun componente.

N°	Componente		
1		volume	5012885 mm ³
		PESO	4.7 kg
2		volume	167156 mm ³
		PESO	0.2 kg
3		volume	311301 mm ³
		PESO	2.4 kg
4		volume	62063 mm ³
		PESO	0.5 kg
5		volume	73495 mm ³
		PESO	0.6 kg





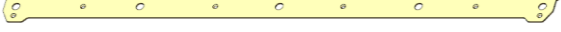

6		volume	56371 mm ³
		PESO	0.4 kg
7		volume	38035 mm ³
		PESO	0.3 kg
8		volume	38035 mm ³
		PESO	0.3 kg
9		volume	62160 mm ³
		PESO	0.5 kg
10		volume	62166 mm ³
		PESO	0.5 kg
11		volume	89491 mm ³
		PESO	0.7 kg
12		volume	157411 mm ³
		PESO	1.2 kg

Tabella 4.1.2 Dati caratteristici del pianale di scorrimento del nastro e del relativo sostegno, Leonardo S.p.A.

Dalla tabella è possibile calcolare il peso complessivo del sistema costituito dal pianale di scorrimento e dal telaio di supporto, non tenendo in considerazione del ridotto apporto relativo alla viteria:

$$\textit{peso complessivo del gruppo pianale – telaio} = 12.8 \textit{ kg}$$

Dai dati forniti dal personale *Leonardo S.p.A.*, inoltre, risulta che il costo di produzione ed assemblaggio delle parti dell'intero gruppo è di:

$$\textit{costo di produzione e assemblaggio} = 199 \textit{ euro}$$

4.2. Aspetti critici del gruppo pianale di scorrimento – sostegno

Il pianale di scorrimento ed il relativo sostegno presentano una serie di criticità che limitano l'efficienza costruttiva e l'affidabilità operativa della cella di smistamento MBHS®.

Una delle principali problematiche riscontrate riguarda l'eccessiva deformabilità termica del pianale in polietilene e la necessità di sfruttare uno specifico sistema di fissaggio al sostegno. È stata, infatti, implementata la soluzione meccanica riportata di seguito:

1. inserto ad incastro PEM® filettato internamente;
2. vite a testa cilindrica con esagono incassato Weidmuller® FKSC M5;
3. distanziale (Figura 3.1.2).

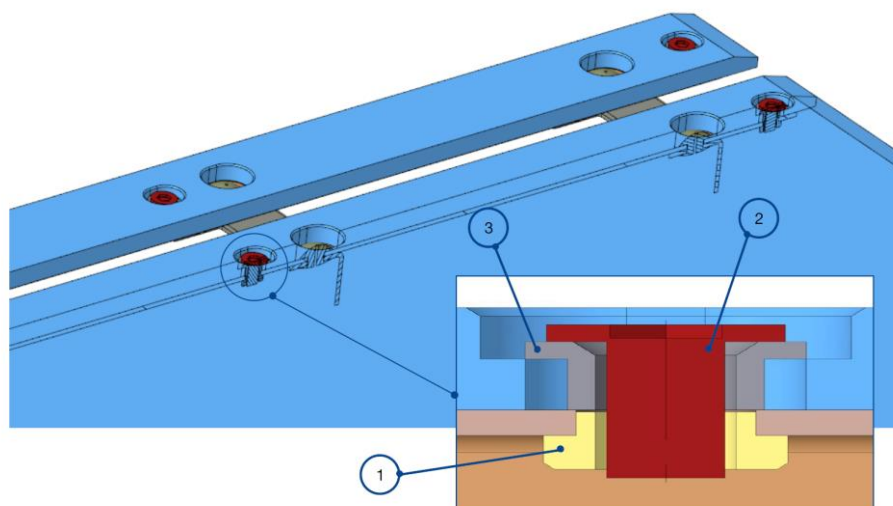


Figura 4.2.1 Visualizzazione del sistema di fissaggio del pianale di scorrimento al sostegno, Creo Parametric, Leonardo S.p.A.

Tale sistema sembrerebbe efficace dal punto di vista funzionale perché evita che la vite vada direttamente in presa al pianale e consente a quest'ultimo elemento una leggera deformazione dimensionale, causata da variazioni di temperatura.

Tuttavia, è già stato dimostrato che, per il range di funzionamento della macchina (temperatura ambientale da 5°C a 45°C), la lunghezza delle asole non è sufficiente ad accompagnare le dilatazioni del pianale. Il sistema, infatti, è stato sottoposto ad analisi sperimentale in un impianto di prova ed è stato messo in funzione per 8 ore

giornaliere, distribuite su 10 giorni consecutivi. I risultati della prova mostrano alcuni piani di scorrimento con deformazione permanente ed altri privi di dilatazioni evidenti. Nelle immagini che seguono è possibile osservare diverse angolazioni dell'elemento danneggiato a seguito dell'attività.



Figura 4.2.2 Vista A, deformazione del pianale di scorrimento della cella MBHS[®], in un impianto di prova, Leonardo S.p.A.



Figura 4.2.3 Vista B, deformazione del pianale di scorrimento della cella MBHS[®], in un impianto di prova, Leonardo S.p.A.



Figura 4.2.4 Vista C, deformazione del pianale di scorrimento della cella MBHS[®], in un impianto di prova, Leonardo S.p.A.

Negli elementi deformati, il distanziale del sistema di fissaggio (componente 3 in *Figura 4.2.1*) è entrato in battuta sull'asola del pianale, generando un vincolo fisso ed impedendo una libera dilatazione termica del piano stesso.

La presenza di pianali deformati, in contrapposizione ad altri rimasti indenni, suggerisce che i primi siano stati esposti ad un livello di riscaldamento superiore ai limiti contrattuali ammessi. Tale condizione è verosimilmente riconducibile ad un fenomeno di irraggiamento solare diretto, favorito dall'installazione di lucernari a tetto, che ha determinato un incremento termico localizzato tale da compromettere le caratteristiche meccaniche del materiale del pianale.

Sarebbe, tuttavia, preferibile impiegare dei materiali alternativi per la realizzazione del piano di scorrimento, caratterizzati da un coefficiente di dilatazione termica tale da impedire un'eccessiva deformazione alle temperature di esercizio.

Un'ulteriore criticità riguarda il numero complessivo dei componenti strutturali: dalla *Tabella 4.1.2* si individuano, infatti, dieci diverse tipologie di elementi di supporto. Inoltre, trattandosi di lamiere lavorate, la loro produzione contribuisce ad un aumento significativo dei costi.

Dunque, sarebbe più opportuno semplificare l'architettura meccanica e ridurre il numero di elementi di supporto.

Nei capitoli che seguono verranno presentate nuove soluzioni che impiegano materiali legnosi compositi (WPC) e materiali sintetici avanzati con rivestimento termoindurente per la realizzazione del piano di scorrimento del nastro. L'attività di riprogettazione si impegna, al tempo stesso, a:

- non incrementare la massa complessiva del gruppo per evitare un maggior dispendio energetico per la movimentazione del sorter;
- ridurre i costi complessivi del sistema;
- mantenere inalterate le prestazioni operative della tecnologia di smistamento.

La riprogettazione del pianale di scorrimento della cella MBHS® si inserisce a pieno nel percorso di sostenibilità delineato da *Leonardo S.p.A.*, che traduce la visione del gruppo in iniziative concrete e misurabili lungo l'intera catena del valore.

Nel contesto della transizione ecologica che caratterizza l'attuale panorama produttivo, infatti, la selezione di materiali non può più prescindere da un'analisi rigorosa dell'impatto ambientale lungo l'intero ciclo di vita (LCA). Sebbene la scelta tecnologica possa orientarsi verso polimeri ad alto peso molecolare per le loro indubbe caratteristiche meccaniche e di scorrimento, il presente progetto

sostiene l'adozione del legno composito e di materiali a base cellulosa come soluzione d'elezione per una fabbricazione orientata verso la sostenibilità.

Il vantaggio competitivo del legno composito risiede nella sua natura di materiale ibrido e rigenerativo. A differenza del polimero puro, che rimane un derivato della filiera petrolchimica, il WPC agisce come catalizzatore di economia circolare. Questa classe di materiali permette una reale circolarità attraverso il riciclo meccanico per declassamento (downcycling). Una volta dismessi, possono essere triturati in scaglie per la produzione di pannelli truciolari, riducendo l'abbattimento di foreste vergini. In alternativa, l'elevato potere calorifico di questi compositi ne consente una valorizzazione energetica d'eccellenza in impianti a biomassa.

I materiali a base cellulosa, tra cui l'HPL, pur presentando una struttura termoindurente che ne impedisce il riciclo meccanico tradizionale, offre dei vantaggi di sostenibilità indiretta. La sua eccezionale durezza superficiale garantisce un ciclo di vita utile superiore, riducendo la frequenza di sostituzione dei componenti e la generazione di rifiuti. A fine vita, la sua alta densità energetica lo rende ideale per il recupero energetico in termovalorizzatori.

Sotto il profilo climatico, questi materiali offrono un beneficio fondamentale: il sequestro di carbonio. Mentre la polimerizzazione a bassa temperatura del polietilene comporta un'impronta carbonica netta, la componente cellulosa agisce da carbon sink, intrappolando l'anidride carbonica assorbita biogenicamente. Questo posizionerebbe il nuovo modello non solo come prodotto industriale, ma come uno strumento di mitigazione ambientale.

Dunque, in un contesto in cui gli aeroporti puntano al traguardo Net Zero 2030⁶, la progettazione di soluzioni a ridotto impatto ambientale, anche nei sottosistemi meccanici come il pianale MBHS[®], contribuisce a rendere i sistemi di movimentazione bagagli più sostenibili. L'utilizzo di materiali eco-compatibili, associato alle tecnologie a basso consumo energetico sviluppate da *Leonardo*

⁶ Il Net Zero 2030 è un obiettivo ambientale che indica il raggiungimento, entro l'anno 2030, di un bilancio netto pari a zero tra le emissioni di gas a effetto serra prodotte e quelle rimosse dall'atmosfera. Molti aeroporti europei e internazionali hanno aderito al programma Airport Carbon Accreditation (ACA), che prevede proprio il percorso verso il Net Zero 2030.

Per un aeroporto ciò implica:

- elettrificazione dei mezzi di terra;
- utilizzo di energia 100% rinnovabile;
- sistemi di gestione bagagli e infrastrutture a basso consumo energetico;
- materiali e architetture sostenibili;
- riduzione dei rifiuti e ottimizzazione dei consumi idrici [38-39].

Automation, come motori ad alta efficienza e azionamenti lineari senza attrito, consente di realizzare un'infrastruttura aeroportuale che combina:

- efficienza;
- innovazione;
- ridotte emissioni;
- responsabilità ambientale.

5. Materiali alternativi per la fabbricazione del nuovo pianale di scorrimento del nastro

La progettazione del nuovo pianale di scorrimento per la cella di smistamento aeroportuale richiede un bilanciamento rigoroso tra resistenza strutturale, riduzione dei pesi e sostenibilità economica ed ambientale dei processi produttivi.

In questa prima fase della ricerca, l'attenzione si è focalizzata sulla valutazione dei possibili materiali a base lignea e cellulosica. La scelta deriva dalle idoneità prestazionali di tali prodotti ingegnerizzati che presentano caratteristiche di resistenza al carico, durabilità e basso coefficiente di attrito comparabili ai materiali tradizionali.

Per alcuni di essi, inoltre, l'azienda dispone già di canali di fornitura consolidati con partner operanti nel settore del legno tecnico. Sfruttare collaborazioni esistenti permetterebbe una riduzione significativa dei lead-time di approvvigionamento ed un abbattimento dei costi logistici iniziali, garantendo una continuità operativa già testata.

Di seguito sono indicati i materiali compositi che sono stati presi in considerazione per il progetto.

CARPLY RA®
di *Bellotti S.p.A.*

DESCRIZIONE
Pannello multistrato formato da sfogliati di betulla con facce ricoperte da resina fenolica termoindurente. La copertura comporta l'aumento della durezza superficiale, dell'impermeabilità e della durabilità delle superfici.

	Spessore [mm]				
	9	12	15	18	21
Densità [kg/m ³]	755	750	740	738	733
Resistenza a flessione longitudinale [MPa]	52-60				
Resistenza a flessione trasversale [MPa]	45-52				
Modulo longitudinale [MPa]	8100	7200	7200	7200	7200
Modulo trasversale [MPa]	3600	4500	5400	5400	5400
Coefficiente di Poisson longitudinale	0.450				
Coefficiente di Poisson trasversale	0.178				
Coefficiente di espansione termica – longitudinale [mm/(m°C)]	0.005				
Coefficiente di espansione termica trasversale [mm/(m°C)]	0.035				
Capacità termica specifica [J/(kgK)]	1600				
Conducibilità termica [W/(mK)]	0.17				

Tabella 5.1 Caratteristiche del materiale CARPLY RA® dell'azienda Bellotti S.p.A. [40]

**FAGGIO
RESINATO**

di *Bellotti S.p.A.*

DESCRIZIONE
Pannello multistrato costituito esclusivamente da legno di faggio fumigato ricoperto da uno strato di resina termoindurente. I bordi sono protetti da una vernice non igroscopica per ridurre al minimo l'assorbimento di acqua.

	Spessore [mm]				
	8	10	12	15	20
Densità [kg/m ³]	787.5	790	783.3	786.7	785
Resistenza a flessione longitudinale [MPa]	80-100				
Resistenza a flessione trasversale [MPa]	56-60				
Modulo longitudinale [MPa]	10000	7000	8600	7800	7900
Modulo trasversale [MPa]	4000	4200	5000	6700	5400
Coefficiente di Poisson longitudinale	0.40				
Coefficiente di Poisson trasversale	0.32				
Coefficiente di espansione termica longitudinale [mm/(m°C)]	0.01				
Coefficiente di espansione termica trasversale [mm/(m°C)]	0.06				
Capacità termica specifica [J/(kgK)]	1700				
Conducibilità termica [W(mK)]	0.17				

Tabella 5.2 Caratteristiche del compensato di faggio resinato dell'azienda Bellotti S.p.A. [41]

N.EXT COMPACT®
di Puricelli S.p.A.

DESCRIZIONE
Laminato HPL (High Pressure Laminate) composto da un nucleo rigido di strati di carta kraft impregnati di resine termoindurenti, protetto da una superficie contenente resine melamminiche.

Spessore [mm]	2-16
Densità [kg/m ³]	1350
Resistenza a flessione [MPa]	80
Modulo elastico [MPa]	9000
Coefficiente di Poisson	0.3
Coefficiente di espansione termica [mm/(m°C)]	0.018
Capacità termica specifica [J/(kgK)]	1450
Conducibilità termica [W(mK)]	0.28

Tabella 5.3 Caratteristiche del materiale N.EXT COMPACT® dell'azienda Puricelli S.p.A. [41]

Il materiale HPL ha le caratteristiche di un materiale isotropo. Tale assunzione, supportata dalle specifiche tecniche del produttore, deriva dalla particolare natura strutturale dei laminati ad alta pressione (HPL) e dal loro processo di trasformazione industriale.

A differenza dei materiali di origine lignea analizzati in questa sede, che conservano l'anisotropia intrinseca della fibra naturale, il N.EXT COMPACT® presenta una risposta meccanica e termica uniforme in tutte le direzioni spaziali per le seguenti ragioni tecniche:

- Omogeneità della matrice polimerica – il pannello è costituito da strati di fibre cellulosiche impregnati con resine termoidurenti fenoliche e melamminiche. Durante il processo di pressatura ad alta pressione e temperatura, le resine subiscono una reazione di polimerizzazione che crea un reticolo tridimensionale continuo. Questa matrice plastica avvolge le fibre, annullando le direzioni preferenziali di scorrimento tipiche dei tessuti legnosi.
- Disposizione casuale del rinforzo: le fibre di cellulosa all'interno della carta kraft utilizzata come supporto non presentano un orientamento unidirezionale, ma sono distribuite in modo casuale o intrecciato. Ciò conferisce al materiale proprietà quasi isotrope nel piano della lastra, rendendo trascurabile la distinzione tra direzione longitudinale e trasversale.

Oltre alle proprietà meccaniche, la scelta dei materiali per il pianale della cella MBHS® è stata rigorosamente guidata dai parametri di sicurezza antincendio, fondamentali per l'installazione in ambienti aeroportuali chiusi e ad alto affollamento. Le soluzioni individuate rispondono ai più elevati standard internazionali, seppur seguendo quadri normativi differenti in base alla loro natura compositiva:

- CARPLY RA® e faggio resinato – sono certificati secondo la norma EN 45545-2, specifica per il settore ferroviario ma adottata come benchmark di eccellenza anche in ambito logistico. In particolare, soddisfano il set di requisiti R10 (superfici orizzontali) per il livello di rischio HL2 (Hazard level 2). Tale classificazione garantisce che, in caso di innesco, il materiale presenti un'elevata resistenza alla propagazione della fiamma e, soprattutto, una bassissima opacità e tossicità dei fumi sprigionati, facilitando le operazioni di evacuazione.
- N.EXT COMPACT® – per questo materiale avanzato, la validazione segue la norma EN13501, ottenendo la classificazione B-s1, d0. Questa sigla identifica un profilo di sicurezza eccellente:
 - B (combustibilità limitata) – indica che il materiale fornisce un contributo molto limitato di incendio;
 - s1 (sviluppo di fumi) – rappresenta il grado più alto di performance per quanto riguarda l'assenza di fumi opachi;
 - d0 (gocciolamento) – certifica la totale assenza di gocce o particelle infiammate durante la combustione, eliminando il rischio di propagazione del fuoco verso le parti sottostanti della cella o del sorter.

L'impiego di materiali conformi a tali standard assicura che il sistema di smistamento bagagli di *Leonardo S.p.A.* risulti pienamente integrabile nelle moderne infrastrutture aeroportuali, rispettando i più stringenti protocolli di prevenzione incendi globali.

6. Il nuovo modello del pianale di scorrimento per la cella MBHS®

Il nuovo progetto del gruppo pianale di scorrimento – telaio è riportato in *Figura 6.1* e *Figura 6.2*.

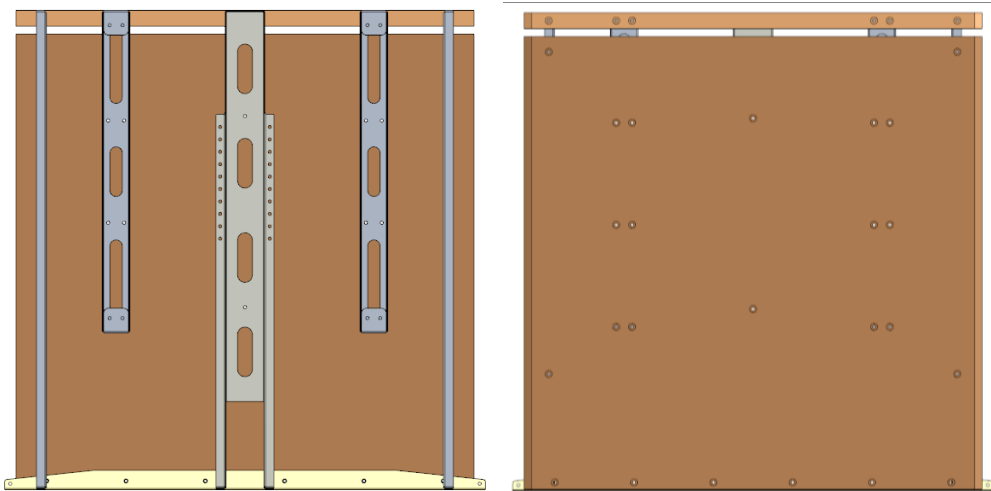


Figura 6.1 Nuovo modello del gruppo pianale di scorrimento-telaio, realizzato con il software Creo Parametric

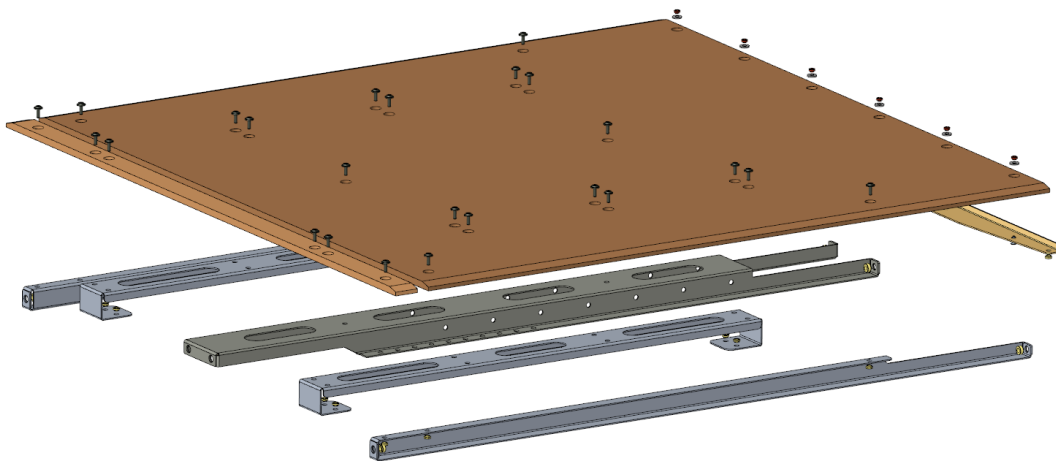


Figura 6.2 Esploso del nuovo modello del gruppo pianale di scorrimento-telaio, realizzato con il software Creo Parametric

La modellazione del pianale di scorrimento ha previsto spessori differenziati in funzione delle caratteristiche intrinseche di ciascun materiale e dei relativi vincoli produttivi, come approfondito nel *Capitolo 5*.

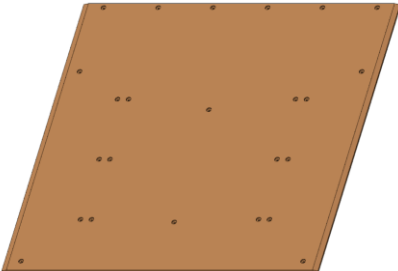

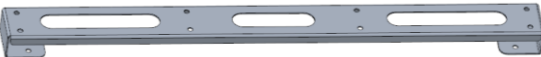
Nello specifico, per il faggio resinato di *Bellotti S.p.A.* è stato adottato uno spessore di 8 mm, corrispondente allo standard minimo di fornitura per tale tipologia di pannello. Per il CARPLY RA[®], la dimensione è stata fissata a 9 mm, in linea con le specifiche del produttore. Diversamente, per il materiale N.EXT COMPACT[®] di *Puricelli S.p.A.*, si è optato per una selezione di 6 mm. Tale valore rappresenta il compromesso ottimale tra due esigenze contrapposte: da un lato la necessità di contenere il peso complessivo del componente (data l'elevata densità del materiale); dall'altro l'esigenza tecnica di garantire uno spessore sufficiente per la realizzazione delle lamature. Queste lavorazioni meccaniche sono, infatti, indispensabili per alloggiare le teste delle viti a scomparsa, assicurando che rimangano al di sotto del piano di scorrimento per evitare interferenze o danneggiamenti ai bagagli in transito.

Tale differenziazione geometrica ha permesso di perseguire l'obiettivo di riduzione degli ingombri e dei pesi.

I componenti in lamiera, invece, hanno mantenuto lo stesso spessore del modello originario (1.5 mm) e sono fabbricati nel medesimo materiale.

Come nel sistema già esistente, anche nel nuovo progetto il pianale si compone di due parti. Il gap creato tra i due elementi è necessario per consentire l'inserimento del cingolo di centraggio saldato al nastro di trasporto: il suo scopo è evitare lo sbandamento di quest'ultimo durante la movimentazione concessa dal rullo motore.

I dati relativi al volume ed al peso di ciascun componente sono riportati in *Tabella 6.1.*

N°	Componente			
1		volume	CARPLY RA®	7527549 mm ³
			FAGGIO RESINATO	6683692 mm ³
			N.EXT COMPACT®	4995977 mm ³
		PESO	CARPLY RA®	5.7 kg
			FAGGIO RESINATO	5.3 kg
			N.EXT COMPACT®	6.7 kg
2		volume	CARPLY RA®	259640 mm ³
			FAGGIO RESINATO	230242 mm ³
			N.EXT COMPACT®	171445 mm ³
		PESO	CARPLY RA®	0.20 kg
			FAGGIO RESINATO	0.18 kg
			N.EXT COMPACT®	0.23 kg
3		volume	70290 mm ³	
		PESO	0.6 kg	





4		volume	61630 mm ³
		PESO	0.7 kg
5		volume	187138 mm ³
		PESO	1.5 kg
6		volume	81922.7 mm ³
		PESO	0.6 kg
7		volume	81923 mm ³
		PESO	0.6 kg

Tabella 6.1 Dati caratteristici del pianale di scorrimento del nastro e del relativo sostegno riprogettati

Dalla tabella è possibile notare che il nuovo telaio si compone di sole 5 tipologie di elementi di supporto ed è caratterizzato, dunque, da un ridotto livello di complessità.

In base al materiale assegnato ai due costituenti del pianale, il peso dell'assieme cambia. Di seguito sono riportati i risultati relativi a tale associazione.

CARPLY RA®: peso complessivo del gruppo pianale – telaio = 9.0 kg

FAGGIO RESINATO: peso complessivo del gruppo pianale – telaio = 10.1 kg

N.EXT COMPACT®: peso complessivo del gruppo pianale – telaio = 11.5 kg

6.1. Messe in tavola dei nuovi componenti

Di seguito sono allegate le messe in tavola delle parti rappresentative del pianale e degli elementi di sostegno che sono stati riprogettati tramite il software *Creo Parametric*⁷.

Tra le tavole allegate emergono anche quelle relative ad alcuni componenti della cella che non fanno parte del gruppo pianale di scorrimento-telaio, ma che sono stati rimodellati per accogliere il nuovo sistema progettato. In *Figura 6.1.1* sono mostrate tali parti.

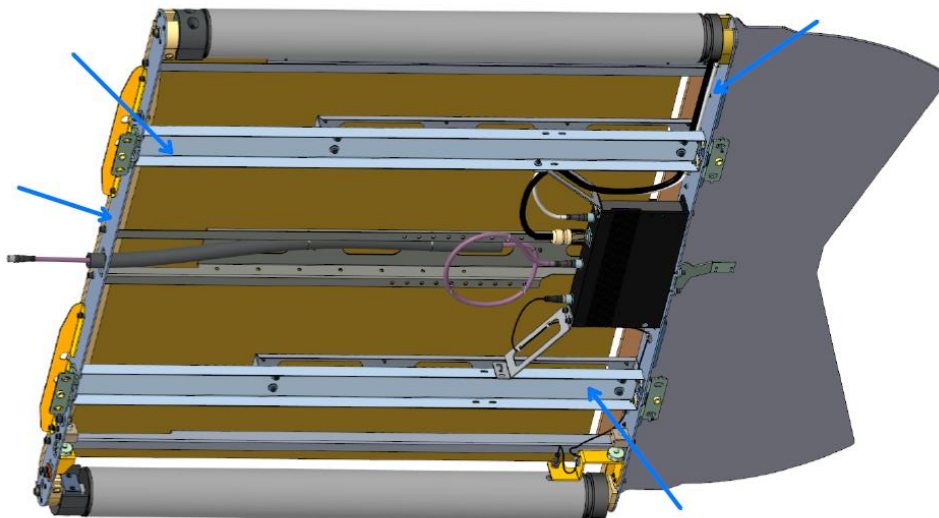


Figura 6.1.1 Elementi rimodellati per accogliere il nuovo gruppo pianale di scorrimento-telaio

⁷ Le messe in tavola dei due componenti del pianale fanno riferimento al sistema realizzato in legno di betulla CARPLY RA®. Gli altri modelli si differenziano solo per lo spessore del materiale.

Pianale – parte 2

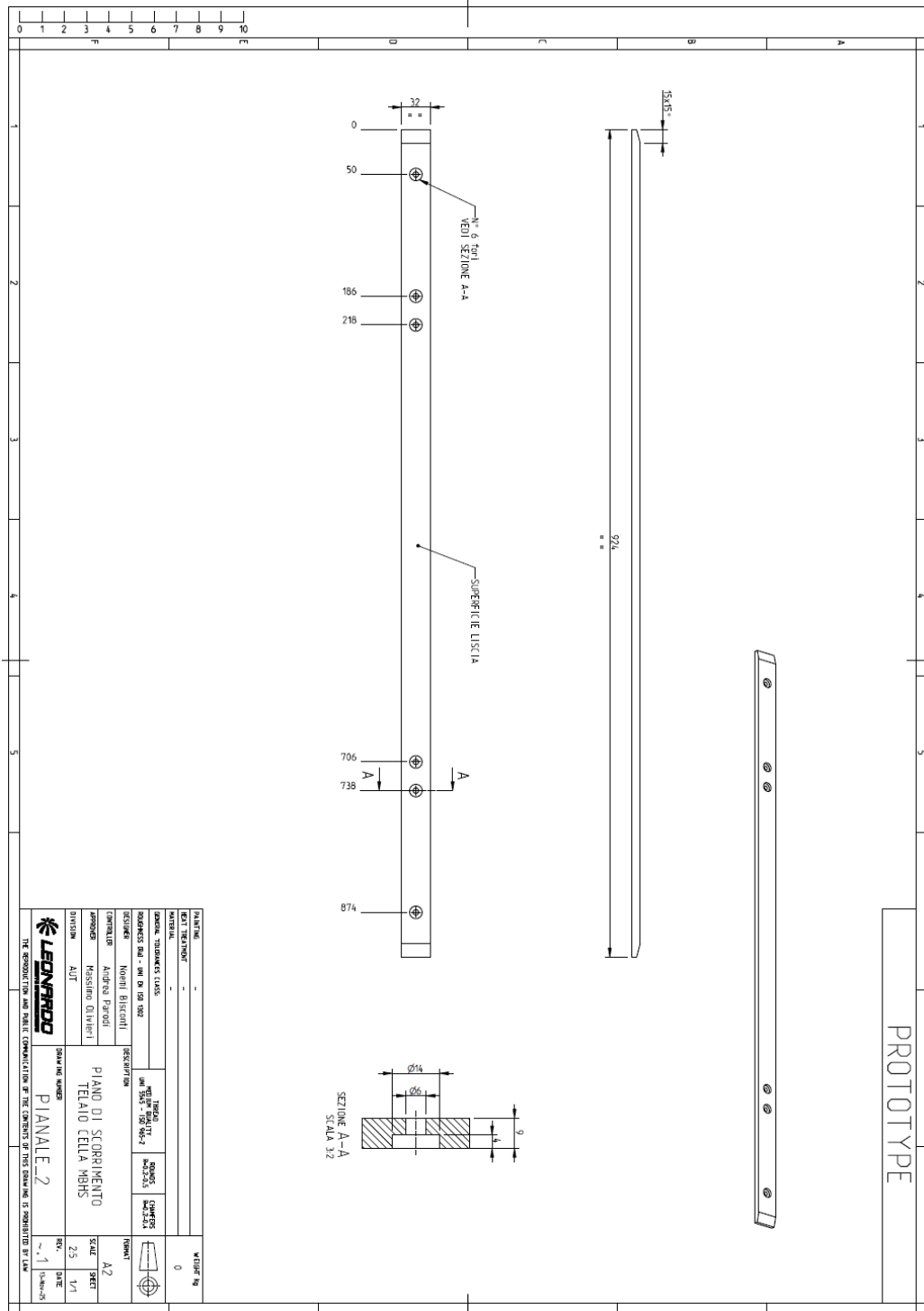


Figura 6.1.3 Messa in tavola del pianale, parte 2

Lamiera di fissaggio dei cavi di cablaggio, per azionamento del motorullo

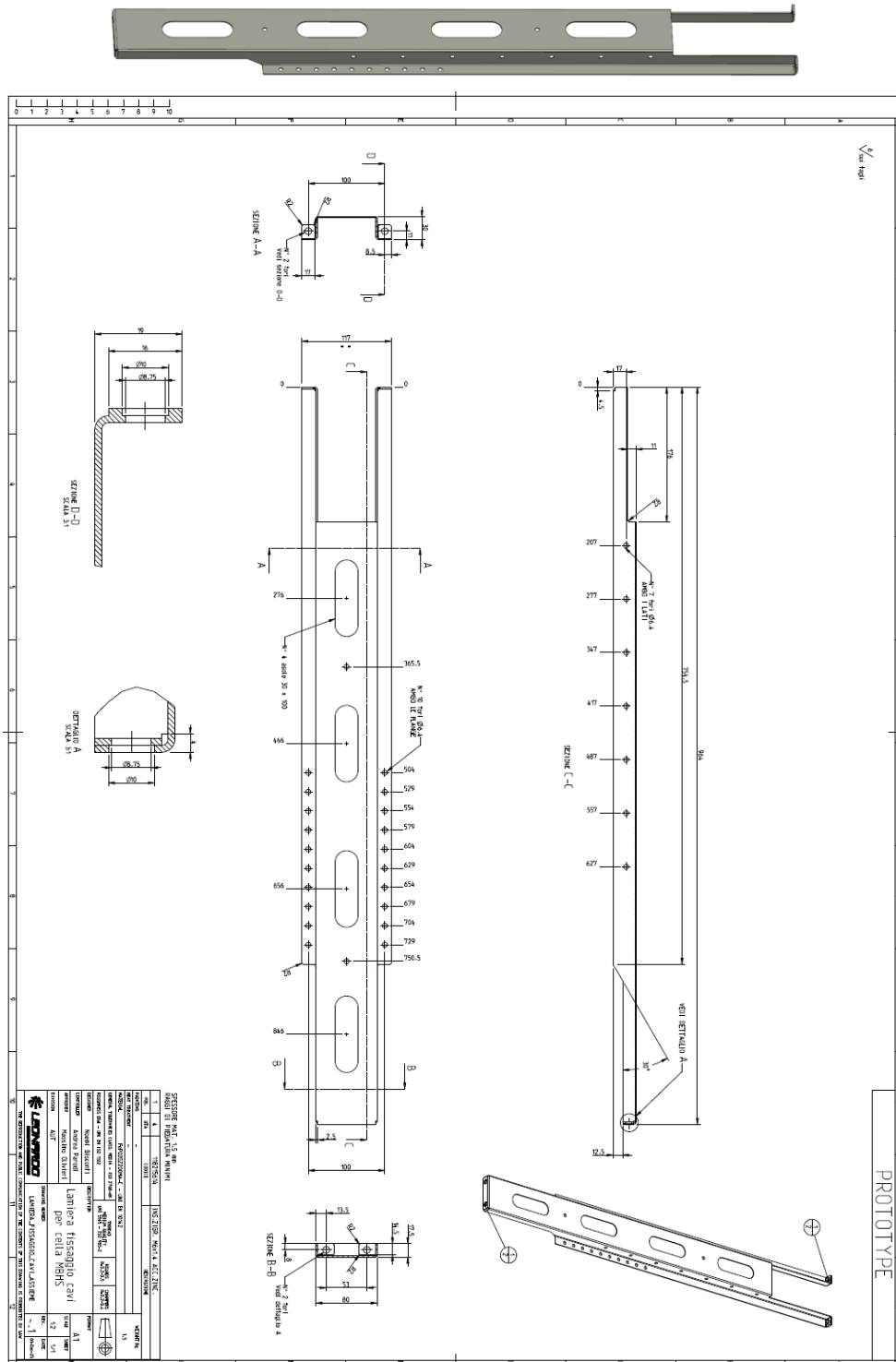


Figura 6.1.5 Messa in tavola della lamiera di fissaggio dei cavi di cablaggio

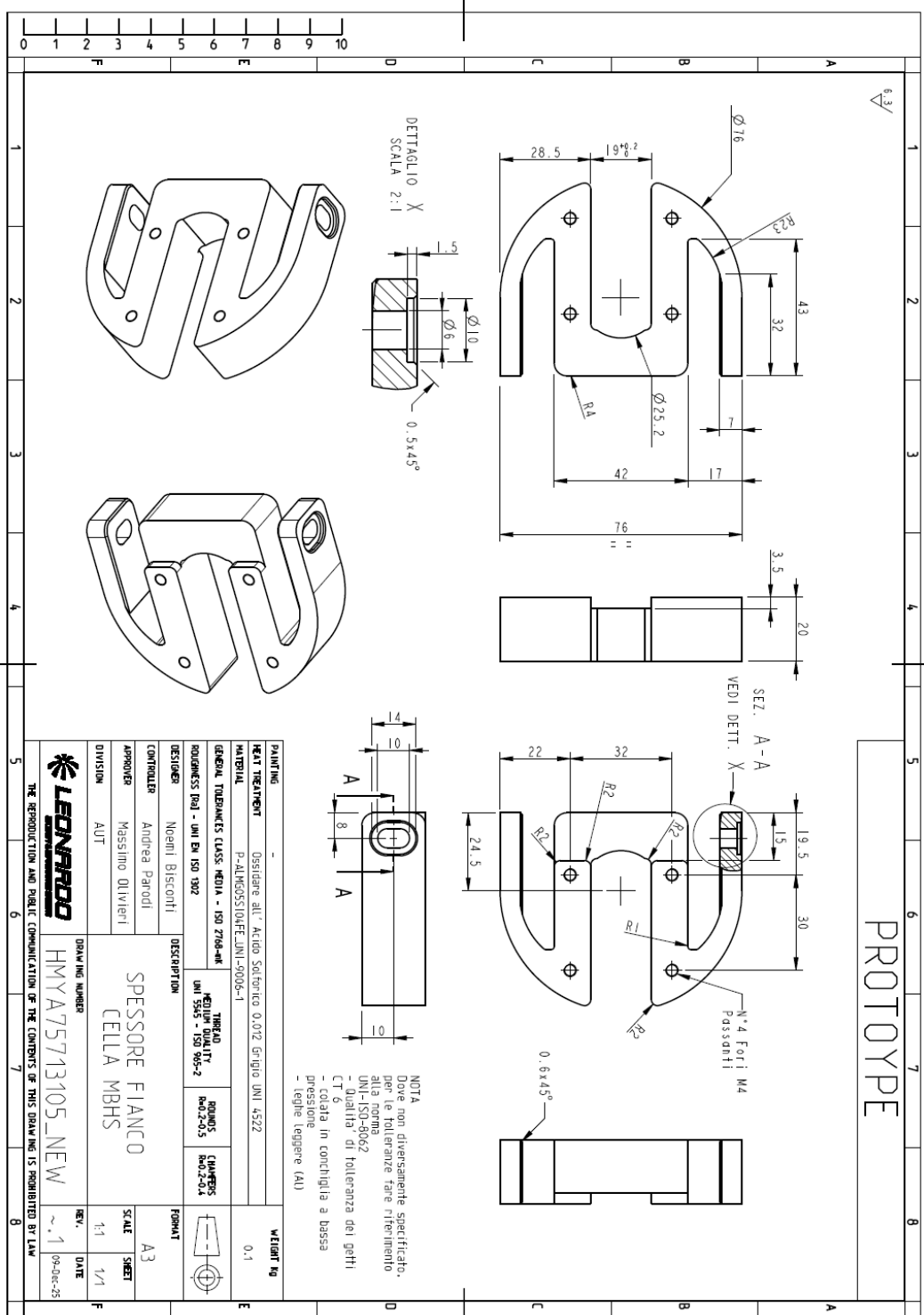


Figura 6.1.10 Messa in tavola del distanziante posizionato tra rullo e fianco della cella MBHS®

6.2. Assemblaggio dei nuovi componenti

Gli elementi che compongono il telaio sono fissati al pianale tramite un sistema costituito da un inserto PEM® filettato internamente e da una vite TBEI (vite a testa bombata con esagono incassato). L'inserto è montato direttamente sulle lamiere di sostegno prima della loro installazione sul piano di scorrimento (*Figura 6.1.1*).

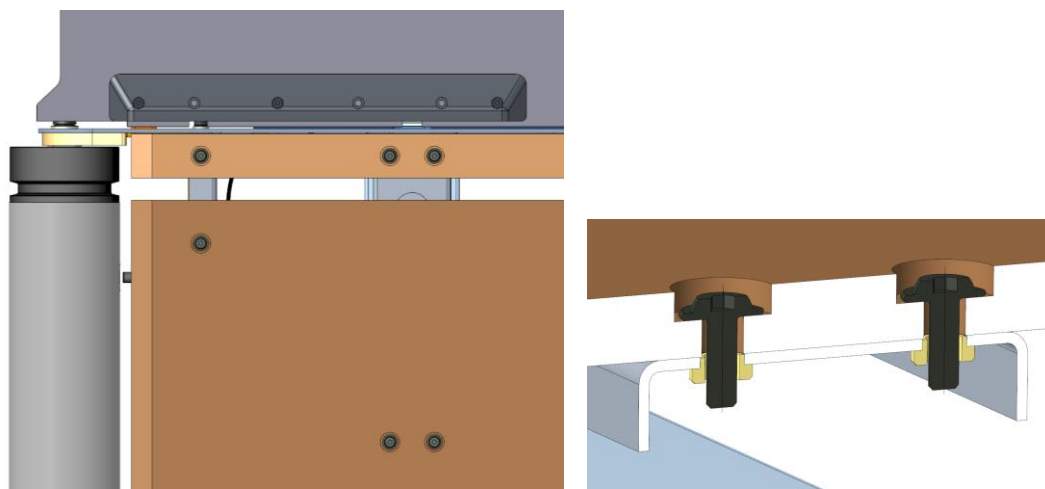


Figura 6.2.1 Sistema di fissaggio del telaio al pianale

I collegamenti del pianale alla lamiera collocata ad una estremità della cella (*lamiera di sostegno estremità piano di scorrimento per cella MBHS*) sono costituiti, invece, da una vite a testa svasata, un inserto PEM® autobloccante ed una rosetta (*Figura 6.1.2*).

Tale sistema di fissaggio è efficace perché non genera ingombri al di sotto della lamiera, laddove scorre la flappa della cella di smistamento precedente. Infatti, se venisse applicato il collegamento menzionato inizialmente, l'inserto PEM® potrebbe entrare in contatto con la flappa e premere su di essa, a causa delle deformazioni dovute al caricamento di un bagaglio durante l'effettivo funzionamento della cella. Il risultato comporterebbe rumorosità e corrosione della flappa stessa.

Nonostante lo spessore del pianale sia sufficiente per generare del filetto per l'avvitamento della vite, la presenza di un inserto autobloccante è necessaria. Il motivo è puramente strutturale: le creste di un filetto generato su un materiale legnoso tenderebbero a sfaldarsi sotto carico, a causa della sua fibrosità ed anisotropia.

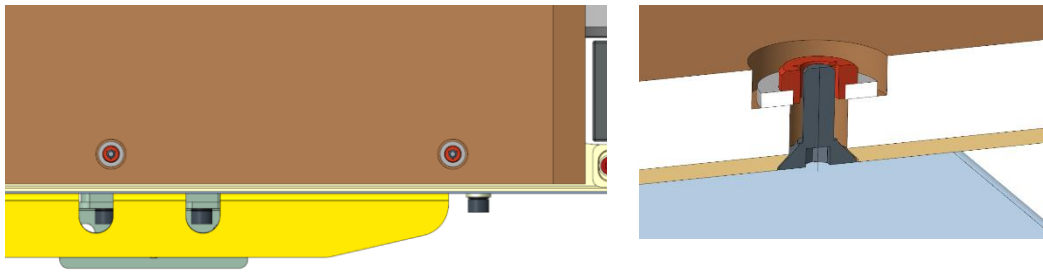


Figura 6.2.2 Sistema di fissaggio della lamiera all'estremità della cella al pianale

Per entrambe le tipologie di collegamento, i fori realizzati sul pianale sono dotati di lamatura per nascondere la testa della vite o l'inserto autobloccante al di sotto della superficie ed evitare, in questo modo, che possano entrare in contatto con il nastro che avvolgerà l'intera cella.

Nel nuovo progetto, dunque, le asole sono state sostituite da fori e la scelta è dovuta al ridotto coefficiente di dilatazione termica di un materiale legnoso o a base cellulosica, che è circa due ordini di grandezza inferiore rispetto a quello relativo al polietilene con cui il pianale era stato realizzato originariamente.

6.3. Montaggio del pianale di scorrimento e del relativo telaio sulla cella MBHS®

Il gruppo pianale-telaio viene montato al resto della cella solo dopo l'assemblaggio dei rulli, dei fianchi, delle lamiere trasversali a 'C' e del sistema di azionamento del motorullo. Nell'immagine di seguito è riportato il modello dell'unità di smistamento prima dell'installazione del gruppo pianale-telaio.

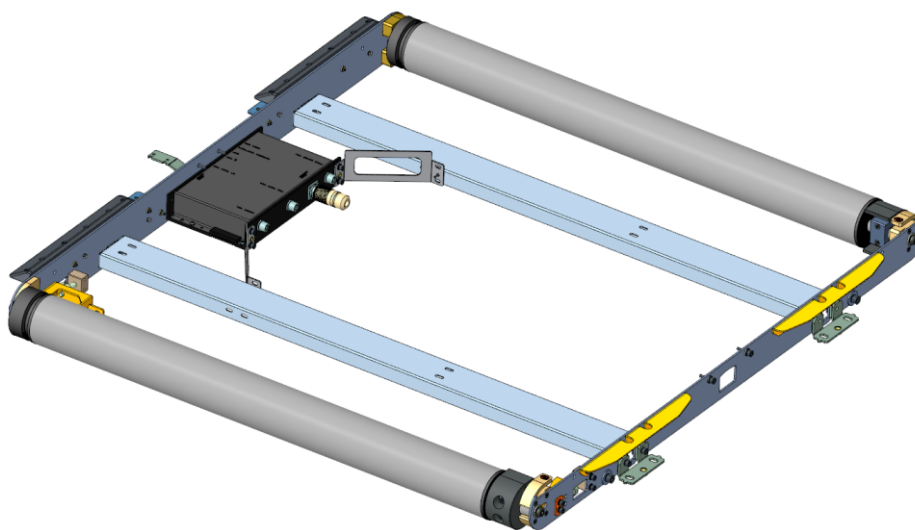


Figura 6.3.1 Modello dell'unità di smistamento prima dell'installazione del gruppo pianale di scorrimento-telaio, Creo Parametric

Le fasi di installazione del pianale di scorrimento del nastro trasportatore e del relativo telaio sulla cella sono riportati di seguito:

1. Il gruppo pianale-supporto viene posizionato sulle traverse della cella smistatrice mediante le omega di sostegno. L'accoppiamento tra le due parti avviene tramite un sistema costituito da vite a testa cilindrica, rondella e inserto PEM®, con un avvitamento inizialmente lasso (*Figura 6.3.2*). La presenza di asole passanti consente di ottenere il necessario gioco, permettendo il successivo corretto fissaggio del telaio ai fianchi della cella.

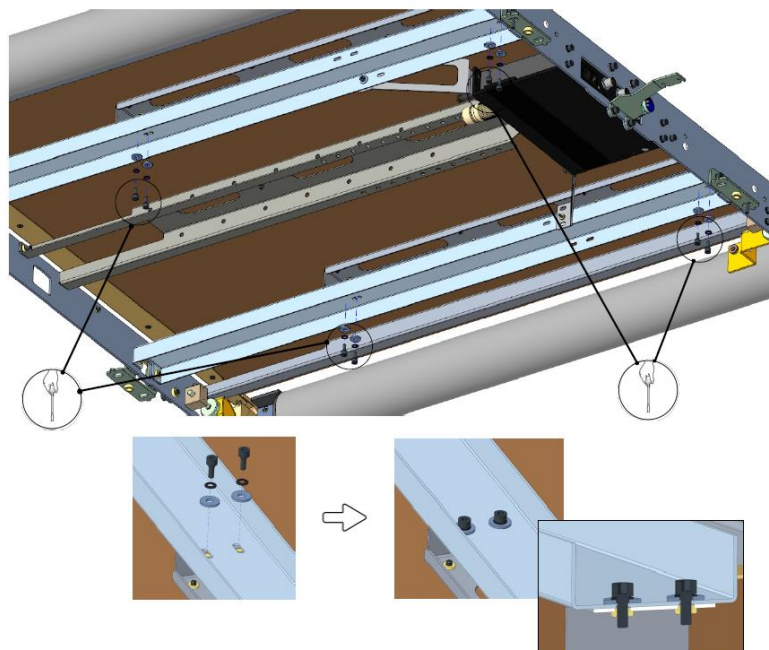


Figura 6.3.2 Fase 1 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS[®],
Creo Parametric

2. Il telaio viene, poi, fissato ai due fianchi della cella smistatrice, sfruttando la stessa viteria citata al punto 1 (Figura 6.3.3 e Figura 6.3.4).

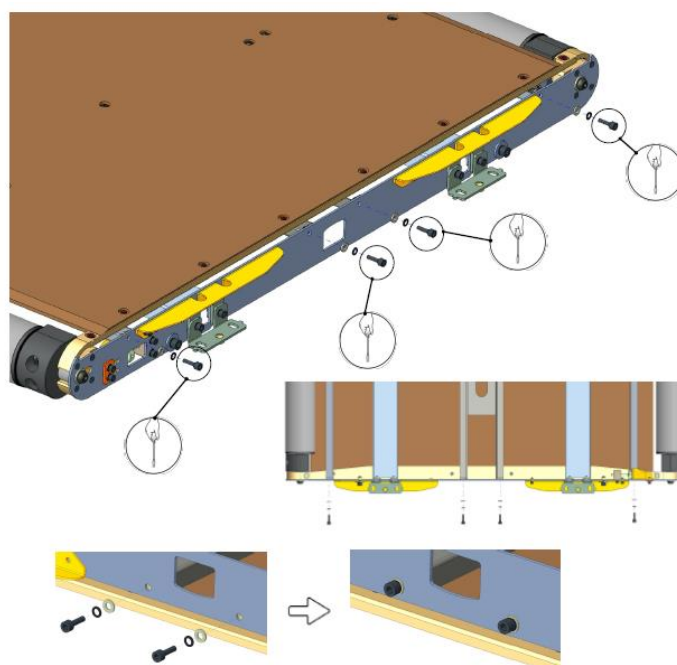


Figura 6.3.3 Fase 2 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS[®],
Creo Parametric

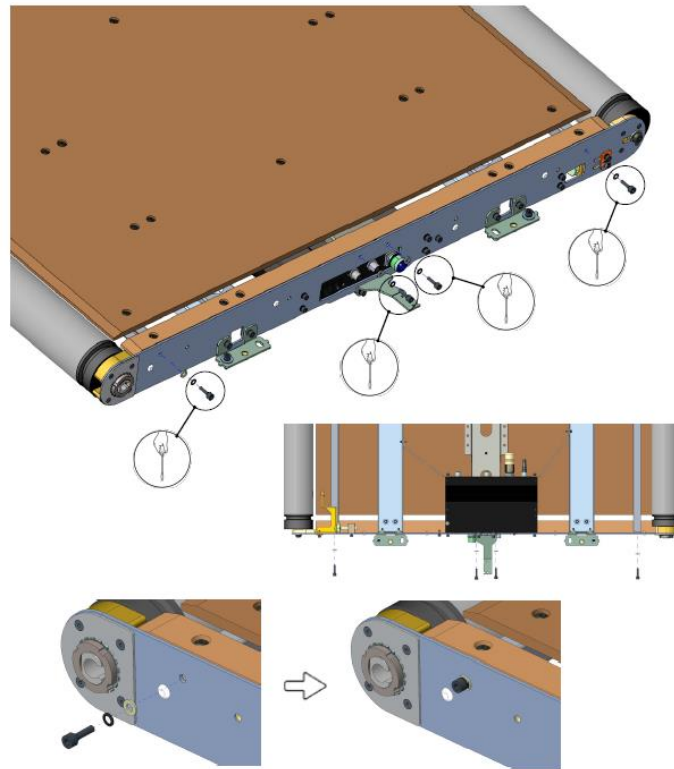
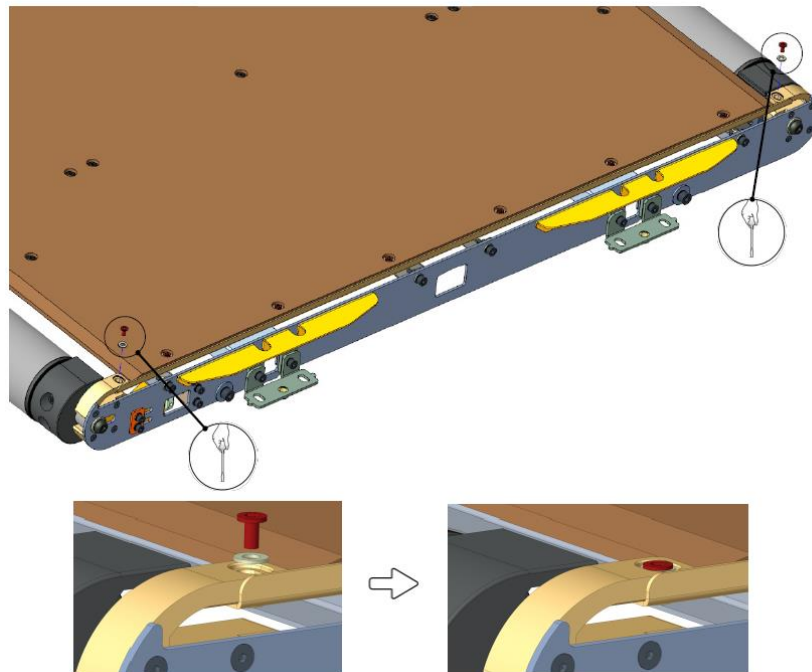


Figura 6.3.4 Fase 2 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS[®],
Creo Parametric

3. Il fissaggio avviene anche tramite i distanziali posizionati tra i rulli ed un fianco dell'unità di smistamento. Tale accoppiamento ha lo scopo di garantire sostegno al pianale e di evitare che quest'ultimo possa deformarsi, colpendo la flappa, nel momento in cui una valigia viene posizionata sul nastro.



*Figura 6.3.5 Fase 3 della procedura di installazione del gruppo pianale-telaio al resto della cella MBHS[®],
Creo Parametric*

4. Infine, l'avvitamento lasso menzionato al punto 1 viene fissato, permettendo il completamento del processo di montaggio del gruppo pianale-telaio all'unità di smistamento.

Soltanto a seguito dell'installazione del piano di scorrimento e del supporto, è previsto il montaggio dei cavi di cablaggio, nastro e flappa.

Specificamente, i cavi di alimentazione sono connessi al sostegno tramite delle fascette di cablaggio (*Figura 6.3.6*). La lamiera alla quale tali elementi sono fissati è dotata di numerosi fori, per permettere all'operaio la migliore gestione e sistemazione dei cavi nella cella.

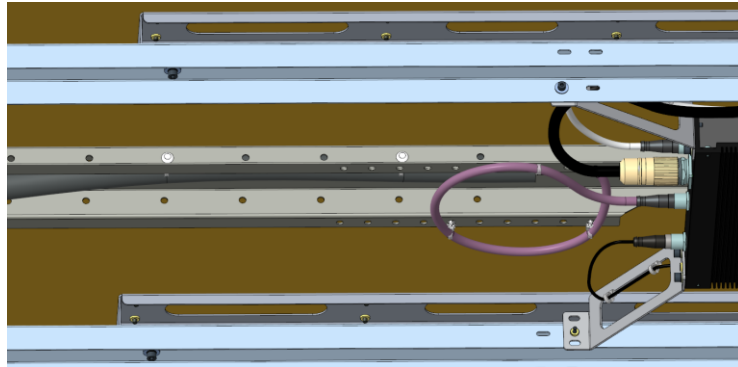


Figura 6.3.6 Sistema di fissaggio dei cavi di cablaggio alla lamiera

Il modello complessivo della cella di smistamento, non dotata di nastro, è mostrata di seguito.

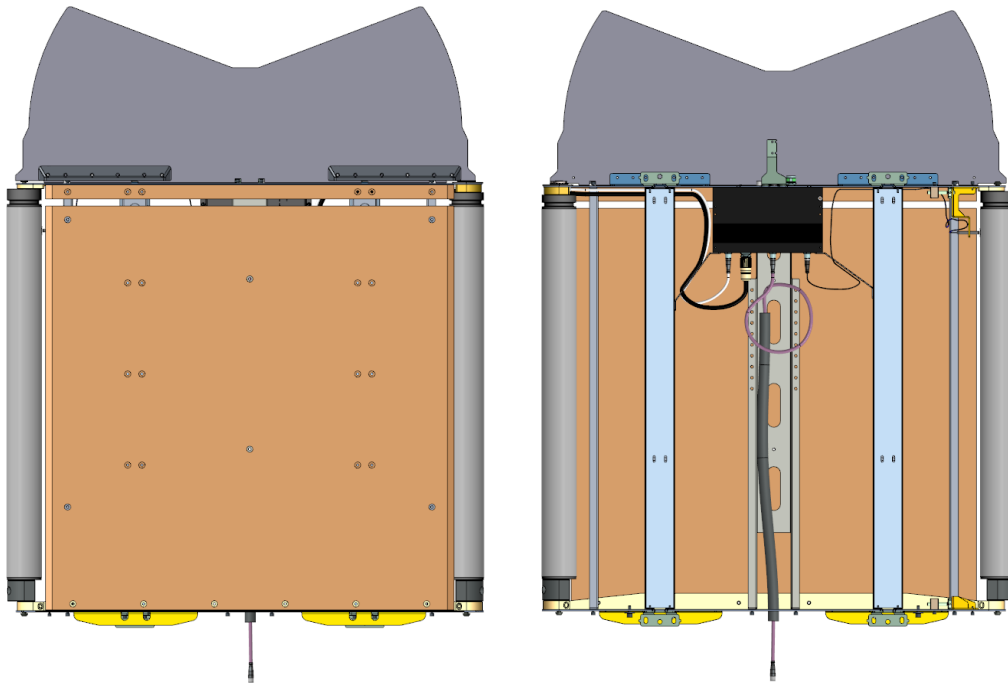


Figura 6.3.7 Modello complessivo della nuova cella di smistamento, non dotata di nastro, realizzato con Creo Parametric

6.4. Analisi di fattibilità economica e confronto delle offerte

L'ottimizzazione della cella di smistamento non può prescindere da una valutazione rigorosa della sostenibilità economica delle soluzioni proposte. In questa fase, l'obiettivo è stato confrontare l'impatto dei costi dei materiali alternativi rispetto allo standard attuale, integrando le quotazioni ottenute dai diversi fornitori.

In questa sezione vengono presentati i costi unitari relativi al nuovo modello di studio. Per garantire l'omogeneità del confronto, i preventivi sono stati richiesti per lotti di fornitura standard (1500 unità per ogni elemento), considerando le specifiche geometriche definite nel modello CAD ed i trattamenti previsti dalle schede tecniche. È opportuno riassumere i dati in una tabella per facilitare l'attività di confronto.

Modello originario – pianali in polietilene	Telaio	-	125
	Pianali	Habasit	84
			TOTALE = 199
Nuova proposta – pianali in faggio resinato	Telaio	-	62
	Pianali	Bellotti	56
			TOTALE = 118
Nuova proposta – pianali in CARPLY RA®	Telaio	-	62
	Pianali	Bellotti	52
			TOTALE = 114
Nuova proposta – pianali in HPL	Telaio	-	62
	Pianali	Puricelli	135
			TOTALE = 197

Tabella 6.4.1 Costi unitari del gruppo pianale-telaio derivanti da preventivo per un lotto di fornitura standard

Dall'analisi comparativa dei costi tra il sistema originario con il pianale in polietilene e le nuove configurazioni proposte, emerge un dato significativo: tutti i nuovi modelli presentano un costo industriale complessivo inferiore rispetto alla soluzione di partenza.

Il fattore determinante per la riduzione dei costi non è da ricercarsi esclusivamente nel prezzo del materiale del pianale, bensì nella profonda semplificazione del telaio sottostante.

Il design originario richiedeva una struttura di supporto complessa e non economica per compensare la scarsa rigidità del polietilene. Grazie alle superiori proprietà meccaniche dei nuovi materiali selezionati (HPL e WPC), è stato possibile snellire il telaio, riducendo il numero di componenti e le lavorazioni richieste.

Nello specifico, l'analisi ha evidenziato quanto segue:

- Soluzioni in legno composito – questi modelli rappresentano l'opzione più economica. Il basso costo del legno composito, unito alla drastica riduzione dei componenti del sostegno, porta ad un costo finale della cella di gran lunga inferiore rispetto al modello di partenza;
- Soluzione in HPL – in questo caso, il costo del materiale plastico ad alte prestazioni è superiore a quello del polietilene. Tuttavia, la semplificazione del telaio agisce come un correttivo economico fondamentale. Se avessimo mantenuto il sostegno originario, infatti, il costo del sistema con pianale in HPL sarebbe risultato eccessivo e fuori mercato. Grazie al nuovo design ottimizzato, invece, la configurazione in HPL raggiunge un costo complessivo quasi comparabile a quello in PE offrendo, però, prestazioni termiche e meccaniche superiori.

In definitiva, la strategia di progettazione adottata ha permesso di trasformare un miglioramento qualitativo in un vantaggio economico. L'impiego di materiali più nobili e rigidi ha abilitato una revisione del design strutturale che rende l'intero gruppo cella più competitivo.

7. Analisi FEM del nuovo modello

A seguito della creazione del modello tridimensionale del gruppo pianale-telaio, è stata eseguita un'analisi statica FEM dell'assieme, nell'ambiente di simulazione del software *Creo Parametric*.

Il metodo degli elementi finiti (FE)

L'analisi agli elementi finiti è il processo di previsione del comportamento di un oggetto che consente l'ottenimento di una soluzione numerica in forma integrale su un dominio finito, a partire da un problema fisico-matematico descritto con equazioni differenziali alle derivate parziali. Tale tecnica utilizza la matematica per discretizzare un sistema continuo, introducendo delle funzioni che approssimano il campo degli spostamenti all'interno di ogni parte. La legge di spostamento di tutti i punti del continuo deformabile può essere espressa come combinazione degli spostamenti definiti ai nodi di un elemento:

$$\{u(x, y, z, t)\} = [N(x, y, z)] \cdot \{q(t)\}$$

dove

$$\left\{ \begin{array}{l} \{u(x, y, z, t)\} \text{ è il vettore degli spostamenti di un generico punto all'interno dell'elemento} \\ [N(x, y, z)] \text{ è la matrice delle funzioni di forma} \\ \{q(t)\} \text{ è il vettore degli spostamenti nodali} \end{array} \right.$$

I nodi, nei quali sono valutati gli spostamenti, sono i punti chiave dell'analisi FEM. Sono generalmente situati alle estremità o ai vertici di un elemento, ma possono essere posizionati anche all'interno di esso.

Similmente possono essere valutate le deformazioni di un generico punto all'interno dell'elemento:

$$\{\varepsilon(x, y, z, t)\} = [B(x, y, z)] \cdot \{q(t)\}$$

dove

$$\left\{ \begin{array}{l} \{\varepsilon(x, y, z, t)\} \text{ è il vettore delle deformazioni di un generico punto all'interno dell'elemento} \\ [B(x, y, z)] \text{ è la matrice di deformabilità, contenente opportune derivate delle funzioni di forma} \end{array} \right.$$

Gli elementi con cui sono state eseguite le analisi sono elementi solidi tetraedrici lineari (*Figura 7.1*). Ognuno di essi è caratterizzato da 4 nodi con 12 gdl (3 gdl per ogni nodo).

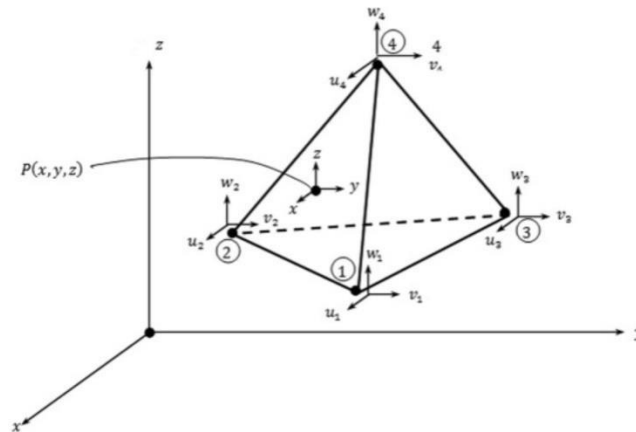


Figura 7.1 Elemento solido tetraedrico per analisi FEM

Il campo di spostamenti è, quindi, descritto da polinomi di primo grado nelle coordinate spaziali x, y, z . Per un generico punto interno all'elemento, le tre componenti di spostamento (u, v, w) sono espresse come:

$$u(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z$$

$$v(x, y, z) = \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 z$$

$$w(x, y, z) = \alpha_9 + \alpha_{10} x + \alpha_{11} y + \alpha_{12} z$$

dove i 12 coefficienti α_i (costanti generalizzate) vengono determinati imponendo che lo spostamento nei 4 nodi coincida con i valori nodali incogniti.

Queste funzioni polinomiali rispettano rigorosamente i requisiti classici per garantire la convergenza dell'analisi al diminuire delle dimensioni dell'elemento:

- sono funzioni continue;
- sono in grado di rappresentare il moto rigido dell'elemento con una corrispondente energia di deformazione nulla;
- sono capaci di individuare uno stato di deformazione costante, dal momento che tali polinomi sono lineari;
- garantiscono una deformazione coerente delle interfacce di due elementi adiacenti, impedendo compenetrazioni della mesh.

Per verificare la convergenza, sono state eseguite molteplici analisi dell'assieme: è stato imposto un carico costante (60kg) distribuito su una superficie del pianale di $680 \times 440 \text{ mm}^2$ ed è stato variato il numero di elementi per la discretizzazione del

sistema. Di seguito è riportato il grafico che mostra la massima deformazione del pianale (in CARPLY RA[®]) in funzione del numero.

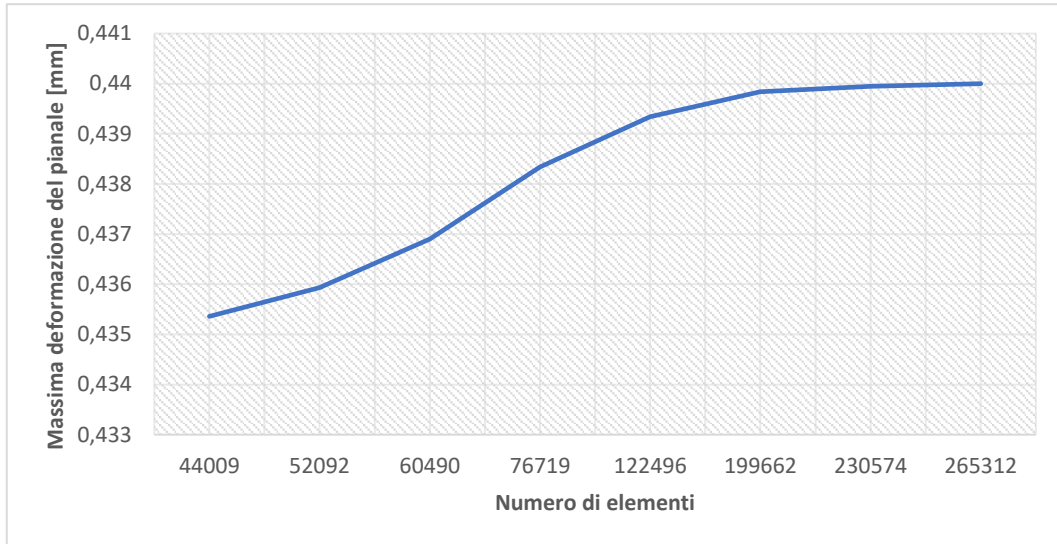


Grafico 7.1 Andamento della deformazione massima del pianale in funzione del numero di elementi

Dal grafico è possibile osservare che la curva relativa alla massima deformazione del pianale ha un andamento monotono crescente ed asintotico, per un numero di elementi che tende ad infinito. Tale asintoto si verifica per:

$$\text{deformazione massima} = 0.440 \text{ mm}$$

I risultati delle simulazioni sono in linea con la teoria: la formulazione agli spostamenti finiti, su cui si basa l'analisi FEM, attribuisce una maggiore rigidità agli elementi, dal momento che obbliga gli infiniti punti del dominio fisico ad avere una dipendenza matematica dagli spostamenti nodali. Nella discontinuità tra due elementi adiacenti nasce un residuo che genera un errore distribuito nel modello. Tuttavia, tanto maggiore è il numero di elementi con cui l'assieme è discretizzato, tanto minore è il residuo e tanto più gli output sono rappresentativi della realtà.

Questo studio preliminare è essenziale anche per individuare la dimensione della mesh che sia in grado di fornire risultati con un buon livello di approssimazione, evitando tempi computazionali proibitivi. Come anche citato nel paragrafo successivo, la lunghezza massima dei lati dell'elemento solido tetraedrico deve essere scelta per consentire la generazione di una mesh con un numero di elementi compreso tra 199000 e 230000, così che il risultato di deformazione possa ricadere nel plateau della curva del *Grafico 7.1*.

Inizializzazione del modello per l'analisi statica strutturale FEM

La finalità dello studio è la determinazione della bontà della struttura progettata e dei materiali scelti attraverso il calcolo delle deformazioni del modello al variare della posizione e della dimensione del bagaglio applicato al pianale.

La deformazione massima ammissibile del sistema per evitare che il gruppo stesso vada a contatto con la flappa collocata al di sotto del telaio è di 2.5 mm (*Figura 7.2*). Dunque, un risultato al di sotto di tale valore conferisce validità strutturale al progetto.

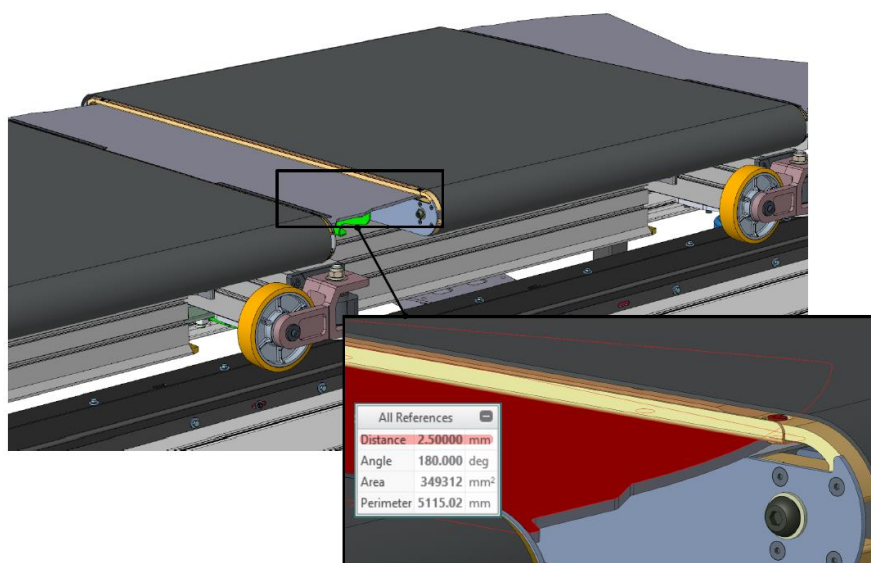


Figura 7.2 Distanza tra telaio e flappa dell'unità di smistamento adiacente, Creo Parametric

Il primo passo da compiere per il raggiungimento degli obiettivi prefissati è l'assegnazione del carico. Il sistema è sottoposto ad una pressione uniforme, dovuta al posizionamento di un bagaglio sul pianale di scorrimento. Secondo i limiti contrattuali, la cella deve essere in grado di supportare un peso massimo di 60 kg e l'area di appoggio sul piano può assumere valori fino a 900x700 mm².

Nonostante il limite di peso per la maggior parte delle compagnie aeree sia di 23 kg (secondo le linee guida di IATA⁸), tutte le prove sono state eseguite attraverso l'imposizione del più grande peso ammissibile (60 kg), sulla base delle

⁸ IATA è l'acronimo di *International Air Transport Association* ed identifica l'associazione internazionale delle compagnie aeree, un organismo che stabilisce standard e norme per garantire un trasporto aereo sicuro ed efficiente (Treccani)

informazioni precedentemente citate. Le attività di analisi sono state ripetute applicando il carico su un'area definita sulla base delle dimensioni standard IATA per i bagagli da stiva.

Di seguito sono riportati i casi di studio presi in considerazione.

Area di applicazione del carico: 680x440 mm²

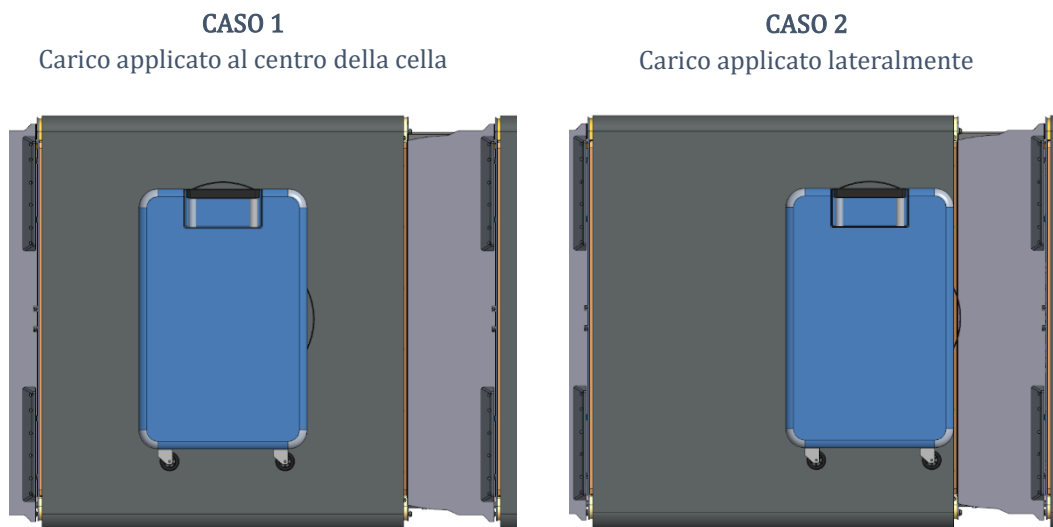


Figura 7.3 Casi di studio per la valutazione della massima deformazione del pianale, Creo Parametric

Le analisi sono state effettuate supponendo sia un posizionamento centrale del bagaglio sia uno laterale. Il primo caso è quello che più frequentemente si verifica nella realtà: i sensori lungo il percorso, infatti, garantiscono un'elevata precisione e coordinano l'azione di caricamento dell'oggetto sulla cella. Il secondo caso, invece, rappresenta la condizione più critica: il bagaglio è collocato in una zona in cui il telaio, al di sotto del pianale, offre meno supporto.

La fase successiva consiste nell'assegnazione degli opportuni vincoli. Al fine di ottenere dei risultati con un buon livello di approssimazione senza appesantire eccessivamente l'analisi dal punto di vista computazionale, i fori per le viti di fissaggio del telaio ai fianchi della cella di smistamento sono rimossi e degli incastri sono applicati direttamente alle superfici. In *Figura 7.4* sono messi in evidenza i vincoli assegnati.

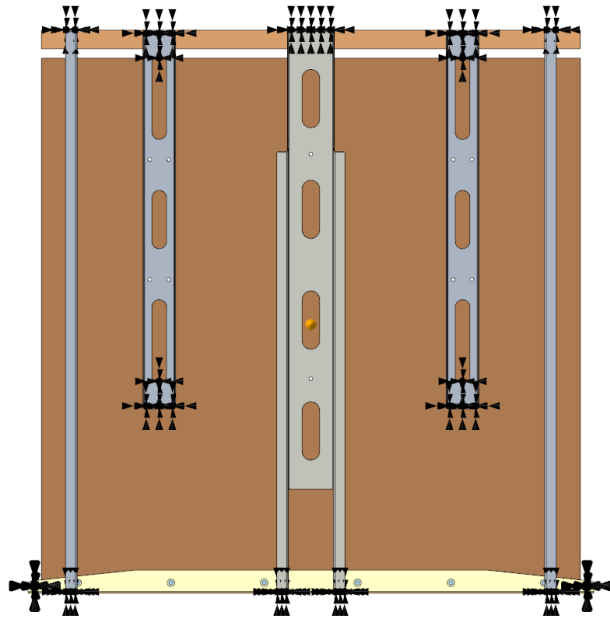


Figura 7.4 Vincoli di incastro imposti per l'analisi FEM, Creo Simulate

Segue l'assegnazione del materiale a ciascuna delle parti dell'assieme. Gli elementi che costituiscono il telaio sono in acciaio FEP02GZ200MA-C, mentre il pianale è stato analizzato sfruttando diversi tipi di materiali citati nel *Capitolo 5*.

Le viti e gli inserti di collegamento del telaio al pianale sono stati sostituiti con modelli estremamente semplificati, per evitare che la meshatura di parti troppo piccole segnalasse dei problemi durante l'avvio delle prove.

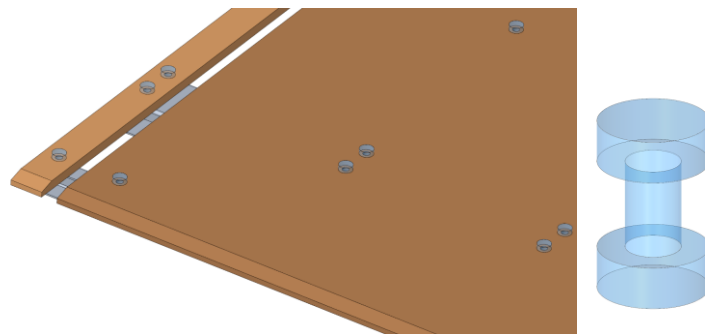


Figura 7.5 Elementi sostitutivi della viteria per la semplificazione dell'analisi FEM, Creo Simulate

Sono stati imposti dei vincoli di contatto tra le parti del telaio ed il pianale, con lo scopo di evitare la compenetrazione degli elementi durante l'analisi. Le superfici dei collegamenti semplificati, invece, sono state saldate alle aree con cui confinano per rappresentare al meglio la finalità della reale viteria. Nell'immagine che segue

le interfacce evidenziate in rosa rappresentano una ‘saldatura’, mentre quelle in giallo identificano un contatto.

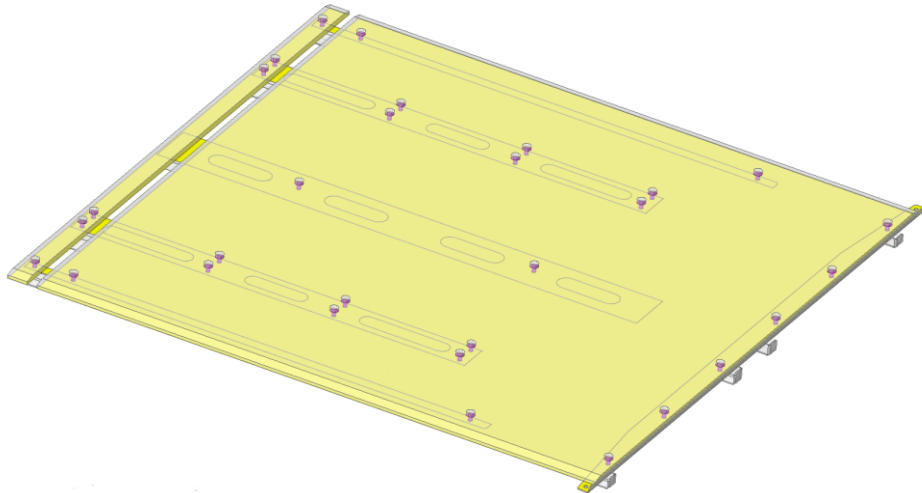


Figura 7.6 Tipologie di interfacce assegnate per l'analisi FEM – in rosa le superfici saldate, in giallo le superfici a contatto, Creo Simulate

Infine, è stata definita la mesh dell'intero assieme. Nello specifico, è stata impostata una lunghezza massima dei lati degli elementi tetraedrici di 12 mm: con questa dimensione limite la discretizzazione avviene in modo omogeneo, senza appesantire le simulazioni con tempi di calcolo eccessivi. In Figura 7.7 è mostrata la meshatura che viene generata dal software in seguito a tale scelta.

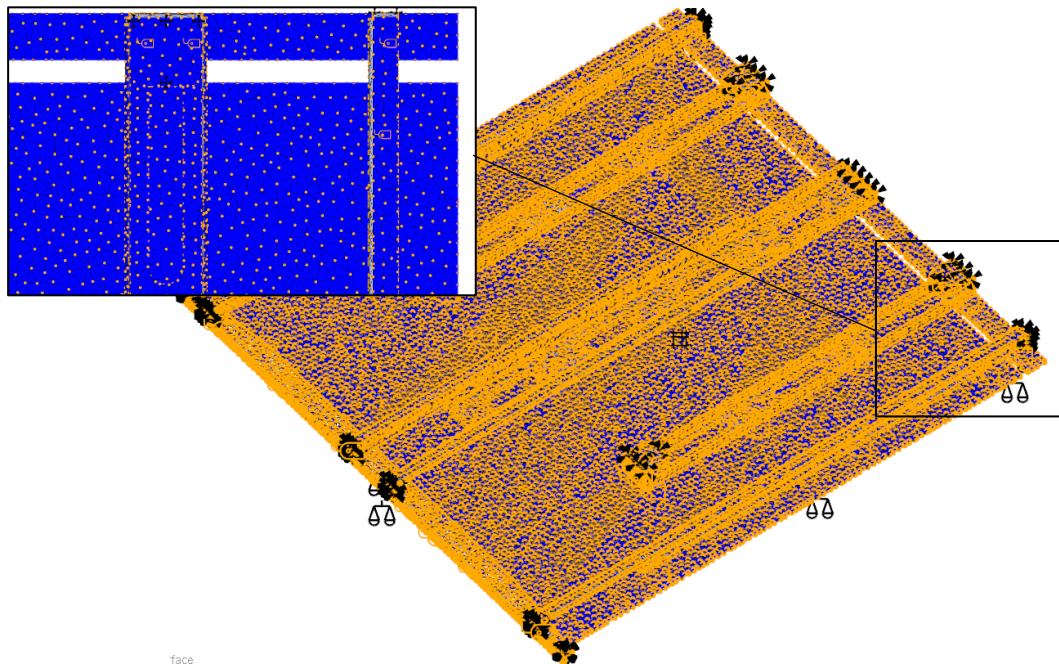


Figura 7.7 Mesh del modello, con una dimensione massima del lato dell'elemento di 12 mm, Creo Simulate

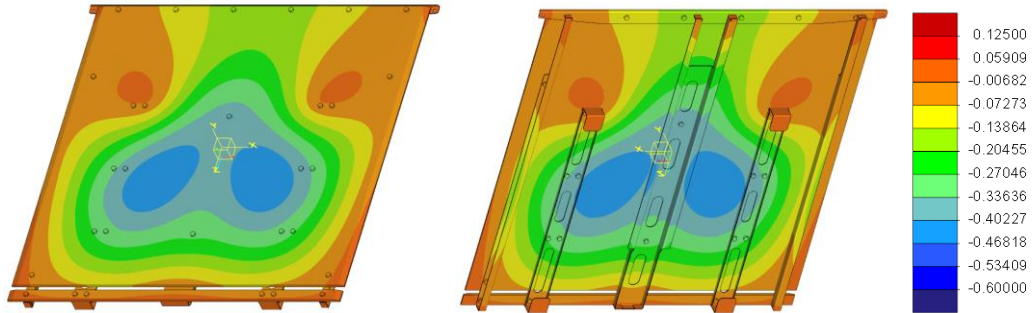
Risultati dell'analisi statica strutturale FEM

In questa sezione vengono presentati e discussi i risultati ottenuti dalle simulazioni, illustrati attraverso mappe a colori della risposta deformativa del sistema. Le immagini che seguono mostrano il comportamento del pianale e del telaio sotto carico, mettendo in evidenza l'entità e la localizzazione degli spostamenti verticali della struttura. Tale visualizzazione permette di apprezzare immediatamente l'efficacia del nuovo materiale e della geometria ottimizzata nel limitare le frecce di inflessione.

Per una corretta interpretazione, le scale cromatiche indicano i valori di spostamento risultanti, espressi in millimetri. Inoltre, per ogni caso di studio preso in considerazione, è stata impostata la stessa scala di colori, garantendo un facile confronto tra gli outputs.

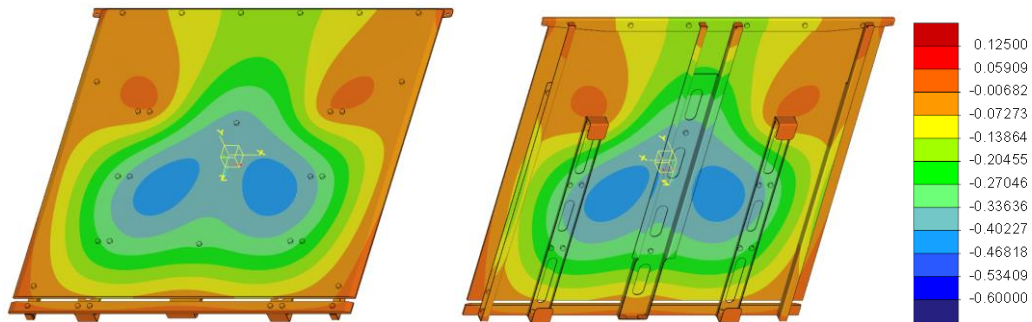
CASO 1

FAGGIO RESINATO



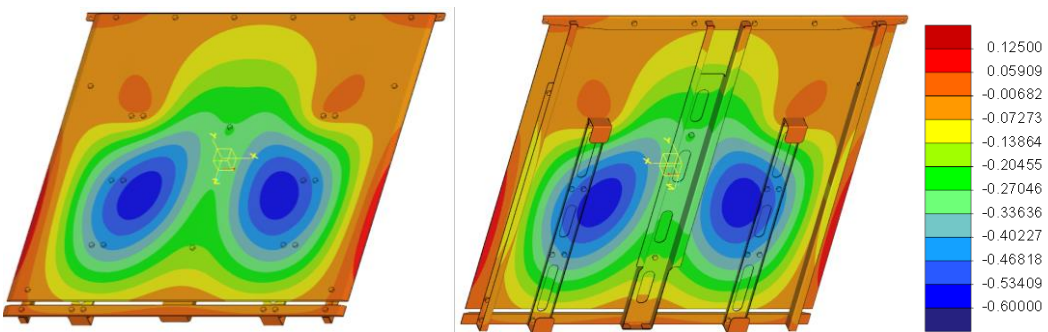
deformazione massima = 0.45 mm

BETULLA (CARPLY RA®)



deformazione massima = 0.43 mm

HPL (N.EXT COMPACT®)

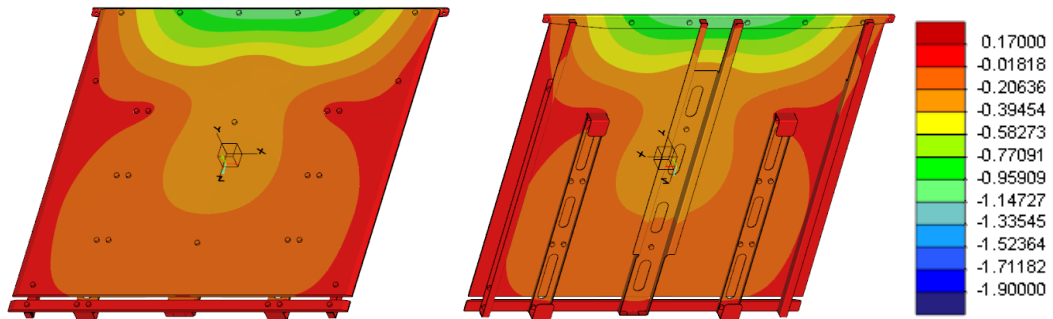


deformazione massima = 0.58 mm

Figura 7.8 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema, CASO 1, Creo Simulate

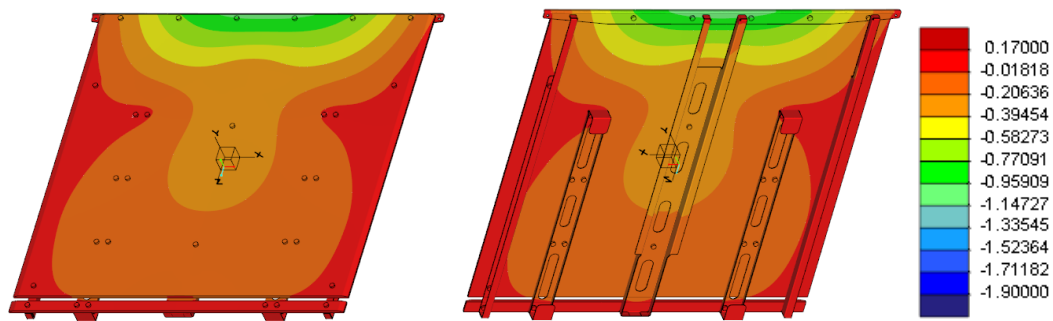
CASO 2

FAGGIO RESINATO



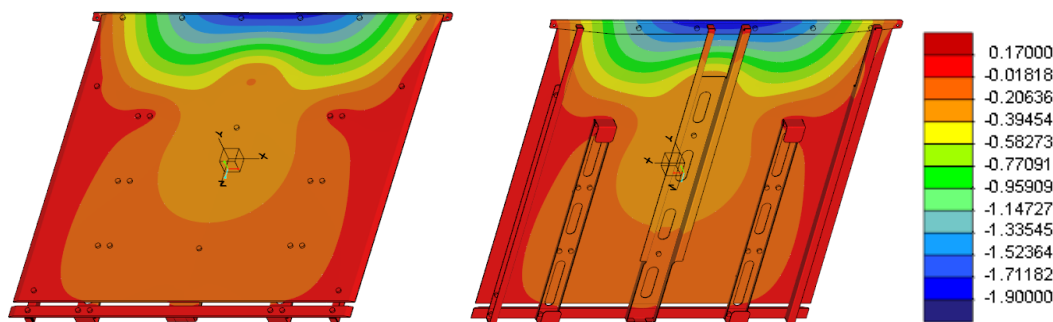
deformazione massima = 1.14 mm

BETULLA (CARPLY RA®)



deformazione massima = 1.05 mm

HPL (N.EXT COMPACT®)



deformazione massima = 1.89 mm

Figura 7.9 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema, CASO 2, Creo Simulate

Dall'analisi dei risultati sono emerse le seguenti considerazioni:

- Il pianale in betulla ha mostrato la deformazione minore. Questo comportamento è riconducibile sia alle ottime proprietà meccaniche del composito, sia al maggior momento di inerzia della sezione dovuto allo spessore di 9 mm.
- Il faggio ha evidenziato una deformazione leggermente superiore al CARPLY RA®. Sebbene il materiale mantenga una buona risposta elastica, la riduzione dello spessore e l'incremento del peso comportano una riduzione della rigidità flessionale che si manifesta con un incremento della freccia massima sotto l'impronta del bagaglio.
- Il pianale il N.EXT COMPACT® è risultato il componente più deformabile, con valori di spostamento sensibilmente più elevati. È opportuno rilevare che tale evidenza non è imputabile esclusivamente alle proprietà intrinseche del materiale (l'elevata densità dell'HPL comporta un incremento notevole del peso del pianale rispetto agli altri due casi sopra citati), ma anche alla scelta geometrica dello spessore di soli 6 mm. Poiché la rigidità di una piastra ha una proporzionalità diretta con il cubo dello spessore, la riduzione del 33% rispetto al CARPLY RA® determina una deformazione molto più pronunciata sotto l'azione della gravità e del carico da 60kg.

In sintesi, i risultati ottenuti dall'analisi strutturale confermano la validità delle soluzioni materiche individuate. Sebbene siano state riscontrate differenze nella massima freccia individuabile, tutti i materiali sottoposti a simulazione hanno mostrato idoneità strutturale pienamente conforme ai requisiti operativi della cella MBHS®.

È fondamentale sottolineare che le simulazioni sono state condotte adottando un approccio cautelativo estremamente rigoroso. Il carico di 60 kg utilizzato per la verifica rappresenta, infatti, una condizione di stress eccezionale: considerando che il peso medio di un bagaglio standard (secondo le statistiche e gli standard IATA) si attesta tra i 15 ed i 20 kg, il valore di prova impiegato risulta essere circa 3.5 volte superiore al carico medio di esercizio.

L'aver superato positivamente l'analisi con un tale margine di sicurezza garantisce che:

- Il sistema sia in grado di gestire senza criticità anche i bagagli “fuori norma” (*Out of Gauge* o *pesanti*);

- Le deformazioni riscontrate si mantengono entro limiti tali da non compromettere l'integrità strutturale del pianale;
- L'affidabilità del sistema di scorrimento sia preservata anche in scenari di sovraccarico imprevisto, assicurando la continuità operativa richiesta dai flussi logistici aeroportuali di *Leonardo*.

Inizializzazione del modello per l'analisi termica FEM

Il pianale di scorrimento della cella deve garantire una planarità quasi perfetta per permettere al nastro di attivarsi e di scaricare il bagaglio con la precisione millimetrica richiesta dal sistema. Le variazioni termiche, dovute all'ambiente aeroportuale, al calore dissipato dai sistemi di azionamento a bordo o all'esposizione prolungata ai raggi solari, possono indurre deformazioni nel materiale del gruppo pianale-telaio. Uno scostamento verso l'alto (buckling) o una torsione della struttura di supporto porterebbero il nastro a sfregare contro le guide fisse o a sollevarsi, compromettendo il coefficiente di attrito richiesto necessario per il suo corretto trascinarsi.

Per validare la selezione dei materiali compositi, è stata condotta anche una verifica numerica di tipo termico basata sulla modellazione con elementi finiti. L'obiettivo è stato quello di simulare la risposta del sistema alle condizioni operative più gravose, valutando l'impatto delle sollecitazioni termiche sulla stabilità strutturale del pianale di scorrimento.

Dunque, lo scenario analizzato simula una condizione di esercizio critica, tipica di ambienti aeroportuali caratterizzati da ampie superfici vetrate o lucernari. Il modello riproduce il pianale ed il relativo telaio racchiuso dal nastro trasportatore e soggetto a:

- irraggiamento solare diretto – un flusso termico è stato applicato solo sulla superficie esterna del nastro. Tale scelta identifica il nastro come il primo elemento di captazione termica del sistema, dal quale il calore si propaga verso l'interno della struttura;
- convezione naturale – il fenomeno di scambio termico con l'aria circostante è stato modellato imponendo una condizione di convezione a tutte le superfici esterne e pareti dei componenti a contatto con l'ambiente. Il modello considera un'aria stagnante in ambiente chiuso, con un coefficiente di scambio termico convettivo di $8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$;
- conduzione termica – il calore assorbito dal nastro viene trasferito per contatto diretto al pianale sottostante. Questo fenomeno è critico, poiché la capacità del materiale del pianale di dissipare o accumulare tale calore determina l'entità delle deformazioni locali. Il trasferimento di calore per conduzione tra nastro, pianale e telaio è gestito automaticamente dal solutore di *Creo Simulate*. Grazie alla definizione delle proprietà termofisiche dei materiali e all'impostazione di interfacce termicamente

connesse, il software ha calcolato il gradiente termico attraverso gli spessori dei componenti, mappando la diffusione del calore per contatto diretto in modo energeticamente congruente.

Per simulare l'evoluzione termica del sistema MBHS® durante l'arco della giornata, è stata impostata una condizione iniziale di equilibrio termico a 20°C, assunta come temperatura di riferimento e di montaggio della cella. Al fine di rappresentare l'effettivo ciclo di riscaldamento diurno all'interno dell'infrastruttura aeroportuale, è stato modellato un incremento lineare di temperatura nell'arco di 4 ore. Il gradiente termico è stato definito in modo da raggiungere, al termine del transitorio, la temperatura ambientale di 45°C, identificata come valore limite di esercizio per il corretto funzionamento operativo della cella. Anche il flusso termico associato all'irraggiamento è stato fatto variare in modo lineare da 300 W/m² a 1000 W/m² nello stesso arco temporale.

È stata eseguita un'analisi termica transiente per la valutazione dell'evoluzione del campo delle temperature nel tempo, attraverso discretizzazione in 40 step temporali. Grazie alle mappe colorimetriche ottenute, è stato possibile monitorare il riscaldamento progressivo dei componenti della cella. Lo studio si è focalizzato sull'individuazione dell'istante temporale critico: il momento in cui le temperature del nastro e/o del pianale raggiungono i valori limite definiti dalle specifiche tecniche dei materiali. Di seguito sono evidenziati i principali parametri ammissibili.

	CARPLY RA e faggio resinato	HPL	Nastro trasportatore (PET con rivestimento in PVC)
Temperatura di esercizio continuo	-40°C/+90°C	-40°C/+140°C	-40°C/+80°C
Resistenza a breve termine	150°C (limite resina)	160°C - 180°C	110°C (rammollimento)

Tabella 7.1 Temperature ammissibili per i materiali selezionati e per il nastro trasportatore della cella aeroportuale [40-46]

La distribuzione di temperatura corrispondente a tale istante critico è stata successivamente esportata ed utilizzata come carico termico per un'analisi strutturale statica. Questo approccio di accoppiamento ha permesso di quantificare

le deformazioni indotte dalla dilatazione termica differenziale. La verifica finale ha avuto lo scopo di accertare che gli eventuali buckling del pianale non compromettano la planarità necessaria al corretto scorrimento del nastro, garantendo così l'efficienza meccanica del sistema di smistamento.

Per l'esecuzione dell'analisi termica transiente, la geometria del sistema è stata semplificata notevolmente: questo per evitare che smussi e raccordi non critici potessero impedire la generazione della mesh o incrementassero notevolmente i tempi di calcolo della prova stessa. Di seguito è riportato il modello utilizzato allo scopo.

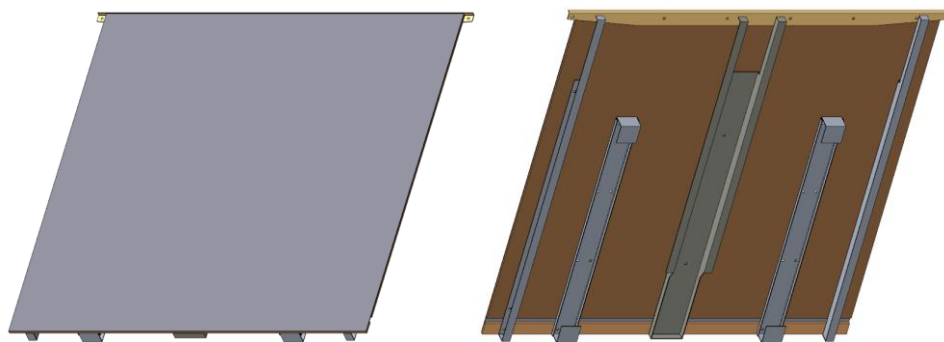


Figura 7.10 Modello sottoposto ad analisi termica FEM, Creo Parametric

Il nastro, in particolar modo, è stato schematizzato come un'entità piana solida dallo spessore di 2 mm. Tale semplificazione cinematica è stata adottata poiché l'obiettivo dell'analisi non risiede nello studio della dinamica di avvolgimento o della flessibilità del nastro, bensì nella valutazione dello scambio termico per conduzione con il pianale.

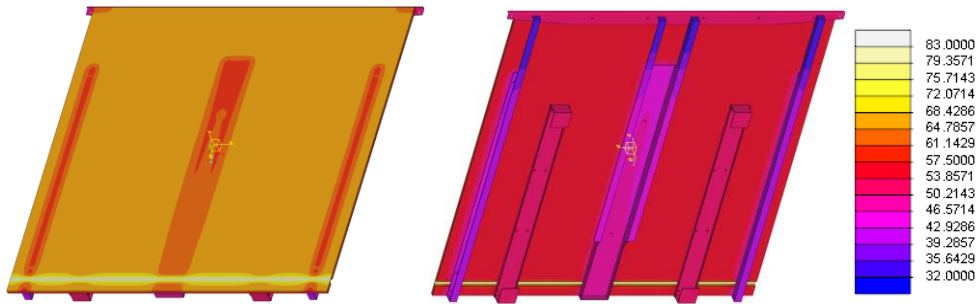
La viteria, invece, è stata sostituita con connessioni ideali 'fasteners' per evitare di appesantire l'analisi.

Per le simulazioni strutturali finali sono state imposte le stesse condizioni di vincolo e di interfaccia usate nelle analisi FEM analizzate precedentemente. Dal punto di vista dei carichi, invece, sono stati presi in considerazione solo la gravità ed il fenomeno di surriscaldamento.

Risultati dell'analisi termica transiente

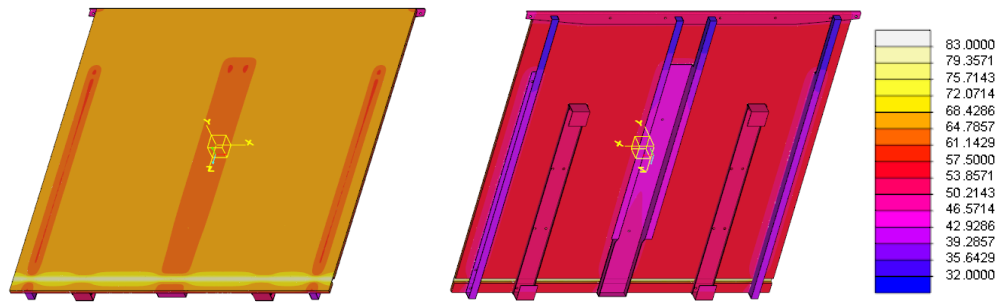
Di seguito sono allegate le mappe termiche dell'istante temporale in cui la superficie del nastro raggiunge, almeno in un punto, la temperatura critica di 80°C.

FAGGIO RESINATO



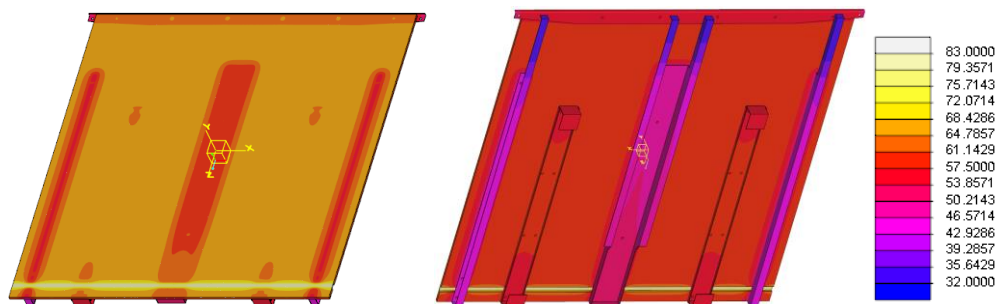
Istante temporale = 86 minuti

BETULLA (CARPLY RA®)



Istante temporale = 86 minuti

HPL (N.EXT COMPACT®)



Istante temporale = 92 minuti

Figura 7.11 Mappe a colori ottenute dall'analisi termica transiente del nuovo modello, nell'istante temporale in cui almeno un punto del nastro raggiunge la temperatura limite di 80°C, Creo Simulate

Le analisi effettuate con i diversi materiali hanno evidenziato risultati comparabili per le soluzioni in legno di faggio resinato e di betulla. Al contrario, la configurazione in HPL ha mostrato un comportamento leggermente diverso. Specificamente, con il laminato ad alta pressione, la soglia degli 80°C viene raggiunta con un ritardo temporale rispetto agli altri due casi.

Sebbene lo spessore del pianale in HPL sia inferiore e la diffusività termica sia comparabile a quelli lignei (vedi *Tabella 7.2*), il ritardo è giustificato dalla maggiore capacità termica del materiale. La quantità di calore Q [J] che il nastro deve trasferire al pianale per innalzarne la temperatura di un intervallo ΔT è definita dalla relazione:

$$Q = mc_p\Delta T = \rho Asc_p\Delta T$$

$$\text{dove} \left\{ \begin{array}{l} \rho \text{ è la densità del pianale } \left[\frac{kg}{m^3} \right] \\ A \text{ è la superficie di scambio termico } [m^2] \\ s \text{ è lo spessore del pianale } [m] \\ c_p \text{ è la capacità termica specifica a pressione costante } [J/(kgK)] \\ \Delta T \text{ è la variazione di temperatura } [K] \end{array} \right.$$

Di seguito è riportata una tabella che indica i valori della capacità termica e della diffusività associata ai pianali esaminati e l'istante, tra i 40 step esaminati, per il quale la condizione critica è raggiunta.

	FAGGIO RESINATO	BETULLA (CARPLY RA®)	HPL (N.EXT COMPACT®)
Densità ρ $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	787.5	755	1350
Area A $[m^2]$	0.8	0.8	0.8
Spessore s $[m]$	0.008	0.009	0.006
Capacità termica specifica a pressione costante c_p $[J/(kgK)]$	1700	1600	1450
Conducibilità termica λ $[W/(mK)]$	0.17	0.17	0.28
Diffusività $\lambda/(\rho c_p)$ $\left[\frac{mm^2}{s} \right]$	0.13	0.14	0.14
Capacità termica ρAsc_p $[J/K]$	8568	8697	9396
Tempo di raggiungimento degli 80°C $[min]$	86	86	92

Tabella 7.2 Caratteristiche termiche dei materiali analizzati per la realizzazione del pianale di scorrimento

Dalle informazioni reperibili dalla tabella è possibile constatare che l'HPL possiede una densità tale da compensare ampiamente il ridotto spessore del pianale. Conseguentemente, quest'ultimo richiede un maggiore assorbimento di energia (e, quindi, più tempo a parità di flusso termico) per incrementare la propria temperatura rispetto ai pianali in legno composito.

Un altro fenomeno rilevante riguarda la distribuzione di temperatura all'interfaccia con le lamiere del telaio. Nello specifico, si osserva che nelle zone in cui il pianale tocca il telaio, la temperatura è inferiore. Questo è strettamente connesso alla legge di Fourier:

$$q'' = -\lambda \nabla T$$

$$\text{dove } \begin{cases} q'' \text{ è il flusso termico [W/m}^2\text{]} \\ \lambda \text{ è la conducibilità termica [W/(mK)]} \\ \nabla T \text{ è il gradiente della temperatura [K/m]} \end{cases}$$

I materiali scelti per la realizzazione del pianale hanno una conducibilità termica molto bassa (vedi *Capitolo 5*), con un comportamento pressoché isolante. Al contrario, l'acciaio del telaio si caratterizza per una conducibilità nettamente superiore ($\lambda = 43.01 \text{ W/(mK)}$).

Quando il calore arriva dal nastro irraggiato e attraversa lo spessore del pianale, incontra l'interfaccia con la lamiera. Grazie alla sua alta conducibilità, la lamiera assorbe il calore del pianale e lo distribuisce rapidamente in tutta la sua massa metallica.

Inoltre, si osserva che nel caso del laminato ad alta pressione (N.EXT COMPACT®) la temperatura della lamiera è più alta rispetto ai casi con pianale in WPC. Questo fenomeno è riconducibile alla minore resistenza termica conduttiva dell'HPL, dovuta sia allo spessore ridotto sia alla conducibilità termica superiore rispetto a quella del legno.

$$R = \text{resistenza termica} = \frac{s}{\lambda}$$

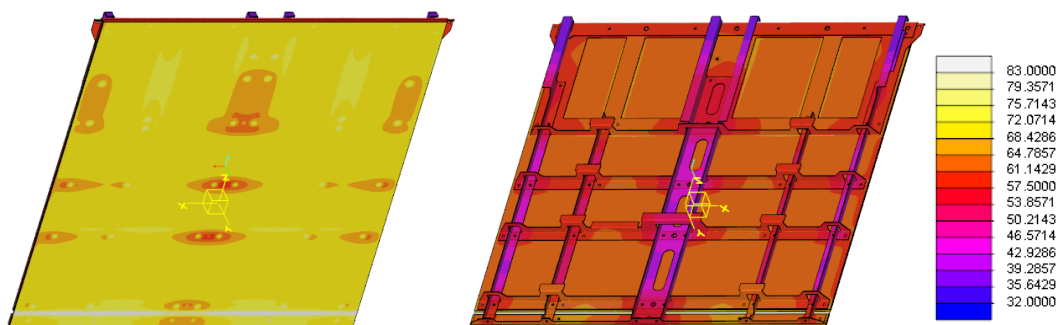
	FAGGIO RESINATO	BETULLA (CARPLY RA®)	HPL (N.EXT COMPACT®)
Resistenza termica [W/(m²K)]	0.047	0.053	0.021

Tabella 7.3 Resistenza termica dei materiali composite alternativi

Una resistenza minore facilita il passaggio del flusso termico dal nastro verso la lamiera attraverso il pianale. Di conseguenza, il telaio sottostante riceve una quantità di calore superiore.

A completamento dell'indagine termica, è stata condotta la stessa analisi transiente anche sul sistema originariamente adottato da *Leonardo S.p.A.* che prevede l'impiego di un pianale in polietilene. È opportuno premettere che tale sistema non si presta ad una comparazione diretta ed immediata con le soluzioni precedentemente analizzate in quanto presenta differenze sostanziali nell'intera architettura del supporto meccanico. Quest'ultimo presenta, infatti, un'estensione superficiale significativamente maggiore, coprendo un'area di contatto molto più vasta rispetto al telaio utilizzato per i nuovi modelli.

Di seguito sono riportate le mappe termiche di interesse.



Istante temporale = 98 minuti

Figura 7.12 Mappa a colori ottenuta dall'analisi termica transiente del modello originario, nell'istante temporale in cui almeno un punto del nastro raggiunge la temperatura limite di 80°C, Creo Simulate

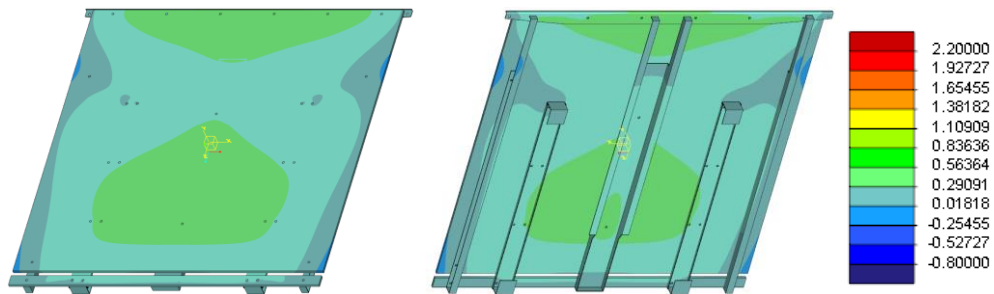
L'analisi ha evidenziato che il raggiungimento della soglia critica degli 80°C del nastro avviene in un tempo maggiore. Tuttavia, tale inerzia non è riconducibile ad una superiore capacità isolante del polietilene, quanto piuttosto all'efficienza del meccanismo di dissipazione verso il basso.

L'ampia area di contatto del telaio in acciaio, unita al ridotto spessore del pianale (6 mm), trasforma la sottostruttura in un potente dissipatore termico. Questo fenomeno trova conferma nel comportamento della lamiera a contatto con il pianale: mentre la superficie del nastro rimane più fredda per un periodo prolungato, la temperatura all'interfaccia tra pianale e telaio subisce un riscaldamento più intenso.

Risultati dell'analisi strutturale con carico termico

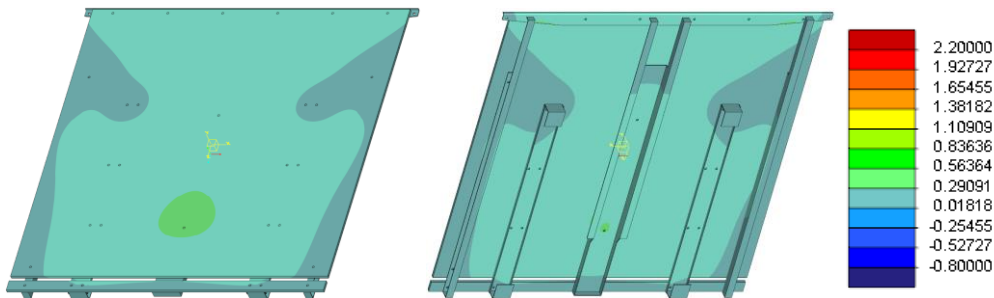
In questa sezione vengono discussi i risultati strutturali ottenuti applicando il carico termico illustrato nel paragrafo precedente, presentati attraverso mappe a colori della deformazione verticale del sistema.

FAGGIO RESINATO



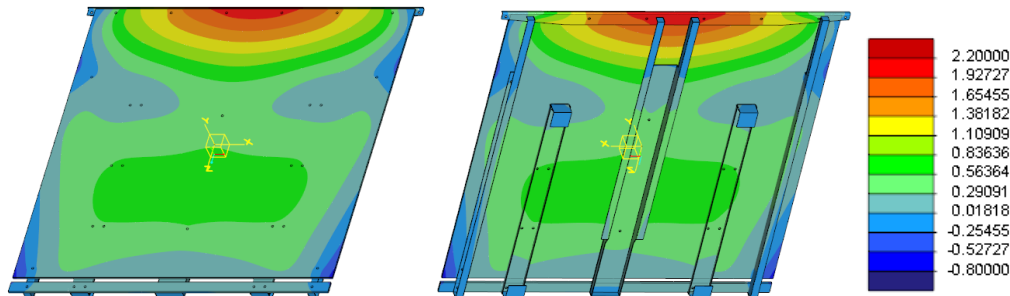
deformazione verticale massima = 0.47 mm

BETULLA (CARPLY RA®)



deformazione verticale massima = 0.30 mm

HPL (N.EXT COMPACT®)



deformazione verticale massima = 2.10 mm

Figura 7.13 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema causata dal carico termico, Creo Simulate

In sede di valutazione finale, i risultati ottenuti confermano la validità delle scelte progettuali effettuate per la cella MBHS®. Le simulazioni condotte, che hanno integrato l'apporto dell'irraggiamento solare diretto e della convezione naturale con un incremento lineare della temperatura ambiente, hanno permesso di mappare il comportamento del sistema in condizioni di estrema criticità.

In linea generale, le deformazioni ottenute per le diverse configurazioni risultano contenute e compatibili con i requisiti funzionali del sistema. Tuttavia, si osserva che il pianale in HPL presenta spostamenti verticali di entità superiore rispetto alle soluzioni in legno composito.

Questa discrepanza è strettamente riconducibile al profilo termico precedentemente analizzato. Come evidenziato nell'analisi termica, infatti, gli elementi del telaio raggiungono temperature medie più elevate che causano una deformazione più grande, trascinando con sé il pianale a cui è vincolato.

In sintesi, i risultati delle prove mostrano che:

- risposta termica nel transitorio – dopo circa 1 ora e 30 minuti di esposizione, il nastro trasportatore raggiunge, in almeno un punto, la temperatura limite di 80°C. In questa medesima istantanea temporale, il pianale di scorrimento si attesta su una temperatura media di circa 62°C;
- stabilità dimensionale – nonostante i suddetti picchi termici, la deformazione del pianale risulta minima. Questo dato è di fondamentale importanza poiché garantisce che, anche nelle condizioni più gravose di irraggiamento, la planarità necessaria per lo scorrimento del nastro non venga compromessa;
- analisi dei margini di sicurezza – la simulazione condotta sotto irraggiamento diretto rappresenta un'estremizzazione rispetto alle reali condizioni di esercizio. Se si considerasse la sola temperatura ambiente limite di 45°C, il sistema raggiungerebbe un equilibrio termico molto più favorevole, con deformazioni ancora più contenute e tensioni interne trascurabili.

Per enfatizzare la maggiore stabilità delle nuove soluzioni proposte, si riportano le mappe delle deformazioni verticali ottenute applicando il carico termico al modello originario.

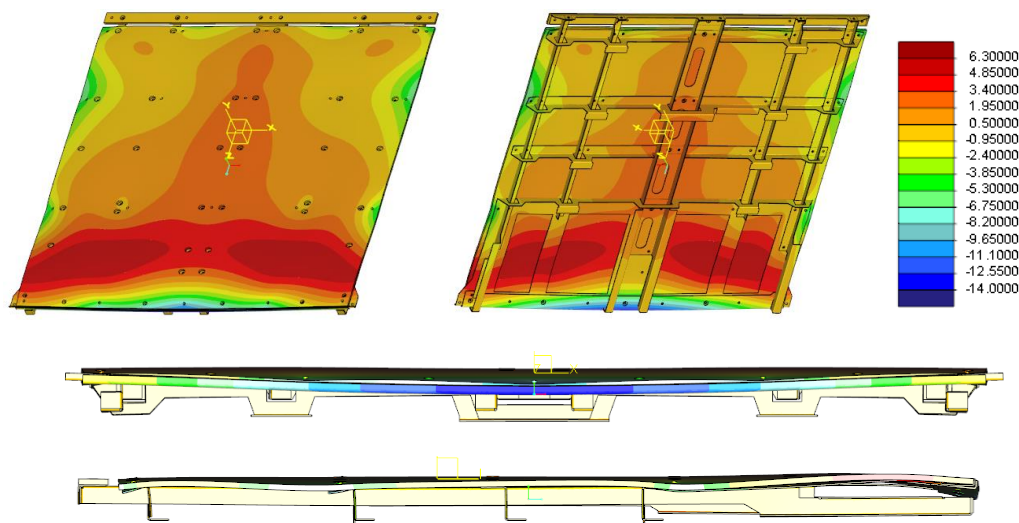


Figura 7.14 Mappe a colori della risposta deformativa del sistema causata dal carico termico sul modello originario, Creo Simulate

Nonostante l'adozione di un telaio di supporto con un'area di contatto maggiorata, scelta progettuale volta a massimizzare la dissipazione termica verso la sottostruttura, i risultati FEM hanno mostrato deformazioni strutturali di notevole entità. Tale fenomeno è riconducibile all'elevato coefficiente di dilatazione termica. Il polietilene, infatti, presenta una sensibilità alle variazioni di temperatura significativamente superiore rispetto ai laminati plastici (HPL) e ai legni compositi.

Il dato più rilevante emerso dalla simulazione riguarda l'impatto di tali deformazioni sull'architettura complessiva della cella di smistamento. Nello specifico, gli spostamenti totali portano il gruppo pianale-lamiera ad una condizione di contatto indesiderato (interferenza) con la flappa sottostante della cella precedente.

Dunque, dai risultati emerge l'elevata instabilità dimensionale del polietilene, che non solo compromette la planarità del piano di scorrimento del nastro, ma genera un'interferenza meccanica che pregiudicherebbe il movimento cinematico del sistema e l'integrità dei componenti limitrofi. Quanto detto è in linea con le considerazioni fatte nel *Capitolo 4.2* riguardante gli aspetti critici del gruppo pianale di scorrimento – sostegno.

8. Validazione del modello CAD tramite assemblaggio dei componenti prototipati

Al fine di garantire l'accuratezza della modellazione con il software *Creo Parametric* e la congruenza con le ipotesi di montaggio formulate nei *Capitolo 6.2* e *Capitolo 6.3*, è stata condotta una fase di validazione sperimentale tramite prototipazione. Tra le soluzioni materiche analizzate per il pianale, l'azienda *Puricelli S.p.A.* ha fornito campionature reali in laminato ad alta pressione (HPL, N.EXT COMPACT®).

Il confronto diretto tra l'assieme digitale ed il prototipo fisico ha permesso di confermare:

- Accoppiamenti meccanici – la corrispondenza tra i fori di fissaggio del telaio metallico e le sedi predisposte sul pianale in HPL è stata convalidata. Questo passaggio attesta la precisione delle quote nominali impostate nel software di progettazione;
- Sequenza di montaggio – la verifica fisica ha confermato l'accessibilità dei punti di serraggio e la correttezza degli step ipotizzati per l'assemblaggio dei componenti, assicurando che non vi siano interferenze non previste tra le parti in movimento (rulli e nastri) e la struttura di sostegno.

Di seguito è riportata la documentazione fotografica dei singoli prototipi e dei componenti assemblati, con lo scopo di dimostrare quanto detto precedentemente.

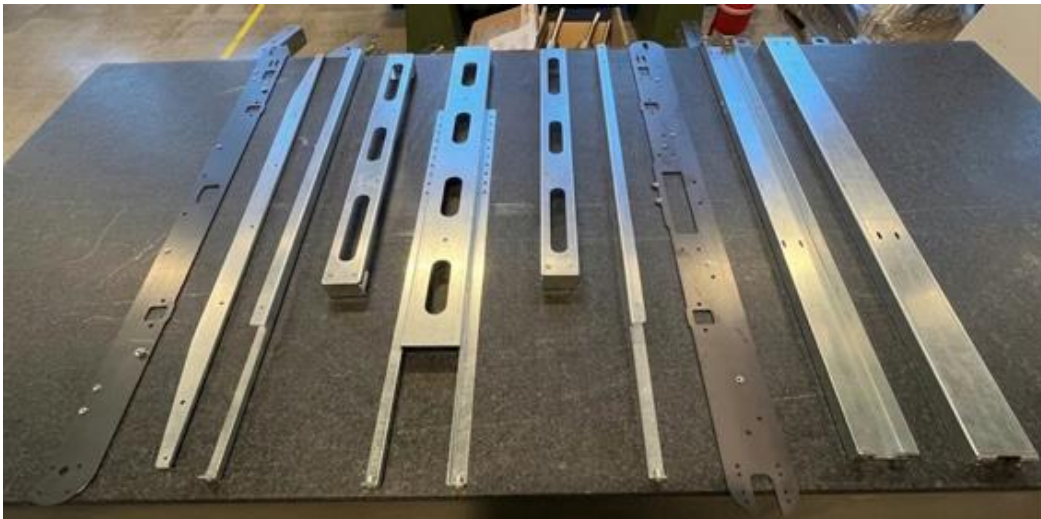


Figura 8.1 Elementi del telaio di supporto del pianale prototipati

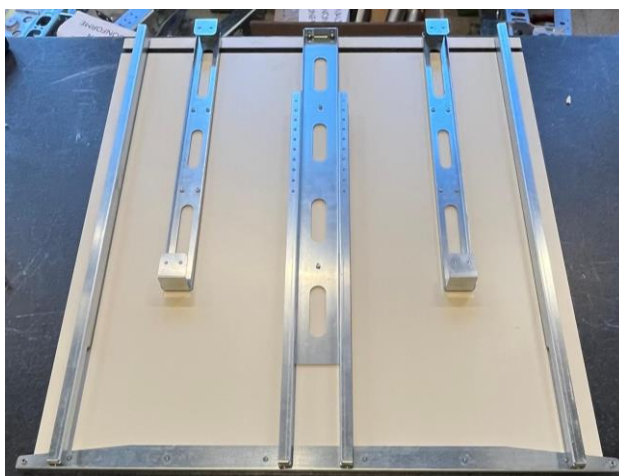


Figura 8.2 Pianale in laminato ad alta pressione (HPL) e corrispondente telaio di sostegno, assemblati a seguito della loro prototipazione, visuale 1

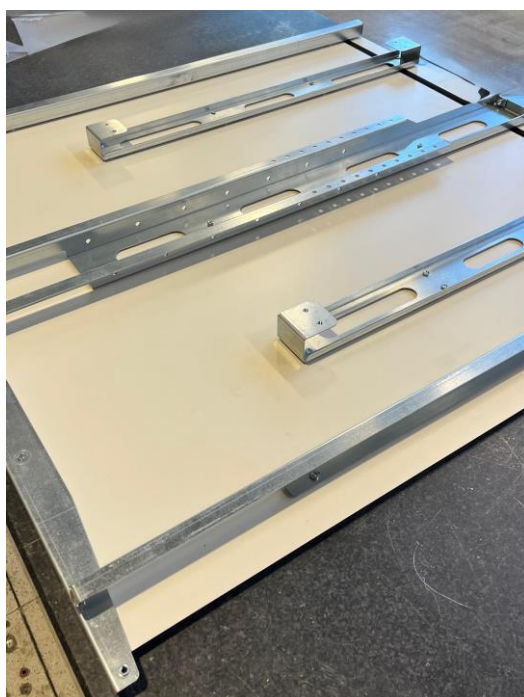


Figura 8.3 Pianale in laminato ad alta pressione (HPL) e corrispondente telaio di sostegno, assemblati a seguito della loro prototipazione, visuale 3



Figura 8.4 Cella di smistamento MBHS con il gruppo pianale-telaio ottimizzato, non dotata di cavi di alimentazione, flappa e nastro, visuale 1



Figura 8.5 Focus sui fianchi rimodellati per assicurare il montaggio del nuovo gruppo pianale-telaio

In fase di prototipazione, i distanziali interposti tra rullo e fianco - concepiti originariamente per una produzione tramite stampaggio ad iniezione - sono stati fabbricati tramite manifattura additiva in ABS (*Figura 8.4*). Tale scelta è stata

dettata dalla necessità di ottimizzare i tempi di sviluppo e contenere i costi associati alla realizzazione di stampi pilota, non giustificabili per una fase di test preliminare. A causa delle limitazioni meccaniche del materiale stampato nel sostenere filettature dirette, è stata mandatoria l'integrazione di inserti metallici (dadi) all'interno della struttura. Questa soluzione ibrida ha garantito la tenuta strutturale richiesta dal sistema.



Figura 8.6 Distanziali interposti tra rulli e fianco realizzati in ABS tramite stampaggio 3D

9. Validazione prestazionale e protocolli di prova

La validazione di un componente critico per l'infrastruttura aeroportuale e la sua successiva industrializzazione richiedono un passaggio rigoroso dalla simulazione numerica alla verifica empirica. Sebbene la fase di modellazione e assemblaggio abbia già confermato la fattibilità tecnica e la riduzione della complessità del sistema, la completa qualifica del prototipo necessita di una serie di campagne prestazionali, volte a garantire la sua piena rispondenza agli standard di sicurezza e continuità operativa.

L'adempimento di questo obiettivo segue un rigoroso iter di qualifica definito dai protocolli interni del gruppo *Leonardo*. È prevista, infatti, una serie di test strutturali, termici e di durata.

Nell'ambito del presente lavoro di tesi, a causa di vincoli temporali legati alla fase di prototipazione, è stato possibile eseguire solo una selezione mirata di tali test. Di seguito vengono illustrati i risultati delle prove effettuate e parallelamente vengono dettagliate le rimanenti fasi del protocollo necessarie per la futura delibera industriale del gruppo pianale-telaio.

TENSIONAMENTO DEL NASTRO e PROVA DI SLITTAMENTO

Il primo step da seguire dopo aver completato l'assemblaggio della cella di smistamento è il suo avvolgimento con il nastro ed il corretto tensionamento di quest'ultimo.

Tale operazione viene effettuata mediante un meccanismo installato sui fianchi dell'unità di smistamento, riportato in *Figura 9.1*. In particolare, agendo sulla rondella evidenziata nell'immagine, è possibile variare la distanza tra l'asse del rullo folle e quello del motore consentendo, così, la regolazione della tensione del nastro.



Figura 9.1 Sistema di tensionamento del nastro montato su uno dei fianchi della cella di smistamento

Durante questa fase risulta fondamentale posizionare correttamente il cingolo saldato sulla faccia inferiore del nastro allo scopo di mantenere il tappeto in guida, garantendone il corretto allineamento durante il funzionamento. Specificamente, l'elemento di centraggio deve essere collocato all'interno del vano ricavato tra le due sezioni del pianale.

Al fine di verificare l'eventuale presenza di slittamenti del nastro, si procede marcando due riferimenti inizialmente coincidenti: uno sul tappeto ed uno sul rullo motore (come indicato dai simboli blu in *Figura 9.2*). Successivamente si posiziona un carico sulla cella e si esegue un ciclo operativo comprendente lo scarico del prodotto ed il riavvolgimento del nastro nella direzione opposta.

Al termine della prova, si verifica la corrispondenza tra i due marker: un loro disallineamento indica la presenza di slittamento. In tal caso, è necessario misurare la distanza tra i riferimenti e valutare se tale valore rientra nei limiti ammissibili definiti dalla normativa aziendale.



Figura 9.2 Illustrazione dei marker da eseguire sul nastro e sul rullo motore per l'esecuzione della prova di slittamento

CICLO CONTINUO DI MOVIMENTAZIONE DEL NASTRO

Con questa prova il nastro montato sulla cella viene movimentato in modo continuo per 7 giorni, 24h/giorno. Lo scopo è approvare che il nastro rimanga in guida in condizioni operative estreme.

Le verifiche descritte finora corrispondono ad attività sperimentali effettivamente eseguite sul campo (per il sistema con pianale in HPL). I risultati ottenuti da questa campagna hanno dato esito ampiamente positivo.

Tuttavia, è doveroso sottolineare che le prove citate nelle seguenti sezioni sono da intendersi come test non ancora svolti.

PROVA TERMICA

Una volta valutato il corretto tensionamento ed il centraggio del nastro, l'intera cella viene inserita in camera climatica. Il test si articola in 2 fasi:

- Riscaldamento (Hot Soak) - si porta la camera a 60°C per un periodo di 24 ore. Qui si osserva se il materiale del pianale subisce bulking o se il nastro si allenta eccessivamente per dilatazione;
- Raffreddamento (Cold Soak) - la temperatura viene ridotta a 5°C per altre 24 ore. In questa fase il rischio è il restringimento del nastro, che aumenta la tensione sui cuscinetti, o la fragilizzazione del pianale.

Le rilevazioni delle deformazioni vengono effettuate in due momenti:

- In tempo reale (Hot/Cold measurement) – le misurazioni vengono eseguite tramite sensori laser interni, quando il componente è al picco termico;
- Post-condizionamento (Set permanente) - dopo aver riportato la cella a temperatura ambiente, la valutazione viene ripetuta nuovamente per vedere se il componente è tornato alla forma originale o se presenta una deformazione residua.

I parametri di valutazione sono:

- Planarità - lo scostamento massimo ammesso dal piano teorico;
- Tensionamento - la variazione della freccia del nastro sotto carico termico;
- Dilatazione laterale del nastro - verifica che la dilatazione non porti il nastro a toccare i fianchi della cella.

VALUTAZIONE DEL COEFFICIENTE D'ATTRITO

Per convalidare le prestazioni energetiche e funzionali dei nuovi materiali, è necessario determinare il coefficiente di attrito che si genera all'interfaccia tra la superficie inferiore del nastro e la faccia superiore del pianale in condizioni di esercizio reali.

L'esecuzione della prova sull'intero assieme prototipale permette di includere nel rilievo variabili sistematiche fondamentali, quali la tensione del nastro e gli attriti propri dei rulli. Il protocollo prevede l'acquisizione della coppia motrice tramite l'inverter del motore in due scenari distinti:

- Misurazione a vuoto (C_{vuoto}) – si misura la potenza necessaria per eseguire un ciclo di scarico a vuoto (senza alcun carico appoggiato). Questo valore rappresenta la base-line degli attriti interni meccanici del sistema.
- Misurazione a carico concentrato (C_{carico}) – si posiziona sul nastro una 'valigia tipo' dal peso calibrato e si ripete la stessa valutazione nelle medesime condizioni della misurazione a vuoto.

La variazione di coppia registrata dall'inverter permette di risalire alla forza di attrito tangenziale (F_a) e, conseguentemente, al coefficiente di attrito μ . I passaggi analitici sono i seguenti:

1. Determinazione della coppia di attrito netta:

$$C_{attrito} = C_{carico} - C_{vuoto} [Nm]$$

2. Calcolo della forza tangenziale di attrito nastro-pianale

$$F_a = \frac{C_{attrito}}{R} \eta$$

$$\text{dove } \begin{cases} \eta \text{ è il rendimento della trasmissione meccanica [-]} \\ R \text{ è il raggio del rullo motore [m]} \end{cases}$$

3. Calcolo del coefficiente di attrito sperimentale

$$\mu = \frac{F_a}{Mg}$$

$$\text{dove } \begin{cases} M \text{ è la massa del carico [kg]} \\ g \text{ è l'accelerazione di gravità [m/s}^2\text{]} \end{cases}$$

I risultati ottenuti per i materiali compositi alternativi verranno confrontati direttamente con quello del sistema originario (pianale in polietilene), misurato nelle stesse condizioni operative. Ciò permetterà di quantificare l'eventuale variazione della coppia resistente introdotta dalla nuova configurazione.

In secondo luogo, i risultati dovranno essere validati rispetto ai parametri di riferimento ed alle soglie di tolleranza stabiliti dalle procedure interne di *Leonardo*. Tale confronto è fondamentale per garantire che l'assorbimento di potenza non introduca surriscaldamenti anomali o usure precoci delle superfici di scorrimento.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha affrontato la sfida della riprogettazione strutturale e funzionale della cella di smistamento MBHS®. L'obiettivo centrale è stato il superamento dei limiti intrinseci del sistema originario con pianale di scorrimento in PE, materiale che, pur essendo economico, manifesta criticità significative in termini di stabilità termica e rigidità meccanica sotto carico.

L'intera attività di ricerca si è sviluppata seguendo un approccio metodologico rigoroso che ha integrato la scienza dei materiali, la modellazione numerica avanzata ed il Design-to-Cost. I risultati ottenuti possono essere riassunti nei punti chiave descritti di seguito.

Riprogettazione CAD e ottimizzazione del design

Un passaggio fondamentale dell'attività è stata la completa reingegnerizzazione dell'insieme pianale-telaio della cella smistatrice aeroportuale, eseguita attraverso il software *Creo Parametric*. L'utilizzo di questo strumento di modellazione solida avanzata ha permesso di rimodellare da zero la struttura di supporto, sfruttando le superiori proprietà meccaniche dei materiali selezionati (HPL e compositi legnosi). È stato così possibile snellire il telaio eliminando rinforzi superflui e riducendo il numero di componenti, gettando le basi per una struttura più leggera, modulare e facile da assemblare.

Validazione termomeccanica tramite modellazione numerica FEM

Sulla geometria ottimizzata in *Creo* sono state condotte approfondite analisi agli elementi finiti (FEM) per validare il comportamento dei nuovi materiali.

- Dal punto di vista strutturale, le simulazioni hanno confermato che le ottime proprietà meccaniche dei nuovi pianali garantiscono l'assenza di interferenze con la flappa di scorrimento, garantendo planarità anche in condizioni di massimo carico;
- Dal punto di vista termico, le analisi comparative condotte rispetto al modello originario hanno evidenziato una netta superiorità. Mentre il polietilene mostra un rapido decadimento delle sue caratteristiche geometriche già a temperature moderate, i materiali compositi proposti mantengono una stabilità dimensionale che riduce drasticamente i rischi di imbarcamento e deformazione, garantendo una maggiore affidabilità operativa.

Sostenibilità economica e Design-to-Cost

L'analisi ha dimostrato che l'impiego di materiali performati non comporta necessariamente un aumento del costo finale del prodotto, se accompagnato da una corretta semplificazione strutturale. La riduzione della complessità del telaio ha portato, infatti, ad un abbattimento dei costi di carpenteria. Questo fa sì che la soluzione con pianale in WPC sia di gran lunga più economica dello standard, mentre quella con piano in HPL raggiunge un costo complessivo quasi comparabile al polietilene offrendo, però, prestazioni nettamente superiori.

In un'ottica di rigorosa ingegnerizzazione del prodotto, la tesi ha delineato dei protocolli necessari per la transizione dal modello numerico alla produzione in serie.

Per la configurazione con pianale in HPL è già stata avviata una prima fase di validazione fisica sul prototipo. Sono state eseguite, con successo, prove di slittamento e di movimentazione continua per monitorare la dinamica del sistema; tali test hanno confermato che l'interazione tra il nastro ed il nuovo pianale non altera il corretto centraggio del cingolo, scongiurando il rischio che il nastro vada fuori guida. Per completare la validazione, restano da eseguire i test di attrito tramite inverter e le prove in camera climatica.

Per i sistemi in legno composito (Faggio resinato e CARPLY RA®) non è ancora disponibile un prototipo fisico. Conseguentemente, per tali modelli la convalida si basa attualmente sulle sole analisi FEM. Risulta, quindi, indispensabile la realizzazione di campioni e l'esecuzione dell'intero pacchetto di prove come sviluppo futuro per confermare, 'sul campo', le eccellenti performance teoriche e la fattibilità del nuovo design semplificato del telaio.

Referenze

- [1] Sito Leonardo S.p.A., <https://www.leonardo.com/it/about/profile>
- [2] “*Leonardo at a glance*”, Novembre 2025, Leonardo S.p.A., Brochure reperibile sul sito <https://www.leonardo.com/it/about/profile>
- [3] “*A legacy leading to the future*”, Brochure 70esimo anniversario dell’azienda Leonardo S.p.A., Leonardo S.p.A, 2018
- [4] Sito Leonardo S.p.A., <https://www.leonardo.com/it/about/history/1960-1986>
- [5] Sito Leonardo S.p.A., <https://www.leonardo.com/it/about/history/1987-2002>
- [6] Sito Leonardo S.p.A., <https://www.leonardo.com/it/about/history/2018-2023>
- [7] “Baggage handling solutions”, Brochure from Leonardo Automation, 2025
- [8] Sito Leonardo S.p.A., <https://automation.leonardocompany.com/en/parcel-handling>
- [9] “Leonardo Automation Company Overview”, Brochure from Leonardo Automation, 2025
- [10] Amazon,
<https://assets.aboutamazon.com/2e/d7/ac71f1f344c39f8949f48fc89e71/amazon-logo-squid-ink-smile-orange.png>
- [11] anpost, <https://www.anpost.com/getapmedia/185a235d-2459-493c-b9aa-d800927e4674/An-Post-logo.jpg>
- [12] bpost, <https://www.bpost.be/sites/default/files/logo/bpost-logo-group.png>
- [13] Canada Post,
<https://www.canadapost-postescanada.ca/cpc/en/mercury/style/logo.page>
- [14] Chronopost, <https://www.chronopost.fr/en>
- [15] DHL, <https://www.dhl.com/it-it/home/cerca.html?q=Logo>
- [16] Helta, <https://www.elta.gr/en/>
- [17] SDA, <https://www.sda.it/wps/portal/sdait.home/>

- [18] Posteitaliane, <https://www.posteitaliane.it>
- [19] TGW Group, <https://www.tgw-group.com/it/azienda/brand-story/>
- [20] ADR, <https://www.adr.it/restyling-logo>
- [21] Hong Kong Airport, <https://www.hongkongairport.com>
- [22] Lyon Aéroport, <https://www.lyonaeroports.com/en>
- [23] Genève Aéroport, <https://www.gva.ch/fr/>
- [24] Bengaluru International Airport, <https://www.bengaluruairport.com>
- [25] London City Airport, <https://www.londoncityairport.com/media-centre/media-library/brand/logos>
- [26] Milan Bergamo Airport, <https://www.milanbergamoairport.it/it/>
- [27] Frankfurt Airport, <https://www.frankfurt-airport.com/en.html>
- [28] Aeroporto di Palermo, <https://www.aeroporto dipalermo.it>
- [29] Aeroporto di Brescia, https://www.aeroportobrescia.it/it_it/
- [30] Civil Aviation Kuwait, <https://www.dgca.gov.kw>
- [31] Euro Airport, <https://www.euroairport.com/en>
- [32] Paris Aéroport, <https://www.parisaeroport.fr/en>
- [33] Aeroporto di Catania, <https://www.aeroporto.catania.it>
- [34] Aena, <https://www.aena.es/en/passengers/passengers.html>
- [35] Flughafen Zurich, <https://www.flughafen-zuerich.ch/en/passengers>
- [36] “MBHS[®] Cross-belt Sorter”, Brochure from Leonardo Automation, Maggio 2025
- [37] “HabiPLAST[®], guide per catene a rulli e per cinghie, profili estrusi e accessori”, Brochure from Habasit, Products No. 4097
- [38] IPCC, Special Report on Global Warming of 1.5°C, 2018
- [39] SBTi, Foundations for Science-Based Net-Zero Target Setting, 2020

- [40] Scheda tecnica del materiale CARPLY RA[®], Bellotti S.p.A., https://bellottispa.com/wp-content/uploads/pdf/schede-tecniche/TDS-CARPLY-RA_R08_IT.pdf
- [41] Scheda tecnica del compensato di faggio resinato, Bellotti S.p.A., https://bellottispa.com/wp-content/uploads/pdf/schede-tecniche/TDS-C-Faggio-Resinato_R03_IT.pdf
- [42] Scheda tecnica del materiale N.EXT COMPACT[®], di Bellotti S.p.A., [N-EXT COMPACT_Eng_Rev0.pdf](#)
- [43] Habasit AG, Technical Guide: Conveyor and Processing Belts – Physical Properties and Chemical Resistance of Polyethylene and PET Belts. Disponibile su www.habasit.com
- [44] UNI EN 45545-2: Applicazioni ferroviarie - Protezione al fuoco sui veicoli ferroviari - Parte 2: Requisiti per il comportamento al fuoco di materiali e componenti (Requirement Set R10, Hazard Level HL2)
- [45] UNI EN 13501-1: Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione - Parte 1: Classificazione in base ai risultati delle prove di reazione al fuoco (Classe B-s1, d0)
- [46] UNI EN 438-2: Laminati decorativi ad alta pressione (HPL) - Parte 2: Determinazione delle proprietà (Resistenza al calore secco e stabilità dimensionale).