



UNIVERSITÀ  
DI PAVIA

## DIPARTIMENTO DI SCIENZE DEL FARMACO

Direttore Chiar.ma Prof.ssa Simona Collina

### **LAUREA MAGISTRALE A CICLO UNICO IN CHIMICA E TECNOLOGIA FARMACEUTICHE**

***PLASTICA VERGINE O RICICLATA? STUDIO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE  
E FISICHE DEL PACKAGING COSMETICO***

Relatore:

Prof.ssa Paola Perugini

Tesi di Laurea Magistrale a Ciclo Unico di  
*Simone Fianza*

Anno Accademico 2024/2025

## INDICE

1	INTRODUZIONE.....	2
1.1	PACKAGING .....	2
1.1.1	CHE COS'É?.....	2
1.1.2	MATERIALI DI CONFEZIONAMENTO .....	5
1.1.2.1	METALLI.....	5
1.1.2.2	PLASTICHE.....	7
1.1.2.3	VETRO.....	16
1.1.2.4	CARTA .....	17
1.1.2.5	LEGNO.....	19
1.1.2.6	POLIACCOPPIATI.....	20
1.2	RICICLO .....	22
1.3	TRASPORTO .....	27
1.3.1	MODALITÀ DI TRASPORTO .....	27
1.3.2	UNITÀ DI CARICO / CONTAINER.....	31
2	SCOPO .....	32
3	MATERIALI.....	33
4	METODI.....	34
4.1	ANALISI SOTTOVUOTO SECONDO NORMA ASTM D5094.....	34
4.2	VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE ALLA RADIAZIONE SOLARE SECONDO LA NORMA ISO 4892-2.....	39
4.3	VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA TRAZIONE SECONDO NORMA ASTM D638 .....	42
4.4	IDENTIFICAZIONE DEI POLIMERI MEDIANTE NIR.....	49
4.5	TEST DI COMPRESSIONE .....	55
5	RISULTATI.....	60
5.1	RISULTATI METODO 4.1 .....	60
5.2	RISULTATI METODO 4.2 .....	63
5.3	RISULTATI METODO 4.3 .....	65
5.4	RISULTATI METODO 4.4 .....	74
5.5	RISULTATI METODO 4.5 .....	98
5.6	DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	107
6	CONCLUSIONI .....	110
7	RIFERIMENTI.....	112

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 PACKAGING

### 1.1.1 CHE COS'É?

Il termine *packaging* indica qualsiasi tipo di imballaggio, indipendentemente dal materiale di cui è costituito, progettato per contenere, proteggere e preservare le merci, dalle materie prime ai prodotti finiti. La sua funzione principale è facilitare la manipolazione, il trasporto e la distribuzione lungo l'intera catena logistica, dal produttore fino al consumatore, contribuendo al contempo alla presentazione e alla valorizzazione del prodotto [1].

Il packaging svolge un ruolo centrale all'interno della filiera logistica e commerciale. Offre diverse funzioni, tra cui:

- **Contenimento:** La funzione primaria dell'imballaggio è quella di contenere il prodotto. Serve a garantire integrità e ordine durante tutte le fasi della distribuzione.
- **Protezione:** assicura la protezione del contenuto da fattori esterni e interni, contribuendo a preservare la qualità e allungarne lo *shelf-life*. Le forme di protezione includono:
  - Barriera contro agenti chimico-fisici come calore, luce, gas e umidità;
  - Protezione meccanica e climatica durante le operazioni di trasporto e stoccaggio;
  - Chiusura ermetica per evitare fuoriuscite del contenuto nell'ambiente, e contaminazioni.
- **Trasporto:** Il packaging consente di trasformare i prodotti in unità idonee al trasporto. Gli imballaggi vengono progettati considerando peso e volume. I singoli imballaggi vengono successivamente raggruppati in lotti progressivamente più grandi, agevolando così la movimentazione meccanica e ottimizzando lo spazio.

- Servizio: deve rispondere alle esigenze del consumatore, adattarsi ai diversi stili di vita. Esistono varie soluzioni pratiche come sistemi di apertura facilitata, confezioni richiudibili, dosatori e porzionature.
- Comunicazione: oltre alla funzione commerciale e promozionale, fornisce anche informazioni essenziali quali, composizione, quantità, origine, data di scadenza, istruzioni per l'uso e modalità di conservazione. Per mezzo di codice a barre, QR code ed altri strumenti digitali, rappresenta uno strumento chiave per la tracciabilità [2].

Esistono diverse tipologie di confezionamento, ciascuna con funzioni specifiche e ben definite. In generale, si possono suddividere in tre categorie principali:

1. Confezionamento primario: è la forma di confezionamento a contatto diretto con il prodotto. Offre una prima barriera protettiva contro agenti esterni come luce, gas e umidità, che potrebbero compromettere la stabilità e la qualità del contenuto.  
I materiali comunemente impiegati sono vetro, plastica, metalli (come l'alluminio) e materiali compositi. Questi materiali devono garantire adeguate proprietà barriera, essere chimicamente inerti e compatibili con il prodotto, al fine di evitare contaminazioni e assicurare la conservazione ottimale nel tempo. È essenziale, inoltre, che siano conformi ai requisiti specifici del prodotto confezionato. Nel settore cosmetico, il packaging primario assume forme e dimensioni molto varie: tubetti cilindrici per lucidalabbra, barattoli compatti di forma quadrata per creme, flaconi a pompa per lozioni, fino a stick per deodoranti e profumi solidi [3].
2. Confezionamento secondario: rappresenta lo strato esterno che avvolge il confezionamento primario. Pur non essendo in contatto

diretto con il prodotto, offre una protezione supplementare durante le fasi di manipolazione, trasporto e stoccaggio. Preserva l'integrità strutturale dei contenitori primari, previene la contaminazione e mantiene la qualità del prodotto durante tutto il ciclo di vita. Cartone, cartone ondulato e varie tipologie di plastica, sono i materiali più spesso utilizzati, grazie alle loro caratteristiche di resistenza, flessibilità e stampabilità. Per garantire una maggior sicurezza al prodotto, possono essere aggiunti materiali di imbottitura, guarnizioni ed etichette, contribuendo alla protezione del prodotto e il rispetto delle normative. In ambito cosmetico, la forma e la dimensione del packaging secondario sono elementi essenziali anche per motivi commerciali, poiché influenzano l'appeal del marchio e la visibilità del prodotto. In genere, si utilizzano scatole rettangolari per i flaconi di profumo, scatole quadrate per creme e sieri, e tubi cilindrici per il mascara [3].

3. Confezionamento terziario: raggruppa più unità di imballaggio primario o secondario per facilitare il trasporto e la distribuzione di prodotti sfusi. Fornisce ulteriore protezione contro agenti esterni e urti durante il trasporto. Generalmente, i materiali utilizzati per l'imballaggio terziario sono robusti ed economici, privilegiando l'efficienza e la sostenibilità lungo la catena di approvvigionamento. Pallet, pellicola estensibile, pellicola termoretraibile, contenitori in cartone ondulato e contenitori riutilizzabili per la spedizione sono i materiali più impiegati [3].

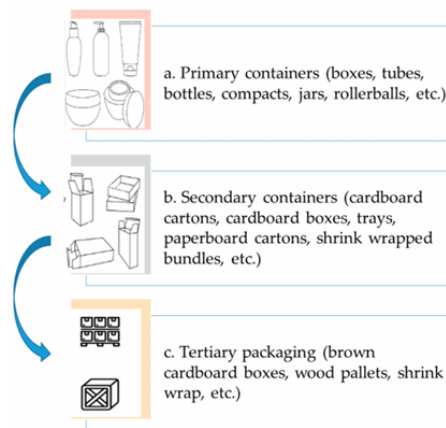


Figura 1: Packaging primario, secondario e terziario [3]

## 1.1.2 MATERIALI DI CONFEZIONAMENTO

I materiali più comunemente impiegati per la produzione di packaging e imballaggi sono: metalli, plastiche, carta, legno e vetro.

### 1.1.2.1 METALLI

Gli imballaggi in metallo offrono una buona protezione contro luce, gas e umidità. Sono riciclabili, facilmente modellabili in diverse forme, resistenti a temperature elevate durante il riscaldamento. Presentano una struttura rigida, sono adatti per il trasporto su lunghe distanze e offrono possibilità di decorazione uniche [4]. Tra i più impiegati vi sono:

- L'acciaio: è una lega di ferro con una percentuale di carbonio non superiore al 2,11%. Gli acciai sono identificati con una sigla internazionale AISI (American Iron and Steel Institute), seguita da un numero che descrive la loro composizione chimica [5]. Esistono due principali tipologie di acciaio:
  - ≥ Banda stagnata: conosciuta anche come latta, rappresenta il 90% della produzione. È un acciaio con basso contenuto di carbonio, ottenuto immergendo fogli di acciaio in stagno fuso o utilizzando un processo di elettrodeposizione. Questa tipologia è resistente alla corrosione e svolge funzione di

barriera contro gas, umidità, luce e odori. Viene spesso utilizzato per il confezionamento di prodotti alimentari [6], ma anche per contenere pitture, vernici, smalti, oli, fusti e bombolette aerosol [1].

- ≥ Acciaio senza stagno: conosciuto anche come acciaio rivestito di cromo elettrolitico o ossido di cromo, necessita di un rivestimento organico per garantire una protezione completa contro la corrosione. Sebbene il rivestimento di cromo renda l'acciaio difficile da saldare, lo rende ideale per aderire a vernici, lacche e inchiostri. Come la banda stagnata, l'acciaio senza stagno è facile da lavorare e resistente. Viene impiegato nella produzione di lattine per alimenti, barattoli, vassoi, tappi di bottiglia e chiusure. È anche utilizzato nella realizzazione di contenitori di grandi dimensioni, come fusti, per la vendita e lo stoccaggio di ingredienti o prodotti finiti [6].
- ≥ Alluminio: è un metallo leggero, malleabile, resistente agli urti e alla corrosione, il che lo rende ideale per il confezionamento. L'alluminio possiede eccellenti proprietà di barriera contro luce, aria, umidità e batteri. È un materiale atossico ed ecologico, poiché è completamente riciclabile. Viene utilizzato in moltissimi settori, quali gli imballaggi, l'industria, l'edilizia, il settore aerospaziale e nella realizzazione di componenti elettronici. A seconda delle varie applicazioni, l'alluminio può essere combinato con altri materiali, per esempio rame, zinco, manganese, stagno e silicio. Esistono diverse leghe e sono classificate in quattro gruppi: la serie 1000, composta al 99,5% da alluminio, è utilizzata per la produzione di bombolette e tubetti; la serie 3000, legata al manganese, comunemente utilizzata per la

realizzazione di lattine per bevande e vaschette alimentari; la serie 5000, con magnesio, impiegata per le linguette a strappo; la serie 8000, contenente ferro, per la produzione di fogli sottili [7]. Nel settore cosmetico, i tubetti in alluminio sono ideali per creme e lozioni, mentre i flaconi in alluminio sono spesso impiegati per shampoo e balsami [3].

### 1.1.2.2 PLASTICHE

Le materie plastiche sono spesso utilizzate nella produzione di bottiglie e film, grazie alle loro caratteristiche che le rendono adatte alle varie tipologie di imballaggi. Tra le principali proprietà troviamo: leggerezza, praticità ed economicità, morbidezza, capacità di termosaldatura e un buon rapporto resistenza/peso. Anche nel settore cosmetico, la plastica trova ampio impiego sia per imballaggi rigidi che flessibili [3]. I polimeri possono essere utilizzati singolarmente, oppure combinati con altri materiali, formando i poliaccoppiati; tra i principali si annoverano:

- Polietilene (PE)

Il polietilene è un polimero termoplastico, formato da lunghe catene di atomi di carbonio legati tra loro per mezzo di legami covalenti, ognuno dei quali è associato a due atomi di idrogeno. La formula chimica è  $C_2H_4$ .

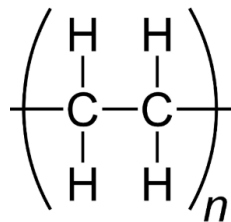


Figura 2: struttura generale di PE [8]

Il polietilene è caratterizzato da una elevata resistenza meccanica e buona flessibilità, può essere facilmente estruso oppure stampato. La sua struttura generale può essere modificata introducendo ramificazioni, reticolazioni o differenti gruppi terminali [9]. Per

mezzo di queste modificazioni, si ottengono numerose tipologie di polietilene:

≥ Polietilene ad alta densità (HDPE)

Il polietilene ad alta densità rappresenta il terzo materiale plastico più prodotto al mondo, dopo polipropilene e polivinilcloruro [10]. È la forma di polietilene più resistente, e presenta una buona resistenza alla trazione e alla compressione, ed un'eccellente resistenza agli urti. È facilmente lavorabile. Le sue proprietà rimangono invariate anche a basse temperature. Il polietilene ad alta densità si distingue per la sua bassa permeabilità e ridotto assorbimento dell'umidità, di conseguenza, trova impiego in applicazioni dove sono previste immersioni sia in acqua dolce sia salata [11]. La sostanziale differenza tra il polietilene ad alta densità (HDPE) e quello a bassa densità (LDPE), è il grado di ramificazione di ramificazione della struttura molecolare. L'HDPE presenta una struttura lineare, con poche o nessuna ramificazione. Inoltre, il grado di cristallinità di quest'ultimo è maggiore rispetto a quello del LDPE [10], di conseguenza è soggetto a maggiori deformazioni. È la tipologia di polietilene maggiormente utilizzata e trova applicazioni in molteplici settori. Tra i principali vi sono il settore alimentare dove viene utilizzato per realizzare sacchetti, barattoli e bottiglie; nel settore della comunicazione, per la produzione di cavi ottici; nel settore automobilistico per i serbatoi, giocattoli, tubi ed articoli per la casa [11].

≥ Polietilene a bassa densità (LDPE)

È stata la prima tipologia di polietilene sviluppata. polietilene a bassa densità, rispetto a quello ad alta densità,

presenta maggiore permeabilità ai gas. È un materiale leggero e facilmente lavorabile, con una buona flessibilità, ma scarsa resistenza alla trazione e a temperature elevate. Presenta una buona resistenza agli agenti chimici ed atmosferici, un basso assorbimento di umidità. Viene impiegato principalmente nel settore alimentare in diverse forme, tra cui sacchetti e liner, ma anche nella produzione di tappi e chiusure, cavi e tubi, raccordi. Tuttavia, il suo utilizzo è in diminuzione, a causa della sostituzione con il più performante LLDPE [11].

≥ Polietilene a bassa densità lineare (LLDPE)

L'LLDPE è una tipologia di polietilene con rigidità e grado di cristallinità simile all'LDPE. Ha una maggiore resistenza alla trazione e strappo. È ampiamente utilizzato nella produzione di serbatoi, fusti e silos, ma anche per imballaggi alimentari come sacchi.

≥ Polietilene a media densità (MDPE)

L'MDPE rappresenta una via di mezzo tra LDPE e HDPE, con proprietà intermedie rispetto alle due varianti. Ha una durezza e rigidità inferiore all'HDPE, ma offre una buona resistenza agli urti e alla permeabilità. Viene utilizzato nella produzione di sacchetti, pellicole per imballaggio, tubi, tappi e borse per la spesa. [11]

• Polietilentereftalato (PET)

Il polietilene tereftalato è uno dei polimeri termoplastici più diffusi disponibili sul mercato. Appartiene alla famiglia dei poliesteri, categoria di materiali polimerici contraddistinta da funzionalità esteree all'interno delle catene principali della macromolecola. Il PET si trova principalmente in due forme: amorfa e semicristallina. È ampiamente utilizzato oggi grazie alle diverse proprietà.

La densità è maggiore di quella dell'acqua, di conseguenza affonda, indipendentemente dal grado di cristallinità. La cristallinità influenza le proprietà ottiche: la forma amorfa è trasparente, mentre la forma semicristallina è opaca o traslucida. Il PET presenta una bassa permeabilità ai gas quali ossigeno, idrogeno ed azoto, e un buon effetto barriera contro composti di origine aromatica, grazie alla proprietà di barriera alla CO<sub>2</sub>. Il grado di cristallinità influenza anche le proprietà termiche, la forma amorfa possiede una temperatura di transizione vetrosa di 67°C circa, e la forma semicristallina di circa 80°C. Chimicamente è inerte, ma sensibile all'azione acidi e basi forti, basi deboli ed idrocarburi come ad esempio orto-clorofenolo, acido trifluoroacetico ed esafluoroisopropanolo [12]. Possiede anche una elevata resistenza meccanica, in particolare alla trazione e stabilità dimensionale. Inoltre, polietilene tereftalato rappresenta una scelta sostenibile: è riciclabile, il che lo rende un'opzione ecologica particolarmente interessante, soprattutto nella produzione tessile e degli imballaggi. Il polietilene tereftalato è un polimero ampiamente utilizzato in diversi settori. Nel settore della moda e abbigliamento, si producono fibre tessili a base di PET, anche tappeti. Viene anche utilizzato per realizzare componenti elettroniche, pellicole isolanti, circuiti stampati e altri componenti che richiedono stabilità termica e protezione chimica. Nel settore automobilistico, vengono realizzate sia componenti interne quali rivestimenti e tessuti per sedili, sia elementi esterni come i paraurti, in PET. In edilizia, per la produzione di materiali isolanti, barriere acustiche e membrane per coperture. Nel campo biomedico, il PET viene utilizzato per produrre di dispositivi medici, tubi e strumenti diagnostici. Tuttavia, il settore di maggior impiego è quello degli imballaggi: è

utilizzato nella realizzazione di contenitori per alimenti e bevande, per farmaci e cosmetici.

Infine, il polietilene tereftalato rappresenta una scelta sostenibile: è riciclabile, il che lo rende un'opzione ecologica particolarmente interessante, soprattutto nella produzione tessile e degli imballaggi [9].

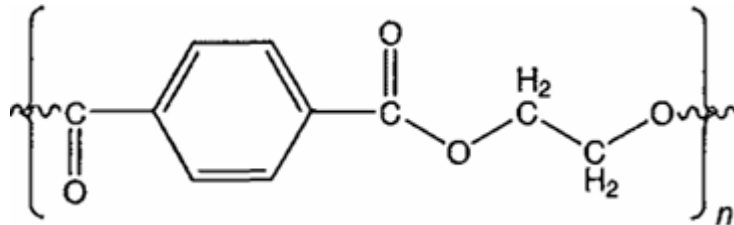


Figura 3: struttura del PET [9]

- Cloruro di polivinile (PVC)

Il PVC è un polimero lineare e termoplastico, utilizzato in una vasta gamma di prodotti come pellicole trasparenti, guarnizioni di barattoli, bottiglie e flaconi per detersivi e articoli per la casa [13]. Si ottiene attraverso un processo di polimerizzazione del cloruro di vinile.

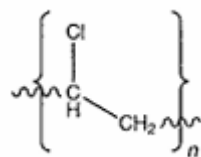


Figura 4: Struttura generale del PVC [9]

In commercio sono reperibili due principali tipologie di PVC: quello puro e quello modificato con additivi. Il polimero puro è un materiale color bianco, molto rigido. Spesso è impiegato in ambito edilizio, per la realizzazione di tubazioni, segnaletica e materiali in fogli. È instabile intrinsecamente, di conseguenza necessita dell'aggiunta di additivi quali stabilizzanti, plasticizzanti, pigmenti e cere. Gli additivi hanno la funzione di migliorare proprietà meccaniche, elettriche, termiche, colore e trasparenza [14]. Il

polivinilcloruro (PVC) è un materiale versatile, utilizzato in ambito edilizio nella produzione di finestre e tubazioni, mentre nel settore degli imballaggi trova applicazione nella produzione di bottiglie e film flessibili. Nell'elettronica, viene utilizzato per cavi e nastri adesivi; mentre nel settore automotive per i cavi della batteria. Inoltre, il PVC può essere utilizzato per la produzione di altri prodotti commerciali come borse e scarpe [15].

- Polistirene (PS):

Il polistirene (PS) è un polimero termoplastico derivato dalla polimerizzazione dello stirene, un idrocarburo aromatico liquido ottenuto dal petrolio. A temperatura ambiente è solido, fonde ad elevate temperature, il che lo rende idoneo per processi industriali come stampaggio ed estrusione. Può essere fuso e rifuso più volte senza subire modifiche chimiche sostanziali, anche se la sua saldabilità è limitata dalla fragilità di alcuni gradi.

Dal punto di vista chimico, il PS mostra moderata resistenza ad acidi o basi diluiti e agli alcoli a lunga catena, è degradabile in presenza di solventi organici aromatici, alifatici o clorurati. Tuttavia, presenta una buona resistenza ad agenti ossidanti e disinfettanti comuni come l'ossido di etilene e la candeggina.

Dal punto di vista strutturale, il polistirene può presentarsi in tre diverse conformazioni stereochimiche: atattica, isotattica e sindiotattica. La forma maggiormente disponibile in commercio è quella atattica. Il polistirene sindiotattico (sPS), è semicristallino e possiede un punto di fusione attorno ai 270 °C. Presenta una elevata resistenza chimica ed eccellenti proprietà dielettriche, pur conservando una certa fragilità [16].

In ambito industriale, il PS è disponibile in molteplici tipologie:

- ≥ Polistirene cristallino: trasparente, rigido e fragile, ampiamente utilizzato in applicazioni che richiedono

stampaggio a iniezione o estrusione, come articoli da laboratorio, componenti medici e contenitori per alimenti.

- ≥ HIPS (High Impact Polystyrene): è modificato con elastomeri come il polibutadiene, conferendogli una maggiore resistenza agli urti e rendendolo idoneo alla termoformatura. Viene impiegato nel settore alimentare per realizzare contenitori per yogurt e latticini, bicchieri e stoviglie. È inoltre utilizzato negli elettrodomestici, giocattoli e dispositivi medici.
- ≥ Polistirene orientato (OPS): ottenuto tramite orientamento biassiale del PS cristallino. Questo processo migliora le caratteristiche di flessibilità e resistenza. Tipici esempi di prodotti realizzati con OPS sono le vaschette da gastronomia.
- ≥ Polistirene espanso (EPS): è una schiuma rigida costituita per circa il 95% da aria e per il 5% da polimero, caratterizzata da buone capacità isolanti, leggerezza e bassa conduttività termica. È comunemente impiegato come materiale isolante in edilizia e nell'imballaggio. Tuttavia, presenta limitazioni legate alla sua fragilità e al parziale assorbimento d'acqua.
- ≥ Copolimeri stirenici: derivati del PS simili agli HIPS. I più noti sono i seguenti: l'ABS (Acrilonitrile-Butadiene-Stirene), caratterizzato da robustezza e resistenza chimica, utilizzato nella realizzazione di componenti automobilistiche, giocattoli e apparecchiature elettroniche; il SAN (Stirene-Acrilonitrile), caratterizzato da una maggiore resistenza termica e chimica rispetto all'ABS, trova applicazione in contenitori cosmetici e oggetti di design.

≥ Polistirene bromurato: è un polistirene a base di HIPS, ottenuto mediante processo di derivatizzazione con bromo, il che lo rende resistente all'accensione e alla fiamma. Viene impiegato nei dispositivi elettronici come televisori, computer e fotocopiatrici [16].

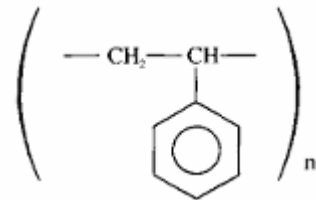


Figura 5: struttura del polistirene [17].

- Polipropilene (PP):

Nel 2006 rappresentava circa il 30 % della produzione mondiale dei polimeri. Il polipropilene è ampiamente utilizzato in diversi settori grazie alla sua resistenza, robustezza e all'elevato punto di fusione, circa 160°C, superiore rispetto ad altri materiali polimerici. Trova impiego, per esempio come contenitori per alimenti lavabili in lavastoviglie, etichette per bibite ma anche come giocattoli e fibre per tappeti destinati sia ad ambienti interni sia esterni [9]. Viene utilizzato anche in ambito medico, ad esempio per la realizzazione di dispositivi medici e flaconi destinati a prescrizioni farmaceutiche. Nel settore degli imballaggi, il polipropilene si utilizza nella produzione di bottigliette d'acqua e contenitori per shampoo [18].

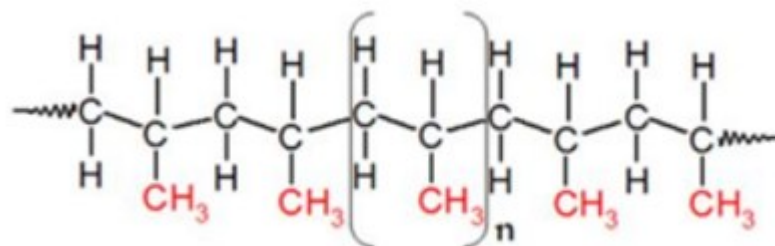


Figura 6: struttura generale del polipropilene [18]

La struttura chimica del polipropilene è caratterizzata dalla presenza di gruppi metilici legati a una metà degli atomi di carbonio della sua catena principale. Questi gruppi giocano un ruolo chiave nel determinare le proprietà del polimero. In base alla disposizione stereochimica, il polipropilene può presentarsi in tre diverse forme di stereoisomeri: isotattico, sindiotattico e atattico.

- Polipropilene isotattico: è la forma più comunemente utilizzata. La capacità di cristallizzare, gli conferisce un elevato punto di fusione, attorno ai 160-180°C, ed una altrettanto elevata densità. Il grado di cristallinità può variare da 40 al 70%, contribuendo alle sue ottime proprietà meccaniche.
- Polipropilene atattico: è stata la prima forma sintetizzata. Caratterizzato da una struttura irregolare, si presenta morbido ed appiccicoso, con proprietà meccaniche limitate. Proprio per le sue proprietà, viene utilizzato come materiale adesivo oppure come additivo nell'asfalto.
- Il polipropilene sindiotattico è stato reso disponibile circa un paio di decenni fa, e rispetto alla forma isotattica, presenta un punto di fusione più basso circa 138 °C ed una densità inferiore. Presenta una forma più complessa rispetto alla forma isotattica, che ne impedisce la cristallizzazione. [9]

Il polipropilene è particolarmente apprezzato dalle aziende petrolchimiche grazie alle sue ottime proprietà. È un materiale semirigido e traslucido, dotato di buona resistenza chimica, tenacità. Presenta una buona resistenza alla fatica ed al calore. Possiede un alto punto di rammollimento o di transizione vetrosa, elevata resistenza alla flessione e bassa capacità di assorbire acqua. Inoltre, il polipropilene è un materiale leggero, dotato di stabilità

dimensionale, buona resistenza elettrica, elevata resistenza agli urti e non è tossico [18].

### **1.1.2.3 VETRO**

Il vetro è un materiale ampiamente utilizzato nei cosmetici come contenitori di profumi, creme, nel settore farmaceutico per gli sciroppi, e nel settore alimentare, soprattutto come contenitore per bevande. Le sue numerose proprietà lo rendono uno dei materiali più diffusi ai giorni nostri, tra queste vi sono trasparenza, impermeabilità, stabilità al calore, varietà di colori, potenziale decorativo, integrità chimica, flessibilità del design, compatibilità con l'uso del microonde [3]. Grazie alla sua natura inerte ed impermeabile, il vetro rappresenta una soluzione consolidata e sicura per l'imballaggio protettivo. Oltre ad essere una barriera eccellente contro agenti esterni, i contenitori in vetro non interagiscono né alterano il gusto, l'odore o la composizione dei prodotti che contengono. Tuttavia, la sua fragilità e il suo peso elevato rimangono svantaggi reali per quanto riguarda il trasporto, la movimentazione e la sicurezza dei lavoratori coinvolti. Il vetro però è un materiale sostenibile, inerte, completamente e infinitamente riciclabile, riutilizzabile e ricaricabile [19].

Il vetro può essere classificato in tre tipologie:

- Tipo I (borosilicato): tipologia di vetro che presenta una elevata resistenza idrolitica e agli shock termici. Risulta essere maggiormente inerte rispetto al vetro soda-calcico.
- Tipo II (soda-calcico trattato): presenta una elevata resistenza idrolitica, dovuta ad un trattamento superficiale, che conferisce proprietà equivalenti al vetro di tipo I
- Tipo III (soda-calcico non trattato): possiedono una moderata resistenza idrolitica, dovuta alla loro composizione chimica intrinseca [20] [21].

#### 1.1.2.4 CARTA

L'uso della carta e del cartone per imballaggio alimentare ebbe origini nel XVII secolo, registrando un notevole incremento nella seconda metà del XIX secolo. Questi sono materiali in fogli costituiti da una rete intrecciata di fibre di cellulosa derivante dal legno [6].

- La carta è un materiale naturale, rinnovabile e facilmente riciclabile. Tuttavia, il suo utilizzo come imballaggio primario presenta alcune problematiche strutturali, come la bassa resistenza all'umidità e ai grassi, nonché una limitata capacità di barriera contro gas e aromi. Inoltre, non è possibile termosaldarla nella sua forma pura. Per superare questi limiti, la carta viene trattata appositamente o rivestita con cere, resine, polietilene o alluminio, al fine di migliorarne le proprietà funzionali e protettive. Questo processo porta alla creazione di diverse varianti di carta speciale, ciascuna con caratteristiche fisico-meccaniche specifiche e applicazioni mirate in vari settori, inclusa l'industria alimentare. Le principali tipologie sono le seguenti:
  - Carta kraft: La carta Kraft si distingue per la sua particolare resistenza agli urti, all'usura e agli strappi, garantendo una protezione efficace del contenuto, dell'imballaggio e prevenendo eventuali fuoriuscite. Data la sua robustezza e resistenza all'umidità, risulta adatta in diversi settori. È ampiamente utilizzata per la realizzazione di sacchetti destinati al confezionamento di prodotti alimentari, come le farine. Trova impiego anche nel settore edilizio per il confezionamento di materiali come calce e sabbia [22].
  - Carta glassine: è una tipologia di carta semitrasparente rivestita con una superficie liscia e lucida. Si ottiene mediante processo di raffinazione della pasta di alfa-cellulosa. È una carta oleata, presenta un'elevata resistenza

al grasso e all'umidità. Una delle caratteristiche più importanti è la capacità antiaderente, che la rendono una efficace barriera protettiva per prodotti alimentari, quali snack e prodotti dolciari. Viene inoltre impiegata nei settori della stampa e della fotografia [23].

- Carta oleata: è un tipo di carta grassa, trasparente o semitrasparente, a bassa porosità e resistente ai grassi, ma non agli agenti umidi [2]. Viene comunemente utilizzata per avvolgere snack, biscotti e barrette di cioccolato [6].
- Carta pergamena: realizzata con pura cellulosa. La carta pergamena è impermeabile ai grassi e resistente all'umidità, grazie ad un trattamento a freddo con acido solforico concentrato [2]. È particolarmente indicata per il confezionamento di alimenti grassi, come il burro [6].
- Il cartone invece, si distingue dalla carta per il maggiore spessore e peso per unità di superficie. Solitamente è realizzato in più strati. Trova applicazioni come packaging secondario per la realizzazione di contenitori per la spedizione, come scatole, vagoni e vassoi. Raramente è utilizzato a contatto diretto con gli alimenti. Tra le tipologie di cartone più utilizzate vi sono:
  - Cartoncino patinato bianco: viene generalmente utilizzata come strato interno di un cartone. Può essere rivestita con cera oppure laminata con polietilene per renderlo termosaldabile. Rappresenta l'unica tipologia di cartoncino che, se rivestita correttamente, è idonea al contatto diretto con gli alimenti.
  - Pannello solido: è dotato di elevata resistenza e durabilità. Se accoppiato con polietilene, può essere utilizzato per realizzare cartoni utilizzati per il confezionamento di

sostanze liquide (conosciuto anche come milkboard), ad esempio per succhi di frutta e bevande analcoliche.

- Cartoncino truciolare: è realizzato con carta riciclata, presenta imperfezioni e impurità, che lo rende inadatto al contatto diretto con gli alimenti, alla stampa e alla piegatura. È spesso foderato con cartoncino patinato bianco, per migliorare sia l'aspetto che la resistenza. Viene utilizzato per fabbricare gli strati esterni dei cartoni.
- Fibra di legno: disponibile in forma solida oppure ondulata. La tipologia solida presenta uno strato interno di cartoncino bianco, ed uno strato di carta kraft esterno, offrendo una buona protezione contro urti e compressioni. Se accoppiato con film plastici o di alluminio, il pannello di fibra solida può migliorare le proprietà di barriera e viene utilizzato per confezionare prodotti alimentari secchi come caffè e latte in polvere. La tipologia ondulata, conosciuta anche come cartone ondulato, è realizzata con due strati di carta kraft con un materiale ondulato centrale (o scanalato). Grazie alla sua resistenza a urti, abrasione e schiacciamento, è comunemente utilizzata per le spedizioni di alimenti sfusi e l'imballaggio in scatole di prodotti alimentari al dettaglio [6].

#### **1.1.2.5 LEGNO**

L'utilizzo del legno nel settore del packaging risale sin dall'antichità, ad esempio nella realizzazione di cestini per la frutta oppure nella produzione di botti per il vino. Il legno è un materiale molto resistente rispetto al suo peso, rigido, durevole e relativamente versatile per il design. Mantiene la sua resistenza anche quando è bagnato, ed è più leggero rispetto ad altri materiali rigidi come acciaio e vetro. Tuttavia, non costituisce una barriera

efficace contro l'umidità. Gli imballaggi in legno offrono ottima rigidità, resistenza alla sovrapposizione e protezione fisica. Inoltre, è un materiale ecologico a basso costo, poiché richiede poca energia per essere lavorato, immagazzina carbonio, non inquina, ed è rinnovabile e biodegradabile. Nonostante ciò, non sempre è economico, in quanto richiede tempo e abilità per essere assemblato. L'impiego del legno negli imballaggi è ideale per produzioni su piccola scala e possono essere realizzati con attrezzature semplici ed in varie forme. I più comuni sono scatole, casse, pallet e barili. Le proprietà e il costo del legno variano a seconda del tipo di albero, che si suddividono principalmente in conifere (sempreverdi, legno tenero) e latifoglie (decidue, legno duro) [24].

- Legno duro: è generalmente più denso e difficile da lavorare rispetto al legno tenero, ma offre una maggiore resistenza. Presentano una maggiore resistenza e durezza, dovuto al loro lento processo di crescita e ad una struttura più compatta. I legni duri possiedono una resistenza superiore agli agenti atmosferici e al fuoco, ma risultano difficili da lavorare. Vengono principalmente utilizzati nell'edilizia, per la produzione di mobili e pavimenti, e nel settore degli imballaggi per la fabbricazione di pallet.
- Legno tenero: meno resistente del legno duro, ma più leggero e facilmente lavorabile. Viene utilizzato principalmente nella produzione di carta e, nel packaging, per la realizzazione di pallet [25].

#### **1.1.2.6 POLIACCOPPIATI**

L'accoppiamento è un processo che consiste nell'unire strettamente più materiali, attraverso tecniche come estrusione, laminazione, estrusione-laminazione e coestrusione, al fine di ottenere un unico laminato. Il prodotto finale possiederà una combinazione delle caratteristiche di ciascun componente. Le possibilità offerte dall'industria

dell'accoppiamento per la selezione delle materie prime sono numerose ed in continua evoluzione, grazie alla costante ricerca di nuovi materiali. Il primo poliaccoppiato era composto da carta e cera, quest'ultima utilizzata per impermeabilizzare la carta e fungere da termosaldante al momento della chiusura delle buste. Oggi, i principali materiali impiegati nella produzione di imballaggi poliaccoppiati sono: carta, cellophane, alluminio, polietilene, polipropilene, poliestere, poliammide. I requisiti fondamentali che i poliaccoppiati devono soddisfare sono i seguenti: protezione dei prodotti imballati e compatibilità con essa; ermeticità della confezione e la possibilità di automatizzare le operazioni di imballaggio. Gli strati che costituiscono un accoppiato possono essere molteplici: vi è in genere:

- un foglio esterno di supporto con proprietà di resistenza alle sollecitazioni meccaniche. Di solito, i film plastici sono i materiali più impiegati, grazie alla capacità di resistere alle elevate temperature generate dal contatto con le barre saldanti. Altri materiali come alluminio, carta e cellulosa, possono essere utilizzati come foglio esterno di supporto, per conferire al poliaccoppiato caratteristiche quali impermeabilità ai gas e macchinabilità.
- Un foglio interposto di alluminio con funzioni di barriera e resistenza chimica, utili per prodotti deperibili e con shelf-life lunga.
- un foglio interno termosaldante, progettato per garantire l'ermeticità della confezione. I materiali più idonei per questo scopo sono le poliolefine amorphe, e in particolare l'MDPE per temperature massime di 105°C, o l'HDPE. Inoltre, il film poliolefinico, deve assicurare la massima impermeabilità al vapore acqueo.

I contenitori poliaccoppiati trovano applicazione in diversi settori, in particolare quello alimentare, dove uno degli esempi più importanti è

rappresentato dalla confezione del latte. I contenitori poliaccoppiati rigidi con uno strato di alluminio vengono inoltre impiegati per il confezionamento del vino e dei succhi di frutta. Anche diversi alimenti solidi vengono confezionati con laminati poliaccoppiati: le paste alimentari, racchiuse in buste composte da diversi polimeri plastici, e i biscotti, in sacchetti costituiti dallo strato di alluminio per mantenere il corretto grado di umidità [1].

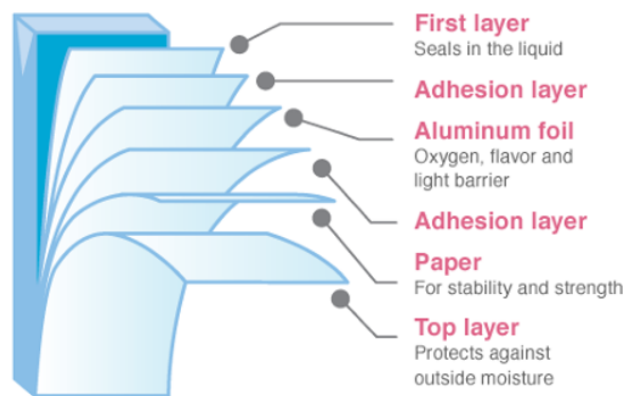


Figura 7: rappresentazione di un packaging poliaccoppiato [26]

## 1.2 RICICLO

Secondo la Commissione Europea, con il termine *waste* si intende “qualsiasi sostanza, materiale od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsi” [27].

Ogni anno vengono generati circa 1,3 miliardi di tonnellate di rifiuti, tali da coprire l'intero mondo. Si prevedono incrementi fino a 27 miliardi entro il 2050, un terzo dei quali proverrà dall'Asia, principalmente da Cina e India.

La produzione mondiale di plastica è stata di 1,5 milioni di tonnellate negli anni '50. È salito a 336 milioni di tonnellate nel 2016. Globalmente, circa 400 milioni di tonnellate di carta e cartoni vengono prodotti ogni anno. Per quanto riguarda il vetro, nel 2018 sono stati prodotti circa 56,51 milioni di tonnellate nel mondo [28].

I rifiuti sono un problema di oggi e delle generazioni future. Esistono diverse metodologie per ridurre questo problema, ed è rappresentato dal modello delle 4R: riduzione, recupero, riutilizzo e riciclo di oggetti o materiali più volte.

- **Recupero:** ogni oggetto, materiale o prodotto, possiede il proprio stadio finale. Al termine del proprio ciclo di vita, vengono recuperati. Alcune parti possono essere riutilizzate, altre riciclate.
- **Riduzione:** per ridurre l'utilizzo di risorse naturali quali petrolio, acqua, energia e gas, si attuano tecniche di riciclo, riutilizzo e recupero. Questo riduce l'utilizzo di nuovi prodotti vergini [28].
- **Riciclo:** "Processo attraverso il quale si mira al recupero di materiali, con il duplice obiettivo di limitare la quantità di rifiuti e di ottenere un risparmio di materia o di energia reinserendo nei cicli produttivi i materiali recuperati. I prodotti da riciclare provengono da materiali di pre-consumo (scarti di lavorazione ecc.) e da materiali di post-consumo (rifiuti solidi urbani, automobili in demolizione ecc.)" [29].
- **Riutilizzo:** "Per riutilizzo dei rifiuti si intende qualsiasi operazione mediante la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti vengono riutilizzati per lo stesso scopo per cui sono stati concepiti" [30].

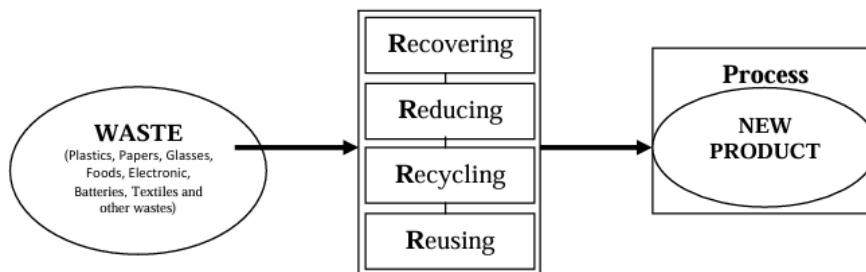


Figura 8 : conversione dei rifiuti in nuovi prodotti [28]

Nel 2022 sono state prodotte in UE circa 58,7 milioni di tonnellate di plastica, di cui 15,4% di PP, 13,4% di LDPE e LLDPE, 9,1% di PVC, 8,7% di HDPE e MDPE, 5,4% di PS e PS-E, 5,3% di PUR e 5,0% di PET.

Di questa quantità, 54 milioni di tonnellate sono state trasformate in prodotti e parti in plastica da parte di aziende europee, principalmente destinata nel settore degli imballaggi, nell'edilizia, nel settore dell'automotive ed elettronica [31].

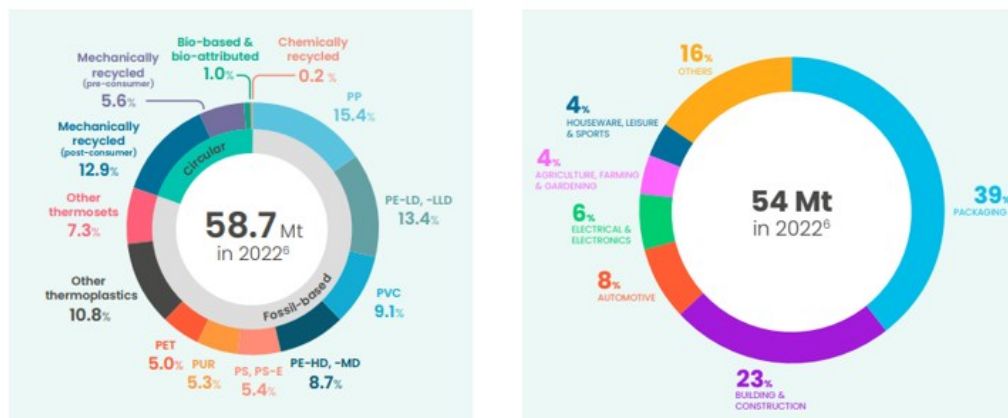


Figura 9: produzione di plastica in UE e settori di destinazione [31]

In Unione Europea, nel 2022 sono stati prodotti circa 83,5 milioni di tonnellate di rifiuti di imballaggi, di cui il 41% sono carta e cartoni, 19,4% plastica, 18,8% di vetro, 16,0% legno e 4,9% di metallo.

I rifiuti derivati da imballaggi di plastica prodotti nel 2022 sono stati circa 16,2 milioni di tonnellate, di cui il 41%, circa 6,6 milioni di tonnellate, sono stati riciclati [32].

**Packaging waste generated, by packaging material, EU, 2022**  
(%)

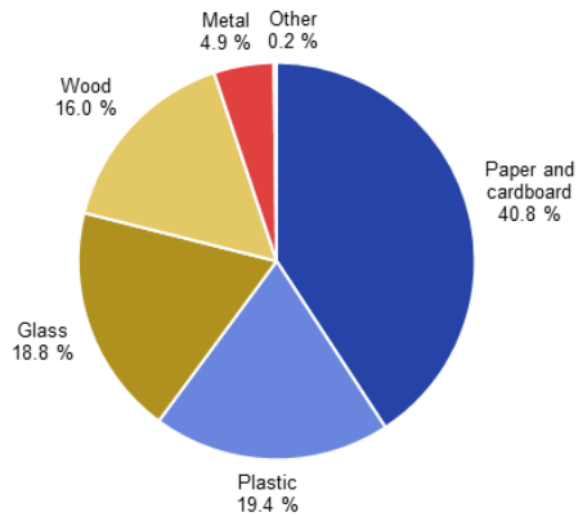


Figura 10: rifiuti urbani prodotti in UE nel 2022 [32]

Il riciclo dei materiali plastici può avvenire in due modalità differenti:

- ≥ Meccanico: è il processo attraverso il quale, la plastica viene macinata, ritrattata e assemblata per produrre nuovi componenti che possono essere identici all'originale o meno. È conosciuto anche con il nome di riciclo fisico.
- ≥ Chimico: i rifiuti plastici vengono ritrasformati nella loro componente idrocarburica, ed essere utilizzati per la produzione di nuovi polimeri e l'industria petrolchimica, o nei polimeri puri utilizzando trattamenti con solventi chimici [33].

I materiali plastici, a differenza del vetro o dei metalli, non possono essere riciclati infinitamente. Generalmente è possibile riciclare fino a quattro volte:

- Riciclo primario: consiste nel processo di riciclo di rifiuti puliti, monotipo. È il metodo maggiormente diffuso, semplice ed economico. Da questo processo, si ottengono prodotti con caratteristiche simili a quelli realizzati con materiali vergini. Per ottenere una elevata qualità del prodotto, i rifiuti plastici vengono

mescolati con materiali vergini. Quelli inadatti, trovano impiego come materiali di seconda scelta.

- Riciclo secondario: rappresenta il processo di trasformazione dei rifiuti plastici in prodotti con prestazioni inferiori rispetto al materiale vergine. Per effettuare il riciclo secondario, esistono due metodi: il primo prevede la separazione della plastica dai suoi componenti e suddivisione in tipi generici, alcuni dei quali vengono poi riciclati per realizzare prodotti insieme a materiale vergine o primario riciclato. Il secondo metodo consiste nel separare il materiale plastico dai contaminanti addizionati, e successivamente effettuare un processo di fusione in miscela senza segregazione. Il trattamento dei rifiuti plastici può includere diversi procedimenti, a seconda del prodotto da ottenere e dai rifiuti da trattare, per esempio separazione delle plastiche da altri materiali di scarto e l'una dall'altra, processi di pulitura ed essiccazione e riduzione delle dimensioni mediante granulatori.
- Riciclo terziario: definito anche riciclo chimico. Nel riciclo terziario, le materie plastiche solide derivate dai rifiuti, per mezzo di trattamento chimico o calore, vengono trasformati in molecole più piccole come gli intermedi. I prodotti intermedi ricavati sono generalmente liquidi o gassosi, ma anche solidi e cere. Questi, sono utilizzati nella produzione di nuovi prodotti petrolchimici e plastici.
- Riciclo quaternario: è il processo di recupero energia attraverso incenerimento, dai rifiuti. La combustione dei materiali rappresenta la modalità oggi più efficace per ridurre il volume di materiale organico, i cui residui possono essere successivamente smaltiti in discarica. Dai polimeri termoplastici e termoindurenti si ricavano fonti di energia ad alto rendimento. L'energia generata dipende dalla tipologia di plastica, in media si ricavano circa 10000 kcal/kg. L'incenerimento di materie plastiche è necessario per i

rifiuti ospedalieri, considerati fonti di malattia. La combustione però, può provocare la formazione ed emissione di composti pericolosi ed inquinanti come idrocarburi aromatici polinucleari (IPA), fuliggine, diossine e furano. Di conseguenza gli inceneritori devono essere progettati per evitare l'emissione di queste sostanze [10].

## 1.3 TRASPORTO

### 1.3.1 MODALITÀ DI TRASPORTO

Quando si parla di trasporto merci, si fa riferimento a diverse modalità, tra cui il trasporto su gomma, su rotaia, via aerea, via mare e quello intermodale. Ogni tipologia si distingue per caratteristiche specifiche in termini di durata, costi, capacità di carico e distanza percorribile.



Figura 11: tipologie di trasporti [34]

#### – Trasporto aereo

Il trasporto aereo rappresenta la soluzione più veloce per spedire merci su lunghe distanze, ed è particolarmente impiegato per spedizioni intercontinentali e per prodotti deperibili. Grazie alla sua rapidità, consente di coprire tratte molto ampie nel giro di poche ore [35]. Il trasporto merci tramite aereo cargo offre numerosi vantaggi, tra cui

l'elevata velocità, un buon livello di sicurezza e la capacità di coprire grandi distanze in tempi ridotti. Tuttavia, presenta anche alcuni svantaggi, come per esempio costi generalmente molto elevati, quantità di merce trasportabile limitata, non tutte le tipologie di beni possono essere imbarcate sugli aerei, e infine possono verificarsi ritardi dovuti a condizioni meteorologiche avverse [36] [37].

– Trasporto su rotaia

Il trasporto ferroviario rappresenta una modalità di movimentazione merci particolarmente efficiente. Alimentato principalmente tramite energia elettrica, si configura come una soluzione più sostenibile dal punto di vista ambientale, grazie alla capacità di trasportare un elevato numero di container con una conseguente riduzione delle emissioni di anidride carbonica [38] [39]. Inoltre, l'utilizzo della rotaia contribuisce ad alleggerire la congestione dei porti coinvolti negli scambi di container tra Est e Ovest, favorendo il trasferimento dei carichi dalla strada alla rete ferroviaria. Il trasporto su rotaia è impiegato sia per spedizioni regolari sia occasionali, garantendo un buon livello di puntualità nelle consegne. Tuttavia, analogamente al trasporto aereo, richiede spesso un'integrazione con il trasporto su gomma per raggiungere la destinazione finale, in quanto le tratte ferroviarie non arrivano direttamente al cliente [35].

Uno dei principali punti di forza di questa modalità è la piena compatibilità dei container con il trasporto su strada, che consente un passaggio rapido e diretto dal treno al camion in base alle necessità logistiche [38].

– Trasporto navale

Secondo la definizione della Treccani, con il termine trasporto navale si intende il “Trasporto di merci e persone che si svolge via mare” [40]. È una modalità di scambio commerciale utilizzata fin dall'antichità, che consente il trasferimento di migliaia di tonnellate di merci tra i continenti.

Per effettuare questo, possono essere utilizzate navi di diversa dimensione e tipologia. Oggigiorno, rappresenta l'opzione più economica per il trasporto intercontinentale di merci, soprattutto se confrontata con il trasporto aereo. Le principali tipologie di trasporto marittimo includono: container, rinfuse solide e liquide, e carichi speciali [41].

Questa modalità presenta sia vantaggi sia svantaggi:

Vantaggi:

- È la soluzione più economica per il trasporto intercontinentale di grandi volumi di merci. Questo beneficio economico è dovuto alle economie di scala: le navi possono trasportare elevate quantità di merci in un singolo viaggio, distribuendo prezzi fissi su carichi più ampi [41];
- Ha una notevole capacità di carico, rendendola adatta per spedizioni di grandi quantità;
- I container utilizzati sono standardizzati per il trasporto intermodale, il che consente di trasferirli agevolmente su treni o camion senza necessità di trasbordo.

Svantaggi:

- Non è economicamente vantaggiosa per il trasporto di piccole quantità di merce [42];
- I tempi di transito sono sensibilmente più lunghi rispetto al trasporto aereo. Ad esempio, un volo diretto da Milano Malpensa (MXP) a Shanghai Pudong (PVG) impiega circa 11 ore e 20 minuti [43], mentre una spedizione via nave dal porto di Genova al porto di Shanghai può richiedere circa 35 giorni. [44]

– Trasporto su gomma

Il trasporto stradale è la modalità di movimentazione merci più diffusa e utilizzata dalle aziende. Grazie alla capillarità della rete stradale, consente

la consegna diretta delle merci ai destinatari, raggiungendo praticamente qualsiasi località [35]. Uno dei principali punti di forza di questa modalità è la sua versatilità: è in grado di trasportare qualsiasi tipologia di merce, comprese quelle pericolose. Le aziende si affidano spesso a trasportatori professionisti dotati delle autorizzazioni e delle competenze necessarie per gestire i diversi tipi di carico in base alle normative vigenti. Il trasporto su gomma viene effettuato principalmente attraverso due categorie di veicoli:

- Autotreni: composti da una motrice (autocarro) abbinata a un rimorchio, permettono il trasporto di volumi maggiori rispetto ad altre configurazioni;
- Autoarticolati: costituiti da un trattore stradale agganciato a un semirimorchio, generalmente lungo non più di 13,60 metri. Questa configurazione offre maggiore flessibilità logistica: il semirimorchio può essere sganciato e trasferito da un trattore all'altro in base alla tratta, oppure un unico trattore può essere impiegato per trainare più semirimorchi in momenti diversi [45].

#### – Trasporto intermodale

Il trasporto intermodale consiste nell'integrazione di diverse modalità di trasporto per movimentare merci da un punto all'altro, utilizzando un unico contenitore, solitamente un container, che viene trasferito da un mezzo all'altro senza necessità di scaricare la merce. Questa soluzione viene adottata principalmente per coprire lunghe distanze, con l'obiettivo di ottimizzare tempi, costi ed efficienza operativa [35].

Affinché un trasporto sia definito "intermodale", è necessario che coinvolga almeno due differenti mezzi di trasporto. Le combinazioni più comuni includono autoarticolati, treni merci e navi portacontainer, ma possono essere impiegati anche aerei cargo, a seconda delle esigenze logistiche.

Il trasporto intermodale rappresenta una modalità estremamente flessibile, adatta a qualsiasi tipo di merce e capace di adattarsi a diverse necessità operative [46].

### **1.3.2 UNITÀ DI CARICO / CONTAINER**

Secondo la Treccani, le unità di carico rappresentano una determinata quantità di merce che, sistemata in modo adatto, può essere manipolata, trasportata e immagazzinata con apparecchi meccanici [47].

Le principali forme di unità di carico sono i container ISO e le ULD (Unit Load Device).

- ISO container: sono standardizzati dall' International Organization for Standardization, da consentire un ampio utilizzo in tutto il mondo. La struttura è realizzata in acciaio e le lunghezze più comuni sono 20, 40, 45 piedi (rispettivamente 6.10; 12.19; 13.72 metri), la larghezza e l'altezza sono le stesse per tutte le lunghezze, pari a 8 piedi di larghezza (2.44 metri) e 8 piedi e 6 pollici (2,591 metri). Le tipologie maggiormente utilizzate sono indicate con gli acronimi TEU (Twenty-Foot Equivalent Unit) e FEU (Forty-foot Equivalent Unit). Esistono diverse varianti di container: chiusi, aperti e coperti con un telo per carichi di grandi dimensioni, refrigerati per il trasporto di prodotti che necessitano temperature controllate e tanktainer per gestire carichi liquidi o polveri. I container ISO sono utilizzati nel trasporto intermodale, idonei sia a trasporto su strada, rotaia e via mare [48].
- ULD: impiegate nel trasporto aereo, permettono di stivare le merci in modo efficiente e sicuro, ottimizzando lo spazio disponibile. Molti modelli sono progettati per adattarsi alla forma specifica della stiva dell'aeromobile. La International Air Transport Association (IATA) ha sviluppato un sistema standard di

identificazione delle ULD [48]. Le Unit Load Device esistono in due tipologie: pallet e container.

La tipologia di ULD utilizzata dipende dallo spazio, dal volume e dal peso per garantire che il dispositivo di carico unitario possa essere sollevato su un aereo passeggeri o cargo.

I pallet sono grandi piastre metalliche, sopra cui viene posizionato il carico e fissato mediante reti o maglie. Offrono una soluzione flessibile, poiché la disposizione delle merci può essere adattata alla sagoma dell'aereo.

I container aerei, sono l'equivalente dei container marittimi, ma disponibili in una varietà molto maggiore di forme e dimensioni. Sono progettati per adattarsi alle misure delle diverse stive.

La scelta dipende dallo spazio, dal volume e dal peso del carico, garantendo la compatibilità sia con aerei cargo, sia passeggeri [49].

## **2 SCOPO**

L'obiettivo di questo studio consiste nel valutare le proprietà meccaniche e fisiche dei diversi materiali di imballaggio, confrontando le prestazioni tra packaging realizzati con due processi differenti e tra materiale vergine e materiale riciclato.

Per evidenziare le differenze tra i materiali, sono state effettuate diverse prove, tra cui test di trazione, compressione, esposizione alla luce solare ed in camera climatica, cicli di vuoto e analisi spettroscopica mediante MicroNIR.

Le prove sono state eseguite seguendo normative specifiche ICH (International Council for Harmonisation), ISO (International Organization for Standardization) e ASTM (American Society for Testing and Materials). L'esposizione in camera climatica è stata eseguita secondo la norma ICH Q1A (R2); la resistenza alla trazione è stata valutata facendo riferimento alla norma ASTM D638 e la realizzazione dei provini alla

ASTM D882; le prove di resistenza alla compressione sono state effettuate seguendo la norma ASTM D2659. I test di sottovuoto sono stati effettuati secondo la norma ASTM D5094; infine, i test di esposizione ai raggi UV e alle radiazioni solari sono stati simulati secondo ISO 4892-2.

### **3 MATERIALI**

Per lo studio sono stati utilizzati packaging realizzati con materiali polimerici, forniti dall'azienda Eurovetrocap S.r.l., rappresentativi di quattro tipologie di contenitori.

- Cilindro alto 250 ml HDPE (HDPE 2): flacone realizzato polietilene ad alta densità (HDPE) vergine, di colore bianco. Di base tonda, presenta una lunghezza pari a 173 mm, un diametro medio di 48 mm ed un peso di circa 24 g. La capacità del flacone è di 250 ml, a raso bocca è 262. Il collo è conforme allo standard 24/410.
- Squeeze 200 ml HDPE (HDPE 1): Flacone in HDPE per cosmetici, anch'esso di colore bianco, con base tonda. Il diametro è circa 43 mm, la lunghezza pari a 169 mm e possiede un peso totale di 11 g. La capacità del flacone squeeze è di 200 ml, raso bocca è 215 ml è un collo standard 24/410.
- Sirio alto 100 ml PET: contenitore in Polietilene tereftalato vergine (PET). La capacità nominale dei flaconi è 100 ml, a raso bocca è 116 ml. La base è tonda con un diametro di 38 mm, la lunghezza di 124 mm, la bocca ha una dimensione standard 24/410: Il peso è circa 17 g. Appare trasparente.
- Sirio alto 100 ml r-PET: flacone in polietilene tereftalato riciclato. La bocca è standard 24/410, il peso di 16 g, la lunghezza di 124 mm, il diametro della base tonda di 38 mm. La capacità è di 100 ml, mentre il volume a raso collo raggiunge 124 ml. Appaiono trasparenti ma con una tonalità grigio-verdognola.



Figura 12: flaconi S (HDPE), Si (PET), C (HDPE) e rSi (rPET)

## 4 METODI

### 4.1 ANALISI SOTTOVUOTO SECONDO NORMA ASTM D5094

La presente analisi ha lo scopo di analizzare i campioni secondo norma ASTM D5094, al fine di valutare la resistenza dei flaconi a cicli di vuoto. L'obiettivo è verificare che i contenitori siano sigillati in modo ermetico e privi di perdite, garantendo gli standard qualitativi richiesti [50].

Gli strumenti utilizzati per l'analisi sono stati i seguenti:

- Wigam RS15D: Pompa da vuoto a doppio stadio, con portata nominale di 250 L/min, vuoto limite pari a  $1 \times 10^{-2}$  mbar e potenza installata di 550 W. Lo strumento è stato impiegato per generare il vuoto necessario all'esecuzione della prova di sottovuoto in conformità alla norma ASTM D5094 [51].

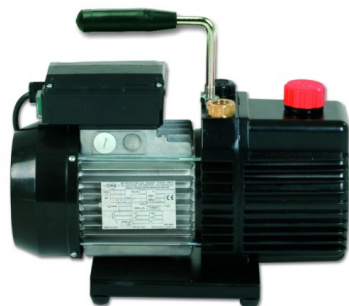


Figura 13: Wigam RS15D [51]

- Essiccatore vetro Duran® DN 300: dispositivo utilizzato per effettuare la prova di sottovuoto secondo ASTM D5094. Presenta un diametro interno di 300 mm e un'altezza complessiva di 420 mm. Al suo interno è presente una piastra di porcellana, che funge da supporto durante il test [52].



Figura 14: Essiccatore vetro Duran DN 300. [52]

- Motic BA410: è un microscopio ottico binoculare o trinoculare, utilizzato per osservare fori di rottura nei campioni analizzati, in seguito ai cicli di sottovuoto. I tubi oculari standard BA410 sono progettati con un angolo di visione confortevole di 30° e offrono un ampio campo visivo di 22 mm (FOV 22), ideale per analisi e screening rapidi. La distanza interpupillare è regolabile da 48 a 75 mm. Il microscopio è equipaggiato con diverse lenti obiettivo: EC-H Plan 4X/0.10, EC-H Plan 10X/0.25, EC-H Plan 40X/0.65 ed EC-H Plan 100X-oil/1.25 [53].



Figura 15: Motic BA410 [53]

- Camera climatica Memmert serie ICH 260 di EN.CO s.r.l.: strumento progettato per test in condizioni di temperatura e umidità controllate, adatto sia a prove di breve o lunga durata, come test di resistenza, invecchiamento e stabilità su una vasta gamma di materiali. È utilizzata nei settori industriale, alimentare, cosmetico e farmaceutico, conforme alle linee guida ICH Q1A e Q1B. Il sistema è dotato di riscaldamento a resistenza elettrica e di un compressore per la refrigerazione. La temperatura è regolabile in un intervallo compreso tra  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$ , mentre l'umidità relativa è regolabile dal 10% all'80%. È inoltre presente un timer programmabile da 1 giorno fino a 99 giorni e 23 ore. Le dimensioni interne della camera sono di 640 mm di larghezza, 800 mm di altezza e 500 mm di profondità [54].



*Figura 16: Memmert serie ICH260 EN.CO s.r.l. [54]*

- Bilancia OHAUS SKX1202: bilancia ideale in ambito didattico. Il piatto della bilancia ha una dimensione pari a 140 mm x 170 mm, una portata massima di 1200 g e una risoluzione di 0,01 g [55].



Figura 17: Bilancia OHAUS SKX1202 [55]

Protocollo sperimentale:

Prima dell'inizio delle operazioni, verificare il corretto funzionamento della pompa da vuoto. Assicurarsi che il livello dell'olio lubrificante sia adeguato, e procedere con la preparazione dell'essiccatore, applicando vaselina sul bordo della base e del coperchio per garantire una chiusura ermetica.

Una volta predisposta la strumentazione, riempire i flaconi con un liquido, ad esempio acqua, fino alla base del collo. Chiudere i flaconi con i rispettivi tappi e pesarli accuratamente tramite una bilancia analitica.

Conclusa la preparazione dei campioni, posizionare carta assorbente all'interno dell'essiccatore per facilitare l'identificazione di eventuali perdite. Quindi, disporre i flaconi in posizione orizzontale all'interno dell'essiccatore, chiuderlo con il coperchio e applicare il tappo per il collegamento al sistema di vuoto. Collegare la pompa da vuoto all'essiccatore e azionarla, mantenendola in funzione per circa 4-5 minuti. Il vuoto generato viene mantenuto per un tempo di 30 minuti. Trascorso questo tempo, sfiatare l'essiccatore e rimuovere i campioni. Procedere quindi con una pesata precisa di ciascun flacone per rilevare eventuali variazioni di massa.

Dopo pesatura, lasciare i campioni a riposo per ulteriori 30 minuti, quindi avviare un nuovo ciclo di prova. L'ultimo ciclo della giornata prevede il mantenimento del vuoto per l'intera notte.

Sono stati analizzati otto flaconi, quattro nuovi (T0) e quattro posizionati in camera climatica (T1) a condizioni di temperatura e umidità controllate

di 40°C e 75%, secondo norma ICH Q1A2, per un periodo di tre settimane [56]. Ogni sette giorni, i flaconi vengono prelevati e si effettua una giornata di ciclo sottovuoto. Il giorno dopo si riposizionano in camera climatica.

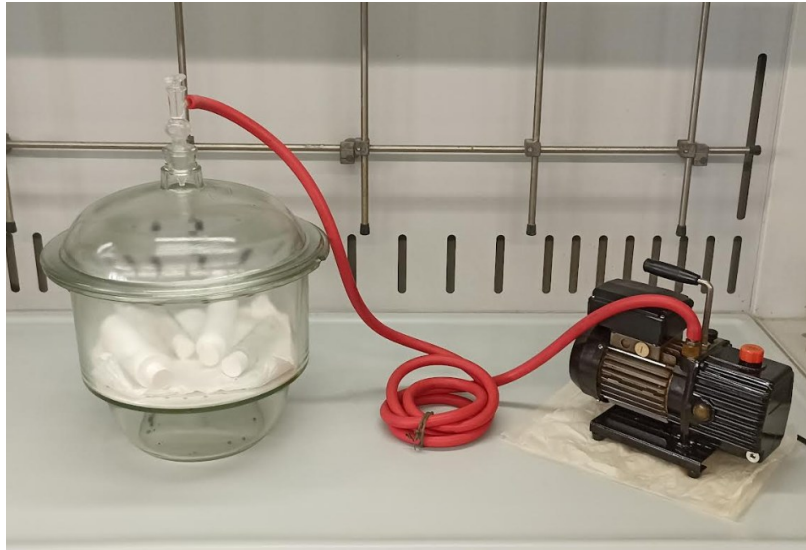
I quattro campioni a temperatura ambiente sono stati analizzati quotidianamente, ad eccezione dei giorni in cui sono stati esaminati i campioni provenienti dalla camera climatica.

Al termine delle analisi, i flaconi nei quali si sono verificate perdite di liquido, sono stati osservati al microscopio.

Di seguito, si riportano in tabella tutti i campioni analizzati.

*Tabella 1: anagrafica dei campioni analizzati*

<b>Campione</b>	<b>Polimero</b>	<b>Condizione</b>
S-T0	HDPE	T0
S-T1	HDPE	T1
C-T0	HDPE	T0
C-T1	HDPE	T1
Si-T0	PET	T0
Si-T1	PET	T1
rSi-T0	rPET	T0
rSi-T1	rPET	T1



*Figura 18: pompa da vuoto collegata all'essiccatore, al cui interno sono disposti i campioni*



*Figura 19: disposizione dei campioni all'interno dell'essiccatore*

## **4.2 VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE ALLA RADIAZIONE SOLARE SECONDO LA NORMA ISO 4892-2**

Questa sezione della ISO 4892 definisce i metodi per sottoporre i campioni all'esposizione alla luce prodotta dalle lampade ad arco allo xeno, al fine di simulare gli effetti degli agenti atmosferici come temperatura, umidità e bagnatura, che i materiali subiscono quando vengono esposti alla luce solare diretta o filtrata attraverso vetri, come quelli delle finestre, negli ambienti di utilizzo finale [57].

Lo strumento utilizzato per valutare l'esposizione alla luce dell'arco allo xeno è il Suntest XLS+ di Atlas.

○ Suntest XLS+ di Atlas: viene utilizzato per analizzare in tempi ridotti le alterazioni nelle proprietà di materiali e prodotti dovute all'esposizione a luce solare, temperatura e umidità. Alterazioni come scolorimento, ingiallimento o perdita di resistenza meccanica, che normalmente si sviluppano nell'arco di mesi o anni, possono essere riprodotte in pochi giorni o settimane attraverso test accelerati. Lo strumento consente di effettuare prove in conformità a diverse normative internazionali, tra cui le ISO 4892-1 e 4892-2. È dotato di un'area di esposizione di 39 x 30 cm (1170 cm<sup>2</sup>), una lampada allo xeno da 1700 W raffreddata ad aria, e supporta un range di irraggiamento variabile:

- 30–65 W/m<sup>2</sup> (300–400 nm)
- 0,26–0,62 W/m<sup>2</sup> (340 nm)
- 250–765 W/m<sup>2</sup> (300–800 nm)
- 45–130 klx (lux)

La temperatura durante i test è monitorata tramite sensore BST (Black Standard Temperature), con un range operativo compreso tra 45 e 100 °C [58].



Figura 20: Atlas Suntest xls+ [58]

## Protocollo sperimentale

Per l'analisi, i campioni devono essere posizionati orizzontalmente all'interno dello strumento. I materiali sottoposti al test comprendono due flaconi in HDPE, uno di PET e di rPET. L'obiettivo è osservare il comportamento di una sola faccia del campione, quella direttamente esposta alla radiazione della lampada allo xeno e confrontarlo con quella non esposta. Prima del posizionamento, vengono inseriti dei pesetti all'interno dei flaconi per evitarne lo spostamento, in quanto l'attivazione dello strumento comporta l'azionamento di un sistema di ventilazione che potrebbe muovere i campioni durante il test. Completato l'allestimento, si procede con la chiusura dello sportello e l'impostazione delle condizioni sperimentali. Il test prevede una temperatura del Black Standard Temperature (BST) di 65 °C, un'energia di irradiazione pari a 550 W/m<sup>2</sup>, per una durata di 150 ore.

Al termine del ciclo di esposizione, i campioni vengono rimossi e sottoposti ad analisi visiva al fine di valutare le eventuali alterazioni tra la superficie esposta alla radiazione e quella non esposta di ciascun flacone. Si riporta la tabella con i flaconi sottoposti ad analisi.

*Tabella 2: anagrafica dei flaconi sottoposti ad analisi*

<b>Campione</b>	<b>Polimero</b>
S	HDPE
C	HDPE
Si	PET
rSi	rPET



*Figura 21: disposizione dei campioni all'interno del Suntest XLS+ di Atlas*

### **4.3 VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA ALLA TRAZIONE SECONDO NORMA ASTM D638**

L'obiettivo della seguente analisi è valutare la resistenza alla trazione dei flaconi realizzati con polimeri plastici HDPE, PET e rPET, in conformità con la norma ASTM D638 [59]. Questo test permette di determinare le proprietà meccaniche dei materiali, quali resistenza, elasticità e deformabilità.

Gli strumenti utilizzati per effettuare la prova sono i seguenti:

- Tensile EZ-LX Shimadzu: strumento utilizzato nel mio studio per prove di resistenza alla trazione e alla compressione. È equipaggiato con un controller manuale che consente la regolazione della posizione della traversa e l'avvio/arresto del test in qualsiasi momento. Il sistema è compatibile con celle di carico fino a 5 kN, presenta una corsa utile di 740 mm e un intervallo di velocità compreso tra 0,001 e 1000 mm/min, con velocità di ritorno massima pari a 1500 mm/min. Le specifiche garantiscono l'esecuzione di prove affidabili su un'ampia gamma di carichi e materiali. È conforme alle norme ISO 7500-1, ASTM E4, EN 10002-2, JIS B7721 [60].



Figura 22: Shimadzu EZ-LX [60]

- Fustellatrice manuale: dispositivo manuale dotato di punzone con diametro pari a 17 mm, utilizzato per la produzione di provini analoghi a quelli descritti dalla norma ASTM D882.



Figura 23: fustellatrice manuale

- Fustellatrice 10020000 Noselab ATS s.r.l.: Questo modello di fustellatrice è utilizzata per prove di trazione e altre prove fisiche è necessario ricavare provini da lastre di materiali come plastiche, gomme, pelli, schiume, carta e tessuti tecnici. Tali materiali, grazie alle loro caratteristiche di durezza e spessore, consentono l'uso di opportune lame sagomate. È una fustellatrice manuale, dotata di leva di adeguata lunghezza per esercitare forze di taglio pari a 5kN (kg 500). La base di appoggio è realizzata in materiale plastico, con una dimensione di 200 x 200 mm, mentre la struttura in fusione di

ghisa, è progettata per il fissaggio al banco [61]. I campioni sono stati realizzati in conformità alla normativa ASTM D882 [62].



Figura 24: Fustellatrice manuale 10020000 Noselab ATS [61]

Protocollo sperimentale:

I campioni utilizzati sono stati ricavati dai flaconi, attraverso l'utilizzo di due fustellatrici in modo da ottenere provini conformi o similari, a quelli descritti nella norma ASTM D638.

Per la prima fustellatrice, è stato necessario rimuovere la sezione del collo e della base del flacone. Successivamente tagliare i flaconi lungo la linea di saldatura in modo tale da ottenere un foglio di materiale plastico. Dopo avere misurato con precisione la larghezza e la lunghezza del foglio, ricavare quattro provini, due di forma trasversale e due di forma longitudinale, entrambi di dimensione 4 cm x 2 cm, per ciascun materiale. Questi provini sono stati poi posizionati sotto la fustellatrice per ottenere i campioni simili a quelli previsti dalla norma ASTM. Lo spessore di questi campioni è circa 0,74 mm e la larghezza della sezione di analisi 2,60 mm. Per quanto riguarda la seconda fustellatrice, dopo aver effettuato gli stessi passaggi iniziali esplicitati sopra, per ottenere il foglio di materiale plastico; posizionare il foglio sotto la fustellatrice. Quest'ultima è dotata di un punzone a forma di provino descritto dalla norma ASTM D638. Una volta pressati i fogli piani, si otterranno campioni di lunghezza 8 cm e larghezza 1 cm. I campioni analizzati sono due, uno trasversale ed uno longitudinale

per ogni materiale. Lo spessore medio è circa 0,66 mm e la larghezza media della sezione di analisi è 3,44 mm.

Le prove di trazione sono state effettuate mediante l'utilizzo di un tensimetro Shimadzu EZ-LX, a cui è stata montata una cella di carico di 50 N.

#### Parametri dello strumento

- Distanza tra le due pinze: 18 mm, per i campioni prodotti dalla prima fustellatrice, e 40 mm per quelli prodotti con la seconda fustellatrice.
- La velocità di spostamento: 10 mm/min.
- Lo spostamento massimo: 500 mm.
- Cella di carico: 50 N

I campioni analizzati derivano da 12 flaconi: quattro non sottoposti ad alcun trattamento (T0), quattro analizzati dopo cicli di vuoto secondo norma ASTM D5094 e posizionamento in camera climatica (T1) descritti nel metodo 4.1, ed infine altri quattro dopo trattamento in Suntest xls+ secondo norma ISO 4892-2 (T2), descritto nel metodo 4.2. Dai flaconi sottoposti al metodo 4.1 e 4.2, sono stati ottenuti campioni esclusivamente dalla prima fustellatrice; mentre per quelli sottoposti a nessun trattamento, sono stati ottenuti sia dalla prima sia dalla seconda. Da quelli sottoposti al metodo 4.1, i provini sono stati realizzati due volte: una prima volta terminato il test discusso nel seguente metodo, e la seconda dopo un mese di conservazione a temperatura ambiente.

In tabella si riportano i provini realizzati dalla prima fustellatrice.

Tabella 3: anagrafica dei provini derivati da HDPE

<b>Campione</b>	<b>Polimero</b>	<b>Posizionamento</b>	<b>Condizioni</b>
S-T0-T	HDPE	Trasversale	T0
S-T0-L	HDPE	Longitudinale	T0
S-T1-1-T	HDPE	Trasversale	T1
S-T1-1-L	HDPE	Longitudinale	T1
S-T1-2-T	HDPE	Trasversale	T1
S-T1-2-L	HDPE	Longitudinale	T1
S-T2-T	HDPE	Trasversale	T2
S-T2-L	HDPE	Longitudinale	T2
C-T0-T	HDPE	Trasversale	T0
C-T0-L	HDPE	Longitudinale	T0
C-T1-1-T	HDPE	Trasversale	T1
C-T1-1-L	HDPE	Longitudinale	T1
C-T1-2-T	HDPE	Trasversale	T1
C-T1-2-L	HDPE	Longitudinale	T1
C-T2-T	HDPE	Trasversale	T2
C-T2-L	HDPE	Longitudinale	T2

Tabella 4: anagrafica dei provini derivati dal PET

<b>Campione</b>	<b>Polimero</b>	<b>Posizionamento</b>	<b>Condizioni</b>
Si-T0-T	PET	Trasversale	T0
Si-T0-L	PET	Longitudinale	T0
Si-T1-1-T	PET	Trasversale	T1
Si-T1-1-L	PET	Longitudinale	T1
Si-T1-2-T	PET	Trasversale	T1
Si-T1-2-L	PET	Longitudinale	T1
Si-T2-T	PET	Trasversale	T2
Si-T2-L	PET	Longitudinale	T2
rSi-T0-T	rPET	Trasversale	T0
rSi-T0-L	rPET	Longitudinale	T0
rSi-T1-1-T	rPET	Trasversale	T1
rSi-T1-1-L	rPET	Longitudinale	T1
rSi-T1-2-T	rPET	Trasversale	T1
rSi-T1-2-L	rPET	Longitudinale	T1
rSi-T2-T	rPET	Trasversale	T2
rSi-T2-L	rPET	Longitudinale	T2

Di seguito si riportano i provini realizzati con la seconda fustellatrice.

Tabella 5: legenda provini realizzati con la seconda fustellatrice

Campione	Polimero	Posizione
S-T	HDPE	Trasversale
S-L	HDPE	Longitudinale
C-T	HDPE	Trasversale
C-L	HDPE	Longitudinale
Si-T	PET	Trasversale
Si-L	PET	Longitudinale
rSi-T	rPET	Trasversale
rSi-L	rPET	Longitudinale

Sotto, sono riportate alcune immagini dei campioni realizzati e le fasi del processo.



Figura 25: campioni realizzati con la prima fustellatrice

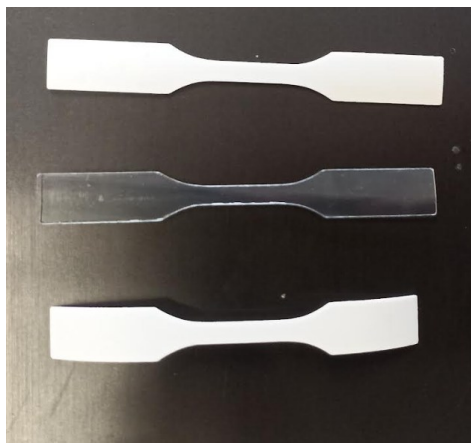


Figura 26: campioni realizzati con la fustellatrice manuale 10020000 Noselab ATS

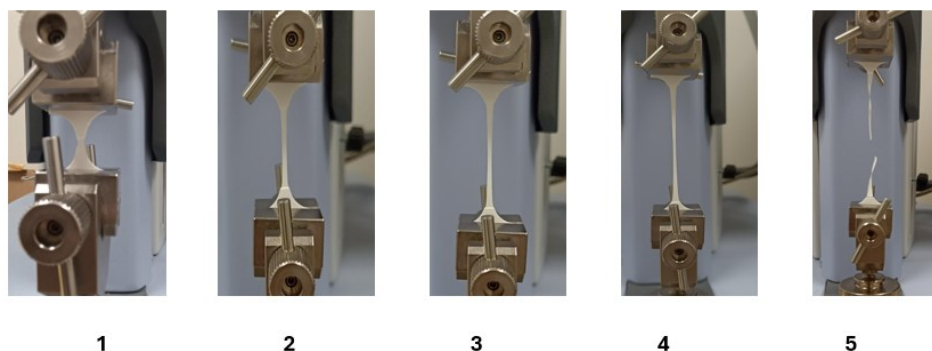


Figura 27: fasi del processo

Legenda:

- I. Il campione è posizionato tra le due pinze del tensimetro, pronto per l'avvio del test, ad una distanza di 18 mm.
- II. Il test di trazione ha avuto inizio e il provino ha raggiunto il punto di snervamento (Yield Point).
- III. La fase di trazione prosegue, con un progressivo allungamento del campione.
- IV. Il provino ha raggiunto il limite massimo di estensione.
- V. Si osserva la rottura del campione polimerico.

#### 4.4 IDENTIFICAZIONE DEI POLIMERI MEDIANTE NIR

Identificazione dei polimeri plastici utilizzando la spettroscopia vicino all'infrarosso, con MicroNIR 1700 EC.

- MicroNIR 1700 EC di VIAVI: Si tratta di uno spettrometro portatile che opera nell'intervallo spettrale compreso tra 908 e 1676 nm, progettato per applicazioni in ambito farmaceutico, alimentare, agricolo e industriale. Permette di effettuare analisi rapide e non distruttive direttamente sul campo o in linea di produzione. Il dispositivo è equipaggiato con due lampade al tungsteno sottovuoto, con una durata nominale superiore a 40.000 ore. Con

un diametro di 47 mm, un'altezza di 60 mm e un peso di soli 116 grammi, il MicroNIR 1700 EC si distingue per la sua compattezza, leggerezza e portabilità [63]. Tra le applicazioni svolte, è stato utilizzato con successo per l'identificazione di polimeri, dimostrando la sua efficacia anche nella caratterizzazione dei materiali [64].



*Figura 28: MicorNIR 1700 EC [63]*

#### Protocollo sperimentale

Per determinare la composizione polimerica dei flaconi analizzati, è stato necessario rimuovere entrambe le estremità del contenitore, ovvero la base e l'area del collo. Una volta ottenuto il cilindro senza estremità, si procede a tagliare i flaconi lungo una delle due linee di saldatura, ricavando così un foglio piano. In base alla tipologia, sono stati ottenuti fogli di HDPE, PET e rPET.

Completata la preparazione dei campioni, si è proceduto con l'analisi spettroscopica. Prima di procedere con l'analisi, si rileva il bianco mediante l'utilizzo di un supporto color oro. Ogni campione è stato analizzato in tre punti specifici: l'estremità superiore (precedentemente sede del collo (a)), il centro (b) e la base (c). Per ciascuna zona sono state effettuate tre misurazioni (triplicati). Sono state analizzate sia le superfici interne sia esterne.

Gli spettri acquisiti sono stati confrontati tra di loro e con quelli disponibili in letteratura, al fine di identificare la composizione dei materiali e la

variabilità tra le diverse zone di acquisizione dello spettro. Per determinare la variabilità, è stata effettuata l'analisi delle componenti principali (PCA). La PCA è una tecnica che consente di trasformare un numero di variabili correlate in un numero minore, chiamate componenti principali, mediante principi matematici. La PCA può essere visualizzata sotto forma di Scores e Loadings. I loadings definiscono la combinazione delle variabili di una componente. Gli scores rappresentano le coordinate del campione nel nuovo sistema di riferimento definito dai componenti principali.

L'analisi è stata effettuata sui flaconi conservati a temperatura ambiente (T0), sottoposti a cicli di vuoto e camera climatica (T1), paragrafo 4.1, e sottoposti ad esposizione a lampada ad arco di xeno, metodo descritto nel paragrafo 4.5 (T2).

I campioni analizzati sono i seguenti:

Tabella 6: legenda campioni S analizzati

<b>Campione</b>	<b>Descrizione</b>
S-T0-Ext-a	HDPE superficie esterna, collo, T0
S-T0-Ext-b	HDPE superficie esterna, centro, T0
S-T0-Ext-c	HDPE superficie esterna, base, T0
S-T0-Int-a	HDPE superficie interna, collo, T0
S-T0-Int-b	HDPE superficie interna, centro, T0
S-T0-Int-c	HDPE superficie interna, base, T0
S-T1-Ext-a	HDPE superficie esterna, collo, T1
S-T1-Ext-b	HDPE superficie esterna, centro, T1
S-T1-Ext-c	HDPE superficie esterna, base, T1
S-T1-Int-a	HDPE superficie interna, collo, T1
S-T1-Int-b	HDPE superficie interna, centro, T1
S-T1-Int-c	HDPE superficie interna, base, T1
S-T2-Ext-a	HDPE superficie esterna, collo, T2
S-T2-Ext-b	HDPE superficie esterna, centro, T2
S-T2-Ext-c	HDPE superficie esterna, base, T2
S-T2-Int-a	HDPE superficie interna, collo, T2
S-T2-Int-b	HDPE superficie interna, centro, T2
S-T2-Int-c	HDPE superficie interna, base, T2

Tabella 7: anagrafica dei campioni C sottoposti a prova NIR

<b>Campione</b>	<b>Descrizione</b>
C-T0-Ext-a	HDPE superficie esterna, collo, T0
C-T0-Ext-b	HDPE superficie esterna, centro, T0
C-T0-Ext-c	HDPE superficie esterna, base, T0
C-T0-Int-a	HDPE superficie interna, collo, T0
C-T0-Int-b	HDPE superficie interna, centro, T0
C-T0-Int-c	HDPE superficie interna, base, T0
C-T1-Ext-a	HDPE superficie esterna, collo, T1
C-T1-Ext-b	HDPE superficie esterna, centro, T1
C-T1-Ext-c	HDPE superficie esterna, base, T1
C-T1-Int-a	HDPE superficie interna, collo, T1
C-T1-Int-b	HDPE superficie interna, centro, T1
C-T1-Int-c	HDPE superficie interna, base, T1
C-T2-Ext-a	HDPE superficie esterna, collo, T2
C-T2-Ext-b	HDPE superficie esterna, centro, T2
C-T2-Ext-c	HDPE superficie esterna, base, T2
C-T2-Int-a	HDPE superficie interna, collo, T2
C-T2-Int-b	HDPE superficie interna, centro, T2
C-T2-Int-c	HDPE superficie interna, base, T2

Tabella 8: anagrafica dei campioni Si

<b>Campione</b>	<b>Descrizione</b>
Si-T0-Ext-a	PET superficie esterna, collo, T0
Si-T0-Ext-b	PET superficie esterna, centro, T0
Si-T0-Ext-c	PET superficie esterna, base, T0
Si-T0-Int-a	PET superficie interna, collo, T0
Si-T0-Int-b	PET superficie interna, centro, T0
Si-T0-Int-c	PET superficie interna, base, T0
Si-T1-Ext-a	PET superficie esterna, collo, T1
Si-T1-Ext-b	PET superficie esterna, centro, T1
Si-T1-Ext-c	PET superficie esterna, base, T1
Si-T1-Int-a	PET superficie interna, collo, T1
Si-T1-Int-b	PET superficie interna, centro, T1
Si-T1-Int-c	PET superficie interna, base, T1
Si-T2-Ext-a	PET superficie esterna, collo, T2
Si-T2-Ext-b	PET superficie esterna, centro, T2
Si-T2-Ext-c	PET superficie esterna, base, T2
Si-T2-Int-a	PET superficie interna, collo, T2
Si-T2-Int-b	PET superficie interna, centro, T2
Si-T2-Int-c	PET superficie interna, base, T2

Tabella 9: legenda campioni rSi analizzati

<b>Campione</b>	<b>Descrizione</b>
rSi-T0-Ext-a	rPET superficie esterna, collo, T0
rSi-T0-Ext-b	rPET superficie esterna, centro, T0
rSi-T0-Ext-c	rPET superficie esterna, base, T0
rSi-T0-Int-a	rPET superficie interna, collo, T0
rSi-T0-Int-b	rPET superficie interna, centro, T0
rSi-T0-Int-c	rPET superficie interna, base, T0
rSi-T1-Ext-a	rPET superficie esterna, collo, T1
rSi-T1-Ext-b	rPET superficie esterna, centro, T1
rSi-T1-Ext-c	rPET superficie esterna, base, T1
rSi-T1-Int-a	rPET superficie interna, collo, T1
rSi-T1-Int-b	rPET superficie interna, centro, T1
rSi-T1-Int-c	rPET superficie interna, base, T1
rSi-T2-Ext-a	rPET superficie esterna, collo, T2
rSi-T2-Ext-b	rPET superficie esterna, centro, T2
rSi-T2-Ext-c	rPET superficie esterna, base, T2
rSi-T2-Int-a	rPET superficie interna, collo, T2
rSi-T2-Int-b	rPET superficie interna, centro, T2
rSi-T2-Int-c	rPET superficie interna, base, T2

#### **4.5 TEST DI COMPRESSIONE**

Il presente studio ha l'obiettivo di valutare la resistenza alla compressione dei flaconi realizzati con materiali termoplastici, in conformità con la norma ASTM D2659, dell'American Society for Testing and Materials International [65].

Lo scopo non è quello di portare i campioni fino a rottura, bensì verificare eventuali deformazioni permanenti nella struttura in seguito all'applicazione di piccole pressioni.

## Protocollo sperimentale

L'attività sperimentale è stata condotta utilizzando lo strumento Shimadzu Tensile EZ-LX, a cui è stata montata una cella di carico di 50 N, equipaggiata con un tubo specifico per comprimere i campioni trasversalmente.

I flaconi sono stati posizionati orizzontalmente su una base in alluminio, così da poter applicare una compressione orizzontale e non verticale.

Sono stati sviluppati due metodi di compressione distinti.

Parametri strumentali metodo 1 che utilizza una modalità di compressione a controllo corsa ciclico:

- Fondo scala: 50 N
- Velocità di corsa: 300 mm/min
- Spostamento limite: 15 mm
- Spostamento max: 25 mm
- Distanza iniziale flacone – tubo: 5 mm

Parametri strumentali metodo 2, si basa su una compressione a controllo forza ciclico:

- Fondo scala: 50 N
- Velocità di corsa: 100 mm/min
- Spostamento: 15 mm
- Forza limite: 40 N
- Forza max: 45 N
- Distanza iniziale flacone – tubo: 5 mm

Entrambi metodi, prevedono un'analisi composta da mille cicli di compressione. Ogni campione è stato testato in due configurazioni distinte: nella prima, la compressione è stata applicata con la linea di saldatura orientata trasversalmente rispetto alla direzione del carico; nella seconda invece, con la linea di saldatura posizionata longitudinalmente, ossia lungo l'asse di compressione.

Al termine di ogni ciclo di prova, si procede con una valutazione visiva delle deformazioni eventualmente indotte nei flaconi.

Campioni analizzati:

Sono stati analizzati 12 flaconi, di cui quattro nuovi (T0), quattro sottoposti a cicli di vuoto secondo il metodo 4.1 (T1), e quattro sottoposti ad esposizione solare con lampade ad arco di xeno, descritto nel metodo 4.2 (T2).

- Metodo 1: dedicato ai flaconi Squeeze 200 ml realizzati in HDPE.
- Metodo 2: applicato per i campioni realizzati in HDPE, PET, rPET.

In tabella si riportano tutti i campioni analizzati.

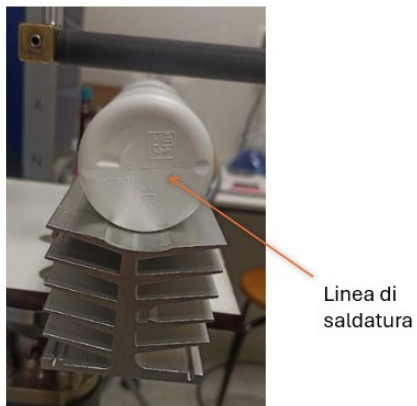
Tabella 10: anagrafica dei campioni analizzati

Campione	Polimero	Metodo	Posizionamento	Condizioni
S-T0-T	HDPE	1	Trasversale	T0
S-T0-L	HDPE	1	Longitudinale	T0
S-T1-T	HDPE	1	Trasversale	T1
S-T1-L	HDPE	1	Longitudinale	T1
S-T2-T	HDPE	1	Trasversale	T2
S-T2-L	HDPE	1	Longitudinale	T2
C-T0-T	HDPE	2	Trasversale	T0
C-T0-L	HDPE	2	Longitudinale	T0
C-T1-T	HDPE	2	Trasversale	T1
C-T1-L	HDPE	2	Longitudinale	T1
C-T2-T	HDPE	2	Trasversale	T2
C-T2-L	HDPE	2	Longitudinale	T2
Si-T0-T	PET	2	Trasversale	T0
Si-T0-L	PET	2	Longitudinale	T0
Si-T1-T	PET	2	Trasversale	T1
Si-T1-L	PET	2	Longitudinale	T1
Si-T2-T	PET	2	Trasversale	T2
Si-T2-L	PET	2	Longitudinale	T2
rSi-T0-T	rPET	2	Trasversale	T0
rSi-T0-L	rPET	2	Longitudinale	T0
rSi-T1-T	rPET	2	Trasversale	T1
rSi-T1-L	rPET	2	Longitudinale	T1
rSi-T2-T	rPET	2	Trasversale	T2
rSi-T2-L	rPET	2	Longitudinale	T2

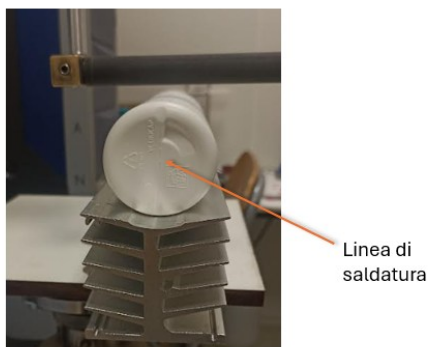
Di seguito sono riportate immagini riguardo lo strumento il posizionamento dei campioni e le fasi del processo.



*Figura 29: Tensile EZ-LX equipaggiato con tubo specifico*



*Figura 30: Posizionamento del contenitore con linea di saldatura trasversale*



*Figura 31: Posizionamento del contenitore con linea di saldatura longitudinale*

Fasi del processo:

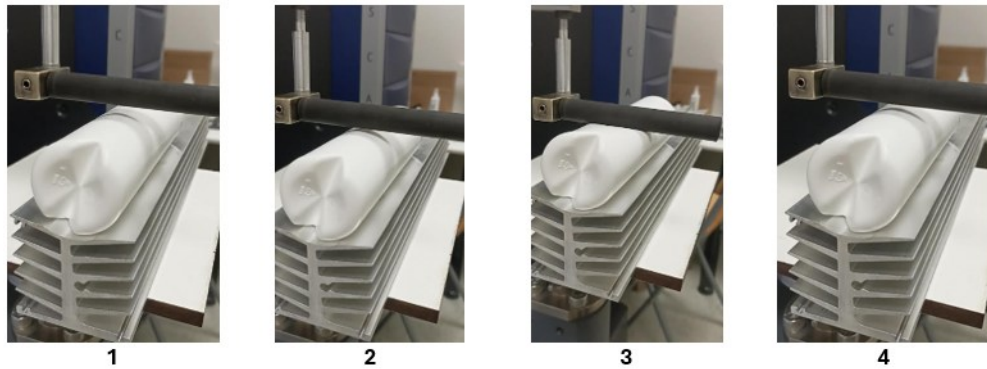


Figura 32: rappresentazione del processo di compressione

Legenda:

1. Il campione ed il tubo si trovano ad una distanza iniziale di 5 mm.
2. Il ciclo inizia con la fase di avanzamento del tubo.
3. Il tubo sta applicando una pressione sul flacone, generando una deformazione.
4. La corsa è completata; lo strumento è nella fase di ritorno alla posizione iniziale per l'avvio del ciclo successivo.

## 5 RISULTATI

### 5.1 RISULTATI METODO 4.1

Di seguito sono riportate le tabelle relative ai cicli di vuoto effettuati, sia sui campioni mantenuti a temperatura ambiente, sia su quelli sottoposti a condizioni accelerate. I dati ricavati ad ogni analisi riguardano le masse dei flaconi, espresse in grammi, misurate al ciclo 0 e dopo ogni ciclo di prova.

Per i campioni mantenuti a temperatura ambiente, sono stati effettuati 35 cicli di prova per osservare segni di cedimenti strutturali, con successiva fuoriuscita di liquido da uno dei contenitori.

Tabella 11 valori di massa dei campioni a temperatura ambiente fino al ciclo di perdita

<b>NOME</b>	<b>Massa Ciclo 0 (g)</b>	<b>Massa ciclo 1 (g)</b>	<b>Massa ciclo 5 (g)</b>	<b>Massa ciclo 10 (g)</b>	<b>Massa ciclo 20 (g)</b>	<b>Massa ciclo 30 (g)</b>	<b>Massa ciclo 35 (g)</b>
<b>S-T1</b>	210,47	210,50	210,48	210,47	210,46	210,07	171,03
<b>C-T1</b>	254,19	254,21	254,18	254,16	253,99	253,99	253,99
<b>Si-T1</b>	130,00	130,00	130,00	129,98	129,93	129,93	129,93
<b>rSi-T1</b>	128,80	128,84	128,80	128,80	128,77	128,75	128,76

Per quanto riguarda i flaconi sottoposti in camera climatica a condizioni di temperatura di 40°C e 75% di umidità relativa, sono stati impiegati solo 17 cicli prima di osservare la perdita in uno dei campioni.

Tabella 12: valori di massa dei campioni in condizioni accelerate fino al ciclo di perdita

<b>NOME</b>	<b>Massa Ciclo 0 (g)</b>	<b>Massa ciclo 1 (g)</b>	<b>Massa ciclo 5 (g)</b>	<b>Massa ciclo 10 (g)</b>	<b>Massa ciclo 15 (g)</b>	<b>Massa ciclo 16 (g)</b>	<b>Massa ciclo 17 (g)</b>
<b>S-T1</b>	221,83	221,77	221,77	220,60	220,61	220,60	213,60
<b>C-T1</b>	270,47	270,47	270,43	270,39	270,22	270,19	270,13
<b>Si-T1</b>	130,27	130,26	139,26	130,22	130,09	130,09	130,10
<b>rSi-T1</b>	129,65	129,65	129,61	129,59	129,59	129,58	129,58

Dalle analisi emerge che entrambi i campioni di HDPE Squeeze (S-T0 e S-T1) hanno subito rottura. In particolare, il flacone a condizioni ambientali ha impiegato 35 cicli prima di osservare la rottura, mentre in condizioni accelerate solo 17 cicli, meno della metà.

Questi dati evidenziano come l'esposizione ad elevate temperature e livelli di umidità, possano accelerare il processo di degradazione dei materiali, compromettendone la resistenza fisica e le proprietà meccaniche.

Tra i risultati si osserva anche una differenza di resistenza al vuoto tra i campioni realizzati in HDPE, S e C. Tale differenza si osserva sia a condizioni ambientali sia accelerate, confermando la maggior vulnerabilità del flacone S realizzato in polietilene ad alta densità.

Al contrario, nei campioni Si e rSi, realizzati in PET vergine e PET riciclato non si è osservata perdita del contenuto in entrambe le condizioni, sottolineando una maggior resistenza rispetto al campione S (HDPE).

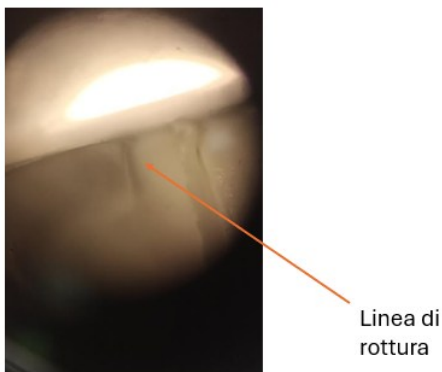
Sotto è riportata un'immagine che mostra la deformazione del campione di S-T0 dopo il ciclo n° 35, insieme ad una prova con colorante blu alimentare per osservare il foro di rottura. Il foro di uscita è stato successivamente visualizzato al microscopio.



*Figura 33: flacone di S-T0 al ciclo n°35*



*Figura 34: prova di sottovuoto con colorante per dimostrare la perdita del campione S-T0*



*Figura 35: visualizzazione microscopica della perdita di S-T0*

Ulteriori immagini, riportate di seguito, mostrano il flacone di S-T1 al termine del diciassettesimo ciclo, e il controllo con colorante blu per osservare il foro di perdita.



*Figura 36: flacone di S-T1 al ciclo n°17*



*Figura 37: prova di sottovuoto con colorante per dimostrare la perdita del campione S-T1*

## **5.2 RISULTATI METODO 4.2**

Di seguito sono riportate le immagini dei flaconi analizzati con il Suntest xls+. Sono state effettuate valutazioni visive e confronti tra le superfici esposte all'esposizione alla lampada ad arco di xeno e quelle non esposte. Le caratteristiche osservabili riguardano l'aspetto estetico, tra cui colore, ingiallimento, perdita di lucentezza, opacizzazione, imbrunimento ed eventuale cambiamento della forma.

Dall'analisi condotta, è possibile osservare quali sono le superfici esposte alla luce per ogni flacone esaminato. Di seguito sono riportate le superfici esposte dei flaconi S e C di HDPE.

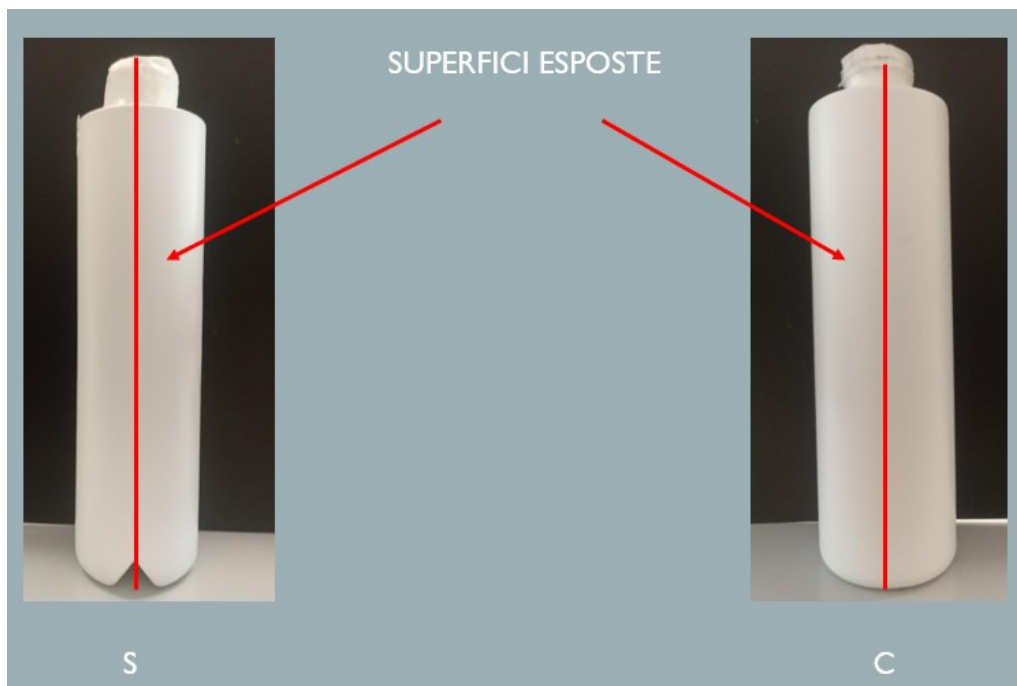


Figura 38: superfici esposte al trattamento di S e C realizzati in HDPE

In seguito al trattamento, nei campioni S e C, entrambi di color bianco, non sono state evidenziate variazioni cromatiche, fenomeni di ingiallimento e nemmeno una variazione della forma.

In figura sotto, si riposta le superfici esposte dei campioni rSi e Si.

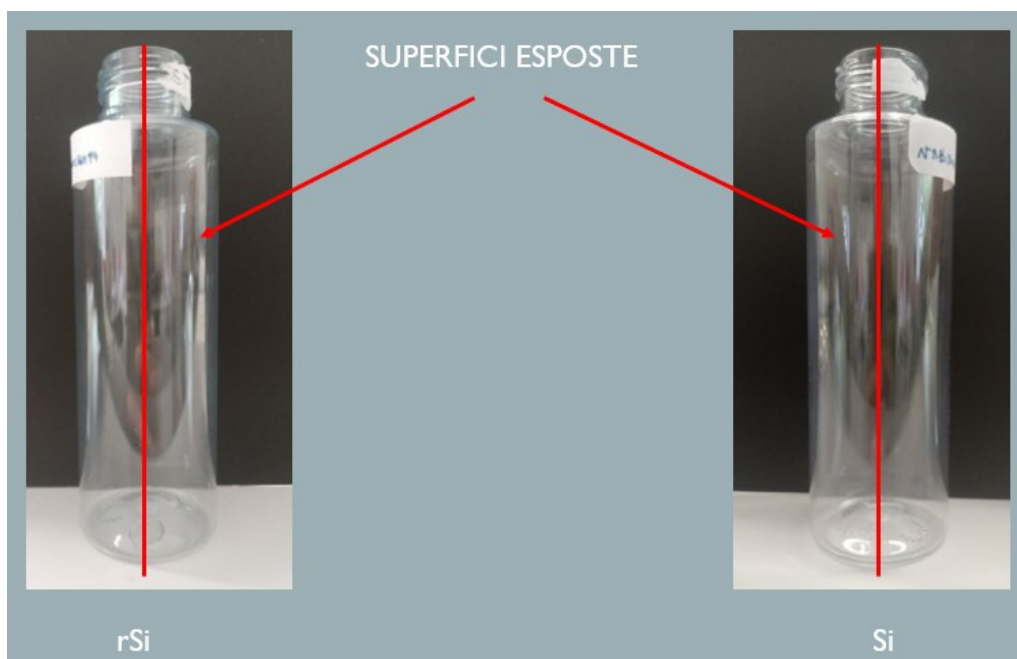
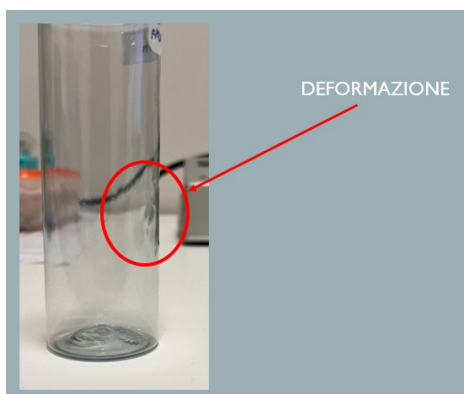


Figura 39: superfici esposte al trattamento di rSi e Si realizzati in rPET e PET

Anche nei campioni di rSi e Si, entrambi di natura trasparenti, non sono stati osservati imbrunimenti e opacizzazione delle superfici esposte. Tuttavia, nel campione riciclato si è verificata una deformazione nella superficie non esposta direttamente alla luce, corrispondente alla sagoma del pesetto utilizzato per mantenerlo ancorato alla griglia.

Secondo banche dati, la temperatura di rammollimento del polietilentereftalato è circa 70-80°C. La deformazione osservata nel flacone rSi potrebbe essere attribuita al raggiungimento di tale temperatura, ed è plausibile che, a causa del processo di riciclo, sia di qualche grado inferiore rispetto a quella del PET.



*Figura 40: deformazione sulla superficie non esposta di rSi*

Dai risultati, quindi, si evince che cambiamenti estetici dei flaconi come cambiamento di colore, imbrunimento e opacizzazione non si sono verificati. Pertanto, per determinare tali alterazioni, si propone un trattamento con gli stessi parametri di irraggiamento, temperatura della camera e temperatura del BST, ma prolungando il tempo di esposizione. Riguardo le proprietà meccaniche, i flaconi sono stati sottoposti a test di resistenza alla compressione, descritto nel metodo 4.5 e test di resistenza alla trazione, secondo quanto descritto nel metodo 4.3; con l'obiettivo di osservare e confrontare i valori ottenuti con quelli di campioni analizzati in differenti condizioni sperimentali.

### **5.3 RISULTATI METODO 4.3**

I risultati delle analisi sono riportati nelle tabelle seguenti. I parametri presi in considerazione sono il punto di snervamento, la forza massima, lo spostamento, il modulo elastico. Nelle tabelle sono indicati i valori medi e le deviazioni standard dei parametri per ciascuna tipologia di campione analizzato. Il punto di snervamento, detto anche yield point, indica il momento nel quale il campione passa da una deformazione elastica a plastica, non tornando così alla sua forma originale. Lo spostamento consente di osservare l'allungamento massimo del provino prima della rottura; la forza è necessaria per determinare la deformazione e la rottura del campione. Il modulo elastico misura la rigidità del materiale durante la fase di deformazione elastica.

Di seguito sono riportate le tabelle 13, 14, 15 e 16, dei provini realizzati con la prima fustellatrice ed analizzati in diverse condizioni sperimentali.

*Tabella 13: risultati analisi campioni a temperatura ambiente realizzati con la prima fustellatrice*

NOME	MEDIA spostamento (mm)	DEV ST Spostamento	MEDIA forza (N)	DEV ST forza	MEDIA Modulo elastico (N/mm <sup>2</sup> )	DEV ST mod elastico	MEDIA YP (N)	DEV ST YP
S-T0-T	74,782	4,903	44,370	9,384	713,494	72,576	27,047	2,096
S-T0-L	78,548	11,745	51,003	0,002	808,324	45,420	28,205	2,004
C-T0-T	0,544	0,544	51,364	0,149	277,340	33,523		
C-T0-L	0,428	0,034	51,261	0,012	497,590	41,784		
Si-T0-T	0,423	0,030	51,683	0,053	608,311	57,696		
Si-T0-L	0,207	0,007	50,538	1,925	668,080	25,383		r
rSi-T0-T	0,414	0,100	51,800	0,093	1.100,660	203,198		
rSi-T0-L	0,222	0,005	51,986	0,225	1.045,520	320,882		

Dai risultati delle analisi di resistenza alla trazione dei provini mantenuti a temperatura ambiente (T0), realizzati con la prima fustellatrice, si osserva che in tutti i campioni ottenuti da C, Si, rSi, non è stato possibile determinare né la rottura né il punto di snervamento, suggerendo la necessità di utilizzare una cella di carico con maggior capacità. Per i provini ricavati dal flacone S invece, sia S-T0-T sia S-T0-L, lo

snervamento registrato ha un valore medio di circa 27 e 28 N. Solo il campione S-T0-T preso vicino alla base del collo (S-T0-T n°2) si è rotto, gli altri necessitano di una cella di carico superiore ai 50 N per determinare la rottura.

Tabella 14: risultati analisi dei campioni sottoposti a cicli di vuoto e camera climatica (T1), realizzati dalla prima fustellatrice

NOME	MEDIA spostamento (mm)	DEV ST Spostamento	MEDIA forza (N)	DEV ST forza	MEDIA Modulo elastico (N/mm <sup>2</sup> )	DEV ST mod elastico	MEDIA YP (N)	DEV ST YP
S-T1-1-T	55,817	8,370	42,205	12,506	696,697	125,898	29,428	4,148
S-T1-1-L	63,329	6,559	48,213	3,952	838,506	125,603	30,808	0,965
C-T1-1-T	0,647	0,109	51,256	0,205	322,872	34,429		
C-T1-1-L	0,412	0,010	51,349	0,026	521,491	31,912		
Si-T1-1-T	0,390	0,121	51,842	0,032	1.736,175	1.629,115		
Si-T1-1-L	0,259	0,037	51,770	0,094	1.001,930	298,310		r
rSi-T1-1-T	0,371	0,079	51,909	0,052	1.154,370	291,812		
rSi-T1-1-L	0,251	0,006	52,105	0,131	1.206,190	37,608		

I provini ricavati dal flacone S sottoposto a metodo 4.1 (T1), possiedono un punto di snervamento tra 29 e 30 N. A differenza di quelli analizzati al T0, non solo si osserva la rottura del campione in posizione trasversale, ricavato vicino al collo del flacone (S-T1-1-T n°2), ma anche di quello in posizione longitudinale (S-T1-1-L n°2). Tale comportamento è probabilmente dovuto alle condizioni di temperatura e umidità ed ai cicli di vuoto cui sono stati sottoposti i flaconi, che potrebbero aver alterato le proprietà meccaniche del materiale.

Anche in questo caso, per i campioni C-T1-1, Si-T1-1 e rSi-T1-1, non è stato possibile determinare il valore di yield point.

Tabella 15: risultati analisi dei campioni sottoposti a cicli di vuoto e camera climatica realizzati dalla prima fustellatrice dopo un mese fuori dalla camera

NOME	MEDIA spostamento (mm)	DEV ST spostamento	MEDIA forza (N)	DEV ST forza	MEDIA Modulo elastico (N/mm <sup>2</sup> )	DEV ST mod elastico	MEDIA YP (N)	DEV ST YP
S-T1-2-T	61,120	18,116	44,247	3,746	679,750	178,143	27,827	24,497
S-T1-2-L	48,538	30,057	39,616	7,487	579,539	70,243	35,732	1,994
C-T1-2-T	0,477	0,036	51,325	0,042	433,411	43,818		
C-T1-2-L	0,379	0,007	51,320	0,114	549,849	5,460		
Si-T1-2-T	0,335	0,098	51,817	0,043	1.915,278	1.779,861		
Si-T1-2-L	0,229	0,027	52,104	0,236	1.163,229	406,009		r
rSi-T1-2-T	0,355	0,119	51,937	0,294	1.407,478	498,068		
rSi-T1-2-L	0,224	0,007	50,306	2,405	1.328,956	67,955		

La prova sui campioni sottoposti a metodo 4.1, è stata effettuata una seconda volta dopo un mese (T1-2). In tutti i campioni di S, sia S-T1-2-L sia S-T1-2-T, si è osservato il punto di rottura. La forza applicata media e lo spostamento medio necessari risultano inferiori rispetto a quelli rilevati dopo il primo trattamento (T1-1). La forza media applicata per i provini realizzati trasversalmente ha un valore pari a 44 N, mentre quelli realizzati longitudinalmente di 39 N, contro i 42 e 48 al T1-1. I valori di spostamento sono di 61 e 48 N circa, rispetto ai 55 e 63 N dei provini analizzati subito dopo trattamento.

Nei provini ottenuti dai flaconi C, Si e rSi non è stato possibile determinare lo snervamento. La forza necessaria per determinarlo è maggiore di 50N.

Tabella 16: risultati analisi dei campioni esposti a lampada ad arco di xeno realizzati con la prima fustellatrice

NOME	MEDIA spostamento (mm)	DEV ST Spostamento	MEDIA forza (N)	DEV ST forza	MEDIA Modulo elastico (N/mm <sup>2</sup> )	DEV ST mod elastico	MEDIA YP (N)	DEV ST YP
S-T2-T	77,412	10,992	44,163	9,637	619,271	59,250	29,836	3,645
S-T2-L	72,699	7,486	44,384	5,303	655,563	51,482	36,620	1,072
C-T2-T	0,754	0,146	51,232	0,087	316,140	21,377		
C-T2-L	0,455	0,042	51,360	0,232	437,281	4,606		
Si-T2-T	0,456	0,029	52,032	0,007	689,728	361,962		
Si-T2-L	0,219	0,043	52,173	0,273	913,117	296,251		
rSi-T2-T	0,372	0,043	52,201	0,113	818,914	6,664		
rSi-T2-L	0,204	0,004	52,053	0,031	755,720	92,969		

Sono stati realizzati provini anche dai flaconi posizionati all'interno dello strumento Suntest xls+ (T2). Dalle analisi si osserva che i campioni ottenuti dai flaconi C, Si e rSi, non si sono rotti e non è stato possibile rilevare il punto di snervamento, analogamente a quanto osservato negli altri campioni analizzati. Al contrario, come per i campioni analizzati al T1-2, tutti i provini S-T2 si sono rotti, suggerendo che le condizioni sperimentali imposte abbiano causato alterazioni meccaniche nel flacone. In questo caso, il valore di forza media necessaria per la rottura è intermedio ai campioni al T1-1 e T1-2, circa di 44 N per entrambe le tipologie. I valori di spostamento invece sono maggiori, pari a 77 e 72 mm.

Nella tabella sotto riportata, sono indicati i risultati dell'analisi condotta sui campioni realizzati con la seconda fustellatrice.

Tabella 17: risultati analisi campioni prodotti dalla seconda fustellatrice

<b>NOME</b>	<b>Spostamento (mm)</b>	<b>Forza (N)</b>	<b>Modulo elastico (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Yield Point (N)</b>
S-L-Prova	103,641	41,877	256,575	22,5536
S-T	207,188	51,001	213,445	23,7774
S-L	198,379	51,002	255,648	23,9003
C-T	1,759	51,073	134,068	
C-L	0,839	51,303	120,988	
Si-T	1,160	51,507	755,039	
Si-L	0,313	51,830	369,558	
rSi-T	1,234	51,655	769,559	
rSi-L	0,288	51,931	392,968	

Dalle analisi dei provini realizzati con la fustellatrice 10020000 Noselab, è emerso che la cella di carico da 50 N non è risultata adeguata per i campioni C, Si e rSi, realizzati con HDPE, PET e rPET, impedendo la determinazione dello yield point.

Per quanto riguarda i campioni S, realizzati con HDPE, lo snervamento è stato osservato in tutti i provini, ma la rottura si è verificata solo nel campione S-L-Prova.

I risultati delle prove indicano che i procedimenti descritti nei metodi 4.1 e 4.2, hanno alterato le proprietà meccaniche dei materiali, fino a consentire la rottura di tutti provini S ottenuti con la prima fustellatrice.

Poiché, per i provini realizzati con gli altri materiali, non è stato possibile né rilevare la rottura né il punto di snervamento, per analisi future, si

consiglia di utilizzare una cella di carico superiore ai 50 N, tale da coprire l'intero range di forza necessario per ciascun campione.

Di seguito sono riportati alcuni grafici dei campioni analizzati sia in condizioni ambientali sia in condizioni accelerate prodotti dalla prima e seconda fustellatrice.

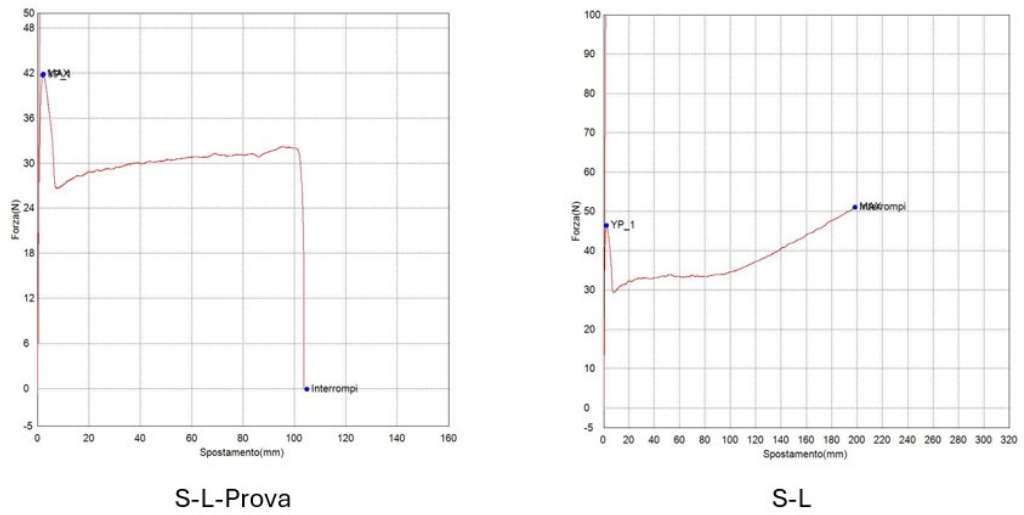


Figura 41: grafici resistenza alla trazione dei campioni S-L-Prova e S-L

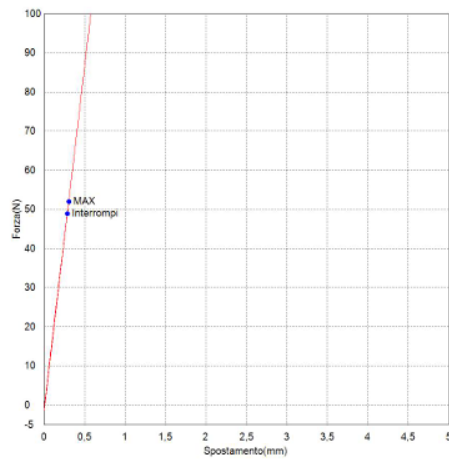
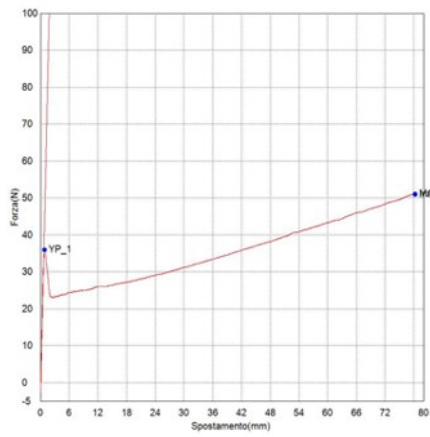
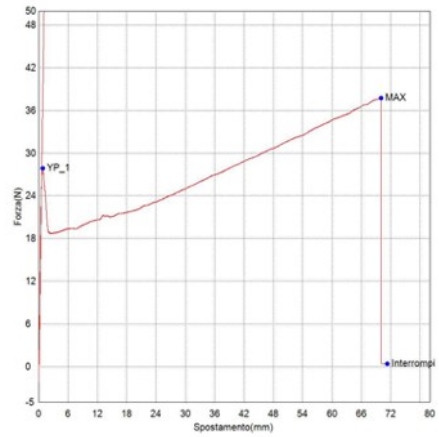


Figura 42: grafico resistenza alla trazione di rSi-L



S-T0-T n°1



S-T0-T n°2

Figura 43: grafici resistenza alla trazione dei due campioni di S-T0-T

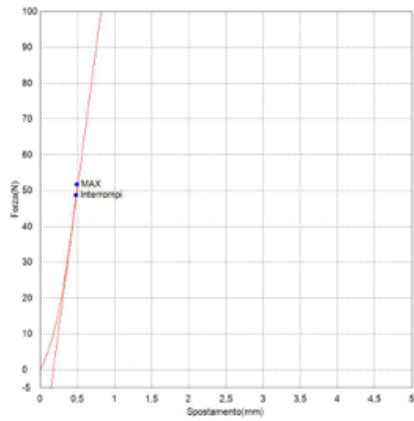
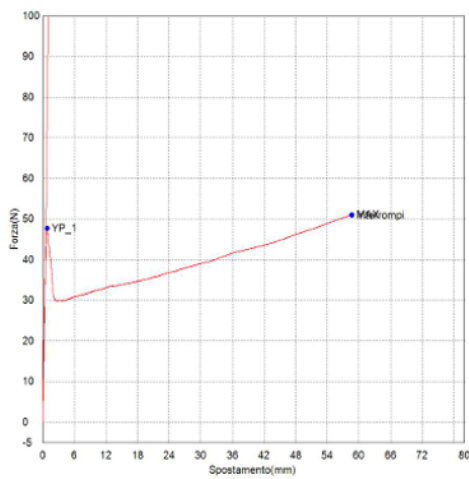
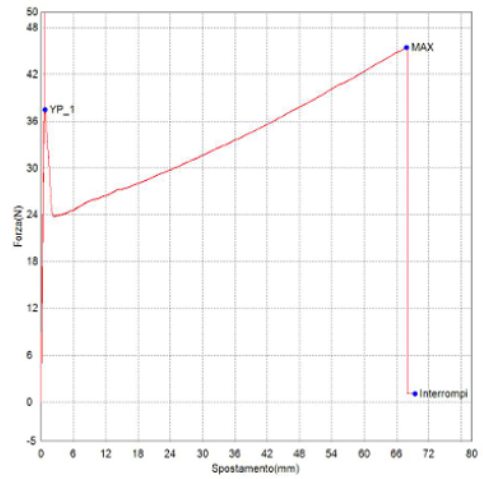


Figura 44: grafico resistenza alla trazione del campione rSi-T0-T n°1

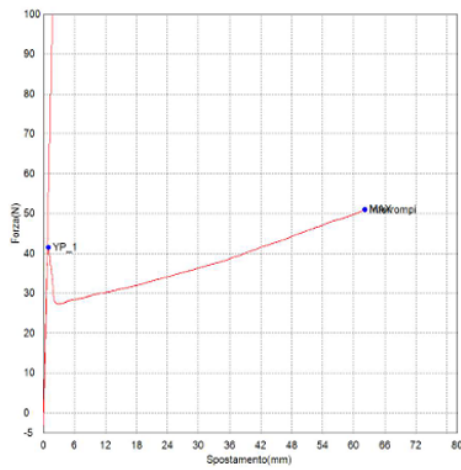


S-T1-1-L n°1

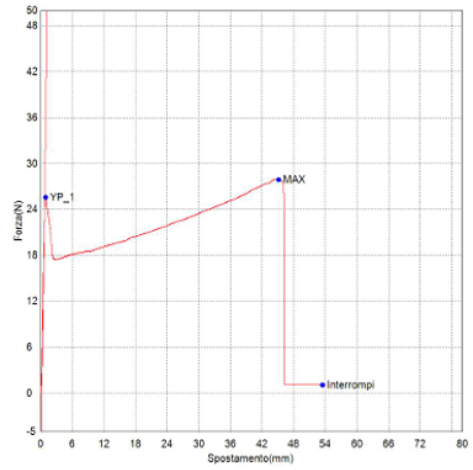


S-T1-1-L n°2

Figura 45: grafici resistenza alla trazione S-T1-1-L



S-T1-T n°1



S-T1-T n°2

Figura 46: grafici resistenza alla trazione S-T1-1-T

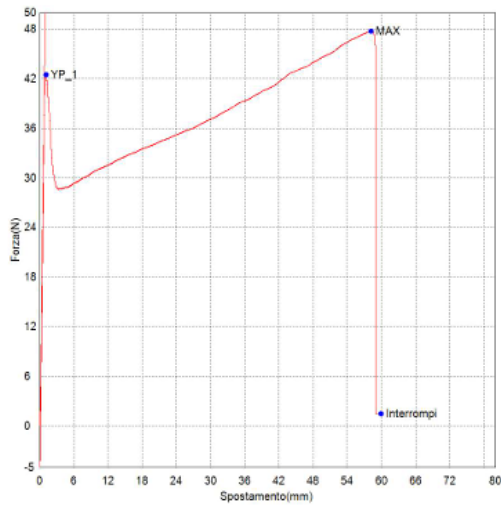
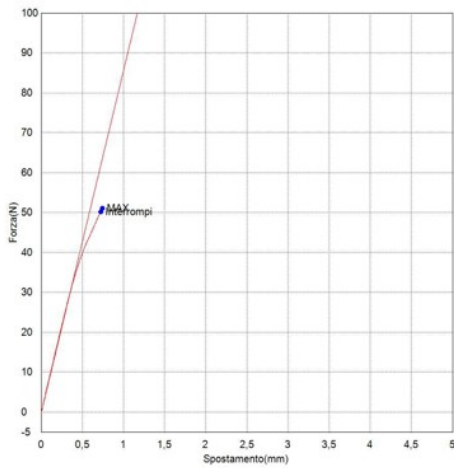
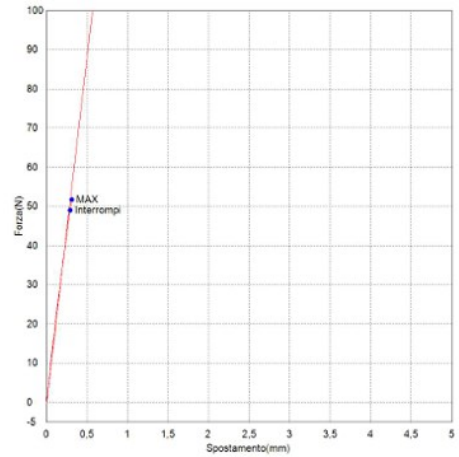


Figura 47: grafico resistenza alla trazione S-T1-T n°3

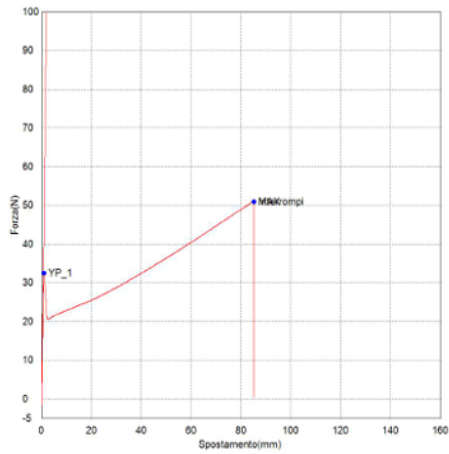


C-T1-1-T n°1

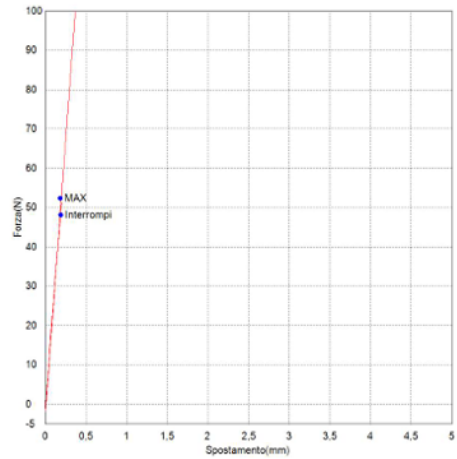


Si-T1-1-L n°1

Figura 48: grafici resistenza alla trazione C-T1-1-T n°1 e Si-T1-1-L n°1



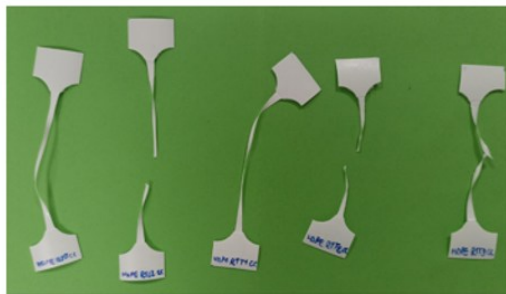
S-T2-T n°1



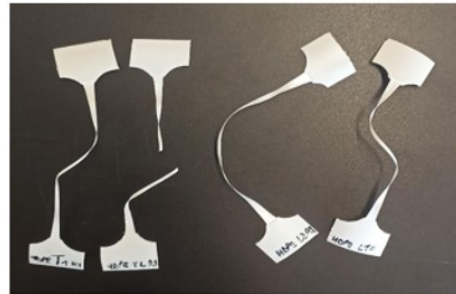
Si-T2-L n°1

Figura 49: grafici resistenza alla trazione S-T2-T n°1 e Si-T2-L n°1

Nelle immagini riportate di seguito, sono mostrati i provini dopo essere stati sottoposti al test di resistenza alla trazione.



S-T1-1



S-T0

Figura 50: provini di S-T1-1 e di S-T0 post analisi

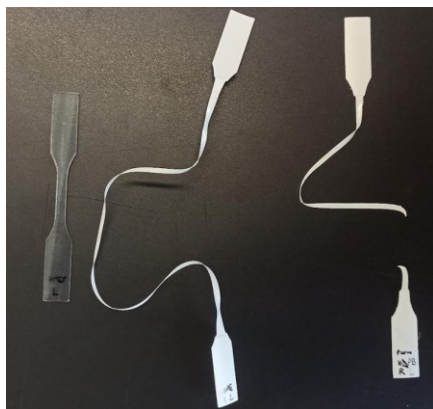


Figura 51: provini realizzati secondo ASTM D882 di rSi-L, S-L e S-L-Prova

## 5.4 RISULTATI METODO 4.4

Dalle analisi con lo strumento MicroNIR sono state ottenuti grafici di tutti i flaconi, analizzati in condizioni sperimentali differenti tra loro. Sono state effettuate valutazioni relative allo stesso flacone, superficie interna ed esterne, che tra provini differenti. Per esempio, sono stati confrontati i campioni S con quelli di C, essendo realizzati con stesso materiale, nelle stesse condizioni, e quelli di Si con rSi, ottenuti dal polietilentereftalato vergine e riciclato.

Di seguito sono illustrati tutti gli spettri ottenuti.

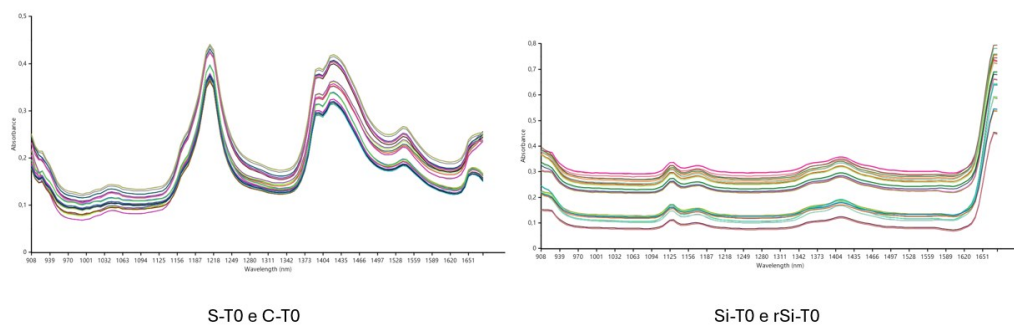


Figura 52: spettri NIR S-T0 e C-T0 a sinistra, Si-T0 e rSi-T0 a destra

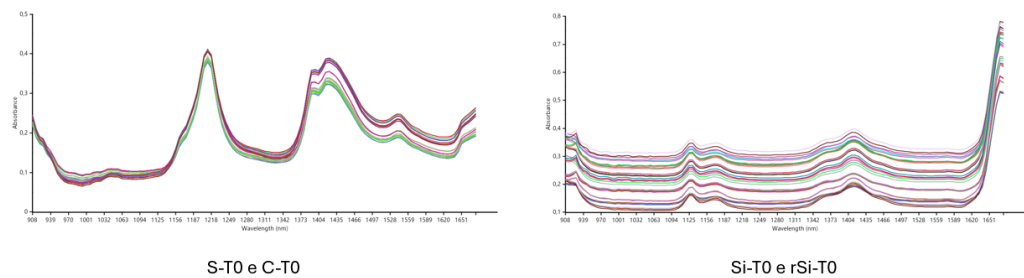


Figura 53: spettri NIR S-T1 e C-T1 a sinistra, Si-T1 e rSi-T1 a destra

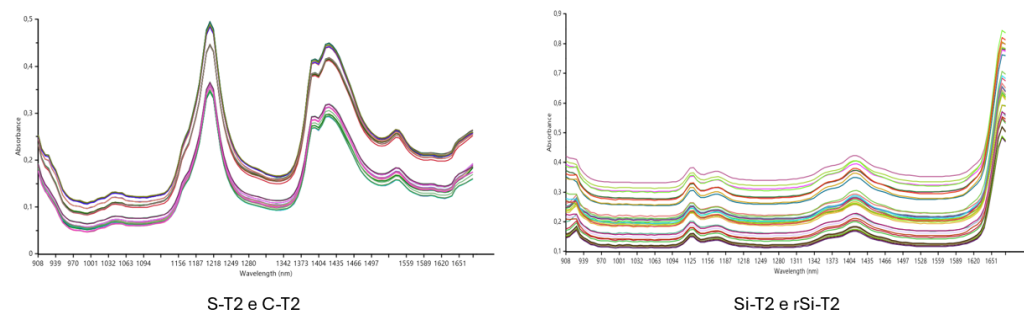


Figura 54: spettri NIR S-T2 e C-T2 a sinistra, Si-T2 e rSi-T2 a destra

Nelle figure 52, 53 e 54, sono illustrati a sinistra gli spettri di S e C, mentre a destra quelli di Si e rSi, analizzati a temperatura ambiente (T0), sottoposti a cicli di vuoto e camera climatica secondo metodo 4.1 (T1), ed

esposti a lampada ad arco di xeno secondo metodo 4.2 (T2). Nei flaconi in polietilene ad alta densità, in tutte le condizioni e per entrambe le tipologie, si osservano due bande di assorbimento principale intorno a 1200 e 1400 nm circa, corrispondenti ai legami C-H. Nei campioni derivati da PET e PET, invece, gli spettri mostrano il picco principale a 1650 nm e due picchi minori a 1130 e 1400 nm. Il picco a 1650 potrebbe essere riconducibile ai legami C=O, mentre gli altri due ai legami C-H alifatici e aromatici della struttura del polietilentereftalato. Tali spettri sono stati confrontati con quelli descritti in letteratura e risultano conformi. Sotto sono riportati gli scores e i loadings delle superfici interne ed esterne di tutti i flaconi S, ed un confronto tra gli stessi analizzati in condizione diverse.

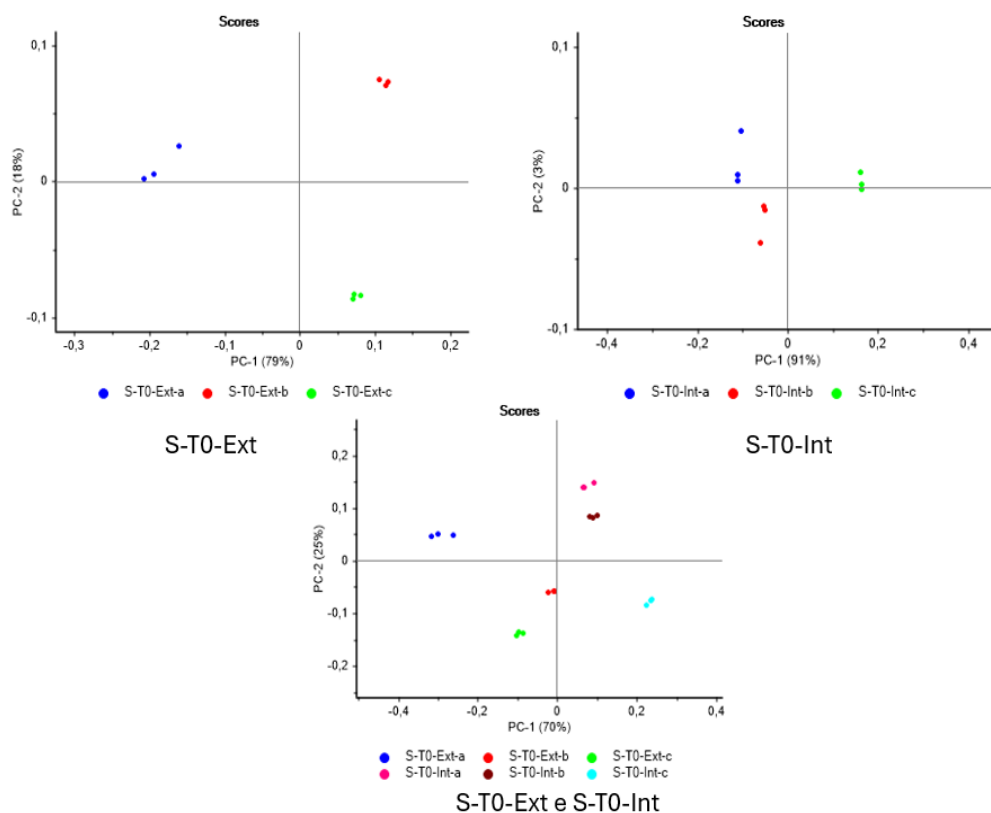


Figura 55: score S-T0

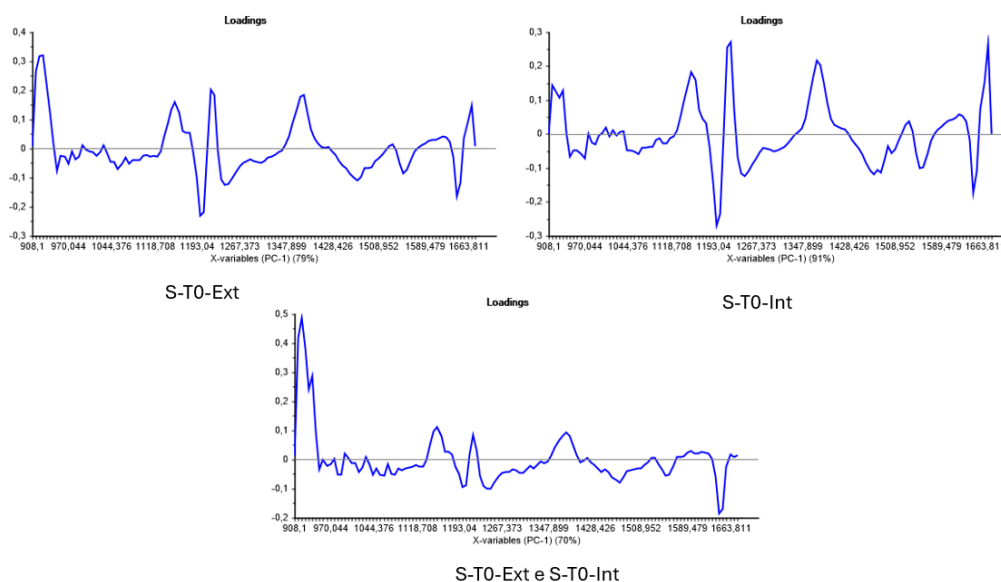


Figura 56: loadings di S-T0

Nella figura 55, vi sono rappresentati gli scores del campione S-T0. Guardando l'analisi effettuata sulla superficie esterna (Ext), si osserva variabilità tra il campionamento S-T0-Ext-a rispetto agli altri due. Al contrario, nella superficie interna, i tre campionamenti sono molto simili tra loro. Il confronto tra S-T0-Ext e S-T0-Int, si osservano differenze tra i campionamenti S-T0-Ext-a S-T0-Int-c, rispetto agli altri quattro. I loadings, figura 56, descrivono una zona spettrale suscettibile a variazione intorno a 1180 e 1350 nm.

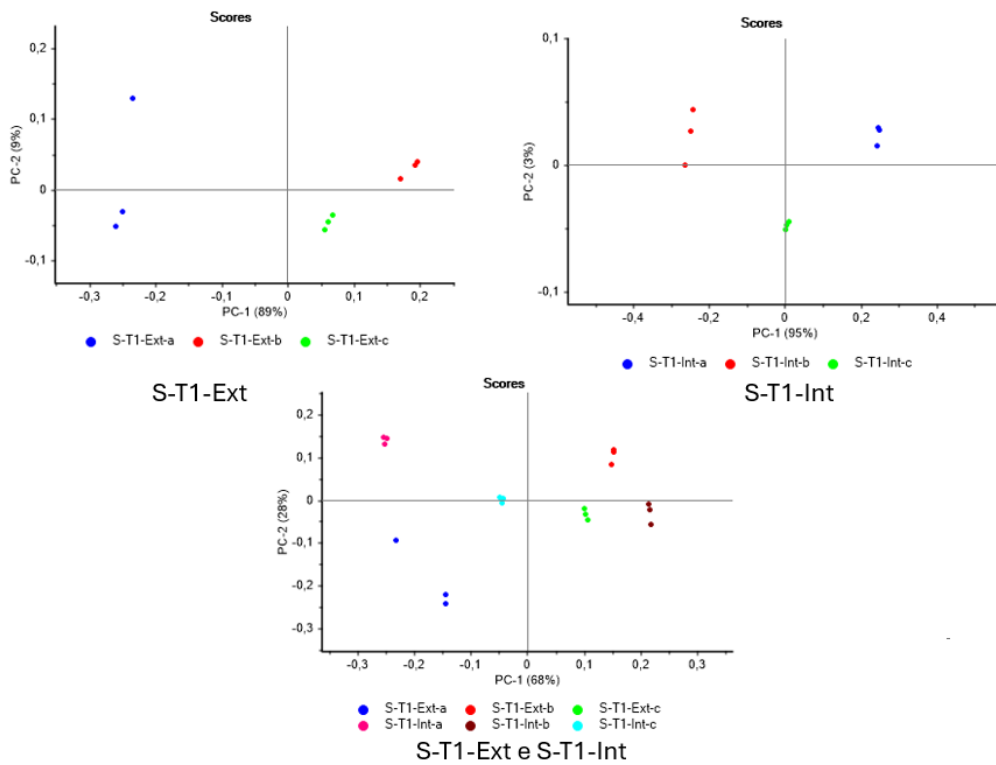


Figura 57: scores S-T1

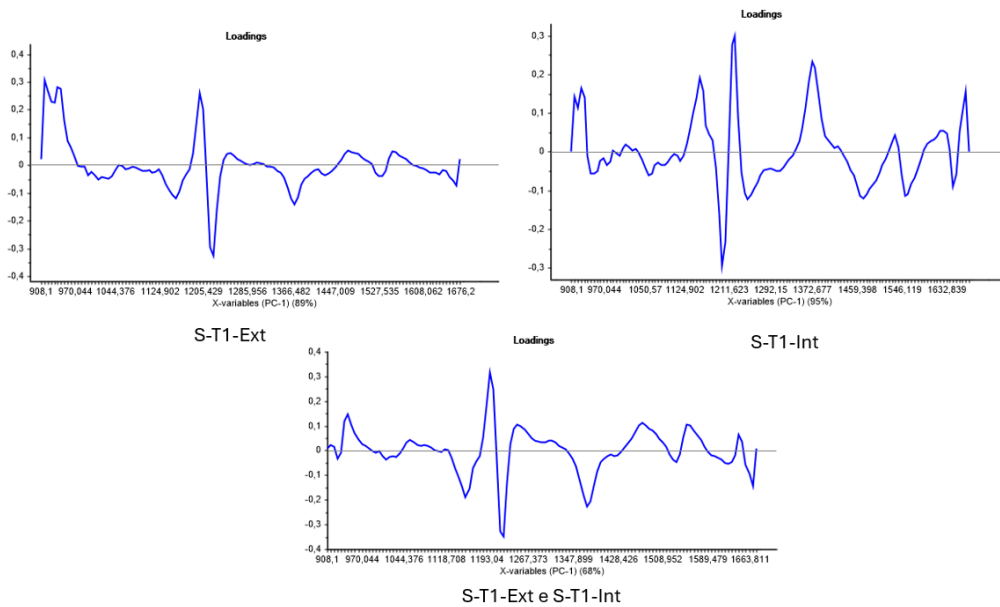


Figura 58: loadings S-T1

Gli scores mostrano una discrepanza di S-T1-Ext-a rispetto quelli presi sulla stessa superficie al centro e alla base. Una situazione analoga ai campionamenti S-T0-Int, riguardano quelli S-T1-Int ove vi è meno variabilità. Il confronto tra le due superfici, per entrambe si osservano differenze significative tra i triplicati effettuati vicino al collo rispetto agli

altri. I loadings mostrano le regioni più influenti intorno a 1190 nm, tra 1250 e 1350 nm, ed intorno a 1500-1580 nm.

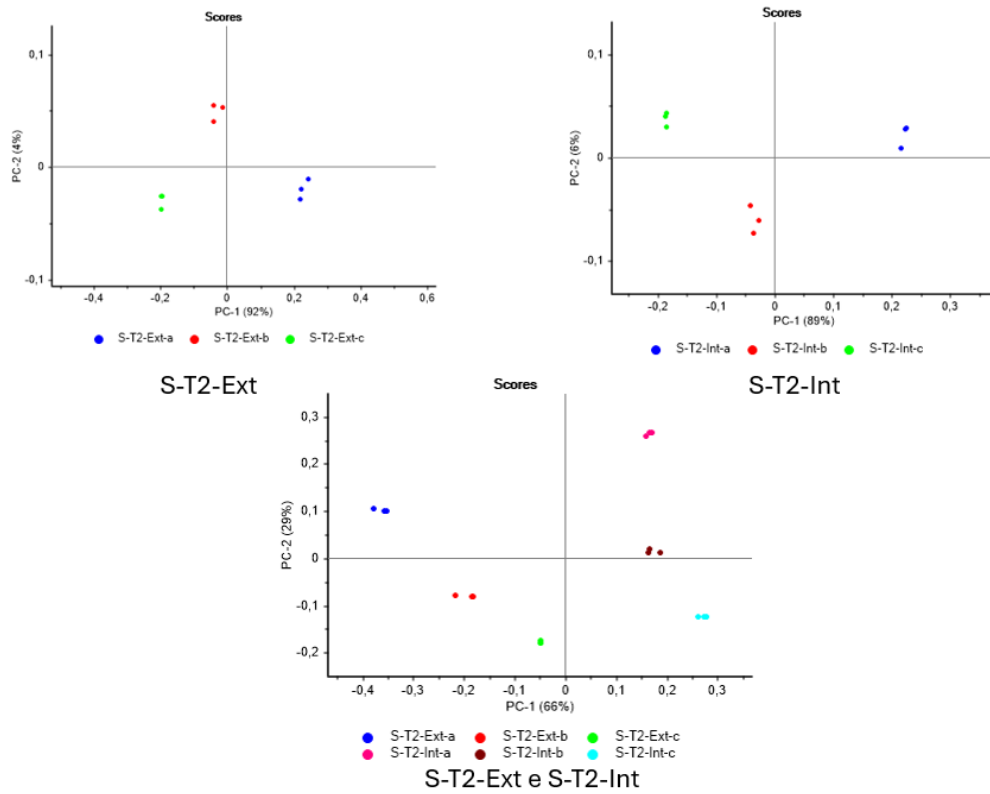


Figura 59: score S-T2

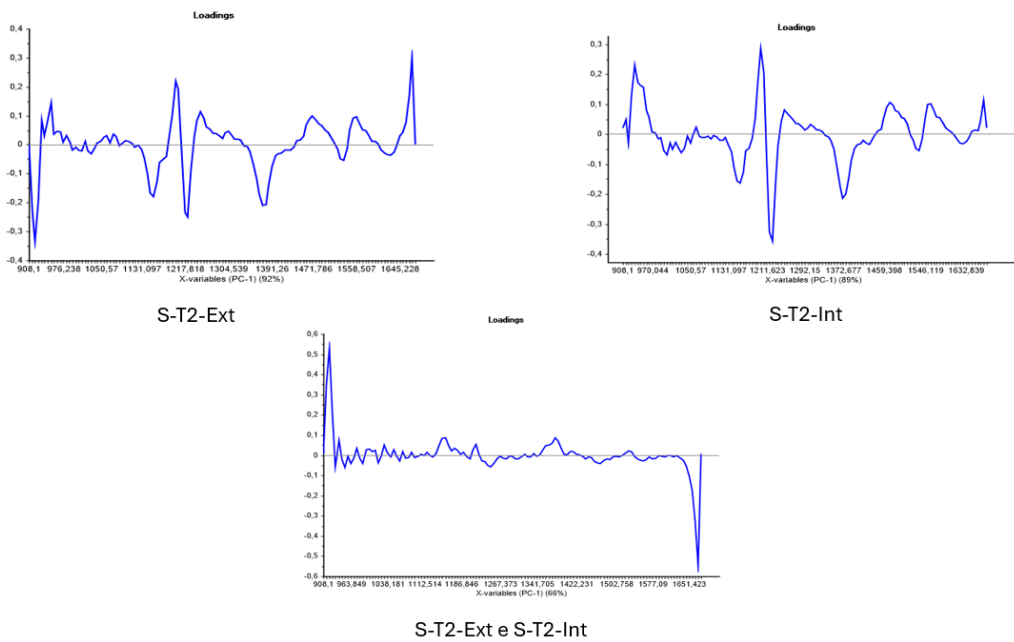


Figura 60: loadings S-T2

Per i campioni posizionati in Suntest xls+, le acquisizioni effettuate sulla stessa superficie, sia interna sia esterna, non evidenziano una variabilità significativa. Tuttavia, confrontando i diversi campioni tra loro, emergono delle differenze. I loadings mostrati in figura 60, indicano regioni spettrali più rilevanti analoghe ai campioni analizzati al T0 e T1.

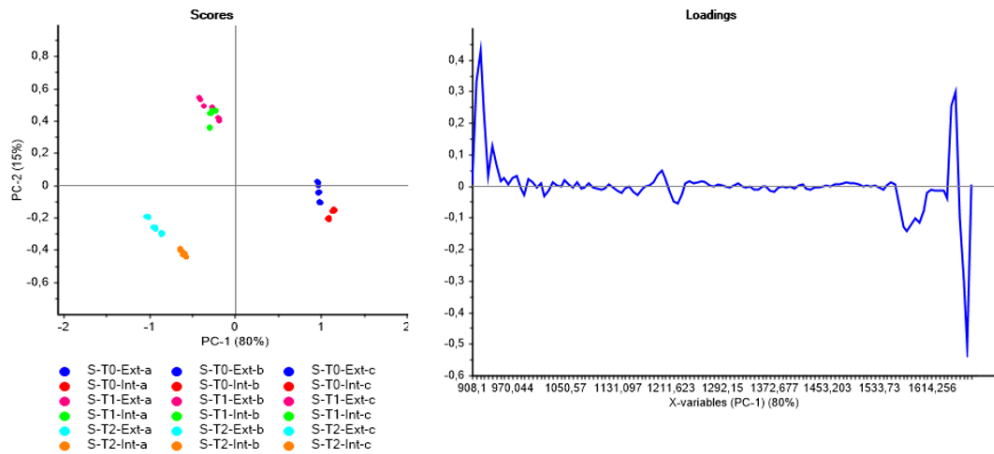


Figura 61: score e loading del confronto di S al T0, T1 e T2

Nello score riportato in figura 61 evidenzia le variazioni tra i flaconi sottoposti a diverse condizioni. I campioni S-T1 e S-T2 mostrano una variabilità meno significativa rispetto a S-T0, suggerendo che le condizioni imposte abbiano provocato variazioni simili sulle superfici dei flaconi.

Il loading evidenzia che la regione spettrale maggiormente influenzata corrisponde a 1211 nm.

Di seguito si riportano scores e loadings dei flaconi C.

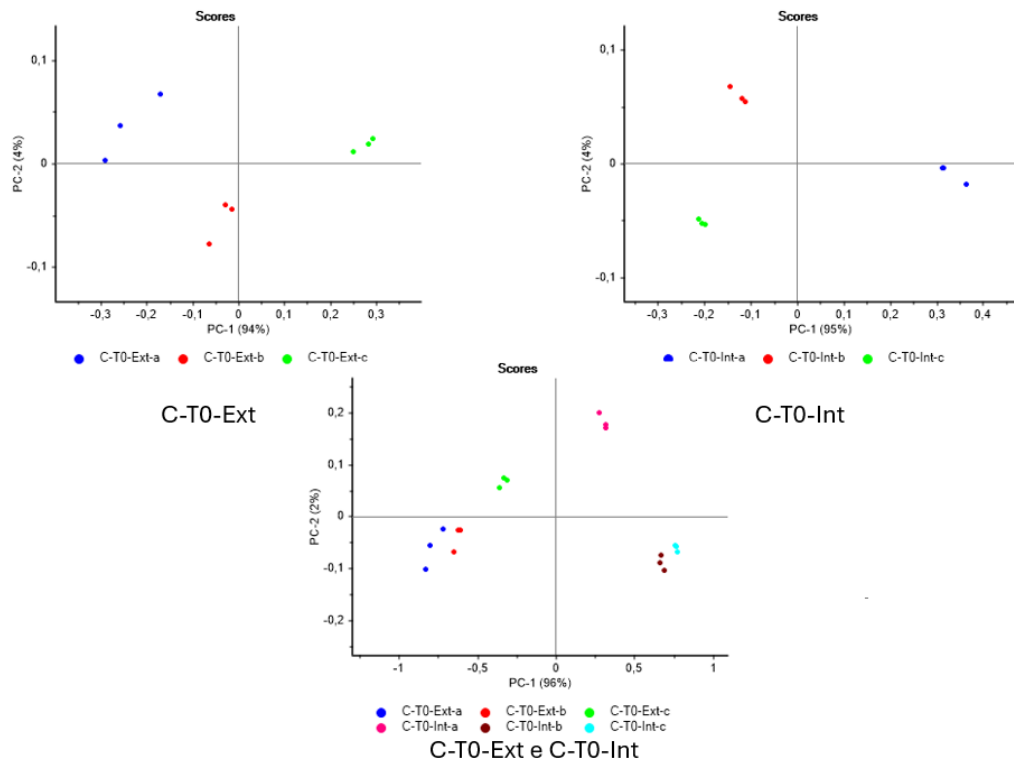


Figura 62: scores C-T0

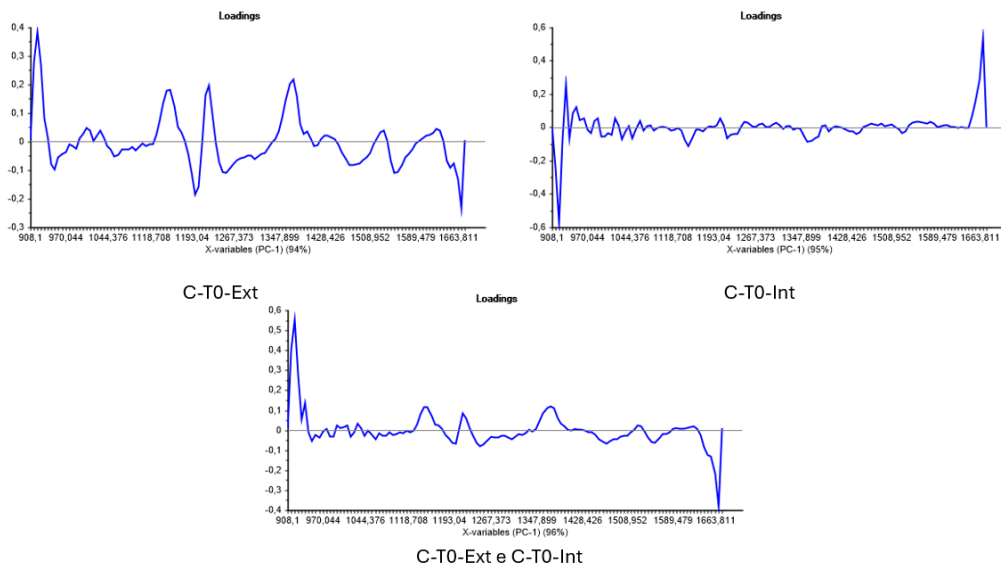


Figura 63: loadings C-T0

Dagli scores si evince che, sia nella superficie esterna sia in quella interna, i campioni C-T0-Ext-a e C-T0-Int-a, presi vicino al collo, si discostano dai triplicati acquisiti al centro e alla base. Confrontando le due superfici, si rileva una differenza tra di esse. I loadings mostrano regioni suscettibili ad

alterazione intorno a 1180, 1250 e 1350 nm, e piccole influenze intorno ai 1500 nm.

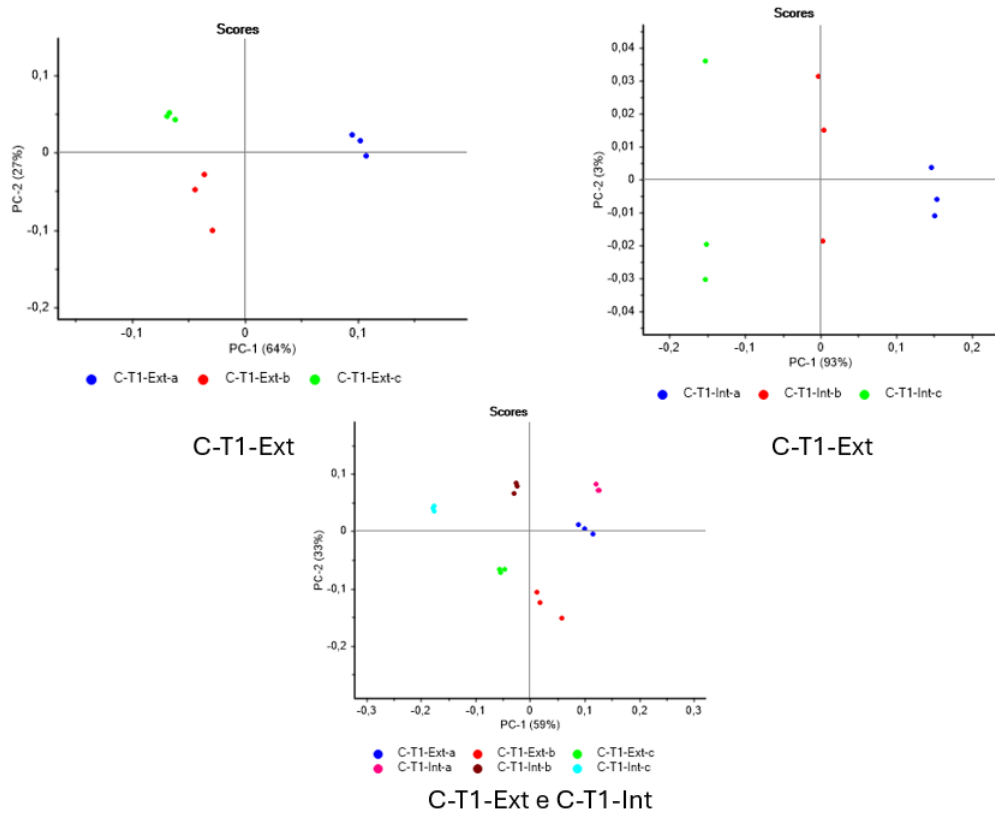


Figura 64: scores di C-T1

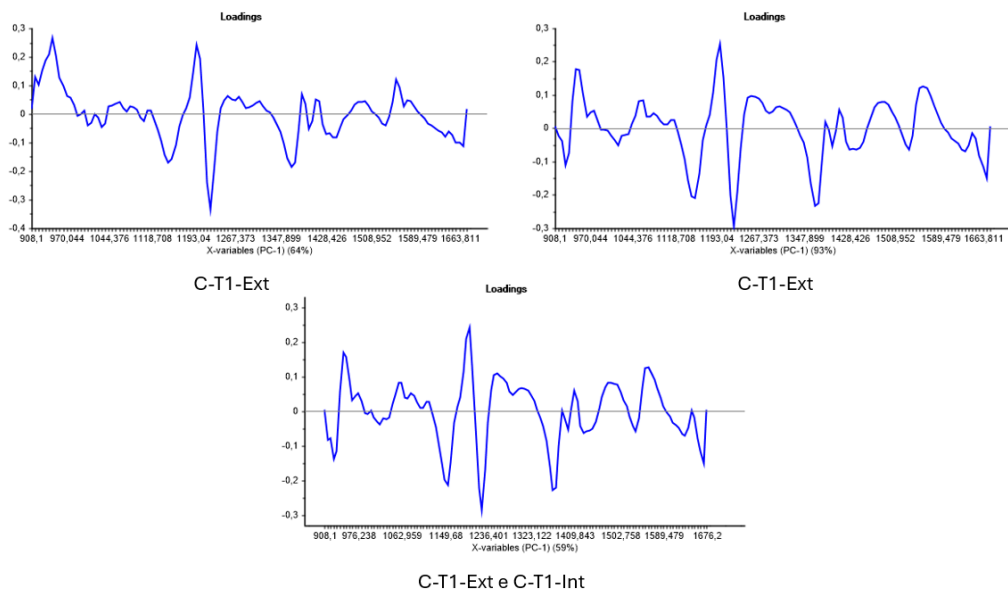


Figura 65: loadings C-T1

Dalle immagini si osserva una maggior variabilità, nella superficie esterna, per le acquisizioni al collo del flacone, mentre sulla superficie interna tutte

e tre si discostano con un certo grado di differenza. Il confronto tra i due però, evidenzia una buona somiglianza tra le facce analizzate, con il campione C-T1-Int-c che si discosta maggiormente. I loadings rappresentati nella figura 65, mostrano picchi di regioni variabili analoghe a quelli analizzati al T0.

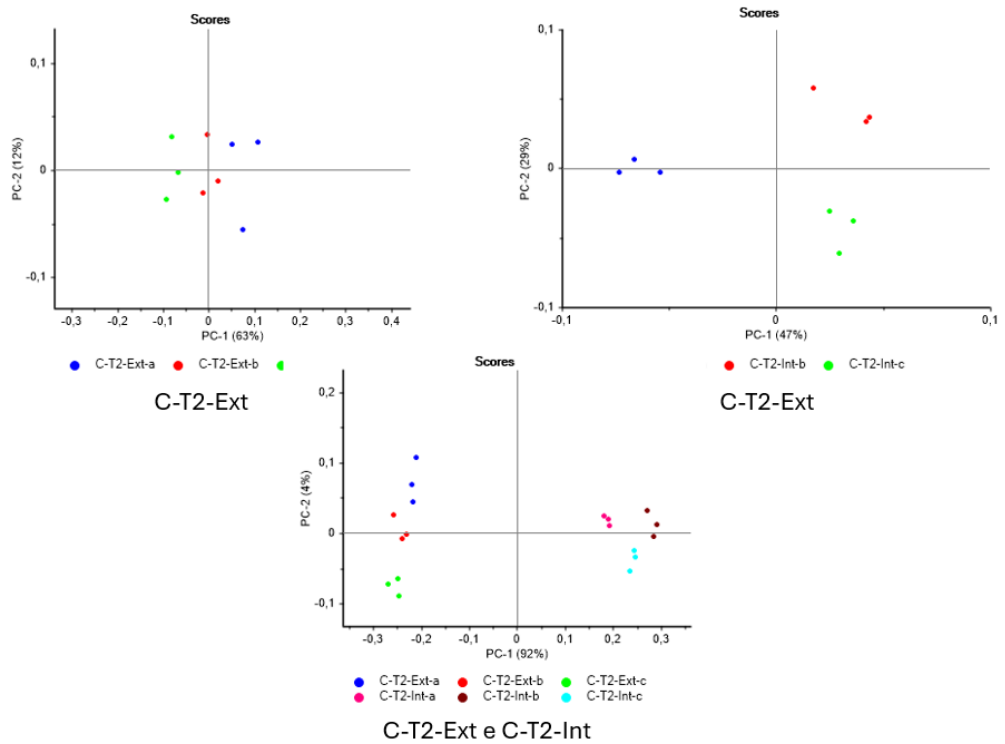


Figura 66: scores C-T2

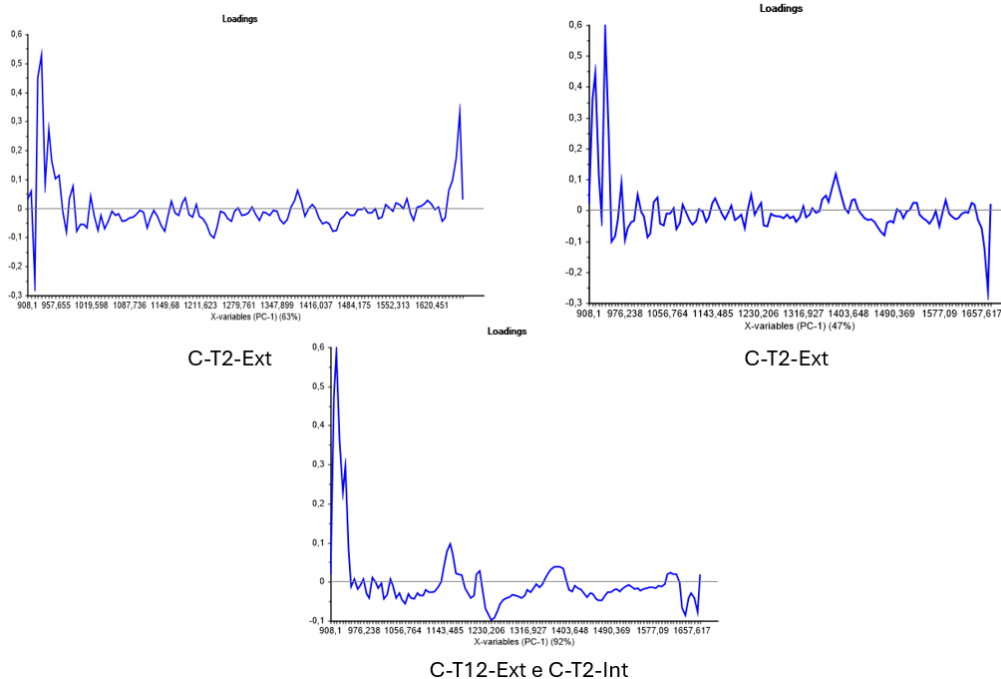


Figura 67: loadings C-T2

Lo score relativo a C-T2-Ext, mostra una bassa variabilità tra le aree in cui sono state effettuate le acquisizioni. Comportamento analogo si è verificato per C-T2-Int. Al contrario, il confronto tra le due superfici evidenzia una significativa variabilità. Inoltre, i loadings indicano le zone più suscettibili a variazioni simili a quelle conservate a temperatura ambiente (T0) e sottoposte a vuoto e camera climatica (T1).

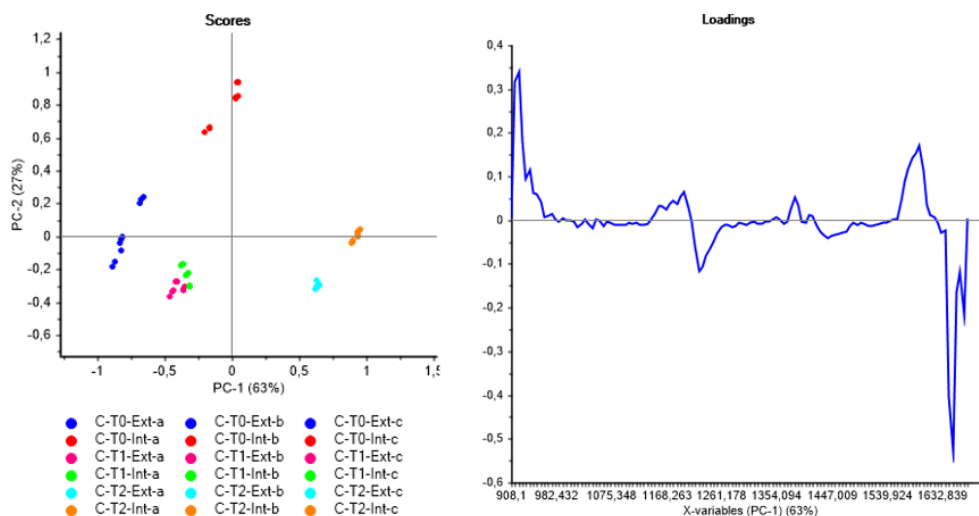


Figura 68: confronto C-T0, C-T1 e C-T2

L'analisi comparativa tra i flaconi C, realizzati in HDPE, nelle diverse condizioni imposte, mostra una similitudine tra C-T0 e C-T1, ad eccezione di C-T0-Int che presenta lieve differenza. Valori diversi sono stati registrati per i campionamenti C-T2, i quali suggeriscono che il trattamento applicato possa aver condizionato e modificato la struttura.

Il loading, invece, mostra che le regioni più suscettibili hanno una lunghezza d'onda intorno a 1200 nm, 1400 e 1580 nm.

Si riportano le analisi effettuate sui campioni rSi, costituiti da rPET.

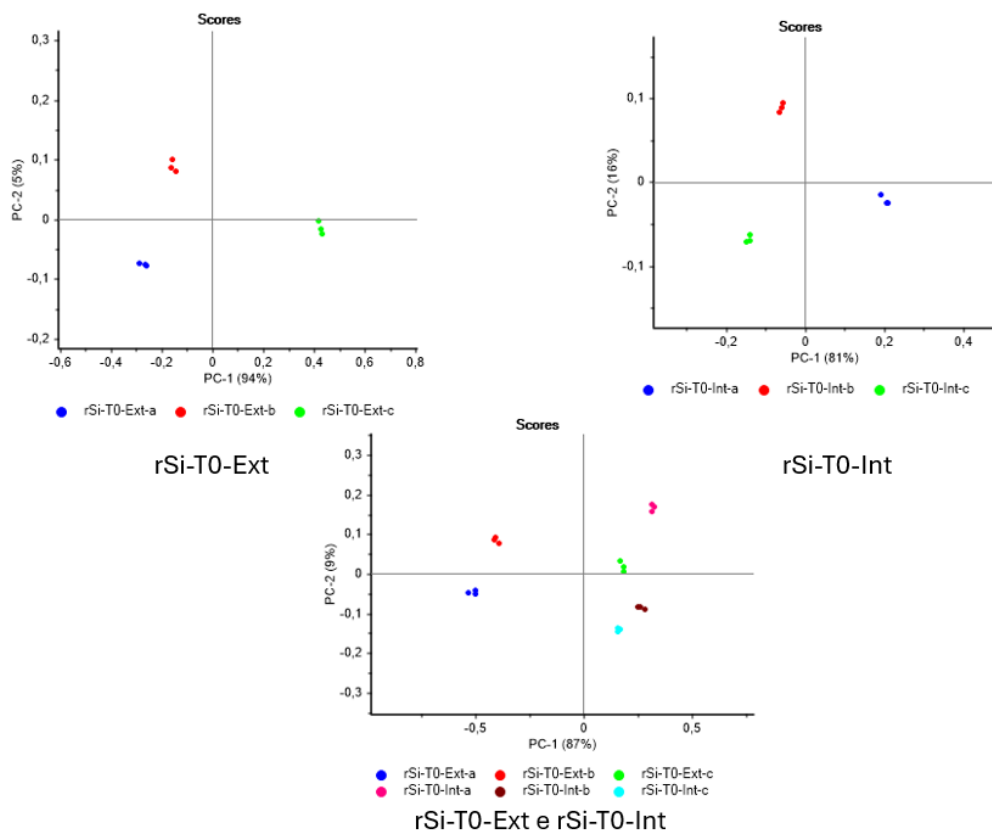


Figura 69: scores rSi-T0

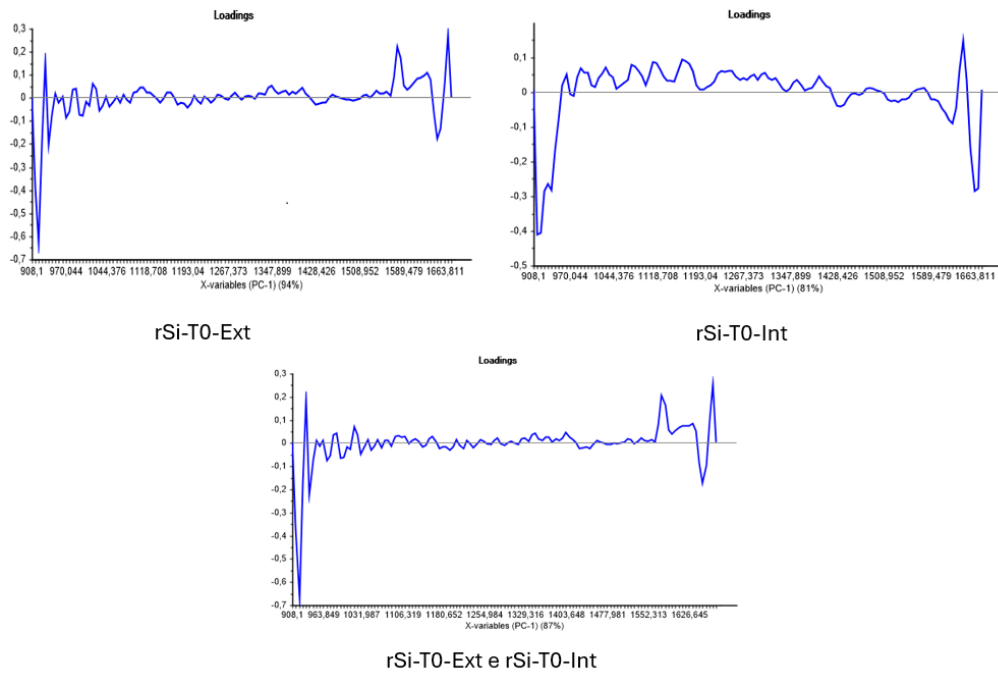


Figura 70: loadings rSi-T0

Le prove condotte sul flacone conservato a temperatura ambiente (T0), evidenziano un discostamento significativo dei triplicati ottenuti dalla zona della base esterna, rSi-T0-Ext-c, rispetto alle altre due aree esaminate. Nella superficie interna, le tre acquisizioni presentano variazioni simili tra loro. Tuttavia, la comparazione tra le due facce rileva che i valori di rSi-T0-Ext-c sono simili a quelli della superficie interna.

I loadings indicati nella figura 70 registrano piccole variazioni nell'intervallo tra 1100 e 1400 nm, un picco principale a 1650 nm.

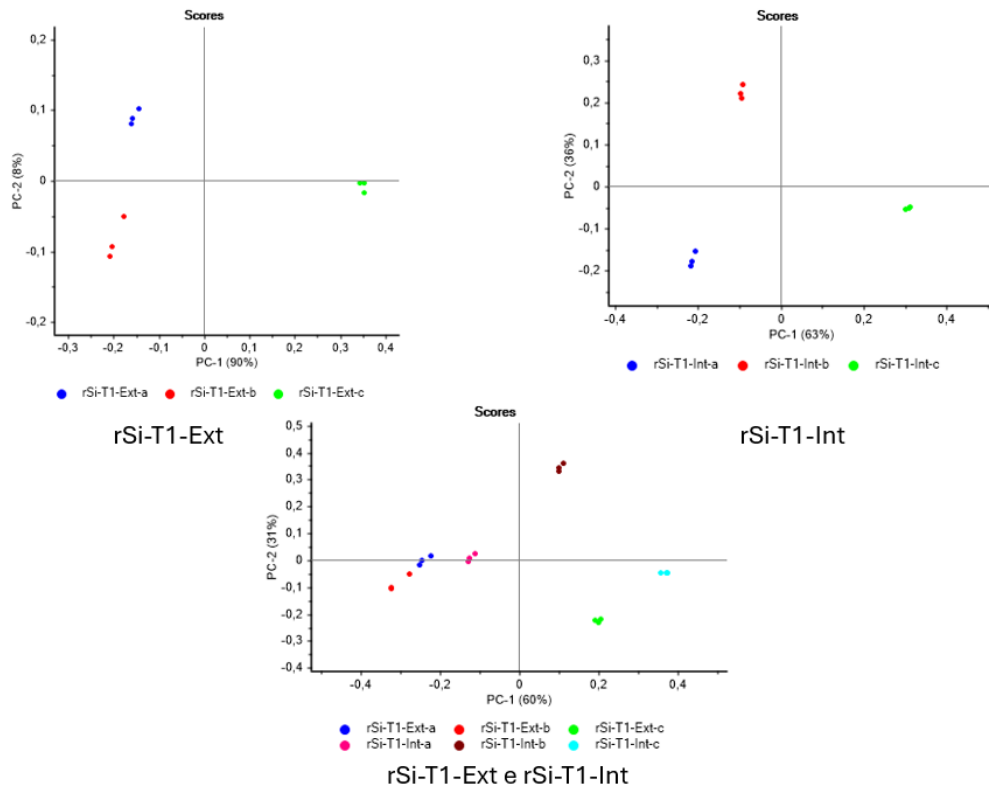


Figura 71: scores rSi-T1

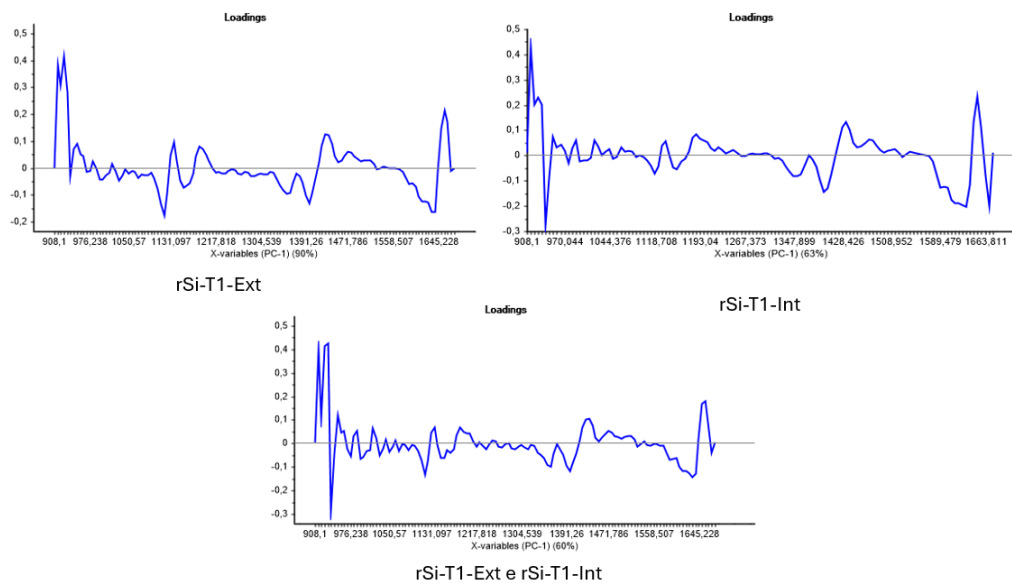


Figura 72: loadings rSi-T1

Nel campione trattato secondo metodo 4.1 (T1), così come per quello conservato a temperatura ambiente (T0), i prelievi effettuati sulla faccia esterna vicino alla base, rSi-T1-Ext-c, si differenziano dagli altri effettuati sulle altre due aree, mentre in quella interna le variazioni sono simili. Dall'analisi comparativa emerge che i campionamenti interni al collo, rSi-

T1-Int-a sono simili a rSi-T1-Ext-a e rSi-T1-Ext-b; al contrario, gli altri valori mostrano differenze significative tra loro e rispetto a questi.

I loadings evidenziano zone spettrali soggette ad alterazioni nell'intervallo 1130-1200 nm, a 1400 ed il picco principale a 1650 nm.

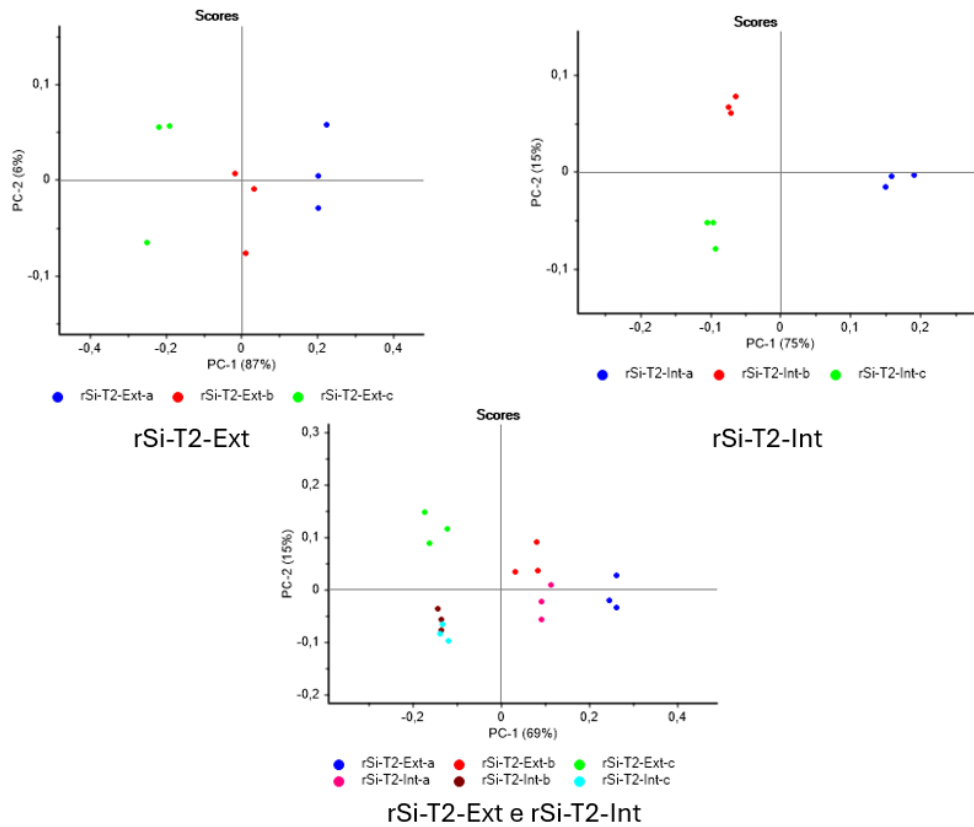
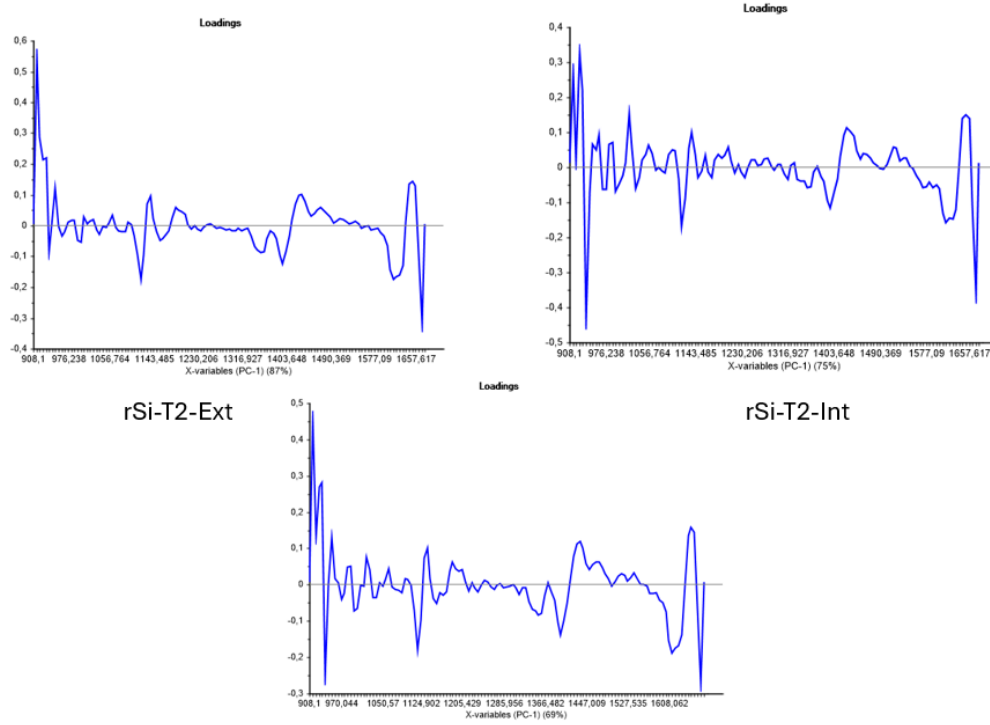


Figura 73: scores dei campionamenti di rSi-T2



rSi-T2-Ext e rSi-T2-Int

Figura 74: loadings dei campionamenti rSi-T2

Dall'analisi delle singole aree, è possibile notare un discostamento omogeneo tra i prelievi in quella esterna. Sulla superficie interna si registra una lieve variazione dei campionamenti effettuati alla testa del flacone rispetto a quelli delle altre due zone. Confrontando le due superfici analizzate, si osserva una leggera discrepanza nei campionamenti.

I picchi rilevati a 1130, 1200, 1400 e 1650 nm corrispondono alle regioni variabili.

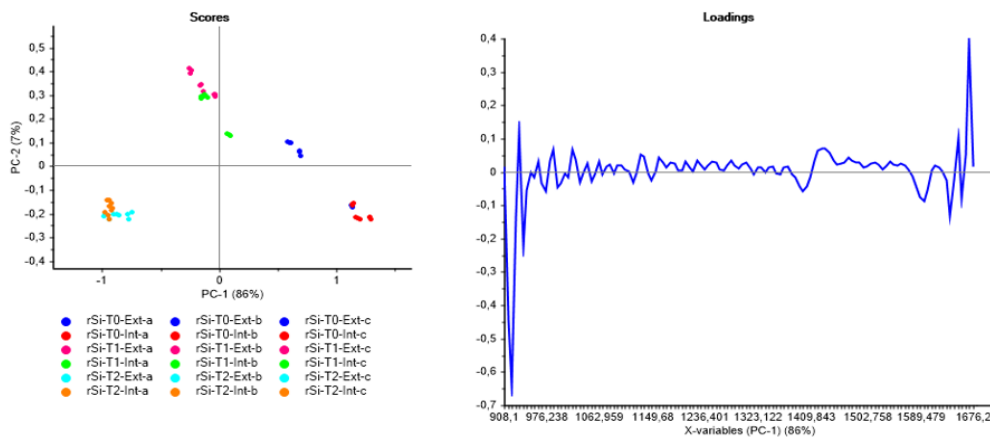


Figura 75: score e loading del flacone rSi al tempo T0, T1 e T2

L'analisi comparativa consente di visualizzare gli effetti indotti dalle condizioni applicate ai tre flaconi. Da essa evince che le acquisizioni al T1 e T2 si discostano sia tra loro sia da quelli registrati al T0.

Il loading, invece, identifica quali sono le zone spettrali maggiormente interessate da alterazioni. Esse sono due: la prima intorno a 1450 nm e la seconda intorno a 1600 nm.

Sotto si riportano i risultati delle analisi di Si, realizzati in PET.

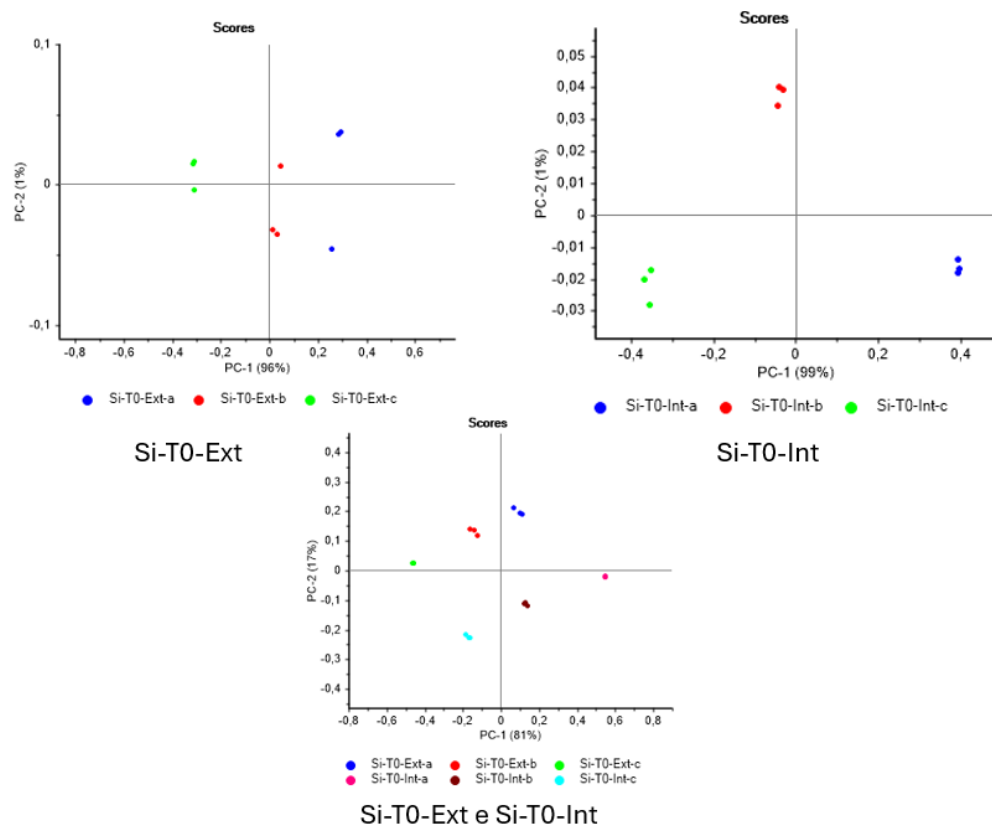


Figura 76: scores Si-T0

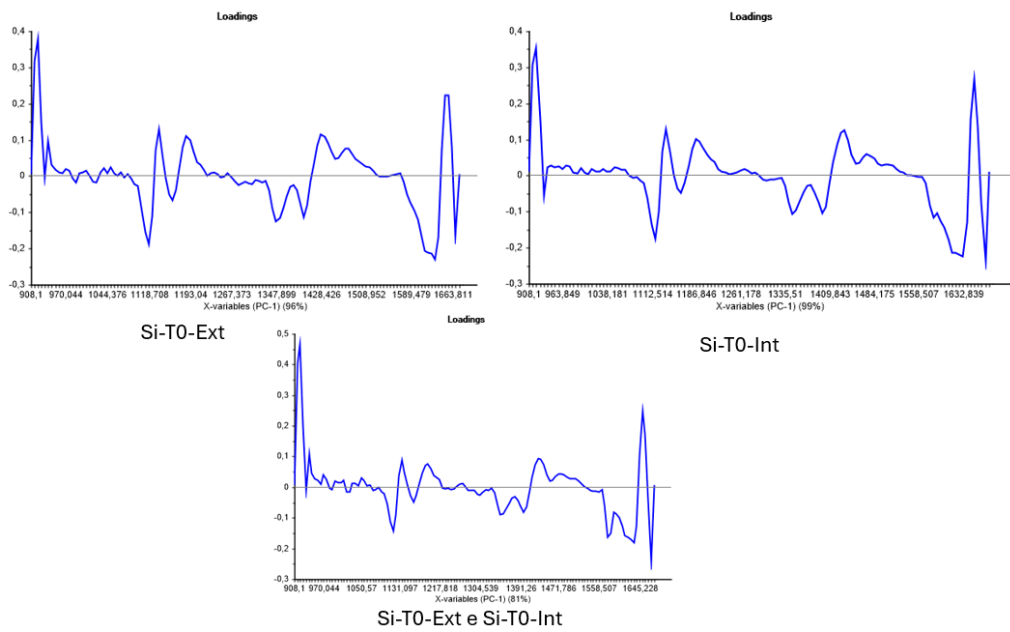


Figura 77: loadings Si-T0

In figura 76 e 77 sono illustrati scores e loadings del flacone Si analizzato al T0. Per entrambe le superfici si osserva variabilità tra tutte e tre le zone sottoposte ad analisi. Il confronto tra di esse mostra differenze tra loro. I loadings invece, sono simili a quelli dei campioni rSi, realizzati in polietilentereftalato vergine, con picchi a 1120, 1200, 1400 e 1650 nm.

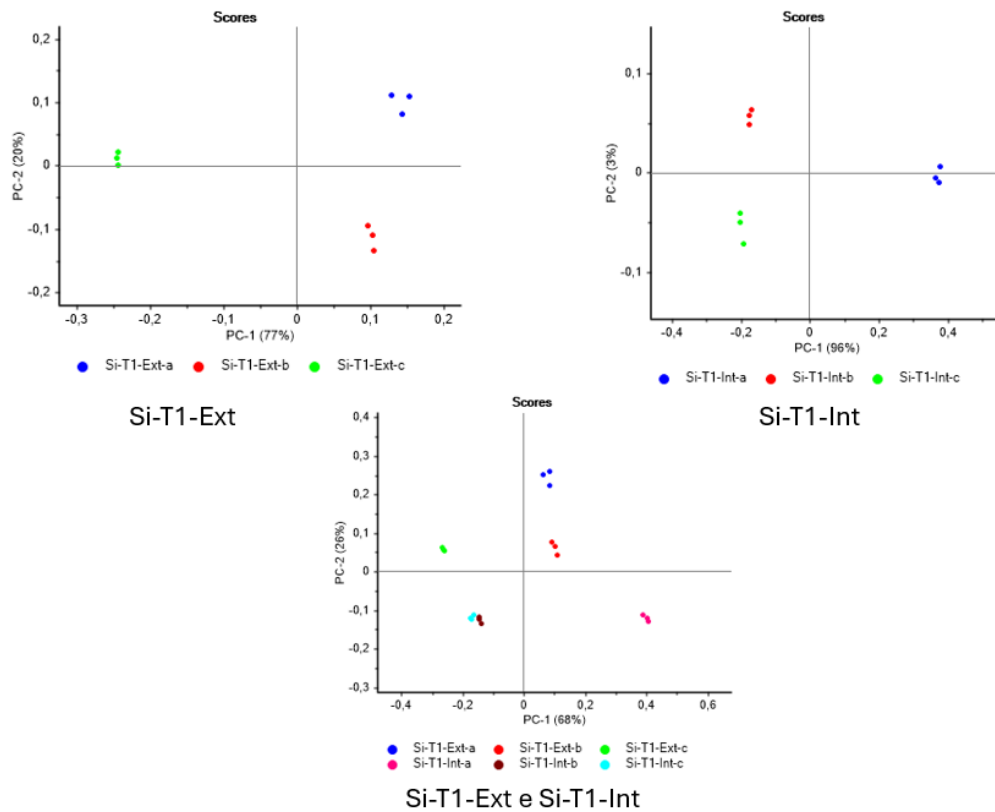


Figura 78: scores Si-T1

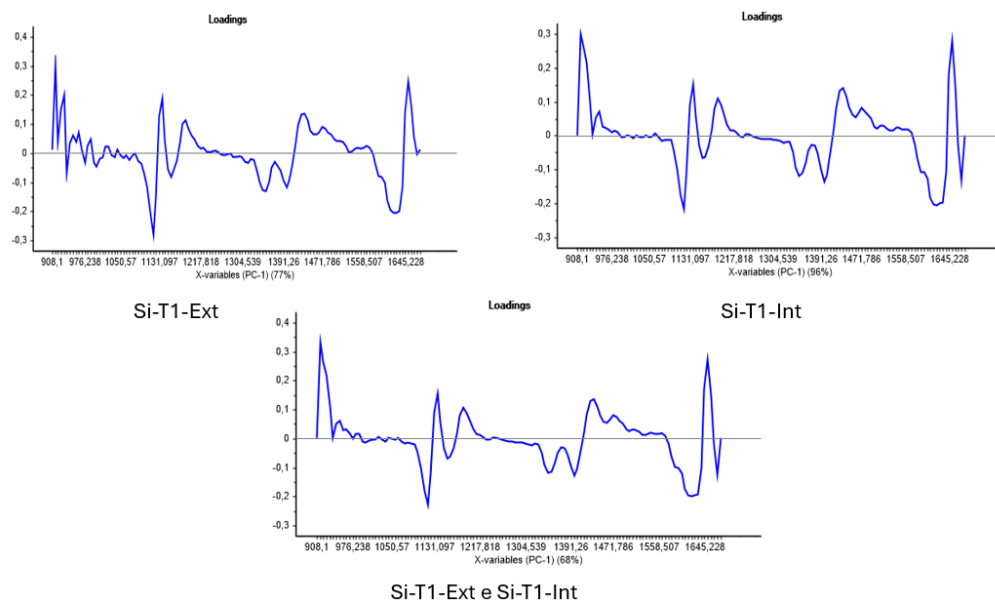


Figura 79: loadings Si-T1

Al tempo T1, si rileva disomogeneità nei risultati ottenuti dalle prove realizzate sulla superficie esterna. In particolare, i triplicati di Si-T1-Ext-c si differenziano rispetto a Si-T1-Ext-a e Si-T1-Ext-b. Situazione analoga

si verifica anche in quella interna, dove è Si-T1-Int-a a mostrare un comportamento differente.

La comparazione mostra una buona uniformità, ad eccezione di Si-T1-Int-a, che presenta una variazione maggiore rispetto agli altri campionamenti. I loadings riportati in figura 79, rimarcano le stesse regioni spettrali variabili osservate al T0.

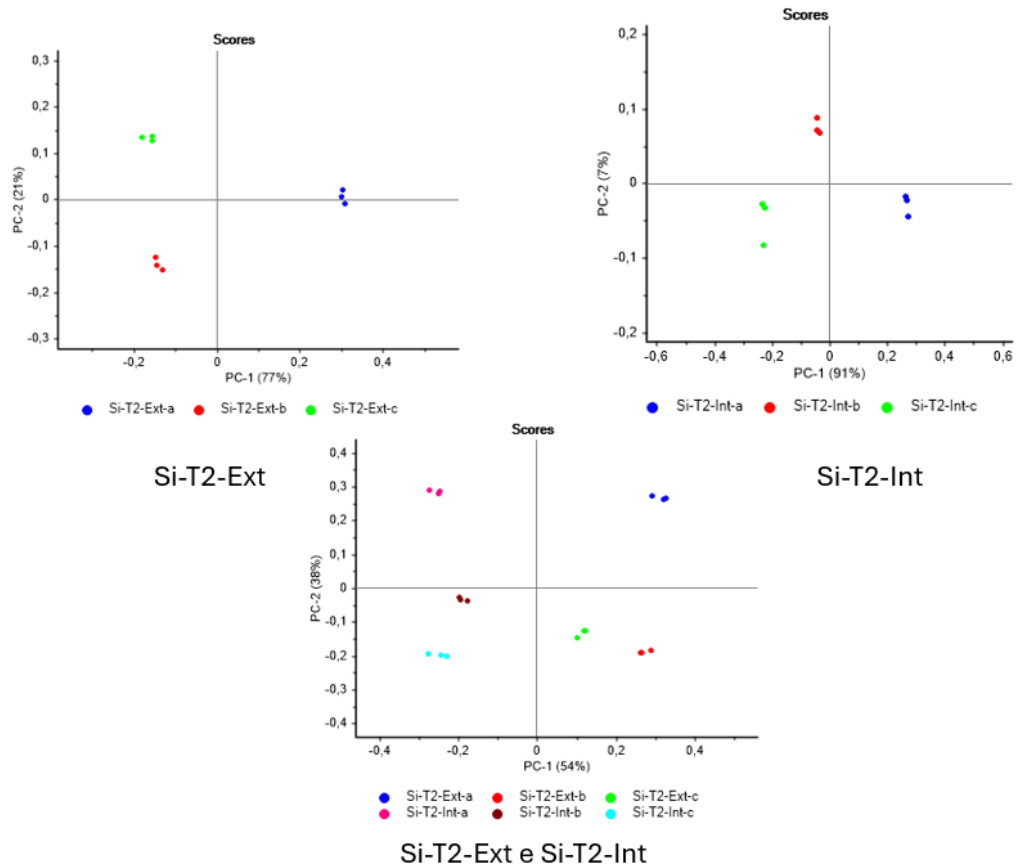


Figura 80: scores Si-T2

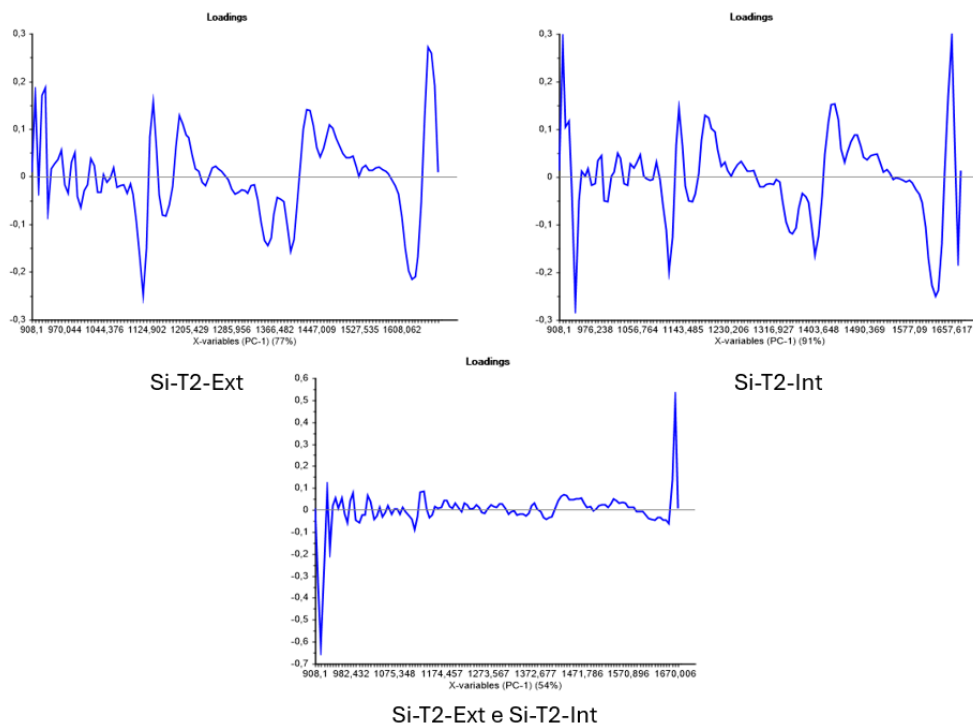


Figura 81: loadings Si-T2

Dal flacone trattato secondo metodo 4.2 (T2), le zone campionate per entrambe le superfici mostrano la stessa variabilità. Dal confronto si evince la differenza delle due.

Le regioni spettrali variabili le stesse al T0 e al T1.

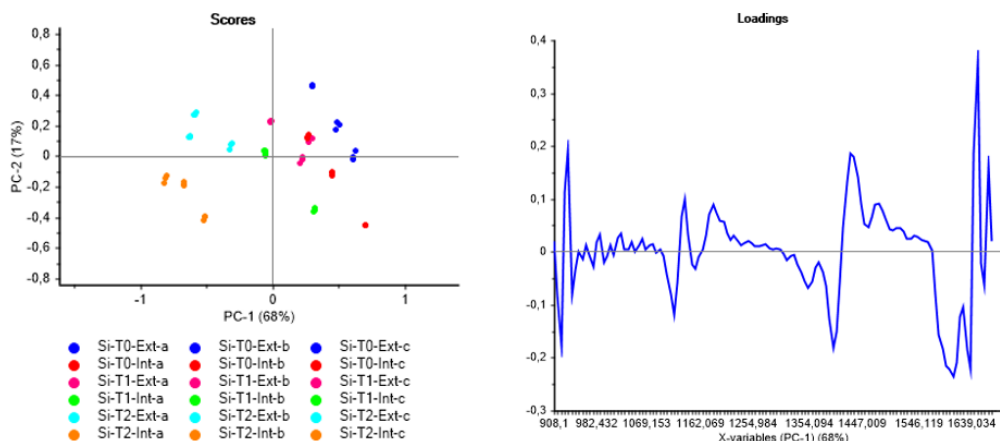


Figura 82: confronto Si-T0, Si-T1 e Si-T2

L'analisi comparativa delle tre condizioni sperimentale evidenzia le lunghezze d'onda in corrispondenza delle quali si verificano le variazioni. Queste sono localizzate a 1120, 1200, 1400 e 1650 nm.

La variabilità registrata dallo score suggerisce un maggior effetto del trattamento effettuato in Suntest xls+ (T2), rispetto a quello in essiccatore e camera climatica (T1).

Sono state effettuate anche analisi comparative tra i flaconi S e C e tra rSi e Si.

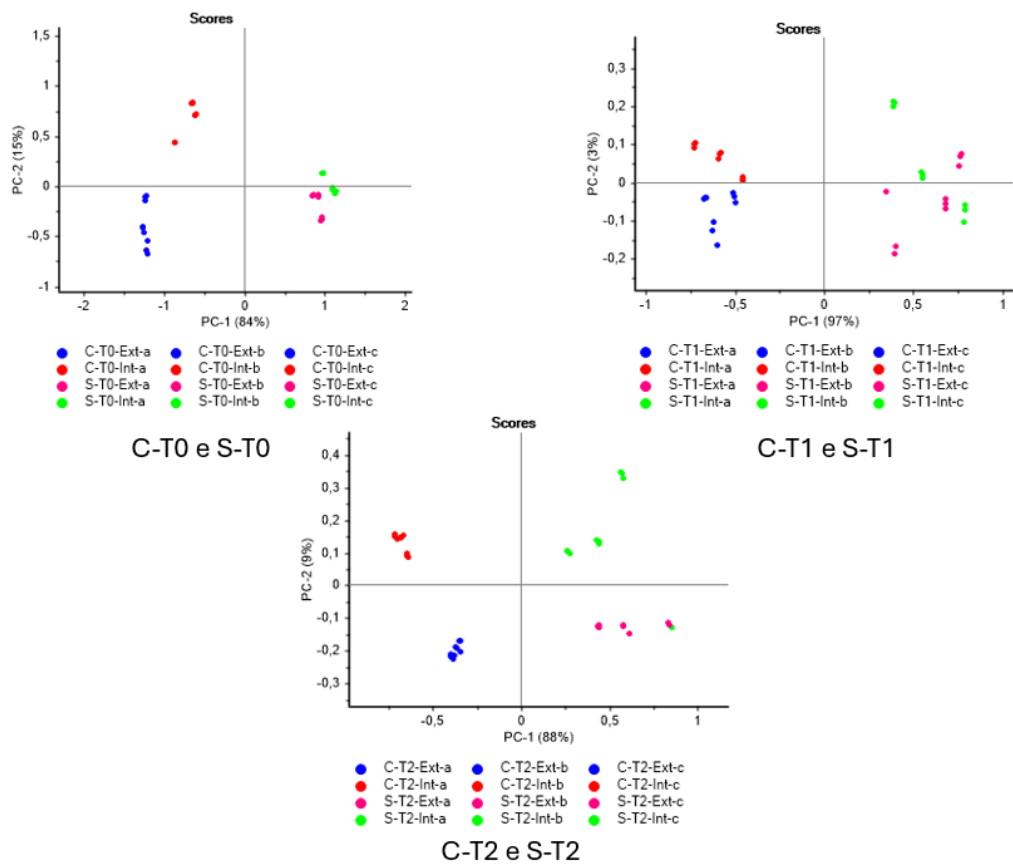


Figura 83: scores confronto flaconi C e S

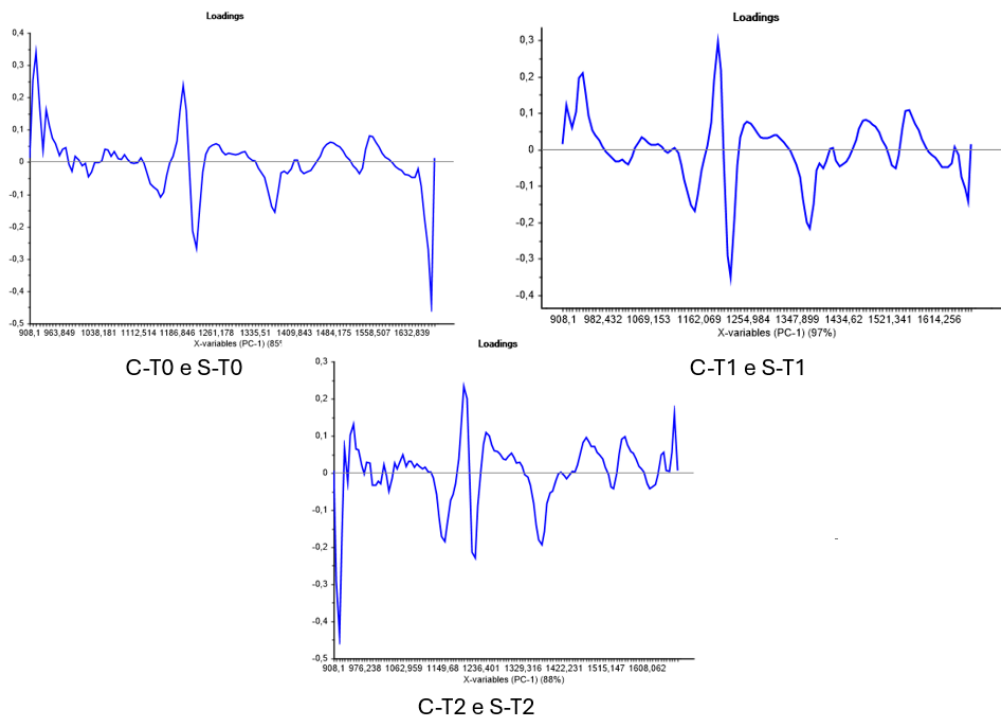


Figura 84: loadings confronto C e S

Nella figura 83 sono rappresentati gli scores dei confronti tra il flacone C e S, a temperatura ambiente, sottoposti a vuoto e camera climatica ed esposti a lampada ad arco di xeno. Da tali confronti si evince che la variabilità tra i campioni è maggiore al tempo T0 che al T1 e al T2. I grafici di loadings indicano che le regioni suscettibili a variazione si osservano a lunghezze d'onda pari a 1180 e 1250 nm, ed intorno a 1480 e 1550 nm.

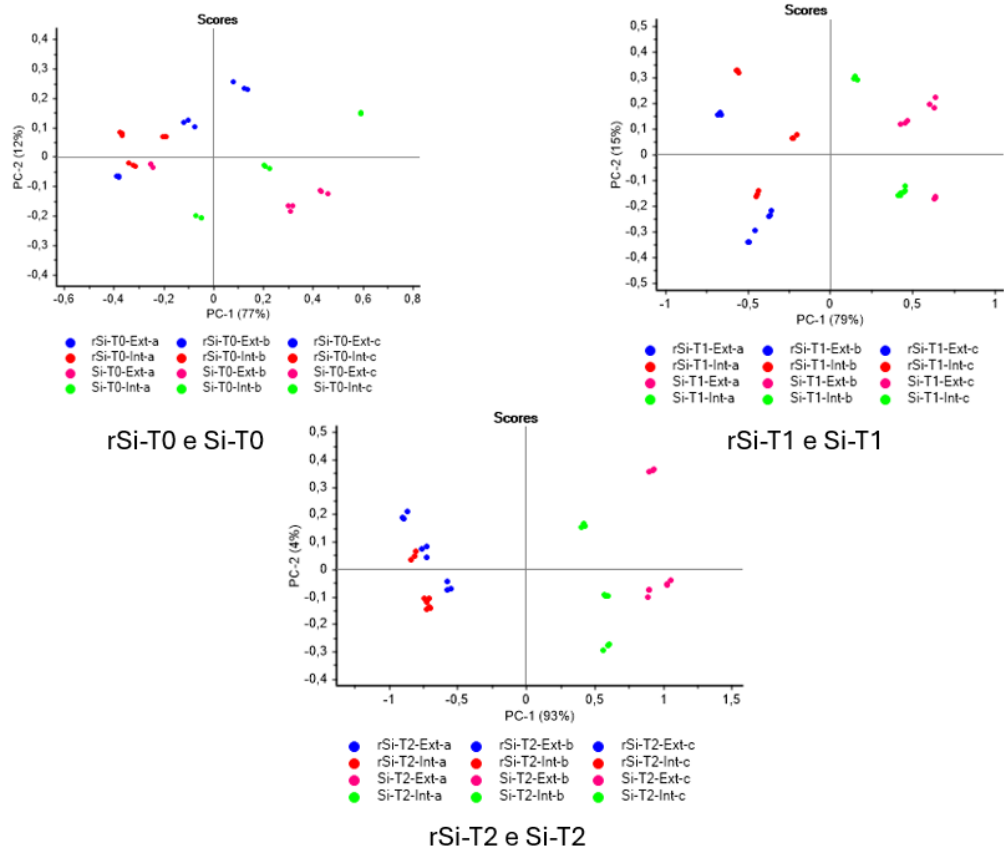


Figura 85: scores confronto rSi e Si

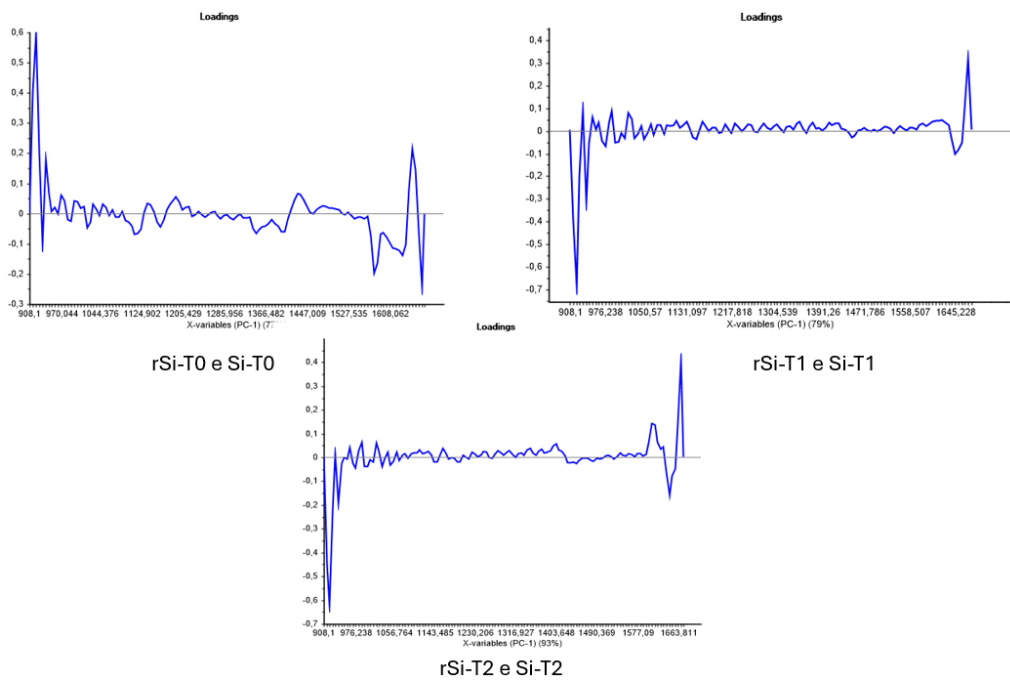


Figura 86: loadings confronto rSi e Si

Tra rSi e Si, derivati rispettivamente da flaconi in rPET e PET, si osservano differenze tra le superfici. Al T0, la variabilità registrata è inferiore rispetto

a quanto osservato ai tempi T1 e T2. Le variazioni più marcate si evidenziano nei campioni analizzati al T2, suggerendo una alterazione più significativa indotta da questo trattamento. I loadings raffigurati sopra, mostrano zona spettrale maggiormente variabile a 1600 nm e piccole influenze intorno a 1130, 1200 e 1400 nm.

## 5.5 RISULTATI METODO 4.5

Di seguito sono riportate le tabelle ed i grafici degli andamenti dei campioni analizzati al tensimetro secondo metodo di compressione 4.5. Per tutti i flaconi analizzati secondo metodo 1, sono stati presi in considerazione valori di forza massima applicata ed il lavoro. Per quelli sottoposti a metodo 2, i valori di spostamento massimo e lavoro.

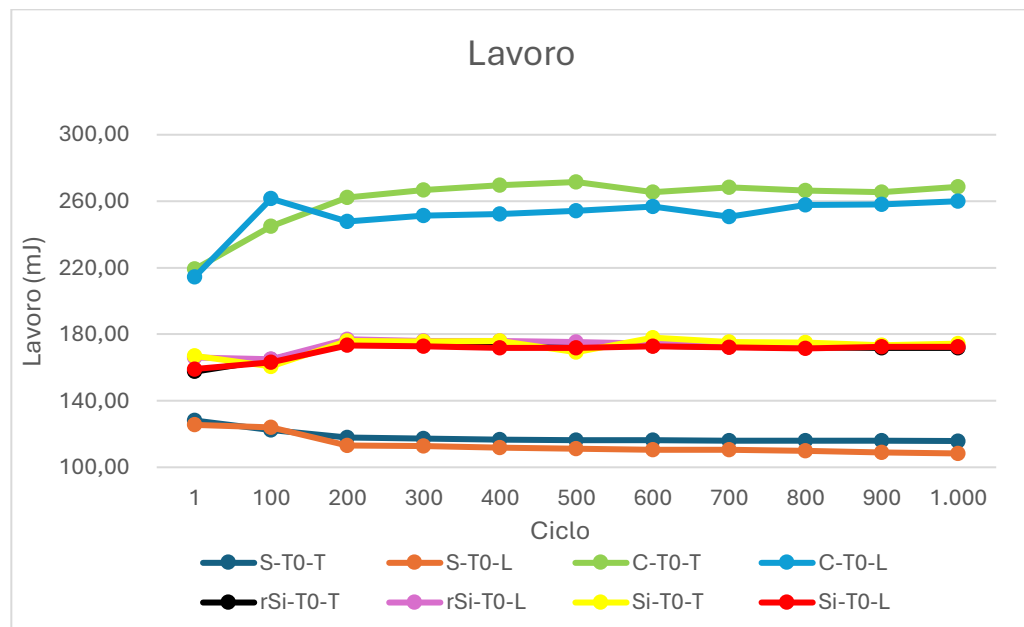


Figura 87: grafico lavoro di tutti i campioni al T0

Il grafico riportato sopra mostra il lavoro, espresso in mJ, di tutti i campioni analizzati al tempo T0. Si osserva che i campioni C-T0 hanno un valore che cresce da circa 220 mJ a 260, tra il ciclo 1 e 200, per poi stabilizzarsi su questo valore. Nei campioni rSi-T0 E Si-T0, il lavoro aumenta da circa 160 mJ fino a 170, mantenendosi pressoché costante. Al

contrario, per S-T0, il lavoro decresce leggermente intorno ad un valore di 110 mJ.

Nelle tabelle e nei grafici, si riportano i valori di forza e lavoro dei flaconi S analizzati nelle tre condizioni sperimentali T0, T1 e T2.

Tabella 18: valori di forza delle prove sui flaconi S

<b>NOME</b>	<b>Forza ciclo 1 (N)</b>	<b>Forza ciclo 100 (N)</b>	<b>Forza ciclo 500 (N)</b>	<b>Forza ciclo 1000 (N)</b>	<b>Forza media (N)</b>	<b>Dev. St. Forza</b>
<b>S-T0-T</b>	17,08	16,31	15,51	15,43	15,740	0,512
<b>S-T0-L</b>	16,73	16,55	14,84	14,45	15,115	0,779
<b>S-T1-T</b>	17,90	17,29	18,09	17,63	17,958	0,355
<b>S-T1-L</b>	18,10	17,07	16,15	15,83	16,335	0,665
<b>S-T2-T</b>	14,94	14,45	14,26	14,06	14,295	0,246
<b>S-T2-L</b>	14,62	14,13	14,26	13,98	14,203	0,197

Tabella 19: lavoro compiuto dei campioni S

<b>NOME</b>	<b>Lavoro ciclo 1 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 100 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 500 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 1000 (mJ)</b>	<b>Lavoro medio (mJ)</b>	<b>Dev. St. Lavoro</b>
<b>S-T0-T</b>	128,12	122,36	116,35	115,81	118,066	3,835
<b>S-T0-L</b>	125,50	124,12	111,30	108,35	113,366	5,842
<b>S-T1-T</b>	134,21	129,64	135,71	132,25	134,687	2,662
<b>S-T1-L</b>	135,74	128,01	121,11	118,73	122,514	4,985
<b>S-T2-T</b>	111,12	108,40	106,98	105,43	107,134	1,606
<b>S-T2-L</b>	109,72	106,01	106,36	104,85	106,538	1,482

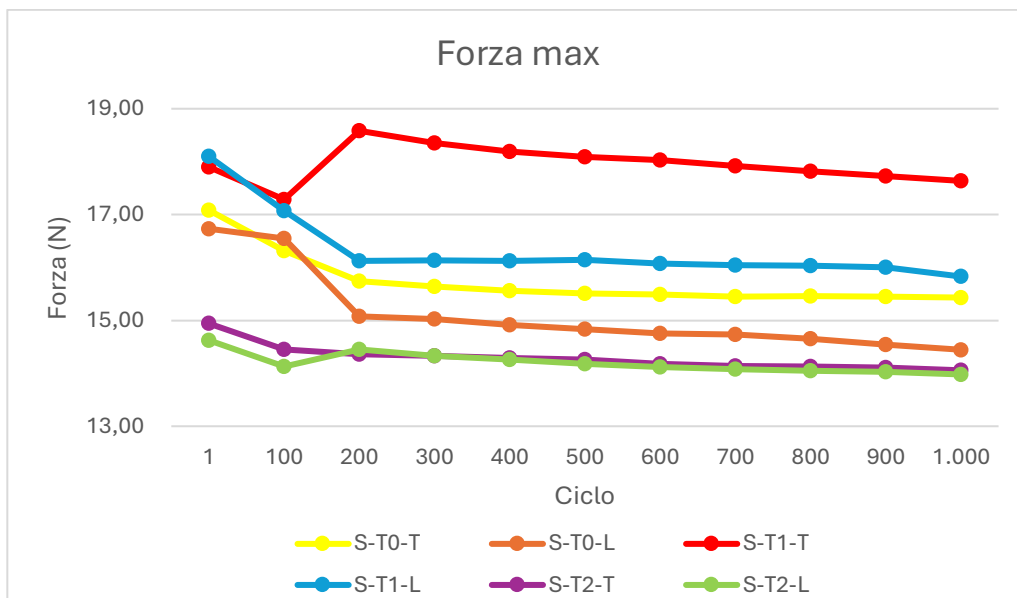


Figura 88: grafico forza dei campioni S

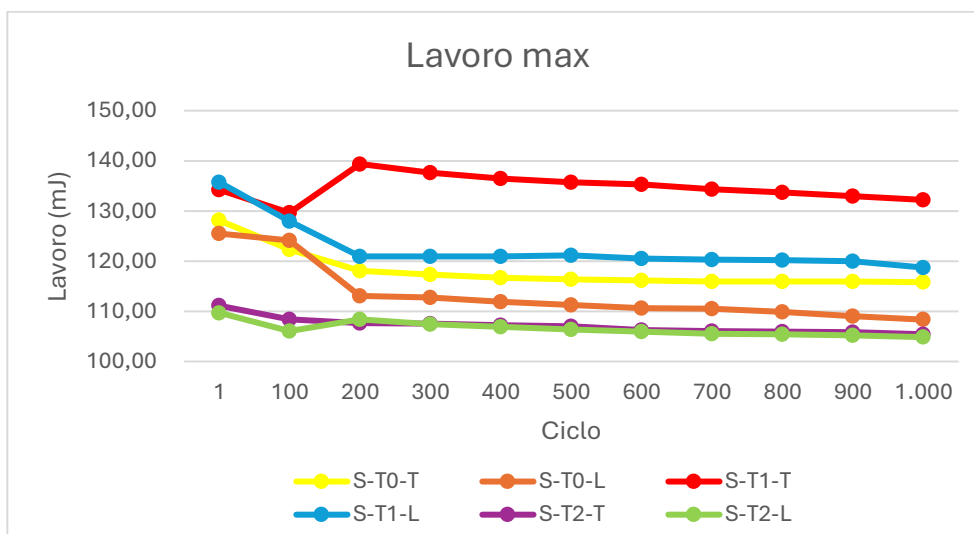


Figura 89: grafico andamento del lavoro di S

Per i campioni S al T0, al T1 e al T2, analizzati attraverso un metodo di compressione a controllo corsa ciclico (metodo 1), essendo lo spostamento costante intorno ai 15,0 mm, si verifica una diminuzione della forza applicata. La forza necessaria per raggiungere lo spostamento imposto, diminuisce all'aumentare della deformazione del flacone. Di conseguenza, anche il lavoro diminuisce. Questo andamento si è verificato nei campioni con linea di saldatura in posizione sia trasversale sia longitudinale rispetto all'asse del tubo di compressione. Il confronto tra le condizioni mostra che

la forza applicata sul flacone sottoposto a trattamento in Suntest xls+, metodo 4.2, è inferiore rispetto a quella richiesta dagli altri due, suggerendo che il trattamento effettuato abbia recato alterazioni delle proprietà meccaniche nel campione. Se la forza diminuisce, anche il lavoro compiuto segue lo stesso andamento.

Tabella 20: valori di spostamento dei campioni C

<b>NOME</b>	<b>Spostamento ciclo 1 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 100 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 500 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 1000 (mm)</b>	<b>Spostamento medio (mm)</b>	<b>Dev. St. Spostamento</b>
<b>C-T0-T</b>	11,09	12,25	13,57	13,42	13,054	0,740
<b>C-T0-L</b>	10,76	13,15	12,74	12,98	12,584	0,638
<b>C-T1-T</b>	11,67	12,66	12,55	13,99	13,022	0,679
<b>C-T1-L</b>	12,27	13,49	13,75	13,90	13,586	0,872
<b>C-T2-T</b>	12,26	13,25	13,50	13,65	13,394	0,400
<b>C-T2-L</b>	12,34	14,23	14,58	14,66	14,313	0,668

Tabella 21: lavoro dei campioni C

<b>NOME</b>	<b>Lavoro ciclo 1 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 100 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 500 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 1000 (mJ)</b>	<b>Lavoro medio (mJ)</b>	<b>Dev. St. Lavoro</b>
<b>C-T0-T</b>	219,18	244,89	271,59	268,58	260,773	15,518
<b>C-T0-L</b>	214,60	261,55	254,38	259,90	251,388	12,909
<b>C-T1-T</b>	231,72	253,56	250,40	279,78	260,232	14,118
<b>C-T1-L</b>	245,00	268,91	275,92	278,93	272,832	17,915
<b>C-T2-T</b>	243,37	266,07	269,82	272,21	268,324	8,851
<b>C-T2-L</b>	246,64	285,94	291,90	293,54	286,155	13,392

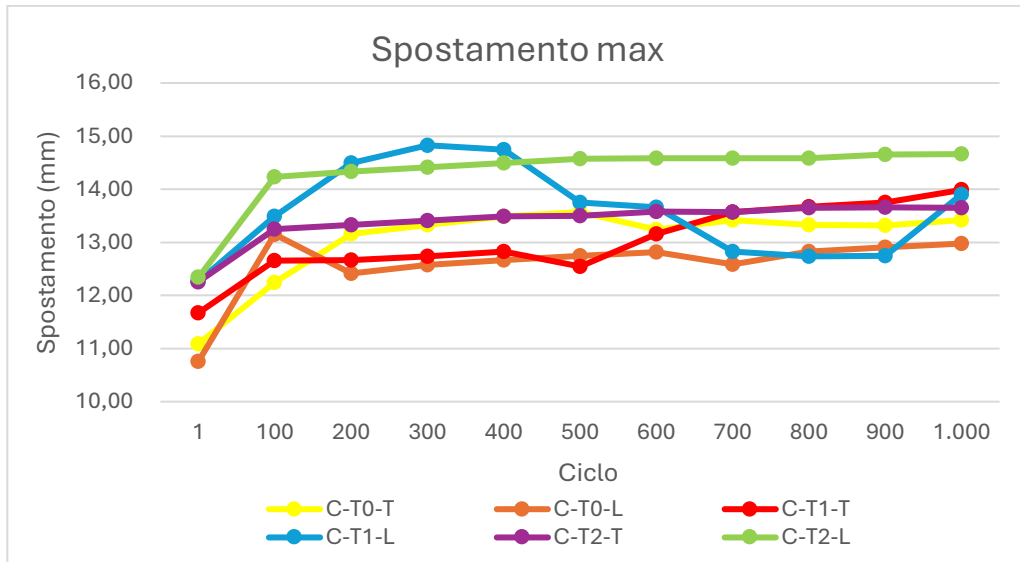


Figura 90: andamento spostamento flaconi C

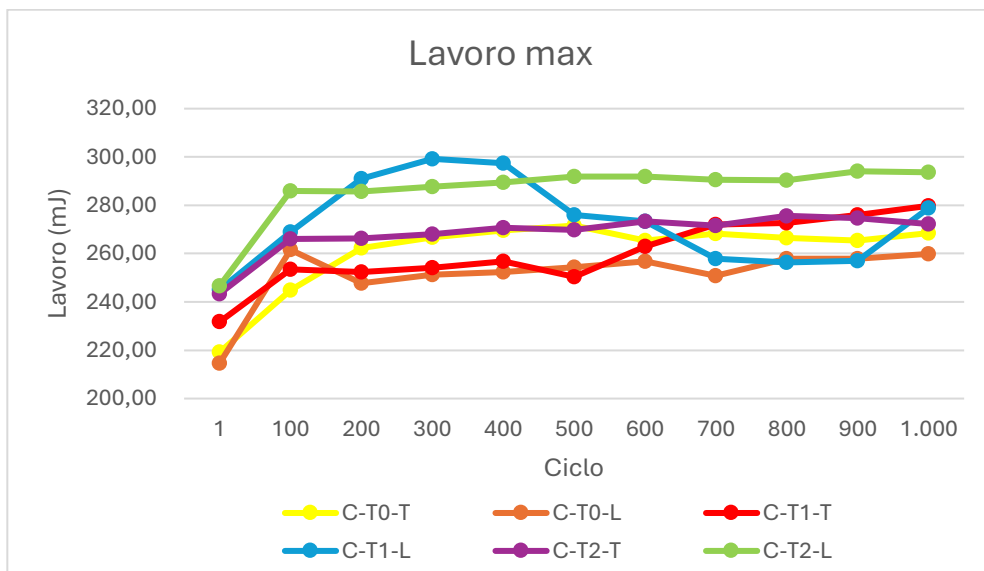


Figura 91: andamento lavoro dei flaconi C

Le tabelle e i grafici sopra riportati, mostrano l'andamento dello spostamento e del lavoro. I flaconi C sono stati testati utilizzando il metodo 2, che prevede una compressione a controllo forza ciclico; per questo motivo la forza applicata risulta costante, intorno ai 40 N. In questo contesto, l'attenzione è posta sul valore di spostamento esercitato dal tubo sul flacone. Si osserva una media di spostamento tra i 12,5 e 14 mm. I valori più elevati si riscontrano nei flaconi sottoposti a cicli di vuoto (T1),

ed in misura maggiore in quelli esposti a lampada ad arco di xeno (T2), segno che questo trattamento ha alterato maggiormente il flacone. L'aumento del valore di spostamento provoca anche l'incremento del lavoro compiuto. Il valore medio dei flaconi è tra i 250 e 286 mJ, con valori più elevati per i flaconi al T2.

Di seguito sono riportati i valori di spostamento e lavoro dei campioni rSi realizzati in rPET.

Tabella 22: risultati dello spostamento in mm di rSi

<b>NOME</b>	<b>Spostamento ciclo 1 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 100 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 500 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 1000 (mm)</b>	<b>Spostamento medio (mm)</b>	<b>Dev. St. Spostamento</b>
rSi-T0-T	7,68	7,96	8,49	8,46	8,361	0,275
rSi-T0-L	8,10	8,08	8,66	8,66	8,550	0,229
rSi-T1-T	8,14	8,20	8,00	8,00	8,022	0,077
rSi-T1-L	8,10	8,08	8,33	7,88	8,278	0,448
rSi-T2-T	7,83	8,33	8,33	8,32	8,278	0,148
rSi-T2-L	8,26	8,33	8,42	8,40	8,385	0,055

Tabella 23: lavoro rSi

<b>NOME</b>	<b>Lavoro ciclo 1 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 100 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 500 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 1000 (mJ)</b>	<b>Lavoro medio (mJ)</b>	<b>Dev. St. Lavoro</b>
rSi-T0-T	157,54	164,75	173,14	171,89	171,060	5,314
rSi-T0-L	166,15	164,99	175,41	172,72	173,198	3,986
rSi-T1-T	167,11	169,69	163,39	162,82	163,769	2,485
rSi-T1-L	169,50	167,01	169,49	161,50	170,429	8,557
rSi-T2-T	163,25	171,35	171,08	169,87	170,006	2,318
rSi-T2-L	167,42	169,81	173,88	172,62	172,028	2,726

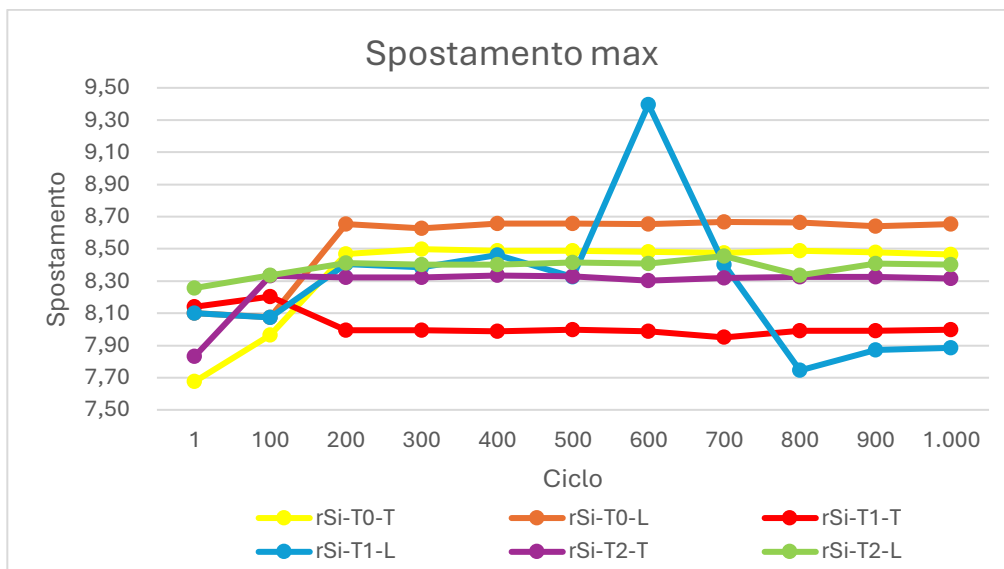


Figura 92: andamento dello spostamento di rSi

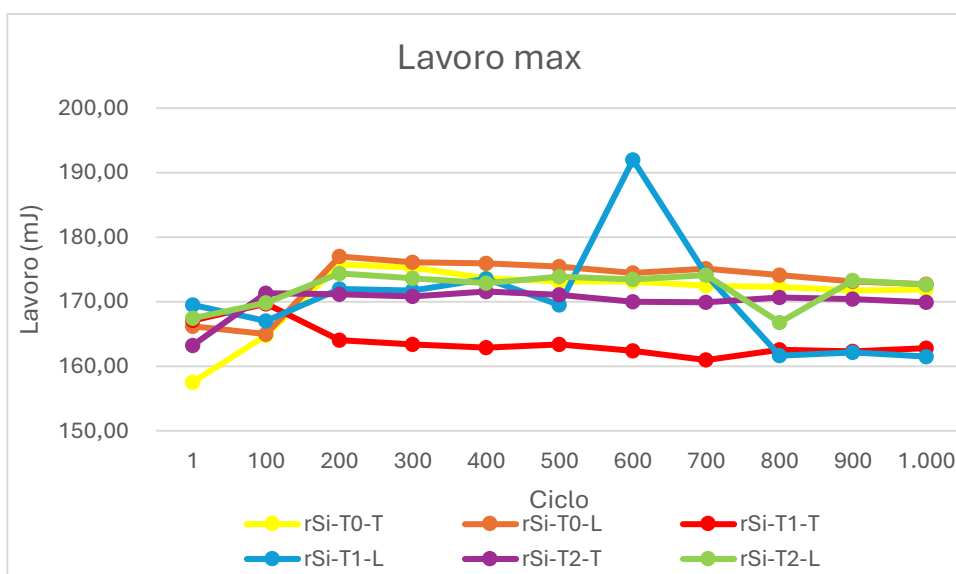


Figura 93: grafico andamento lavoro di rSi

Per quanto riguarda i campioni di rPET, tabelle 22 e 23, il valore di spostamento medio è tra 8 e 8,5 mm, mentre il lavoro intorno a 160 e 175 mJ. La figura 92 mostra un incremento dei valori di spostamento nei primi 200 cicli, per poi stabilizzarsi. Il valore del lavoro (figura 93), segue un andamento simile, con un aumento iniziale seguito poi da un assestamento. In questa analisi, le tre condizioni sperimentali hanno prodotto risultati simili tra loro, indicando che i trattamenti a cui sono sottoposti al T1 e al T2, non hanno provocato alterazioni significative del materiale.

Tabella 24: risultati valore di spostamento flaconi Si

<b>NOME</b>	<b>Spostamento ciclo 1 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 100 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 500 (mm)</b>	<b>Spostamento ciclo 1000 (mm)</b>	<b>Spostamento medio (mm)</b>	<b>Dev. St. Spostamento</b>
<b>Si-T0-T</b>	7,91	7,89	8,48	8,56	8,444	0,272
<b>Si-T0-L</b>	7,76	8,00	8,39	8,41	8,304	0,218
<b>Si-T1-T</b>	8,35	7,98	8,16	8,23	8,152	0,092
<b>Si-T1-L</b>	8,26	8,49	7,88	7,90	7,964	0,223
<b>Si-T2-T</b>	8,67	8,67	8,67	8,67	8,654	0,014
<b>Si-T2-L</b>	8,34	8,32	8,39	8,49	8,406	0,064

Tabella 25: valori del lavoro compiuti nelle analisi dei campioni Si

<b>NOME</b>	<b>Lavoro ciclo 1 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 100 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 500 (mJ)</b>	<b>Lavoro ciclo 1000 (mJ)</b>	<b>Lavoro medio (mJ)</b>	<b>Dev. St. Lavoro</b>
<b>Si-T0-T</b>	166,92	160,71	169,38	174,30	172,792	5,111
<b>Si-T0-L</b>	159,11	163,10	171,67	172,33	170,262	4,638
<b>Si-T1-T</b>	171,36	164,40	167,75	170,69	167,415	2,307
<b>Si-T1-L</b>	170,26	172,30	161,18	160,50	162,420	5,101
<b>Si-T2-T</b>	178,67	179,64	179,57	179,18	178,834	0,546
<b>Si-T2-L</b>	174,57	171,52	173,82	169,36	172,398	2,348

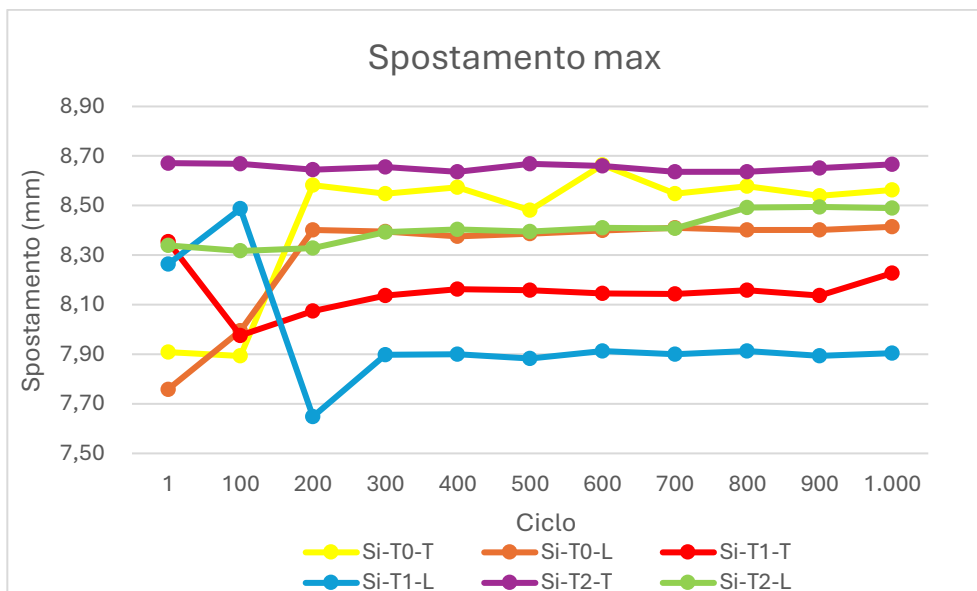


Figura 94: proiezione spostamento flaconi Si

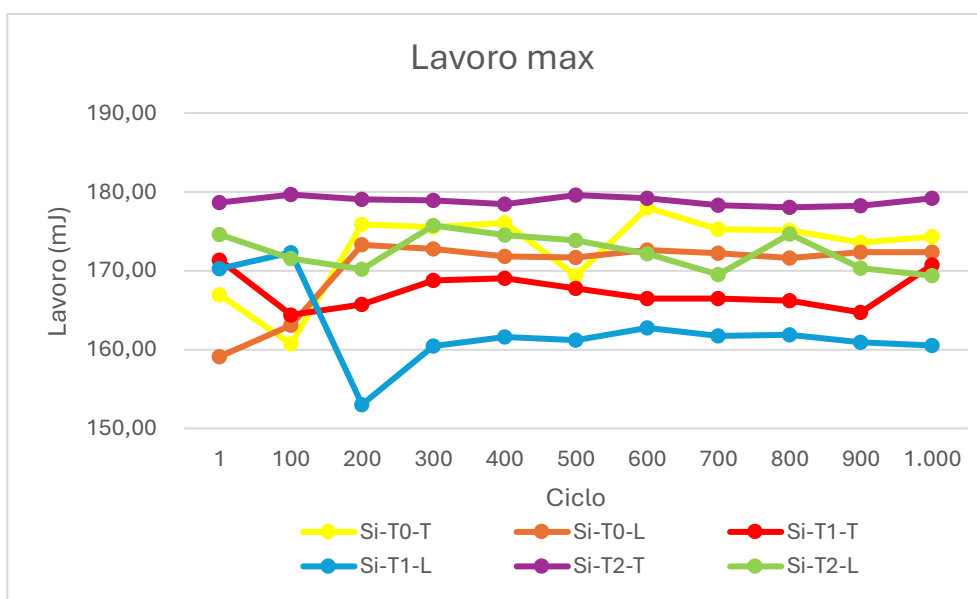


Figura 95: proiezione lavoro compiuto nei flaconi Si

Valori simili ai campioni di rSi si riscontrano anche nei campioni di PET vergine (Si). Come riportato nelle tabelle 24 e 25, lo spostamento medio varia tra 7,9 e 8,6 mm, mentre il lavoro tra 160 e 180 mJ. Sia lo spostamento sia il lavoro mostrano un andamento costante per tutti i flaconi, salvo eccezioni nei primi 200 cicli, durante i quali si osservano oscillazioni prima di raggiungere una stabilizzazione. Le variazioni più significative si sono verificate per i campioni Si-T0-T, e Si-T1-T e Si-T1-

L, dove lo spostamento inizialmente diminuisce, per poi aumentare nuovamente e stabilizzarsi.

Per concludere, osservando tutti i grafici sia dei flaconi mantenuti a condizioni ambientali sia sottoposti a cicli sottovuoto, si evidenzia un comportamento simile. Ciò suggerisce che l'applicazione del vuoto non altera la resistenza alla compressione dei materiali analizzati. I campioni esposti a radiazione emessa da una lampada ad arco di xeno mostrano un'alterazione maggiore, soprattutto per i flaconi S e C, entrambi realizzati con HDPE. Al contrario, i flaconi di PET e rPET (Si e rSi) invece, presentano comportamenti simili in tutte e tre le condizioni. Pertanto, si consiglia di utilizzare una cella di carico maggiore al fine di ottenere dati più accurati e rappresentativi.

Di seguito sono riportate delle immagini dei flaconi post analisi dove è possibile osservare una lieve deformazione. Nei flaconi C e S sono state riscontrate deformazioni visibili, mentre per rSi e Si non è stato possibile.

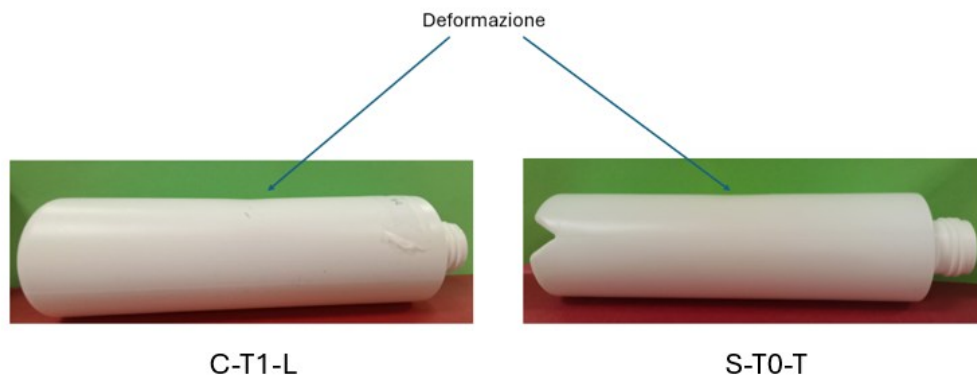


Figura 96: deformazione nei campioni C-T1-L e S-T0-T

## 5.6 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Nello corso dello studio sono state condotte diverse prove su varie tipologie di campioni. Sono stati analizzati flaconi realizzati in polietilene ad alta densità (HDPE), identificati con le sigle S e C; e flaconi di polietilentereftalato (PET) sia vergine sia riciclato, denominati rispettivamente Si e rSi.

Avendo a disposizione campioni per ogni tipo di materiale, è possibile fare un confronto tra i due campioni di HDPE e i due di PET.

Per quanto riguarda flaconi di HDPE, nel paragrafo 5.1, i flaconi S risultano meno resistenti ai cicli di vuoto rispetto ai flaconi C, sia in condizioni ambientali sia in condizioni accelerate. Inoltre, si può osservare come l'esposizione in camera climatica abbia alterato le caratteristiche del flacone S-T1, causando una perdita in tempi minori rispetto a quello in condizioni ambientali, S-T0.

Una possibile spiegazione per cui i flaconi S sono meno resistenti rispetto a quelli C, può essere attribuita allo loro spessore. Infatti, come mostrato nel paragrafo 5.3, è possibile osservare una facile rottura nei provini ottenuti da S, essendo di uno spessore inferiore. Al contrario, nei provini derivati dai flaconi C, lo yield point non risulta identificabile in alcuna delle condizioni testate. Anche in questo test, il calore ha alterato le proprietà meccaniche. I valori di spostamento e forza necessari per provocare la rottura, sono minori per i campioni sottoposti a camera climatica rispetto a quelli analizzati a temperatura ambiente. Nei provini derivati dal flacone esposto alla luce generata dalla lampada ad arco di xeno (T2), si registrano valori di forza, spostamento e modulo elastico medi inferiori rispetto a quelli misurati al tempo T0, e simili a quelli al T1 e T2. Ciò significa che anche questo trattamento ha determinato una alterazione delle proprietà meccaniche.

Dall'analisi effettuata in Suntest xls+, paragrafo 5.2, non è stata riscontrata alcuna variazione estetica, nessun imbrunimento, ingiallimento o variazioni di forma, in entrambe le tipologie di materiale.

Al paragrafo 5.4 sono descritte le analisi condotte il MicroNIR. Gli spettri mostrano picchi tra 1200 e 1400 attribuibili ai legami C-H. Le analisi delle componenti principali (PCA), nel campione S e C, mostrano variazioni tra le superfici interne ed esterne, e all'interno della stessa superficie. È stato

osservato che le condizioni imposte nella camera climatica ed i cicli di vuoto, ed anche il trattamento in Suntest xls+, hanno influenzato le proprietà superficiali di entrambe le tipologie. Il confronto tra i due tipi mostra variabilità. I grafici dei loadings mostrano regioni spettrali influenti comprese tra 1180-1250 nm e 1480-1550 nm.

Per quanto riguarda le prove di compressione, risultati al paragrafo 5.5, non è possibile un confronto diretto tra i flaconi S e C, poiché sono stati utilizzati due metodi di analisi differenti. Tuttavia, si possono confrontare cambiamenti tra flaconi della stessa linea produttiva, tra campioni al T0, al T1 e al T2. Nei campioni di S-T1, è necessaria una maggiore forza applicata per raggiungere uno spostamento intorno ai 15 mm. Mentre per il flacone S, nelle medesime condizioni (C-T1), si osserva uno spostamento maggiore necessario per raggiungere una forza applicata intorno ai 40 N. A seguito del trattamento in Suntest xls+, il flacone S-T2 mostra una forza applicata minore, con conseguente valore ridotto del lavoro compiuto. Per quello C-T2, il valore di spostamento è maggiore rispetto ai flaconi analizzati in altre condizioni. Questi risultati indicano che le proprietà meccaniche di entrambi i materiali hanno subito alterazione.

Per i campioni di polietilentereftalato, si può effettuare un confronto diretto tra i flaconi realizzati in materiale vergine e riciclato. Per quanto riguarda le prove sottovuoto, i flaconi Si e di rSi non hanno mostrato perdite sia per quelli mantenuti a temperatura ambiente sia per quelli in condizioni accelerate in camera climatica.

L'esposizione all'irraggiamento solare generata dalla lampada allo xeno, paragrafo 5.2, ha determinato nel flacone di rSi una deformazione nella superficie non esposta alla luce, con la sagoma del pesetto utilizzato per mantenerlo saldo alla griglia. Al contrario, in Si non si è verificata alcuna deformazione.

Le analisi effettuate al tensimetro per determinare la resistenza alla trazione, non hanno mostrato rotture dei provini. Ma si può valutare i moduli elastici, o di Young, dei provini. Quello che si osserva è un valore più alto nel campione vergine rispetto a quello riciclato. Quindi, si può suggerire che il PET è più rigido rispetto al PET riciclato e tale proprietà può essere attribuita al numero di ricicli e contaminanti che possono alterare la rigidità del materiale.

Dalle analisi nel vicino infrarosso (NIR), paragrafo 5.4, si ottengono spettri, sia per Si sia per rSi, con un picco principale a 1650 nm corrispondente ai legami C=O, e due picchi secondari a 1130 e 1400 nm riconducibili ai legami C-H. Gli score evidenziano maggior variabilità nei campioni riciclati rispetto a quelli vergini. Anche in questo caso, le analisi descritte al metodo 4.1 hanno provocato variazione delle proprietà superficiali. Il confronto tra le due tipologie mostra variabilità tra le superfici interne ed esterne dei campioni. I loading indicano la regione spettrale più influente a 1600 nm e zone secondarie a 1200 e 1400.

Infine, dai risultati descritti al paragrafo 5.5, prove di compressione, sia per il campione vergine sia per quello riciclato, si osserva una riduzione della corsa necessaria per raggiungere i 40 N per quelli sottoposti a vuoto (Si-T1 e rSi-T1). Di conseguenza, si può affermare che l'applicazione del vuoto ha alterato la resistenza alla compressione. Anche per il flacone rSi-T2 sottoposto a metodo 4.2, si rileva uno spostamento inferiore rispetto a quello conservato a temperatura ambiente, rSi-T0. Al contrario, nel flacone realizzato con materiale vergine, i valori di forza, spostamento e lavoro sono simili a quelli analizzati al T0.

## **6 CONCLUSIONI**

Il presente studio è stato condotto con l'obiettivo di valutare le proprietà meccaniche e fisiche dei materiali polimerici utilizzati nel packaging, secondo le normative ASTM e ISO, e avvalendosi di strumentazioni quali

camera climatica, tensimetro, Suntest xls+, bilancia, MicroNIR, essiccatore e pompa da vuoto, fustellatrici e microscopio ottico.

I risultati evidenziano differenze tra le due tipologie di flaconi realizzati in polietilene ad alta densità (HDPE) e tra quelli realizzati in polietilentereftalato vergine e riciclato (PET e rPET). In particolare, il flacone S risulta meno resistente alle prove di vuoto e di trazione, probabilmente a causa del suo minor spessore rispetto al flacone C. Per i flaconi in PET, si è osservata differenza del modulo elastico: quello del campione rSi è inferiore rispetto al Si, probabilmente attribuibile ai processi di riciclo. Inoltre, si è osservata una minor resistenza quando esposta a lampada ad arco di xeno, ove si è verificata una deformazione della superficie non esposta.

Tuttavia, alcune limitazioni come la cella di carico da 50 N del Tensile EZ-LX, troppo piccola per effettuare test di trazione e compressione, non hanno permesso di ottenere dati sufficientemente accurati da poter effettuare un valido confronto tra le diverse tipologie di materiali.

Per studi futuri, si consiglia di eseguire test di trazione e compressione con cella di carico di maggior capacità. Inoltre, si suggerisce di eseguire ulteriori prove per ottenere una valutazione delle proprietà meccaniche più completa. Tra queste, si propongono il test di valutazione della durezza mediante la prova dell'impronta sferica, secondo norma ISO 2039-1 [66], test di caduta (drop test) per simulare urti accidentali durante la movimentazione in conformità con la norma ASTM D5276 o ISO 2248 [67] [68], e test di vibrazione per simulare le vibrazioni subite durante i trasporti su strada, rotaia, mare o aereo secondo la norma ASTM D4169 [69].

In conclusione, lo studio ha fornito un primo approfondimento delle proprietà meccaniche e fisiche di questi flaconi, evidenziando differenze tra le tipologie realizzati in HDPE e tra i PET e rPET, con l'auspicio che

ulteriori ricerche possano portare un approfondimento migliore di tali differenze.

## 7 RIFERIMENTI

- [1] M. LANCHI, L'impiego dei materiali polimerici nell' imballaggio, ENEA - ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E L'AMBIENTE, 2001.
- [2] S. L. Luciano Piergiovanni, Food packaging: Materiali, tecnologie e qualità degli alimenti, Springer , 2010.
- [3] G. M. M. G. a. S. S. Silvia Morel, «Cosmetic Packaging: European Regulatory Aspects and Sustainability,» *Cosmetics*, 2024.
- [4] N. R. P. Gaurav Kr. Deshwal, «Review on metal packaging: materials, forms, food applications, safety and recyclability,» *Journal of Food Science and Technology*, p. 16, 2019.
- [5] C. d. C. d. Torino, «Confezioni e imballaggi? Vai sul sicuro.,» 20 Ottobre 2008. [Online]. Available: [https://www.to.camcom.it/sites/default/files/regolazione-mercato/Imballaggi\\_guida.pdf](https://www.to.camcom.it/sites/default/files/regolazione-mercato/Imballaggi_guida.pdf). [Consultato il giorno 13 Marzo 2025].
- [6] B. B. Kenneth Marsh, « Food Packaging? Roles, Materials, and Environmental Issues,» *Journal of Food Science*, p. 18, 2007.
- [7] B. M. G. S. S. S. Valentina Beccali, «Imballaggi in alluminio - Linee guida per una progettazione ...,» 12 09 2018. [Online]. Available: [https://www.cial.it/wp-content/uploads/2020/10/Imballaggi-in-Alluminio\\_Linee-guida-per-una-progettazione-ecosostenibile.pdf](https://www.cial.it/wp-content/uploads/2020/10/Imballaggi-in-Alluminio_Linee-guida-per-una-progettazione-ecosostenibile.pdf). [Consultato il giorno 13 Marzo 2025].
- [8] PlasticFinder, «HDPE (Polietilene ad alta densità),» [Online]. Available: <https://www.plasticfinder.it/hdpe/hdpe-polietilene-ad-alta-densita>. [Consultato il giorno 13 Marzo 2025].
- [9] A. C. Andrew Peacock, Polymer Chemistry: Properties and applications, HANSER, 2006.
- [10] A. K. P. R. S. Sachin Kumar, «A review on tertiary recycling of high-density polyethylene to fuel,» *Resources, Conservation and recycling*, 2011.
- [11] M. P. Cornelia Vasile, Pratical guide to polyethylene, Rapra Technology limited, 2005.

- [12] R. Nistico, «Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry,» *Polymer Testing*, 2020.
- [13] Plasticmagazine, «PVC-cloruro-di-polivinile-caratteristiche-applicazioni-mercato,» 14 Aprile 2022. [Online]. Available: <https://www.plastmagazine.it/pvc-cloruro-di-polivinile-caratteristiche-applicazioni-mercato/>. [Consultato il giorno 16 Marzo 2025].
- [14] A. S. Elgharbawy, «Poly Vinyl Chloride Additives and Applications - A Review,» *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 2022 .
- [15] M. K. G. R. N. L. A. E. Zouhair Ait-Touchente, «Recent advances in polyvinyl chloride (PVC) recycling,» *Polymers for Advanced Technologies*, p. 2, 2023.
- [16] K. P. N. H. M. N. a. N. S. Jaworski C. Capricho, «Upcycling Polystyrene,» *Polymers*, pp. 2-6, 2022.
- [17] J. A. Brydson, *Plastic Materials*. Seventh edition, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [18] H. A. Maddah, «Polypropylene as a Promising Plastic: A Review,» *American Journal of Polymer Science*, p. 11, 2016.
- [19] K. G. M. K. N. B. M. S. Frederic Debeaufort, «Glass packaging,» in *Packaging Materials and Processing for Food, Pharmaceuticals and Cosmetics*, Iste/Hermes Science Pub, 2021, p. 49.
- [20] M. G. F. N. Emanuel Guadagnino, «Glass: The best material for pharmaceutical packaging,» *International journal of Applied Glass science*, 2022.
- [21] R. E. S. Z. Shivsharan U.S., «Packaging of cosmetics: a review,» *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research.*, 2014.
- [22] R. Pack, «Carta Kraft: che cos'e?,» [Online]. Available: <https://www.rcapack.com/carta-kraft-che-cose/>. [Consultato il giorno 20 Marzo 2025].
- [23] W. Paper, «Cos'è la carta glassine?,» 30 Ottobre 2023. [Online]. Available: <https://it.wanpupaper.com/info/what-is-glassine-paper-90886993.html>. [Consultato il giorno 20 Marzo 2025].
- [24] S. E. M. S. D.-P. K. D. S. Diana Twede, *Cartons, crates and corrugated boards. Handbook of paper and wood packaging technology.*, DTStech publications, 2015.
- [25] D. Timber, «Hardwood vs. Softwood: Differences, Uses, Species & Examples. Last update: 12 Mar 2024,» 21 Ottobre 2021 . [Online]. Available: <https://duffieldtimber.com/the-workbench/timber-trends/hardwood-vs->

softwood-what-are-the-differences#:~:text=Hardwoods%20derive%20from%20angiosperm%20trees,is%. [Consultato il giorno 21 Marzo 2025].

- [26] G. N. Sivaraman, «Packaging Technology,» [Online]. Available: [https://agpcptech.weebly.com/uploads/1/2/4/2/12423472/pt\\_combinepdf.pdf](https://agpcptech.weebly.com/uploads/1/2/4/2/12423472/pt_combinepdf.pdf). [Consultato il giorno 22 Marzo 2025].
- [27] E. Commission, «Glossary:Waste - Statistics Explained - Eurostat,» [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Waste>. [Consultato il giorno 3 Maggio 2025].
- [28] Y. D. T. & R. S. AROKIARAJ DAVID, «RECOVER, RECYCLE AND REUSE: AN EFFICIENT WAY TO REDUCE THE WASTE,» *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, pp. 31-41, 2019.
- [29] «Riciclaggio,» Treccani, 2007. [Online]. Available: <https://www.treccani.it/enciclopedia/riciclaggio/>. [Consultato il giorno 3 Maggio 2025].
- [30] E. Commission, «Glossary: Reuse of waste - Statistics Explained - Eurostat,» [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Reuse\\_of\\_waste](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Reuse_of_waste). [Consultato il giorno 3 Maggio 2025].
- [31] P. Europe, «Plastics – the fast Facts 2023,» 2023. [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>. [Consultato il giorno 3 Maggio 2025].
- [32] E. Commission, «Packaging waste statistics - Statistics Explained - Eurostat, 10 Ottobre 2024. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging\\_waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics). [Consultato il giorno 3 Maggio 2025].
- [33] M. K. F. D. Kotiba Hamada, « Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent works,» *Polymer Degradation and Stability*, 2013.
- [34] «TRASPORTO, INFRASTRUTTURE E LOGISTICA,» Educazione Tecnica, 12 Settembre 2018. [Online]. Available: <https://www.educazionetecnicaonline.com/2018/09/12/i-mezzi-di-trasporto/>. [Consultato il giorno 26 Maggio 2025].
- [35] C. T. Srl, «Quali sono i vari tipi di trasporto merci?,» 12 Aprile 2023. [Online]. Available: <https://www.cippatrasporti.ch/it/ultime-notizie/quali-sono-i-vari-tipi-di-trasporto-merci/>. [Consultato il giorno 12 Aprile 2025].

- [36] S. S. I. Srl, «Trasporto aereo merci: cosa sapere - SIExpress,» [Online]. Available: <https://www.siexpress.com/trasporto-aereo-merci-cosa-sapere/>. [Consultato il giorno 12 Aprile 2025].
- [37] X. Srl, «Trasporto Aereo - Spedizione Merci via Aerea - XPED,» [Online]. Available: <https://xpedinternational.com/servizi/trasporto-aereo-merci/>. [Consultato il giorno 12 Aprile 2025].
- [38] DSV, «Soluzioni e vantaggi del trasporto su rotaia,» [Online]. Available: <https://www.dsv.com/it-it/le-nostre-soluzioni/mezzi-di-trasporto/trasporto-su-rotaia/soluzioni-e-vantaggi-del-trasporto-su-rotaia>. [Consultato il giorno 12 Aprile 2025].
- [39] «Trasporto su Rotaia: Trasporto Ferroviario delle Merci,» db group, [Online]. Available: <https://www.dbgroup.net/it/spedizioni-internazionali/trasporto-su-rotaia>. [Consultato il giorno 2025 Aprile 2025].
- [40] Treccani, «marittimo, trasporto - Enciclopedia - Treccani,» 2012. [Online]. Available: [https://www.treccani.it/enciclopedia/trasporto-marittimo\\_\(Dizionario-di-Economia-e-Finanza\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/trasporto-marittimo_(Dizionario-di-Economia-e-Finanza)/). [Consultato il giorno 13 Aprile 2025].
- [41] S. S.r.l, «Trasporto marittimo: quali sono i vantaggi - SOGESE,» 30 Agosto 2024. [Online]. Available: <https://www.sogeseitalia.it/articoli/news/stock-solution/trasporto-marittimo-quali-sono-i-vantaggi/>. [Consultato il giorno 13 Aprile 2025].
- [42] A. Moller-Maersk, «Trasporto marittimo,» [Online]. Available: <https://www.maersk.com/it-it/transportation-services/ocean-transport>. [Consultato il giorno 13 Aprile 2025].
- [43] Trip.com, «Sito ufficiale di Trip.com - Voli da Milano per Shanghai,» [Online]. Available: <https://it.trip.com/hot/milano-shanghai-ore-di-volo/>. [Consultato il giorno 26 Maggio 2025].
- [44] I. I. Transit, «InInternational Transit Spedizioni Marittime,» 2023. [Online]. Available: <https://internationaltransit.it/international-transit-spedizioni-marittime/>. [Consultato il giorno 13 Aprile 2025].
- [45] X. International, «Trasporto su Gomma - Spedizione merci su strada - XPED,» [Online]. Available: <https://xpedinternational.com/servizi/trasporto-su-gomma/>. [Consultato il giorno 12 Aprile 2025].
- [46] C. T. Srl, «Cosa significa trasporto intermodale,» 21 Aprile 2023. [Online]. Available: <https://www.cippatrasporti.ch/it/ultime-notizie/cosa-significa-trasporto-intermodale/>. [Consultato il giorno 13 Aprile 2025].

- [47] «Unità - Significato ed etimologia,» Treccani, [Online]. Available: <https://www.treccani.it/vocabolario/unita/>. [Consultato il giorno 5 Maggio 2025].
- [48] P. C. a. P. B. Alan Rushton, The handbook of logistics & distribution management. 4th edition, Kogan Page Limited, 2010.
- [49] «What Are Unit Load Devices and What Are the Most Common Types?,» PRO CARRIER, [Online]. Available: <https://weareprocarrier.com/news/article/what-are-unit-load-devices-and-what-are-the-most-common-types>. [Consultato il giorno 5 Maggio 2025].
- [50] A. International, «ASTM D5094/D5094M-09(2014) – Standard Test Methods for Gross Leakage of Liquids from Containers with Threaded or Lug-Style Closures (Withdrawn 2023). Last update: ASTM D5094/D5094M-24 (2024),» American Society for Testing and Materials International, 2014.
- [51] «RS15D - Pompa per alto vuoto doppio stadio 250lt/min,» Frizzi s.r.l, [Online]. Available: <https://www.frizzi.it/rs15d-pompa-per-alto-vuoto-doppio-stadio-250lt-min.html>. [Consultato il giorno 2 Aprile 2025].
- [52] «ESSICCATORE VETRO DURAN® DN 300. COPERCHIO ...,» Chimica centro, [Online]. Available: <https://www.chimicacentro.it/prodotto/essiccatore-vetro-duran-dn-300-coperchio-con-rubinetto/>. [Consultato il giorno 26 Maggio 2025].
- [53] Bioidea, «Motic BA410 - Bioidea,» 4 Febbraio 2011. [Online]. Available: <http://www.bioidea.org/pdf/microscopia/Motic%20BA410.pdf>. [Consultato il giorno 2 Aprile 2025].
- [54] «Camera climatica Memmert - Camere climatiche industriali,» Enco s.r.l, [Online]. Available: <https://encosrl.com/termostatazione-ad-aria/camera-climatica-refrigerata-ich.html>. [Consultato il giorno 2 Aprile 2025].
- [55] «Scout™ SKX Portable Balance SKX1202 EU,» OHAUS, [Online]. Available: <https://eu-it.ohaus.com/it-eu/products/balances-scales/portable-balances/scout-skx/skx1202-eu>. [Consultato il giorno 2 Aprile 2025].
- [56] ICH, «Q1A(R2) Guideline,» 6 Febbraio 2003. [Online]. Available: <https://database.ich.org/sites/default/files/Q1A%28R2%29%20Guideline.pdf>. [Consultato il giorno 2 Aprile 2025].
- [57] ISO, «ISO 4892-2:2013 Plastics — Methods of exposure to laboratory light sources — Part 2: Xenon-arc lamps. Last update: ISO 4892-2:2021,» International Organization for Standardization, 2013.
- [58] «SUNTEST XLS+ | Xenon Arc Weathering Instruments,» Atlas, Febbraio 2024. [Online]. Available: <https://www.atlas-mts.com/products/standard->

instruments/xenon-arc-weathering-test/suntest/xls. [Consultato il giorno 3 Aprile 2025].

- [59] A. International, «ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Last update: ASTM D638-22 (2022),» American Society for Testing and Materials International, 2014.
- [60] S. Corporation, «EZ Test,» Shimadzu, 27 Gennaio 2023. [Online]. Available: [https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim\\_document\\_file/brochures/10350/c224-e055.pdf](https://www.shimadzu.com/an/sites/shimadzu.com.an/files/pim/pim_document_file/brochures/10350/c224-e055.pdf). [Consultato il giorno 3 Aprile 2025].
- [61] N. A. s.r.l., «10020000\_IT Fustellatrici,» 16 Settembre 2019. [Online]. Available: <https://www.noselab-ats.com/media/editor/10020000-it-fustellatrici-rev-3-2019.pdf>. [Consultato il giorno 3 Aprile 2025].
- [62] A. International, «ASTM D882-10: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. Last update: ASTM D882-18 (2018),» American Society for Testing and Materials International, 2010.
- [63] VIAVI, «MicroNIR 1700 EC - Compact, Hand-held NIR Spectrometer,» Viavi, 23 Maggio 2024. [Online]. Available: <https://www.viavisolutions.com/en-us/literature/micronir-1700ec-data-sheets-en.pdf>. [Consultato il giorno 4 Aprile 2025].
- [64] Metrohm, «Spettroscopia NIR nell'industria dei polimeri: lo strumento ideale per il controllo qualità e lo screening dei prodotti - Parte 1,» 3 Maggio 2021. [Online]. Available: [https://www.metrohm.com/it\\_it/discover/blog/20-21/nir-spectroscopy-in-the-polymer-industry--the-ideal-tool-for-qc-.html](https://www.metrohm.com/it_it/discover/blog/20-21/nir-spectroscopy-in-the-polymer-industry--the-ideal-tool-for-qc-.html). [Consultato il giorno 4 Aprile 2025].
- [65] A. International, «ASTM D2659-16 – Standard Test Method for Column Crush Properties of Blown Thermoplastic Containers. Last update: ASTM D2659-16(2023),» American Society for Testing and Materials International, 2016.
- [66] ISO, «ISO 2039-1:2001 - Plastics — Determination of hardness — Part 1: Ball indentation method,» International Organization for Standardization, 2001.
- [67] A. International, «ASTM D5276-19(2023): Standard Test Method for Drop Test of Loaded Containers by Free Fall,» American Society for Testing and Materials International, 2023.
- [68] ISO, «ISO 2248:1985 - Packaging — Complete, filled transport packages — Vertical impact test by dropping,» International Organization for Standardization, 1985.

[69] A. International, «ASTM D4169-23e1: Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems,» American Society for Testing and Materials International, 2023.