EDILIZIA COSTRUZIONI

Studio LCA della filiera di telai in PVC per infissi e serramenti e di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro

UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Agenzia per la Coesione Territoriale

ENEA AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

PON GOVERNANCE E CAPACITÀ ISTITUZIONALE 2014-2020

EDILIZIA COSTRUZIONI

Studio LCA della filiera di telai in PVC per infissi e serramenti e di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro

Autori:
Serena Giorgi [1], Monica Lavagna [1], Andrea Campioli [1], Valentina Fantin [2]

Revisione critica:
Ecoinnovazione S.r.l

[1] LifeCycleTEAM, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, [2] ENEA - Dipartimento Sostenibilità, circolarità e adattamento al cambiamento climatico dei Sistemi Produttivi e Territoriali

Data di redazione: Febbraio 2023
Data di pubblicazione: Luglio 2025

Sommario

1 Sintesi 8
2 Scopo del documento 10
3 Descrizione della filiera 10
3.1 Prodotti rappresentativi della filiera nazionale 15
3.2 Impatto socio-economico della filiera 23
3.3 Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità 25
3.3.1 Principali impatti della filiera 25
4 Gruppo di lavoro 37
5 Ambito di applicazione dello studio 37
5.1 Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento 39
5.2 Confini del sistema 40
5.3 Assunzioni e giudizi di valore 42
5.4 Gestione della multifunzionalità 45
6 Modellazione dei dataset della filiera 45
7 Analisi di inventario 46
7.1 Input del processo di compoundazione, estrusione ed assemblaggio 47
7.1.1 Materiali in input del processo di compoundazione 47
7.2 Output del processo di compoundazione, estrusione ed assemblaggio 57
7.2.1 Prodotti e sottoprodotti 57
7.3 Sviluppo dei dataset 61
8 Valutazione degli impatti ambientali 66
8.1 Caratterizzazione 66
8.2 Normalizzazione 69
8.3 Pesatura 71
9 Interpretazione dei risultati 72
9.1 Categorie di impatto rilevanti 72
9.2 Fasi e processi più rilevanti 74
9.3 Flussi elementari più rilevanti 80
9.4 Analisi di sensitività 81
10 Conclusioni 82
Bibliografia 85

Lista delle Figure

Figura 1. Flowchart di processo e individuazione dei confini di sistema dello studio LCA 12
Figura 2. Diversità dei telai in PVC per finestre all'interno dello stesso *range* dimensionale.....18
Figura 3: Contributo agli impatti ambientali per la produzione del PVC (suspension polymerisation) e consumo di energia primaria nella sola produzione di Vinyl chloride. 26
Figura 4: Confronto degli impatti ambientali di diversi tipi di PVC riciclato e vergine 28
Figura 5. PVC riciclato dal 2001 al 2020 30
Figura 6. Serramenti e prodotti correlati in PVC riciclati nel 2020, per nazione europea.....31
Figura 7. Confini di sistema considerati dallo studio LCA 41
Figura 8. Telaio in PVC preso in considerazione per la quantificazione della superficie zincata del rinforzo in acciaio e calcolo della superficie di zincatura del rinforzo in acciaio 51
Figura 9: Ridisegno per la misurazione della superficie di zincatura, del rinforzo in acciaio zincato incluso nel telaio PVC mobile 52
Figura 10: Ridisegno per la misurazione della superficie di zincatura, del rinforzo in acciaio zincato incluso nel telaio PVC fisso.....52
Figura 11: Schematizzazione dei flussi e del processo di riciclo 54

Lista delle Tabelle

Tabella 1: Composizione PVC compound 13
Tabella 2: Diverse dimensioni del telaio in PVC 17
Tabella 3: Comparazione dei pesi di componenti del prodotto finestra in PVC 19
Tabella 4: Dimensioni e pesi dei componenti del prodotto medio rappresentativo 22
Tabella 5: Trasmittanza telai per finestre prodotte in Italia 23
Tabella 6. Tonnellate di PVC trasformate in Italia destinate al settore edilizio e ad altri settori, anno 2020 24
Tabella 7. Indagine di tracciabilità 2020: utilizzo del PVC riciclato del 2019 31
Tabella 8. EPD disponibili riguardanti PVC per serramenti 34
Tabella 9. Report LCA disponibili riguardanti PVC per serramenti 35
Tabella 10. Principali PCR di riferimento e normative per lo sviluppo di certificazioni EPD della filiera serramenti in PVC 36
Tabella 11. Gruppo di Lavoro 37
Tabella 12. Definizione del peso dei componenti in input del prodotto rappresentativo e del peso dei componenti nel prodotto finito 47
Tabella 13. Composizione mix compound PVC per telai finestra e dati primari input materiali riferiti alla produzione di 1 kg di compound PVC 48
Tabella 14. Dati primari degli input materiali della fase di compoundazione in relazione all'unità finestra 49
Tabella 15. Dati primari degli input materiali della fase di compoundazione in relazione all'unità finestra, articolati per provenienza geografica e tipologia di processo di produzione 49
Tabella 16. Dati primari input materiali fase di estrusione e assemblaggio 53
Tabella 17. Dati primari input energia e acqua 55
Tabella 18. Dati primari traporti input 56
Tabella 19. Dati primari tipologie di imballaggio materiali/componenti in input 57
Tabella 20. Dati primari prodotto in output 58
Tabella 21. Dati primari rifiuti in output 59
Tabella 22. Dati primari emissioni in aria 59
Tabella 23. Dati primari emissioni in acqua 60
Tabella 24. Dati secondari trasporti rifiuti 60

Tabella 25: Inventario input-output “Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m”...63
Tabella 26: Inventario input-output “Polyvinylchloride frame for windows, 1 m” 64
Tabella 27: Inventario input-output “Window Polyvinylchloride, double glazing, float-laminated” 65
Tabella 28: Inventario input-output “Window Polyvinylchloride, double glazing, coated-laminated” 65
Tabella 29: Inventario input-output “Window Polyvinylchloride, double glazing, laminated-laminated”.....65
Tabella 30: Inventario input-output “Window Polyvinylchloride, triple glazing, float-float-laminated”.....65
Tabella 31: Inventario input-output “Window Polyvinylchloride, triple glazing, laminated-float-laminated”.....65
Tabella 32a. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro.....67
Tabella 32b. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro.....68
Tabella 33a. Risultati di normalizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro.....69
Tabella 33b. Risultati di normalizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro.....70
Tabella 34a. Risultati di pesatura relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro 71
Tabella 34b. Risultati di pesatura relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro 72
Tabella 35. Contributo delle fasi e dei processi che costituiscono la produzione del telaio in PVC, incluso di tutti i suoi componenti 75
Tabella 36. Incidenza della produzione del telaio PVC e del doppio vetro (F-L) sugli impatti totali della finestra completa 76
Tabella 37. Incidenza della produzione del telaio PVC e del doppio vetro (C-L) sugli impatti totali della finestra completa 77
Tabella 38. Incidenza della produzione del telaio PVC e del doppio vetro (L-L) sugli impatti totali della finestra completa 77

Tabella 39. Incidenza della produzione del telaio PVC e del triplo vetro (F-F-L) sugli impatti totali della finestra completa 78
Tabella 40. Incidenza della produzione del telaio PVC e del triplo vetro (L-F-L) sugli impatti totali della finestra completa 78
Tabella 41. Analisi di sensitività riguardo lo spessore di zincatura dei componenti in acciaio del telaio PVC 81

Acronimi

BOF (Basic Oxygen Furnace)

EAF (Electric Arc Furnace)

EPDM (Ethylene-Propylene Diene Monomer)

GdL (Gruppo di Lavoro)

GFK (vetro resina)

LCA (Life Cycle Assessment)

PP (Polipropilene)

PVC (Polivinilcloruro)

PVC-U (Polivinilcloruro rigido, non plastificato)

Uf (trasmittanza del telaio PVC)

UF (Unità Funzionale)

1 Sintesi

Il presente report riguarda la produzione di serramenti e infissi in PVC, riportando le caratteristiche specifiche della filiera di produzione italiana, i relativi aspetti socio-economici e le principali azioni di impegno verso la riduzione degli impatti ambientali della filiera stessa, con lo scopo di definire il profilo ambientale di prodotti rappresentativi della tecnologia media della filiera italiana.

Lo studio si riferisce alla raccolta dati del prodotto "telaio in PVC", sviluppato in 2 datasets.

L'unione del prodotto rappresentativo "telaio PVC" ai prodotti rappresentativi "vetro-camera" (individuati nel report Arcadia "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti" sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam) ha permesso di definire il profilo ambientale delle principali soluzioni di finestra completa prodotte in Italia, sviluppati in 5 datasets.

Il Gruppo di Lavoro (GdL) costituito ai fini dello svolgimento del presente studio vede la partecipazione del mondo dell'Università e della Ricerca (Politecnico di Milano, ENEA), delle Associazioni di Categoria (PVCForumItalia) e di alcune aziende italiane che rivestono, a livello nazionale, una quota parte di mercato particolarmente rilevante nella produzione del compound PVC-U e nella produzione di finestre in PVC.

Il report riporta la raccolta dati primari effettuata per la definizione del telaio in PVC per serramenti rappresentativo della produzione su territorio italiano. I dati primari riguardano i flussi in input (risorse materiche ed energetiche) e in output (rifiuti ed emissioni) del processo di produzione di compound PVC-U, del processo di estrusione del telaio in PVC per infissi e del processo di assemblaggio della finestra.

I dati primari raccolti sono stati riproporzionati al prodotto medio rappresentativo della filiera italiana definito dalle analisi condotte all'interno del presente studio. I dati primari raccolti sono caratterizzati da buona affidabilità e buona rappresentatività in termini sia geografici, sia tecnologici, sia temporali.

Il presente report riporta, quindi, la definizione dei seguenti prodotti rappresentativi definiti dallo studio:

- n. 1 telaio in PVC (comprensivo di tutti i componenti della finestra), per il quale sono sviluppati n. 2 dataset, uno espresso per 1 metro lineare di telaio PVC e uno espresso per 5,42 metri lineari di telaio PVC, lunghezza totale per comporre una finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m;
- n. 3 finestre complete di dimensione 1,23 m x 1,48 m composte da telaio PVC (comprensivo di tutti i componenti della finestra) e vetrocamera a doppio vetro, considerando le tre seguenti soluzioni:

un sistema di spessore 26 mm (4-16-33.1), derivato dall'assemblaggio di una lastra in vetro float (4 mm) e una in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm), di seguito indicato con la sigla (F-L); un sistema di spessore 26 mm (4-16-33.1), derivato dall'assemblaggio di una lastra in vetro basso-emissivo (4 mm) e una in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm), di seguito indicato con la sigla (C-L); un sistema di spessore 28 mm (33.1-16-33.1), derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm), di seguito indicato con la sigla (L-L);

- n. 2 finestre complete di dimensione 1,23 m x 1,48 m composte da telaio PVC (comprensivo di tutti i componenti della finestra) e vetrocamera a triplo vetro, considerando le due seguenti soluzioni: un sistema di spessore 42 mm (4-14-4-14-33.1), derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro float (4 mm), rispettivamente sul lato esposto verso l'esterno e al centro, e una lastra in vetro stratificato (33.1), disposta invece verso l'interno, con interposto gas argon (14 mm), di seguito indicato con la sigla (F-F-L); un sistema a triplo vetro di spessore 44 mm (33.1-14-4-14-33.1), derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro stratificato (33.1) tra le quali, al centro, è posta una lastra in vetro float (4 mm) con interposto gas argon (14 mm), di seguito indicato con la sigla (L-F-L).

Il presente studio ha, quindi, permesso la definizione di n. 7 dataset per la banca dati Arcadia, rappresentativi della filiera italiana di produzione:

- "Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m";
- "Polyvinylchloride frame for windows, 1 m";
- "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated";
- "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated";
- "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated";
- "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated";
- "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated".

I dataset sviluppati sono di interesse generale per la filiera del PVC e per gli utenti della banca dati Arcadia.

All'interno del documento sono presentati anche i risultati della valutazione Life Cycle Assessment (LCA) applicata ai dataset sopra elencati, utilizzando il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0 che costituisce il metodo di valutazione dell'iniziativa della Commissione Europea sull'impronta ambientale e consente di ottenere un profilo di impatto completo a livello di prodotto. I risultati dello studio LCA, indicano che nel caso delle finestre a doppio vetro in tutte le categorie di impatto ambientale risulta prevalente l'incidenza del telaio in PVC rispetto alla componente di vetrocamera,

in quanto detto telaio include anche il rinforzo metallico e tutti gli accessori di movimentazione e apertura delle ante. Nel caso della finestra a triplo vetro, la soluzione vetrocamera F-F-L incide più del telaio nella categoria di impatto Eutrophication marine, e la soluzione L-L-F risulta prevalente negli indicatori di Photochemical ozone formation, Eutrophication marine e Land use.

Le categorie di impatto più rilevanti per la produzione del telaio in PVC e per la produzione di una finestra completa (sia doppio vetro, sia triplo vetro), sono Resource use minerals and metals, Ecotoxicity freshwater, Eutrophication freshwater, Resource use fossils e Eutrophication terrestrial.

I risultati dello studio LCA hanno dimostrato che gli impatti più rilevanti della componente telaio PVC sono molto influenzati dalla zincatura dei componenti in acciaio che costituiscono la finestra. Tuttavia, non è stato possibile ricavare da dati primari l'effettivo spessore in µm della zincatura, per la quale sussiste anche una carenza nei dataset ambientali specifici (Lavagna et al., 2022). Di conseguenza l'analisi di sensitività effettuata valuta quanto le assunzioni applicate alla zincatura influenzino i risultati finali dello studio, confrontando i risultati di impatto ottenuti assumendo una zincatura che prevede minore spessore di zinco per tutti i componenti in acciaio della finestra in PVC.

2 Scopo del documento

Il seguente rapporto è stato realizzato all'interno del progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA, finanziato dal PON Governance e Capacità Istituzionali 2014-2020, come output dell'Azione 5 "Analisi e raccolta dati per la costituzione della banca dati".

Questo rapporto rientra nella sotto-azione A5.3 "raccolta dati prodotto/servizio lungo il ciclo di vita ed elaborazione dei documenti" e rappresenta lo studio della filiera di produzione di telai in PVC per serramenti e infissi.

3 Descrizione della filiera

La filiera di interesse del presente studio LCA riguarda la produzione di serramenti e infissi in PVC, facenti parte l'attività economica identificata con il codice ATECO 22.23.02 "Fabbricazione di porte, finestre, intelaiature eccetera in plastica per l'edilizia".

Il presente studio LCA si riferisce, in particolare, alle finestre in PVC comprendendo l'intero sistema di telaio fisso e mobile, inclusivo di tutti gli accessori per la movimentazione, le guarnizioni per la tenuta all'aria e all'acqua e i rinforzi interni in acciaio. Dal presente studio è, invece, esclusa la componente di vetrocamera della finestra, in quanto per la stessa è stato compiuto uno studio a

parte, restituito all'interno del report Arcadia "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti" sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam.

Il settore edilizio sta dimostrando un crescente interesse per gli infissi in PVC. Il serramento in PVC è arrivato a coprire circa il 42% del mercato totale dei serramenti in Italia (rispetto alle altre opzioni materiche). Ciò rappresenta una filiera molto in crescita, considerando che, nell'anno 2000, la finestra in PVC rappresentava solo il 15% del mercato.

Il PVC è considerato un prodotto petrolchimico, in quanto è prodotto attraverso l'unione di etilene con cloro. In Italia dal 2010 è cessata la produzione di PVC, di conseguenza tutto il PVC è importato dall'estero, principalmente da altre nazioni europee. Nonostante la chiusura dell'industria di produzione del PVC, la filiera di trasformazione dello stesso è invece ancora molto attiva in Italia e viene rappresentata dall'associazione *PVC Forum Italia* che raccoglie diversi attori della filiera: produttori di compound, produttori di additivi, produttori di profili, assemblatori e posatori/installatori. In Italia, infatti, la filiera del serramento in PVC è molto frammentata. In Italia esistono poche aziende che riescono a seguire l'intera filiera del serramento o più fasi del processo, ad esempio dalla fase di compound, all'estrusione, all'assemblaggio, fino alla posa in opera. Sono, comunque, poche le aziende che estrudono profilati in PVC, mentre molteplici e presenti in modo diffuso sul territorio italiano sono le aziende che si occupano esclusivamente di assemblare le componenti in PVC, per formare i serramenti, e le aziende che si occupano della posa in opera.

Per descrivere sinteticamente l'intera filiera di produzione di un serramento in PVC, si riporta graficamente, attraverso un flow chart, ciascuna fase del processo considerando l'intero ciclo di vita del serramento (fig. 1). Di seguito vengono quindi descritte le diverse fasi: produzione di etilene e di cloro; polimerizzazione, compoundazione; estrusione e assemblaggio; posa e manutenzione del serramento; fine vita e recupero del serramento. Il presente studio LCA considera solo le fasi *from cradle to gate*, ossia A1-A3.

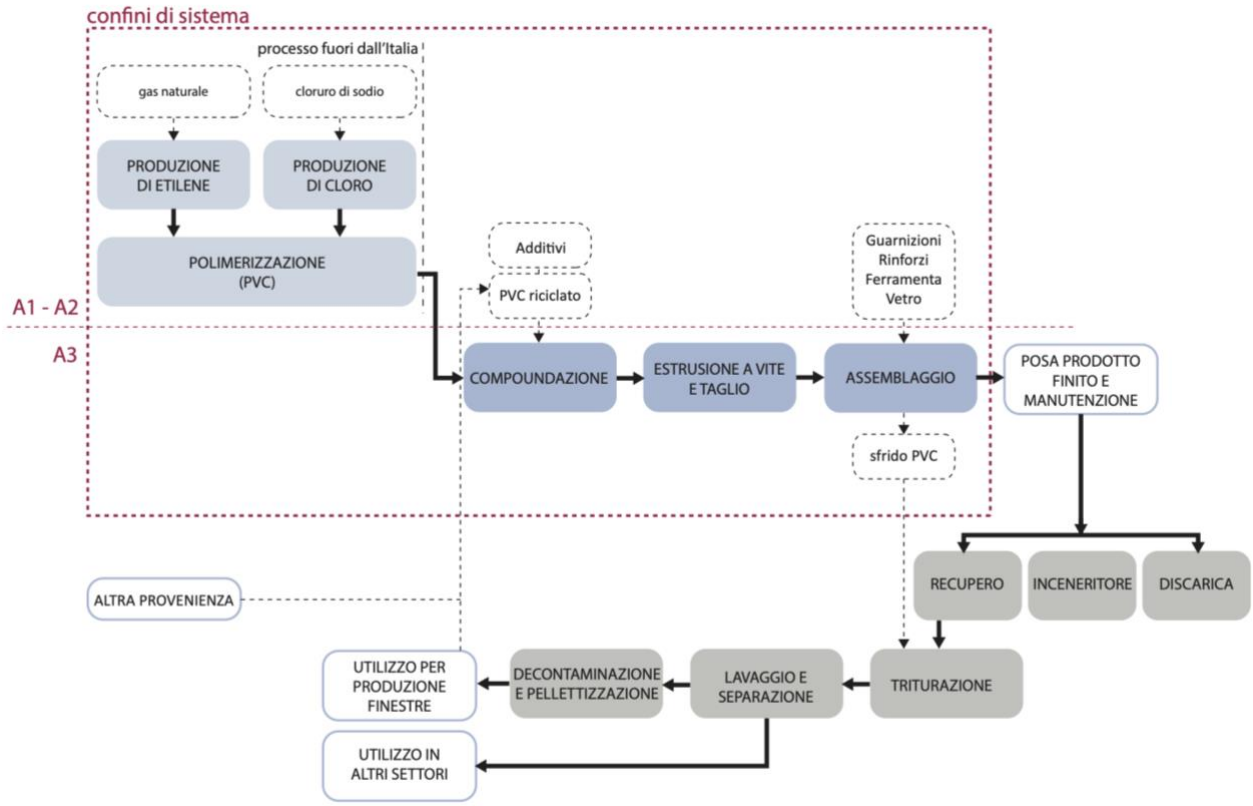


Figura 1. Flowchart di processo e individuazione dei confini di sistema dello studio LCA: A1-A2 (*upstream process*), A3 (*core process*). Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Produzione di etilene e di cloro: industria dei cloro-alcali e di prodotti petrolchimici di base

Le materie prime del PVC (cloro e etilene) sono fornite, a monte, dall'industria dei cloro-alcali, che utilizza il sale di grado industriale (cloruro di sodio) per ottenere il cloro (generalmente insieme ad idrossido di sodio e idrogeno) tramite elettrolisi, e dall'industria di prodotti petrolchimici di base, che forniscono etilene e propilene. La principale fonte di etilene è costituita dal cracking termico del gas naturale, dell'etano e di altri idrocarburi superiori (nafta, gasolio) e dal suo isolamento dai gas ottenuti nei processi di cracking e reforming nelle raffinerie di petrolio.

Polimerizzazione

L'etilene (43%) viene combinato con il cloro (57%) per produrre una sostanza chimica intermedia nota come dicloruro di etilene (EDC). L'EDC viene quindi trasformato in cloruro di vinile (VCM), un gas conservato in forma liquida sotto pressione. Attraverso un processo di polimerizzazione, le unità più semplici di cloruro di vinile, dette monomeri, vengono legate tra loro per formare lunghe catene molecolari, dette polimeri. Questo produce cloruro di polivinile (PVC), sotto forma di polvere bianca. Le due tecniche di polimerizzazione più importanti sono la polimerizzazione in sospensione (suspension polymerisation) e la polimerizzazione in emulsione (emulsion polymerisation), che

portano rispettivamente alla produzione di S-PVC ed E-PVC. In termini ambientali la differenza tra i due processi è minima, poiché il tipo di polimerizzazione ha un basso impatto sulle prestazioni complessive del PVC durante il suo ciclo di vita (Baitz et al., 2004)

Compoundazione

Il PVC puro viene quindi integrato con additivi che ne migliorano le caratteristiche di durata e ne consentono la lavorazione. Nel caso del PVC per infissi, in particolare, vengono aggiunti:

- additivi riempitivi, come carbonato di calcio opportunamente trattato;
- additivi stabilizzanti al calore e alla luce, che sono solitamente composti organici a base di Sali di calcio e Zinco, solitamente combinati con co-stabilizzanti che sono materiali organici come polioli o esteri epossidici, idrossidi di alluminio e magnesio, zeoliti, idrotalciti, copolimeri acrilici.
- pigmenti, generalmente in biossido di titanio (i pigmenti a base di piombo sono stati eliminati per impegno volontario, anche se deve ancora essere ratificata tale restrizione e la relativa autorizzazione);
- modificatori che migliorano la resistenza meccanica all'urto a base di polimeri acrilici oppure politene clorurato.

In termini percentuali e a livello medio Europeo, per conoscere la composizione tipica di PVC-U compound per serramenti, è possibile considerare la composizione dichiarata dell'EPD di EPPA (European PVC Window Profiles and related Building Products Association), articolata come in tabella 1.

EPD EPPA, Validità 03.05.2022 - 02.05.2027	
PVC	81 %
additivi riempitivi (filler – chalk)	8,1 %
modificatori (impact resistance modifier)	4,9 %
additivi stabilizzanti (calcium-zinc-stabilisers)	2,8 %
pigmenti (titanium oxide (TiO2) pigment)	3,2 %

Tabella 1: Composizione PVC compound. Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano da EPD EPPA n. EPD-QKE-20220002-IBG1-EN

Nella fase di compoundazione è prassi abbastanza comune un'ottimizzazione del processo attraverso un riciclo interno che prevede il recupero e la reimmissione degli sfridi di lavorazione nel processo di produzione.

Estrusione e assemblaggio

Il processo produttivo per la realizzazione dei serramenti prevede le seguenti fasi (*PVC Forum Italia*, 2022a; Baitz et al., 2004):

- estrusione di granulato di PVC per formare il profilo del serramento;
- assemblaggio che comprende l'aggiunta di prese d'aria per il drenaggio e per il fissaggio dei raccordi; saldatura per fusione; montaggio di raccordi, vetri e guarnizioni e montaggio telaio e battente della finestra.

Estrusione dei profilati. Il PVC rigido è facilmente lavorabile per estrusione, se preventivamente reso plastico attraverso il calore. I profilati si ottengono lavorando la mescola di compound in estrusori a vite, composti da un cilindro riscaldato entro cui gira una vite senza fine.

All'uscita dagli estrusori a vite, il profilato passa attraverso un dispositivo di calibratura e successivamente attraverso sistemi di raffreddamento, di trazione e di taglio. Talvolta, vengono co-estrusi insieme al telaio anche parti di guarnizioni che, quindi, risultano già assemblate al profilo di telaio stesso.

Assemblaggio. Per la realizzazione dei serramenti occorre procedere all'assemblaggio dei profilati. Per un serramento esterno a due ante generalmente occorrono: profilati principali per la realizzazione del telaio fisso e delle ante mobili; profilati complementari quali i ferma-vetri, il gocciolatoio, i profilati per la battuta centrale, i coprifili, ecc.

I profilati principali vengono generalmente tagliati a 45° e poi collegati tra di loro mediante saldatura per fusione. Il taglio a 45° causa inevitabilmente uno sfrido di prodotto (ovvero una porzione triangolare del profilato). Generalmente lo stesso viene triturato in loco e reimmesso nella mescola di compound utilizzata per l'estrusione.

La saldatura per fusione consiste nel riscaldare, mediante elemento termico a contatto, le superfici da saldare sino a portarle allo stato di fusione e nell'unirle successivamente mediante pressione per ottenerne la saldatura (senza materiale di apporto). Esiste anche il sistema di collegamento tramite incollaggio con inserimento di squadrette di rinforzo, ma esso risulta meno praticato.

I profilati per finestre in PVC, soprattutto nel caso di finestre di una certa dimensione, richiedono dei rinforzi metallici a causa del più basso modulo elastico del PVC rispetto ad altri materiali. Generalmente tutti i telai in PVC superiori alla dimensione 60 cm x 60 cm sono dotati di rinforzo metallico, generalmente in acciaio zincato (molto più raramente in GFK).

Attraverso operazioni di taglio, fresatura e foratura vengono aggiunti gli accessori (cerniere, organi di manovra) fissati con viti, di solito in acciaio zincato. Le cerniere devono essere applicate in posizioni e numero adeguato alla dimensione dell'anta (generalmente tre per anta).

Posa e manutenzione del serramento

Durante la fase d'uso, il serramento in PVC è soggetto a differenti condizioni climatiche ed esposto a molteplici agenti atmosferici che possono causare cambiamenti alle proprietà fisico-meccaniche e all'aspetto dei profilati (stato superficiale). Le prove sperimentali riportate dal Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia e acquisite da analisi condotte su alcune finestre in PVC di 15 anni di vita utile, soggette alle condizioni ambientali che si verificano nell'Europa centrale, hanno dimostrato che non intervengono cambiamenti degni di rilievo nella idoneità pratica e nelle proprietà del materiale. In particolare, non sono stati rilevati differenze in termini di: moduli di elasticità; resistenza all'urto; scolorimenti percettibili dall'occhio umano.

Studi LCA sul ciclo di vita dei serramenti in PVC, assumono una durata di vita utile del serramento di circa 30 anni (Baitz et al., 2004; Mösle et al., 2015) e scenari di sostituzione e manutenzione che considerano la sostituzione del 20% degli accessori, ogni 10 anni di utilizzo (Mösle et al., 2015).

Fine vita e recupero del serramento

A seguito degli impegni volontari presi da *VinylPlus* per la sostenibilità dell'industria europea del PVC, si sta consolidando la filiera del recupero del serramento in PVC per il riciclo del materiale.

Il materiale in PVC viene prima macinato in parti con diametro di circa 20 mm e successivamente sminuzzato in particelle con dimensione di pochi millimetri. Il materiale macinato passa quindi attraverso vari processi di separazione e preparazione, che ne migliorano ulteriormente la qualità. Il rimacinato in PVC pulito viene quindi riscaldato e pressato attraverso un vaglio. Alla fine del processo di riciclo si ottiene un granulato di PVC che può essere reimmesso nella produzione di profili. Il PVC riciclato dal settore infissi può essere, inoltre, destinato ad altri settori industriali. Oltre a *Vinylplus,* in Italia è in atto il progetto WREP che raccoglie PVC e lo indirizza a recupero e riciclo.

3.1 Prodotti rappresentativi della filiera nazionale

I prodotti rappresentativi della tecnologia media della filiera italiana, oggetto del presente report, sono:

- telaio in PVC (la cui raccolta dati è riportata nel presente report), comprensivo di tutti i componenti della finestra, per il quale sono sviluppati n. 2 dataset, uno espresso per 1 metro lineare di telaio

PVC e uno espresso per 5,42 metri lineari di telaio PVC, lunghezza totale per comporre una finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m;

- finestre complete di dimensione 1,23 m x 1,48 m composte da telaio PVC (derivate dall'unione del prodotto rappresentativo "telaio PVC" ai prodotti rappresentativi "vetrocamera" individuati nel report Arcadia "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti" sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam), comprensivo di tutti i componenti della finestra con soluzione di vetrocamera a doppio vetro, per le quali si sono sviluppati 3 dataset, e soluzione di vetrocamera a triplo vetro, per le quali si sono sviluppati 2 dataset. Le finestre a doppio vetro considerano le tre seguenti soluzioni di vetrocamera: un sistema di spessore 26 mm (4-16-33.1), derivato dall'assemblaggio di una lastra in vetro float (4 mm) e una in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm), di seguito indicato con la sigla (F-L); un sistema di spessore 26 mm (4-16-33.1), derivato dall'assemblaggio di una lastra in vetro basso-emissivo (4 mm) e una in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm), di seguito indicato con la sigla (C-L); un sistema di spessore 28 mm (33.1-16-33.1), derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm), di seguito indicato con la sigla (L-L); le finestre a triplo vetro considerando le due seguenti soluzioni di vetrocamera: un sistema di spessore 42 mm (4-14-4-14-33.1), derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro float (4 mm), rispettivamente sul lato esposto verso l'esterno e al centro, e una lastra in vetro stratificato (33.1), disposta invece verso l'interno, con interposto gas argon (14 mm), di seguito indicato con la sigla (F-F-L); un sistema a triplo vetro di spessore 44 mm (33.1-14-4-14-33.1), derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro stratificato (33.1) tra le quali, al centro, è posta una lastra in vetro float (4 mm) con interposto gas argon (14 mm), di seguito indicato con la sigla (L-F-L).

Il report si concentra principalmente sulla definizione e raccolta dati primari del telaio in PVC. I partner aziendali che hanno collaborato al presente report sono rappresentativi del mercato nazionale per il processo di produzione del telio PVC (compound, estrusione, assemblaggio). Tuttavia, i loro prodotti risultano atipici rispetto ai prodotti sul mercato, a causa di specifiche ottimizzazioni di forma e composizione del telaio PVC prodotto. Il telaio PVC per finestre, infatti, è un prodotto molto variabile in dimensione e conformazione. Ciò dipende dalle differenti scelte di design di prodotto compiute da ciascuna azienda che produce i profilati.

Si è ritenuto corretto, quindi, utilizzare i dati primari di processo raccolti presso i partner aziendali e di rapportarli al prodotto medio rappresentativo, calcolato da un più ampio campione di soluzioni, i cui dati sono ricavabili da EPD di prodotto e studi LCA a letteratura.

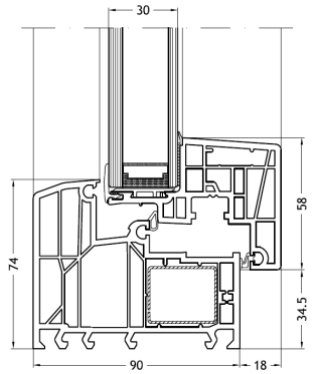
Telaio Tipo		
Profondità telaio	90 mm	90 mm
Altezza telaio	74 mm	80 mm
rinforzo	acciaio zincato	acciaio zincato
vetrocamera	doppio	triplo

Tabella 2: Diverse dimensioni del telaio in PVC. Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano, da disegni tecnici disponibili online di prodotti Finstral

La dimensione del telaio, del rinforzo interno e lo spessore delle camere interne sono variabili e dipendono dall'area stessa della finestra e dalle prestazioni che si vogliono raggiungere.

La tabella 2 riporta un esempio della variabilità dimensionale di telai in PVC presenti sul mercato. In linea di massima, sul mercato, le dimensioni di telaio PVC disponibili variano da un minino di circa 70 mm ad un massimo di circa 100 mm. L'esempio (tab. 2) fa capire, tuttavia, che la differente dimensione di telaio non è strettamente correlata alla vetrocamera installata.

Inoltre, anche all'interno dello stesso *range* dimensionale (es. 70-80 mm) la forma del telaio in PVC può variare da sezioni rettangolari più semplici, o sezioni più articolate, come riporta la figura sottostante che mostra esempi di prodotti presenti sul mercato italiano.

A conferma del prodotto rappresentativo è stato chiesto un parere all'*Associazione PVC Forum Italia*, ad alcune aziende di produzione di infissi in PVC e ai produttori facenti parte il Gruppo di Lavoro del progetto Arcadia; gli stessi hanno dichiarato che la profondità di telaio più tipica utilizzata in Italia è pari a 70 mm.

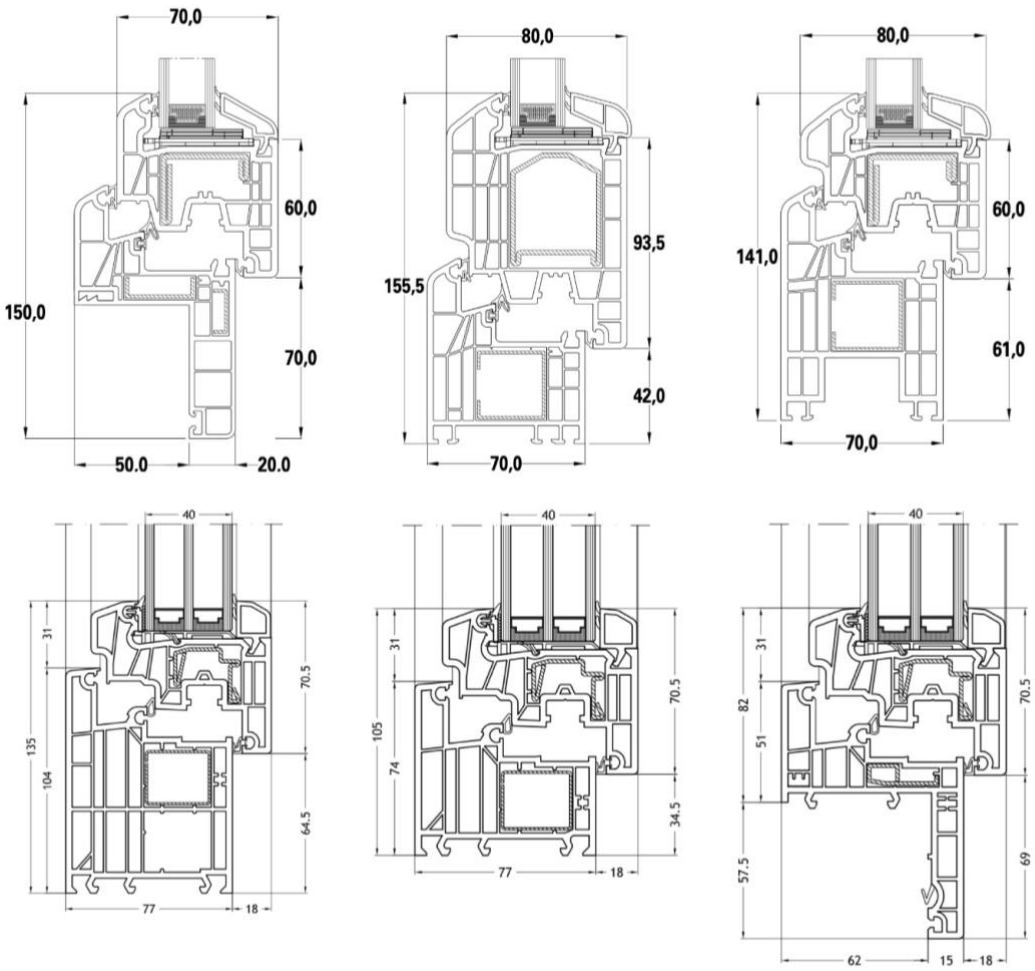


Figura 2. Diversità dei telai in PVC per finestre all'interno dello stesso *range* dimensionale. Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano da disegni tecnici disponibili online di prodotti Alphacan (sopra) e Finstral (sotto)

Tuttavia, siccome non è quindi possibile definire il peso dei componenti specifici di un "prodotto rappresentativo della filiera nazionale" considerando un prodotto specifico per forma e dimensione, l'analisi si è focalizzata sui prodotti presi in esame da studi LCA ed EPD di prodotto, che forniscono i pesi di tutti i singoli componenti della finestra. Si sono considerate EPD di prodotto specifico riferite alla produzione/distribuzione su territorio italiano; tuttavia, per ampliare l'indagine, sono state considerate anche EPD di settore a livello europeo, come quelle dell'associazione EPPA. Nella tabella 3 sono riportati quindi i pesi di tutti i componenti di finestre rappresentative, nonché le dimensioni totali e caratteristiche delle finestre stesse. In azzurro sono segnati i valori calcolati dagli autori del presente report partendo dai valori rilevati nei relativi documenti di origine. L'area trasparente (ovvero l'area visibile di vetro) è stata calcolata conoscendo la percentuale di *fraction frame*, ovvero la porzione di area totale costituita dal telaio PVC, quindi, sottraendo tale area di telaio PVC all'area totale della finestra.

Fonte (validità)	EPD FINSTRAL (2022-2027)	EPD QKE - EPPA (2017-2023)	EPD Ares (2020-2025)	EPD QKE - EPPA (2022-2027)	Studio LCA PVC Forum Italia (2008)	Studio LCA Drees & Sommer (2015)
Dimensione finestra	1,23 m x 1,48 m	1,23 m x 1,48 m	1,00 m x 1,50 m	1,23 m x 1,48 m	120 x 150 cm	2,50 m x 1,50 m
Area finestra	1,82 m^2	1,82 m^2	1,50 m^2	1,82 m^2	1,80 m^2	3,75 m^2
Area trasparente	1,29 m^2	1,22 m^2	--	1,35 m^2	--	2,62 m^2
Perimetro finestra	5,42 m	5,42 m	5,00 m	5,42 m	5,40 m	8,00 m
Trasmittanza finestra totale (Uw)	0,82 W/(m^2K)	0,92 W/(m^2K)	non dichiarata	1,3 W/(m^2K)	1,4 W/(m^2K)	2,0 W/(m^2K)
Tipo di vetrocamera	triplo vetro	triplo vetro	doppio vetro	doppio vetro	--	doppio vetro
Profondità telaio	77 mm	--	82 mm	--	--	70 mm
Peso totale della finestra	67,94 kg	71,9 kg	69,23 kg	57,3 kg	57,69 kg	136,3 kg
Porzione di telaio (Fraction Frame "FF")	29%	33%	non dichiarato	25,70%	--	--
peso componenti finestra totale	**kg**	**kg**	**kg**	**kg**	**kg**	**kg**
PVC telaio (PVC-U frame incl.)	18,95	16,47	16,74	16,79	16,5	30
Blocchi di posa (Glazing blocks)	0,14	--	1,45	--	--	--
Guarnizioni (EPDM Gasket)	--	0,65	1,12	0,76	0,86	--
Rinforzo in acciaio (Reinforcement Steel)	4,29	9,99	9,68	11,87	11,5	21,7
Ferramenta in acciaio (Steel Hardware)	2,73	2,44	2,63	1,88	< 2	--
Maniglia	0,14					
Viti (Screws)	0,14	0,14	0,11	0,13	--	--
Vetro (Insulated Glass Unit)	41,48	42,21	37,50	25,87	28,83	84,60
peso componenti al metro lineare di telaio	**kg/m**	**kg/m**	**kg/m**	**kg/m**	**kg/m**	**kg/m**
PVC telaio (PVC-U frame incl.) Peso al m	3,50	3,04	3,35	3,10	3,06	3,75

Tabella 3: Comparazione dei pesi di componenti del prodotto finestra in PVC. In azzurro sono segnati i valori calcolati dagli autori e non presenti nel documento di origine; in grigio sono evidenziati i valori utilizzati per il calcolo dei pesi del prodotto medio rappresentativo. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Per la lettura dei valori della tabella 3, si nota che le EPD Finstral ed EPPA esprimono i pesi per una finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m; l'azienda Ares considera una finestra da 1,00 m x 1,50 m; lo studio LCA di PVC Forum Italia si riferisce ad una finestra di 1,20 m x 1,50 m e lo studio LCA di Drees & Sommer, invece, considera una finestra 2,50 m x 1,50 m. Nel confronto tra i pesi, quindi, quest'ultimo studio ha ovviamente pesi molto più alti data la dimensione di prodotto considerato. Sono invece mediamente comparabili i restanti. Si nota inoltre che la dimensione di telaio presa in esame è appunto variabile tra i 70 mm e gli 82 mm (valore medio 76 mm).

Utile, inoltre, notare che nella EPD di Finstral è dichiarato che la porzione di telaio "FF" (frame fraction) in relazione alla superficie complessiva di 1,82 m^2 (=1,23 m × 1,48 m) è del 29%; secondo l'EPD dell'Associazione di Categoria EPPA la porzione di telaio in una finestra di ugual superficie è

pari al 33%. Questa informazione ha permesso di calcolare l'area trasparente (*transparent area)* di ciascun prodotto, per poter effettuare una comparazione con l'area trasparente dichiarata solo nel caso dello Studio LCA Drees & Summer, determinando un valore di paragone tra quest'ultimo studio LCA e gli altri.

Il peso del PVC è di circa 16,7 kg e il peso del rinforzo in acciaio varia tra 10 e 11 kg. Il peso del PVC dichiarato nella EPD di Finstral è più alto di quasi 3 kg rispetto alla media, e il peso del rinforzo è più basso di circa 5,5 kg. L'azienda conferma che i pesi sono derivati dal loro metodo di produzione che necessita di una quantità inferiore di acciaio di rinforzo.

Il peso della ferramenta in acciaio risulta mediamente costante tra i prodotti analizzati, mostrando un'oscillazione inferiore ad 1 kg, risultando mediamente pari a 2,4 kg. Anche gli accessori di fissaggio (viti) presentano un peso abbastanza costante, variando da un minimo di 0,11 kg a un massimo di 0,18 kg.

Alcuni studi dichiarano anche il peso dei blocchi di posa, ovvero i componenti che servono al posizionamento e supporto per un'adeguata distanza tra il vetro e il telaio. Tali blocchi fungono anche per sopportare l'espansione termica del telaio e del vetro senza imporre stress al vetro. Tuttavia, molti studi trascurano il contributo di questi componenti e di conseguenza è difficile dedurne un peso rappresentativo.

Infine, il peso delle guarnizioni varia tra 0,65 kg, come dichiarato in EPD di EPPA, a 1,12 kg, come dichiarato nell'EPD Ares che articola tali valori in 0,62 kg di guarnizione per il telaio e 0,50 kg di guarnizione per l'anta mobile.

La tabella 3, infine, riporta il calcolo del peso di telaio in PVC al m (kg/m); tale valore, non essendo generalmente dichiarato, è stato calcolato dividendo il peso totale del telaio in PVC per il perimetro della finestra.

Data la varietà dei prodotti in commercio, al fine di definite un prodotto medio rappresentativo di telaio PVC per serramenti e di finestra all'interno della Banca Dati Italiana LCA Arcadia, si è scelto di considerare un oggetto "virtuale" medio rappresentativo e non un prodotto specifico "reale" disponibile in commercio (che comporta determinate caratteristiche della filiera produttiva specifica). Tale scelta è data dall'obiettivo di rappresentare il più possibile la varietà dei prodotti disponibili.

Innanzitutto, per la definizione della grandezza di finestra rappresentativa si prende a riferimento la EN 14351 e la EN 17213:2020 "Windows and doors — Environmental Product Declarations — Product category rules for windows and pedestrian doorsets" che definisce le regole di settore per

le assunzioni di prodotto finalizzate alla dichiarazione ambientale EPD (*Environmental Product Declaration*). Tale norma definisce l'area standard di una finestra, pari a 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2). Per la definizione dei pesi del telaio, rinforzo incluso, e di tutti i componenti che costituiscono la finestra, si prende a riferimento il peso medio ponderato, calcolato partendo dai pesi dei prodotti dichiarati negli studi LCA presenti a letteratura ed EPD disponibili, come riportato nella seguente tabella 4.

Per calcolare il peso di ciascun componente sono stati utilizzati i valori evidenziali in grigio nella tabella 3. È stato quindi necessario effettuare una media (ponderata all'area del prodotto) tra più valori, talvolta escludendo i valori anomali (legati alla specificità del prodotto specifico), oppure assumere l'unico dato disponibile. Per il calcolo del peso del PVC frame, delle guarnizioni e del rinforzo in acciaio sono stati esclusi i pesi del prodotto Finstral (ottenuti per ottimizzazione del loro specifico processo di produzione) e quello dello Studio LCA Drees & Sommer; per il calcolo del peso della ferramenta e delle viti è stato escluso il valore dello studio LCA PVC Forum Italia, in quanto non precisamente dichiarato; per il calcolo del peso dei blocchi di posa e della maniglia sono stati considerati solo i valori dichiarati da Finstral, in quanto non era possibile dedurne un peso medio rappresentativo per mancanza di altri dati significativi.

Anche l'area coperta dal serramento pari al 30% (fraction frame), deriva da una media ponderata tra i prodotti presi in considerazione. Considerando l'area trasparente pari a 1,27 m^2 (calcolata partendo dalla percentuale di fraction frame del 30%), e calcolando la porzione di vetro inserita nel telaio, tramite calcolo analitico, l'area del vetro complessivo risulta pari a 1,30 m^2.

Il peso al metro lineare risulta dividendo il peso totale del telaio in PVC per lo sviluppo lineare totale del telaio PVC, pari al perimetro della finestra.

Caratteristiche prodotto medio rappresentivo	
Area finestra	1,23 m x 1,48 m = 1,82 m^2
Area trasparente visibile	1,27 m^2
Area vetro	1,30 m^2
Perimetro finestra	5,42 m
Tipo di vetrocamera	doppio o triplo vetro
Profondità telaio	76 mm
Frazione di telaio (Fraction Frame "FF")	30%
peso componenti finestra totale	**Kg/unità finestra**
PVC telaio (PVC-U frame incl.)	16,62
Blocchi di posa (Glazing blocks)	0,14
Guarnizione (Gasket)	0,83
Rinforzo in acciaio (Reinforcement Steel)	10,81
Ferramenta in acciaio (Hardware)	2,41
Maniglia	0,14
Viti (Screws)	0,14
Vetro (Insulated Glass Unit)	--
Telaio completo (somma dei pesi)	**31,10 kg (totale)**
peso componenti al metro lineare di telaio	**kg/m**
PVC telaio (PVC-U frame incl.)	3,07
Blocchi di posa (Glazing blocks)	0,03
Guarnizione (Gasket)	0,15
Rinforzo in acciaio (Reinforcement Steel)	1,99
Ferramenta in acciaio (Steel fittings)	0,44
Maniglia	0,03
Viti (Screws)	0,03

Tabella 4: Dimensioni e pesi dei componenti del prodotto medio rappresentativo (finestra con telaio PVC). Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Per la definizione del tipo di materiale maggiormente utilizzato per ciascun componente, è stato possibile avvalersi del confronto con l'*Associazione PVC Forum Italia*, con alcune aziende di produzione di infissi in PVC e con i produttori facenti parte il Gruppo di Lavoro del progetto Arcadia. Detta collaborazione ha permetto di definire che la soluzione maggiormente rappresentativa su territorio italiano è composta da:

- blocchi di posa in PP;
- guarnizioni in EPDM;
- rinforzo, ferramenta, e viti e in acciaio zincato;
- maniglia in alluminio.

Facendo, inoltre, riferimento allo studio Arcadia condotto sulle soluzioni vetrocamera individuate nel report "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti" (sviluppato sempre dal

Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam), si sono rilevate le cinque tipologie di vetrocamera maggiormente rappresentative su territorio italiano: tre soluzioni a doppio vetro (F-L), (C-L), (L-L) e due soluzioni a triplo vetro (F-F-L) e (L-F-L).

La definizione del prodotto rappresentativo del telaio PVC e delle caratteristiche dimensionali della finestra tipo, e la definizione delle tipologie rappresentative di vetrocamera ha, quindi, permesso la determinazione di cinque soluzioni di finestra considerevolmente indicative per la produzione italiana.

Per approfondire il tema della presentazione termica media rappresentativa, sulla base di un'esplorazione di schede tecniche di serramenti prodotti da Finstral ed Alphacan, che rappresentano rispettivamente i maggiori produttori e distributori italiani (Tab. 5), è possibile notare che la trasmittanza media del telaio (Uf), normata dalla EN 12412-2:2003 "Thermal performance of windows, doors and shutters — Determination of thermal transmittance by hot box method", è pari 1,2 W/m^{2}K.

Produttore	Prodotto	Profondità Telaio	Trasmittanza telaio (Uf) [W/m^{2}K]
Alphacan	Prestigio	70	1,24
		80	1,20
	In'alpha70	70	1,30
		80	1,24
Finstral	Nova-line 77	77	1,1
	Classic-line 77	77	1,2
	Slim-line 77	77	1,1

Tabella 5: Trasmittanza telai per finestre prodotte in Italia. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

3.2 Impatto socio-economico della filiera

In Europa vengono prodotte circa 5,9 milioni di tonnellate di PVC ogni anno, di cui il 70% è destinato a prodotti da costruzione, come finestre, tubazioni, pavimenti, membrane di copertura e altri prodotti per l'edilizia (ECVM, 2022).

La produzione di PVC in Italia è cessata a partire dal 2010, a seguito di un referendum sul cloro tenutosi nel 2005 a Magenta, luogo sede del più grande impianto di produzione di PVC in Italia, e un susseguirsi di acquisizioni di industrie italiane da parte di aziende straniere. Dopo la chiusura della filiera di produzione del polimero PVC (cloro-soda, DCE, CVM, PVC) sono stati persi circa 3.000 posti di lavoro (Trifirò, 2015). Dal 2010, quindi, l'Italia importa PVC dall'estero, in particolare da altre nazioni europee.

Tuttavia, in Italia sono ancora attive diverse aziende chimiche per la produzione di additivi per PVC e aziende specialistiche nella produzione di compound, ovvero granulati di PVC rigido o flessibile che vengono utilizzati per produrre i manufatti finali. Inoltre, in Italia è fortemente presente anche l'industria manifatturiera di trasformazione delle plastiche in PVC, in particolare per la produzione di serramenti, persiane, avvolgibili, tubi, raccordi e valvole, pavimentazione vinilica e film. Nel 2015 si riscontrava un coinvolgimento di oltre 50.000 addetti tra diretti ed indiretti nelle aziende legate alla trasformazione ed all'utilizzo del PVC (Trifirò, 2015). Di conseguenza anche se chiusa la produzione di PVC in Italia, le materie plastiche in PVC sono ancora una parte significativa dell'industria delle specialità chimiche (additivi e compound) e dell'industria manifatturiera italiana. In Italia, nel 2021, sono state trasformate un totale di 650.000 tonnellate di PVC. In particolare, 199.500 tonnellate di PVC rigido sono state trasformate per l'utilizzo nel settore edilizio, che comprende la produzione di infissi e serramenti oltre ad altre applicazioni, come tubi, film, lastre, profilati. Le restanti tonnellate di PVC rigido o plastificato, sono state trasformate per altri usi e settori. Nella tabella seguente è quindi possibile notare come la produzione di PVC, in Italia, interessi maggiormente il settore edilizio/delle costruzioni.

	PVC rigido	PVC plastificato	Totale PVC	
	Ton.	Ton.	Ton.	%
Edilizia/costruzioni	**199.500**	199.500	223.000	34,3
Imballaggio	36.000	27.000	63.000	9,7
Elettricità	3.000	58.000	61.000	9,4
Mobile/arredamento	13.000	14.000	27.000	4,2
Cartotecnica	14.500	12.000	26.500	4,1
Tempo libero	–	27.500	27.500	4,2
Agricoltura	13.500	–	13.500	2,2
Telecomunicazioni	–	14.500	14.500	2,2
Trasporto	–	17.500	17.500	2,7
Calzature/abbigliamento	–	8.500	8.500	1,3
Elettrodomestici	500	7.000	7.500	1,2
Diversi*	10.500	72.500	82.500	12,7
Compound esportato	25.500	52.500	78.000	12,0
TOTALE	**316.000**	**334.000**	**650.000**	**100**

Tabella 6. Tonnellate di PVC trasformate in Italia destinate al settore edilizio e ad altri settori, anno 2021.

Forte: Rielaborazione Politecnico di Milano da PVC Forum Italia, 2022a

Le statistiche della produzione di finestre in PVC sono reperibili dall'annuale ricerca sul mercato del serramento in PVC realizzata dal *Gruppo Serramenti e Avvolgibili* di *PVC Forum Italia* in

collaborazione con 10 aziende associate che, insieme, rappresentano la maggior parte del mercato delle finestre polimeriche.

Secondo detta statistica, nel 2021 sono stati immessi sul mercato oltre 14,2 milioni di metri lineari di telaio per finestre in PVC con un forte incremento, pari al 48%, rispetto all'anno precedente, in quanto il 2020 è stato un anno che ha subito le conseguenze economiche della pandemia da Covid 19, e dato l'effetto positivo sul settore conseguente agli incentivi fiscali (Bonus Infissi al 50%; Ecobonus al 110%).

Le unità serramento in PVC prodotte in Italia nel 2021 sono oltre 2,3 milioni quasi equamente suddivise tra profili bianchi e pellicolati (si precisa che sono esclusi dal calcolo i profili persiana mentre sono compresi quelli per finestre scorrevoli). Considerando un peso medio di 18 kg per il telaio in PVC, la statistica dichiara che sono state prodotte 42.660 tonnellate (*Gruppo Serramenti e Avvolgibili* di *PVC Forum Italia*, 2022b). In aggiunta ai serramenti prodotti in Italia, si conteggiano anche le unità finestra importate dall'estero, stimabili intorno alle 900.000 unità, in aumento rispetto al 2020. Ne consegue quindi che in Italia, nel 2021, in totale si arriva a circa a 3,2 milioni unità di serramento in PVC, di cui il 72% prodotte in Italia e il 28% importate dall'estero. Considerando che Il mercato italiano 2021 del serramento, considerando tutti i materiali alternativi, è stimato in circa 6,3 milioni di unità serramento per impiego residenziale e in applicazioni equiparabili per tipologia di utilizzo. Il PVC rappresenta quindi circa il 52% del mercato totale. Un dato che testimonia la costante crescita di un comparto che nel 2000 non arrivava al 15%.

Il giro d'affari generato lo scorso anno dal settore del serramento in PVC risulta essere in totale di circa 1,3 miliardi di euro.

3.3 Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità

3.3.1 Principali impatti della filiera

Impatti produzione del cloruro di polivinile (PVC)

Come è stato detto, il processo di produzione del cloruro di polivinile (PVC) avviene fuori dal contesto italiano, di conseguenza, anche per la definizione del dataset Arcadia, è necessario affidarsi a studi LCA, EPD e database per poter comprendere gli impatti ambientali di questa fase e le relative maggiori cause e contributi di processo.

Secondo lo studio LCA (Baitz M. et al., 2004, pag. 55) il consumo di energia per la produzione di 1 kg di PVC è pari a 57,2 MJ: 20,7 MJ/kg energia feedstock e 36,5 MJ/kg energia consumata per la produzione. Secondo la stessa fonte, questa assunzione è tratta dal database GaBi e, secondo gli

autori dello studio LCA è considerata coerente a diversi controlli incrociati con l'industria, professionisti e organizzazioni accademiche.

The European Council of Vinyl Manufacturers (2015), ha pubblicato uno studio LCA, finalizzato alla certificazione EPD del Vinyl chloride (VCM) and Polyvinyl chloride (PVC) a livello europeo, valutando il profilo ambientale della produzione del monomero di cloruro di vinile e del polimero di cloruro di polivinile dall'estrazione del petrolio greggio ai granuli o alla resina prodotta in stabilimento (from cradle to gate). Anche in questo studio il consumo di energia per la produzione di 1 kg di PVC si attesta intorno ai 60 MJ, precisamente: 56,9 MJ nel caso del processo di polimerizzazione in sospensione (*suspension polymerisation*) e 66,1 MJ nel caso del processo di polimerizzazione in emulsione (*emulsion polymerisation*), comprendendo sia l'energia consumata per la produzione sia l'energia feedstock.

Il VCM (cloruro di vinile o *vinyl chloride*) è il contributore principale a tutte le categorie di impatto (Figura 3). Inoltre, considerando i processi a monte della produzione del VCM, è possibile asserire che i processi coinvolti nella produzione di etilene (cracker a vapore, raffineria e fornitura di petrolio greggio) consumano la maggior parte dell'energia: l'energia primaria richiesta per la filiera di produzione dell'etilene è circa tre volte superiore all'energia primaria richiesta per la formazione del cloro tramite elettrolisi (Baitz M. et al., 2004).

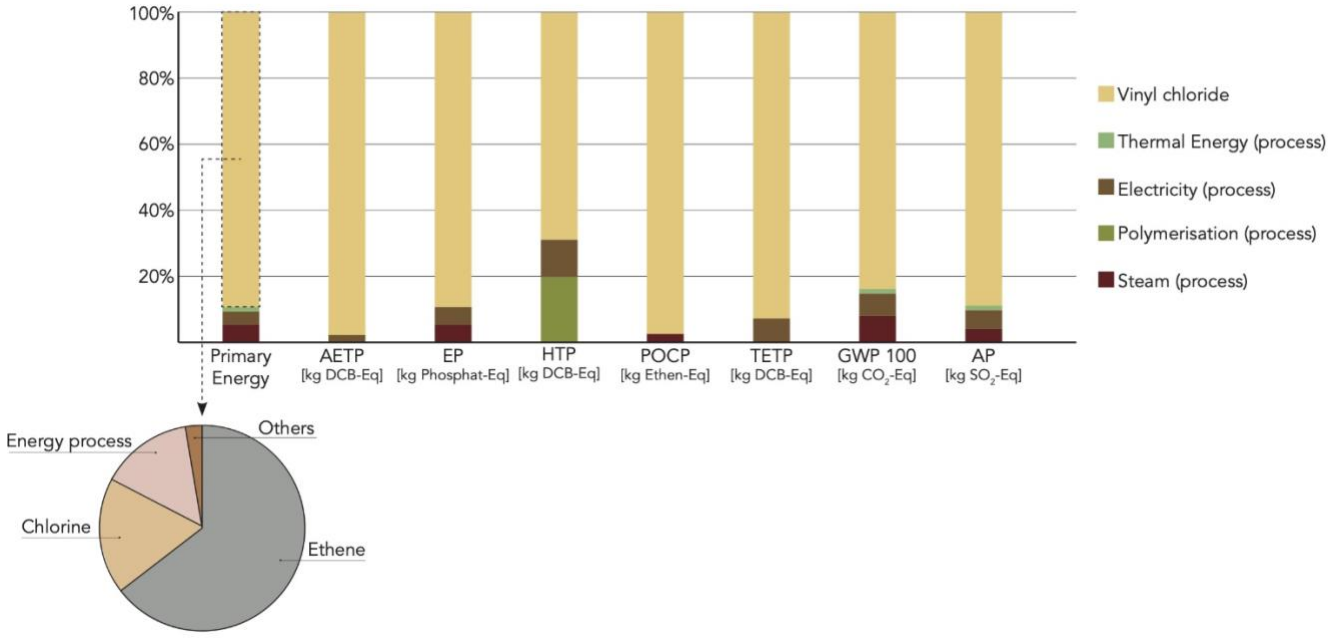


Figura 3: Contributo agli impatti ambientali per la produzione del PVC (suspension polymerisation) e consumo di energia primaria nella sola produzione di Vinyl chloride. Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano da Baitz M. et al., 2004

Impatti degli additivi, aggiunti durante il processo di compoundazione PVC

Durante il processo di compoundazione, che avviene su territorio italiano e che sarà oggetto della valutazione LCA per la definizione del dataset Arcadia, vengono aggiunti additivi per i quali sarà necessario affidarsi a profili ambientali contenuti nel database Ecoinvent (database assunto per lo studio della presente analisi).

Gli additivi stabilizzanti organici a base di stagno, zinco, bario e calcio, è una miscela complessa progettata per prevenire la degradazione termica, lo sviluppo di acido cloridrico durante la lavorazione e il degrado in fase d'uso dovuto alle condizioni atmosferiche o ai raggi UV. Difficile è trovare la composizione della miscela negli studi LCA o in EPD di prodotto (generalmente le miscele sono a discrezione delle aziende produttrici). Un additivo molto utilizzato era il piombo, ormai però vietato per legge. Nello studio LCA di Baitz M. et al., 2004 risulta ancora considerato il piombo, di conseguenza non è possibile fare riferimento agli impatti risultati da tale valutazione.

Il riempitivo più comunemente utilizzato nelle formulazioni in PVC è a base di carbonato di calcio opportunamente trattato, come risulta dallo studio LCA (Baitz M. et al., 2004) e da recenti EPD di prodotto (es.: EPD Finstral, 2022). Esso viene estratto, setacciato, macinato e condizionato. Secondo il report LCA (Baitz M. et al., 2004) l'input principale è l'energia e gli output principali sono le emissioni dalla fornitura di energia. Gli impatti ambientali della produzione di materiali di riempimento sono minori rispetto a quelli della produzione di PVC. I principali impatti ambientali sono causati dalle emissioni dell'approvvigionamento energetico e dalla combustione dei combustibili. Non ci sono segnalazioni sugli effetti dei riempitivi in PVC durante la fase di utilizzo. Nella fase di fine vita, i riempitivi non influiscono in modo significativo sul riciclaggio dei materiali.

Uno dei *pigmenti* più importanti è il biossido di titanio, come risulta dallo studio LCA (Baitz M. et al., 2004) ed EPD di prodotto (es.: EPD Finstral, 2022). La produzione del biossido di titanio è possibile attraverso il processo al cloruro e il processo al solfato. La produzione di biossido di titanio mediante il processo al cloruro richiede un elevato consumo di energia (70 MJ/kg) e produce una grande quantità di rifiuti chimici (2,3 kg/kg) (Baitz M. et al., 2004).

Impatti produzione truciolati PVC riciclato vs PVC vergine

Stichnothe and Azapagic (2013), attraverso uno studio LCA (basato su un impianto di riciclaggio situato nel Regno Unito, con una capacità di trattare 50.000 tonnellate di telai in PVC di scarto all'anno) hanno stimato gli impatti ambientali del PVC riciclato da infissi post-industriali e post-consumo. L'unità funzionale utilizzata è riferita alla "produzione di 1 tonnellata di PVC riciclato da infissi di scarto", considerando le seguenti tipologie di PVC riciclato:

- trucioli bianchi, trucioli non bianchi e polvere non bianca, prodotti dal riciclo dei telai dei rifiuti post-industriali;
- trucioli bianchi, prodotti riciclando i telai dei rifiuti post-consumo.

Il confine del sistema comprende la raccolta e il trasporto dei rifiuti all'impianto di riciclaggio e il trattamento dei telai dei rifiuti per produrre trucioli di PVC e polvere. Il vetro degli infissi viene rimosso altrove (per motivi di salute e sicurezza) e quindi non rientra nei confini di sistema dello studio.

È interessante riportare il confronto degli impatti ambientali dei truciolati bianchi in PVC riciclato con gli impatti della resina di PVC vergine (Fig. 4). I trucioli bianchi riciclati sono scelti per il confronto con il PVC vergine per le loro specifiche di alta qualità che sono vicine alla resina di PVC vergine.

Come indicato nella figura 4, il PVC riciclato consente di risparmiare una quantità significativa di risorse abiotiche e di impatti ambientali rispetto al PVC vergine. Ad esempio, il PVC da rifiuti post-industriali ha impatti mediamente 85 volte inferiori rispetto alla resina vergine, con le maggiori riduzioni ottenute per l'ecotossicità, che vanno da 56 volte per la tossicità marina (MAETP) a 465 volte per la tossicità d'acqua dolce (FAETP). L'esaurimento delle risorse abiotiche (ADP) è ridotto di 36 volte (da 22,5 a 0,62 kg Sb eq/t) e il GWP di 20 volte (da 1910 a 100 kg CO_2eq/t PVC)

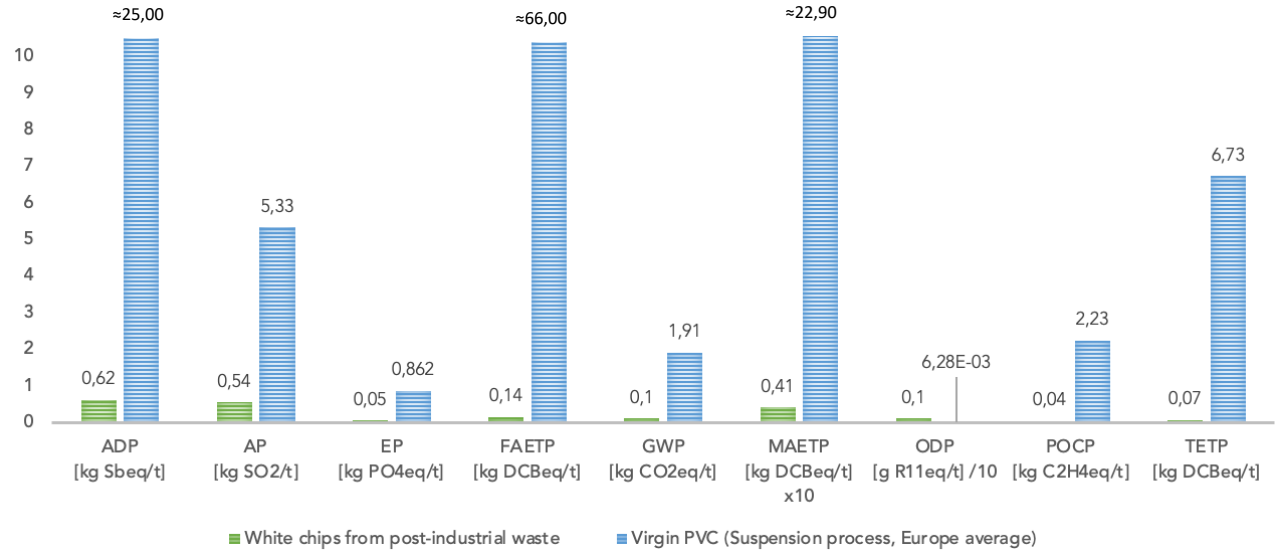


Figura 4: Confronto degli impatti ambientali di diversi tipi di PVC riciclato e vergine (tutti gli impatti espressi per tonnellata di PVC; Distanza di trasporto: 160 km; fattore di carico utile: 0,3. Dati per PVC vergine da "Plastics Europe", 2010). Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano da Stichnothe and Azapagic (2013)

Impegni di sostenibilità della filiera

La filiera italiana ed europea del PVC ha dimostrato attenzione verso gli aspetti di sostenibilità, impegnandosi di volta in volta in progetti mirati al miglioramento del profilo ambientale dei prodotti e grazie ai regolamenti dell'Unione Europa.

La filiera ha quindi posto attenzione negli anni a vari comparti ambientali, ad esempio (Ciotti, 2012):

- l'utilizzo di additivi sempre più sostenibili per minimizzare la contaminazione dei terreni in particolare durante la fase di smaltimento e gestione del fine vita (progetti *Vinyl 2010* e *VinylPlus*, regolamento *Reach*);
- abolizione dell'utilizzo di stabilizzanti al piombo e co-stabilizzante al cadmio (progetto *VinylPlus*, regolamento *Reach*);
- utilizzo di fonti di energia rinnovabili (progetto *VinylPlus*);
- riduzione dei consumi attraverso l'innovazione di processo (es. *PVCLean di Vinnolit*);
- riduzione delle emissioni;
- riduzione di rifiuti inviati a discarica e riciclo meccanico dei sottoprodotti e del fine vita (progetti *Vinyl 2010* e *VinylPlus*);
- innovazione di processo e trattamento rifiuti (processo *Vinyloop* e processo *Ecoloop*).

Particolarmente importante è l'impegno volontario *VinylPlus*, ovvero un impegno decennale per lo sviluppo sostenibile dell'industria europea del PVC. Si basa sui risultati del precedente programma *Vinyl 2010*, e considera gli ulteriori importanti passi necessari ad affrontare le sfide della sostenibilità del PVC, creando un modello di sviluppo di lungo periodo per l'intera filiera. Nel 2021 è stato lanciato un nuovo impegno volontario, denominato *VinylPlus 2030* definendo tre percorsi:

- aumentare la circolarità della filiera del PVC;
- progredire verso la carbon neutrality e minimizzare l'impronta ambientale della filiera;
- costruire alleanze globali e partnership per gli SDGs.

I tre percorsi comprendono dodici principali aree di azione e 39 obiettivi che delineano passi concreti che l'industria europea del PVC deve intraprendere per continuare a migliorare le prestazioni di sostenibilità del PVC.

Recupero e riciclo del PVC

Particolarmente discusso è il tema dell'aumento del recupero e riciclo del PVC a fine vita (Fig. 5). L'ultimo bilancio di *VinylPlus* mostra come il riciclo di rifiuti in PVC (nell'ambito di *VinylPlus*) ha raggiunto il volume rilevante pari a 731.461 tonnellate nel 2020 e 810.775 tonnellate nel 2021, mostrando, quindi, un aumento di quasi il 10% in un solo anno (*Vinylplus*, 2022).

In totale, nel 2021, nell'Unione Europea (incluso Norvegia e Svezia) sono state riciclate nell'ambito di *VinylPlus* 355.329 tonnellate di finestre in PVC e relativi profili, che rappresentano circa il 44% del totale del riciclo di PVC. La quantità di PVC per finestre e relativi profili riciclati sono costrituite per circa il 40% da rifiuti post-consumo e per il 60% da rifiuti pre-consumo.

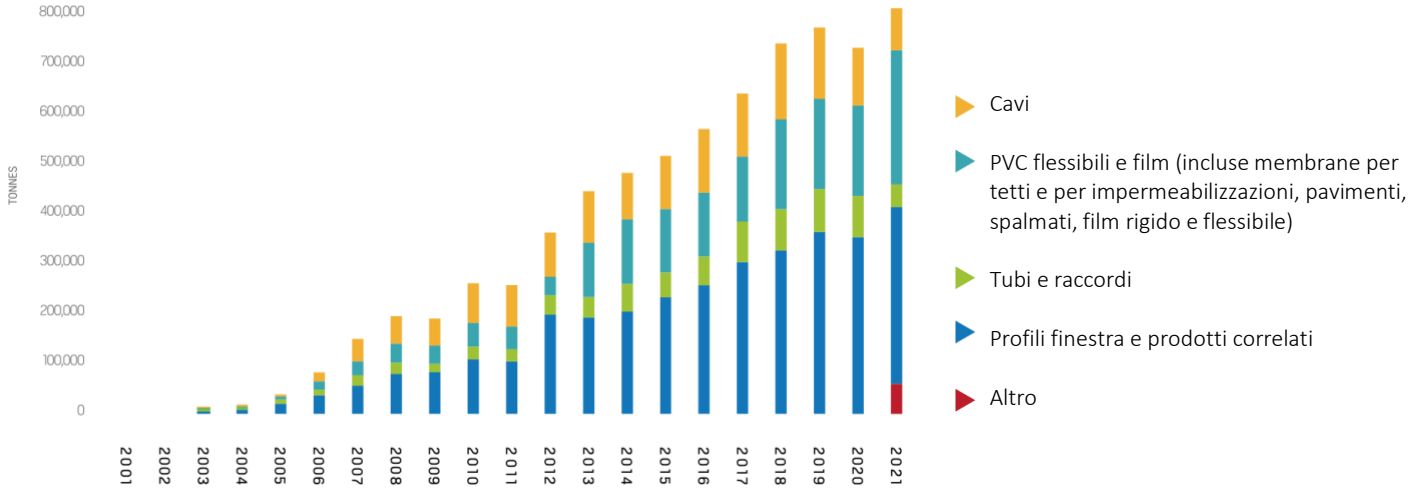


Figura 5. PVC riciclato dal 2001 al 2021. Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano da VinylPlus, 2022

L'indagine *VinylPlus* ha, inoltre, dichiarato che l'aumento del riciclo del PVC, nel 2020 ha anche aumentato la richiesta di personale tecnico, registrando una crescita di 1500 i posti di lavoro in impianti di riciclo.

Gli obiettivi futuri di *VinylPlus* riguardano il raggiungimento di una quota di 900.000 tonnellate all'anno di PVC riciclate entro il 2025 e 1 milione di tonnellate all'anno entro il 2030.

Interessante notare il contributo di ciascuna nazione europa nell'ambito del riciclo di serramenti e prodotti correlati in PVC: la figura 6 mostra la quantità (entro un intervallo) riciclata per nazione nell'anno 2020 (*Recovinyl*, 2021). Inoltre, grazie all'indagini di tracciabilità di *Recovinyl*, è stato possibile evidenziare che il 35% di PVC riciclato (associato a *Recovinyl*) del 2019 è stato utilizzato per la produzione di finestre e profili (Tab. 7).

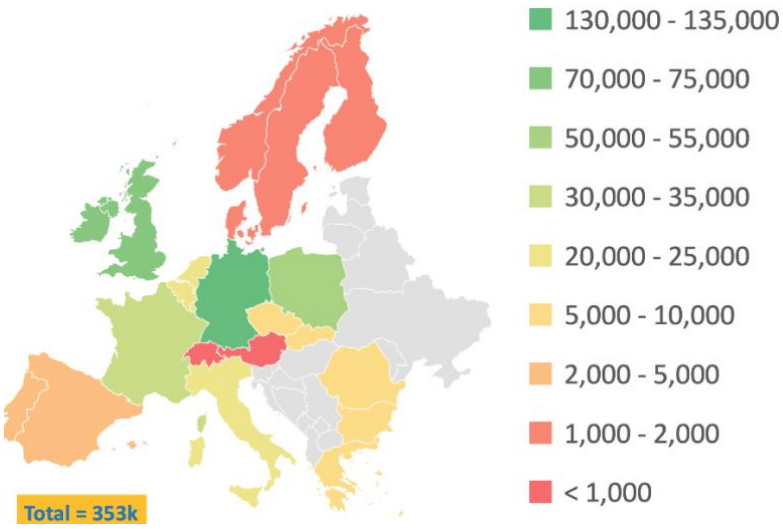


Figura 6. Serramenti e prodotti correlati in PVC riciclati nel 2020, per nazione europea, Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano da Recovinyl, 2021

Percentuale di utilizzo di PVC riciclato	Ambito di applicazione del riciclo
35%	Finestre e Profili
15%	Articoli per la gestione del traffico
13%	Tubi
10%	Pavimenti
5%	Fogli termoformati
4%	Copertura tetti
3%	Attrezzatura per orticoltura e stalle
3%	Altro riciclatore
3%	Compound
3%	Esportazione
2%	Altro

Tabella 7. Indagine di tracciabilità 2020: utilizzo del PVC riciclato del 2019. Fonte: Rielaborazione Politecnico di Milano da Recovinyl, 2021

In Germania i principali produttori di profili in plastica si sono uniti in un'iniziativa congiunta il cui obiettivo è quello di aumentare il riciclaggio di finestre, persiane e porte smontate in PVC e promuovere una gestione efficiente delle risorse, fondando nel 2002 la rete *Rewindo*.

Rewindo, ad esempio, ha organizzato e coordinano la logistica del riciclaggio, attraverso la definizione di tre diverse modalità di raccolta: autoconsegna al partner di riciclaggio *Rewindo*; ritiro a cura del partner di riciclaggio *Rewindo*; autoconsegna a un punto di accettazione regionale, soprattutto per piccole quantità inferiori a dieci finestre. Oggetti edilizi (es. finestre, porte) possono essere consegnate ancora unite ad altri componenti (come vetro e accessoristica).

Gli oggetti edilizi recuperati in PVC subiscono una pre-triturazione e con l'aiuto di speciali separatori, i componenti metallici e il vetro vengono separati dal flusso del materiale.

A partire dal 2016 il *PVC Forum Italia* e *VinylPlus* hanno iniziato un progetto poliennale denominato WREP (*Waste Recycling Project*) che si pone gli obiettivi di definire le quantità di PVC disponibile per il riciclo in Italia, valutare i quantitativi di riciclati e definire uno schema di collettamento per migliorare la raccolta e il riciclo di rifiuti in PVC.

Il progetto WREP ha evidenziato che meno della metà del PVC potenzialmente disponibile per il riciclo viene attualmente riciclato. Ciò dipende soprattutto dal fatto che i punti di raccolta sono sparsi nel territorio e la maggior parte dei riciclatori sono micro e piccole imprese che risentono maggiormente del complesso quadro normativo. Tuttavia, tale ricerca, dal 2018 ha definito schemi pilota per migliorare la raccolta e il riciclo di rifiuti in PVC in diverse aree test: Città Metropolitana di Venezia; il territorio del bacino del Brenta, dall'Altopiano di Asiago al Bassanese e alla Provincia di Padova; venticinque comuni della provincia di Gorizia.

Principali etichettature/certificazioni ambientali legate alla filiera

Di seguito vengono riportate le principali etichettature/certificazioni ambientali legate alla filiera, sia basate sul ciclo di vita ma anche su determinati aspetti ambientali rilevanti per il settore.

VinylPlus Product Label: Il *VinylPlus Product Label* è uno schema di etichettatura di sostenibilità per i prodotti in PVC. È stato sviluppato da *VinylPlus* in cooperazione con due *stakeholder* esterni, *BRE Global* e *The Natural Step*. Il marchio di prodotto si concentra sulle applicazioni in PVC per il settore edilizia e costruzioni. I criteri combinano elementi del *Responsible Sourcing (BES 6001)* di BRE con le cinque sfide di sostenibilità di *VinylPlus*. La valutazione di prodotto per lo schema di etichettatura prevede aspetti relativi a: politiche generali, prestazioni dell'impianto richiedente, aspetti relativi alle componenti del prodotto specifico in esame.

- VinylPlus Supplier Certificate (VSC): nella prima parte del 2020, *VinylPlus* ha ufficialmente lanciato il *VinylPlus Supplier Certificate* (VSC) per i fornitori di materie prime che sono partner di *VinylPlus*.
- Green PVC Compound: il marchio *Green PVC Compound* riguarda il prodotto intermedio dei compound, prodotti dalla miscelazione della resina di PVC con i diversi additivi (stabilizzanti, plastificanti, lubrificanti, riempitivi e pigmenti), necessari per ottenere PVC rigidi o flessibili. Il marchio *Green PVC Compound* nasce nel 2007 per iniziativa del *PVC Forum Italia*, come contributo delle aziende italiane alla sostenibilità del PVC nell'ambito del programma europeo *Vinyl 2010* che prevedeva, tra i diversi impegni, la riduzione del consumo di metalli

pesanti ed in particolare del piombo. Il marchio ha l'obiettivo di fornire garanzie all'utilizzatore e al consumatore sulla "qualità" dei manufatti e la "sostenibilità" delle produzioni e delle sostanze utilizzate e presenti nel prodotto finito.

- EuCertPlast (European Certification of Plastics Recycling): sviluppato attraverso un progetto triennale, cofinanziato dalla Commissione Europea, nell'ambito del Programma Eco-Innovation, mira a comunicare a fornitori e clienti la qualità del riciclatore, garantendo che le plastiche post-consumo lavorate nello stabilimento certificato sono trattate secondo le migliori pratiche e nel rispetto dell'ambiente.
- Plastica Seconda Vita: il marchio italiano ed europeo "Plastica Seconda Vita" è un sistema di certificazione ambientale di prodotto dedicata ai materiali ed ai manufatti ottenuti da plastica riciclata. L'obiettivo del marchio è migliorare la "tracciabilità" dei materiali riciclati e aumentare l'accettazione di materia prima seconda. Il marchio è anche richiamato dai CAM edilizia (Criteri Ambientali Minimi) come strumento di verifica dei criteri obbligatori richiesti. Nel repertorio IPPR (Repertorio Prodotti Plastica Seconda Vita), l'elenco relativo alle Categorie di prodotti nel campo edilizia censisce prodotti relativi a scuri e tapparelle ma non si rilevano ancora profili di serramenti.
- Etichetta energetica del serramento: l'etichetta energetica del serramento, sviluppata da un Gruppo di lavoro costituito da ENEA, Associazioni di Settore Federlegno, UNCSALL, e PVC Forum Italia, incaricato dall'ex-Ministero dell'Ambiente e dal Ministero dello Sviluppo Economico, ha l'obiettivo di comunicare ai progettisti e agli utenti finali l'efficienza energetica del serramento, ovvero di capire in modo oggettivo se il serramento installato garantisce le migliori prestazioni energetiche.
- EPD (Environmental Product Declaration): la Dichiarazione Ambientale di Prodotto, conosciuta anche come *Environmental Product Declaration* (EPD), è un documento che dichiara in maniera certificata gli impatti ambientali legati alla produzione di uno specifico prodotto o servizio, lungo il ciclo di vita dello stesso. Attualmente le EPD disponibili riguardano il prodotto semilavorato di profili in PVC (es.: EPD Saray) oppure riguardano interi serramenti, comprensivi di telaio in PVC e vetrocamera. Non sono state invece rilevate EPD specifiche del PVC compound per serramenti. Di seguito vengono riportate le EPD rilevate sulla base di una ricerca tramite database Environdec, IBU, EPD Italy, Ecoplatform (Tab. 8).

Inoltre, vengono di seguito indicati alcuni studi LCA condotti per la filiera serramento in PVC, riportando una breve descrizione della loro finalità (Tab. 9).

Program Operator	EPD International System	Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU)	EPD International System	EPD International System
Produttore	Finstral Bolzano, Italia	Associazione di Categoria: - QKE Qualitätsverband Kunststofferzeugnisse e.V. - EPPA European PVC Window Profile and related Building Products Association	Ares D&V Serramenti Monteforte d'Alpone, Verona	Saray Istanbul, Turchia
Descrizione prodotto	Finestra "Classic Line" un'anta, triplo vetro. Profili per infissi in PVC-U bianchi e colorati con superficie testurizzata o liscia, guarnizioni in PVC-P coestruso, guarnizioni in EPDM, rinforzo in acciaio e ferramenta in acciaio. La superficie dei telai laminata con un foglio di PMMA.	Non si riferisce a un prodotto specifico di un produttore, ma a un prodotto medio per tutte le finestre in PVC non plastificato delle società appartenenti alle associazioni EPPA - QKE. Si considerano vari materiali per rinforzare i profili realizzati: in acciaio o alluminio, schiuma di poliuretano o fibre di vetro estruse nel PVC non plastificato. La superficie del telaio può presentare differenti tipologie: laminata con pellicola di PVC, rivestita con PMMA (polimetacrilato di metile) o verniciata. Le guarnizioni sono realizzate in PVC plastificato, EPDM (etilene propilene diene monomero) o TPE (elastomeri termoplastici). Giunzioni di acciaio.	Finestra Ares di dimensioni 1000mm x 1500mm, dotata di vetro monocamera, anta liscia singola e telaio di tipo elle.	Profili in PVC laminato. Il codice UN CPC del prodotto è 363, semilavorati in plastica.
Unità Funzionale	1 m^2 di Finestra con dimensioni standard 1.23 m x 1.48 m con triplo vetro, (Uw 0,82 W/m^2K). Porzione Telaio *(Frame fraction)*: 29%.	1 Finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m con triplo vetro (Uw 0,92 W/m^2K). Porzione Telaio *(Frame fraction)*: 25,7%. 1 Finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m con triplo vetro (Uw 1,2 W/m^2K). Porzione Telaio *(Frame fraction)*: 28%.	1 m^2 di una finestra, con dimensioni 1 m x 1,5 m con doppio vetro.	1 kg di Profili in PVC laminato.
Confini di sistema	A1-A2-A3-A4-A5-B2-C1-C2-C3-C4-D	A1-A2-A3-A4-A5-B1-B4-C1-C2-C3-C4-D A1-A2-A3-A4-A5-B1-B2-C1-C2-C3-C4-D	A1-A2-A3-C2-C4-D	A1-A2-A3-A4-C1-C2-C3-C4-D

Tabella 8. EPD disponibili riguardanti PVC per serramenti. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Autore (anno)	Titolo	Descrizione Report LCA	Fonte
Baitz M., Kreißig J., Byrne E. et al. (2004)	"Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials"	Report LCA: Lo studio fornisce una panoramica delle informazioni pubblicamente disponibili sulle valutazioni del ciclo di vita (LCA) sul PVC e sui materiali concorrenti, per una varietà di applicazioni (compresi PVC per finestre e serramenti) al fine di valutare le informazioni esistenti e identificare le lacune informative	Final Report commissioned by European Commission
Mösle P., Oshiro Gama R., Haun T., Fauth J. at al. (2015)	"Sustainability assessment of windows and curtain walls"	Report LCA: valutazione completa della sostenibilità ambientale ed economica nel ciclo di vita di finestre e facciate continue simili fabbricate con materiali di intelaiatura diversi. Vengono presi in considerazione i materiali: alluminio, legno, legno-alluminio per il sistema di facciate continue e alluminio, legno, legno-alluminio e PVC per le finestre residenziali. Per la modellazione della fase d'uso, sono utilizzati le condizioni di diverse zone climatiche (Berlino e Roma)	Study commissioned by the European Aluminium Association
PVC Forum Italia Centro di Informazione sul PVC (2008)	"I serramenti in pvc sotto la lente del ciclo di vita. I risultati e le metodologie dello studio LCA che ha posto a confronto serramenti in PVC, in alluminio e in legno"	Report LCA: Lo studio LCA è finalizzato a porre a confronto i serramenti e gli avvolgibili in PVC con quelli in alluminio e legno.	Commissionato da PVC Forum Italia Centro di Informazione sul PVC
Life Cycle Engineering (2008)	"Confronto tra serramenti in PVC, Alluminio e Legno mediante l'Analisi del Ciclo di Vita (LCA) (inclusi gli avvolgibili)"	Report LCA: valutazione finalizzata a determinare e confrontare il carico ambientale di ciclo di vita di alcune tipologie di chiusure trasparenti (infissi) realizzate in materiali diversi (infissi in pvc, infissi in alluminio con taglio termico infissi in legno)	Commissionato dal Centro di Informazione sul PVC
Dr. José María Baldasano Recio Dr. René Parra Narváez Dr. Pedro Jiménez Guerrero (2005)	"Estimate of energy consumption and CO2 emission associated with the production, use and final disposal of PVC, aluminium and wooden windows"	Report LCA: studio LCA finalizzaro alla valutazione dei serramenti in PVC, alluminio e legno. L'analisi si basa su una finestra a battente standard di 1,34 m x 1,34 m, con doppi vetri, installata in una stanza standard, prodotta e utilizzata nell'ambito della penisola iberica.	

Tabella 9. Report LCA disponibili riguardanti PVC per serramenti. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Norme tecniche

La filiera serramento in PVC si basa su specifiche PCR (*Product Category Rules*) e normative di riferimento di seguito riportate (Tab. 10).

PCR	Program Operator	Contesto
Windows and doors, 11.2015 (tested and approved by the SVR)	IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V.	Germania
PCR 2019:14 Construction products, version 1.11	International EPD System	Internazionale
Sub-PCR-007 Windows and doors (EN 17213)	International EPD System	Internazionale
Construction Products and CPC 54 Construction Services	International EPD System	Internazionale
Uncompounded Polymer Resins and Reactive Polymer Precursors (PCR version 2.0, 2011)*	--	--
Titolo	**Norma**	**Contesto**
Windows and doors — Environmental Product Declarations — Product category rules for windows and pedestrian doorsets	EN ISO 17213:2020	Europa
Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti – Calcolo della trasmittanza termica	UNI EN ISO 10077:2018	Italia
Finestre e porte – Norma di prodotto, caratteristiche prestazionali – Parte 1: Finestre e porte esterne pedonali	UNI EN 14351-1:2016	Europa
Materie plastiche - Profilati di policloruro di vinile non plastificato (PVC-U) per applicazioni edilizie - Parte 1: Designazione dei profilati di PVC-U	UNI EN 13245-1	Europa

Tabella 10. Principali PCR di riferimento e normative per lo sviluppo di certificazioni EPD della filiera serramenti in PVC. *Per il prodotto PVC (Polyvinyl chloride) EN 14351-1. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Rilevanza per quanto riguarda il GPP

Il Green Public Procurement (D.Lgs. 50/2016) prevede l'applicazione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) in edilizia definiti dal D.M. 23/06/2022. I serramenti in PVC rivestono un ruolo principale nel rispetto dei criteri riguardanti il criterio "2.5.11 Serramenti ed oscuranti in PVC" e per l'uso di materie plastiche. In particolare i CAM richiedono per serramenti ed oscuranti in PVC un contenuto di materie riciclate, ovvero recuperate, ovvero di sottoprodotti di almeno il 20% sul peso del prodotto, inteso come somma delle tre frazioni. Tale contenuto deve essere dichiarato in relazione attraverso una certificazione di prodotto basata sui criteri 4.1 "Use of recycled PVC" e 4.2 "Use of PVC by-product", del marchio *VinylPlus Product Label*, con attestato della specifica fornitura. Inoltre, le prestazioni dei serramenti in PVC sono determinanti per i requisiti di trasmittanza termica, definiti D.M. 26 gennaio 2010 e dal D.M. 26 giugno 2015 e s.m.i.

4 Gruppo di lavoro

Nome	Ente/impresa	Tipologia	Sito web	Contatti
Ing. PhD. Valentina Fantin	ENEA	Centro di ricerca	www.enea.it	valentina.fantin@enea.it
Arch. PhD. Serena Giorgi, Prof. Arch. Monica Lavagna, Prof. Arch. Andrea Campioli (responsabili studio di filiera dei telai in PVC)	Life Cycle TEAM, Dipartimento ABC, Politecnico di Milano	Università	www.polimi.it	serena.giorgi@polimi.it monica.lavagna@polimi.it andrea.campioli@polimi.it
Ing. Marco Piana	PVC Forum Italia	Associazione di categoria	www.pvcforum.it	marcopiana@epsass.it
Dott. Gabriele Bagnoli	TPV Compound	Impresa	www.tpvcompound.com	gabriele.bagnoli@tpvcompound.com
Ing. Katrien Romagnoli	Finstral	Impresa	www.finstral.com	kromagnoli@finstral.com

Tabella 11. Gruppo di Lavoro. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

5 Ambito di applicazione dello studio

Il presente studio riguarda la filiera di produzione di telai in PVC per serramenti e infissi in Italia. Lo studio, in particolare, definisce prodotti ritenuti rappresentativi e particolarmente rilevanti per la filiera, quali:

- telaio in PVC, comprensivo di tutti gli elementi, quindi telaio fisso, anta mobile (rinforzo ed elemento fermavetro compreso), guarnizioni, ferramenta, maniglia, viti;
- finestra completa dimensione 1,23 m x 1,48 m, con telaio PVC e vetrocamera doppio vetro (F-L);
- finestra completa dimensione 1,23 m x 1,48 m, con telaio PVC e vetrocamera doppio vetro (L-L);
- finestra completa dimensione 1,23 m x 1,48 m, con telaio PVC e vetrocamera triplo vetro (F-F-L);
- finestra completa dimensione 1,23 m x 1,48 m, con telaio PVC e vetrocamera triplo vetro (L-F-L).

Partendo da tali prodotti rappresentativi sono stati definiti n. 7 dataset per la Banca Dati Arcadia, di seguito riportati.

- Dataset “Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m”: un telaio per serramenti in PVC (vetro escluso) con sviluppo lineare perimetrale di 5,42 m (ovvero di lunghezza totale per comporre una finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m) e con profondità 76 mm, comprensivo di telaio fisso, anta mobile, fermavetro, rinforzo telaio, guarnizioni, ferramenta, maniglia, viti.

- Dataset “Polyvinylchloride frame for windows, 1 m”: un metro lineare di telaio; i dati relativi al telaio totale in PVC (vetro escluso) sono stati ricondotti a 1 metro lineare di telaio attraverso un fattore di conversione: considerando il perimetro esterno della finestra di dimensioni 1,28 m x 1,48 m, pari a 5,42 m, il fattore di conversione per ottenere 1 m di telaio risulta pari a 0,185. L’assunzione del perimetro esterno è data dal fatto che è un parametro facilmente utilizzabile dall’operatore che utilizza il dataset Arcadia; ciò permette all’utente della banca dati Arcadia di rimoltiplicare 1 metro lineare di telaio per altre dimensioni di finestre, non trascurando il contributo delle parti accessorie.
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a doppio vetro (F-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a doppio vetro (C-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a doppio vetro (L-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a triplo vetro (F-F-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a triplo vetro (L-F-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;

Lo studio LCA dei suddetti dataset è sviluppato in conformità alle norme ISO 14040:2006 (“*Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework”*) e ISO 14044:2006 (“*Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*”).

Per lo svolgimento dello studio è stato utilizzato il software SimaPro versione 9.0.0.49 (SimaPro) contenente la banca dati commerciale Ecoinvent 3.6, da cui sono stati selezionati tutti i dataset utilizzati nella modellazione e riguardanti i dati di background. In un'ottica di rappresentatività geografica, temporale e tecnologica dei processi di banca dati utilizzati si è fatto riferimento a tecnologie medie europee e ai più recenti dati disponibili nel database Ecoinvent 3.6.

5.1 Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento

La raccolta dati è stata finalizzata alla mappatura dell'intero processo di produzione del serramento in PVC, comprendendo la produzione del compound PVC-U, la profilatura del telaio in PVC e l'assemblaggio del serramento finito.

Il flusso di riferimento utilizzato per la raccolta dati primari input-output presso le aziende partecipanti al GdL del progetto Arcadia è stato il seguente:

- 1 kg di prodotto (compound) per la raccolta dati primari relativi al processo di compoundazione;
- 1 telaio in PVC per una finestra 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2) per la raccolta dati primari relativi al processo di estrusione e per il processo di assemblaggio del prodotto finito, vetro escluso (i dati relativi al vetro sono ricavati dal relativo report di filiera del progetto Arcadia, "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti", sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam).

Successivamente i flussi input-output raccolti riferiti al processo di compound sono stati riproporzionati al peso PVC della finestra completa (1,82 m^2). La proporzione può essere effettuata direttamente perché (come confermato dei produttori coinvolti nel GdL) il peso del compound utilizzato per produrre un telaio è pari al peso del telaio stesso (parte in PVC). Tutti i dati primari sono stati, quindi, riproporzionati ai pesi del prodotto medio rappresentativo definito.

Le unità funzionali (UF) della valutazione ambientale per ciascun dataset analizzato sono:

- 1 finestra di dimensione 1,82 m^2 (1 p) per i dataset "Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m", "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated", "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated", "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated", "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated", "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated";
- 1 metro lineare di telaio (1 m) per il dataset "Polyvinylchloride frame for windows, 1 m".

5.2 Confini del sistema

I confini di sistema dello studio LCA sono stati definiti per ottenere un'analisi LCA "cradle-to-gate" (dalla culla al cancello), ovvero considerando le fasi A1 "reperimento di materie prime", A2 "trasporto", A3 "produzione", come definisce la norma EN15804:2012+A1:2013.

È esclusa dai confini del sistema la produzione di macchinari ed infrastrutture (e relativi rifiuti di manutenzione) utilizzati per le diverse attività di produzione del serramento, con l'eccezione di quelli già contenuti nei dataset di Ecoinvent utilizzati per modellare i dati di background. Inoltre, sono escluse anche le operazioni "accessorie", quali i viaggi di lavoro e gli spostamenti degli operatori verso i siti di produzione.

In accordo con la EN 15804:2012+A1:2013, inoltre si sottolinea che sono esclusi dal confine di sistema eventuali motori elettrici e dispositivi elettrici collegati per l'apertura/chiusura di finestre.

Nella figura 7 viene evidenziato il confine di sistema dello studio del prodotto rappresentativo. Lo studio considera le fasi per le quali è stato possibile raccogliere dati primari presso le aziende: fase di compoundazione (che include i dataset ambientali della fase di polimerizzazione che avviene fuori dal contesto italiano), fase di estrusione e fase di assemblaggio, comprendendo i processi e gli input di materie prime, energia, acqua e gli output di rifiuti solidi, emissioni in aria, emissioni in acqua.

In Italia esistono diverse realtà di produzione di compound: aziende che producono compound e distribuiscono a piccole aziende/artigiani che estrudono e assemblano finestre e grandi aziende di serramenti che seguono l'intero processo dalla compoundazione all'assemblaggio delle finestre. Nel primo caso il compound viene imballato e venduto ad altre aziende. Nel secondo caso il compound viene utilizzato senza uscire dal sito produttivo (passando direttamente alla fase di estrusione). Il presente studio ha provveduto a raccogliere i dati primari in entrambe le realtà produttive.

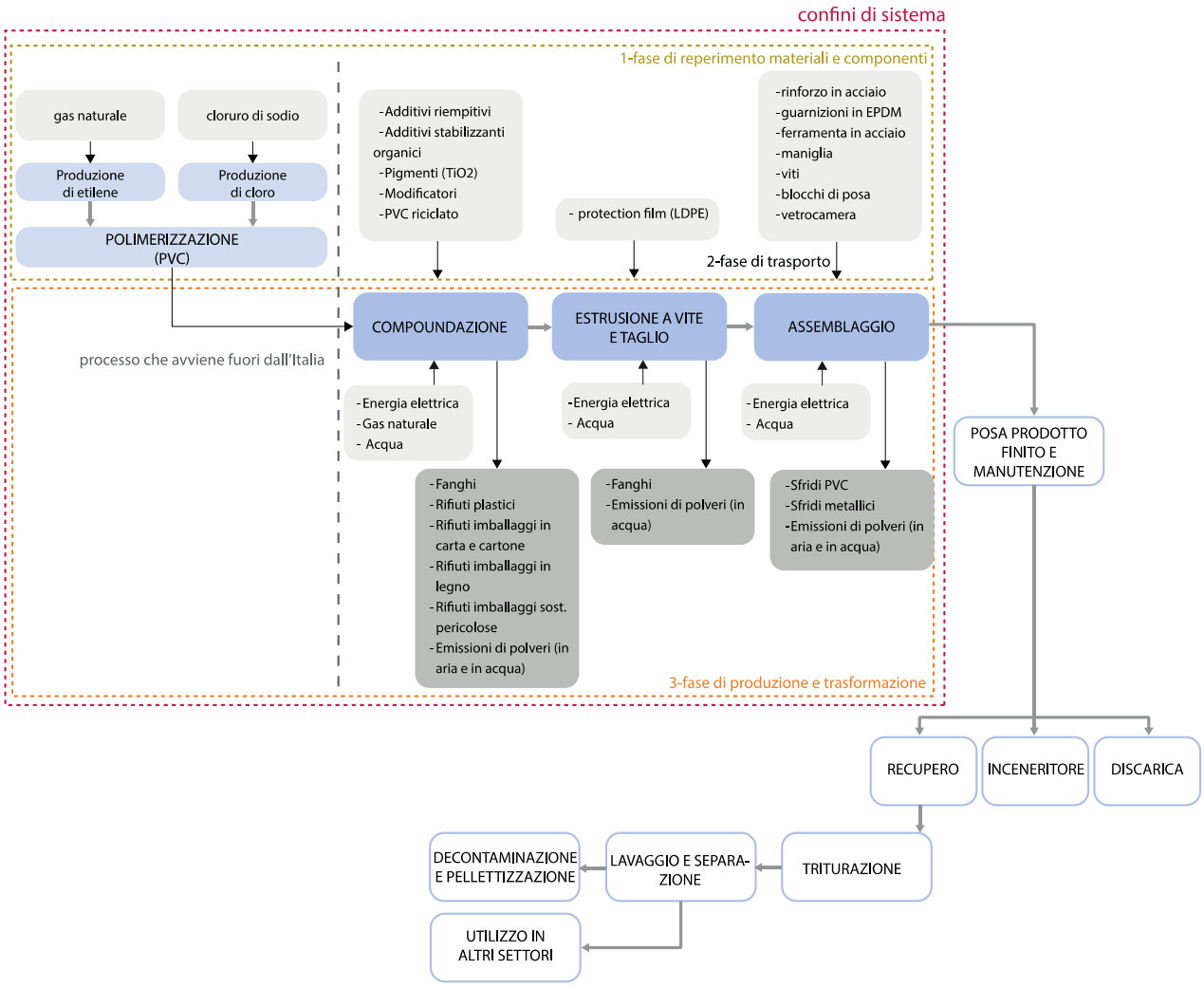


Figura 7. Flussi input e output all'interno dei confini di sistema considerati dallo studio LCA. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Durante il processo di compoundazione non esiste una reazione chimica, in quanto vengono compiuti solo processi fisici, attivati tramite la miscelazione. I prodotti di base, quali resina in PVC (prodotta all'estero) e gli additivi vengono reperiti da aziende produttive esterne e vengono stoccate in silos. Attraverso una macchina (bilancia), in grado di quantificare il peso dei singoli materiali, viene immesso in un turbomiscelatore il giusto mix di materiali per la produzione di compound. Il turbomiscelatore, alimentato a energia elettrica, produce un movimento circolare che mescola ad alta velocità tutti i componenti (che per sfrizionamento si riscaldano). Successivamente, il composto, ormai unificato, viene raffreddato e immesso in trafile che producono il compound PVC, sottoforma di piccolo cippato. Il compound passa quindi alla macchina di insaccaggio, che imballa il prodotto in big bag in polietilene, in modo che siano pronti per la commercializzazione (oppure che siano pronti per passare direttamente alla fase di estrusione).

Successivamente il mix compound giunge al luogo di produzione del telaio PVC, ovvero dove avviene l'estrusione dei profili e il taglio su misura.

Durante la fase di estrusione il compound viene convogliato attraverso una tramoggia (per gravità) nella sezione di alimentazione del cilindro rotante. Quindi, il materiale viene forzato per compressione e, allo stato pastoso, viene fatto passare attraverso una sagoma ("matrice") che riproduce la forma del profilo che si vuole ottenere.

Successivamente avviene la fase di estrusione del telaio. I compound PVC-U viene fatto passare attraverso l'estrusore che effettua la sagomatura del profilo. Successivamente, il profilo continua nella zona di raffreddamento, dove la forma estrusa può passare attraverso una serie di piastre di dimensionamento/rimodellamento. Attraverso acqua o aria compressa, il profilo viene raffreddato.

Durante la fase di estrusione un semplice rullo in gomma applica, direttamente sul profilo, il nastro di protezione che permette una più facile movimentazione dei profili e una maggiore sicurezza di protezione ad eventuali danni durante il trasporto e assemblaggio dei profilati stessi. Infine, il profilo, attraverso un cutter, viene tagliato alla lunghezza stabilita.

In seguito, avviene la produzione di finestre, dove i profili vengono, innanzitutto, sagomati per l'assemblaggio, attraverso il taglio a 45° delle estremità. Generalmente tramite saldatura a caldo, i profili vengono assemblati tra loro per formare la struttura di telaio e vengono aggiunti i singoli componenti facenti parte il prodotto finito, come ferramenta (cerniere, serrature, maniglie, ecc.) e vetrocamera.

5.3 Assunzioni e giudizi di valore

L'assunzione principale dello studio riguarda il prodotto rappresentativo oggetto di valutazione LCA, infatti, esso presenta caratteristiche rappresentative medie di prodotti presenti sul mercato italiano; le dimensioni, ma soprattutto le quantità dei componenti che costituiscono il prodotto valutato derivano dai calcoli presentati nel paragrafo 3.1, come già spiegato, basati su dati a letteratura e/o di settore rappresentativi della filiera di produzione di profili in PVC per serramenti, ritenuti idonei per caratteristiche dell'area geografica in cui si sviluppano (studi LCA, EPD di prodotti) e delle tecnologie in essa impiegate (tipologie di macchinari, attrezzature).

Per le informazioni non reperibili direttamente dalle aziende coinvolte nel GdL, ovvero per quelle lavorazioni che avvengono in altre filiere produttive e/o non localizzate in territorio italiano, lo studio LCA si avvale di dati di "background system" reperiti nel database Ecoinvent.

Identificati i componenti costituenti il sistema serramento in PVC (*foreground system*) è stato necessario, quindi, definire i processi indiretti sottesi a ciascun componente (*background system*),

per quantificare i consumi di materie prime, energia, acqua, emissioni in aria, acqua, suolo, in particolare per i processi di produzione dei seguenti componenti:

- processo di produzione del cloruro di polivinile (PVC) attraverso polimerizzazione in sospensione (*suspension polymerisation*) e processo di polimerizzazione in emulsione (*emulsion polymerisation*), in quanto avviene a monte e fuori dal contesto italiano;
- processo di produzione degli additivi che costituiscono il mix di PVC compound;
- processo di produzione del rinforzo in acciaio e della relativa zincatura;
- processo di produzione dei componenti in aggiunta al telaio PVC per l'assemblaggio del serramento, in quanto materiali provenienti da fornitori differenti.

Per la definizione dell'inventario del vetro, invece, ci si avvale dei dati definiti dallo studio specifico, relativo la filiera di produzione del vetro, all'interno della banca dati Arcadia, "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti", sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam.

È stata effettuata un'assunzione riguardo il contenuto di riciclato nei componenti in acciaio in quanto non è stato possibile quantificarla da dati primari (risulta, infatti, molto difficile ricevere tale informazione a causa di una mancanza di tracciabilità di dati tra siti di produzione dell'acciaio e siti di produzione di prodotti in acciaio). È stata quindi adottata una assunzione già presente a letteratura (Lavagna et al., 2022), assumendo valori statistici relativi alla produzione media europea. Secondo la media europea (EUROFER, 2020), il 60% dell'acciaio corrisponde alla produzione di acciaio da altoforno, a ciclo integrale BOF, e il 40% alla produzione di acciaio da forno elettrico, EAF. Tali percentuali non rispecchiano però quelle presenti ad oggi nei database LCI (incluso GaBi e dati World Steel Association). Di conseguenza, si è deciso di utilizzare dataset Ecoinvent corrispondenti alla produzione di acciaio da altoforno, o a ciclo integrale BOF (Basic Oxygen Furnace), con contenuto di riciclato pari al 19%, e un altro corrispondente alla produzione di acciaio da forno elettrico basso legato, o EAF (Electric Arc Furnace), con contenuto di riciclato pari al 100%. Tali dataset sono stati utilizzati con una combinazione del 60% BOF e 40% EAF, in linea con i dati statistici europei (EUROFER, 2020). Si precisa, inoltre, che è stato necessario assumere un acciaio da forno elettrico basso legato (al posto di un acciaio non legato) in quanto è l'unico dato disponibile in banca dati Ecoinvent 3.6.

Ulteriore assunzione riguarda lo spessore dello strato di zincatura dei componenti in acciaio. Dalla raccolta di dati primari non è stato possibile rilevare lo spessore di zinco dei componenti in acciaio utilizzati in una finestra con telaio in PVC. Ai fini della valutazione sono stati assunti quindi i valori

dei dataset di Ecoinvent: *Zinc coat, coils {RER}| zinc coating, coils*, per il rinforzo in acciaio del telaio PVC, che considera un range di spessore di zinco compreso tra 20 e 45 µm, e *Zinc coat, pieces {RER}| zinc coating, pieces,* per la ferramenta, che considera uno spessore di zinco pari a 130 µm. Tale incertezza è stata oggetto di analisi di sensitività (cfr. paragrafo 9.4) in quanto, in seguito all'interpretazione dei risultati, è emersa l'influenza che lo strato di zincatura ha sulle categorie di impatto più rilevanti.

Costituisce un'ulteriore assunzione anche la dimensione e la classe ambientale dei veicoli utilizzati per i trasporti considerati, sia per i trasporti in input sia per i trasporti in output. I chilometraggi compiuti per il reperimento dei materiali e componenti in input sono dati primari.

L'assunzione di dati secondari si è resa necessaria per la definizione della distanza di trasporto dei rifiuti in PVC e metallici al centro di riciclaggio e per la distanza di trasporto degli altri rifiuti di processo al conferimento in discarica. Tali dati sono stati quindi assunti in accordo allo studio a letteratura di *Stichnothe and Azapagic (2013)*, unico studio presente a lettura per la specifica filiera di serramenti in PVC relativo alla gestione del fine vita. Per quantificare il consumo energetico utilizzato per la triturazione del PVC riciclato (quota parte in input al processo di compoundazione) è stato assunto il consumo energetico riportato nel dataset di Ecoinvent "Recycling PVC/RER U" ed espresso al kg di PVC riciclato. Detto consumo unitario è moltiplicato per la quantità di PVC riciclata in input al processo di compoundazione, definita sulla base di dati primari.

Per quanto riguarda i dati primari raccolti presso le imprese coinvolte nel GdL relativi ai flussi input/output di processo sono da ritenersi ragionevolmente rappresentativi della filiera oggetto di studio, in quanto sono stati comunicati dalle aziende che presentano le maggiori produzioni in Italia sia per quanto riguarda la realtà della sola produzione di compound, sia per quanto riguarda la realtà della filiera continua di produzione (compoundazione, estrusione e assemblaggio finale).

Nel complesso, per la qualità dei dati utilizzati nello studio LCA, si ritiene:

- buona affidabilità dei dati (i dati non primari sono definiti sulla base di dati provenienti da letteratura e controllati da esperti dell'associazione di categoria e dai produttori facenti parte il GdL di progetto);
- molto buona rappresentatività temporale dei dati (nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 3 anni lo studio di filiera);
- buona rappresentatività geografica dei dati (i dati raccolti rappresentano la realtà della filiera sviluppata in Italia, mentre i dati secondari riferiti a produzioni svolte fuori dal

contesto italiano sono state avvallate dai produttori ed esperti dell'associazione di categoria, facenti parte il GdL di progetto);

- molto buona rappresentatività tecnologica dei dati (il processo descrive in modo dettagliato la tecnologia attualmente presente sul mercato, includendo tutti i flussi di materia ed energia in input e output).

5.4 Gestione della multifunzionalità

In generale, non sono stati gestiti problemi di multifunzionalità per i prodotti oggetto di analisi nel presente studio di filiera.

La multifunzionalità "interna" al processo di produzione di compound è stata gestita direttamente dall'azienda facente parte il GdL che ha fornito i dati primari per lo studio di filiera. L'azienda ha gestito la multifunzionalità attraverso procedure di allocazione su base di quantità prodotte. Ad esempio, per la raccolta dei dati primari del processo di compoundazione, oltre alla produzione di compound per infissi, l'azienda produce altri tipi di PVC compound destinati ad altri settori ed usi. L'azienda ha considerato e fornito i soli consumi di materie prime, energia, acqua e la generazione di rifiuti solidi ed emissioni della quota parte di produzione di compound destinata all'estrusione di PVC rigido destinato alla filiera dei serramenti.

6 Modellazione dei dataset della filiera

Per la creazione dei dataset della banca dati di Arcadia è stato scelto un modello di tipo "attribuzionale", ovvero un modello che rappresenta la catena di fornitura del prodotto oggetto di studio LCA, utilizzando dati ed eventuali processi di background rappresentativi di una situazione media del mercato di riferimento. I dataset creati a partire dal presente studio di filiera sono relativi alla sola produzione, ovvero si riferiscono al prodotto in uscita dallo stabilimento produttivo e pronto per essere messo sul mercato. I dataset non includono dunque tutti i trasporti del prodotto finito alla sua destinazione finale di uso. Sono, invece, inclusi i trasporti relativi alla fase di produzione (A2) ovvero quelli che riguardano il traporto delle materie prime e componenti utili per la produzione e l'assemblaggio del prodotto finestra.

7 Analisi di inventario

Di seguito viene descritta la procedura di raccolta dati primari relativa ai processi di filiera di produzione di una finestra in PVC. La raccolta dei dati primari presso le aziende coinvolte nel GdL è stata effettuata tramite la predisposizione di fogli di calcolo Microsoft Excel impostati per la raccolta dei flussi materici ed energetici in entrata e in uscita al processo di produzione (A1-A3). Tali file Excel sono stati inviati alle aziende, le quali hanno provveduto alla loro compilazione. Successivamente sono state organizzate con le aziende del GdL una serie di incontri (attraverso piattaforme online), finalizzati ad un confronto diretto relativamente ai dati raccolti, alle modalità di calcolo e di rilevamento.

Per la raccolta dei dati secondari, ovvero per quelli non reperiti direttamente dalle aziende del GdL, sono stati assunti dati di letteratura (attraverso l'analisi di report scientifici, report di settore e studi LCA). Come già specificato nel paragrafo 5.3, l'assunzione di dati secondari si è resa necessaria per la definizione della distanza di trasporto (km) dei rifiuti in PVC e metallici al centro di riciclaggio e per la distanza di trasporto degli altri rifiuti di processo al conferimento in discarica e per la quantificazione del consumo energetico (kWh/kg) utilizzato per la triturazione del PVC riciclato.

Gli input riguardano: i componenti della fase di compoundazione, partendo dalla resina di PVC, prodotta al di fuori del contesto italiano, in aggiunta agli additivi che servono per raggiungere le caratteristiche richieste da norma per il PVC rigido (PVC-U) destinato alla produzione di serramenti, gli accessori componenti della finestra, ovvero il rinforzo in acciaio, le guarnizioni, la ferramenta e le viti, i materiali per gli imballaggi, i relativi trasporti e i flussi energetici necessari per le fasi di estrusione e assemblaggio. Gli output invece riguardano: il prodotto finale, le emissioni in atmosfera e in acqua, i rifiuti generati durante il processo produttivo e i relativi trasporti fino al conferimento in discarica o centri di riciclaggio. I dati di input e output del prodotto rappresentativo, mostrati nei paragrafi seguenti, vengono espressi per l'unità funzionale dello studio LCA (espresso in 1 unità finestra 1,28 m x 1,48 m).

La riproporzione dei flussi materici ed energetici in input e in output (es. pesi dei materiali del mix compound, consumo energetico, emissioni, ecc.) per l'UF dello studio è avvenuta sulla base del peso in input del telaio PVC del prodotto rappresentativo, ovvero incluso sfridi e scarti di produzione. Dai dati primari raccolti è stato possibile, infatti, definire che tra input e prodotto finito esiste uno scarto pari al 7% del peso del telaio in PVC (scarto dovuto ai tagli effettuati durante la fase di assemblaggio). Inoltre, grazie ai dati primari raccolti, è stato possibile definire anche la differenza di quantità in input e in output (prodotto finito) del rinforzo in acciaio (+2,1%); il peso degli altri componenti resta

invece costante in quanto essi non subiscono lavorazioni. Nella tabella seguente è possibile quindi notare le quantità dei materiali in input e le quantità in output (ovvero del prodotto finito).

	INPUT		PRODOTTO FINITO (cfr par. 3.1)		% scarto
UF = 1,82 m²	Quantità	u.m.	Quantità	u.m.	
PVC-profiles (compound PVC rigido)	1,79E+01	kg	1,66E+01	kg	7,0%
Rinforzo in acciaio (acciaio zincato)	1,10E+01	kg	1,08E+01	kg	2,1%
Guarnizioni / (EPDM)	8,34E-01	kg	8,34E-01	kg	0,0%
Blocchi di posa (PP)	1,40E-01	kg	1,40E-01	kg	0,0%
Ferramenta (acciaio zincato)	2,41E+00	kg	2,41E+00	kg	0,0%
Maniglia (acciaio zincato)	1,40E-01	kg	1,40E-01	kg	0,0%
Viti (acciaio zincato)	1,43E-01	kg	1,43E-01	kg	0,0%
Telaio completo (peso totale)	3,26E+01	kg	3,11E+01	kg	--

Tabella 12. Definizione del peso dei componenti in input del prodotto rappresentativo e del peso dei componenti nel prodotto finito (definito nel paragr. 3.1). Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Si precisa che la ferramenta in acciaio comprende tutti i meccanismi di manovra (cerniere, supporti angolari, ecc.) che consentono l'apertura e la chiusura di finestre con una gamma di azioni (ad es. rotazione e inclinazione dell'anta). Generalmente tutta la ferramenta e le viti sono in acciaio zincato. Le guarnizioni, generalmente in EPDM, sono elementi aggiunti in fase di montaggio della finestra per aumentarne le prestazioni costruttive nell'ambito di: tenuta all'acqua, tenuta all'aria, tenuta termica, isolamento acustico.

7.1 Input del processo di compoundazione, estrusione ed assemblaggio

7.1.1 Materiali in input del processo di compoundazione

Grazie alla raccolta dei dati primari del processo di compound presso due siti produttivi, è stato possibile definire la composizione rappresentativa del mix compound per la produzione di PVC rigido per serramenti (Tab. 13).

All'interno del mix (Tab. 13), la porzione di PVC rappresenta la resina di PVC prodotta fuori dai confini dell'Italia e importata. Secondo quanto sostenuto dall'azienda facente parte il GdL circa l'80% del PVC utilizzato in Italia proviene dall'Europa, e solo il 20% proviene dal mondo. Inoltre, il 10% del PVC è prodotto con processo *emulsion* mentre e il 90 % è prodotto con processo *suspension*. Gli additivi possono essere di diverso tipo e il mix degli additivi utilizzati generalmente è un dato riservato all'azienda di produzione in quanto determina le caratteristiche prestazionali del telaio in PVC stesso. Le miscela maggiormente rappresentativa è la seguente:

- additivi riempitivi sono a base di carbonato di calcio opportunamente trattato;
- gli stabilizzatori sono costituiti da miscele complesse a base di stearati di calcio, stearati di zinco, idrossidi di alluminio e magnesio, zeoliti, idrotalciti, copolimeri acrilici e lubrificanti di varia natura; all'interno degli stabilizzatori sono inclusi i lubrificanti;
- i pigmenti sono in biossido di titanio (TiO2)
- per modificatori si intende la classe di polimeri che vanno a migliorare la resistenza meccanica all'urto e si tratta di polimeri acrilici oppure politene clorurato.

Il processo di produzione di compound richiede circa il 3% di materiali in più in input, i quali vengono dispersi come scarti di produzione e come emissioni in aria e in acqua durante il processo. La quota di contenuto di riciclato pari al 20% è stata adottata sulla base dei dati primari raccolti e sulla base da quanto dichiarato nei rapporti dell'associazione di categoria.

Di seguito sono riportati i valori percentuali del mix compound e i pesi di ciascun componente per produrre 1 kg di compound (considerando lo scarto del 3%, quindi: 1,03 kg di materiale totale per produrre 1 kg di prodotto).

Input materiali	Mix compound in %	Quantità kg/1kg compound PVC	u.m.	Tipologia di dato
Polivinyl chloride (PVC)	61,80%	6,37E-01	kg /1 kg compound	Primario
Additivi riempitivi	6,85%	7,06E-02	kg /1 kg compound	Primario
Additivi stabilizzanti organici	3,22%	3,32E-02	kg /1 kg compound	Primario
Pigmenti in Biossido di titanio	4,28%	4,41E-02	kg /1 kg compound	Primario
Modificatori	3,95%	4,07E-02	kg /1 kg compound	Primario
PVC riciclato	19,90%	2,05E-01	kg /1 kg compound	Primario
Totale (incl. + 3% materiali in input)	100%	1,03E+00	kg /1 kg compound	Primario

Tabella 13. Composizione mix compound PVC per telai finestra e dati primari input materiali riferiti alla produzione di 1 kg di compound PVC. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Moltiplicando i valori del mix compound per la quantità necessaria per produrre il telaio PVC del prodotto rappresentativo, pari a 17,87 kg (considerando anche gli scarti della fase di assemblaggio), e considerando, quindi, lo scarto del 3% ne risulta che servono 18,41 kg di mix compound per la produzione del telaio PVC di 17,87 kg (tab. 14).

In tabella 15 vengono riportati i dati di input della fase di compoundazione (ricavati sulla base dei dati primari), per la produzione della finestra oggetto di studio (1,23 m x 1,48 m). I dati sono a loro volta suddivisi per quote parti di provenienza geografica e tipologia di processo di produzione, sulla base dei dati primari raccolti. Viene inoltre riporta l'identificazione dei dataset Ecoivent utilizzati per lo studio LCA. Per ricondurre tutti i valori ad 1 m di telaio, il fattore di conversione è pari a 0,185.

processo	Input materiali	Quantità per 1 finestra 1,23 m x 1,48 m	u.m.	Tipologia dato
produzione compound	Polivinyl chloride (PVC)	1,14E+01	kg/u.f.	Primario
	Additivi riempitivi	1,26E+00	kg/u.f.	Primario
	Additivi stabilizzanti organici	5,93E-01	kg/u.f.	Primario
	Pigmenti (in Biossido di titanio)	7,88E-01	kg/u.f.	Primario
	Modificatori	7,27E-01	kg/u.f.	Primario
	PVC riciclato	3,66E+00	kg/u.f.	Primario
	totale materiali per compound	1,84E+01	kg/u.f.	Primario

Tabella 14. Dati primari degli input materiali della fase di compoundazione in relazione all'unità finestra. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Input materiali	Quantità per finestra (u.f)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent
PROCESSO: PRODUZIONE COMPOUND				
Polivinyl chloride (PVC)	1,14E+01	kg/u.f.	Primario	--
10% emulsion	1,14E+00	kg/u.f.	Primario	--
80% emulsion RER	**9,10E-01**	kg/u.f.	Primario	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RER}| polyvinylchloride production, emulsion polymerisation | Cut-off, U
20% emulsion GLO	**2,28E-01**	kg/u.f.	Primario	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RoW}| polyvinylchloride production, emulsion polymerisation | Cut-off, U
90% suspension	1,02E+01	kg/u.f.	Primario	--
80% emulsion RER	**8,19E+00**	kg/u.f.	Primario	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RER}| polyvinylchloride production, suspension polymerisation | Cut-off, U
20% emulsion GLO	**2,05E+00**	kg/u.f.	Primario	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}| polyvinylchloride production, suspension polymerisation | Cut-off, U
Additivi riempitivi	**1,26E+00**	kg/u.f.	Primario	Calcium Carbonate, precipitated (RER) | Calcium Carbonate production, precipitated | Cut-off, U
Additivi stabilizzanti organici	**5,93E-01**	kg/u.f.	Primario	Chemical, organic {GLO}| market for | Cut-off, U
Pigmenti (in Biossido di titanio)	**7,88E-01**	kg/u.f.	Primario	Titanium dioxide (RER) | production, chloride process | Cut-off, U
Modificatori	**7,27E-01**	kg/u.f.	Primario	Acrylic Binder, without water, in 34%solution state (RER) | acrylic Binder production in 34%solution state | Cut-off, U
PVC riciclato	3,66E+00	--	Primario	Recycling PVC/RER U (this is an empty process because of the cut-off at recycling)
Totale	1,84E+01	--	Primario	--

Tabella 15. Dati primari degli input materiali della fase di compoundazione in relazione all'unità finestra, articolati per provenienza geografica e tipologia di processo di produzione. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Materiali in input del processo di estrusione e assemblaggio

Come già mostrato nella tabella 12, durante la fase di assemblaggio viene generato uno scarto pari al 7% del peso del telaio in PVC (scarto dovuto ai tagli effettuati). Il materiale estruso (necessario per l'assemblaggio della finestra) è quindi maggiore rispetto alla quantità presente nel prodotto finito. Le barre di telaio PVC vengono, infatti, estruse alla lunghezza massima necessaria e, successivamente, le estremità vengono tagliate a 45° in modo da permettere l'assemblaggio angolare dell'intero sistema finestra. Come il telaio in PVC, anche la barra di rinforzo metallico in acciaio viene tagliata a 45°. Di conseguenza i tagli effettuati per la fase di assemblaggio generano inevitabilmente anche sfridi di acciaio (2,1% del peso dell'acciaio in input) (cfr. rifiuti ottenuti).

Nella tabella 16, oltre ai pesi del prodotto (cfr. tabella 12), si nota la presenza del film adesivo colorato e del nastro di protezione. Per quanto riguarda il film adesivo colorato (*decorative foil*), il GdL ha dichiarato che esso presenta un peso insignificante; inoltre, tale film viene applicato solo ai telai per finestre con particolari finiture, ad esempio, finiture colorate o effetto legno. Di conseguenza, scegliendo di valutare un telaio in PVC bianco si esclude dal conteggio la presenza del film adesivo colorato. Viene invece conteggiato il nastro di protezione, generalmente in LDPE, che viene applicato sul profilo in PVC durante il processo di estrusione, come protezione contro i danni esterni che possono verificarsi durante le operazioni di trasporto, movimentazione, stoccaggio e assemblaggio del prodotto finito. Il nastro di protezione viene rimosso dopo la fase di installazione in opera della finestra.

Per la quantificazione degli impatti dei componenti in acciaio zincato è stato necessario quantificare la superficie degli oggetti in acciaio in quanto Ecoinvent non riporta un dataset di background relativo all'acciaio zincato, ma solo dataset relativi al rivestimento in zinco.

Non potendo reperire tale informazione dalle aziende produttrici, la superficie di zinco del rinforzo di telaio e della ferramenta è stata calcolata attraverso il ridisegno 2D e 3D dei componenti facenti parte la finestra. Per quantificare la superficie del rinforzo in acciaio è stato scelto il prodotto maggiormente rappresentati della variabilità di mercato.

Nella tabella seguente vengono riportate le misure rilevate per il rinforzo del telaio mobile e del telaio fisso, unitamente al calcolo della superficie totale, complessiva dell'intera finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m.

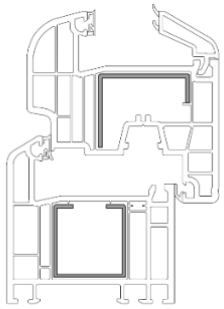
		Telaio mobile	Telaio fisso
	Area della sezione di rinforzo	0,00012044 m^2	0,00012667 m^2
	Perimetro della sezione di rinforzo	0,16 m	0,20 m
	Sviluppo lineare del rinforzo in acciaio (lunghezza) (Fig. 9 telaio mobile) (Fig. 10 telaio fisso)	1,10 m (lung. lato corto) 1,35 m (lung. lato lungo) 4,9 m (lunghezza totale)	1,208 m (lung. lato corto) 1,458 m (lung. lato lungo) 5,3 m (lunghezza totale)
	Superficie di zincatura	**0,16 m *4,9 m = 0,78 m^2**	**0,2 m x 5,3 m = 1,06 m^2**
	Superficie di zincatura totale	**0,78 m^2 + 1,06 m^2 = 1,84 m^2**	

Figura 8. Telaio in PVC preso in considerazione per la quantificazione della superficie zincata del rinforzo in acciaio e calcolo della superficie di zincatura del rinforzo in acciaio. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Al fine di validare la correttezza dell'assunzione, è stato calcolato il peso del rinforzo in acciaio considerato, moltiplicando il volume totale per una densità media di 7860 kg/m^3. Risulta un peso pari a circa 10 kg, in linea con il prodotto medio rappresentativo definito.

La stessa metodologia, basata sul ridisegno 2D e 3D degli elementi, è stata assunta per il calcolo della superficie di zinco dei componenti in acciaio zincato che costituiscono la ferramenta della finestra. Il ridisegno si è basato su schede tecniche relative alla componentistica utilizzata per una finestra con telaio in PVC, fornite direttamente da un'azienda che distribuisce meccanismi per finestre, porte e scorrevoli in Italia. Il totale della superficie di zincatura della ferramenta è risultata pari a 0,039 m^2.

È stato necessario effettuare una semplificazione degli elementi che sono molto articolati (es. alcuni meccanismi di chiusura, scontro nottolino, punti di chiusura a fungo, ecc.). La zincatura delle viti è stata trascurata in quanto sarebbe risultata un'assunzione troppa approssimativa, non potendo risalire al numero e alla tipologia di viti utilizzate.

Si sottolinea che non è stato possibile reperire o quantificare con certezza lo spessore dello strato di zinco. Lo stesso è quindi oggetto di analisi di sensitività (paragrafo 9.4).

Per quanto riguarda tutti prodotti in acciaio, i dati primari di input sono associati alla produzione di acciaio vergine (per il 60% del totale) e alla produzione di acciaio riciclato (per il 40% del totale) secondo l'assunzione presente a letteratura (Lavagna et al., 2022), già spiegata nel paragrafo 5.3.

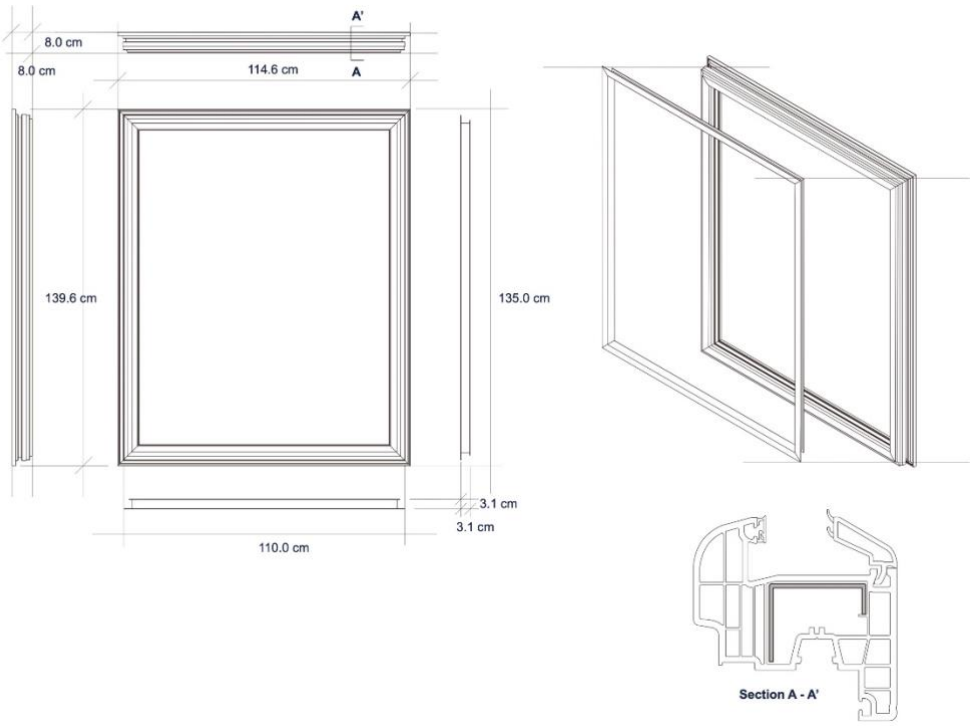


Figura 9: Ridisegno per la misurazione della superficie di zincatura, del rinforzo in acciaio zincato incluso nel telaio PVC mobile. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

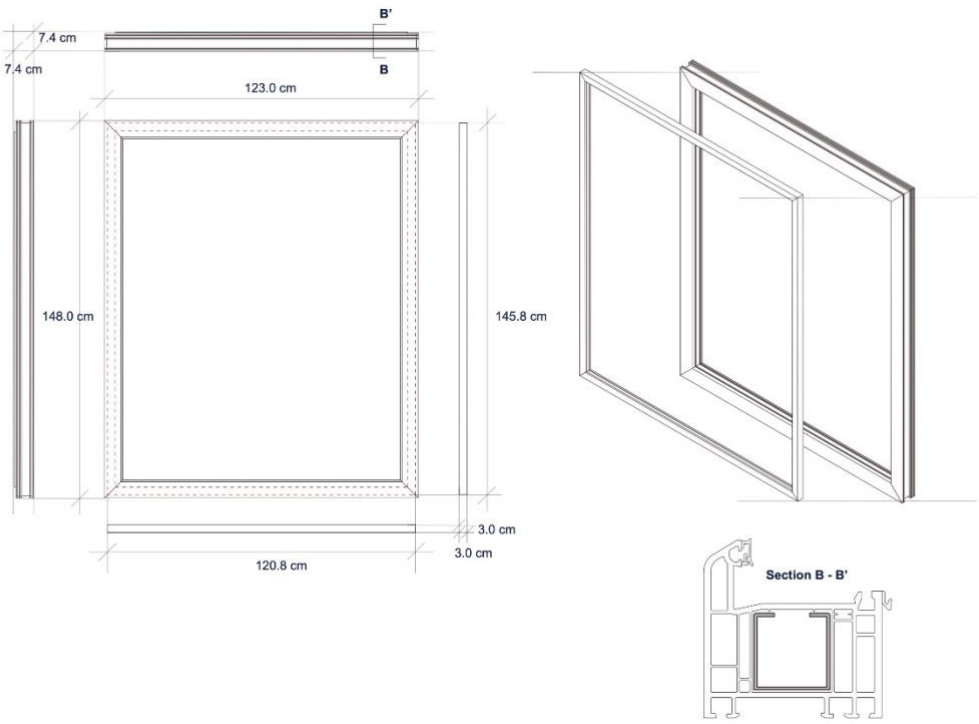


Figura 10: Ridisegno per la misurazione della superficie di zincatura, del rinforzo in acciaio zincato incluso nel telaio PVC fisso. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Input materiali	Quantità per finestra (u.f)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent
PROCESSO: ESTRUSIONE				
PVC-profiles (compound PVC rigido)	1,79E+01	kg/u.f.	Primario	--
Decorative foil (Film adesivo colorato)	0,00E+00	--	Primario	--
Protection film (LDPE)	**3,10E-02**	kg/u.f.	Primario	Polyethylene, low density, granulate (RER) | production |Cut-off, U
PROCESSO: ASSEMBLAGGIO				
Rinforzo in acciaio / Steel reinforcement (acciaio zincato)	1,10E+01	kg/u.f.	Primario	--
60% BOF acciaio primario 100%	**6,62E+00**	kg/u.f.	Primario	60% - Steel unalloyed (RER)| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U
40% EAF	**4,41E+00**	kg/u.f.	Primario	40% - Steel, low-alloyed (RER)| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U
Laminazione a caldo coil	**1,10E+01**	kg/u.f.	Primario	Hot rolling, steel (RER) | processing | Cut-off, U
Profilatura a freddo	**1,10E+01**	kg/u.f.	Primario	Sheet rolling, steel (RER) | processing | Cut-off, U
Zincatura	**1,84E+00**	m^2/u.f.	Primario	Zinc coat, coil (RER)| zinc coating, coils | Cut-off, U
Ferramenta / Hardware (acciaio zincato)	2,41E+00	kg/u.f.	Primario	--
60% BOF	**1,45E+00**	kg/u.f.	Primario	60% - Steel unalloyed (RER)| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U _ Blast furnace converter _ acciaio primario 100%
40% EAF	**9,65E-01**	kg/u.f.	Primario	40% - Steel, low-alloyed (RER)| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U _ electric arc furnace converter _acciaio secondario 100%
Lavorazione del metallo	**2,41E+00**	kg/u.f.	Primario	Metal working, average for steel product manufacturing (RER) | processing | Cut-off, U
Zincatura	**5,40E-02**	m^2/u.f.	Primario	Zinc coat, pieces {RER}| zinc coating, pieces | Cut-off, U
Maniglia / Handle (alluminio)	1,40E-01	kg/u.f.	Primario	Aluminium, wrought alloy (GLO) | aluminium ingot, primary, to market |Cut-off,U
Lavorazione del metallo	**1,40E-01**	kg/u.f.	Primario	Metal working, average for steel product manufacturing (RER) | processing | Cut-off, U
Viti / Screws (acciaio zincato) - zincatura trascurata	1,43E-01	kg/u.f.	Primario	--
60% BOF	**8,55E-02**	kg/u.f.	Primario	60% - Steel unalloyed (RER)| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U _ Blast furnace converter _ acciaio primario 100%
40% EAF	**5,70E-02**	kg/u.f.	Primario	40% - Steel, low-alloyed (RER)| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U _ electric arc furnace converter _acciaio secondario 100%
metal working	**1,43E-01**	kg/u.f.	Primario	Metal working, average for steel product manufacturing (RER) | processing | Cut-off, U
Guarnizioni / Gaskets (EPDM)	**8,34E-01**	kg/u.f.	Primario	Synthetic rubber (RER) | production | Cut-off, U
Blocchi di posa / Glazing Blocks (PP)	**1,40E-01**	kg/u.f.	Primario	Polypropylene, granulate (RER) | production | Cut-off, U

Tabella 16. Dati primari input materiali fase di estrusione e assemblaggio. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Riciclo / contenuto di riciclato del processo di compoundazione, estrusione e assemblaggio

Come sostenuto dalle aziende del GdL, il processo di estrusione in sé non presenta rifiuti, in quanto lo sfrido (generato durante il processo di estrusione) viene reimmesso nella filiera produttiva, all'interno del mix compound, alimentando nuovamente il processo di estrusione.

Lo sfrido prodotto durante l'assemblaggio viene raccolto e riciclato nella filiera produttiva, all'interno del mix compound. Come si nota dalle tabelle 13, 14 e 15 nel mix compound si conteggia circa un 20% di contenuto di riciclato, in linea con i dati primari raccolti e le statistiche rilevate nelle dichiarazioni PVC Forum Italia e *Recovinyl* (cfr. paragrafo 3.3). Considerando i dati primari è possibile asserire che, in linea di massima, il 6% di scarto PVC del processo di assemblaggio viene interamente riciclato come materia prima seconda all'interno del mix compound. Considerando una filiera frammentata, nella quale la produzione del compound e l'assemblaggio della finestra vengono effettuate da seti produttivi diversi ed autonomi, è possibile conteggiare il beneficio di tale processo di riciclo. Si restituisce di seguito una sintesi grafica (fig. 11) dei flussi del prodotto rappresentativo mostrando il processo di riciclo che avviene lungo la catena di produzione. La figura 11 schematizza i flussi materici del processo di riciclo riferite alla produzione di una finestra 1,23 m x 1,48 m.

Per la valutazione LCA è stato considerato il consumo energetico utilizzato per la triturazione del PVC riciclato.

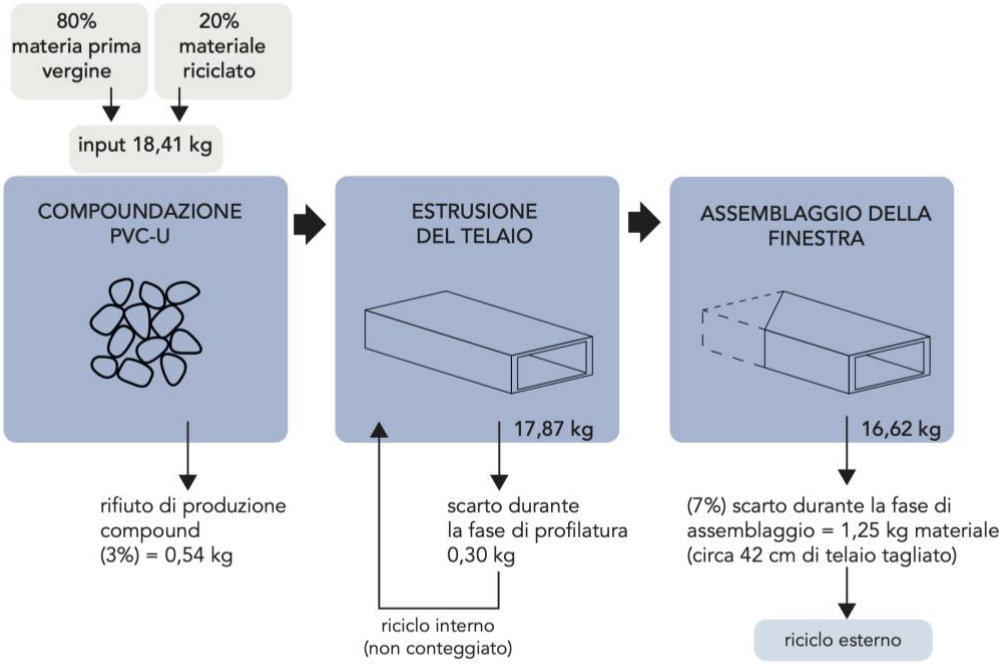


Figura 11: Schematizzazione dei flussi e del processo di riciclo. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Consumi di energia e di acqua del processo di compoundazione, estrusione e assemblaggio

Il consumo di energia (articolato in due vettori: energia elettrica e gas naturale) e di acqua, derivato da dati primari, riguardano l'intero ciclo produttivo: per la fase di compoundazione viene considerato lo stoccaggio delle materie prime in silo, il loro trasferimento nei turbo-miscelatori veloci, il raffreddamento nei miscelatori lenti, la granulazione ed infine l'imballaggio dei granuli; per la fase di estrusione viene compreso il passaggio del mix compound nella macchina profilatrice, il taglio dei profili, il sistema di raffreddamento e il compressore; durante l'assemblaggio viene considerato il taglio dei profili a 45°, la saldatura e l'assemblaggio dei componenti.

risorsa	Quantità per finestra (u.f)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent
processo: produzione compound				
energia elettrica	6,84E+00	kWh/u.f.	Primario	Electricity medium voltage (IT) | market for | Cut-off, U
gas naturale	7,08E-01	mc/u.f.	Primario	Heat, district or industrial, natural gas {CH}| market for heat, district or industrial, natural gas | Alloc Def, U
acqua	2,02E+00	litri/u.f.	Primario	Tap water (CH) market for | Cut-off U
energia elettrica per riciclo PVC	2,20E+00	kWh/u.f.	Primario	Electricity medium voltage (IT) | market for | Cut-off, U
processo: estrusione (profilatrice + sistema di raffredamento + taglio + compressore)				
energia elettrica	7,86E+00	kWh/u.f.	Primario	Electricity medium voltage (IT) | market for | Cut-off, U
acqua	3,18E+00	litri/u.f.	Primario	Tap water (CH) market for | Cut-off U
processo: assemblaggio (taglio + saldatura + assemblaggio)				
energia elettrica	2,78E+01	kWh/u.f.	Primario	Electricity medium voltage (IT) | market for | Cut-off, U
Totale Energia elettrica	**4,47E+01**	kWh/u.f.	Primario	Electricity medium voltage (IT) | market for | Cut-off, U
Totale gas naturale	**7,08E-01**	mc/u.f.	Primario	Heat, district or industrial, natural gas {RER}| market group for heat | Cut-off, U
Totale acqua	**5,21E+00**	kg/u.f.	Primario	Tap water (CH) market for | Cut-off U

Tabella 17. Dati primari input energia e acqua. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Trasporti dei materiali in input + imballaggi del processo di compoundazione, estrusione e assemblaggio

La raccolta dati primari ha permesso di quantificare anche la distanza media di trasporto (km) percorsa per il reperimento dei materiali/componenti in input (da fornitore a impianto di compoundazione, estrusione e assemblaggio). Anche in questo caso il dato è di tipo primario.

Al fine di associare la distanza percorsa al prodotto rappresentativo, si è scelto, tra i dati primari raccolti, di adottare la distanza peggiorativa. Successivamente la distanza è stata moltiplicata per il peso dei prodotti in input per l'UF 1 unità finestra (1,82m^2) per ottenere le tkm.

Processo: Produzione compound				
Input materiali	Trasporto per 1 finestra (u.f)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent mezzo trasporto
Polivinyl chloride (PVC)	9,10E+00	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Additivi riempitivi	1,01E+00	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Additivi stabilizzanti organici	2,96E-01	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Pigmenti (in Biossido di titanio)	5,52E-01	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Modificatori	1,45E+01	tkm	Primario	Transport, freight, sea, container ship (GLO)| transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U
	2,07E-01	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Processo: Estrusione				
PVC-profiles (PVC rigido)	1,89E+00	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Protection film (LDPE)	1,55E-03	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Processo: Assemblaggio				
Rinforzo in acciaio / Steel reinforcement (acciaio zincato)	1,32E+01	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Ferramenta / Hardware (acciaio zincato)	1,52E+00	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Maniglia / Handle (acciaio zincato)	8,82E-02	tkm	Assunzione da primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Viti / Screws (acciaio zincato) - zincatura trascurata	9,55E-02	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Guarnizioni / Gaskets (EPDM)	2,50E-01	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Blocchi di posa / Glazing Blocks (PP)	4,20E-02	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
doppio vetro	6,84E+00	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
triplo vetro	9,59E+00	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U

totale trasporti via tir	**28,293**	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
totale trasporti via nave	**14,543**	tkm	Primario	Transport, freight, sea, container ship (GLO)| transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U

Tabella 18. Dati primari traporti input. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Il trasporto del doppio vetro e del triplo vetro (indicato in tab. 18) non è considerato per la definizione del dataset relativo al telaio in PVC, ma è conteggiato per i dataset della finestra a doppio vetro e finestra a triplo vetro.

Dai dati primari è stato possibile anche definire il tipo e la quantità di imballaggio per ogni materiale e componente in input al processo di produzione di PVC-U, ovvero: PVC, additivi riempitivi, additivi stabilizzanti organici, pigmenti in biossido di titanio, modificatori. È stato quantificato, inoltre,

l'imballaggio del PVC-U compound, per il trasporto da sede di compoundazione a sede di estrusione (per considerare la situazione in cui i due processi vengono svolti in due diversi luoghi). Si considera anche una quota parte di imballaggi in legno, che risultano come rifiuti nella quantificazione degli output. Oltre a rilevare la tipologia dell'imballaggio, da dati primari è stato possibile reperire la quantità specifica di materiale da associare a ciascun materiale in input.

Imballaggio del materiale in input (tipologia e quantità)	kg imballaggio per u.f.	u.m	Tipologia dato	Dataset Ecoinvent
processo: produzione compound				
sacchi in poliestere da 1250kg per polivinyl chloride (PVC)	2,04E-02	kg/u.f.	Primario	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous (GLO) market for | Cut-off, U
sacchi di carta da 25kg per additivi riempitivi	7,57E-03	kg/u.f.	Primario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) (RER) | production | Cut-off, U
sacchi in poliestere da 1250kg per additivi stabilizzanti organici	1,06E-03	kg/u.f.	Primario	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous (GLO) market for | Cut-off, U
sacchi in poliestere da 1250kg per pigmenti (in Biossido di titanio)	1,41E-03	kg/u.f.	Primario	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous (GLO) market for | Cut-off, U
sacchi in poliestere da 1250kg per modificatori	1,30E-03	kg/u.f.	Primario	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous (GLO) market for | Cut-off, U
processo: estrusione				
sacchi in poliestere da 1250kg per PVC-U compound (PVC rigido)	3,20E-02	kg/u.f.	Primario	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous (GLO) market for | Cut-off, U

Totale imballaggio in poliestere	**5,62E-02**	kg/u.f.	Primario	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous (GLO) market for | Cut-off, U
Totale imballaggio in legno	**9,18E-06**	m^3/u.f.	Primario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) (RER) | production | Cut-off, U
Totale imballaggio in carta	**7,57E-03**	kg/u.f.	Primario	kraft paper, unbleached (RER) | production | Cut-off, U

Tabella 19. Dati primari tipologie di imballaggio materiali/componenti in input. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

7.2 Output del processo di compoundazione, estrusione ed assemblaggio

7.2.1 Prodotti e sottoprodotti

L'output principale del processo di produzione analizzato è ovviamente rappresentato dal prodotto finestra finale. Le quantità dei componenti sono medie rappresentative (cfr. par. 3.1). Si riporta di seguito la composizione del prodotto in uscita al processo produttivo descritto. L'analisi dei dati primari ha definito che non ci sono particolari sottoprodotti di processo.

Prodotto finito	Peso componenti	Quantità per 1 finestra 1,23 m x 1,48 m	u.m.
1 finestra 1,23 m x 1,48 m	PVC-profiles (PVC-U rigido)	1,66E+01	kg
	Protection film (LDPE)	3,10E-02	kg
	Rinforzo in acciaio (acciaio zincato)	1,08E+01	kg
	Ferramenta (acciaio zincato)	2,41E+00	kg
	Maniglia (acciaio zincato)	1,40E-01	kg
	Viti (acciaio zincato)	1,43E-01	kg
	Guarnizioni (EPDM)	8,34E-01	kg
	Blocchi di posa (PP)	1,40E-01	kg
caso 1	vetrocamera	3,42E+01	kg
caso 2	triplo vetro	4,80E+01	kg

Tabella 20. Dati primari prodotto in output. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Rifiuti ottenuti del processo di compoundazione, estrusione e assemblaggio

Durante il processo produttivo vengono generati rifiuti che vengono poi conferiti a terzi per operazioni di recupero o smaltimento. I dati primari considerano solamente i rifiuti generati all'interno del confine di sistema analizzato. Essi sono stati riproporzionati al prodotto rappresentativo analizzato dal presente studio. I rifiuti sono prevalentemente costituiti da rifiuti plastici e rifiuti degli imballaggi in plastica, legno e cartone per la fase di compoundazione (tutti conferiti in discarica). Si notano, invece, prevalentemente sfridi di PVC generati durante le fasi di estrusione e assemblaggio (conferiti ai centri di riciclaggio). Si sottolinea che gli sfridi in PVC e in metallo, vengono quantificati nell'inventario input-output per completezza di dati, ma non saranno imputati nel modello SimaPro, in ottemperanza alla regola cut-off assunta per lo studio LCA.

Output Materiale	Rifiuti per 1 finestra (u.f.)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent
PROCESSO: PRODUZIONE COMPOUND				
Fanghi	8,54E-03	kg/u.f.	Primario	Raw sawage sludge (CH) | treatment of, municipal incineration | Cut-off, U
Rifiuti plastici	5,55E-02	kg/u.f.	Primario	Waste plastic, mixture, (CH) | treatment of, municipal incineration | Cut-off, U
Rifiuti imballaggi in carta e cartone	3,52E-02	kg/u.f.	Primario	Waste paperboard (CH) | treatment of, municipal incineration | Cut-off, U
Rifiuti imballaggi in legno	4,90E-03	kg/u.f.	Primario	Waste wood, untreated (CH) | treatment of, municipal incineration | Cut-off, U
Rifiuti imballaggi con contenuto sost. Pericolose	1,70E-02	kg/u.f.	Primario	Waste plastic, mixture, (CH) | treatment of, sanitary landfill | Cut-off, U
PROCESSO: ESTRUSIONE				
Fanghi	8,77E-03	kg/u.f.	Primario	Raw sawage sludge (CH) | treatment of, municipal incineration | Cut-off, U
Sfridi PVC	2,98E-01	kg/u.f.	Primario	*Riciclo interno*
PROCESSO: ASSEMBLAGGIO				
Sfridi PVC	1,25E+00	kg/u.f.	Primario	*Recycling PVC/RER U (this is an empty process because of the cut-off at recycling)*
sfridi metalli	2,27E-01	kg/u.f.	Primario	*Recycling steel and iron/RER U (this is an empty process because of the cut-off at recycling)*

Tabella 21. Dati primari rifiuti in output. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Emissioni in aria del processo di compoundazione, estrusione e assemblaggio

Non essendo disponibili rilievi in stabilimento, non sono stati raccolti dati primari relativi alle emissioni in aria, per cui la maggior parte delle emissioni sono associate ai dati di background.

È stato possibile quantificare solo le emissioni di polveri durante il processo di produzione di compound e il processo di assemblaggio, partendo dai dati primari.

Partendo dai dati primari comunicati dalle aziende facenti parte il GdL i valori sono stati riproporzionati per l'unità finestra del prodotto rappresentativo.

Emissione in aria	Quantità totale per 1 finestra (u.f.)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent
PROCESSO: PRODUZIONE COMPOUND				
Polveri	3,15E-04	kg/u.f.	Primario	Particulates
PROCESSO: ASSEMBLAGGO				
Polveri	3,16E-04	kg/u.f.	Primario	Particulates

Tabella 22. Dati primari emissioni in aria. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Emissioni in acqua del processo di compoundazione, estrusione e assemblaggio

L'unico dato primario riferito alle emissioni in acqua è complessivo delle fasi di compounding, estrusione ed assemblaggio. I valori sono stati, quindi, riproporzionati per l'unità finestra del prodotto rappresentativo.

Emissione in acqua	Quantità totale per 1 finestra (u.f.)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent
PROCESSO: PRODUZIONE COMPOUND, ESTRUSIONE E ASSEMBLAGGIO				
COD	6,14E-05	kg/u.f.	Primario	COD, Chemical Oxygen Demand
Polveri	1,75E-05	kg/u.f.	Primario	Particulates < 10 um

Tabella 23. Dati primari emissioni in acqua. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Trasporti dei rifiuti in output + imballaggio del processo di compoundazione, estrusione e assemblaggio

All'interno dei confini di sistema vanno considerati anche i trasporti per il conferimento al centro di smaltimento dei rifiuti o al centro di raccolta per il riciclaggio. Siccome non è stato possibile reperire tali dati primari dalle aziende facenti parte il GdL, è stato scelto di adottare le assunzioni a letteratura di Stichnothe and Azapagic, 2014. Lo studio considera una distanza di 20 km per il trasporto dei rifiuti di processo alla discarica, e una distanza media di 160 km per il trasporto dei rifiuti all'impianto di riciclaggio. La distanza assunta è stata moltiplicata per il peso dei rifiuti in output di UF pari a 1 unità finestra (1,82 m^2) per ottenere le tkm. Le tonnellate a km sono state, poi, sommate per calcolare le tkm totali percorse dal tir.

Output Materiale	Trasporto per 1 finestra (u.f.)	u.m.	Tipologia dato	dataset Ecoinvent
processo: produzione compound				
Fanghi	1,37E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Rifiuti plastici	8,88E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Imballaggi in carta e cartone	5,63E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Imballaggi in legno	7,84E-04	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Imballaggi che hanno contenuto sost. Pericolose	3,39E-04	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
processo: estrusione				
Fanghi	1,40E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
processo: assemblaggio				
Sfridi PVC	1,99E-01	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
sfridi metalli	3,63E-02	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U
Totale trasporti	2,54E-01	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 (RER)| trnsport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U

Tabella 24. Dati secondari trasporti rifiuti. Fonte: Elaborazione: Politecnico di Milano

7.3 Sviluppo dei dataset

A seguito del presente studio, sono stati sviluppati sette dataset:

- Dataset “Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m”: un telaio per serramenti in PVC (vetro escluso) con sviluppo lineare perimetrale di 5,42 m (ovvero di lunghezza totale per comporre una finestra di dimensione 1,23 m x 1,48 m) e con profondità 76 mm, comprensivo di telaio fisso, anta mobile, fermavetro, rinforzo telaio, guarnizioni, ferramenta, maniglia, viti.
- Dataset “Polyvinylchloride frame for windows, 1 m”: un metro lineare di telaio; i dati relativi al telaio totale in PVC (vetro escluso) sono stati ricondotti a 1 metro lineare di telaio attraverso un fattore di conversione: considerando il perimetro esterno della finestra di dimensioni 1,28 m x 1,48 m, pari a 5,42 m, il fattore di conversione per ottenere 1 m di telaio risulta pari a 0,185. L’assunzione del perimetro esterno è data dal fatto che è un parametro facilmente utilizzabile dall’operatore che utilizza il dataset Arcadia; ciò permette all’utente della banca dati Arcadia di rimoltiplicare 1 metro lineare di telaio per altre dimensioni di finestre, non trascurando il contributo delle parti accessorie.
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a doppio vetro (F-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a doppio vetro (C-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a doppio vetro (L-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;
- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a triplo vetro (F-F-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;

- Dataset “Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated”: un’unità finestra completa di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), con telaio in PVC con profondità 76 mm, comprensivo di tutti gli elementi (rinforzo, ferramenta, guarnizioni ecc.) e di vetrocamera a triplo vetro (L-F-L) (distanziatore incluso) di dimensione 1,30 m^2;

Si tratta di dataset aggregati (unit process) e non suddivisi per *life cycle stages*, adottando un’impostazione simile a quella dei dataset contenuti nella banca dati Ecoinvent.

I dataset relativi alle principali soluzioni di finestra completa prodotte in Italia sono stati definiti utilizzando e unendo i dataset del prodotto rappresentativo “telaio PVC” ai prodotti rappresentativi “vetrocamera”, individuati nel report Arcadia “Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti” sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam.

Il dataset “Polyvinylchloride frame for windows, 1 m”, espresso al metro lineare di telaio, permette agli utilizzatori della banca dati di modellare dimensioni di infisso che possono essere diverse da quelle considerate in ottemperanza alla EN 17213:2020 (pari a 1,23 m x 1,48 m). Avvalendosi, inoltre, dei dataset relativi alla sola vetrocamera (studio sopra menzionato) espressi al metro quadro, un utente della banca dati Arcadia può modellare finestre complete di varia dimensione.

I dataset sviluppati sono di interesse generale per la filiera del PVC e per gli utenti della banca dati ARCADIA. Il dataset è basato su dati primari e secondari solidi caratterizzati da una buona rappresentatività.

Di seguito vengono mostrate le tabelle riassuntive contenenti i dati input e output relativi a ciascun dataset Arcadia, utilizzato per la valutazione LCA nel modello SimaPro. Le tabelle riportano, inoltre, l'indicazione dei dataset Ecoinvent utilizzati (tab. 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31). All’interno delle tabelle 25 e 26 viene riportata anche la massa in input del PVC riciclato: si sottolinea che ad essa è stata associata un dataset della banca dati Ecoinvent che risulta vuoto, in linea con le assunzioni *cut-off*. Si ricorda che nel totale dell’energia in input è inclusa la quota parte utilizzata per la triturazione della massa di PVC riciclato in input.

Flussi/processi in input	Valore	u.m.	Dataset di riferimento	Banca dati
Materials/fuels				
PVC-U emulsion (EU)	9,10E-01	kg	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RER}| polyvinylchloride production, emulsion polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC-U emulsion (GLO)	2,28E-01	kg	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RoW}| polyvinylchloride production, emulsion polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC-U suspension (EU)	8,19E+00	kg	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RER}| polyvinylchloride production, suspension polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC-U suspension (GLO)	2,05E+00	kg	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}| polyvinylchloride production, suspension polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC riciclato	3,66E+00	kg	Recycling PVC/RER U (this is an empty process because of the cut-off at recycling)	Ecoinvent 3.6
Additivi riempitivi	1,26E+00	kg	Calcium carbonate, precipitated {RER}| calcium carbonate production, precipitated | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Additivi stabilizzanti organici	5,93E-01	kg	Chemical, inorganic {GLO}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Pigmenti (in Biossido di titanio)	7,88E-01	kg	Titanium dioxide {RER}| production, chloride process | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Modificatori	7,27E-01	kg	Acrylic binder, without water, in 34% solution state {RER}| acrylic binder production, product in 34% solution state | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Protection film (LDPE)	3,10E-02	kg	Polyethylene, low density, granulate {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rinforzo in acciaio (BOF)	6,62E+00	kg	Steel, unalloyed {RER}| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rinforzo in acciaio (EAF)	4,41E+00	kg	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Laminazione a caldo coil (rinforzo)	1,10E+01	kg	Hot rolling, steel {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Proflatura a freddo (rinforzo)	1,10E+01	kg	Sheet rolling, steel {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Zincatura (rinforzo in acciaio)	1,84E+00	m^2	Zinc coat, coils {RER}| zinc coating, coils | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Ferramenta in acciaio (BOF)	1,45E+00	kg	Steel, unalloyed {RER}| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Ferramenta in acciaio (EAF)	9,65E-01	kg	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Lavorazione acciaio (ferramenta)	2,41E+00	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Zincatura (ferramenta)	5,00E-02	m^2	Zinc coat, pieces {RER}| zinc coating, pieces | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Maniglia in alluminio	1,40E-01	kg	Aluminium, wrought alloy {GLO}| aluminium ingot, primary, to market | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Lavorazione alluminio (maniglia)	1,40E-01	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Viti in acciaio (BOF)	8,60E-02	kg	Steel, unalloyed {RER}| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Viti in acciaio (EAF)	5,70E-02	kg	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Lavorazione acciaio (viti)	1,43E-01	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Guarnizioni in EPDM	8,34E-01	kg	Synthetic rubber {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Blocchi di posa in PP	1,40E-01	kg	Polypropylene, granulate {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Consumo di acqua	5,15E+00	kg	Tap water {Europe without Switzerland}| market for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Imballaggi in carta	8,00E-03	kg	Kraft paper, unbleached {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Imballaggi in poliestere	5,60E-02	kg	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO}| market for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Imballaggi in legno	1,00E-05	m^3	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Trasporti in input via tir	2,83E+01	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Trasporti in input via nave	1,45E+01	tkm	Transport, freight, sea, container ship {GLO}| transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Trasporti in output	2,54E-01	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Electricity/heat				
Consumo di energia (elettricità)	4,45E+01	kWh	Electricity, medium voltage {IT}| market for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Consumo di energia (gas naturale)	6,87E-01	MJ	Heat, district or industrial, natural gas {RER}| market group for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Emissions to air				
Polveri (compounding)	3,15E-04	kg	Particulates	Ecoinvent 3.6
Polveri (assemblaggio)	3,16E-04	kg	Particulates	Ecoinvent 3.6
Emissions to water				
COD (compound., estrus., assemblag.)	6,14E-05	kg	COD, Chemical Oxygen Demand	Ecoinvent 3.6
Polveri ((compound., estrus., assemblag.)	1,75E-05	kg	Particulates, < 10 um	Ecoinvent 3.6
Waste to treatment				
Fanghi (compounding)	8,50E-03	kg	Raw sewage sludge {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti plastici (compounding)	5,55E-02	kg	Waste plastic, mixture {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti imballaggi carta (compounding)	3,52E-02	kg	Waste paperboard {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti imballaggi legno (compounding)	4,90E-03	kg	Waste wood, untreated {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti imballaggi con contenuto sost. pericolose (compounding)	1,70E-02	kg	Waste plastic, mixture {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Fanghi (estrusione)	8,80E-03	kg	Raw sewage sludge {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6

Tabella 25: Inventario “Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m”. Fonte: Elaborazione PoliMi

Flussi/processi in input	Valore	u.m.	Dataset di riferimento	Banca dati
Materials/fuels				
PVC-U emulsion (EU)	1,68E-01	kg	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RER}| polyvinylchloride production, emulsion polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC-U emulsion (GLO)	4,20E-02	kg	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {RoW}| polyvinylchloride production, emulsion polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC-U suspension (EU)	1,51E+00	kg	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RER}| polyvinylchloride production, suspension polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC-U suspension (GLO)	3,78E-01	kg	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW}| polyvinylchloride production, suspension polymerisation | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
PVC riciclato	6,76E-01	kg	Recycling PVC/RER U (this is an empty process because of the cut-off at recycling)	Ecoinvent 3.6
Additivi riempitivi	2,33E-01	kg	Calcium carbonate, precipitated {RER}| calcium carbonate production, precipitated | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Additivi stabilizzanti organici	1,09E-01	kg	Chemical, inorganic {GLO}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Pigmenti (in Biossido di titanio)	1,45E-01	kg	Titanium dioxide {RER}| production, chloride process | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Modificatori	1,34E-01	kg	Acrylic binder, without water, in 34% solution state {RER}| acrylic binder production, product in 34% solution state | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Protection film (LDPE)	6,00E-03	kg	Polyethylene, low density, granulate {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rinforzo in acciaio (BOF)	1,22E+00	kg	Steel, unalloyed {RER}| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rinforzo in acciaio (EAF)	8,14E-01	kg	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Laminazione a caldo coil (rinforzo)	2,04E+00	kg	Hot rolling, steel {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Proflatura a freddo (rinforzo)	2,04E+00	kg	Sheet rolling, steel {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Zincatura (rinforzo in acciaio)	3,39E-01	m^2	Zinc coat, coils {RER}| zinc coating, coils | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Ferramenta in acciaio (BOF)	2,67E-01	kg	Steel, unalloyed {RER}| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Ferramenta in acciaio (EAF)	1,78E-01	kg	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Lavorazione acciaio (ferramenta)	4,45E-01	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Zincatura (ferramenta)	1,00E-02	m^2	Zinc coat, pieces {RER}| zinc coating, pieces | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Maniglia in alluminio	2,60E-02	kg	Aluminium, wrought alloy {GLO}| aluminium ingot, primary, to market | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Lavorazione alluminio (maniglia)	2,60E-02	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Viti in acciaio (BOF)	1,60E-02	kg	Steel, unalloyed {RER}| steel production, converter, unalloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Viti in acciaio (EAF)	1,10E-02	kg	Steel, low-alloyed {RER}| steel production, electric, low-alloyed | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Lavorazione acciaio (viti)	2,60E-02	kg	Metal working, average for steel product manufacturing {RER}| processing | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Guarnizioni in EPDM	1,54E-01	kg	Synthetic rubber {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Blocchi di posa in PP	2,60E-02	kg	Polypropylene, granulate {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Consumo di acqua	9,50E-01	kg	Tap water {Europe without Switzerland}| market for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Imballaggi in carta	1,00E-03	kg	Kraft paper, unbleached {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Imballaggi in poliestere	1,00E-02	kg	Polyethylene terephthalate, granulate, amorphous {GLO}| market for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Imballaggi in legno	2,00E-06	m^3	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}| production | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Trasporti in input via tir	5,22E+00	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Trasporti in input via nave	2,68E+00	tkm	Transport, freight, sea, container ship {GLO}| transport, freight, sea, container ship | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Trasporti in output	4,70E-02	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Electricity/heat				
Consumo di energia (elettricità)	8,21E+00	kWh	Electricity, medium voltage {IT}| market for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Consumo di energia (gas naturale)	1,27E-01	MJ	Heat, district or industrial, natural gas {RER}| market group for | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Emissions to air				
Polveri (compounding)	5,81E-05	kg	Particulates	Ecoinvent 3.6
Polveri (assemblaggio)	5,82E-05	kg	Particulates	Ecoinvent 3.6
Emissions to water				
COD (compound., estrus., assemblag.)	1,00E-05	kg	COD, Chemical Oxygen Demand	Ecoinvent 3.6
Polveri ((compound., estrus., assemblag.)	3,00E-06	kg	Particulates, < 10 um	Ecoinvent 3.6
Waste to treatment				
Fanghi (compounding)	1,60E-03	kg	Raw sewage sludge {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti plastici (compounding)	1,02E-02	kg	Waste plastic, mixture {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti imballaggi carta (compounding)	6,50E-03	kg	Waste paperboard {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti imballaggi legno (compounding)	9,00E-04	kg	Waste wood, untreated {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Rifiuti imballaggi con contenuto sost. pericolose (compounding)	3,10E-03	kg	Waste plastic, mixture {CH}| treatment of, sanitary landfill | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6
Fanghi (estrusione)	1,60E-03	kg	Raw sewage sludge {CH}| treatment of, municipal incineration | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6

Tabella 26: Inventario “Polyvinylchloride frame for windows, 1 m”. Fonte: Elabor. PoliMi

Flussi/processi in input	Valore	u.m.	Dataset di riferimento	Banca dati
Materials/fuels				
Telaio in PVC (incluso accessori)	1,00E+00	p	Polyvinylchloride frame for windows, at production	Arcadia
Vetrocamera Float-laminated	1,30E+00	m^2	Insulated Glass Unit, double glazing, float-laminated	Arcadia
Trasporto	6,84E+00	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6

Tabella 27: Inventario "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated". Fonte: Elaborazione PoliMi

Flussi/processi in input	Valore	u.m.	Dataset di riferimento	Banca dati
Materials/fuels				
Telaio in PVC (incluso accessori)	1,00E+00	p	Polyvinylchloride frame for windows, at production	Arcadia
Vetrocamera coated-laminated	1,30E+00	m^2	Insulated Glass Unit, double glazing, coated-laminated	Arcadia
Trasporto	6,84E+00	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6

Tabella 28: Inventario "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated". Fonte: Elaborazione PoliMi

Flussi/processi in input	Valore	u.m.	Dataset di riferimento	Banca dati
Materials/fuels				
Telaio in PVC (incluso accessori)	1,00E+00	p	Polyvinylchloride frame for windows, at production	Arcadia
Vetrocamera laminated-laminated	1,30E+00	m^2	Insulated Glass Unit, double glazing,laminated-laminated	Arcadia
Trasporto	8,24E+00	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6

Tabella 29: Inventario "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated". Fonte: Elaborazione PoliMi

Flussi/processi in input	Valore	u.m.	Dataset di riferimento	Banca dati
Materials/fuels				
Telaio in PVC (incluso accessori)	1,00E+00	p	Polyvinylchloride frame for windows, at production	Arcadia
Vetrocamera float-float-laminated	1,30E+00	m^2	Insulated Glass Unit, triple glazing, float-float-laminated	Arcadia
Trasporto	9,59E+00	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6

Tabella 30: Inventario "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated". Fonte: Elaborazione PoliMi

Flussi/processi in input	Valore	u.m.	Dataset di riferimento	Banca dati
Materials/fuels				
Telaio in PVC (incluso accessori)	1,00E+00	p	Polyvinylchloride frame for windows, at production	Arcadia
Vetrocamera laminated-float-laminated	1,30E+00	m^2	Insulated Glass Unit, triple glazing, laminated-float-laminated	Arcadia
Trasporto	1,10E+01	tkm	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}| transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 | Cut-off, U	Ecoinvent 3.6

Tabella 31: Inventario "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated". Fonte: Elaborazione PoliMi

8 Valutazione degli impatti ambientali

Secondo le indicazioni della Norma ISO 14040, la fase di valutazione degli impatti ha lo scopo di evidenziare l'entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell'ambiente e del consumo di risorse provocati dal prodotto preso in esame. Tale fase, consiste quindi nell'imputare i consumi e le emissioni a specifiche categorie di impatto, riferibili ad effetti ambientali conosciuti, e nel quantificare l'entità del contributo che il processo arreca agli effetti considerati. La valutazione degli impatti in accordo alla ISO 14040 si articola nelle seguenti fasi obbligatorie:

- classificazione: assegnazione dei dati raccolti nell'inventario ad una o più categorie d'impatto ambientale selezionate;
- caratterizzazione: calcolo dei risultati di ogni indicatore di categoria, è determinato il contributo relativo di ogni sostanza emessa o risorsa usata;
- valutazione vera e propria dell'impatto.

Come fasi opzionali della valutazione degli impatti di ciclo di vita, sono invece indicate dalla ISO 14040 le operazioni di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione (pesatura).
Ai fini del presente studio LCA di filiera è stato utilizzato, come metodo di valutazione degli impatti, il metodo EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019) e i risultati delle fasi appena descritte sono riportate nei paragrafi successi per i prodotti oggetto di studio.
Si evidenzia che i risultati ottenuti dalla fase di normalizzazione, che riflettono gli oneri imputabili al prodotto oggetto di studio rispetto all'unità di riferimento, sono adimensionali e, nell'ambito dello specifico metodo di calcolo degli impatti, i fattori di normalizzazione sono espressi pro capite sulla base di un valore globale.
Tutti i risultati di seguito presentati sono stati calcolati escludendo dai confini di sistema la produzione di macchinari ed infrastrutture (e relativi rifiuti di manutenzione) con l'eccezione di quelli già contenuti nei dataset di Ecoinvent utilizzati per modellare i dati di background.

8.1 Caratterizzazione

Nella tabella 32 (a-b) sono indicati i risultati di caratterizzazione relativi ai sette dataset analizzati:

- Polyvinylchloride frame for windows, 1 m;
- Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m;
- Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated (F-L);
- Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated (C-L);
- Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated (L-L);

- Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated (F-F-L);
- Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated (L-F-L).

La percentuale indica l'aumento degli impatti causato dalla componente vetrocamera rispetto al telaio (accessori compresi), riferita all'intera finestra di 1,23 m x 1,48 m.

Categoria d'impatto	Unità	PVC frame for windows, 1 m	PVC frame for a window of 1,23 m x 1,48 m	Window, PVC frame, double glazing, F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, double glazing, C-L	% di aumento impatto
Climate change	kg CO2 eq	1,83E+01	9,89E+01	1,52E+02	35%	1,53E+02	35%
Ozone depletion	kg CFC11 eq	4,01E-06	2,17E-05	2,99E-05	27%	2,99E-05	27%
Ionising radiation	kBq U-235 eq	2,27E+00	1,23E+01	1,50E+01	18%	1,51E+01	19%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	6,25E-02	3,38E-01	5,80E-01	42%	5,82E-01	42%
Particulate matter	disease inc.	1,61E-06	8,75E-06	1,06E-05	18%	1,07E-05	18%
Human toxicity, non-cancer	CTUh	8,23E-07	4,46E-06	5,08E-06	12%	5,09E-06	12%
Human toxicity, cancer	CTUh	4,11E-08	2,23E-07	2,50E-07	11%	2,51E-07	11%
Acidification	mol H+ eq	2,02E-01	1,10E+00	1,31E+00	16%	1,31E+00	16%
Eutrophication, freshwater	kg P eq	7,53E-03	4,08E-02	4,96E-02	18%	4,98E-02	18%
Eutrophication, marine	kg N eq	2,05E-02	1,11E-01	1,96E-01	43%	1,97E-01	44%
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	6,81E-01	3,69E+00	4,32E+00	15%	4,33E+00	15%
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	5,03E+02	2,72E+03	3,80E+03	28%	3,81E+03	29%
Land use	Pt	7,46E+01	4,05E+02	7,21E+02	44%	7,40E+02	45%
Water use	m3 depriv.	1,30E+01	7,04E+01	8,50E+01	17%	8,53E+01	18%
Resource use, fossils	MJ	3,03E+02	1,64E+03	2,33E+03	29%	2,34E+03	30%
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,91E-02	1,03E-01	1,04E-01	1%	1,04E-01	1%
Climate change – Fossil	kg CO2 eq	1,81E+01	9,82E+01	1,51E+02	35%	1,52E+02	35%
Climate change – Biogenic	kg CO2 eq	1,26E-01	6,85E-01	8,69E-01	21%	8,76E-01	22%
Climate change – Land use and LU change	kg CO2 eq	1,39E-02	7,53E-02	1,08E-01	30%	1,08E-01	31%
Human toxicity, non-cancer – organics	CTUh	1,10E-08	5,95E-08	9,73E-08	39%	9,76E-08	39%
Human toxicity, non-cancer – inorganics	CTUh	1,89E-07	1,03E-06	1,19E-06	14%	1,19E-06	14%
Human toxicity, non-cancer – metals	CTUh	6,25E-07	3,39E-06	3,82E-06	11%	3,82E-06	11%
Human toxicity, cancer – organics	CTUh	1,82E-08	9,87E-08	1,11E-07	11%	1,11E-07	11%
Human toxicity, cancer – inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	--	0,00E+00	--
Human toxicity, cancer – metals	CTUh	2,29E-08	1,24E-07	1,39E-07	11%	1,40E-07	11%
Ecotoxicity, freshwater – organics	CTUe	3,52E+00	1,91E+01	3,80E+01	50%	3,81E+01	50%
Ecotoxicity, freshwater – inorganics	CTUe	1,03E+02	5,59E+02	8,12E+02	31%	8,13E+02	31%
Ecotoxicity, freshwater – metals	CTUe	3,96E+02	2,15E+03	2,95E+03	27%	2,96E+03	28%

Tabella 32a. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Categoria d'impatto	Unità	Window, PVC frame, double glazing, L-L,	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, F-F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, L-F-L	% di aumento impatto
Climate change	kg CO2 eq	1,64E+02	40%	1,75E+02	43%	1,86E+02	47%
Ozone depletion	kg CFC11 eq	3,21E-05	32%	3,29E-05	34%	3,51E-05	38%
Ionising radiation	kBq U-235 eq	1,58E+01	22%	1,61E+01	24%	1,69E+01	27%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	6,30E-01	46%	6,80E-01	50%	7,30E-01	54%
Particulate matter	disease inc.	1,10E-05	20%	1,15E-05	24%	1,19E-05	26%
Human toxicity, non-cancer	CTUh	5,21E-06	14%	5,37E-06	17%	5,49E-06	19%
Human toxicity, cancer	CTUh	2,54E-07	12%	2,64E-07	16%	2,68E-07	17%
Acidification	mol H+ eq	1,35E+00	19%	1,40E+00	22%	1,44E+00	24%
Eutrophication, freshwater	kg P eq	5,16E-02	21%	5,36E-02	24%	5,56E-02	27%
Eutrophication, marine	kg N eq	2,14E-01	48%	2,32E-01	52%	2,49E-01	55%
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,45E+00	17%	4,59E+00	19%	4,72E+00	22%
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	3,96E+03	31%	4,29E+03	36%	4,45E+03	39%
Land use	Pt	8,26E+02	51%	8,31E+02	51%	9,36E+02	57%
Water use	m3 depriv.	8,92E+01	21%	9,07E+01	22%	9,49E+01	26%
Resource use, fossils	MJ	2,49E+03	34%	2,61E+03	37%	2,77E+03	41%
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	1,04E-01	1%	1,04E-01	1%	1,04E-01	1%
Climate change – Fossil	kg CO2 eq	1,63E+02	40%	1,74E+02	43%	1,85E+02	47%
Climate change – Biogenic	kg CO2 eq	9,19E-01	25%	9,43E-01	27%	9,92E-01	31%
Climate change – Land use and LU change	kg CO2 eq	1,12E-01	33%	1,27E-01	41%	1,31E-01	43%
Human toxicity, non-cancer – organics	CTUh	1,05E-07	43%	1,13E-07	47%	1,20E-07	51%
Human toxicity, non-cancer – inorganics	CTUh	1,21E-06	15%	1,26E-06	19%	1,29E-06	20%
Human toxicity, non-cancer – metals	CTUh	3,91E-06	13%	4,01E-06	16%	4,10E-06	18%
Human toxicity, cancer – organics	CTUh	1,12E-07	12%	1,17E-07	16%	1,19E-07	17%
Human toxicity, cancer – inorganics	CTUh	0,00E+00	--	0,00E+00	--	0,00E+00	--
Human toxicity, cancer – metals	CTUh	1,42E-07	13%	1,47E-07	16%	1,49E-07	17%
Ecotoxicity, freshwater – organics	CTUe	3,96E+01	52%	4,69E+01	59%	4,85E+01	61%
Ecotoxicity, freshwater – inorganics	CTUe	8,64E+02	35%	9,13E+02	39%	9,66E+02	42%
Ecotoxicity, freshwater – metals	CTUe	3,06E+03	30%	3,33E+03	35%	3,43E+03	38%

Tabella 32b. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

8.2 Normalizzazione

Nella tabella 33 (a,b) sono indicati i risultati di normalizzazione relativi alla produzione del telaio PVC (incluso di tutte le sue componenti) espresso per 1 metro lineare e per l'intero perimento di finestra, dell'intera finestra con le diverse tipologie di doppio vetro e con triplo vetro analizzate (come indicato nel paragrafo 8.1).

Categoria d'impatto	Unità	PVC frame for windows, 1 m	PVC frame for a window of 1,23 m x 1,48 m	Window, PVC frame, double glazing, F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, double glazing, C-L	% di aumento impatto
Climate change	--	2,25E-03	1,22E-02	1,88E-02	35%	1,89E-02	35%
Ozone depletion	--	7,47E-05	4,05E-04	5,57E-04	27%	5,58E-04	27%
Ionising radiation	--	5,39E-04	2,92E-03	3,57E-03	18%	3,58E-03	19%
Photochemical ozone formation	--	1,54E-03	8,34E-03	1,43E-02	42%	1,43E-02	42%
Particulate matter	--	2,71E-03	1,47E-02	1,79E-02	18%	1,79E-02	18%
Human toxicity, non-cancer	--	3,58E-03	1,94E-02	2,21E-02	12%	2,22E-02	12%
Human toxicity, cancer	--	2,43E-03	1,32E-02	1,48E-02	11%	1,48E-02	11%
Acidification	--	3,64E-03	1,97E-02	2,35E-02	16%	2,36E-02	16%
Eutrophication, freshwater	--	4,68E-03	2,54E-02	3,09E-02	18%	3,10E-02	18%
Eutrophication, marine	--	1,05E-03	5,69E-03	1,00E-02	43%	1,01E-02	44%
Eutrophication, terrestrial	--	3,85E-03	2,09E-02	2,45E-02	15%	2,45E-02	15%
Ecotoxicity, freshwater	--	1,18E-02	6,38E-02	8,91E-02	28%	8,93E-02	29%
Land use	--	9,10E-05	4,94E-04	8,80E-04	44%	9,03E-04	45%
Water use	--	1,13E-03	6,14E-03	7,41E-03	17%	7,44E-03	18%
Resource use, fossils	--	4,66E-03	2,53E-02	3,58E-02	29%	3,59E-02	30%
Resource use, minerals and metals	--	2,99E-01	1,62E+00	1,63E+00	1%	1,63E+00	1%

Tabella 33a. Risultati di normalizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Categoria d'impatto	Unità	Window, PVC frame, double glazing, L-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, F-F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, L-F-L	% di aumento impatto
Climate change	--	2,02E-02	40%	2,16E-02	43%	2,30E-02	47%
Ozone depletion	--	5,98E-04	32%	6,13E-04	34%	6,55E-04	38%
Ionising radiation	--	3,74E-03	22%	3,83E-03	24%	4,00E-03	27%
Photochemical ozone formation	--	1,55E-02	46%	1,68E-02	50%	1,80E-02	54%
Particulate matter	--	1,85E-02	20%	1,93E-02	24%	1,99E-02	26%
Human toxicity, non-cancer	--	2,27E-02	14%	2,34E-02	17%	2,39E-02	19%
Human toxicity, cancer	--	1,50E-02	12%	1,56E-02	16%	1,58E-02	17%
Acidification	--	2,43E-02	19%	2,52E-02	22%	2,59E-02	24%
Eutrophication, freshwater	--	3,21E-02	21%	3,34E-02	24%	3,46E-02	27%
Eutrophication, marine	--	1,09E-02	48%	1,18E-02	52%	1,27E-02	55%
Eutrophication, terrestrial	--	2,52E-02	17%	2,59E-02	19%	2,67E-02	22%
Ecotoxicity, freshwater	--	9,29E-02	31%	1,00E-01	36%	1,04E-01	39%
Land use	--	1,01E-03	51%	1,01E-03	51%	1,14E-03	57%
Water use	--	7,78E-03	21%	7,90E-03	22%	8,27E-03	26%
Resource use, fossils	--	3,83E-02	34%	4,01E-02	37%	4,26E-02	41%
Resource use, minerals and metals	--	1,63E+00	1%	1,63E+00	1%	1,63E+00	1%

Tabella 33b. Risultati di normalizzazione relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

8.3 Pesatura

Nella tabella 34 (a,b) sono indicati i risultati di pesatura relativi alla produzione del telaio PVC (incluso di tutte le sue componenti) espresso per 1 metro lineare e per l'intero perimento di finestra, dell'intera finestra con le diverse tipologie di doppio vetro e con triplo vetro analizzate (come indicato nel paragrafo 8.1).

Categoria d'impatto	Unità	PVC frame for windows, 1 m	PVC frame for a window of 1,23 m x 1,48 m	Window, PVC frame, double glazing, F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, double glazing, C-L	% di aumento impatto
Totale	mPt	2,48E+01	1,34E+02	1,39E+02	4%	1,39E+02	4%
Climate change	mPt	4,75E-01	2,57E+00	3,96E+00	35%	3,98E+00	35%
Ozone depletion	mPt	4,71E-03	2,56E-02	3,51E-02	27%	3,52E-02	27%
Ionising radiation	mPt	2,70E-02	1,46E-01	1,79E-01	18%	1,80E-01	19%
Photochemical ozone formation	mPt	7,35E-02	3,98E-01	6,83E-01	42%	6,85E-01	42%
Particulate matter	mPt	2,43E-01	1,32E+00	1,60E+00	18%	1,61E+00	18%
Human toxicity, non-cancer	mPt	6,59E-02	3,57E-01	4,07E-01	12%	4,08E-01	12%
Human toxicity, cancer	mPt	5,18E-02	2,81E-01	3,16E-01	11%	3,16E-01	11%
Acidification	mPt	2,26E-01	1,22E+00	1,46E+00	16%	1,46E+00	16%
Eutrophication, freshwater	mPt	1,31E-01	7,11E-01	8,65E-01	18%	8,68E-01	18%
Eutrophication, marine	mPt	3,11E-02	1,68E-01	2,97E-01	43%	2,98E-01	44%
Eutrophication, terrestrial	mPt	1,43E-01	7,75E-01	9,07E-01	15%	9,09E-01	15%
Ecotoxicity, freshwater	mPt	2,26E-01	1,23E+00	1,71E+00	28%	1,72E+00	29%
Land use	mPt	7,23E-03	3,92E-02	6,99E-02	44%	7,17E-02	45%
Water use	mPt	9,64E-02	5,22E-01	6,31E-01	17%	6,33E-01	18%
Resource use, fossils	mPt	3,88E-01	2,10E+00	2,98E+00	29%	2,99E+00	30%
Resource use, minerals and metals	mPt	2,26E+01	1,22E+02	1,23E+02	1%	1,23E+02	1%

Tabella 34a. Risultati di pesatura relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Categoria d'impatto	Unità	Window, PVC frame, double glazing, L-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, F-F-L	% di aumento impatto	Window, PVC frame, triple glazing, L-F-L	% di aumento impatto
Totale	mPt	1,40E+02	4%	1,41E+02	5%	1,42E+02	6%
Climate change	mPt	4,26E+00	40%	4,54E+00	43%	4,84E+00	47%
Ozone depletion	mPt	3,77E-02	32%	3,87E-02	34%	4,13E-02	38%
Ionising radiation	mPt	1,87E-01	22%	1,92E-01	24%	2,01E-01	27%
Photochemical ozone formation	mPt	7,42E-01	46%	8,01E-01	50%	8,60E-01	54%
Particulate matter	mPt	1,66E+00	20%	1,73E+00	24%	1,79E+00	26%
Human toxicity, non-cancer	mPt	4,17E-01	14%	4,30E-01	17%	4,40E-01	19%
Human toxicity, cancer	mPt	3,20E-01	12%	3,33E-01	16%	3,38E-01	17%
Acidification	mPt	1,51E+00	19%	1,56E+00	22%	1,61E+00	24%
Eutrophication, freshwater	mPt	8,99E-01	21%	9,34E-01	24%	9,68E-01	27%
Eutrophication, marine	mPt	3,24E-01	48%	3,51E-01	52%	3,77E-01	55%
Eutrophication, terrestrial	mPt	9,35E-01	17%	9,63E-01	19%	9,90E-01	22%
Ecotoxicity, freshwater	mPt	1,78E+00	31%	1,93E+00	36%	2,00E+00	39%
Land use	mPt	8,00E-02	51%	8,05E-02	51%	9,06E-02	57%
Water use	mPt	6,62E-01	21%	6,73E-01	22%	7,04E-01	26%
Resource use, fossils	mPt	3,19E+00	34%	3,33E+00	37%	3,54E+00	41%
Resource use, minerals and metals	mPt	1,23E+02	1%	1,23E+02	1%	1,23E+02	1%

Tabella 34b. Risultati di pesatura relativi alla produzione del telaio in PVC e della finestra completa con diverse tipologie di doppio vetro e triplo vetro. Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

9 Interpretazione dei risultati

L'interpretazione di uno studio di ciclo di vita, svolta sulla base dell'analisi critica dei risultati ottenuti, è finalizzata a comprendere la ragionevolezza del risultato finale di tutto l'impatto ambientale, trarre le conclusioni, spiegare le limitazioni dei risultati ottenuti, nonché fornire delle raccomandazioni sulla base degli stessi risultati.

Le evidenze dell'interpretazione dei risultati del presente studio LCA di filiera, svolta in accordo alle indicazioni della ISO 14040, sono riportate nei paragrafi successivi. L'interpretazione è svolta sulla base dei risultati normalizzati, in accordo con le assunzioni dello studio ARCADIA.

9.1 Categorie di impatto rilevanti

L'analisi dei risultati derivanti dalla normalizzazione (tab. 33 a-b) mette in luce quali sono le categorie di impatto più rilevanti per ciascun prodotto analizzato (telaio PVC, finestra con doppio vetro e finestra con triplo vetro).

Relativamente ai dataset riferiti al telaio PVC, incluso di tutte le sue componenti, "Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m" e "Polyvinylchloride frame for windows, 1 m", l'analisi LCA mostra che le categorie di impatto più rilevanti sono: *Resource use minerals and metals* 87,16 % sul totale dei risultati di normalizzazione; *Ecotoxicity freshwater* 3,43% sul totale dei risultati di normalizzazione; *Eutrophication freshwater* 1,37% sul totale dei risultati di normalizzazione; *Resource use fossils* 1,36% sul totale dei risultati di normalizzazione; *Eutrophication terrestrial* 1,12% sul totale dei risultati di normalizzazione.

Per i dataset relativi alle tipologie di finestra a doppio vetro con composizione (F-L), (C-L) e (L-L) le categorie di impatto più rilevanti restano le stesse emerse nella valutazione del solo telaio, mostrando le seguenti incidenze percentuali sul totale dei risultati di normalizzazione:

- Dataset "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated (F-L)": *Resource use minerals and metals* 83,83%; *Ecotoxicity freshwater* 4,59%; *Eutrophication freshwater* 1,59%; *Resource use fossils* 1,84%; *Eutrophication terrestrial* 1,26%.
- Dataset "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated (C-L)": *Resource use minerals and metals*: 83,79%; *Ecotoxicity freshwater* 4,60%; *Eutrophication freshwater* 1,59%; *Resource use fossils* 1,85%; *Eutrophication terrestrial* 1,26%.
- Dataset "Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated (L-L)": *Resource use minerals and metals* 83,22%; *Ecotoxicity freshwater* 4,74%; *Eutrophication freshwater* 1,64%; *Resource use fossils* 1,96%; *Eutrophication terrestrial* 1,29%.

Anche nel caso dei dataset relativi alla finestra a triplo vetro con composizione (F-F-L), (L-F-L) emergono le medesime categorie di impatto, con le seguenti incidenze percentuali rispetto al totale dei risultati di normalizzazione:

- Dataset "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated (F-F-L)": *Resource use minerals and metals* 82,48%; *Ecotoxicity freshwater* 5,07%; *Eutrophication freshwater* 1,69%; *Resource use fossils* 2,02%; *Eutrophication terrestrial* 1,31%.
- Dataset "Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated (L-F-L),": *Resource use minerals and metals* 81,89%; *Ecotoxicity freshwater* 5,22%; *Eutrophication freshwater* 1,73%; *Resource use fossils* 2,13%; *Eutrophication terrestrial* 1,34%.

A seguito delle principali categorie di impatto sopra indicate, emerge anche la categoria *Human toxicity, non-cancer.* Analizzando i dati di caratterizzazione dei dataset relativi al telaio PVC, si evince che l'*Human toxicity, non-cancer - metals* incide in modo predominante sulla categoria, ovvero per

il 76% del totale. La categoria *Human toxicity, non-cancer – inorganics* contribuisce per il 23% e l'*Human toxicity, non-cancer - organics* solo per l'1% sul totale impatto.

9.2 Fasi e processi più rilevanti

Analizzati i risultati della valutazione LCA è possibile identificare quali sono le fasi e i processi più rilevanti per le categorie di impatto sopra indicate.

Innanzitutto, è necessario considerare che il telaio in PVC viene prodotto attraverso tre processi principali: compoundazione che consiste nella mescola di diversi prodotti (additivi, miscele di sostanze, ecc.) reperibili sul mercato, per ottenere il PVC-U; l'estrusione che consiste nella sagomatura del compound PVC-U, per ottenere il telaio; l'assemblaggio che consiste nell'unire il telaio con altri prodotti finiti (es. guarnizioni, ferramenta ecc.) reperibili sul mercato. Non è possibile quindi analizzare la fase del reperimento delle materie prime dalla natura, ma è possibile valutare la fase di reperimento dei singoli componenti dalla tecnosfera.

Considerando la filiera di produzione del telaio in PVC per serramenti (dataset "*Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m" e "Polyvinylchloride frame for windows, 1 m"*) all'interno dei confini di sistema del ciclo di vita considerato, è possibile identificare le seguenti fasi (figura 7): 1) fase di reperimento materiali e componenti (considerando tutti i prodotti utili alla produzione del telaio in PVC per finestre); 2) fase di trasporto dei materiali al luogo di produzione; 3) fase di produzione e trasformazione (considerando il ciclo produttivo che avviene su territorio italiano ovvero: produzione compound, estrusione e assemblaggio).

La fase di reperimento materiali e componenti rappresenta la fase maggiormente influente per tutte le categorie di impatto rispetto tutte le fasi del ciclo di vita del telaio in PVC. Il contributo percentuale di tale fase risulta massimo per l'indicatore di impatto *Resource use minerals and metals* (99,84%) e minimo nella categoria *Land Use* (68,76%).

È possibile analizzare la fase di reperimento materiali e componenti per i rispettivi processi di compoundazione, estrusione, assemblaggio.

All'interno dei processi di compoundazione, estrusione, assemblaggio è possibile inoltre identificare quali lavorazioni (es. zincatura, polimerizzazione, produzione acciaio, ecc.) contribuiscono al maggiore impatto.

			fase 1 - reperimento materiali e componenti				fase 2 - fase di trasporto	fase 3 - fase di produzione e trasformazione		
Categoria d'impatto	u.m.	Totale	compounding	estrusione	assemblaggio	imballaggio		consumo idrico	consumo energetico	rifiuti
Eutrophication, freshwater	--	2,54E-02	8,08E-03	9,70E-06	1,40E-02	2,79E-05	2,20E-04	8,11E-07	3,07E-03	1,20E-06
Eutrophication, terrestrial	--	2,09E-02	1,64E-03	2,60E-06	1,77E-02	9,57E-06	4,30E-04	1,08E-07	1,10E-03	1,40E-06
Ecotoxicity, freshwater	--	6,38E-02	1,49E-02	9,08E-06	4,27E-02	8,27E-05	1,37E-03	7,76E-07	4,67E-03	1,10E-05
Resource use, fossils	--	2,53E-02	1,10E-02	3,46E-05	8,54E-03	6,31E-05	1,13E-03	4,65E-07	4,47E-03	6,05E-07
Resource use, minerals and metals	--	1,62E+00	1,33E-02	8,81E-06	1,60E+00	5,14E-05	2,04E-03	7,75E-07	5,83E-04	7,71E-07

Tabella 35. Contributo delle fasi e dei processi che costituiscono la produzione del telaio in PVC, incluso di tutti i suoi componenti; Dataset "*Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m*". Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Analizzando i valori dei contributi di impatto maggiormente rilevanti (tab. 35) nella fase di reperimento materiali e componenti, si nota come i processi di produzione di compound e di assemblaggio della finestra rappresentino le principali cause di impatto. Risulta necessario, però, entrare nel merito di ciascun processo per capire la causa più influente di impatto.

Nell'indicatore *Resource use, minerals and metals*, la zincatura del rinforzo in acciaio del telaio PVC, aggiunto durante il processo di assemblaggio, rappresenta il 94% dell'impatto totale.

Nella categoria *Resource use, fossils*, il processo di produzione del compound contribuisce al 44% dell'impatto totale, insieme ad un 34% rappresentato dal processo di assemblaggio. Nel primo processo, il contributo maggiore è dato in particolare dalla polimerizzazione (*suspension*) della resina PVC (rappresentando il 32% dell'impatto totale), segue il contributo dalla produzione del biossido di titanio (additivo) (4% del totale); nel secondo processo emerge la produzione dell'acciaio (vergine) per il rinforzo del telaio (7% del totale) e la relativa zincatura (7% del totale).

La categoria *Ecotoxicity, freshwater*, mostra di nuovo la zincatura del rinforzo in acciaio del telaio PVC, aggiunto durante il processo di assemblaggio, come principale causa di impatto, pari al 34% dell'impatto totale. Segue poi, il contributo della polimerizzazione (*suspension*) della resina PVC (processo di compoundazione) che rappresenta quasi il 14% del contributo totale di impatto.

Anche l'impatto *Eutrophication, terrestrial*, è principalmente causato dalla zincatura del rinforzo in acciaio del telaio PVC, aggiunto durante il processo di assemblaggio: esso rappresenta ben il 76% del totale impatto della categoria stessa.

Il 55% dell'impatto di *Eutrophication, freshwater* deriva dall'assemblaggio, in particolare della produzione dell'acciaio (vergine) e della zincatura del rinforzo del telaio PVC: acciaio e zincatura

contribuiscono al 15% ciascuno (ed insieme, al 30% dell'impatto totale). Tuttavia, il contributo di impatto maggiore in assoluto (20% del totale) è associabile al processo di produzione di compound, dove la polimerizzazione (*suspension*) della resina PVC rappresenta il 20% del totale impatto di *Eutrophication, freshwater*.

Per quanto riguarda i prodotti finestra completa è invece possibile comparare l'intero processo di produzione del telaio PVC (incluso tutti gli elementi) e quello di produzione della vetrocamera, al fine di costatare l'incidenza sugli indicatori di impatto rilevanti.

Nelle tabelle seguenti (36, 37,38,39,40) vengono mostrati gli impatti più rilevanti per il prodotto finestra (*Resource use minerals and metals, Resource use fossils, Eutrophication freshwater, Eutrophication terrestrial, Ecotoxicity freshwater*). Inoltre vengono riportati gli indicatori di impatto significativamente incrementati dalla vetrocamera (rispetto ai valori riferiti al solo telaio PVC).

Categoria d'impatto	u.m.	Totale	Telaio PVC	Vetrocamera (F-L)	Trasporto	% aumento impatti*	contributo telaio	contributo vetro
Climate change	--	1,88E-02	1,22E-02	6,45E-03	1,41E-04	35%	65%	34%
Photochemical ozone formation	--	5,57E-04	4,05E-04	1,47E-04	4,83E-06	27%	73%	26%
Eutrophication, freshwater	--	3,09E-02	2,54E-02	5,45E-03	5,20E-05	18%	82%	18%
Eutrophication, marine	--	1,00E-02	5,69E-03	4,28E-03	7,15E-05	43%	57%	43%
Eutrophication, terrestrial	--	2,45E-02	2,09E-02	3,47E-03	8,65E-05	15%	85%	14%
Ecotoxicity, freshwater	--	8,91E-02	6,38E-02	2,49E-02	3,22E-04	28%	72%	28%
Land use	--	8,80E-04	4,94E-04	3,72E-04	1,45E-05	44%	56%	42%
Resource use, fossils	--	3,58E-02	2,53E-02	1,03E-02	2,64E-04	29%	71%	29%
Resource use, minerals and metals	--	1,63E+00	1,62E+00	8,43E-03	4,85E-04	1%	99%	1%

*percentuale di aumento tra telaio in PVC e finestra completa (incluso trasporto)

Tabella 36. Incidenza della produzione del telaio PVC e del doppio vetro (F-L) sugli impatti totali della finestra completa, Dataset *"Window, polyvinylchloride frame, double glazing, float-laminated"* Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Categoria d'impatto	u.m.	Totale	Telaio PVC	Vetrocamera (C-L)	Trasporto	% aumento impatti*	contributo telaio	contributo vetro
Climate change	--	1,89E-02	1,22E-02	6,52E-03	1,41E-04	35%	65%	35%
Photochemical ozone formation	--	5,58E-04	4,05E-04	1,48E-04	4,83E-06	27%	73%	27%
Eutrophication, freshwater	--	3,10E-02	2,54E-02	5,55E-03	5,20E-05	18%	82%	18%
Eutrophication, marine	--	1,01E-02	5,69E-03	4,31E-03	7,15E-05	44%	56%	43%
Eutrophication, terrestrial	--	2,45E-02	2,09E-02	3,51E-03	8,65E-05	15%	85%	14%
Ecotoxicity, freshwater	--	8,93E-02	6,38E-02	2,52E-02	3,22E-04	29%	71%	28%
Land use	--	9,03E-04	4,94E-04	3,94E-04	1,45E-05	45%	55%	44%
Resource use, fossils	--	3,59E-02	2,53E-02	1,04E-02	2,64E-04	30%	70%	29%
Resource use, minerals and metals	--	1,63E+00	1,62E+00	8,50E-03	4,85E-04	1%	99%	1%

*percentuale di aumento tra telaio in PVC e finestra completa (incluso trasporto)

Tabella 37. Incidenza della produzione del telaio PVC e del doppio vetro (C-L) sugli impatti totali della finestra completa, Dataset *"Window, polyvinylchloride frame, double glazing, coated-laminated"* Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Categoria d'impatto	u.m.	Totale	Telaio PVC	Vetrocamera (L-L)	Trasporto	% aumento impatti*	contributo telaio	contributo vetro
Climate change	--	2,02E-02	1,22E-02	7,85E-03	1,70E-04	40%	60%	39%
Photochemical ozone formation	--	1,55E-02	8,34E-03	7,04E-03	1,39E-04	46%	54%	45%
Eutrophication, freshwater	--	3,21E-02	2,54E-02	6,66E-03	6,26E-05	21%	79%	21%
Eutrophication, marine	--	1,09E-02	5,69E-03	5,16E-03	8,61E-05	48%	52%	47%
Eutrophication, terrestrial	--	2,52E-02	2,09E-02	4,20E-03	1,04E-04	17%	83%	17%
Ecotoxicity, freshwater	--	9,29E-02	6,38E-02	2,87E-02	3,88E-04	31%	69%	31%
Land use	--	1,01E-03	4,94E-04	4,96E-04	1,74E-05	51%	49%	49%
Resource use, fossils	--	3,83E-02	2,53E-02	1,28E-02	3,19E-04	34%	66%	33%
Resource use, minerals and metals	--	1,63E+00	1,62E+00	1,02E-02	5,84E-04	1%	99%	1%

*percentuale di aumento tra telaio in PVC e finestra completa (incluso trasporto)

Tabella 38. Incidenza della produzione del telaio PVC e del doppio vetro (L-L) sugli impatti totali della finestra completa, Dataset *"Window, polyvinylchloride frame, double glazing, laminated-laminated"* Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Categoria d'impatto	u.m.	Totale	Telaio PVC	Vetrocamera (F-F-L)	Trasporto	% aumento impatti*	contributo telaio	contributo vetro
Climate change	--	2,16E-02	1,22E-02	9,15E-03	1,98E-04	43%	57%	42%
Photochemical ozone formation	--	1,68E-02	8,34E-03	8,26E-03	1,62E-04	50%	50%	49%
Eutrophication, freshwater	--	3,34E-02	2,54E-02	7,91E-03	7,28E-05	24%	76%	24%
Eutrophication, marine	--	1,18E-02	5,69E-03	6,06E-03	1,00E-04	52%	48%	51%
Eutrophication, terrestrial	--	2,59E-02	2,09E-02	4,93E-03	1,21E-04	19%	81%	19%
Ecotoxicity, freshwater	--	1,00E-01	6,38E-02	3,61E-02	4,52E-04	36%	64%	36%
Land use	--	1,01E-03	4,94E-04	5,00E-04	2,03E-05	51%	49%	49%
Resource use, fossils	--	4,01E-02	2,53E-02	1,44E-02	3,71E-04	37%	63%	36%
Resource use, minerals and metals	--	1,63E+00	1,62E+00	1,19E-02	6,80E-04	1%	99%	1%

*percentuale di aumento tra telaio in PVC e finestra completa (incluso trasporto)

Tabella 39. Incidenza della produzione del telaio PVC e del triplo vetro (F-F-L) sugli impatti totali della finestra completa, Dataset *"Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, float-float-laminated"* Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Categoria d'impatto	u.m.	Totale	Telaio PVC	Vetrocamera (L-F-L)	Trasporto	% aumento impatti*	contributo telaio	contributo vetro
Climate change	--	2,30E-02	1,22E-02	1,06E-02	2,27E-04	47%	53%	46%
Photochemical ozone formation	--	1,80E-02	8,34E-03	9,47E-03	1,85E-04	54%	46%	53%
Eutrophication, freshwater	--	3,46E-02	2,54E-02	9,12E-03	8,36E-05	27%	73%	26%
Eutrophication, marine	--	1,27E-02	5,69E-03	6,94E-03	1,15E-04	55%	45%	54%
Eutrophication, terrestrial	--	2,67E-02	2,09E-02	5,66E-03	1,39E-04	22%	78%	21%
Ecotoxicity, freshwater	--	1,04E-01	6,38E-02	3,99E-02	5,19E-04	39%	61%	38%
Land use	--	1,14E-03	4,94E-04	6,25E-04	2,33E-05	57%	43%	55%
Resource use, fossils	--	4,26E-02	2,53E-02	1,69E-02	4,25E-04	41%	59%	40%
Resource use, minerals and metals	--	1,63E+00	1,62E+00	1,36E-02	7,80E-04	1%	99%	1%

*percentuale di aumento tra telaio in PVC e finestra completa (incluso trasporto)

Tabella 40. Incidenza della produzione del telaio PVC e del triplo vetro (L-F-L) sugli impatti totali della finestra completa, Dataset *"Window, polyvinylchloride frame, triple glazing, laminated-float-laminated"* Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

Nel caso delle finestre a doppio vetro risulta prevalente l'incidenza del telaio in PVC rispetto alla componente di vetrocamera in tutte le categorie di impatto ambientale.

Considerando la finestra completa con doppio vetro F-L (tab. 36), analizzando i valori di impatto maggiormente rilevanti, si nota che la componente del telaio (incluso tutti gli altri elementi, quali: rinforzo metallico, ferramenta, guarnizioni ecc.) costituisce il contributo maggiore: il 99% della

Resource use, minerals and metals; il 71% del *Resource use, fossils*; il 72% dell'*Ecotoxicity, freshwater*; l'85% dell'*Eutrophication, terrestrial*; l'82% dell'*Eutrophication, freshwater*. Si nota, comunque, che il contributo della vetrocamera comporta un significativo incremento in alcuni indicatori di impatto, rispetto al solo telaio. In particolare, la componente della vetrocamera a doppio vetro (F-L) incide sugli indicatori: *Climate change* (+35%), *Photochemical ozone formation* (+42%), *Eutrophication, marine* (+43%), *Land use* (+44%). In questi casi il contributo sull'indicatore di impatto del telaio si avvicina al contributo della vetrocamera.

Per quanto riguarda la finestra completa a doppio vetro C-L (tab. 37), si nota che la componente del telaio (incluso tutti gli elementi) costituisce il contributo maggiore: il 99% della *Resource use, minerals and metals*; il 70% del *Resource use, fossils*; il 71% dell'*Ecotoxicity, freshwater*; l'85% dell'*Eutrophication, terrestrial*; l'82% dell'*Eutrophication, freshwater*. La componente della vetrocamera a doppio vetro (C-L) incide particolarmente sugli indicatori: *Climate change* (+35%), *Photochemical ozone formation* (+42%), *Eutrophication, marine* (+44%), *Land use* (+45%).

Analizzando, quindi, la finestra completa a doppio vetro L-L (tab. 38), si nota, di nuovo, che la componente del telaio PVC (incluso tutti gli elementi) costituisce il contributo maggiore per tutti gli indicatori di impatto: il 99% della *Resource use, minerals and metals*; il 66% del *Resource use, fossils*; il 69% dell'*Ecotoxicity, freshwater*; l'83% dell'*Eutrophication, terrestrial*; il 79% dell'*Eutrophication, freshwater*. La componente della vetrocamera a doppio vetro (L-L) incide particolarmente sugli indicatori: *Climate change* (+40%), *Photochemical ozone formation* (+46%), *Eutrophication, marine* (+48%), *Land use* (+51%).

Considerando la finestra con triplo vetro F-F-L (tab. 39), è possibile costatare che, anche in questo caso, il telaio PVC (incluso tutti gli elementi) costituisce il maggiore contributo per le categorie di impatto più rilevanti: il 99% della *Resource use, minerals and metals*; il 63% del *Resource use, fossils*; il 64% dell'*Ecotoxicity, freshwater*; l'81% dell'*Eutrophication, terrestrial*; il 76% dell'*Eutrophication, freshwater*. In questo caso la componente della vetrocamera a triplo vetro (F-F-L) incide ancora di più sull'incremento di alcune categorie di impatto: *Climate change* (+43%), *Photochemical ozone formation* (+50%), *Eutrophication, marine* (+52%), *Land use* (+51%). Interessante notare che il processo di produzione della soluzione a triplo vetro (F-F-L) è la principale causa per la categoria di impatto *Eutrophication marine (48% telaio PVC e 51% vetrocamera)*.

Riguardo la finestra con triplo vetro L-F-L (tab. 40), nelle categorie di impatto più rilevanti resta prevalente il contributo del telaio PVC (incluso tutti gli elementi): il 99% della *Resource use, minerals and metals*; il 59% del *Resource use, fossils*; il 61% dell'*Ecotoxicity, freshwater*; il 78%

dell'*Eutrophication, terrestrial*; il 73% dell'*Eutrophication, freshwater*. In questo caso la componente della vetrocamera a triplo vetro (F-F-L) incide più del telaio PVC per le categorie di impatto: *Land use* (55%), Eutrophication, marine (54%) e *Photochemical ozone formation* (53%), comportando aumenti di impatto rispetto al solo telaio PVC maggiori del 50%.

9.3 Flussi elementari più rilevanti

Di seguito vengono analizzati i flussi elementari più rilevanti nel ciclo di vita del telaio in PVC (incluso tutti i elementi) (dataset "*Polyvinylchloride frame for a window of 1,23 m x 1,48 m*" e "*Polyvinylchloride frame for windows, 1 m*"). Nella categoria *Resource use, minerals and metals* il flusso elementare più rilevante è la materia prima oro, che costituisce il 97,78% del totale degli impatti in tale categoria, e la materia prima piombo, che contribuisce per l'1,12% sul totale. Tali materie prime derivano dalla fase di estrazione dello zinco, utilizzato per la zincatura delle componenti metalliche della finestra.

Nella categoria *Resource use, fossils* i flussi elementari più rilevanti sono rappresentati da gas naturale, petrolio grezzo e carbone. Il primo contribuisce al 32,72% del totale degli impatti della stessa categoria. Il gas naturale è particolarmente legato, in uguale valore, alla produzione del PVC attraverso polimerizzazione in sospensione (*suspension polymerisation*) e alla produzione di elettricità (considerando il mix medio italiano). Il secondo (petrolio grezzo), contribuisce al 29,82% del totale impatto *Resource use, fossils*, ed è determinato prevalentemente dalla produzione del PVC attraverso polimerizzazione in sospensione. Il terzo (carbone), costituisce il 21,16% dell'impatto *Resource use, fossils* totale, e deriva in particolare dalla produzione dell'acciaio, utilizzato per i componenti di rinforzo e di ferramenta della finestra.

Nella categoria *Ecotoxicity, freshwater*, il flusso elementare più rilevante è l'alluminio in aria (39,06% del totale impatto), prevalentemente correlato alla produzione dell'acciaio e alla produzione di zinco.

L'ammoniaca in aria, anch'essa derivata dalla produzione di zinco, incide per il 76,4% del contributo di *Eutrophication, terrestrial*.

Nella categoria *Eutrophication, freshwater*, il flusso elementare più rilevante è il fosfato in acqua che incide sul 99,87% del totale impatto. Esso è determinato, quasi equamente, dalla produzione di PVC (*suspension polymerisation*), la produzione dell'acciaio vergine, e la produzione di zinco. Emerge, anche se in modo minore, la produzione di biossido di titano (utilizzato come additivo nella produzione di compound).

9.4 Analisi di sensitività

I risultati dello studio LCA hanno dimostrato che gli impatti più rilevanti sono molto influenzati dalla zincatura dei componenti in acciaio che costituiscono la finestra. Tuttavia, dalla raccolta di dati primari non è stato possibile rilevare lo spessore di zinco dei componenti in acciaio utilizzati in una finestra con telaio in PVC. Ai fini della valutazione sono stati assunti il dataset di Ecoinvent Zinc coat, coils {RER}| zinc coating, coils per il rinforzo in acciaio del telaio PVC, che considera un range di spessore di zinco compreso tra 20 e 45 µm e Zinc coat, pieces {RER}| zinc coating, pieces, per la ferramenta, che considera uno spessore di zinco pari a 130 µm.

L'analisi di sensitività ha l'obiettivo di valutare quanto tale assunzione influenzi i risultati finali, confrontando i risultati di impatto ottenuti assumendo una zincatura che prevede minore spessore di zinco per tutti i componenti in acciaio della finestra in PVC.

Categoria d'impatto	u.m.	Telaio con componenti in acciaio zincato 20 µm	Telaio con componenti in acciaio zincato 20-45 µm	scostamento %
Climate change	--	1,19E-02	1,22E-02	2,23%
Ozone depletion	--	4,02E-04	4,05E-04	0,81%
Ionising radiation	--	2,79E-03	2,92E-03	4,35%
Photochemical ozone formation	--	8,00E-03	8,34E-03	4,01%
Particulate matter	--	1,45E-02	1,47E-02	1,03%
Human toxicity, non-cancer	--	1,78E-02	1,94E-02	8,17%
Human toxicity, cancer	--	1,24E-02	1,32E-02	5,56%
Acidification	--	1,93E-02	1,97E-02	2,00%
Eutrophication, freshwater	--	2,36E-02	2,54E-02	7,09%
Eutrophication, marine	--	5,43E-03	5,69E-03	4,62%
Eutrophication, terrestrial	--	2,06E-02	2,09E-02	1,46%
Ecotoxicity, freshwater	--	5,21E-02	6,38E-02	18,35%
Land use	--	4,73E-04	4,94E-04	4,12%
Water use	--	5,94E-03	6,14E-03	3,21%
Resource use, fossils	--	2,48E-02	2,53E-02	1,97%
Resource use, minerals and metals	--	7,43E-01	1,62E+00	54,10%

Tabella 41. Analisi di sensitività riguardo lo spessore di zincatura dei componenti in acciaio del telaio PVC.

Fonte: Elaborazione Politecnico di Milano

È noto, infatti, che esistono differenti processi possibili per zincare prodotti in acciaio, tra cui la zincatura Sendzimir (o elettrolitica), normata dalla UNI EN 10142:2002, che presenta uno spessore di rivestimento di zinco generalmente pari a soli 20 µm. Attraverso una ricerca in diverse banca dati, studi LCA ed EPD, è possibile asserire però che non esistono dataset ambientali specifici riguardo il processo di zincatura Sendzimir con spessore pari a 20 µm (Lavagna et al., 2022).

Ai fini dell'analisi di sensitività, è stato necessario modificare i dataset di zincatura Ecoinvent, intervenendo sui dati di inventario input-output sottesi alla valutazione LCA del dataset stesso, come di seguito spiegato e già assunto in precedenti studi LCA a letteratura (Lavagna et al., 2022).

È stato necessario avvalersi del dataset *Ecoinvent Zinc coat, pieces, adjustment per micro-m {RER}*, che riporta il peso di 1 µm di zinco al m^2. Partendo da tale dataset è stato, quindi, possibile dedurre il peso dello zinco al m^2, pari a 0,0154 kg/m^2 per µm. Tale quantità è stata moltiplicata per x 20 µm (Zincatura Sendzimir). Conoscendo quindi la quantità di Zincatura Sendzimir al m^2, pari a 0,308 kg/m^2 (= 20 µm x 0,0154 kg/m^2µm), è stato possibile modificare il peso imputato nell'inventario input-output del dataset *Zinc coat, coils {RER}| zinc coating, coils* e *Zinc coat, pieces {RER}| zinc coating, pieces*, sostituendo il preciso peso dello zinco. Confrontando i risultati di normalizzazione del telaio in PVC (incluso di tutti i componenti) in cui le parti in acciaio sono state considerate con zincatura pari a 20 µm e i risultati di normalizzazione dello stesso telaio PVC con componenti in acciaio zincato con spessore pari ad un range 20-45 µm, si evince che i maggiori scostamenti riguardano gli indicatori di impatto più rilevanti *Resource use, minerals and metals*, *Ecotoxicity, freshwater*, *Eutrophication, freshwater* e l'indicatore (non emerso dall'analisi precedente come rilevante) *Human toxicity, non-cancer* (tab. 41).

L'indicatore *Resource use, minerals and metals*, in particolare riporta uno scostamento del +54% tra dateset con 20 um di zinco, e quello con il range 20-45 um.

10 Conclusioni

Nel presente report, a seguito della descrizione della filiera italiana di produzione di telai in PVC per serramenti e infissi e delle principali caratteristiche e tipologie di impatto (sia ambientale che socio-economico) che la contraddistinguono, sono presentati i risultati dello specifico studio LCA applicato ai prodotti rappresentativi, identificati dalle analisi condotte (telaio in PVC per serramenti e 5 tipologie di finestra completa) che hanno portato alla definizione di n. 7 dataset per la Banca dati Arcadia.

Lo studio è stato svolto sulla base di dati relativi alla specifica filiera italiana, ricorrendo prevalentemente a dati primari disponibili a livello di filiera, raccolti presso le aziende coinvolte nel GdL, e ad alcuni dati secondari reperiti a letteratura, e controllati da esperti a conferma della rappresentatività della filiera italiana. Non vi sono, quindi, da segnalare importanti carenze di dati. I dati hanno buona affidabilità, e rappresentatività (temporale, geografica e tecnologica). All'interno del GdL si sono selezionate aziende il cui processo produttivo e le cui tecnologie sono

state considerate rappresentative di una situazione media italiana relativa sia alla produzione del compound PVC destinato alla produzione di telai per finestre, sia alla produzione della finestra completa, includendo profilazione del telaio e assemblaggio.

Essendo l'infisso in PVC un prodotto molto variabile in dimensione e conformazione, lo studio ha definito un "prodotto rappresentativo della filiera nazionale" sulla base di svariati prodotti presi in esame da studi LCA ed EPD, calcolando, per tutti i componenti, pesi e dimensioni, i quali sono stati avvallati dal parere di alcune aziende e dall'Associazione PVC Forum Italia, facenti parte il Gruppo di Lavoro. L'assunzione della dimensione della finestra oggetto di studio, pari a 1,23 m x 1,48 m, è in linea con la EN 14351 e la Product Category Rules dei prodotti finestra EN ISO 17213:2020.

L'unione del prodotto rappresentativo "telaio PVC" ai prodotti rappresentativi "vetrocamera" (individuati nel report Arcadia "Produzione di lastre e sistemi in vetro per infissi e serramenti" sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LCTeam) ha permesso di definire anche le principali soluzioni di finestra completa prodotte in Italia.

Lo studio LCA di filiera è stato svolto adottando un approccio "cradle-to-gate", ovvero un approccio che considera tutti i processi fino al "cancello aziendale", escludendo la distribuzione del prodotto al cliente finale, e le successive fasi di uso e fine vita (ad es. eventuali ulteriori lavorazioni/trattamenti eseguiti presso il cliente finale e il processo di riuso/riciclo/smaltimento della finestra stessa). Lo studio comprende quindi l'intero processo di produzione del serramento in PVC, comprendendo la produzione del compound, la produzione dei profili in PVC e l'assemblaggio del serramento finito.

L'unità funzionale (UF) della valutazione ambientale è pari a un'unità finestra di dimensione 1,23 m × 1,48 m (1,82 m^2), come da EN 17213:2020; il fattore di conversione per ricondurre i dati a 1 m di telaio è pari a 0,185.

I risultati dello studio LCA, ottenuti tramite il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0, che costituisce il metodo di valutazione dell'iniziativa della Commissione Europea sull'impronta ambientale e consente di ottenere un profilo di impatto completo a livello prodotto, indicano che:

- Le categorie di impatto più rilevanti, sia per la produzione del telaio PVC (comprensivo di tutti i componenti) sia per la produzione di finestre con vetrocamera a doppio vetro o triplo vetro sono *Resource use minerals and metals*, *Ecotoxicity freshwater*, *Eutrophication freshwater*, *Resource use fossils* e *Eutrophication terrestrial*.
- La rilevanza preponderante di tali categorie di impatto è legata in particolare al reperimento dei materiali e componenti per la produzione del PVC compound e per l'assemblaggio della

finestra, in particolare provocati dai processi di processi di polimerizzazione (suspension) della resina PVC (utilizzato per la produzione di compound PVC-U), dalla produzione dell'acciaio vergine di rinforzo e la relativa zincatura impiegato nel processo di assemblaggio della finestra.

- La zincatura del rinforzo in acciaio del telaio PVC è preponderante per la maggior parte degli impatti più rilevanti (*Resource use, minerals and metals*, *Ecotoxicity, freshwater*, *Eutrophication, terrestrial*).
- La polimerizzazione (*suspension*) influenza particolamente le categorie di impatti relative a *Resource use, fossils*, *Ecotoxicity, freshwater*, *Eutrophication, freshwater*.
- Nel caso delle finestre a doppio vetro in tutte le categorie di impatto ambientale risulta prevalente l'incidenza del telaio in PVC rispetto alla componente di vetrocamera.
- Nel caso di finestre con triplo vetro, la soluzione (F-F-L) incide più del telaio nella categoria di impatto Eutrophication marine, e la soluzione (L-L-F) risulta prevalente negli indicatori di Photochemical ozone formation, Eutrophication marine e Land use.
- I flussi elementari più rilevanti sono costituiti da: materia prima oro e piombo, che derivano dalla fase di estrazione dello zinco; gas naturale, parimenti rilevante sia nella produzione del PVC attraverso polimerizzazione in sospensione (*suspension polymerisation*) sianella produzione di elettricità (considerando il mix medio italiano); petrolio grezzo, determinato prevalentemente dalla produzione del PVC attraverso polimerizzazione in sospensione; carbone che deriva dalla produzione dell'acciaio; l'alluminio in aria prevalentemente correlato alla produzione dell'acciaio e alla produzione di zinco; l'ammoniaca in aria, anch'essa derivata dalla produzione di zinco; il fosfato in acqua determinato, quasi equamente, dalla produzione di PVC (*suspension polymerisation*), la produzione dell'acciaio vergine, e la produzione di zinco; anche se in modo minore, la produzione di biossido di titano, utilizzato come additivo nella produzione di compound.

Nonostante il confronto con la letteratura esistente sia complicato a causa delle differenze metodologiche che possono esserci tra studi LCA di prodotti analoghi, è stato riscontrato un allineamento, dello stesso ordine di grandezza, rispetto ad alcuni risultati di studi LCA riportati in EPD di prodotto: ad esempio nel caso della finestra a doppio vetro l'impatto *Climate change* del presente studio è pari a 8,37E+01 $kgCO_2eq/m^2$ di finestra, in linea con l'impatto dichiarato dalla EPD EPPA (validità 02.05.2027) pari a 8.00E+1 $kgCO_2eq/m^2$ di finestra; altresì, l'indicatore *Resource use, fossils* risulta pari a 1,28E+03 MJ secondo questo studio, e l'indicatore PENRE (*Use of non-renewable*

primary energy excluding non-renewable primary energy resources used as raw materials) della EPD EPPA è pari a 1,14E+03 MJ.

I risultati sull'analisi di sensitività condotta relativamente allo spessore di zincatura dei componenti in acciaio ha evidenziato come la mancanza di tale informazione dimensionale può causare un'incertezza nei risultati delle categorie di impatto più rilevamenti, dimostrando scostamenti (ad esempio che superano il 50% nel caso dell'indicatore *Resource use, minerals and metals*). Tuttavia, la difficoltà di reperimento dei dati relativi allo spessore di zincatura dei prodotti in acciaio e la carenza di relativi dataset ambientali in banche dati, è già stata evidenziata a letteratura (Lavagna et al., 2022).

Bibliografia

Baitz et al. (2004), "Life Cycle Assessment of PVC and of principal competing materials", Final Report commissioned by European Commission.

Baldasano Recio J.M., Parra Narváez R. and Guerrero P.J. (2005), "Estimate of energy consumption and CO2 emission associated with the production, use and final disposal of PVC, aluminium and wooden windows".

Ciotti C. (2012), "La strategia per la sostenibilità del PVC Un PVC sempre più nuovo", available at: https://www.pvcforum.it/wp-content/themes/twentyseventeen/assets/pdf/ccplast.pdf

ECVM (2022), PVC in building and construction, available at: https://pvc.org/pvc-applications/pvc-in-building-and-construction/.

Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia (2015), Volume 1 – Serramenti in PVC, available at: https://www.pvcforum.it/si-pvc/documentazioni/volumi/.

Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia (2015), Volume 2 – Energia e Ambiente, available at: https://www.pvcforum.it/si-pvc/documentazioni/volumi/.

Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia (2015), Volume 3 – Riciclo del PVC in Italia, available at: https://www.pvcforum.it/si-pvc/documentazioni/volumi/.

Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia (2015), Volume 9 – Le sfide per il futuro del serramento in PVC, available at: https://www.pvcforum.it/si-pvc/documentazioni/volumi/.

Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia (2020), "Il mercato italiano dei serramenti in PVC nel 2020", available at: https://www.pvcforum.it/si-pvc/news/mercato-italiano-serramenti-pvc-2020/.

Life Cycle Engineering (2008), “Confronto tra serramenti in PVC, Alluminio e Legno mediante l’Analisi del Ciclo di Vita (LCA) (inclusi gli avvolgibili)”, Commissionato dal Centro di Informazione sul PVC.

Mösle et al. (2015), ““Sustainability assessment of windows and curtain walls”, Study commissioned by the European Aluminium Association.

Polyvinyl chloride (PVC) PlasticsEurope Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers, available at: https://pvc.org/wp-content/uploads/2019/09/PlasticsEurope_Eco-profile_VCM_PVC_2015-05.pdf.

PVC Forum Italia (2008), “I serramenti in pvc sotto la lente del ciclo di vita. I risultati e le metodologie dello studio LCA che ha posto a confronto serramenti in PVC, in alluminio e in legno”, Commissionato da PVC Forum Italia Centro di Informazione sul PVC.

PVC Forum Italia (2022), PVC, available at: https://www.pvcforum.it/pvc/produzione/.

PVC Forum Italia (2022a), Il consumo di PVC in Italia 2021, Plastic Consult s.r.l.

PVC Forum Italia (2022b), Comunicato Stampa. Importante crescita del mercato italiano del serramento in PVC nel 2021, a cura del Gruppo Serramenti e Avvolgibili di PVC Forum Italia.

Recovinyl (2021), “Recovinyl results 2020 - a detailed overview”, available at: https://www.recovinyl.com/_files/ugd/ed9371_b5d059c088794dacb475c741cc52d1df.pdf

Recovinyl (2022), “Progress Report 2022 Reporting on 2021 Activities”, available at: https://www.vinylplus.eu/wp-content/uploads/2022/05/VinylPlus-Progress-Report-2022.pdf

Stichnothe H. and Azapagic A. (2013), “Life cycle assessment of recycling PVC window frames”, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 71, pp. 40-47.

The European Council of Vinyl Manufacturers (2015), Vinyl chloride (VCM) and Polyvinyl chloride (PVC) PlasticsEurope / Eco-profiles and Environmental Product Declarations of the European Plastics Manufacturers, available at: https://pvc4pipes.com/wp-content/uploads/2018/02/PlasticsEurope_Eco-profile_VCM_PVC_2015-05.pdf.

Trifirò F. (2015), “Come si è salvata l’industria delle plastiche in pvc, dopo la scomparsa della sua produzione in italia”, *La Chimica e l’Industria*, Vol. 2(6), ISSN 2283-5458, available at: https://www.soc.chim.it/sites/default/files/chimind/pdf/2015_6_1_on.pdf.

VinylPlus (2021), “Rapporto sulle attività del 2020 e sintesi dei principali risultati degli ultimi 10 anni”, available at: https://www.vinylplus.eu/resources/new-vinylplus-progress-report-2021/.

Lavagna M., Dalla Valle A., Giorgi S., Campioli A. (2022), Aspetti critici nello sviluppo di LCA dettagliate finalizzate alla certificazione EPD: il caso di prodotti in acciaio zincato, XVI Convegno

Associazione Rete Italiana LCA “La sostenibilità nel contesto del PNRR: il contributo della Life Cycle Assessment”, Università di Palermo, Associazione Rete Italiana LCA (Ed.), pp. 291-298.

Zampori, L. and Pant, R. (2019), Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC115959.

AGROALIMENTARE

EDILIZIA COSTRUZIONI

ENERGIA

LEGNO ARREDO

ISBN 978-88-8286-513-9

enea.it