

# PRODUZIONE DI LASTRE E SISTEMI IN VETRO PER INFISSI E SERRAMENTI



**Autori:** Anna Dalla Valle, Monica Lavagna, Andrea Campioli (LifeCycleTEAM, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano)

**Referente ENEA dello studio LCA di filiera:** Valentina Fantin (ENEA, Laboratorio per la Valorizzazione delle Risorse nei Sistemi produttivi e Territoriali - SSPT-USER-RISE)

**Revisione Critica:** Ecoinnovazione srl

**Data di redazione:** 28.02.2023

**NOTA:** Il report contiene dati riservati e sensibili. Non può quindi essere pubblicato, divulgato o condiviso con terzi. La sua condivisione è solo interna al gruppo di lavoro.

Progetto Arcadia - approccio ciclo di vita nei contratti pubblici e banca dati italiana LCA per l'uso efficiente delle risorse

Linea di intervento 2: Realizzazione della Banca Dati Italiana LCA

Azione 5: Analisi e raccolta dati per la costruzione della Banca Dati

## Sommario

1	Sintesi .....	4
2	Scopo del documento .....	5
3	Descrizione della filiera .....	6
3.1	Prodotti rappresentativi della filiera nazionale .....	6
3.2	Impatto socio-economico della filiera .....	14
3.3	Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità .....	18
4	Gruppo di lavoro .....	34
5	Ambito di applicazione dello studio .....	35
5.1	Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento.....	35
5.2	Confini del sistema.....	36
5.3	Assunzioni e giudizi di valore .....	39
5.4	Gestione della multifunzionalità.....	42
5.5	Revisione critica .....	42
5.6	Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti .....	42
6	Modellazione dei dataset della filiera .....	43
7	Analisi di inventario.....	43
7.1	Assunzioni utilizzate nello studio.....	44
7.2	Descrizione e documentazione processi unitari.....	46
7.3	Sviluppo dei datasets .....	58
8	Valutazione degli impatti ambientali .....	59
8.1	Caratterizzazione .....	60
8.2	Normalizzazione.....	61
8.3	Pesatura .....	62
8.4	Analisi di sensibilità.....	62
9	Interpretazione dei risultati .....	64
9.1	Categorie di impatto rilevanti.....	65
9.2	Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti.....	66
9.3	Flussi elementari rilevanti.....	70

10 Conclusioni ..... 71

11 Bibliografia ..... 73

## 1 Sintesi

Il presente report riguarda la filiera del vetro e ne fornisce una descrizione a livello generale, delle sue caratteristiche peculiari, dei prodotti rappresentativi al suo interno e delle principali tipologie di impatto (sia ambientale che socio-economico) che la contraddistinguono.

Il Gruppo di Lavoro (GdL) costituito ai fini dello svolgimento del presente studio di filiera vede la partecipazione del mondo dell'Università e della Ricerca (Politecnico di Milano, ENEA) e delle principali imprese attive sul territorio (Pilkington e Saint-Gobain).

In particolare, il documento presenta i risultati di uno specifico studio di ciclo di vita (*Life Cycle Assessment* – LCA) applicato alla filiera del vetro, considerandone otto prodotti ritenuti particolarmente rilevanti a livello nazionale e rappresentativi per applicazioni in edilizia, nello specifico per serramenti e infissi:

- vetro float - *Float Glass* (FG, per vetrocamera abbreviato in F);
- vetro basso-emissivo - *Coated Float Glass* (CFG, per vetrocamera abbreviato in C);
- vetro stratificato - *Laminated Safety Glass* (LSG, per vetrocamera abbreviato in L);
- vetrocamera doppio vetro - *Insulated Glass Units double glazing* (IGUd);
  - con lastra esterna in vetro float ed interna in vetro stratificato - *IGUd float-laminated* (F-L);
  - con lastra esterna in vetro basso-emissivo ed interna in vetro stratificato - *IGUd coated-laminated* (C-L);
  - con lastra esterna ed interna in vetro stratificato - *IGUd laminated-laminated* (L-L);
- vetrocamera triplo vetro - *Insulated Glass Units triple glazing* (IGUt).
  - con lastra esterna e centrale in vetro float e lastra interna in vetro stratificato - *IGUt float-float-laminated* (F-F-L);
  - con lastra esterna ed interna in vetro stratificato e lastra centrale in vetro float - *IGUt laminated-float-laminated* (L-F-L).

Al fine di restituire, anche se in maniera non esaustiva, l'ampia gamma di pratiche in atto sul territorio nazionale, si è infatti ritenuto rilevante modellizzare molteplici soluzioni di vetrocamera, ritenute tra le più rappresentative, tenendo in considerazione la diversa composizione delle lastre oggi impiegate nei sistemi finestra. Inoltre, per quanto riguarda la diversa lavorazione delle lastre di vetro, si è inizialmente preso in considerazione anche il vetro temprato - *Toughened Safety Glass* (TSG), ma l'assenza di dati di inventario di supporto (sia primari sia secondari) ha portato a escludere questo prodotto dall'analisi di dettaglio dei relativi impatti ambientali.

Lo studio LCA è stato svolto adottando un approccio “cradle-to-gate”, ovvero considerando tutti i processi di produzione fino al cancello dello stabilimento (A1-A3) ed escludendo le successive fasi di costruzione, uso e fine vita, utilizzando dati di qualità prevalentemente buona (dati primari raccolti presso le imprese coinvolte e dati di letteratura e/o di settore rappresentativi della filiera). L'unità funzionale è di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro, considerando lastre di vari spessori e pesi in accordo con la specifica lavorazione oggetto di studio: vetro float (prodotto base), vetro basso-emissivo, vetro stratificato, vetrocamera doppio vetro (x3) e vetrocamera triplo vetro (x2).

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 significative per la produzione di lastre in vetro sono: *Climate change*, *Photochemical ozone formation*, *Ecotoxicity freshwater*, *Resource use fossils* e *Resource use minerals and metals*. L'ordine di rilevanza varia leggermente a seconda del prodotto in esame, assegnando in ogni caso il primato alla categoria *Ecotoxicity freshwater*, nello specifico a causa del contributo del carbonato di sodio utilizzato come materia prima nella miscela vetrificabile, e il secondo posto alla categoria *Resource use fossils*, dato l'ingente consumo di gas naturale durante il processo di fusione del vetro.

Si ringrazia in particolare l'azienda Pilkington Italia S.p.A. per avere contribuito con i dati forniti al presente studio e allo sviluppo dei dataset per la banca dati di Arcadia.

Questo studio ha supportato la valutazione LCA del serramento completo, oggetto di specifico studio LCA all'interno della banca dati Arcadia, “Produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro”, sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LifeCycleTEAM.

## 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 del vetro piano per serramenti e infissi.

### 3 Descrizione della filiera

Il settore edilizio è caratterizzato dall'impiego di una vasta gamma di prodotti in vetro che, sebbene diversi per funzione, prestazione ed aspetto finale, derivano integralmente dal vetro piano, comunemente chiamato "vetro float", riprendendo il nome dal processo di produzione (bagno float). Una volta prodotte, controllate e tagliate in misure standard, le lastre float vengono infatti comunemente sottoposte ad ulteriori lavorazioni al fine di ottenere caratteristiche prestazionali conformi alle più svariate applicazioni ed esigenze. A seconda della lavorazione perseguita, si ottengono lastre di vario tipo, che vengono poi assemblate tra loro per creare vetrocamera per serramenti ad alte prestazioni.

#### 3.1 Prodotti rappresentativi della filiera nazionale

A partire dal vetro piano float, le lavorazioni più rappresentative a livello nazionale riguardano la deposizione di coating (rivestimenti), la tempra e la stratifica, da cui si ottengono lastre di vetro monolitico di vario tipo che sono poi assemblate tra loro per creare vetrocamera ad alte prestazioni.

I prodotti caratterizzanti la filiera vetro possono essere quindi riassunti in:

- vetro piano float (prodotto base);
- vetro basso-emissivo, temprato e stratificato (lavorazioni aggiuntive);
- vetrocamere doppio vetro e triplo vetro (processi di assemblaggio aggiuntivi).

Gli otto prodotti rappresentativi considerati all'interno di questo studio sono stati elencati nel paragrafo 1.

Il vetro temprato viene qui analizzato, ma per l'assenza di dati primari non verrà considerato nella valutazione LCA e nella modellazione dei dataset. Trattandosi di passaggi sequenziali, la filiera può essere considerata come un unico processo produttivo, che va dalla produzione del vetro piano alla successiva trasformazione, creando prodotti a crescente complessità ed elevate prestazioni. È tuttavia importante sottolineare che tali lavorazioni sono eseguite in diversi stabilimenti dislocati sul territorio.

Di seguito vengono analizzati i principali prodotti rappresentativi, evidenziandone le principali differenze produttive nonché le relative caratteristiche tecniche e trasmittanze termiche. Essi sono stati individuati tramite il confronto diretto con i principali operatori della filiera (a testimonianza

della rappresentatività a livello nazionale, non è stato però possibile reperire le relative quote di mercato).

### **Vetro float (23.11.12 7005 10 05, estratto CPA 2008)**

Nell'ambito della filiera nazionale, il prodotto rappresentativo per il vetro float (sigla in inglese FG, per vetrocamera abbreviata in F) è costituito da una lastra di spessore 4 mm e peso 10 kg/m<sup>2</sup>. Tali specifiche sono state validate dai principali produttori attivi sul territorio nazionale.

Il processo di produzione attualmente utilizzato per la fabbricazione del vetro piano, comunemente chiamato "vetro float", è stato messo a punto da Sir Alastair Pilkington nel 1952 e costituisce oggi lo standard mondiale della produzione vetraria di alta qualità (Fig. 3.1.1). Le materie prime, contenute in silos, vengono dosate e opportunamente umidificate per ottenere la miscela vetrificabile (1) che, mediante nastri trasformatori, viene convogliata nel forno fusorio (2). Qui si raggiunge la temperatura più alta dell'industria del vetro, arrivando ai 1550°C. A 1100°C il vetro fuso cola dal forno su uno strato di stagno fuso (3) e, galleggiando sulla superficie liquida in atmosfera controllata, viene tirato fino a divenire un nastro a facce parallele di larghezza e spessore desiderato (lo spessore naturale di circa 6 mm può essere regolato a 1,1-19 mm). Il nastro di vetro viene quindi deposto a 600°C sui rulli di un tunnel di raffreddamento (4), lungo circa 100 metri, dove si raffredda sotto controllo fino alla temperatura ambiente. Intorno ai 500°C, il nastro di vetro si solidifica, acquistando le proprietà di un solido perfettamente elastico. Una volta raffreddato all'aria ambiente, il nastro di vetro viene tagliato in lastre standard (dimensione tipica di 6×3,21 metri), con eliminazione dei bordi longitudinali (5) e successivamente ispezionato (6). A fondo linea, le lastre imballate vengono posizionate verticalmente su schienali per mezzo di elevatori a ventosa (7).



Fig. 3.1.1. Processo di produzione del vetro float. Fonte: Elaborazione PoliMi.

Il vetro piano float viene consegnato ai trasformatori sotto forma di lastre standard in "grandi dimensioni", pronte per essere tagliate, manualmente o automaticamente mediante impianti a programmazione computerizzata, nelle misure di impiego. Le lastre così ottenute possono essere lavorate al bordo con diverse modalità, per realizzare vetri basso-emissivi, temprati e stratificati, fino ad essere assemblate tra loro per creare serie di vetrocamera a doppio vetro o triplo vetro.

### Vetro basso-emissivo (23.12.11 7006 00 90, estratto CPA 2008)

Nell'ambito della filiera nazionale, il prodotto rappresentativo per il vetro basso-emissivo (sigla in inglese CFG, per vetrocamera abbreviata in C) è costituito da una lastra di spessore 4 mm e peso 10 kg/m<sup>2</sup>. Tali specifiche sono state validate dai principali produttori attivi sul territorio nazionale.

Per ridurre la dispersione termica senza compromettere in modo percepibile la trasmissione della luce solare, le lastre float vengono sottoposte a processi di coatizzazione (Fig. 3.1.2), che prevedono il deposito sulla superficie del vetro di ossidi metallici (strato molto sottile da 0,01 a 0,8 micron). Lo strato depositato è costituito da una serie di film sovrapposti: un film che assicura l'aderenza al vetro; uno o più film che conferiscono al vetro le caratteristiche volute; un film di protezione chimica e meccanica. Tale lavorazione aggiuntiva può avvenire mediante due modalità: online (deposito pirolitico), effettuata in fase di produzione dello stesso vetro float, e offline (deposito magnetronico), eseguita invece in fase successiva. La coatizzazione online, o deposito pirolitico, (1a) è infatti un procedimento di deposito di composti metallici sul vetro che avviene ad alta temperatura durante il processo di fabbricazione float nello stadio intermedio tra formatura e ricottura. Esso viene eseguito tramite pirolisi, una tecnica che permette il deposito di ossidi metallici per decomposizione termica a contatto con la superficie del vetro a temperatura elevata (circa 600°C) e che può essere effettuata in tre modi: in fase liquida, in fase solida, in fase vapore. La coatizzazione offline, o deposito magnetronico, (1b) avviene invece una volta terminato il processo di produzione float e previo lavaggio e asciugatura delle lastre (0). Nello specifico consiste in un deposito applicato sul vetro mediante proiezione di metalli e di composti metallici in ambiente sottovuoto. Ad oggi le aziende adottano entrambe le tipologie di produzione ma, intervistando i principali produttori, la coatizzazione offline si configura come tecnica prevalente. A conclusione, vengono eseguiti i controlli di ispezione e verifica qualità (2) e le operazioni di imballaggio (3). Da notare che il processo di coatizzazione viene eseguito per la produzione di vetri basso-emissivi, al fine di ridurre la dispersione termica per irraggiamento dagli ambienti riscaldati interni all'esterno, ma anche per la produzione di vetri selettivi o a controllo solare, il cui scopo è invece la riduzione della radiazione solare in ingresso.

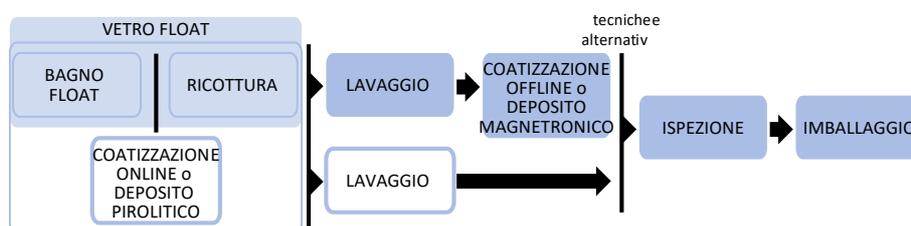


Fig. 3.1.2. Processo di produzione del vetro basso-emissivo. Fonte: Elaborazione PoliMi.

### Vetro temprato (23.12.12 7007 19 80, estratto CPA 2008)

Nell'ambito della filiera nazionale, il prodotto rappresentativo per il vetro temprato (sigla in inglese TSG) è costituito da una lastra di spessore 3 mm e peso 7,5 kg/m<sup>2</sup>. Tali specifiche sono state validate dai principali produttori attivi sul territorio nazionale. Il vetro temprato viene qui analizzato, ma per l'assenza di dati di supporto non verrà considerato nella valutazione LCA e nella modellazione dei dataset.

Per aumentare la resistenza meccanica del vetro, le lastre float sono generalmente sottoposte a tempra (Fig. 3.1.3) termica (1a), un processo che consiste nel raffreddamento assai rapido del vetro mediante un soffio d'aria. Passando in pochi secondi da 600° a 300°, si genera uno stato di tensionamento permanente nella massa vetrosa che consente di mettere lo strato superficiale del vetro in compressione garantendo il grado di sicurezza richiesto. Tecnica alternativa, meno diffusa, è la tempra chimica (1b), che implica l'immersione del vetro in bagni di sali potassici fusi al fine di sostituire parte degli ioni sodio degli strati superficiali del vetro con ioni potassio di dimensioni più grandi (circa 450°C). Rispetto alla tempra termica, questa tecnica non necessita di temperature elevate, con il conseguente pericolo di distorsioni dell'oggetto, e può essere utilizzata anche per elementi di forma complessa. A prescindere dal tipo di lavorazione, se per effetto di un colpo violento il vetro temprato si rompe, si frantuma in una moltitudine di piccoli frammenti di vetro non taglienti (a differenza di quanto succede per il vetro ordinario), venendo per questo motivo impiegato come vetro di sicurezza. Successivamente alla tempra, le lastre di vetro temprato sono soggette al *Heat Soak Test* (2), un trattamento termico aggiuntivo destinato a eliminare i vetri che presentano rischi di rotture spontanee. I controlli di ispezione (3) e le operazioni di imballaggio (4) completano il processo di produzione.

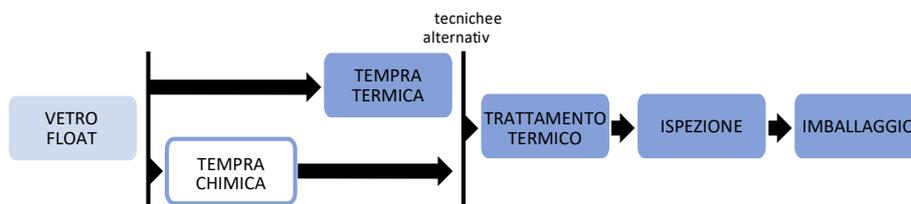


Fig. 3.1.3. Processo di produzione del vetro temprato. Fonte: Elaborazione PoliMi.

### Vetro stratificato (23.12.12 7007 29 00, estratto CPA 2008)

Nell'ambito della filiera nazionale, il prodotto rappresentativo per il vetro stratificato (sigla in inglese LSG, per vetrocamera abbreviata in L) è costituito da una lastra di spessore 6 mm e peso 15,4 kg/m<sup>2</sup>, derivata dall'assemblaggio di due lastre float (3+3 mm) con interposto uno strato in PVB (0,38 mm). Tali specifiche sono state validate dai principali produttori attivi sul territorio nazionale.

Per incrementare ulteriormente le caratteristiche di sicurezza del vetro, dopo le operazioni di lavaggio, si procede con la stratifica (Fig. 3.1.4), ossia l'interposizione di materiale plastico, il butirrato di polivinile (PVB che può essere trasparente ma anche colorato, xerigrafato, etc.), tra due o più lastre di vetro (1). Variando il numero e lo spessore delle lastre e degli strati plastici, si ottiene una vasta gamma di stratificati in grado di coprire tutti i livelli di sicurezza e protezione verso le persone ed i beni. Dopo aver assemblato le diverse parti, l'incollaggio avviene sotto l'azione combinata di calore e pressione, tramite una prima fase di preriscaldamento in forno (100°C) per legare e forzare l'uscita dell'aria e una seconda fase in autoclave per assicurare la totale adesione tra vetri e pellicola (forno a 100°C per circa 2-3 ore). Se in caso di urto il vetro stratificato, detto anche laminato, dovesse rompersi, lo strato di PVB trattiene i frammenti di vetro impedendone la proiezione all'interno, risultando particolarmente indicato come protezione contro il vandalismo e l'effrazione, nonché contro le esplosioni e i colpi d'arma da fuoco (vetri blindati). Da notare come le fasi di lavaggio, assemblaggio, laminazione e autoclavatura sono considerate congiuntamente, in quanto tra loro strettamente integrate nella prassi comune (le aziende non riescono a computerarle distintamente). In seguito alle attività di ispezione e controllo (2), un sistema di impilamento solleva le lastre di vetro verticalmente tramite ventose, posizionando tra di esse uno strato di protezione (3), pronte per poter essere trasportate in sicurezza in furgoni speciali.



Fig. 3.1.4. Processo di produzione del vetro stratificato. Fonte: Elaborazione PoliMi.

### Vetrocamera (23.12.13 7008 00 81, estratto CPA 2008)

Nell'ambito della filiera nazionale, il prodotto rappresentativo base per il vetrocamera a doppio vetro (sigla in inglese IGUd) è costituito da un sistema di spessore 26 mm (4-16-33.1), peso 26,3

kg/m<sup>2</sup> e trasmittanza (U) pari a 1,1 W/m<sup>2</sup>K. Esso deriva dall'assemblaggio di una lastra in vetro float (4 mm) e una in vetro stratificato (33.1, ossia 3+3 mm con 1 strato in PVB) con interposto gas argon (16 mm). Tale composizione è stata individuata a seguito del confronto con gli operatori della filiera, rimarcando tuttavia come il tipo di lavorazione della lastra in vetro e gli spessori di riferimento dipendano strettamente dall'ambito di applicazione e dai livelli di performance da garantire. Tenendo conto dei stringenti requisiti normativi in materia di sicurezza e acustica e termica, si è quindi deciso di considerare tra i prodotti rappresentativi anche due soluzioni aggiuntive più performanti, oggi comunemente impiegate per la realizzazione di sistemi finestra a doppio vetro. In Tab. 3.1.1 viene riportato un prospetto di sintesi relativo ai prodotti vetrocamera a doppio vetro oggetto di studio.

<b>Vetrocamera a doppio vetro</b>	<b>Soluzione (F-L)</b>	<b>Soluzione (C-L)</b>	<b>Soluzione (L-L)</b>
Spessore totale	26 mm	26 mm	28 mm
Peso totale	26,3 kg/m <sup>2</sup>	26,3 kg/m <sup>2</sup>	31,7 kg/m <sup>2</sup>
Lastra esterna	4 mm vetro float	4 mm vetro basso-emissivo	6 mm vetro stratificato
Cavità	16 mm gas argon	16 mm gas argon	16 mm gas argon
Lastra interna	6 mm vetro stratificato	6 mm vetro stratificato	6 mm vetro stratificato

Tab. 3.1.1. Soluzioni a doppio vetro per sistemi finestra. Fonte: Elaborazione PoliMi.

Il prodotto rappresentativo base per il vetrocamera a triplo vetro (sigla in inglese IGUt) è invece costituito da un sistema di spessore 42 mm (4-14-4-14-33.1), peso 36,9 kg/m<sup>2</sup> e trasmittanza (U) pari a 0,6 W/m<sup>2</sup>K. Esso deriva dall'assemblaggio di due lastre in vetro float (4 mm), impiegate rispettivamente all'esterno e al centro del sistema, e una lastra in vetro stratificato (33.1), disposta all'interno, con interposto gas argon (14 mm). Come nel caso precedente, tale composizione è stata individuata a seguito del confronto con gli operatori della filiera, rimarcando tuttavia come il tipo di lavorazione della lastra in vetro e gli spessori di riferimento dipendano strettamente dall'ambito di applicazione e dai livelli di performance da garantire. Sempre in relazione ai requisiti normativi, si è optato per considerare tra i prodotti rappresentativi una soluzione aggiuntiva di triplo vetro, riportando un prospetto di sintesi in Tab. 3.1.2 circa i prodotti vetrocamera a triplo vetro in esame.

<b>Vetrocamera a triplo vetro</b>	<b>Soluzione (F-F-L)</b>	<b>Soluzione (L-F-L)</b>
Spessore totale	42 mm	44 mm
Pesto totale	36,9 kg/m <sup>2</sup>	42,3 kg/m <sup>2</sup>
Lastra esterna	4 mm vetro float	6 mm vetro stratificato
Cavità	14 mm gas argon	14 mm gas argon
Lastra centrale	4 mm vetro float	4 mm vetro float
Cavità	14 mm gas argon	14 mm gas argon
Lastra interna	6 mm vetro stratificato	6 mm vetro stratificato

Tab. 3.1.2. Soluzioni a triplo vetro per sistemi finestra. Fonte: Elaborazione PoliMi.

In particolare, il vetro stratificato viene adoperato almeno sul lato interno dei vetrocamera, siano essi a doppio o triplo vetro, per garantire le prestazioni acustiche e i requisiti di sicurezza sempre più stringenti. Questa soluzione, rispetto all'impiego di lastre in vetro temprato, va a discapito della leggerezza del sistema, in quanto si aumenta lo spessore della lastra, quindi l'uso di risorse materiali, comportando di conseguenza un aumento degli impatti ambientali in termini assoluti. Nello stesso tempo si assolve sia al miglioramento sia della prestazione di sicurezza sia alla prestazione acustica, mentre il vetro temprato migliora solo la prestazione di sicurezza.

Per migliorare in primis l'isolamento termico, a partire da vetri float, basso-emissivi, temprati e stratificati vengono fabbricati vetrocamera (Fig. 3.1.5), ossia vetrate isolanti prodotte su ordinazione sulla base di combinazioni quasi infinite di vetro, distanziatori e opzioni alternative. Si tratta di unità costituite, a seconda dei casi, da due o tre lastre di vetro sigillate al cui interno viene immobilizzato un gas di riempimento, presentando così una scarsa conducibilità termica. Se la principale funzione attesa è migliorare l'isolamento termico, a questa se ne possono associare altre: isolamento termico (in questo caso l'aria può essere sostituita da argon e krypton); sicurezza e protezione da fuoco (tramite impiego di vetri temprati); sicurezza, protezione da fuoco e isolamento acustico (tramite impiego di vetri stratificati); controllo dell'irradiazione di calore (tramite impiego di vetri basso-emissivi). Una volta che il vetro è stato tagliato e bordato (1), le lastre vengono prima lavate con acqua demineralizzata (2) e asciugate per eliminare tutte le particelle di sporco, rimuovendo, in caso di vetri basso-emissivi, il coating di rivestimento attorno al perimetro, in modo da permettere ai sigillanti di aderire direttamente al vetro. Segue l'ispezione automatica (2) per monitorare la qualità del vetro ed individuare eventuali difetti visivi. Le due lastre vengono poi assemblate ad un telaio di profilato, generalmente in alluminio o materiale termoisolante (larghezza variabile da 6 a 30 mm), che serve da distanziatore (3). In fase di montaggio, il profilo distanziatore dotato di adesivo butilico viene posizionato sul primo vetro, successivamente il secondo vetro viene posizionato sulla faccia

del profilo libero e l'unità viene pressata in modo che il profilo aderisca perfettamente al vetro. Il profilato, vuoto internamente e con dei piccoli fori sulla superficie interna, contiene un essicante/disidratante per eliminare qualsiasi traccia di vapore d'acqua rimasta nell'intercapedine d'aria, assicurando così la trasparenza del vetro ed evitando fenomeni di condensa. Le lastre vengono incollate al distanziatore con mastici, volti a garantire l'impermeabilità e la sigillatura dell'insieme. In particolare, le unità sono soggette alle seguenti operazioni eseguite in sequenza per la realizzazione di vetrocamera: una prima sigillatura lungo il perimetro mediante guarnizioni organiche (4), l'eventuale riempimento con gas argon o krypton (5), il monitoraggio dei livelli di riempimento dei gas e del colore e, infine, una sigillatura secondaria per sigillare ermeticamente i vetrocamera (6). Una volta riempito l'intero perimetro, il vetro viene posizionato su cavalletti dove il sigillante indurisce. Nel caso di unità a triplo vetro, il processo viene ripetuto per la produzione di vetrocamera aggiuntivi e, a conclusione, le unità vengono imballate (7) e predisposte per la spedizione ai clienti.

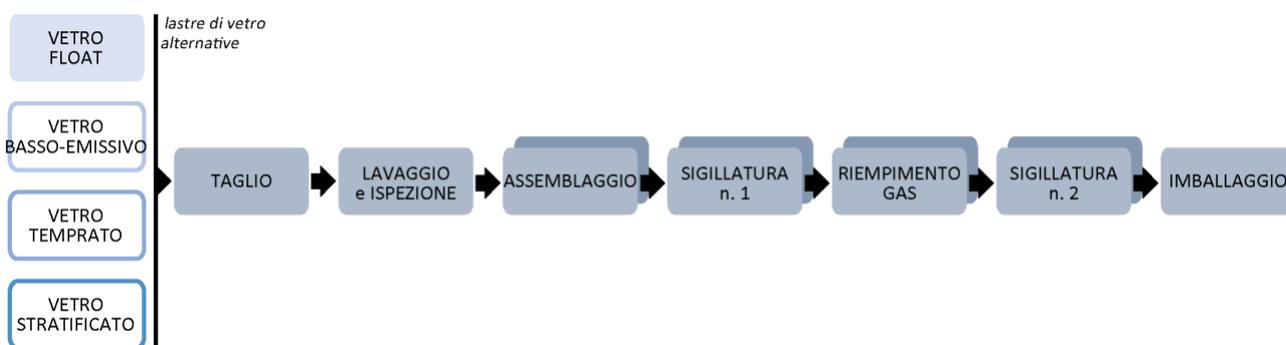


Fig. 3.1.5. Processo di produzione di vetrocamera a doppio e triplo vetro. Fonte: Elaborazione PoliMi.

A seconda dei tipi di vetro e vetrocamera, i sistemi finestra (vetri e telai) presentano diverse caratteristiche tecniche, in particolare con variazioni significative sia per quanto riguarda la trasmittanza termica (Tab. 3.1.3) sia per i coefficienti di guadagno di calore solare (Tab. 3.1.4). Di seguito vengono forniti i rispettivi valori tipici, in relazione ai livelli di sofisticazione delle diverse tipologie di finestre.

Tipologie	U-value [W/m <sup>2</sup> K]
Vetro singolo trasparente	5,4
Vetro doppio, intercapedine 12 mm	2,8
Vetro doppio, intercapedine 20 mm, rivestimento basso emissivo	1,7

Tipologie	U-value [W/m <sup>2</sup> K]
Vetro doppio, intercapedine 20 mm, rivestimento basso emissivo, riempimento argon	1,5
Vetro triplo, spessore complessivo 28 mm	1,1
Vetro triplo, spessore complessivo 52 mm, rivestimento basso emissivo, riempimento argon	0,75

Tab. 3.1.3. Valori di trasmittanza termica (U-value in W/m<sup>2</sup>K) tipici per le varie tipologie di finestre. Fonte: Rielaborazione PoliMi da EC GPP, 2010.

Tipologie	G-value / SHGC
Vetro singolo, trasparente	0,86
Vetro singolo, colorato (bronzio o grigio)	0,73
Vetro doppio, trasparente	0,76
Vetro doppio, colorato (bronzio o grigio)	0,62
Vetro doppio, tinta ad alte prestazioni	0,48
Vetro doppio, alto guadagno solare, basso-emissivo	0,71
Vetro doppio, moderato guadagno solare, basso-emissivo	0,53
Vetro doppio, basso guadagno solare, basso-emissivo	0,39
Vetro triplo, moderato guadagno solare, basso-emissivo	0,50
Vetro triplo, basso guadagno solare, basso-emissivo	0,33

Tab. 3.1.4. Valori di guadagno di calore solare (G-value, Solar Heat Gain Coefficient) tipici per le varie tipologie di finestre. Fonte: Rielaborazione PoliMi da EC GPP, 2010.

## 3.2 Impatto socio-economico della filiera

L'industria del vetro – settore Ateco 23.1 (Fabbricazione di vetro e prodotti di vetro) – è parte integrante del comparto manifatturiero C, dedicato alla fabbricazione di altri prodotti della lavorazione di minerali non metalliferi (23), a cui appartiene anche la produzione di prodotti refrattari in porcellana e ceramica, in calcestruzzo, etc. Nello specifico tale settore comprende il vetro cavo e vetro piano – in particolare Ateco 23.11.00 (fabbricazione di vetro piano) e Ateco 23.12.00 (lavorazione e trasformazione di vetro piano) – impiegando quest'ultimo nel settore dell'ambiente costruito. Si stima infatti che, rispetto alla produzione totale di vetro piano, l'80% è utilizzato nel settore edilizio, il 15% nel settore automobilistico e il 5% nel solare e in altre applicazioni (Glass for Europe, 2022).

In Italia, il fatturato complessivo del settore registrato nel 2018 è pari a 2,83 Miliardi di Euro e in crescita nel triennio (Fig. 3.2.1), così come la produzione nazionale di vetro piano e di vetro cavo

(Fig. 3.2.2). Complessivamente, infatti, la produzione di vetro ha registrato un aumento del 10,2% nel corso di un quinquennio, passando da 4.845.277 tonnellate nel 2014 a ben oltre 5 milioni di tonnellate nel 2018 (Assovetro, 2020).



Fig. 3.2.1. Industria vetro | Fatturato per origine nel 2016-2018 (Euro). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

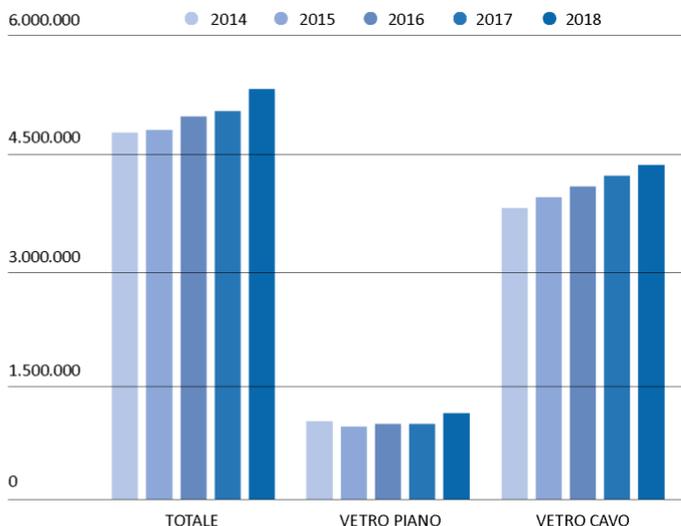


Fig. 3.2.2. Industria vetro | Produzione di vetro nel 2014-2018 (ton). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

Per quanto riguarda il vetro piano (Assovetro, 2022), la produzione si è mostrata in crescita fino al 2018, per poi decrescere negli anni successivi e raggiungere un picco nel 2021 con una produzione di 1.190.251 tonnellate (Fig. 3.2.3). Rispetto al 2020 la produzione 2021 ha registrato un incremento del 23,2%. Tale rialzo è associato a una crescita delle importazioni che, se nel 2020 erano diminuite del 31%, si rilevano ora in aumento, arrivando a 153.119 tonnellate. Allo stesso modo, le esportazioni, pari nel 2021 a 302.775 tonnellate, sono aumentate del 9% rispetto all'anno passato. I dati di interscambio sono riportati nel dettaglio per il vetro float (Fig. 3.2.4) che, insieme al vetro tirato in lastre (non più fabbricato in Italia) e alle lastre di vetro greggio, costituisce il settore industriale del vetro piano.

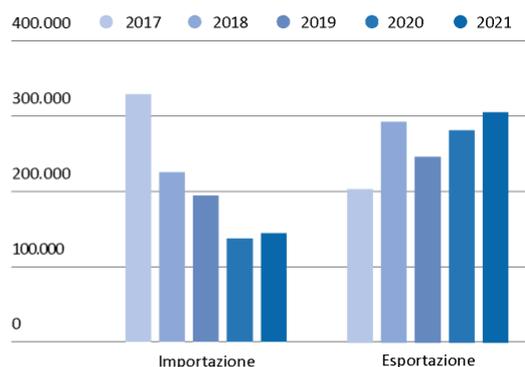
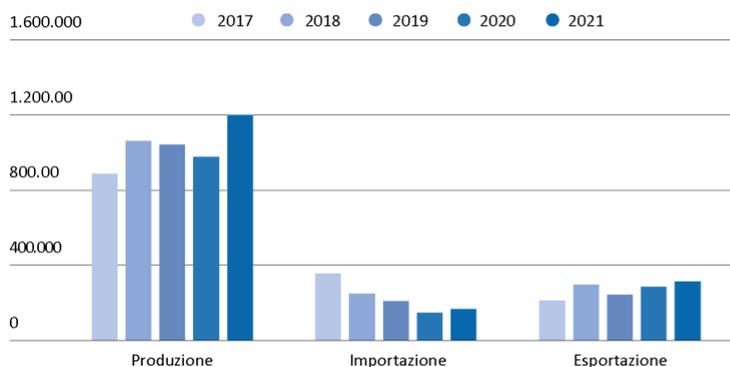


Fig. 3.2.3. Vetro piano | Produzione, importazione, esportazione e consumo apparente nel 2017-2021 (ton).  
Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2022.

Fig. 3.2.4. Vetro piano float | Importazioni ed esportazioni nel 2017-2021 (ton). Fonte:  
Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2022.

Il settore del vetro piano ha risentito in modo particolare delle problematiche intercorse nel 2020, con chiusure forzate quali misure urgenti per l'emergenza pandemica. Tali effetti sono evidenti anche rispetto a macchinari e tecnologie per la lavorazione del vetro (GIMAV, 2021), con un fatturato che è diminuito del 24,8%, comportando un calo del 36,2% delle consegne interne. Inoltre, macchinari e tecnologie per la lavorazione del vetro piano hanno perso il 19,9% del proprio interscambio commerciale, dato che risente più del calo delle importazioni (-38,8%) rispetto a quello delle esportazioni (-19,1%). L'Europa si conferma il primo continente per interscambio commerciale, intercettandone il 45% del totale, seguito dai continenti americano e asiatico rispettivamente con il 22,5% e il 15,7% (GIMAV, 2021). È importante però sottolineare che, dopo la crisi del 2020, il mercato italiano del vetro si mostra ora in rapida ripresa, trainato nel settore delle costruzioni dall'erogazione di incentivi e dalla ripresa degli investimenti (OVP, 2021).

Il ruolo dell'industria italiana del vetro è evidente anche a livello europeo (Paesi EU 28), dove nel 2018 con oltre 5 milioni di tonnellate di vetro prodotto, è stata responsabile, da sola, di circa un settimo dell'intera produzione europea (Assovetro, 2020), che risulta di poco superiore a 35 milioni di tonnellate (Tab. 3.2.1). Rispetto alla produzione di vetro piano, superiore a 10 milioni di tonnellate e pari al 30% della produzione totale, l'Italia risulta oggi il quarto paese produttore (con una quota di mercato del 12%) dopo Germania, Polonia e Francia (Glass for Europe, 2022).

Tipologia di vetro	Contenitori di vetro	Vetro piano	Vetro domestico	Lane e filati di vetro	Vetro speciale	Altri	Totale
Produzione	21.755.000	10.643.000	1.337.000	808.000	702.450	158.720	35.404.170
Esportazioni extra-EU	999.228	734.200	317.045	79.109	21.115	375.658	2.526.355
Importazioni extra-EU	874.919	764.327	431.935	537.546	12.442	638.101	3.259.270

Tab. 3.2.1. Industria vetro | Mercato del settore vetro nei Paesi EU-28 nel 2018 (ton).  
Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

Non bisogna però dimenticare che la produzione di vetro piano è un'attività mondiale (Tab. 3.2.2) che comprende quattro gruppi principali: Saint-Gobain (produttore francese), Asahi Glass Company (produttore giapponese presente in Europa con AGC Flat Glass Europe), NSG Group (produttore

giapponese che ha acquisito Pilkington, Regno Unito) e Guardian Industries (produttore statunitense). A queste si aggiunge Sisecam (produttore turco che ha acquisito la società italiana Sangalli), membro insieme ai precedenti produttori dell'Associazione europea del vetro piano: Glass for Europe. Eccetto Guardian Industries, gli altri produttori mondiali hanno sedi in Italia, per un totale di 6 linee float (Tab. 3.2.3).

<b>Azienda</b>	<b>N° stabilimenti</b>	<b>Localizzazione</b>
Saint-Gobain	16	Germania (4), Francia (3), Belgio (2), Spagna (2), Italia (1), Portogallo (1), Regno Unito (1), Polonia (1), Romania (1)
AGV Flat Glass Europe	13	Belgio (4), Francia (2), Italia (2), Paesi Bassi (1), Repubblica Ceca (3), Spagna (1)
Pilkington	12	Germania (4), Regno Unito (3), Italia (2), Finlandia (1), Svezia (1), Polonia (1)
Guardian	8	Lussemburgo (2), Spagna (2), Germania (1), Regno Unito (1), Ungheria (1), Polonia (1)
Euroglas	3	Francia (1), Germania (2)
Manfredonia Vetro/Sangalli	1	Italia (1)
Sisecam	1	Bulgaria (1)
Interpane	1	Francia (1)
Ges Scaieni	1	Romania (1)

Tab. 3.2.2. Vetro piano float | Produttori mondiali e localizzazione in Europa nel 2007.

Fonte: Rielaborazione PoliMi da Scalet et al., 2013.

<b>Nazione</b>	<b>Numero linee float, 2013</b>	<b>Capacità totale, 2011</b> [tonnellate metriche al giorno]
Germania	10	6.400
Italia	6	4.000
Spagna	5	3.000
Francia	5	3.600
Polonia	5	2.850
Belgio	4	2.400
Regno Unito	4	3.050

Tab. 3.2.3. Vetro piano float | Stabilimenti di vetro float e capacità per continente.

Fonte: Rielaborazione PoliMi da Scalet et al., 2013.

Per servire diversi bacini d'utenza e adottare logiche volte all'ottimizzazione delle operazioni logistiche, le 6 industrie di vetro piano presenti in Italia sono distribuite su tutto il territorio nazionale. Esse presentano in totale un numero di addetti pari a 3.312 (Tab. 3.2.4), da sommare alla quota di dipendenti presenti nelle molteplici aziende di lavorazione e trasformazione del vetro, dislocate anch'esse in modo capillare ed omogeneo.

Comparto	Totale Aziende	Dipendenti*	Totale Fatturato [mil EUR]
Vetro piano	6	3.312	1.114.752.589
Vetro cavo	19	8.273	2.391.793.101
Lana e filati	3	513	174.657.220

\* Il numero dei dipendenti in tabella, calcolato al 31/12, include solo i dipendenti a tempo determinato e indeterminato; sono esclusi i lavoratori con altre forme contrattuali.

Tab. 3.2.4. Industria vetro | Aziende, dipendenti e fatturato nel 2018.  
Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

### 3.3 Impatti ambientali e strumenti di sostenibilità

La produzione di vetro è un'attività altamente energivora in quanto richiede per i processi industriali di fusione e formatura l'impiego di forni ad elevate temperature, a differenza di altri settori, con attività continue e costanti tutto l'anno (solo in caso di manutenzioni straordinarie o fine vita si verificano fermi dei forni). Nello specifico, durante i processi di produzione e lavorazione di vetro piano, i principali consumi energetici (Martini et al., 2021), espressi in tonnellate equivalenti di petrolio (nella prassi OECD/IEA unità di misura comunemente più usata per rappresentare il contenuto energetico dei vari combustibili, 1 tep = 44.769 GJ), sono associati a:

- fusione (>20% tep) e formatura del vetro (>5% tep), quali prime lavorazioni (dati di stima nel caso di forno singolo da verificare per singolo vettore energetico e per confronto con il consumo energetico totale calcolato per il livello superiore);
- tempra (>5% tep) e stratificazione (>5% tep), quali seconde lavorazioni (dati di stima da verificare per singolo vettore energetico e per confronto con il consumo energetico totale calcolato per il livello superiore).

Consumi energetici inferiori al 5% del consumo energetico totale sono attribuiti ai servizi ausiliari (es. impianto di aria compressa per la movimentazione dei macchinari, impianto acque di raffreddamento e di lavaggio vetri, impianto filtrazione emissioni in atmosfera) e ai servizi generali

(es. centrali termiche, condizionamento, illuminazione, gruppo elettrogeno). Analogamente possono essere trascurati i consumi energetici legati a vettori secondari, quali vapore, acqua calda, gasolio. Da notare, però, che la produzione industriale dei gas nobili utilizzati per la realizzazione di vetrocamera (xeno, argon e krypton) richiede una grande quantità di energia per la distillazione di aria liquida. Nella pratica comune, in alternativa all'aria, viene immesso argon, in quanto più economico e meno inquinante rispetto agli altri gas nobili (EC GPP, 2010).

La principale fonte di energia per i produttori di vetro piano in Italia (per la produzione di vetro float) è rappresentata per il 91% da energia termica e per il 9% da energia elettrica (Fig. 3.3.1). Analizzando la suddivisione dei consumi energetici per le differenti aree funzionali (Fig. 3.3.1), è possibile osservare come circa il 94% del consumo totale di energia è imputato alle attività principali e il rimanente 6% a servizi ausiliari e generali. Inoltre, dalle diagnosi energetiche (Martini et al., 2021), emerge come le attività principali sono caratterizzate da una netta prevalenza del consumo termico (gas naturale e/o olio combustibile), mentre al contrario i servizi ausiliari presentano una predominanza del consumo elettrico rispetto al consumo termico (Fig. 3.3.2). Da notare che ad oggi non è disponibile alcuna tecnologia in grado di far funzionare i forni float a sola elettricità e gli impianti più performanti sono alimentati da un mix di combustibili fossili ed elettricità, inferiore al 5% a causa degli elevati costi (Scalet et al., 2013). Tuttavia, sono stati individuati interventi di efficientamento energetico e soluzioni tecnologiche specifiche per il settore del vetro (Martini et al., 2021), delimitando le nuove frontiere della produzione di vetro piano per contribuire ad un'Europa ad emissioni zero (Glass for Europe, 2020).

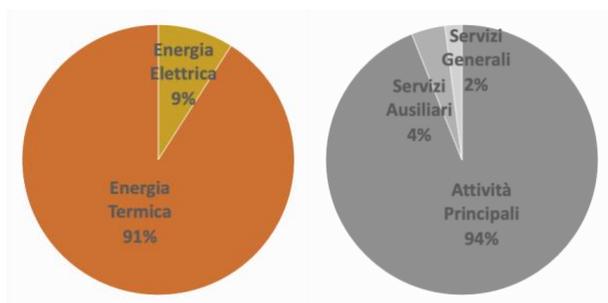


Fig. 3.3.1. Vetro piano | Vettori energetici in fase di produzione (a sx) e ripartizione dei consumi per aree funzionali (a dx) (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Martini et al., 2021.

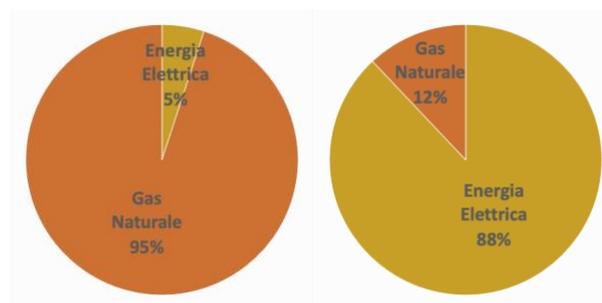


Fig. 3.3.2. Vetro piano | Vettori energetici in fase di produzione nelle attività principali (a sx) e sui servizi ausiliari (a dx) (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Martini et al., 2021.

Per quanto riguarda i processi di lavorazione del vetro piano (lavorazione vetro float per realizzazione di vetri basso-emissivi, temprati, stratificati e vetrocamera), il consumo elettrico incide

per circa l'80% sui consumi totali e solo il restante 20% è relativo al consumo termico (Fig. 3.3.3). Dalla ripartizione dei consumi nelle diverse aree funzionali (Fig. 3.3.4), il consumo elettrico è concentrato principalmente sulle attività principali (78%), seguito da servizi ausiliari (16%) e servizi generali (6%). Andamento opposto si rivela invece per il consumo termico, con un'incidenza del 45% sia per attività principali che servizi generali, e una quota pari al 10% per i servizi ausiliari (Martini et al., 2021).

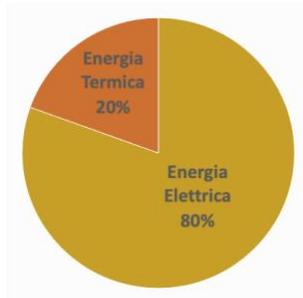


Fig. 3.3.3. Vetro piano | Vettori energetici in fase di lavorazione del vetro (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Martini et al., 2021.

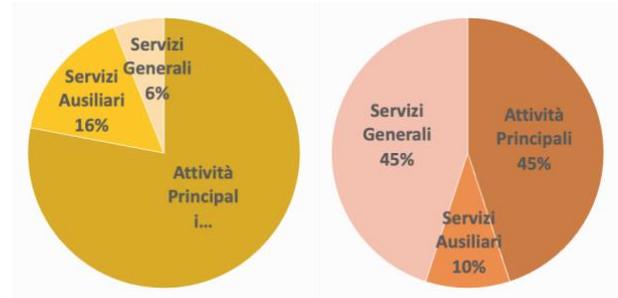


Fig. 3.3.4. Vetro piano | Ripartizione dei consumi elettrici (a sx) e termici (a dx) per aree funzionali (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Martini et al., 2021.

Consumi assoluti, efficienza energetica e utilizzo di energia prodotta da fonti rinnovabili risultano pertanto cruciali in ottica di sostenibilità. In particolare, i consumi di energia elettrica ammontano a circa 0,25 MWh/ton per unità di vetro fuso prodotto (Assovetro, 2020). Tale quota è crescentemente approvvigionata da fonti rinnovabili (Fig. 3.3.5), considerando sia l'energia elettrica autoprodotta dalle aziende, grazie all'installazione di pannelli fotovoltaici a servizio degli impianti produttivi, sia l'energia elettrica acquistata con certificati di origine da fonte rinnovabile (Fig. 3.3.6).

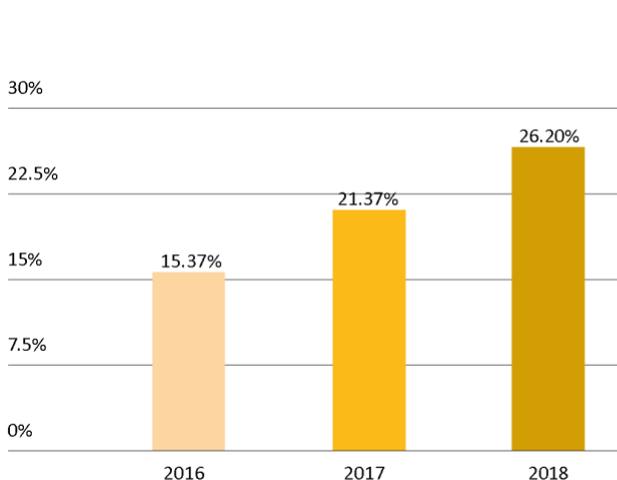


Fig. 3.3.5. Industria vetro | Energia elettrica

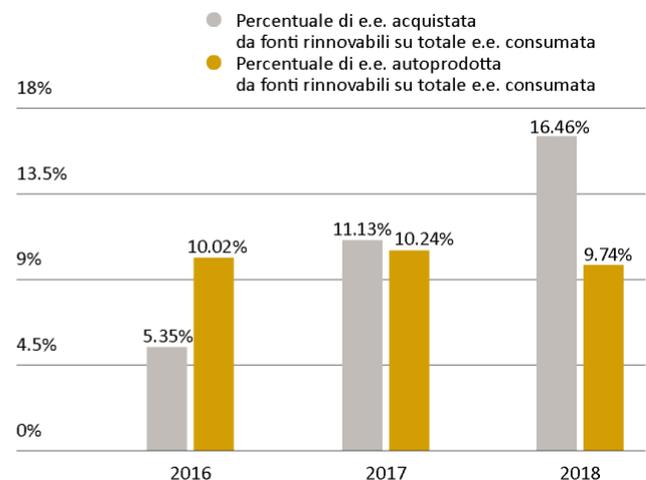


Fig. 3.3.6. Industria vetro | Energia elettrica per

proveniente da fonte rinnovabile sul totale di energia consumata nel 2016-2018 (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

fonte rinnovabile nel 2016-2018 (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

I consumi idrici dell'industria del vetro rappresentano un altro aspetto significativo in materia ambientale. Durante la produzione, infatti, l'acqua viene impiegata in diverse fasi di processo, soprattutto per il lavaggio del vetro e per il raffreddamento di impianti e apparecchiature (es. compressori). In misura minore, essa è poi adoperata ad esempio per il raffreddamento degli scarti di produzione, affinché possano essere trasportati e quindi riciclati nel forno (rottami di vetro di produzione interna). Dalle analisi statistiche, il consumo di acqua annuale risulta sempre superiore a 10 milioni di m<sup>3</sup>, richiedendo un consumo di circa 2 m<sup>3</sup> di acqua per tonnellata di vetro fuso (Assovetro, 2020). La principale fonte di approvvigionamento idrico per i processi produttivi è per il 69% da prelievo da pozzo, per il 20,2% da acque superficiali, per il 10,6% da acquedotto e per il 0,2% dal recupero di acqua piovana (Fig. 3.3.7). Tuttavia, è importante evidenziare come, rispetto al passato, i consumi idrici siano notevolmente diminuiti, in quanto le aziende si sono dotate di circuiti idrici chiusi, installando sistemi mirati alla riduzione delle perdite e al riciclo delle acque di pulizia e raffreddamento (Fig. 3.3.8).



Fig. 3.3.7. Industria vetro | Consumo di acqua per fonte di prelievo nel 2018 (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

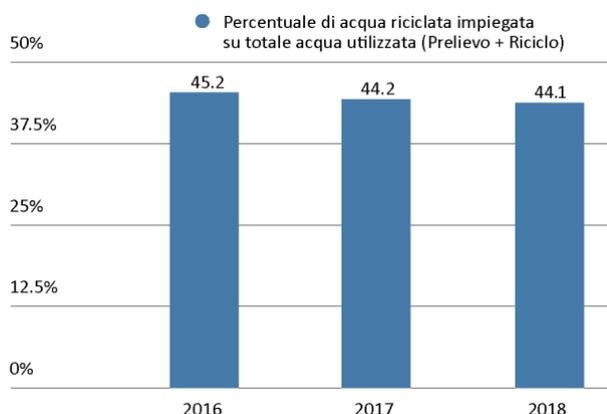


Fig. 3.3.8. Industria vetro | Recupero idrico medio nel 2016-2018 (%). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

Altro aspetto particolarmente critico dal punto di vista ambientale per l'industria del vetro è rappresentato dalle emissioni in atmosfera, che derivano fondamentalmente dal processo di fusione ad alta temperatura e dipendono dal tipo di vetro prodotto, dalle materie prime, dal tipo di forno fusorio e dal combustibile utilizzato. Gli inquinanti principali sono rappresentati da anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>) e polveri (Assovetro, 2020). Considerando

il periodo di un triennio, le emissioni medie di CO<sub>2</sub> prodotte per tonnellata di vetro fuso sono pari a 0,34 ton/ton (Fig. 3.3.9), mentre le altre emissioni inquinanti sono di molto inferiori, registrando come valore più significativo quello associato ai gas NOx (Fig. 3.3.10). Nell'ambito del Sistema EU ETS, i produttori di vetro devono disporre di un piano di monitoraggio (parte integrante anche per l'autorizzazione di impianti industriali) e comunicare annualmente le proprie emissioni tramite una relazione soggetta a verificatore terzo accreditato. Sulla base delle tecniche virtuose specifiche per la riduzione delle emissioni derivate dalla produzione del vetro piano (Scalet et al., 2013), le aziende hanno in corso piani di miglioramento mirati ad ottenere importanti riduzioni delle emissioni nei prossimi anni.

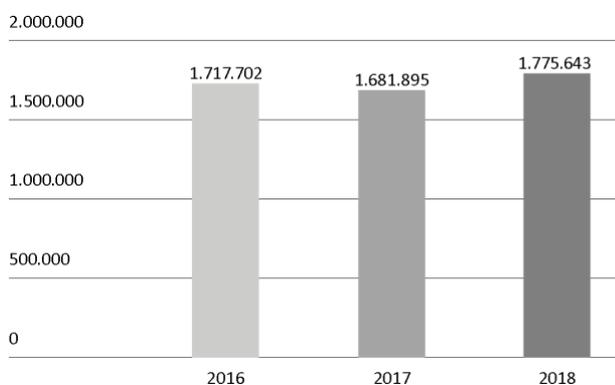


Fig. 3.3.9. Industria vetro | Emissioni di CO<sub>2</sub> da forno per tonnellata di vetro fuso nel 2016-2018 (ton/ton). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

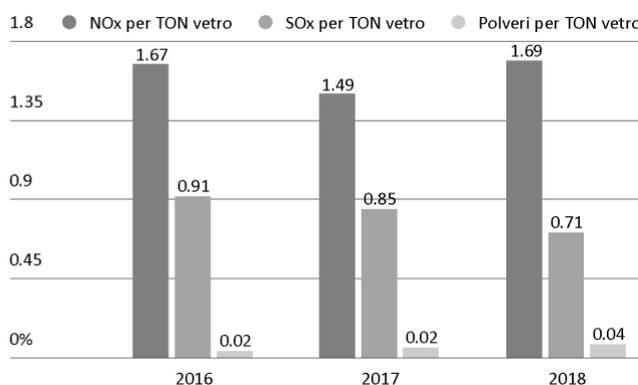


Fig. 3.3.10. Industria vetro | Altre emissioni inquinanti per tonnellata di vetro fuso nel 2016-2018 (kg/ton). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

La produzione di rifiuti è invece limitata nel settore del vetro, consentendo buone percentuali di recupero dei rifiuti prodotti. Ad esclusione del rottame di vetro, che viene generalmente reimmesso nel processo produttivo, le altre principali tipologie di rifiuti non pericolosi sono gli imballaggi (es. carta, cartone, plastica, legno, misti). Essi costituiscono la componente maggioritaria (Fig. 3.3.11) e sono quasi totalmente recuperati tramite processi di riciclo o uso come combustione per produrre energia (Assovetro, 2020). I rifiuti pericolosi, ossia famiglie di oli ed emulsioni oleose, imballaggi contaminati (es. fusti da olio), fanghi, materiali assorbenti (es. filtranti) e refrattari, costituiscono il 15% del totale dei rifiuti prodotti (Fig. 3.3.11).

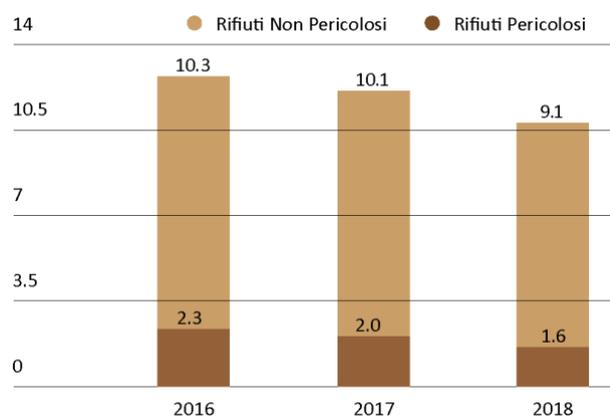


Fig. 3.3.11. Industria vetro | Produzione di rifiuti pericolosi e non per tonnellata di vetro fuso nel 2016-2018 (kg/ton). Fonte: Rielaborazione PoliMi da Assovetro, 2020.

Dato che il vetro è un materiale permanente che può essere potenzialmente riciclato al 100%, il rottame di vetro può essere fuso e riprodotto infinite volte senza perdere le proprie caratteristiche e proprietà e senza bisogno di aggiungere additivi o reagenti. In pratica, si stima che fino al 95% dei rifiuti della lavorazione di vetro venga riciclato e/o reimpresso direttamente nei processi di produzione (Scalet et al., 2013), rispondendo pienamente alle sfide della transizione verso un'economia circolare. I benefici connessi all'impiego di rottame di vetro nella composizione della miscela vetrificabile sono molteplici e principalmente volti al risparmio energetico. Da una parte, implica un risparmio diretto connesso alla riduzione dell'energia di fusione, poiché l'utilizzo di rottame di vetro nella miscela abbassa la temperatura necessaria alla fusione, riducendo quindi la quantità di combustibile. Dall'altra, un risparmio energetico indiretto, poiché consente di sostituire materie prime ad alto contenuto energetico (in particolare sabbie silicee e carbonato di calcio), limitando quindi lo sfruttamento delle cave. Come dichiarato nelle certificazioni ambientali (EPD), i prodotti in vetro oggi disponibili contengono una quota parte di contenuto di riciclato, espressa tramite l'indicatore di impatto SM - *Use of Secondary Material* (Tab. 3.3.1) e calcolata anche in termini percentuali rispetto al peso totale.

SM	Float glass	Coated glass	Toughened glass	Laminated glass	Double glazing	Triple glazing
average EPD content	2,26E-01	1,02E-01	5,00E-02	6,11E-02	1,43E+00	3,22E+00
min EPD content	1,00E-01	7,53E-02	-	2,28E-03	1,99E+00	2,99E+00
max EPD content	5,55E-01	2,32E-01	1,00E-01	1,20E-01	2,29E+00	3,45E+00
recycled content %	9%	4%	2%	2%	7%	11%

Tab. 3.3.1. Impatti SM [kg/m<sup>2</sup>] dei prodotti in vetro per 1 mm di spessore (sx) e dei vetrocamera per 4-16-4 doppi vetri e 4-14-4-14-4 tripli vetri (dx). Fonte: Elaborazione PoliMi.

In termini di efficienza nell'utilizzo delle risorse, inoltre, il settore risulta particolarmente produttivo, richiedendo un input di 1,11 tonnellate di materiali per una tonnellata di vetro fuso (CoReVe, 2021).

Rispetto ai materiali in entrata, la quota parte di rottame di vetro dipende principalmente dalle modalità di raccolta e dalla qualità del rottame. Da notare, infatti, che per la produzione di vetro piano, è possibile utilizzare solo rottame di vetro piano, escludendo di conseguenza il rottame di vetro cavo che costituisce oggi il principale materiale di raccolta. Inoltre, i requisiti di qualità per l'uso del rottame nella produzione di vetro piano sono molto severi, consentendo il riutilizzo per la produzione del vetro float solo di vetro piano non contaminato di altissima qualità. Ad esempio, le impurità di ceramica e metalli non ferrosi non sono praticamente accettabili, mentre le impurità ferrose devono essere per tonnellata di vetro inferiori a 2 ppm nel caso di vetro piano contro i 50 ppm nel caso di vetro cavo (Vieitez et al., 2011). La prevalenza di rottame utilizzato nella produzione del vetro piano è costituita pertanto da rottame interno, riciclato direttamente nelle linee di produzione (Tab. 3.3.2). Tuttavia, i produttori di vetro piano (in particolare vetro float) utilizzano anche rottame esterno, quasi esclusivamente da trasformatori di vetro piano perché questo garantisce la ricezione di specifiche proprietà di rottame. In questo modo, vengono recuperati i rifiuti di vetro provenienti dalla trasformazione delle lastre di vetro e da prodotti non consegnati al cliente finale (rottame *pre-consumer*), seppur in quantità limitata a causa della ridotta disponibilità. Infine, nel settore edile, una minima parte del rottame esterno deriva da ristrutturazioni e demolizioni edilizie (rottame *post-consumer*). Il rottame di vetro piano che non supera i test di qualità per essere riutilizzato nella produzione di vetro float, viene adoperato nella produzione di contenitori di vetro e lana di vetro.

<b>Rottame di vetro - Cullet</b>	<b>Specifiche a seconda dell'origine</b>
19% <i>Internal cullet</i>	<i>Cullet</i> proveniente direttamente dalla produzione del vetro. Questo tipo di rottame non esce dall'impianto di produzione del vetro piano e viene riciclato direttamente sulle linee di produzione.
11% <i>Pre-consumer cullet</i>	<i>Cullet</i> proveniente dalla trasformazione delle lastre di vetro e da prodotti non ancora consegnati al cliente finale. Questo tipo di rottame si trova nei siti di trasformazione.
<1% <i>Post-consumer cullet</i>	<i>Cullet</i> generato dopo la consegna al cliente finale. Nel settore edile, il rottame post-consumo proviene principalmente da ristrutturazioni e demolizioni edilizie.

Tab. 3.3.2. Vetro piano float | Percentuali e tipologia di rottame di vetro immesse nei forni di produzione nel 2018. Fonte: Rielaborazione PoliMi da Saint-Gobain, 2018.

In questo contesto, il GPP (*Green Public Procurement*, ovvero Acquisti Verdi nella pubblica amministrazione), nonché la serie di strumenti normativi introdotti dalle politiche comunitarie in

materia di risparmio energetico, rispetto dell'ambiente e comfort in edilizia, interessano in modo particolare il vetro piano, quale elemento base nella realizzazione dei serramenti (Tab. 3.3.3). Sia nel caso di edifici di nuova costruzione sia di interventi sul costruito, l'applicazione di vetri ad alta efficienza energetica rappresentano ormai lo standard per un'edilizia orientata al risparmio energetico.

<b>Cause dei principali impatti ambientali</b>	<b>Approccio GPP</b>
Dispersioni di energia termica in fase d'uso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Promozione dei concetti di architettura bioclimatica nella progettazione dell'edificio</li> <li>- Utilizzo di serramenti esterni energeticamente efficienti</li> </ul>
Utilizzo di energia, materie prime e sostanze chimiche in fase di produzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Prolungamento della vita utile dei serramenti esterni</li> <li>- Utilizzo di materiali riciclati e di legno proveniente da foreste gestite in modo sostenibile</li> <li>- Utilizzo di sostanze chimiche non pericolose per l'uomo e per l'ambiente</li> </ul>
Produzione di rifiuti in fase di produzione e fine vita	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Promozione di sistemi di recupero a fine vita (per materiali e componenti)</li> <li>- Promozione di prodotti che possano essere facilmente smantellati e riciclati a fine vita</li> </ul>

Tab. 3.3.3. Cause dei principali impatti ambientali dei serramenti esterni ed approccio GPP per la loro mitigazione. Fonte: Rielaborazione PoliMi da EC GPP, 2010.

In Italia, con la pubblicazione del DM 11/10/2017, il Ministero dell'Ambiente ha aggiornato i "Criteri Ambientali Minimi (CAM) per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici", facendo chiarezza su alcune questioni importanti per il settore del vetro. Rispetto ai dispositivi di protezione solare richiesti per vetrate con esposizione Sud, Sud-Est e Sud-Ovest, il requisito può essere soddisfatto anche attraverso le sole e specifiche caratteristiche della componente vetrata (es. vetri selettivi e a controllo solare). Si conferma quindi che i vetri rivestiti rientrano pienamente tra i "sistemi di ombreggiamento fissi o mobili verso l'esterno", a condizione di conformità con i requisiti minimi di controllo solare. Sebbene all'interno dei CAM non sono dichiarati criteri specifici per i prodotti in vetro, essi possono fornire un contributo a una serie di criteri comuni a tutti i componenti edilizi. Si tratta in particolare del requisito di disassemblabilità (pari ad almeno il 50% peso/peso dei componenti edilizi) e del contenuto di riciclato (pari ad almeno il 15% in peso valutato sul totale dei materiali utilizzati). La percentuale di materia riciclata deve essere dimostrata tramite una delle seguenti opzioni: dichiarazione ambientale di Tipo III (UNI EN

15804, ISO 14025); certificazione di prodotto rilasciata da un organismo di valutazione della conformità (es. ReMade in Italy); autodichiarazione ambientale di Tipo II (ISO 14021).

Allargando il campo di applicazione ai serramenti (comprensivi di lastre di vetro e profili di supporto), sono attualmente disponibili vari Ecolabel specifici per i sistemi-finestra (EC GPP, 2010; Tarantini et al., n.d.). Si tratta di marchi di qualità ecologica sviluppati in base al contesto di riferimento (Tab. 3.3.4), che contraddistinguono prodotti e servizi caratterizzati da elevati standard prestazionali associati a ridotti impatti ambientali durante l'intero ciclo di vita. La prestazione ambientale è valutata su base scientifica in relazione ad un sistema di criteri selettivi, peculiari per ogni etichetta ecologica volontaria, ed è sottoposta a certificazione da parte di un ente indipendente competente. I criteri Ecolabel sono generalmente stabiliti tramite un'ampia partecipazione delle parti interessate, tra cui le associazioni di categoria. A livello europeo, molte associazioni di categoria hanno inoltre fissato propri standard ed etichette che le aziende devono rispettare per diventare membri. In Olanda, ad esempio, l'associazione di finestre e facciate in metallo (VMRG) ha un'etichetta per le finestre in alluminio e acciaio, denominata "VMRG-Keurmerk"; così come l'associazione dell'industria degli elementi per facciate in PVC (VKG) ha un'etichetta chiamata "VKG Keurmerk" (EC GPP, 2010).

Nome	Titolo	Contesto	Fonte
Nordic Swan	Ecolabelling of Windows and Exterior Doors, Criteria Document, covering the period 12 December 2004 – 30 June 2009, Version 2.5	Danimarca, Finlandia, Islanda, Norvegia, Svezia	<a href="https://www.svanen.se/Default.aspx?tabName=CriteriaDetail&amp;multemID=&amp;pgr%20=62">https://www.svanen.se/Default.aspx?tabName=CriteriaDetail&amp;multemID=&amp;pgr%20=62</a>
Korean Ecolabel	Product Environmental Criteria for Windows, EL250 2003/1/2003-200	Corea	<a href="http://www.koeco.or.kr/eng/business/cover_document/EL250.pdf">http://www.koeco.or.kr/eng/business/cover_document/EL250.pdf</a>
Hong Kong Green Label Scheme	Product Environmental Criteria for Windows, GL-008-004	Hong Kong	<a href="http://www.greencouncil.org/en/g/greenlabel/cert.asp">http://www.greencouncil.org/en/g/greenlabel/cert.asp</a>
Chinese Ecolabel	Technical Requirements of Products Categories for China Environmental Labelling Program, Energy Saving Doors and Windows, HBC 14-2002	Cina	<a href="http://www.greencouncil.org/en/g/greenlabel/china2.asp">http://www.greencouncil.org/en/g/greenlabel/china2.asp</a>

Nome	Titolo	Contesto	Fonte
Energy Star	Energy Star for Windows, Doors and Skylights	Canada	<a href="http://www.oeenrcan.gc.ca/energy/star/english/consumers/window.cfm?attr=4">http://www.oeenrcan.gc.ca/energy/star/english/consumers/window.cfm?attr=4</a> <a href="http://www.oeenrcan.gc.ca/energy/star/english/consumers/ratings.cfm?text=N&amp;priorityview=N">http://www.oeenrcan.gc.ca/energy/star/english/consumers/ratings.cfm?text=N&amp;priorityview=N</a>
Energy Star	Resources for Window, Door, and Skylight Manufacturers and Retailers	USA	<a href="http://www.energystar.gov/index.cfm?c=manuf_res_pt_windows">http://www.energystar.gov/index.cfm?c=manuf_res_pt_windows</a> <a href="http://www.energystar.gov/index.cfm?c=windows.criteria">http://www.energystar.gov/index.cfm?c=windows.criteria</a>

Tab. 3.3.4. Principali Ecolabel specifici per i serramenti (telaio+vetro). Fonte: Elaborazione PoliMi.

Per quanto riguarda gli studi LCA oggi disponibili nell'ambito della filiera vetro (Tab. 3.3.5), si riscontrano informazioni assai limitate, relative a specifici contesti di riferimento e a una ridotta gamma di indicatori ambientali.

Autore (anno)	Titolo	Indicatori	Contesto	Fonte
Anglarill AG (2018)	Life Cycle Assessment of a conventional float glass production and comparison with regenerative alternatives	Global warming potential, Fossil depletion, Terrestrial acidification, Water depletion, Ozone depletion	Germania	<a href="https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/120519/BA%20AnnaGrane.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y">https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/120519/BA%20AnnaGrane.pdf?sequence=1&amp;isAllowed=y</a>
Usbeck VC, Pflieger J, Sun T (2011)	Life Cycle Assessment of Float Glass: summary report	Global warming potential, Primary energy demand, Eutrophication potential, Acidification potential, Photochemical ozone creation potential	Europe	<a href="https://glassforeurope.com/wp-content/uploads/2018/04/Life-Cycle-Assessment.pdf">https://glassforeurope.com/wp-content/uploads/2018/04/Life-Cycle-Assessment.pdf</a>
Ramkumar	Life Cycle Assessment study of glass in built environment	Global warming potential, Primary energy demand	n.d. (USA ?)	<a href="https://issuu.com/ramkumar95/docs/lca_assignment_of_glass_a0123482_">https://issuu.com/ramkumar95/docs/lca_assignment_of_glass_a0123482_</a>

Tab. 3.3.5. Studi LCA della filiera del vetro per l'edilizia. Fonte: Elaborazione PoliMi.

Al contrario, le aziende di vetro mostrano un crescente interesse per le certificazioni ambientali di prodotto EPD (*Environmental Product Declaration*), oltre che verso l'adozione di sistemi di gestione certificati volti ad assicurare il miglioramento continuo delle performance ambientali (ISO

14001:2015), di qualità (ISO 9001:2015), di salute e sicurezza (OHSAS 18001:2007). Per questioni di competitività sul mercato e in ottica di sostenibilità, i produttori sono infatti sempre più motivati ad ottenere certificazioni EPD, dichiarando in modo trasparente gli impatti ambientali dei propri prodotti. In particolare, a seconda del programma selezionato, le EPD della filiera vetro si basano su specifiche PCR (*Product Category Rules*) di riferimento (Tab. 3.3.6), definite dal Program Operator per ciascuna tipologia di prodotto e contenenti le regole per la conduzione dell’LCA e dell’EPD stessa. Da notare che, per tale motivo, EPD di programmi differenti possono non essere confrontabili.

<b>Program Operator</b>	<b>Titolo</b>	<b>Contesto</b>
IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V.	Requirements on the EPD for Plate glass for construction	Germania
IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V.	Requirements on the EPD for Windows and doors	Germania
ift Rosenheim GmbH	Certification Programme for Coated Glass Products for Thermal and Solar Protection	Germania
International EPD System	Flat Glass Products (EN 17074:2019)	Internazionale
International EPD System	Windows and doors (EN 17213:2020)	Internazionale
ITB – Instytut Techniki Budowlanej	GENERAL PCR v1.4 PN-EN 15804+A1:2014-04 based	Polonia
NSF International	GANA PCR for Flat Glass: UN CPC 3711	Internazionale
<b>Norma</b>	<b>Titolo</b>	<b>Contesto</b>
EN ISO 17074:2019	Glass in building — Environmental product declaration — Product category rules for flat glass products	Europa
EN ISO 17213:2020	Windows and doors — Environmental Product Declarations — Product category rules for windows and pedestrian doorsets	Europa
UNI EN ISO 10077:2018	Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti – Calcolo della trasmittanza termica	Italia

Tab. 3.3.6. Principali PCR di riferimento e normative per lo sviluppo di certificazioni EPD della filiera vetro.  
Fonte: Elaborazione PoliMi.

A testimonianza, è oggi presente sul mercato un’ampia gamma di prodotti in vetro dotati di certificazione EPD. Di seguito sono sistematizzate le principali EPD oggi disponibili (Tab. 3.3.7), articolate in base alle lavorazioni – vetro float (*float glass*), vetro basso-emissivo (*coated glass*),

vetro temprato (*toughened glass*), vetro stratificato (*laminated glass*), vetrocamera doppio vetro (*double glazing*) e triplo vetro (*triple glazing*) – e suddivise per *Program Operator*. In aggiunta, per offrire una panoramica più esaustiva, per ogni EPD vengono specificate le seguenti informazioni di supporto: produttore, prodotto, dettagli prodotto, peso, spessore, unità funzionale, confini di sistema e siti di produzione. Ne consegue che i *Program Operator* di riferimento sono: International EPD System, ift Rosenheim, FDES, ITB, ASTM International, Kiwa. Ad eccezione di una EPD, l'unità funzionale è sempre 1 m<sup>2</sup>, mentre i confini di sistema comprendono la fase di produzione (A1-A3) con riferimenti anche alle fasi *downstream* (A4-A5; B1-B7; C1-C4; D) per ogni lavorazione in oggetto. Interessante è poi notare come la maggior parte delle EPD si riferisce a una media di impatto di diversi stabilimenti produttivi afferenti ad uno specifico contesto di applicazione (e.g. Europa). Le EPD oggi disponibili sono state sviluppate prevalentemente in accordo con la normativa 15804:2012, ma non mancano certificazioni ambientali delle diverse lavorazioni del vetro elaborate in conformità con la nuova versione della normativa 15804:2019 (nella successiva analisi preliminare degli impatti ambientali sono state considerate solo le EPD in accordo con la normativa 15804:2012 per garantire la confrontabilità dei dati).

VETRO	FLOAT								
<b>Program Operator</b>	Int. EPD System	Int. EPD System	Int. EPD System	ift Rosenheim	FDES	FDES	ITB	ift Rosenheim	ASTM International
<b>Produttore</b>	Saint-Gobain Glass France	Saint-Gobain Glass France	Saint-Gobain Glass France	Pilkington IGP Poland	AGC Glass Europe	Euroglas S.A.	Euroglas Poland	Guardian Europe	Cardinal Glass Industries
<b>Prodotto</b>	PLANICLEAR	DIAMANT	SATINOVO MATI	FG flat glass	PLANIBEL	EUROFLOAT	EUROFLOAT	FG flat glass	FG flat glass
<b>Dettagli prodotto</b>	clear: basic soda-lime silicate glass	extra-clear: low iron soda-lime silicate glass	translucent: acid etching treatment	both uncoated and coated (metal-oxide-based)	clear, extra-clear or tinted	(extra) clear	clear float glass	clear float glass uncoated	untreated and uncoated flat glass
<b>Peso</b>	nd	nd	nd	nd	10 kg	10 kg	9.5 kg	2.5 kg (10.8/4.33)	1000 kg
<b>Spessore</b>	2 mm - 19 mm	3 mm - 19 mm	3 mm - 19 mm	1 mm	4 mm	4 mm	4 mm	1 mm	nd
<b>Unità funzionale</b>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 metric tonne
<b>Confini di sistema</b>	A1-A3	A1-A3	A1-A3	A1-A3; C3-C4; D	A1-A3; A4-A5; B1-B7; C1-C4; D	A1-A3; A4-A5; B2; C2-C4	A1-A3	A1-A3; C1-C4; D	A1-A3
<b>Siti di produzione</b>	European sites	European sites	European sites	European plants	European sites	European sites (?)	Ujazd factory (Poland)	European-Russian sites	United States facilities
								EN 15804:2019	

VETRO	BASSO EMISSIVO					
<b>Program Operator</b>	Int. EPD System	Int. EPD System	ift Rosenheim	ASTM International	FDES	IBU
<b>Produttore</b>	Saint-Gobain Glass France	Al Obeikan AGC for Glass	Guardian Europe	Cardinal Glass Industries	AGC Glass Europe	Trakya Cam Sanayii
<b>Prodotto</b>	coated PLANICLEAR	HP coated glass	CFG coated flat glass	Low-E coated glass	Solar control magnet	Offline Coated Glass
<b>Dettagli prodotto</b>	magnetron coated glass; average EPD; one coating	high-performance coated glass	coating by magnetron sputtering	coating by magnetron sputtering		
<b>Peso</b>	7.5 kg - 30 kg	various	2.5 kg (12.42/4.97)	7.5 kg	15 kg	10.99 kg
<b>Spessore</b>	3 mm - 19 mm	various	1 mm	3 mm	6 mm	circa 4 mm
<b>Unità funzionale</b>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>
<b>Confini di sistema</b>	A1-A3; A4-A5; B1-B7; C1-C4; D	A1-A3; A4	A1-A3; C1-C4; D	A1-A3	A1-A3; A4-A5; B1-	A1-A3
<b>Siti di produzione</b>	European sites	Kingdom factory (Saudi Arabia)	European-Russian sites	United States facilities	EU average	Bulgaria+Turkey factory
	EN 15804:2019		EN 15804:2019			

VETRO	TEMPRATO		
<b>Program Operator</b>	Int. EPD System	ift Rosenheim	ASTM International
<b>Produttore</b>	Saint-Gobain Glass France	Pilkington IGP Poland	Cardinal Glass Industries
<b>Prodotto</b>	SECURIT	TSG toughened safe	Tempered glass
<b>Dettagli prodotto</b>	thermally toughened safety glass; average EPD	single pane	
<b>Peso</b>	7.5 kg - 47.5 kg	nd	7.5 kg
<b>Spessore</b>	3 mm - 19 mm	1 mm	3 mm
<b>Unità funzionale</b>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>
<b>Confini di sistema</b>	A1-A3; A4-A5; B1-B7; C1-C4; D	A1-A3; C3-C4; D	A1-A3
<b>Siti di produzione</b>	European sites	European plants	United States facilities
	EN 15804:2019		

VETRO	STRATIFICATO			
<b>Program Operator</b>	Int. EPD System	ift Rosenheim	ift Rosenheim	ASTM International
<b>Produttore</b>	Saint-Gobain Glass France	Pilkington IGP Poland	Guardian Europe	Cardinal Glass Industries
<b>Prodotto</b>	STADIP	LSG laminated safet	LSG laminated safet	Laminated glass
<b>Dettagli prodotto</b>	sheets of glass bonded with interlayers of PVB film; average EPD	two glass panes	two sheet of flat glass (coated and/or uncoated)	two panes of glass and interlayer
<b>Peso</b>	15.4 kg - 30.8 kg	nd	2.5 kg (19.46/7.78)	17.1 kg
<b>Spessore</b>	6.4 mm - 12.8 mm	1 mm	1 mm	7.5 mm
<b>Unità funzionale</b>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>
<b>Confini di sistema</b>	A1-A3; A4-A5; B1-B7; C1-C4; D	A1-A3; C3-C4; D	A1-A3; C1-C4; D	A1-A3
<b>Siti di produzione</b>	European sites	European plants	European-Russian sites	United States facilities
	EN 15804:2019		EN 15804:2019	

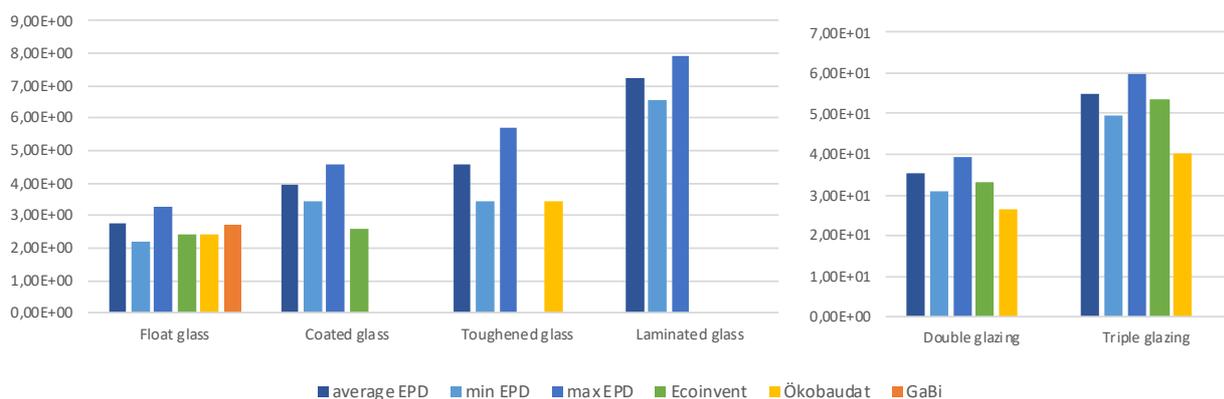
VETROCAMERE	DOPPIO VETRO						
<b>Program Operator</b>	Int. EPD System	ift Rosenheim	ift Rosenheim	ASTM International	Kiwa	-	FDES
<b>Produttore</b>	Saint-Gobain Glass France	Pilkington IGP Poland	Okalux	Cardinal Glass Industries	Astiglass	AGC Glass Europe	AGC Glass Europe
<b>Prodotto</b>	CLIMAPLUS	IGU insulating glass	IGU insulating glass	IGU double pane un	IGU insulating glass	Thermobel	Low-e/solar control dou
<b>Dettagli prodotto</b>	various gas; high performance double glazing; low-e coating	double configuration	argon filled double configuration	argon filled; panes annealed, tempered or coated	argon filled; coated and float glass	double glass units with magnetron coated glass	
<b>Peso</b>	20 kg - 30.8 kg	nd	nd	15.6 kg	21.209 kg	nd	20 kg
<b>Spessore</b>	24 mm - 28.8 mm	nd	4-16-4	3 mm/pane	4-16-4	4-16-4 (4-16-4 to 6-	4-16-4
<b>Unità funzionale</b>	1 m <sup>2</sup>	nd	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup> , U=1.3 Wm <sup>2</sup> K	1 m <sup>2</sup> , U=1.1-1Wm <sup>2</sup> K	1 m <sup>2</sup> , U<1.1 Wm <sup>2</sup> K
<b>Confini di sistema</b>	A1-A3	nd	A1-A3; C1-C4; D	A1-A3	A1-A3	A1-A3	A1-A3; A4-A5; B1-B7; C1-C4; D
<b>Siti di produzione</b>	European sites	nd	European plants	United States facilities	Sevilla factory (Spain)	European plants	EU average

VETROCAMERE	TRIPLO VETRO						
<b>Program Operator</b>	Int. EPD System	ift Rosenheim	ift Rosenheim	ASTM International	-	-	
<b>Produttore</b>	Saint-Gobain Glass France	Pilkington IGP Poland	Okalux	Cardinal Glass Industries	AGC Glass Europe	AGC Glass Europe	
<b>Prodotto</b>	CLIMATOP	IGU insulating glass	IGU insulating glass	IGU triple pane unit	Thermobel	Thermobel	
<b>Dettagli prodotto</b>	various gas; high performance triple glazing; low-e coating on one face	triple configuration	argon filled triple configuration	argon filled; panes annealed, tempered or coated	argon filled; triple glass with two magnetron coated panes	safety triple glass magnetron coated and with laminated glass	
<b>Peso</b>	30 kg - 35.8 kg	nd	nd	23.9 kg	31.3 kg	72.1 kg	
<b>Spessore</b>	34.8 mm - 48 mm	nd	4-12-4-12-4	3 mm/pane	4-14-4-14-4	10-14-4-14-66.2	
<b>Unità funzionale</b>	1 m <sup>2</sup>	nd	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup> , U<1.1 W/m2K	1 m <sup>2</sup>	
<b>Confini di sistema</b>	A1-A3	nd	A1-A3; C1-C4; D	A1-A3	A1-A3; A4-A5; B1-B7; C1-C4; D	A1-A3; A4-A5; B1-B7; C1-C4; D	
<b>Siti di produzione</b>	European sites	nd	European plants	United States facilities	European sites	European sites	

Tab. 3.3.7. Principali certificazioni EPD del vetro presenti sul mercato per le diverse lavorazioni: vetro float, vetro basso-emissivo, vetro temperato, vetro stratificato, vetrocamera doppio e triplo vetro.

Fonte: Elaborazione PoliMi.

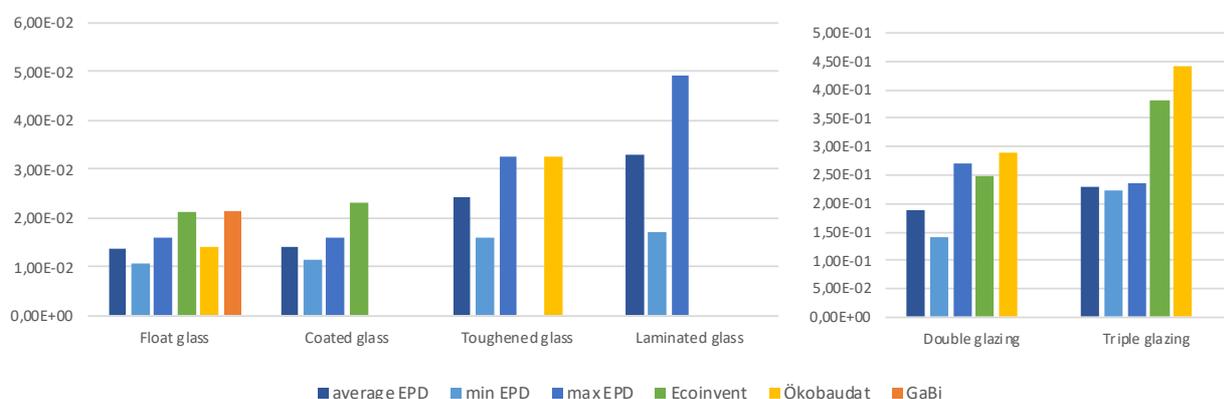
Da un'indagine preliminare sui profili ambientali dei prodotti in vetro è possibile individuare un range di valori di riferimento (Dalla Valle et al., 2022), utili per verificare i risultati di impatto dello studio di filiera e per esplicitare l'aumento percentuale che deriva allo stato attuale dalle diverse lavorazioni del vetro. A tal fine, si riportano sinteticamente i risultati ottenuti dal confronto delle principali EPD (Tab. 3.3.7) e banche dati oggi disponibili, includendo rispettivamente: Ecoinvent, Ökobaudat e GaBi. In particolare, per verificare se sussiste uno scostamento significativo con i dati dei produttori è stata considerata la banca dati Ecoinvent, in quanto affermata a livello interazionale. Di seguito sono esplicitati gli impatti ambientali relativi agli indicatori più significativi, ossia: GWP - *Global Warming Potential* (Tab. 3.3.8); AP - *Acidification Potential* (Tab. 3.3.9); EP - *Eutrophication Potential* (Tab. 3.3.10); *Total use of Primary Energy resources* (Tab. 3.3.11), come somma della quota parte rinnovabile (PERT) e non rinnovabile (PENRT).



GWP	Float glass	Coated glass	Toughened glass	Laminated glass	Double glazing	Triple glazing
<b>average EPD</b>	2,75E+00	3,93E+00	4,58E+00	7,23E+00	3,55E+01	5,47E+01
min EPD	2,20E+00	3,46E+00	3,46E+00	6,53E+00	3,11E+01	4,96E+01
max EPD	3,25E+00	4,57E+00	5,70E+00	7,93E+00	3,92E+01	5,97E+01
<b>Ecoinvent</b>	2,43E+00	2,61E+00	-	-	3,29E+01	5,35E+01
<b>Ökobaudat</b>	2,43E+00	-	3,46E+00	-	2,67E+01	4,04E+01
<b>GaBi</b>	2,71E+00	-	-	-	-	-
var % Ecoinvent-EPD	-12%	-34%			-7%	-2%

Tab. 3.3.8. Impatti GWP [kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>] dei prodotti in vetro per 1 mm di spessore (sx) e dei vetrocamera per 4-16-4 doppi vetri e 4-14-4-14-4 tripli vetri (dx). Fonte: Elaborazione PoliMi.

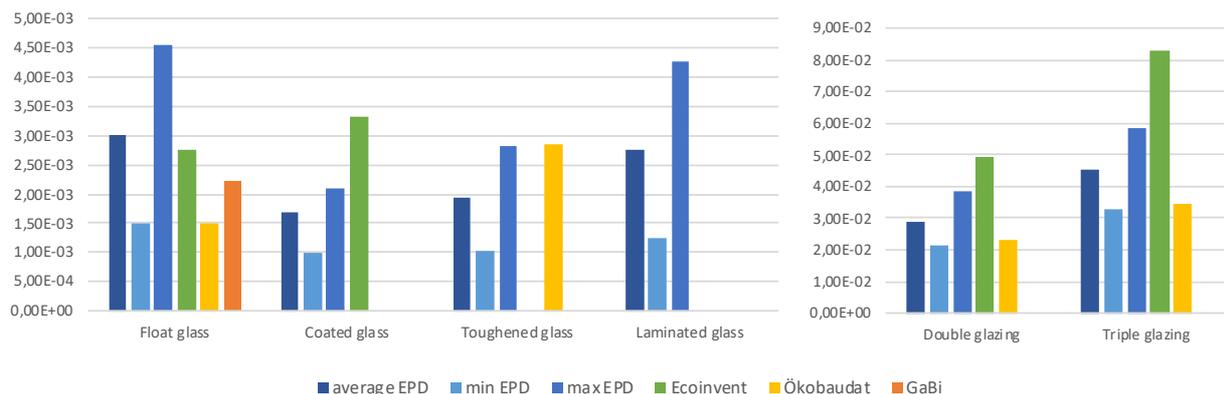
Rispetto agli impatti GWP del vetro float (valore medio da EPD) si evidenzia un aumento del 43% per la produzione del vetro basso-emissivo, raggiungendo il 66% nel caso del vetro temprato e fino al 163% per il vetro stratificato. Considerando i dati Ecoinvent, il vetro basso-emissivo presenta un incremento di impatto del solo 7% rispetto al vetro float, restringendo notevolmente il divario rilevato dalle rilevazioni EPD. Lo scostamento GWP esistente tra vetrocamera risulta invece per lo più allineato tra le medie EPD e i valori di Ecoinvent, dove la realizzazione del triplo vetro comporta un aumento degli impatti da EPD del 54% rispetto ai doppi vetri, mentre pari al 63% considerando i dataset Ecoinvent.



AP	Float glass	Coated glass	Toughened glass	Laminated glass	Double glazing	Triple glazing
<b>average EPD</b>	1,36E-02	1,41E-02	2,42E-02	3,32E-02	1,88E-01	2,30E-01
min EPD	1,06E-02	1,15E-02	1,60E-02	1,72E-02	1,42E-01	2,24E-01
max EPD	1,60E-02	1,59E-02	3,25E-02	4,91E-02	2,70E-01	2,36E-01
<b>Ecoinvent</b>	2,15E-02	2,33E-02	-	-	2,47E-01	3,81E-01
<b>Ökobaudat</b>	1,43E-02	-	3,25E-02	-	2,90E-01	4,40E-01
<b>GaBi</b>	2,13E-02	-	-	-	-	-
var % Ecoinvent-EPD	58%	66%			31%	66%

Tab. 3.3.9. Impatti AP [kgSO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>] dei prodotti in vetro per 1 mm di spessore (sx) e dei vetrocamera per 4-16-4 doppi vetri e 4-14-4-14-4 tripli vetri (dx). Fonte: Elaborazione PoliMi.

Rispetto agli impatti medi AP del vetro float (valore medio da EPD) si registra un aumento rispettivamente del 3% per il vetro basso-emissivo, del 78% per il vetro temprato e del 143% per il vetro stratificato. Tali aumenti percentuali sono per lo più confermati dagli impatti Ecoinvent, dove il vetro basso-emissivo incrementa del 9% le emissioni del vetro float. Lo scostamento degli impatti tra doppi vetri e tripli vetri è del 22% considerando le medie EPD, mentre del 54% se calcolato in base ai dati Ecoinvent.

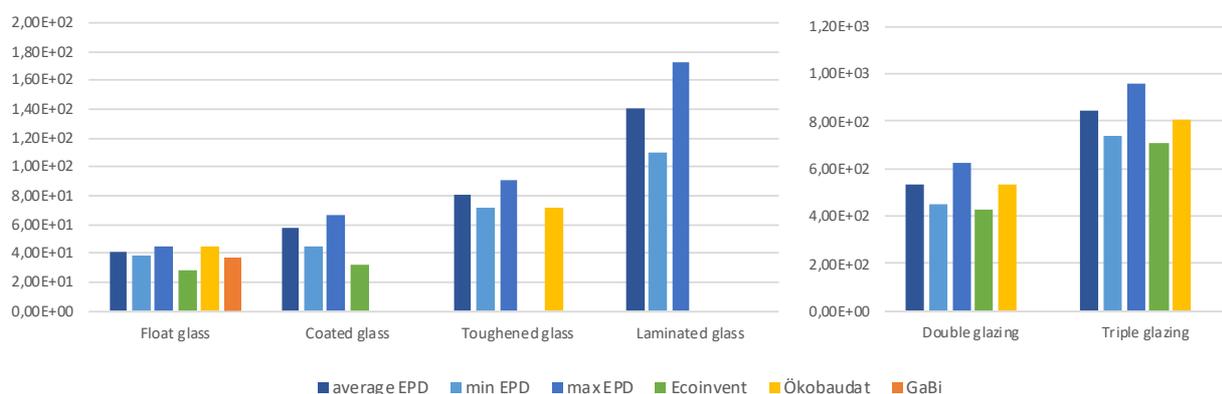


EP	Float glass	Coated glass	Toughened glass	Laminated glass	Double glazing	Triple glazing
<b>average EPD</b>	3,01E-03	1,67E-03	1,94E-03	2,76E-03	2,88E-02	4,57E-02
min EPD	1,49E-03	9,83E-04	1,04E-03	1,26E-03	2,16E-02	3,29E-02
max EPD	4,55E-03	2,10E-03	2,83E-03	4,26E-03	3,84E-02	5,84E-02
<b>Ecoinvent</b>	2,74E-03	3,31E-03	-	-	4,94E-02	8,28E-02
<b>Ökobaudat</b>	1,49E-03	-	2,84E-03	-	2,31E-02	3,47E-02
<b>GaBi</b>	2,23E-03	-	-	-	-	-
var % Ecoinvent-EPD	-9%	98%			71%	81%

Tab. 3.3.10. Impatti EP [kgPO<sub>4</sub><sup>3-</sup>eq/m<sup>2</sup>] dei prodotti in vetro per 1 mm di spessore (sx) e dei vetrocamera per 4-16-4 doppi vetri e 4-14-4-14-4 tripli vetri (dx). Fonte: Elaborazione PoliMi.

Gli impatti EP mostrano un'inversione di tendenza nel senso che appaiono maggiori per il vetro float rispetto a tutti quelli dei vetri lavorati (basso-emissivo, temprato e stratificato). Tuttavia, bisogna sottolineare che le apparenti riduzioni dovute ai processi di trattamento si riferiscono a diversi stabilimenti produttivi con caratteristiche distintive del processo produttivo, non consentendo quindi il paragone tra vetro float e vetri lavorati. Di conseguenza, prendendo come punto di

riferimento gli impatti medi EPD del vetro basso-emissivo si rileva un aumento degli impatti del 16% per la produzione di vetro temprato e fino al 65% per il vetro stratificato. Calcolando invece la differenza tra il vetro float e vetro basso-emissivo da Ecoinvent, la variazione percentuale EP ammonta a circa il 21%. Per quanto riguarda i vetrocamera, sebbene i dati Ecoinvent risultino più svantaggiosi (superiori) rispetto a quelli EPD, l'aumento percentuale è simile, incrementando del 58% gli impatti EPD del doppio vetro per la produzione del triplo vetro e raggiungendo il 68% ove riferiti a Ecoinvent.



PERT+PERNT	Float glass	Coated glass	Toughened glass	Laminated glass	Double glazing	Triple glazing
<b>average EPD</b>	4,11E+01	5,73E+01	8,08E+01	1,41E+02	5,34E+02	8,48E+02
min EPD	3,79E+01	4,42E+01	7,10E+01	1,10E+02	4,53E+02	7,39E+02
max EPD	4,54E+01	6,66E+01	9,05E+01	1,72E+02	6,24E+02	9,56E+02
<b>Ecoinvent</b>	2,87E+01	3,20E+01	-	-	4,25E+02	7,11E+02
<b>Ökobaudat</b>	4,54E+01	-	7,10E+01	-	5,38E+02	8,08E+02
<b>GaBi</b>	3,70E+01	-	-	-	-	-
var % Ecoinvent-EPD	-30%	-44%	-	-	-20%	-16%

Tab. 3.3.11. Impatti PERT+PERNT impacts [MJ/m<sup>2</sup>] dei prodotti in vetro per 1 mm di spessore (sx) e dei vetrocamera per 4-16-4 doppi vetri e 4-14-4-14-4 tripli vetri (dx). Fonte: Elaborazione PoliMi.

Rispetto all'utilizzo totale di risorse energetiche primarie PERT+PERNT del vetro float (valore medio da EPD) si rileva un aumento del 39% per la lavorazione del vetro basso-emissivo, del 96% per il vetro temprato e del 243% per il vetro stratificato. Questa variazione percentuale è significativamente ridotta in Ecoinvent, dove la produzione di vetro rivestito comporta un aumento del solo 11% rispetto al vetro float. L'aumento percentuale degli impatti di vetrocamera a triplo vetro è pressoché allineato tra i valori medi EPD, in cui è al 73%, e gli impatti Ecoinvent, dove è leggermente ridotto al 67%.

## 4 Gruppo di lavoro

In Tab. 4.1 è riportato il gruppo di lavoro che ha contribuito al presente studio.

Nome	Ente/impresa	Tipologia	Sito web	Contatti
Valentina Fantin	Enea	Centro di ricerca	<a href="http://www.enea.it">www.enea.it</a>	e-mail: valentina.fantin@enea.it
Anna Dalla Valle, Monica Lavagna, Andrea Campioli (responsabili studio di filiera del vetro)	Politecnico di Milano, Dip. ABC, Life Cycle TEAM	Università	<a href="http://www.dabc.polimi.it/abclab/le-unita/lifecycleteam/">www.dabc.polimi.it/abclab/le-unita/lifecycleteam/</a>	e-mail: anna.dalla@polimi.it monica.lavagna@polimi.it andrea.campioli@polimi.it
Nicolò Padoan Dina Miglioranzi	Pilkington	Impresa	<a href="http://www.pilkington.com">www.pilkington.com</a>	e-mail: nicolo.padoan@nsg.com dina.miglioranzi@nsg.com tel: 0415334911
Davide Kohen Fabio Damonte	Saint-Gobain	Impresa	<a href="http://www.saint-gobain.it">www.saint-gobain.it</a>	e-mail: davide.kohen@saint-gobain.com fabio.damonte@saint-gobain.com

Tab. 4.1. Gruppo di lavoro per lo studio LCA di filiera delle lastre piane in vetro.

Il gruppo di lavoro comprende i principali produttori di vetro a livello nazionale. È importante, tuttavia, sottolineare come le interviste siano state svolte coinvolgendo un più ampio panel di operatori della filiera, interpellati per investigare questioni più di dettaglio relative alla successiva lavorazione e trasformazione dei prodotti in vetro. Differenza sostanziale è che mentre i grandi produttori sono organizzati e strutturati alla raccolta sistematica dei dati per l'ottenimento di etichette ambientali (EPD), le vetrerie sono in genere piccole realtà diffuse sul territorio, spesso non avvezze alla valutazione delle prestazioni ambientali dei propri prodotti e quindi senza possibilità di fornire dati a supporto ma solo informazioni di carattere generale rispetto alle pratiche correnti. Dato il loro contributo molto puntuale, si è deciso di non indicarle nel gruppo di lavoro che include invece gli stakeholder che hanno svolto un ruolo attivo nello studio di filiera per lo sviluppo dei dataset relativi alle lastre piane in vetro.

## 5 Ambito di applicazione dello studio

Il presente studio riguarda la filiera del vetro prodotto in Italia, rappresentando pertanto sia in termini geografici sia tecnologici la filiera produttiva sviluppata a livello nazionale. In particolare, lo studio prende in considerazione otto differenti prodotti ritenuti rappresentativi e particolarmente rilevanti per la filiera, in relazione alle specificità dei processi produttivi sottesi e alle conseguenti performance offerte:

- vetro float - *Float Glass* (FG, per vetrocamera abbreviato in F);
- vetro basso-emissivo - *Coated Float Glass* (CFG, per vetrocamera abbreviato in C);
- vetro stratificato - *Laminated Safety Glass* (LSG, per vetrocamera abbreviato in L);
- vetrocamera doppio vetro - *Insulated Glass Units double glazing* (IGUd);
  - con lastra esterna in vetro float ed interna in vetro stratificato - *IGUd float-laminated* (F-L);
  - con lastra esterna in vetro basso-emissivo ed interna in vetro stratificato - *IGUd coated-laminated* (C-L);
  - con lastra esterna ed interna in vetro stratificato - *IGUd laminated-laminated* (L-L);
- vetrocamera triplo vetro - *Insulated Glass Units triple glazing* (IGUt).
  - con lastra esterna e centrale in vetro float e lastra interna in vetro stratificato - *IGUt float-laminated* (F-F-L);
  - con lastra esterna ed interna in vetro stratificato e lastra centrale in vetro float - *IGUt laminated-float-laminated* (L-F-L).

Si tratta delle tipologie di prodotto più vendute ed utilizzate nel settore delle costruzioni, nello specifico impiegate per serramenti ed infissi.

Lo studio LCA è stato sviluppato in conformità alle norme ISO 14040-14044 (UNI, 2018; UNI, 2021), modellando il ciclo di vita dei prodotti in accordo con l'approccio "attribuzionale", ovvero riproducendo la catena di fornitura esistente e utilizzando processi di background rappresentativi del mix di consumo del mercato medio.

### 5.1 Funzione del sistema, unità funzionale e flusso di riferimento

La funzione del sistema è la produzione di prodotti in vetro piano, sia sottoforma di lastre sia di sistemi vetrocamera, destinati alla realizzazione di finestre da costruzione.

L'unità funzionale (UF) utilizzata ai fini dello studio è **1 m<sup>2</sup> di vetro**, considerando lastre di diverso spessore a seconda delle lavorazioni eseguite e quindi del prodotto rappresentativo in oggetto.

Tale UF è stata scelta in quanto comunemente utilizzata nell'ambito della filiera vetro, in linea con i documenti metodologici relativi ai prodotti in vetro, ovvero alle principali *Product Categories Rules* di riferimento (Tab. 3.3.4). Il suo impiego nella prassi comune è testimoniato dai vari studi identificati nella letteratura esistente, dalle diverse certificazioni ambientali di prodotto (EPD) oggi disponibili sul mercato (Tab. 3.3.5) ed è confermato anche dalle aziende e dagli esperti di settore coinvolti nello studio di filiera.

Il flusso di riferimento è rappresentato da 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro, di vari spessori e pesi in accordo con le specifiche relative all'unità funzionale utilizzata nello studio per ognuno dei prodotti considerati (Tab. 5.1.1).

Prodotti rappresentativi	Unità Funzionale	Spessore	Peso
Vetro float	1 m <sup>2</sup>	4 mm	10 kg
Vetro basso-emissivo	1 m <sup>2</sup>	4 mm	10 kg
Vetro stratificato	1 m <sup>2</sup>	6 mm (33.1)	15,4 kg
Vetrocamera doppio vetro (F-L)	1 m <sup>2</sup>	26 mm (4-16-33.1)	26,3 kg
Vetrocamera doppio vetro (C-L)	1 m <sup>2</sup>	26 mm (4-16-33.1)	26,3 kg
Vetrocamera doppio vetro (L-L)	1 m <sup>2</sup>	28 mm (33.1-16-33.1)	31,7 kg
Vetrocamera triplo vetro (F-F-L)	1 m <sup>2</sup>	42 mm (4-14-4-14-33.1)	36,9 kg
Vetrocamera triplo vetro (L-F-L)	1 m <sup>2</sup>	44 mm (33.1-14-4-14-33.1)	42,3 kg

Tab. 5.1.1.1. Dettagli unità funzionale dei prodotti in vetro rappresentativi della filiera.

## 5.2 Confini del sistema

Ai fini dello studio LCA di filiera si è adottato un approccio *“from-cradle-to-gate”* (moduli A1-A3), considerando nell'analisi tutti i processi dalla fase di estrazione delle materie prime all'uscita dallo stabilimento produttivo. Sono quindi esclusi dai confini di sistema le fasi di distribuzione e installazione del prodotto (A4-A5), d'uso (B1-B7) e fine vita (C1-C4).

La scelta di circoscrivere i confini di sistema alla sola fase di produzione deriva innanzitutto dalla volontà di costruire una informazione ambientale basata su dati primari e su processi di riferimento “stabili”. Nelle fasi *downstream*, infatti, la filiera del vetro si presenta assai articolata e caratterizzata da molteplici variabili a seconda delle differenti applicazioni possibili, contesti di riferimento, modalità di gestione e soprattutto dal fatto che i prodotti in oggetto sono comunemente assemblati

ad altri elementi (es. profili di diversi materiali) per ottenere sistemi più complessi (es. finestre e infissi). Di conseguenza, per ridurre il grado di incertezza e limitare l'ampia gamma di assunzioni altrimenti necessarie per modellare le fasi a valle del processo di produzione, l'analisi LCA si focalizza sulle fasi *upstream* e *core* della filiera vetro. Tale scelta dei confini del sistema è ritenuta opportuna anche per fornire informazioni solide alla base di studi LCA successivi mirati alla modellizzazione di sistemi più complessi, quali finestre e infissi. Questo studio ha supportato la valutazione LCA del serramento completo, oggetto di specifico studio LCA all'interno della banca dati Arcadia, "Produzione di telai in PVC per infissi e serramenti e produzione di finestre in PVC con vetrocamera a doppio o triplo vetro", sviluppato sempre dal Politecnico di Milano, Dipartimento ABC, LifeCycleTEAM.

In accordo con le indicazioni contenute nei documenti metodologici di riferimento, per la fase *upstream* è stata considerata l'estrazione e fornitura delle materie prime (A1) e il relativo trasporto allo stabilimento di produzione (A2). Tali risorse corrispondono ai materiali in input della linea di produzione della fase *core*, che include tutti i processi di produzione che avvengono presso lo stabilimento (A3). Oltre ai materiali in input sono quindi considerati i consumi energetici e i flussi in output in aria, acqua e al suolo in termini di rifiuti solidi emessi. Da notare che la fase *core* include sia il processo di produzione del vetro float (prodotto base) sia le ulteriori lavorazioni necessarie per la realizzazione degli altri prodotti rappresentativi (vetro basso-emissivo, stratificato e vetrocamere). È esclusa dai confini del sistema la produzione di tutte le tecnologie e i macchinari utilizzati per le diverse attività di produzione, nonché le operazioni di manutenzione effettuate periodicamente sulle attrezzature impiegate.

Di seguito sono forniti i diagrammi di flusso dettagliati dei prodotti considerati nello studio, esplicitando i relativi confini di sistema. Tali processi sono da intendersi in maniera sequenziale, con lavorazioni eseguite a partire dal vetro float (prodotto base).

## Vetro float

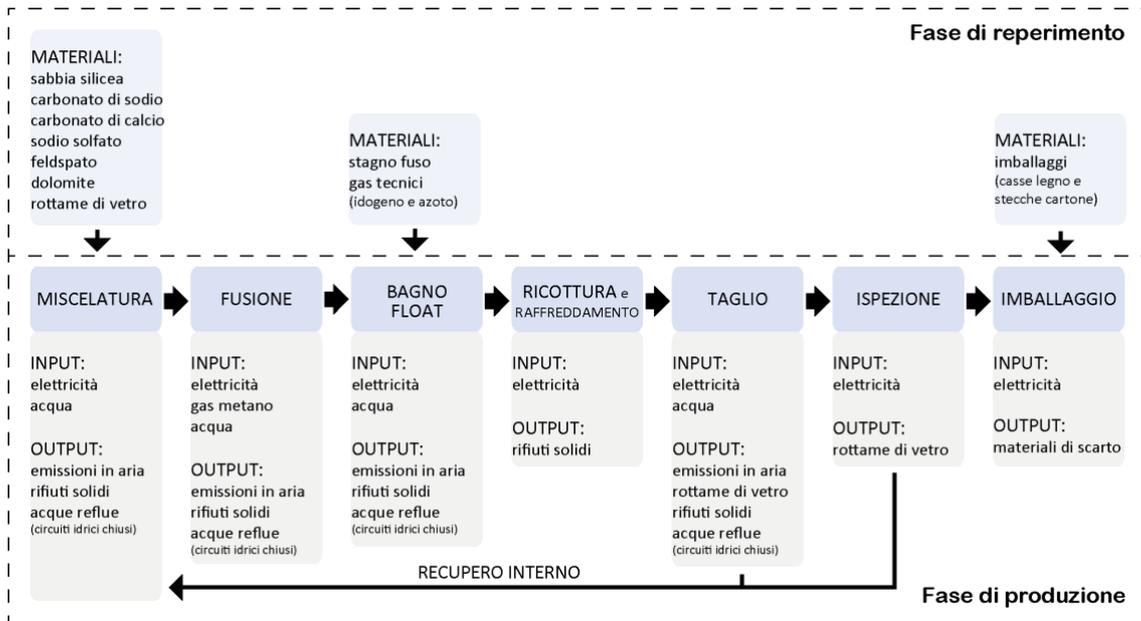


Fig. 5.2.1. Confini di sistema e diagramma di flusso del vetro float. Fonte: Elaborazione PoliMi.

## Vetro basso-emissivo

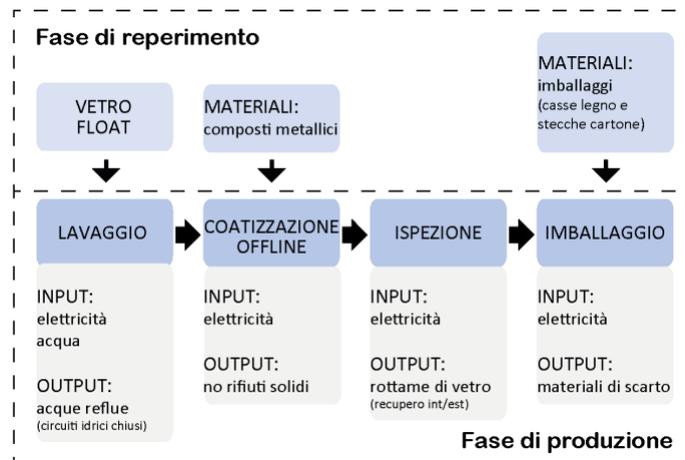


Fig. 5.2.2. Confini di sistema e diagramma di flusso del vetro basso-emissivo. Fonte: Elaborazione PoliMi.

## Vetro stratificato

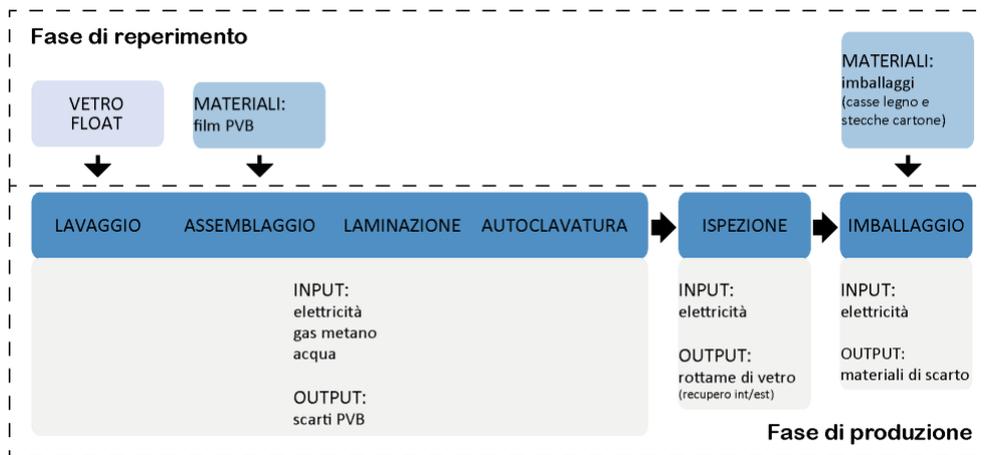


Fig. 5.2.4. Confini di sistema e diagramma di flusso del vetro stratificato. Fonte: Elaborazione PoliMi.

## Vetrocamera doppio e triplo vetro

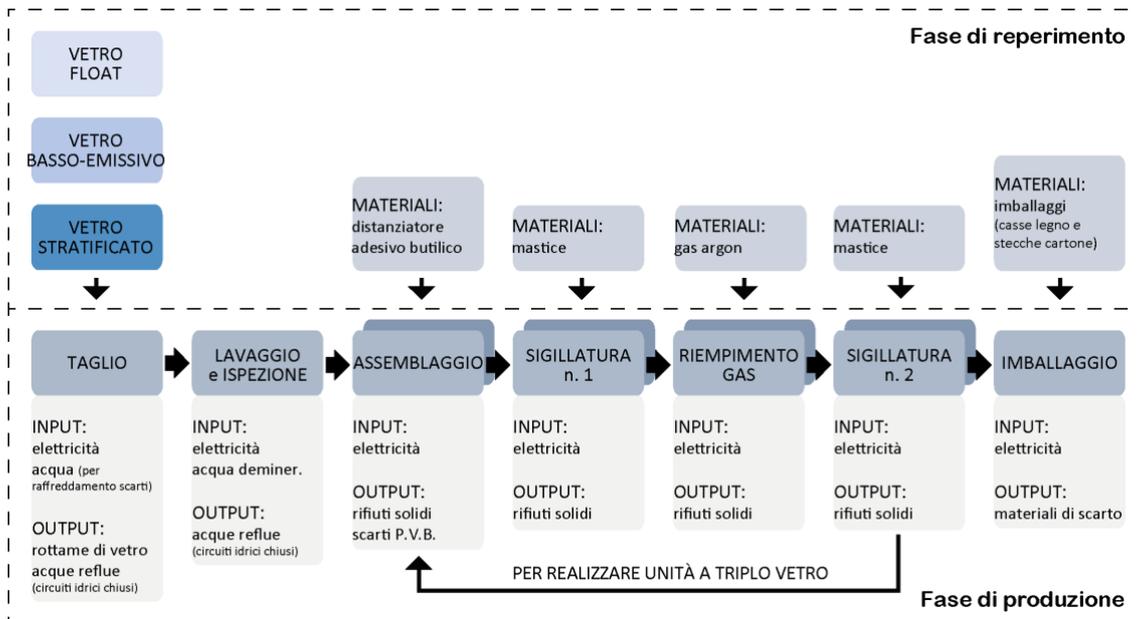


Fig. 5.2.5. Confini di sistema e diagramma di flusso dei vetrocamera doppio e triplo vetro.

Fonte: Elaborazione PoliMi.

## 5.3 Assunzioni e giudizi di valore

La modellazione del sistema analizzato è stata eseguita facendo ricorso sia a dati primari disponibili a livello di filiera, raccolti presso le imprese coinvolte nel GdL, sia a dati secondari di letteratura, reperiti da banche dati riconosciute a livello internazionale (Ecoinvent).

È importante però sottolineare che le fonti di dati primari sono state utilizzate in particolare per la modellizzazione del vetro float, fornendo così un buon punto di partenza per la rappresentatività

della filiera di riferimento a livello nazionale, in quanto costituisce il prodotto base di tutti i restanti prodotti rappresentativi. La collaborazione degli operatori del settore ha consentito infatti di ottenere dati primari per il vetro float e per il vetro stratificato, in quanto prodotti internamente dall'azienda. In questi casi, quindi, i dati di inventario relativi alle risorse impiegate nei diversi processi sono da ritenersi rappresentativi della filiera oggetto di studio, essendo calcolati come media degli ultimi tre anni consecutivi (2019-2020-2021).

Invece, a causa della mancanza di dati primari di inventario forniti dalle aziende interessate (dati sensibili non condivisi), i restanti prodotti rappresentativi si riferiscono principalmente a dati di inventario estratti dai dataset di Ecoinvent. Per il vetro basso-emissivo e vetrocamere doppio/triplo vetro, le lavorazioni supplementari e i materiali aggiuntivi sono stati pertanto modellati sulla base dei dati secondari. Tali dati di inventario sono stati in seguito sottoposti a verifica/revisione degli operatori di filiera e sono stati avvallati e validati dagli stessi come tipici e rappresentativi del settore a scala nazionale.

Per quanto riguarda i trasporti, sono state reperite informazioni peculiari alla produzione del vetro float (prodotto base) e vetro stratificato, in merito alla localizzazione dei diversi fornitori di materie prime, le distanze medie dai fornitori all'impianto di produzione, i mezzi di trasporto impiegati e gli eventuali materiali di imballaggio. Per tutti i prodotti, la modellizzazione dei processi di trasporto è stata eseguita sulla base delle quantità fisiche (peso trasportato) e delle distanze medie rappresentative del trasporto fino allo stabilimento produttivo, considerando anche eventuali tappe intermedie.

Nel complesso, con riferimento alle indicazioni contenute nel report interno di progetto "Metodologia per gli studi di filiera della Banca Dati italiana LCA" (versione Novembre 2021), la qualità dei dati utilizzati nello studio è ritenuta generalmente buona, con alcune variazioni a seconda del prodotto in esame. Nello specifico in Tab. 5.3.1 viene indicato il grado in cui processi/prodotti rappresentano i sistemi analizzati in termini di affidabilità e rappresentatività temporale, geografica e tecnologica. Da notare che la qualità è riferita a ciascun dataset della banca dati di Arcadia e viene valutata limitatamente ai dati di *foreground* raccolti durante gli studi di filiera, senza considerare nel giudizio i dati di *background*. L'indicazione vetrocamera si riferisce a tutte le soluzioni sviluppate sia per il doppio vetro (x3) sia per il triplo vetro (x2).

<b>Criteri di valutazione</b>	<b>Molto buona</b>	<b>Buona</b>	<b>Accettabile</b>	<b>Scarsa</b>	<b>Molto scarsa</b>
Affidabilità (A)		Vetro float	Vetro basso-emissivo		
		Vetro stratificato	Vetrocamera doppio e triplo		
	Tutti i dati sono stati misurati (dati primari raccolti in azienda e dati statistici da fonti riconosciute) e controllati da esperti	I dati sono stati misurati, ma NON controllati da esperti OPPURE I dati sono in parte calcolati/provenienti da letteratura, ma tutti controllati da esperti	I dati sono tutti calcolati/provenienti da letteratura e sono stati controllati da esperti	I dati sono tutti calcolati/da letteratura e NON sono stati controllati da esperti	I dati sono stati stimati da esperti e giudicati utilizzabili per superare la mancanza di dati relativi a un processo non rilevante di un sistema
Rappresentatività temporale (RT)	Vetro float	Vetro basso-emissivo			
	Vetro stratificato	Vetrocamera doppio e triplo			
	Nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 3 anni lo studio di filiera	Nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 4 anni lo studio di filiera	Nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 5 anni lo studio di filiera	Nessun dato si riferisce a un periodo antecedente di 8 anni lo studio di filiera	Alcuni o tutti i dati si riferiscono a un periodo antecedente di 8 anni lo studio di filiera
Rappresentatività geografica (RG)	Vetro float	Vetro basso-emissivo			
	Vetro stratificato	Vetrocamera doppio e triplo			
	Il processo descritto è rappresentativo del luogo geografico indicato negli studi di filiera	Il processo descritto si riferisce a luogo diverso da quello indicato negli studi di filiera, ma su base di giudizio esperto, è del tutto rappresentativo del luogo geografico	Il processo descritto si riferisce a luogo diverso da quello indicato negli studi di filiera, ma su base di giudizio esperto, è sufficientemente rappresentativo del luogo geografico	Il processo descritto si riferisce a una situazione osservata su area eterogenea, nella quale è incluso il luogo indicato negli studi di filiera	Il processo descritto non è per niente rappresentativo del luogo geografico indicato negli studi di filiera
Rappresentatività tecnologica (RTec)	Vetro float	Vetro basso-emissivo			
	Vetro stratificato	Vetrocamera doppio e triplo			
	Il processo descrive in modo dettagliato la tecnologia attualmente presente sul mercato, includendo tutti i flussi di materia ed energia in input e output	Il processo descrive in modo dettagliato la tecnologia attualmente presente sul mercato, ma alcuni flussi, giudicati non rilevanti sulla base di giudizio di esperti, non sono stati quantificati	Il processo descrive in modo dettagliato la tecnologia, ma, a giudizio degli esperti, non tiene conto degli sviluppi più recenti affermatasi sul mercato (ad esempio non tiene conto di efficientamenti energetici o nell'uso dell'acqua che sono disponibili fin d'ora)	Il processo è un proxy, che secondo giudizio esperto è molto simile al processo	Il processo è un proxy che presenta differenze tecnologiche molto rilevanti

Tab. 5.3.1. Valutazione della qualità dei dataset dei prodotti in vetro rappresentativi della filiera.

## 5.4 Gestione della multifunzionalità

L'industria manifatturiera del vetro è caratterizzata da diverse situazioni di multifunzionalità, in quanto include, da una parte, sistemi/processi multi-output, che contribuiscono a fornire più di una funzione generando più di un prodotto, e, dall'altra, sistemi/processi multi-input, che richiedono cioè molteplici input, generando poi svariati casi di loro diverse combinazioni. Il numero di diversi prodotti dipende strettamente dallo stabilimento produttivo in esame, addetto allo svolgimento di diversi processi di lavorazione, ponendo il problema di stabilire dei criteri per assegnare (allocare) loro un inventario, operazione determinante per la creazione di una banca dati LCA.

Nel presente studio di filiera, tale questione è stata assolta direttamente dai referenti del GdL, che hanno provveduto in autonomia ad eseguire una suddivisione razionale dei flussi dei processi in questione fra i molteplici input e/o output e, analogamente, dei flussi legati ad eventuali processi condivisi tra sistemi. Dato che l'allocazione non poteva essere evitata né attraverso un incremento del livello di dettaglio del modello (prima scelta metodologica in ordine gerarchico) né attraverso l'espansione del sistema (seconda scelta), i flussi sono stati ripartiti tra i prodotti/funzioni del sistema per partizionamento. Nello specifico il partizionamento è stato svolto dagli operatori adottando l'applicazione di principi di causalità fisica, eseguendo quindi la ripartizione dei flussi sulla base di proprietà fisiche di massa.

A seguito dei calcoli interni e dell'allocazione per massa, gli operatori del settore hanno fornito i dati primari già associati alle diverse lavorazioni specifiche, rendendo evidenza dei flussi per kg di prodotto. Ulteriori operazioni di calcolo sono state necessarie per la trasformazione dei valori in accordo con l'unità funzionale dello studio.

## 5.5 Revisione critica

Il presente studio di filiera ed il relativo modello LCA nel software SimaPro sono stati messi a disposizione per la revisione di parte terza, prevista all'interno del progetto Arcadia.

## 5.6 Modellizzazione e metodologia di analisi degli impatti

In conformità con la metodologia di Arcadia, il metodo di valutazione degli impatti utilizzato è EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019), che costituisce il metodo di valutazione dell'iniziativa della Commissione

Europea sull'impronta ambientale (EC, 2017) e che comprende caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione.

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 globali e ai più recenti dati disponibili nel database Ecoinvent 3.6.

## 6 Modellazione dei dataset della filiera

Il modello scelto per la creazione dei dataset per la banca dati di Arcadia è di tipo "attribuzionale", ovvero un modello che riproduce la catena di fornitura del prodotto oggetto di analisi utilizzando dati ed eventuali processi di background rappresentativi di una situazione media del mercato di riferimento. I dataset sviluppati per lo studio di filiera sono quelli relativi alla produzione di lastre in vetro e sistemi vetrocamera di vario tipo, giudicati insieme al GdL come rappresentativi della filiera produttiva nazionale e delle relative tecnologie e comprensivi al proprio interno di tutti i dati e i flussi di input ed output. Tutti i dataset sono relativi alla sola fase di produzione e non includono i trasporti dei prodotti finiti alla destinazione finale di uso. Sono, invece, in linea generale incluse le operazioni di trasporto relative alla fase di produzione. Questa scelta è legata alle finalità di utilizzo della banca dati di Arcadia da parte di possibili utenti, che potranno associare ai dataset trasporti e/o utilizzi specifici del vetro.

## 7 Analisi di inventario

A seguito di una attenta analisi di filiera, la raccolta dei dati sottesi all'analisi di inventario del sistema in esame ha interessato sia dati primari, raccolti presso le aziende, sia dati secondari, rivelatosi necessari per sopperire alla serie di informazioni che non è stato possibile reperire direttamente dai produttori (dati sensibili non condivisi/disponibili). Per ognuno di essi di seguito si specifica la procedura di raccolta perseguita, denotando i prodotti rappresentativi oggetto di studio.

Le fonti di dati primari sono state infatti utilizzate in particolare per la modellizzazione del vetro float (prodotto base) e del vetro stratificato. Ai fini della raccolta dei dati primari presso le aziende,

sono state messe a punto delle specifiche schede in grado di semplificare e sistematizzare la raccolta stessa. Tali schede di raccolta dati, predisposte su fogli di calcolo Microsoft Excel, sono state poi condivise con le aziende coinvolte nel GdL, seguendo i referenti nella raccolta dei dati lungo la filiera e supportandoli nella definizione delle modalità operative e di calcolo.

Le principali carenze di dati primari hanno riguardato le lavorazioni successive al processo float: coatizzazione per vetro basso-emissivo; processi supplementari e materiali aggiuntivi (distanziatore) per vetrocamera doppio e triplo vetro. Tali processi implicavano infatti il coinvolgimento di altri stabilimenti produttivi, per cui non è stato possibile accedere alle informazioni. Per questo motivo, si è dovuto ricorrere a dati secondari, ovvero dati di letteratura e/o settore, la cui raccolta è stata svolta sulla base di una revisione sistematica di report di settore, report di progetti preesistenti, studi LCA, Dichiarazioni Ambientali di Prodotto, banche dati (es. Ecoinvent) e altra bibliografia tecnico-scientifica, e di una analisi della disponibilità/qualità dei dati relativi a materiali/componenti/processi contenuti in tali documenti.

Nello specifico, i dati secondari reperiti dai dataset della banca dati Ecoinvent hanno consentito di sopperire alle suddette carenze informative. È importante tuttavia sottolineare che, tramite il supporto delle aziende coinvolte nel GdL, tali dati di inventario sono stati in seguito opportunamente revisionati e validati dagli operatori sul campo. Si nota inoltre come le fonti di dati primari siano state utilizzate in particolare per la modellizzazione del vetro float, fornendo così un buon punto di partenza per la rappresentatività della filiera di riferimento a livello nazionale, in quanto costituisce il prodotto base di tutti i restanti prodotti rappresentativi.

## 7.1 Assunzioni utilizzate nello studio

Nello studio di filiera sono state effettuate le seguenti assunzioni, comuni a tutti i prodotti in vetro in esame:

- L'energia elettrica è stata considerata proveniente interamente da rete nazionale, utilizzando per la sua produzione il mix italiano, senza considerare l'eventuale auto-produzione in loco da fonte rinnovabile (es. impianti fotovoltaici) e la compravendita di energia da fonti rinnovabili (*Power Purchase Agreement* – PPA, attestati dalle Garanzie di Origine – GOs nell'ambito della Direttiva REDII), ritenute tuttora come esempi di buone pratiche non diffuse sul territorio nazionale.

- Allo stesso modo, l'acqua è stata considerata proveniente interamente da acquedotto, in quanto ritenuta la fonte di alimentazione più rappresentativa della situazione italiana media relativa alla produzione di vetro. Si è quindi attribuito il *worst case*, anche se dal confronto con gli operatori del settore si ritrovano esempi di buone pratiche con prelievi da pozzo e recupero dell'acqua piovana. Tali pratiche però sono oggi affermate come soluzioni virtuose, relative a casi specifici e non tipiche della filiera nazionale. La densità dell'acqua è stata considerata pari a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
- Gli imballaggi comprendono per tutti i prodotti in vetro l'uso di casse di legno e stecche di carta, quali sistemi di supporto e protezione delle lastre presso gli stabilimenti produttivi. Essi sono stati calcolati a partire dai dati primari reperiti per il vetro float, eseguendo per le successive lavorazioni un riproporzionamento sulla base della massa. In accordo con il GdL, tutte le materie in input, sia primarie sia ausiliarie, sono fornite come prodotti sfusi in contenitori/recipienti idonei al materiale in questione, senza l'impiego di sistemi di imballaggio aggiuntivi. Per tale motivo i materiali di imballaggio compresi nello studio di filiera si limitano ai sistemi di supporto per i prodotti in vetro, ritenendo trascurabili i relativi trasporti in quanto materiali generalmente disponibili a livello locale. La densità delle casse di legno è stata considerata pari a  $550 \text{ kg/m}^3$ , come valore medio del legno segato (*sawnwood* da 480 a  $610 \text{ kg/m}^3$ ).
- Per i rifiuti è stata considerata una quota parte di materiali di imballaggio, previsti per tutti in prodotti in vetro in esame. I rifiuti di carta e legno sono stati computati sulla base dei dati riferiti al vetro basso-emissivo, riproporzionando i contributi in relazione alla massa dei diversi prodotti.
- I trasporti hanno richiesto diverse assunzioni a seconda del bene trasportato. Ove le materie prime (risorse impiegate nel prodotto) derivano da dati primari, sono state altresì considerate le distanze medie di trasporto fornite dai produttori. Invece, in assenza di informazioni specifiche di supporto, per le materie prime reperite da dati secondari e per tutte le materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione) sono stati selezionati i prodotti in forma disponibile sul mercato (c.d. "*market for*"), includendo i dataset comprensivi di trasporti. Per quanto riguarda invece i trasporti delle lastre di vetro (risorsa in input) destinate a successive lavorazioni, si è considerato una distanza media di 25 km per i processi di coatizzazione e stratifica, mentre una distanza di 100 km per le operazioni di assemblaggio in vetrocamera. È importante però notare che gli stabilimenti di produzione del vetro, a seconda dei casi, possono prevedere al loro interno anche le successive lavorazioni. Tuttavia, data l'ampia diffusione di

vetrerie nel contesto nazionale, si è deciso di considerare la relativa quota di trasporti, calcolando raggi medi a partire dalle distanze esistenti tra i principali stabilimenti produttivi distribuiti in modo capillare sul territorio. Infine, per i trasporti dei rifiuti in output, è stata considerata una distanza pari a 20 km per i rifiuti in discarica e 160 km per i rifiuti destinati ad incenerimento/riciclaggio (Stichnothe and Azapagic, 2013). In tutti i casi, eccetto per il trasporto della sabbia silicea che avviene via mare tramite container navali, i trasporti via gomma sono stati considerati con una classe di emissione Euro 5, in uniformità con le assunzioni effettuate per gli altri studi di filiera del Progetto Arcadia.

Per le specifiche relative ai singoli prodotti oggetto di studio, consultare il seguente paragrafo di descrizione e documentazione dei processi unitari.

## 7.2 Descrizione e documentazione processi unitari

Nelle seguenti Tabelle è riportata una breve descrizione di tutti i processi/flussi coinvolti nel ciclo di vita dei prodotti oggetto di studio e tutti i dati relativi ai processi unitari utilizzati nello studio di filiera, con una chiara identificazione della tipologia di dato di inventario (dati primari/secondari) e della banca dati (e relativi dataset) di riferimento.

Le Tabelle sono divise per ciascuno dei prodotti rappresentativi considerati: vetro float, basso-emissivo, stratificato, vetrocamera doppio vetro (x3) e vetrocamera triplo vetro (x2). I dati si riferiscono alla fase di produzione (A1-A3), considerando quindi congiuntamente le fasi del ciclo di vita *upstream* e *core*, e all'UF dello studio (1 m<sup>2</sup> di vetro), dando evidenza in maniera separata dei flussi in input e output e dei trasporti.

### **Vetro float**

L'inventario del vetro float (sigla in inglese FG, per vetrocamera abbreviata in F) è basato su dati primari, raccolti presso le aziende come media degli ultimi tre anni consecutivi di attività (2019-2020-2021). Tali dati aziendali sono forniti per 1 kg di prodotto e poi convertiti per 1 m<sup>2</sup> di vetro, in accordo con l'UF dello studio, considerando lastre di spessore 4 mm e peso 10 kg/m<sup>2</sup>. Per i calcoli di trasformazione (da 1 kg a 1 m<sup>2</sup>), tutti i dati di inventario sono stati pertanto moltiplicati per 10 (1 m<sup>2</sup> corrisponde a 10 kg), richiedendo solo in casi peculiari elaborazioni aggiuntive di seguito esplicitate. Per quanto riguarda i flussi in input, sono incluse anzitutto le materie prime impiegate per la miscela vetrificabile, ossia: sabbia silicea, carbonato di sodio, dolomite, carbonato di calcio, feldspato e

sodio solfato, da non confondersi però con la composizione. Infatti, la composizione del prodotto finito cambia con un aumento della sabbia silicea fino al 72% (a fronte dell'attuale 50%), con una riduzione della componente carboniosa, che durante il processo produttivo viene emessa in atmosfera sotto forma di CO<sub>2</sub>, e con l'eliminazione di altre sostanze al fine di arrivare a soli ossidi. Da notare nei flussi in input la sostituzione dell'ossido di calcio (impiegato nella produzione standard da letteratura) con il carbonato di calcio, componente dichiarato dai produttori, e l'uso di rottame di vetro che costituisce circa il 15% delle risorse in input. Tuttavia, dato che per garantire le prestazioni e l'elevato livello di trasparenza richiesto si tratta esclusivamente di recupero interno, ovvero rispetto alla media annuale il vetro di recupero in input corrisponde esattamente al rottame di vetro in output, non viene considerato nella modellizzazione.

Si riportano inoltre i materiali ausiliari impiegati nella produzione, quali lo stagno per il bagno float, unitamente a idrogeno e azoto liquido per evitare l'ossidazione dello stagno (tutti i dati di processo sono stati calcolati direttamente dall'azienda in relazione alle tonnellate di vetro prodotte). I materiali di imballaggio utilizzati per lo stoccaggio e distribuzione delle lastre di vetro sono costituiti da casse di legno e stecche di cartone e sono stati calcolati come media degli imballi usati complessivamente rispetto alla produzione di vetro float (allocazione per massa effettuata dall'azienda di riferimento). Da notare che in pratica l'impiego di materiali di imballaggio dipende strettamente dalle richieste dei clienti, i quali, a seconda della gestione delle merci nel magazzino, richiedono espressamente lastre di vetro imballate o disimballate (ad esempio nel caso di sistemi di presa a ventosa). I consumi d'acqua impiegata per i processi di raffreddamento e lavaggio sono interamente alimentati da acquedotto.

Le fonti energetiche impiegate per la produzione del prodotto sono elettricità a media tensione e gas naturale ad alta pressione. Da notare che non è possibile rendere espliciti i consumi energetici per fase del processo/tecnologia/macchinario (dati sensibili), ma in generale è possibile dichiarare che i consumi di gas si riferiscono per il 90% alla fase di fusione. L'uso di olio combustibile denso è ritenuto trascurabile, in quanto utilizzato unicamente per prove di emergenza, come generatore interno in caso di *blackout* (si tratta di 2 m<sup>3</sup>/anno per effettuare le prove annuali).

Per quanto riguarda i trasporti sono state considerate le tonnellate di materiale per le rispettive distanze dal fornitore all'impianto di produzione (tkm). Per le risorse in input, quali carbonato di sodio, dolomite, carbonato di calcio e feldspato, si tratta di trasporti via gomma da fornitori italiani posti a circa 300 km di distanza, eccetto la sabbia silicea che arriva via mare da Tunisia e/o Portogallo (distanza media di circa 3000 km). Per le materie ausiliarie, i trasporti sono compresi nei dataset di

riferimento (c.d. “market for”), esclusi gli imballaggi per cui sono considerati trascurabili. Inoltre, sono inclusi i trasporti via gomma relativi a tutti i rifiuti in output del sistema.

I flussi in output si articolano nella categoria emissioni, identificando le emissioni dirette in aria misurate presso gli stabilimenti produttivi, e nella categoria rifiuti. In quest’ultima si distinguono i rifiuti solidi urbani dai rifiuti speciali inviati a smaltimento, i rifiuti di carta e legno derivati dagli imballaggi e lo scarico di acque reflue derivanti dalla produzione di vetro. Come scenari di smaltimento si prevede l’incenerimento, eccetto per i rifiuti speciali che, in assenza di dettagli rispetto all’ambito materico e le relative quantità, vengono considerati come materiali inerti inviati a discarica.

VETRO FLOAT - UF=1 m <sup>2</sup> , sp 4 mm, peso 10 kg/m <sup>2</sup>				
INPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Sabbia silicea	7,29E+00	kg	Primario	Silica sand {RoW}   production   Cut-off, U
Carbonato di sodio	2,11E+00	kg	Primario	Soda ash, light, crystalline, heptahydrate {RER}   soda production, solvay process   Cut-off, U
Dolomite	1,84E+00	kg	Primario	Dolomite {RER}   production   Cut-off, U
Carbonato di calcio	5,40E-01	kg	Primario	Calcium carbonate, precipitated {RER}   calcium carbonate production, precipitated   Cut-off, U
Feldspato	2,50E-01	kg	Primario	Feldspar {RER}   production   Cut-off, U
Sodio solfato	8,00E-02	kg	Primario	Sodium sulfate, anhydrite {RER}   sodium sulfate production from natural sources   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Stagno	5,00E-04	kg	Primario	Tin {GLO}   market for   Cut-off, U
Idrogeno liquido	8,00E-02	kg	Primario	Hydrogen, liquid {RER}   market for   Cut-off, U
Azoto liquido	1,20E+00	kg	Primario	Nitrogen, liquid {RER}   market for   Cut-off, U
Casse di legno	1,09E-04	m <sup>3</sup>	Primario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}   production   Cut-off, U
Stecche di carta	3,00E-03	kg	Primario	Kraft paper, unbleached {RER}   production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	1,00E+01	kg	Primario	Tap water {Europe without Switzerland}   market for   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a media tensione	2,00E+00	kWh	Primario	Electricity, medium voltage {IT}   market for   Cut-off, U
Gas naturale ad alta pressione	2,50E+00	m <sup>3</sup>	Primario	Natural gas, high pressure {IT}   market for   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via mare	2,19E+01	tkm	Primario	Transport, freight, sea, container ship {GLO}   transport, freight, sea, container...   Cut-off, U
via gomma	1,45E+00	tkm	Primario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}   transport, freight...   Cut-off, U
OUTPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Trasporti</i>				
via gomma	3,73E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}   transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Rifiuti solidi urbani	2,00E-03	kg	Primario	Municipal solid waste {IT}   treatment of, incineration   Cut-off, U
Rifiuti speciali inviati a smaltimento	1,50E-01	kg	Primario	Inert waste, for final disposal {CH}   treatment of inert waste, inert material landfill   Cut-off, U
Rifiuti di carta	1,50E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	1,04E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Acque reflue	1,00E-02	m <sup>3</sup>	Primario	Wastewater from glass production {GLO}   market for   Cut-off, U
<i>Emissioni in aria</i>				
Anidride carbonica da fonti fossili	6,79E+00	kg	Primario	Carbon dioxide, fossil
Ossido d'azoto	4,00E-02	kg	Primario	Nitrogen oxides, IT
Diossido di zolfo	1,00E-02	kg	Primario	Sulfur dioxides, IT
Particolato	1,00E-03	kg	Primario	Particulates
Fluoruro di idrogeno	2,00E-05	kg	Primario	Hydrogen fluoride
Monossido di carbonio da fonti fossili	1,70E-05	kg	Primario	Carbon monoxide, fossil
Cloruro di idrogeno	1,50E-05	kg	Primario	Hydrogen chloride

Fig. 7.2.1. Dati di inventario del vetro float (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 4 mm, peso 10 kg/m<sup>2</sup>).

### Vetro basso-emissivo

L’inventario del vetro basso emissivo (sigla in inglese CFG, per vetrocamera abbreviata in C) è costituito dai dati primari relativi al vetro float (quota prevalente di impatto) e da dati secondari relativi a lavorazioni/materiali aggiuntivi, sottoposti a verifica e avvallo dei produttori italiani

rispetto alla loro rappresentatività. Questi ultimi sono reperiti dalla banca dati Ecoinvent e, nello specifico, dal dataset *“Flat glass, coated {RER}| production | Cut-off, U”*. I dati aggiuntivi di inventario, espressi nel dataset per 1 kg di prodotto, sono stati convertiti per 1 m<sup>2</sup> di vetro, in accordo con l’UF dello studio, considerando lastre di spessore 4 mm e peso 10 kg/m<sup>2</sup>. Per i calcoli di trasformazione (da 1 kg a 1 m<sup>2</sup>), i valori sono stati pertanto moltiplicati per 10 (1 m<sup>2</sup> corrisponde a 10 kg).

I flussi in input corrispondono principalmente alla lastra di vetro float, associata al nuovo dataset Arcadia *“Float Glass, at production”*, rappresentativo delle pratiche in essere sul territorio nazionale. Inoltre, si considerano i materiali aggiuntivi necessari per il processo di coatizzazione, ossia: cromo, nichel, argon liquido, azoto liquido e ossigeno liquido, oltre al polimetilmetacrilato in perline necessario per garantire la trasparenza e la resistenza ai graffi. I materiali ausiliari impiegati nella produzione comprendono invece l’olio lubrificante per la manutenzione dei macchinari, il solvente organico per le operazioni di pulizia, l’acetilene per lubrificare gli stampi di produzione del vetro. A questi si aggiungono i materiali di imballaggio costituiti da casse di legno e stecche di carta.

Per quanto riguarda i consumi, l’acqua impiegata per i processi di coatizzazione è considerata interamente alimentata da acquedotto. Inoltre, i consumi energetici si riferiscono principalmente a elettricità a media tensione, in minima parte a gas naturale e per una quota parte anche a carburante diesel e GPL, quest’ultimo utilizzato per la produzione di vapore destinato al processo di lavaggio e sterilizzazione dei vetri.

I trasporti in input sono imputati esclusivamente al trasporto delle lastre float, in quanto i trasporti delle altre materie prime e ausiliarie sono compresi nei dataset selezionati. I trasporti in output invece sono riferiti ai rifiuti generati, quali rifiuti solidi urbani e materiali di imballaggio. Inoltre, i rifiuti includono le acque reflue, gli olii esausti e i rottami di vetro generati dal processo di coatizzazione che, con il deposito di metalli, impedisce il riciclo del vetro basso-emissivo. Lo smaltimento avviene generalmente mediante incenerimento, ad eccezione dei rottami di vetro per cui viene utilizzato il mix specifico per il contesto italiano, composto dalle seguenti tecnologie: 1% di combustione a cielo aperto, 55% di discarica sanitaria, 44% di incenerimento municipale.

Da notare che sebbene i dati quantitativi aggiuntivi provengano da fonti secondarie, il principale dato ambientale alla base della modellizzazione, ossia il vetro float, deriva da dati primari rappresentativi delle pratiche in essere sul territorio nazionale.

VETRO BASSO EMISSIVO - UF=1 m <sup>2</sup> , sp 4 mm, peso 10 kg/m <sup>2</sup>				
INPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Vetro float	1	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Float Glass, at production
Cromo	5,97E-04	kg	Secondario	Chromium {GLO}   market for   Cut-off, U
Nichel	5,97E-04	kg	Secondario	Nickel, 99.5% {GLO}   market for   Cut-off, U
Argon liquido	4,46E-03	kg	Secondario	Argon, liquid {RER}   market for argon, liquid   Cut-off, U
Azoto liquido	2,87E-05	kg	Secondario	Nitrogen, liquid {RER}   market for   Cut-off, U
Ossigeno liquido	1,43E-02	kg	Secondario	Oxygen, liquid {RER}   market for   Cut-off, U
Polimetilmetacrilato in perline	3,20E-04	kg	Secondario	Polymethyl methacrylate, beads {GLO}   market for   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Olio lubrificante	2,02E-03	kg	Secondario	Lubricating oil {RER}   market for lubricating oil   Cut-off, U
Solvente organico	2,66E-05	kg	Secondario	Solvent, organic {GLO}   market for   Cut-off, U
Acetilene	2,02E-03	kg	Secondario	Acetylene {RER}   market for acetylene   Cut-off, U
Casse di legno	1,09E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}   production   Cut-off, U
Stecche di carta	3,00E-03	kg	Secondario	Kraft paper, unbleached {RER}   production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	5,11E-01	kg	Secondario	Tap water {Europe without Switzerland}   market for   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a media tensione	6,79E-01	kWh	Secondario	Electricity, medium voltage {IT}   market for   Cut-off, U
Gas naturale	5,40E-04	MJ	Secondario	Heat, district or industrial, natural gas {RER}   market group for   Cut-off, U
Diesel	1,92E-01	MJ	Secondario	Diesel, burned in building machine {GLO}   market for   Cut-off, U
GPL	2,02E-03	kg	Secondario	Liquefied petroleum gas {EU without Switzerland}   market for liquefied petroleum gas   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via gomma	2,50E-01	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}   transport, freight...   Cut-off, U
OUTPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Trasporti</i>				
via gomma	7,40E-04	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}   transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Rifiuti solidi urbani	2,09E-03	kg	Secondario	Municipal solid waste {IT}   treatment of, incineration   Cut-off, U
Rottami di vetro	1,96E-01	kg	Secondario	Waste glass {IT}   market group for waste glass   Cut-off, U
Rifiuti di carta	1,50E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	1,04E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Olii esausti	2,28E-04	kg	Secondario	Waste mineral oil {CH}   market for waste mineral oil   Cut-off, U
Acque reflue	5,11E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Wastewater from glass production {GLO}   market for   Cut-off, U

Fig. 7.2.2. Dati di inventario del vetro basso-emissivo (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 4 mm, peso 10 kg/m<sup>2</sup>).

## Vetro stratificato

L'inventario del vetro stratificato (sigla in inglese LSG, per vetrocamera abbreviata in L) è basato su dati primari, raccolti presso le aziende come media degli ultimi tre anni consecutivi di attività (2019-2020-2021). Tali dati sono stati forniti dalle aziende per 1 kg di prodotto e poi convertiti per 1 m<sup>2</sup> di vetro, in accordo con l'UF dello studio, considerando lastre di spessore 6 mm e peso 15,4 kg/m<sup>2</sup>. Per i calcoli di trasformazione (da 1 kg a 1 m<sup>2</sup>), tutti i dati di inventario sono stati pertanto moltiplicati per 15,4 (1 m<sup>2</sup> corrisponde a 15,4 kg), richiedendo solo in casi peculiari elaborazioni aggiuntive di seguito esplicitate.

Le risorse in input impiegate nel prodotto coincidono con due lastre di vetro float, ognuna di spessore 3 mm, associate al nuovo dataset Arcadia "Float Glass, at production", e uno strato di PVB di spessore 0,38 mm che viene interposto tra esse mediante il processo di stratifica. Poiché nel database Ecoinvent non è attualmente presente un dataset specifico per il polivinilbutirrale (PVB), è stato utilizzato il dataset del polivinilcloride (PVC) effettuandone la modellizzazione in accordo con quanto assunto all'interno del dataset "Glazing, double, U<1.1 W/m<sup>2</sup>K, laminated safety glass {RER} | production | Cut-off, U". Si è quindi considerato il 13% da processo di emulsione "Polyvinylchloride, emulsion polymerised {GLO} | market for | Cut-off, U", l'87% da processo di

sospensione “Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO}| market for | Cut-off, U” e l’estrusione della pellicola plastica tramite il dataset “Extrusion, plastic film {RER}| extrusion, plastic film | Cut-off, U”. Da notare che tali assunzioni non corrispondono con i valori percentuali considerati per lo studio di filiera del PVC (profilo finestra), in quanto ritenuti troppo specifici e non peculiari della filiera del PVB, attualmente non rappresentata in Ecoinvent da un dataset distintivo. Alle materie prime si aggiungono come materie ausiliare gli imballaggi in casse di legno e stecche di cartone, calcolati come media degli imballi usati complessivamente rispetto alla produzione di vetro stratificato (allocazione per massa effettuata dall’azienda di riferimento).

Come per tutti i prodotti in vetro, i consumi d’acqua sono considerati interamente da acquedotto, mentre le fonti energetiche in uso sono in prevalenza elettricità a media tensione, associata a una limitata quota di gas naturale ad alta pressione.

Per quanto riguarda i trasporti sono state considerate le tonnellate di materiale in input per le rispettive distanze dal fornitore all’impianto di produzione (tkm). In particolare, essi si riferiscono alla fornitura delle lastre in vetro float e delle pellicole di PVB, quest’ultime trasportate via gomma dal Belgio e/o Italia, considerando una media di circa 1000 km. I trasporti in output invece sono attribuiti ai rifiuti, considerando gli scarti in PVB e i materiali di imballaggio, entrambi destinati allo smaltimento tramite incenerimento. Infine, sono incluse le acque reflue derivate dal processo di stratifica, quale successiva lavorazione del vetro.

VETRO STRATIFICATO - UF=1 m <sup>2</sup> , sp 6 mm, peso 15,4 kg/m <sup>2</sup>				
INPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Vetro float	1,5	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Float Glass, at production
PVB film	4,62E-01	kg	Primario	Extrusion, plastic film {RER}  extrusion, plastic film   Cut-off, U
	6,01E-02	kg	Primario	Polyvinylchloride, emulsion polymerised {GLO}  market for   Cut-off, U
	4,02E-01	kg	Primario	Polyvinylchloride, suspension polymerised {GLO}  market for   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Casse di legno	2,80E-04	m <sup>3</sup>	Primario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}  production   Cut-off, U
Stecche di cartone	6,16E-03	kg	Primario	Kraft paper, unbleached {RER}  production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	7,70E+00	kg	Primario	Tap water {Europe without Switzerland}  market for   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a media tensione	1,54E+00	kWh	Primario	Electricity, medium voltage {IT}  market for   Cut-off, U
Gas naturale	9,86E-02	m <sup>3</sup>	Primario	Heat, district or industrial, natural gas {RER}  market group for   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via gomma	8,47E-01	tkm	Primario/Second	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
OUTPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Trasporti</i>				
via gomma	3,09E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Scarto di PVB	1,54E-02	kg	Primario	Waste polyvinylchloride {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di carta	2,30E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	1,60E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Acque reflue	7,70E-03	m <sup>3</sup>	Secondario	Wastewater from glass production {GLO}  market for   Cut-off, U

Fig. 7.2.4. Dati di inventario del vetro stratificato (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 8 mm, peso 18 kg/m<sup>2</sup>).

## Vetrocamera doppio vetro

L'inventario del vetrocamera a doppio vetro è costituito dai dati primari relativi al vetro float e al vetro stratificato (quota prevalente di impatto) e da dati secondari relativi a lavorazioni/materiali aggiuntivi, sottoposti a verifica e avvallo dei produttori italiani rispetto alla loro rappresentatività. Questi ultimi sono reperiti dalla banca dati Ecoinvent e, nello specifico, dal dataset "*Glazing, double,  $U < 1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$  {RER} | production | Cut-off, U*". I dati sono espressi nel dataset direttamente per  $1 \text{ m}^2$  di vetro, in accordo con l'UF dello studio, senza richiedere quindi alcuna conversione. Come prodotto rappresentativo base (F-L) si considera un sistema di spessore 26 mm (4-16-33.1), peso  $26,3 \text{ kg/m}^2$  e trasmittanza (U) pari a  $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ , derivato dall'assemblaggio di una lastra in vetro float (4 mm) e una in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm).

I flussi in input corrispondono principalmente alla lastra di vetro float, associata al nuovo dataset Arcadia "*Float Glass, at production*", e alla lastra di vetro stratificato, associata anch'essa al nuovo dataset Arcadia "*Laminated Safety Glass, at production*", entrambe rappresentative delle pratiche in essere sul territorio nazionale. A queste si aggiungono come materie prime l'alluminio e il relativo processo di laminazione per la produzione del distanziatore, la polvere di zeolite utilizzata come essiccante di riempimento del distanziatore per asciugare l'aria nella cavità e l'argon liquido impiegato come gas di riempimento dell'intercapedine tra le lastre di vetro per aumentare le prestazioni termiche. Inoltre, il polibutadiene e il polisolfuro sono adoperati come guarnizioni perimetrali per sigillare ermeticamente la vetrata. Per i materiali di imballaggio si considerano casse di legno e stecche di carta.

Rispetto all'inventario di partenza, sono state effettuate due principali modifiche in termini di materiali impiegati. La prima riguarda la lavorazione considerata per le lastre di vetro che si assumono all'esterno a semplice vetro float e all'interno a vetro stratificato (invece che assemblaggio lastre vetro float e vetro basso-emissivo). La seconda concerne invece l'aggiustamento della quantità di zeolite in polvere, impiegata come essiccante nel distanziatore (da  $1,3152 \text{ kg/m}^2$  a  $0,13152 \text{ kg/m}^2$ , dovuto in origine probabilmente ad un errore di battitura).

Per quanto riguarda i consumi, l'acqua impiegata è considerata principalmente trattata, in quanto addolcita, e in minima parte da acquedotto. Inoltre, a differenza delle lavorazioni precedenti per la produzione di vetri float, basso-emissivo e stratificati, i consumi energetici si riferiscono a elettricità a bassa tensione per la produzione di vetrocamera.

I trasporti in input sono imputati esclusivamente al trasporto delle lastre in vetro float e stratificato, in quanto i trasporti delle altre materie prime e ausiliarie sono compresi nei dataset selezionati. I

trasporti in output via gomma invece sono riferiti ai materiali di imballaggio, destinati ad incenerimento. Oltre ai rifiuti di carta e legno, è inclusa una quota parte di rottame di vetro, modellizzata utilizzando il mix di smaltimento specifico per il contesto italiano, composto dalle seguenti tecnologie: 1% di combustione a cielo aperto, 55% di discarica sanitaria, 44% di incenerimento municipale.

VETROCAMERA DOPPIO VETRO (F-L) - UF=1 m <sup>2</sup> , sp 4-16-33.1 mm, peso 26,3 kg/m <sup>2</sup>				
INPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Vetro float	1	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Float Glass, at production
Vetro stratificato	1	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Laminated Safety Glass, at production
Alluminio lega lavorata	3,03E-01	kg	Secondario	Aluminium, wrought alloy {GLO}  market for   Cut-off, U
Laminazione lamiera in alluminio	3,03E-01	kg	Secondario	Sheet rolling, aluminium {RER}  processing   Cut-off, U
Zeolite in polvere	1,32E-01	kg	Secondario	Zeolite, powder {GLO}  market for   Cut-off, U
Argon liquido	2,44E-02	kg	Secondario	Argon, liquid {RER}  market for argon, liquid   Cut-off, U
Polibutadiene	9,37E-03	kg	Secondario	Polybutadiene {GLO}  market for   Cut-off, U
Polisolfuro composto sigillante	4,38E-01	kg	Secondario	Polysulfide, sealing compound {GLO}  market for   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Casse di legno	2,87E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}  production   Cut-off, U
Stecche di cartone	7,89E-03	kg	Secondario	Kraft paper, unbleached {RER}  production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	2,39E-01	kg	Secondario	Tap water {Europe without Switzerland}  market for   Cut-off, U
Acqua trattata	9,96E-01	kg	Secondario	Water, completely softened {RER}  market for water, completely softened   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a bassa tensione	3,21E+00	kWh	Secondario	Electricity, low voltage {IT}  market group for   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via gomma	2,54E+00	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
OUTPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Trasporti</i>				
via gomma	1,07E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Rottame di vetro	1,36E+00	kg	Secondario	Waste glass {IT}  market group for waste glass   Cut-off, U
Rifiuti di carta	3,93E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	2,74E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Acque reflue	9,96E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Wastewater, unpolluted {CH}  market for wastewater, unpolluted   Cut-off, U

Fig. 7.2.5. Dati di inventario del vetrocamera doppio vetro F-L (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 4-16-33.1 mm, peso 26,3 kg/m<sup>2</sup>).

Inoltre, dato che sul mercato è attualmente disponibile un'ampia gamma di soluzioni vetrocamera, sono stati elaborati prodotti vetrocamera a doppio vetro aggiuntivi, considerando la combinazione e l'assemblaggio di lastre di vetro soggette a diverse lavorazioni. A tal fine, l'inventario base del vetrocamera a doppio vetro, costituito all'esterno da un vetro float e all'interno da un vetro stratificato (F-L), è stato modificato per modellizzare due soluzioni alternative rappresentative delle pratiche attuali: una comprendente all'esterno una lastra in vetro basso-emissivo (C-L) e all'interno un vetro stratificato (L-L). I dati di inventario sono quindi stati modificati in termini di quantità di vetro in input, riproporzionando di conseguenza anche i contributi di imballaggi, fonti energetiche e idriche, trasporti e rifiuti, in quanto assunti in base alla massa complessiva del prodotto. Rimangono invece invariate le materie prime aggiuntive al vetro, ossia le risorse impiegate per il processo di assemblaggio in vetrocamera (es. distanziatore, gas di riempimento). Il primo prodotto

vetrocamera aggiuntivo (C-L) prevede un sistema di spessore 26 mm (4-16-33.1), peso 26,3 kg/m<sup>2</sup>, 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). Il secondo, invece, considera un sistema di spessore 28 mm (33.1-16-33.1), peso 31,7 kg/m<sup>2</sup>, derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro stratificato (33.1) con interposto gas argon (16 mm).

<b>VETROCAMERA DOPPIO VETRO (C-L) - UF=1 m<sup>2</sup>, sp 4-16-33.1 mm, peso 26,3 kg/m<sup>2</sup></b>				
<b>INPUT</b>	<b>Valore</b>	<b>UdM</b>	<b>Tipologia dato</b>	<b>Dataset di riferimento</b>
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Vetro basso-emissivo	1	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Coated Float Glass, at production
Vetro stratificato	1	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Laminated Safety Glass, at production
Alluminio lega lavorata	3,03E-01	kg	Secondario	Aluminium, wrought alloy {GLO}  market for   Cut-off, U
Laminazione lamiera in alluminio	3,03E-01	kg	Secondario	Sheet rolling, aluminium {RER}  processing   Cut-off, U
Zeolite in polvere	1,32E-01	kg	Secondario	Zeolite, powder {GLO}  market for   Cut-off, U
Argon liquido	2,44E-02	kg	Secondario	Argon, liquid {RER}  market for argon, liquid   Cut-off, U
Polibutadiene	9,37E-03	kg	Secondario	Polybutadiene {GLO}  market for   Cut-off, U
Polisolfuro composto sigillante	4,38E-01	kg	Secondario	Polysulfide, sealing compound {GLO}  market for   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Casse di legno	2,87E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}  production   Cut-off, U
Stecche di cartone	7,89E-03	kg	Secondario	Kraft paper, unbleached {RER}  production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	2,39E-01	kg	Secondario	Tap water {Europe without Switzerland}  market for   Cut-off, U
Acqua trattata	9,96E-01	kg	Secondario	Water, completely softened {RER}  market for water, completely softened   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a bassa tensione	3,21E+00	kWh	Secondario	Electricity, low voltage {IT}  market group for   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via gomma	2,54E+00	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
<b>OUTPUT</b>				
<i>Trasporti</i>				
via gomma	1,07E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Rottame di vetro	1,36E+00	kg	Secondario	Waste glass {IT}  market group for waste glass   Cut-off, U
Rifiuti di carta	3,93E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	2,74E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Acque reflue	9,96E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Wastewater, unpolluted {CH}  market for wastewater, unpolluted   Cut-off, U

Fig. 7.2.6. Dati di inventario del vetrocamera doppio vetro C-L (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 4-16-33.1 mm, peso 26,3 kg/m<sup>2</sup>).

VETROCAMERA DOPPIO VETRO (L-L) - UF=1 m <sup>2</sup> , sp 33.1-16-33.1 mm, peso 31,7 kg/m <sup>2</sup>				
INPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Vetro stratificato	2	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Laminated Safety Glass, at production
Alluminio lega lavorata	3,03E-01	kg	Secondario	Aluminium, wrought alloy {GLO}   market for   Cut-off, U
Laminazione lamiera in alluminio	3,03E-01	kg	Secondario	Sheet rolling, aluminium {RER}   processing   Cut-off, U
Zeolite in polvere	1,32E-01	kg	Secondario	Zeolite, powder {GLO}   market for   Cut-off, U
Argon liquido	2,44E-02	kg	Secondario	Argon, liquid {RER}   market for argon, liquid   Cut-off, U
Polibutadiene	9,37E-03	kg	Secondario	Polybutadiene {GLO}   market for   Cut-off, U
Polisolfuro composto sigillante	4,38E-01	kg	Secondario	Polysulfide, sealing compound {GLO}   market for   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Casse di legno	3,46E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}   production   Cut-off, U
Stecche di cartone	9,51E-03	kg	Secondario	Kraft paper, unbleached {RER}   production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	2,88E-01	kg	Secondario	Tap water {Europe without Switzerland}   market for   Cut-off, U
Acqua trattata	1,20E+00	kg	Secondario	Water, completely softened {RER}   market for water, completely softened   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a bassa tensione	3,87E+00	kWh	Secondario	Electricity, low voltage {IT}   market group for   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via gomma	3,08E+00	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}   transport, freight...   Cut-off, U
OUTPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Trasporti</i>				
via gomma	1,29E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}   transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Rottame di vetro	1,63E+00	kg	Secondario	Waste glass {IT}   market group for waste glass   Cut-off, U
Rifiuti di carta	4,74E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	3,30E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}   treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Acque reflue	1,20E-03	m <sup>3</sup>	Secondario	Wastewater, unpolluted {CH}   market for wastewater, unpolluted   Cut-off, U

Fig. 7.2.7. Dati di inventario del vetrocamera doppio vetro L-L (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 33.1-16-33.1 mm, peso 31,7 kg/m<sup>2</sup>).

Da notare che in tutti i prodotti vetrocamera a doppio vetro, i principali dati ambientali alla base della modellizzazione, ossia le lastre in vetro, derivano da dati primari rappresentativi delle pratiche in essere sul territorio nazionale. I restanti dati quantitativi provengono da fonti secondarie.

In **Allegato I** è disponibile un focus di approfondimento sui vetrocamera e, in particolare, sugli impatti ambientali associati ai distanziatori.

### Vetrocamera triplo vetro

L'inventario del vetrocamera a triplo vetro è costituito dai dati primari relativi al vetro float (quota prevalente di impatto) e da dati secondari relativi a lavorazioni/materiali aggiuntivi, sottoposti a verifica e avallo dei produttori italiani rispetto alla loro rappresentatività. Questi ultimi sono reperiti dalla banca dati Ecoinvent e, nello specifico, dal dataset "Glazing, triple, U<0.5 W/m<sup>2</sup>K {RER} | production | Cut-off, U". I dati sono espressi nel dataset direttamente per 1 m<sup>2</sup> di vetro, in accordo con l'UF dello studio, senza richiedere quindi alcuna conversione. Come prodotto rappresentativo base (F-F-L) si considera un sistema di spessore 42 mm (4-14-4-14-33.1), peso 36,9 kg/m<sup>2</sup> e trasmittanza (U) pari a 0,6 W/m<sup>2</sup>K, derivato dall'assemblaggio di due lastre in vetro float (4 mm), rispettivamente all'esterno e al centro, e una lastra in vetro stratificato (33.1), disposta invece all'interno, con interposto gas argon (14 mm).

I flussi in input corrispondono principalmente alle lastre di vetro float, associate al nuovo dataset Arcadia *“Float Glass, at production”*, e alla lastra di vetro stratificato, associata anch’essa al nuovo dataset Arcadia *“Laminated Safety Glass, at production”*, entrambe rappresentative delle pratiche in essere sul territorio nazionale. A queste si aggiungono come materie prime l’alluminio e il relativo processo di laminazione per la produzione del distanziatore, la polvere di zeolite utilizzata come essiccante di riempimento del distanziatore per asciugare l’aria nella cavità e l’argon liquido impiegato come gas di riempimento dell’intercapedine tra le lastre di vetro per aumentare le prestazioni termiche. Inoltre, il polibutadiene e il polisolfuro sono adoperati come guarnizioni perimetrali per sigillare ermeticamente la vetrata. Per i materiali di imballaggio si considerano casse di legno e stecche di carta, come per gli altri prodotti in vetro oggetto di studio.

Rispetto all’inventario di partenza, sono state effettuate due principali modifiche in termini di materiali impiegati. La prima riguarda la lavorazione considerata per le lastre di vetro che si assumono due a semplice vetro float e una a vetro stratificato (invece che assemblaggio di una lastra vetro float e due lastre vetro basso-emissivo). La seconda concerne invece la sostituzione del gas di riempimento (da krypton gassoso ad argon liquido), in linea con la prassi attuale nell’ambito della filiera vetro e la sua applicazione in edilizia.

Per quanto riguarda i consumi, come nel caso della produzione del vetrocamera a doppio vetro, l’acqua impiegata è considerata principalmente trattata, in quanto addolcita, e in minima parte da acquedotto. Inoltre, a differenza delle lavorazioni precedenti per la produzione di vetri float, basso-emissivo e stratificati, i consumi energetici si riferiscono a elettricità a bassa tensione per la produzione di vetrocamera.

I trasporti in input sono imputati esclusivamente al trasporto delle lastre in vetro float e stratificato, in quanto i trasporti delle altre materie prime e ausiliarie sono compresi nei dataset selezionati. I trasporti in output via gomma invece sono riferiti ai materiali di imballaggio, destinati ad incenerimento. Oltre ai rifiuti di carta e legno, è inclusa una quota parte di rottame di vetro, modellizzata utilizzando il mix di smaltimento specifico per il contesto italiano, composto dalle seguenti tecnologie: 1% di combustione a cielo aperto, 55% di discarica sanitaria, 44% di incenerimento municipale.

Da notare che sebbene i dati quantitativi aggiuntivi provengano da fonti secondarie, i principali dati ambientali alla base della modellizzazione, ossia il vetro float e il vetro stratificato, derivano da dati primari rappresentativi delle pratiche in essere sul territorio nazionale.

VETROCAMERA TRIPLO VETRO (F-F-L) - UF=1 m <sup>2</sup> , sp 4-14-4-14-33.1 mm, peso 36,9 kg/m <sup>2</sup>				
INPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Vetro float	2	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Float Glass, at production
Vetro stratificato	1	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Laminated Safety Glass, at production
Alluminio lega lavorata	5,20E-01	kg	Secondario	Aluminium, wrought alloy {GLO}  market for   Cut-off, U
Laminazione lamiera in alluminio	5,20E-01	kg	Secondario	Sheet rolling, aluminium {RER}  processing   Cut-off, U
Zeolite in polvere	1,93E-01	kg	Secondario	Zeolite, powder {GLO}  market for   Cut-off, U
Argon liquido	7,70E-02	kg	Secondario	Argon, liquid {RER}  market for argon, liquid   Cut-off, U
Polibutadiene	1,87E-02	kg	Secondario	Polybutadiene {GLO}  market for   Cut-off, U
Polisolfuro composto sigillante	6,57E-01	kg	Secondario	Polysulfide, sealing compound {GLO}  market for   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Casse di legno	4,03E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}  production   Cut-off, U
Stecche di cartone	1,11E-02	kg	Secondario	Kraft paper, unbleached {RER}  production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	3,59E-01	kg	Secondario	Tap water {Europe without Switzerland}  market for   Cut-off, U
Acqua trattata	1,49E+00	kg	Secondario	Water, completely softened {RER}  market for water, completely softened   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a bassa tensione	4,81E+00	kWh	Secondario	Electricity, low voltage {IT}  market group for   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via gomma	3,54E+00	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
OUTPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Trasporti</i>				
via gomma	1,50E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Rottame di vetro	2,03E+00	kg	Secondario	Waste glass {IT}  market group for waste glass   Cut-off, U
Rifiuti di carta	5,52E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	3,84E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Acque reflue	1,49E-03	m <sup>3</sup>	Secondario	Wastewater, unpolluted {CH}  market for wastewater, unpolluted   Cut-off, U

Fig. 7.2.8. Dati di inventario del vetrocamera triplo vetro F-F-L (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 4-14-4-14-33.1 mm, peso 36,9 kg/m<sup>2</sup>).

Così come eseguito per i vetrocamera a doppio vetro, anche per il triplo vetro si è considerato opportuno modellizzare una soluzione alternativa al fine di rappresentare le pratiche in atto sul territorio nazionale. L'inventario base del vetrocamera a triplo vetro, costituito all'esterno e al centro da vetri float e all'interno da un vetro stratificato (F-F-L), è stato modificato al fine di modellizzare una soluzione alternativa, comprendente sia all'interno sia all'esterno lastre in vetro stratificato, mantenendo al centro il vetro float (L-F-L). I dati di inventario sono quindi stati modificati in termini di quantità di vetro in input, riproporzionando di conseguenza anche i contributi di imballaggi, fonti energetiche e idriche, trasporti e rifiuti, in quanto assunti in base alla massa complessiva del prodotto. Rimangono invece invariate le materie prime aggiuntive al vetro, ossia le risorse impiegate per il processo di assemblaggio in vetrocamera (es. distanziatore, gas di riempimento). Il risultante prodotto vetrocamera aggiuntivo (L-F-L) prevede un sistema a triplo vetro di spessore 44 mm (33.1-14-4-14-33.1), peso 42,3 kg/m<sup>2</sup>, derivato dall'assemblaggio alle estremità esterna ed interna di lastre in vetro stratificato (33.1) e al centro di una lastra in vetro float (4 mm) con interposto gas argon (14 mm).

VETROCAMERA TRIPLO VETRO (L-F-L) - UF=1 m <sup>2</sup> , sp 33.1-14-4-14-33.1 mm, peso 42,3 kg/m <sup>2</sup>				
INPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Materie prime (risorse impiegate nel prodotto)</i>				
Vetro float	1	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Float Glass, at production
Vetro stratificato	2	m <sup>2</sup>	Primario	ARCADIA project, Laminated Safety Glass, at production
Alluminio lega lavorata	5,20E-01	kg	Secondario	Aluminium, wrought alloy {GLO}  market for   Cut-off, U
Laminazione lamiera in alluminio	5,20E-01	kg	Secondario	Sheet rolling, aluminium {RER}  processing   Cut-off, U
Zeolite in polvere	1,93E-01	kg	Secondario	Zeolite, powder {GLO}  market for   Cut-off, U
Argon liquido	7,70E-02	kg	Secondario	Argon, liquid {RER}  market for argon, liquid   Cut-off, U
Polibutadiene	1,87E-02	kg	Secondario	Polybutadiene {GLO}  market for   Cut-off, U
Polisolfuro composto sigillante	6,57E-01	kg	Secondario	Polysulfide, sealing compound {GLO}  market for   Cut-off, U
<i>Materie ausiliarie (risorse impiegate nella produzione)</i>				
Casse di legno	4,61E-04	m <sup>3</sup>	Secondario	Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RER}  production   Cut-off, U
Stecche di cartone	1,27E-02	kg	Secondario	Kraft paper, unbleached {RER}  production   Cut-off, U
<i>Fonti idriche</i>				
Acqua da acquedotto	4,11E-01	kg	Secondario	Tap water {Europe without Switzerland}  market for   Cut-off, U
Acqua trattata	1,71E+00	kg	Secondario	Water, completely softened {RER}  market for water, completely softened   Cut-off, U
<i>Fonti energetiche</i>				
Elettricità a bassa tensione	5,52E+00	kWh	Secondario	Electricity, low voltage {IT}  market group for   Cut-off, U
<i>Trasporti</i>				
via gomma	4,08E+00	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
OUTPUT	Valore	UdM	Tipologia dato	Dataset di riferimento
<i>Trasporti</i>				
via gomma	1,72E-03	tkm	Secondario	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 {RER}  transport, freight...   Cut-off, U
<i>Rifiuti</i>				
Rottame di vetro	2,33E+00	kg	Secondario	Waste glass {IT}  market group for waste glass   Cut-off, U
Rifiuti di carta	6,33E-03	kg	Secondario	Waste paperboard {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Rifiuti di legno	4,40E-03	kg	Secondario	Waste wood untreated {CH}  treatment of, municipal incineration   Cut-off, U
Acque reflue	1,71E-03	m <sup>3</sup>	Secondario	Wastewater, unpolluted {CH}  market for wastewater, unpolluted   Cut-off, U

Fig. 7.2.9. Dati di inventario del vetrocamera triplo vetro L-F-L (UF=1 m<sup>2</sup>, sp 33.1-14-4-14-33.1 mm, peso 42,3 kg/m<sup>2</sup>).

Da notare che in tutti i prodotti vetrocamera a triplo vetro, i principali dati ambientali alla base della modellizzazione, ossia il vetro float e il vetro stratificato, derivano da dati primari rappresentativi delle pratiche in essere sul territorio nazionale. I restanti dati quantitativi provengono da fonti secondarie.

In **Allegato I** è disponibile un focus di approfondimento sui vetrocamera e, in particolare, sugli impatti ambientali associati ai distanziatori.

### 7.3 Sviluppo dei datasets

A seguito del presente studio sono stati sviluppati un totale di otto dataset, di seguito specificati, rappresentativi della filiera vetro per serramenti ed infissi a scala nazionale.

Per le lastre in vetro (x3):

- "Float Glass, at production" per il vetro float (FG);
- "Coated Float Glass, at production" per il vetro basso-emissivo (CFG);
- "Laminated Safety Glass, at production" per il vetro stratificato (LSG).

Per i vetrocamera a doppio vetro (IGUd x3):

- *“Insulated Glass Unit, double glazing, float-laminated”* per il doppio vetro composto dall’assemblaggio di un vetro float e un vetro stratificato (F-L);
- *“Insulated Glass Unit, double glazing, coated-laminated”* per il doppio vetro composto dall’assemblaggio di un vetro basso-emissivo e un vetro stratificato (C-L);
- *“Insulated Glass Unit, double glazing, laminated-laminated”* per il doppio vetro composto dall’assemblaggio di due vetri stratificati (L-L).

Per i vetrocamera a triplo vetro (IGUt x2):

- *“Insulated Glass Unit, triple glazing, float-float-laminated”* per il triplo vetro composto dall’assemblaggio di due vetri float e un vetro stratificato (F-F-L);
- *“Insulated Glass Unit, triple glazing, laminated-float-laminated”* per il triplo vetro composto dall’assemblaggio di due vetri stratificati e un vetro float (L-F-L).

Essi sono di interesse comune per la filiera del vetro e in generale per il settore delle costruzioni, dato il diffuso impiego in finestre ed infissi, nonché per i possibili utenti della banca dati Arcadia. Tali dataset sono basati su dati solidi, sia primari sia secondari, caratterizzati da una buona rappresentatività.

## 8 Valutazione degli impatti ambientali

In accordo con la Norma ISO 14040, è stata eseguita la fase di valutazione al fine di evidenziare l’entità delle modificazioni ambientali che si generano a seguito dei rilasci nell’ambiente e del consumo di risorse provocati dai prodotti in esame. Nello specifico, tale fase viene effettuata per ogni prodotto in vetro, imputando i consumi e le emissioni a specifiche categorie di impatto, riferibili ad effetti ambientali conosciuti, e quantificando l’entità del contributo che il processo arreca agli effetti considerati.

La valutazione degli impatti in accordo alla ISO 14040 e ISO 14044 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, determinando 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 e ISO 14044 le operazioni di normalizzazione, raggruppamento e ponderazione (pesatura). Ai fini del presente studio LCA di filiera è stato utilizzato il metodo di valutazione degli impatti EF 3.0 (Zampori e Pant, 2019) e i risultati delle fasi appena descritte sono riportate nei paragrafi successivi.

## 8.1 Caratterizzazione

In Tab. 8.1.1 sono indicati i risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro sottoposto alle diverse lavorazioni, ossia lastre di: vetro float (FG), vetro basso-emissivo (CFG) e vetro stratificato (LSG). A partire dagli impatti del vetro float, che corrisponde al prodotto base di riferimento, viene mostrato l'incremento percentuale (%) dovuto alle diverse lavorazioni.

CARATTERIZZAZIONE		Float glass	Coated glass		Laminated glass	
		FG	CFG	var %	LSG	var %
Climate change	[kg CO2 eq]	1,21E+01	1,25E+01	4%	2,04E+01	69%
Ozone depletion	[kg CFC11 eq]	1,85E-06	1,91E-06	3%	3,46E-06	87%
Ionising radiation	[kBq U-235 eq]	5,10E-01	5,69E-01	12%	1,02E+00	100%
Photochemical ozone formation	[kg NMVOC eq]	6,04E-02	6,20E-02	3%	9,69E-02	61%
Particulate matter	[disease inc.]	3,34E-07	3,53E-07	6%	5,79E-07	73%
Human toxicity, non-cancer	[CTUh]	8,82E-08	9,28E-08	5%	1,76E-07	100%
Human toxicity, cancer	[CTUh]	2,51E-09	2,80E-09	12%	5,17E-09	106%
Acidification	[mol H+ eq]	3,94E-02	4,38E-02	11%	7,00E-02	78%
Eutrophication, freshwater	[kg P eq]	1,38E-03	1,50E-03	9%	2,78E-03	102%
Eutrophication, marine	[kg N eq]	2,16E-02	2,21E-02	2%	3,45E-02	60%
Eutrophication, terrestrial	[mol N eq]	1,45E-01	1,50E-01	4%	2,40E-01	65%
Ecotoxicity, freshwater	[CTUe]	1,56E+02	1,65E+02	5%	2,74E+02	75%
Land use	[Pt]	5,20E+01	6,64E+01	28%	1,21E+02	132%
Water use	[m3 depriv.]	2,79E+00	3,02E+00	8%	5,83E+00	109%
Resource use, fossils	[MJ]	1,53E+02	1,60E+02	4%	2,71E+02	77%
Resource use, minerals and metals	[kg Sb eq]	8,95E-05	9,32E-05	4%	1,69E-04	89%
Climate change, Fossil	[kg CO2 eq]	1,20E+01	1,25E+01	4%	2,03E+01	69%
Climate change, Biogenic	[kg CO2 eq]	3,43E-02	3,96E-02	16%	6,75E-02	97%
Climate change, Land use and LU change	[kg CO2 eq]	2,48E-03	2,71E-03	9%	5,39E-03	118%
Human toxicity, non-cancer, organics	[CTUh]	8,91E-09	9,20E-09	3%	1,44E-08	62%
Human toxicity, non-cancer, inorganics	[CTUh]	1,80E-08	1,88E-08	4%	3,46E-08	92%
Human toxicity, non-cancer, metals	[CTUh]	6,27E-08	6,63E-08	6%	1,30E-07	107%
Human toxicity, cancer, organics	[CTUh]	7,24E-10	7,96E-10	10%	1,53E-09	112%
Human toxicity, cancer, inorganics	[CTUh]	0,00E+00	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%
Human toxicity, cancer, metals	[CTUh]	1,79E-09	2,01E-09	12%	3,63E-09	104%
Ecotoxicity, freshwater, organics	[CTUe]	1,04E+00	1,15E+00	11%	1,98E+00	90%
Ecotoxicity, freshwater, inorganics	[CTUe]	6,38E+01	6,44E+01	1%	1,03E+02	62%
Ecotoxicity, freshwater, metals	[CTUe]	9,16E+01	9,91E+01	8%	1,68E+02	84%

Tab. 8.1.1. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotti in lastre di vetro.

In Tab. 8.1.2 sono indicati i risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di vetrocamera sia doppio vetro sia triplo vetro ottenuto dall'assemblaggio di diverse combinazioni di lastre: vetro float (sigla abbreviata in F), vetro basso-emissivo (sigla abbreviata in C), vetro stratificato (sigla abbreviata in L). A partire dagli impatti del vetrocamera semplice a doppio vetro (F-L), viene mostrato l'incremento percentuale (%) dovuto alle diverse soluzioni.

CARATTERIZZAZIONE		Double glazing					Triple glazing			
		(F-L)	(C-L)	var %	(L-L)	var %	(F-F-L)	(L-F-L)	var %	
Climate change	[kg CO2 eq]	4,02E+01	4,06E+01	1%	4,89E+01	22%	5,70E+01	42%	6,57E+01	64%
Ozone depletion	[kg CFC11 eq]	6,06E-06	6,12E-06	1%	7,73E-06	28%	8,31E-06	37%	9,98E-06	65%
Ionising radiation	[kBq U-235 eq]	2,03E+00	2,09E+00	3%	2,58E+00	27%	2,85E+00	40%	3,40E+00	68%
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,82E-01	1,84E-01	1%	2,20E-01	21%	2,58E-01	42%	2,96E-01	62%
Particulate matter	[disease inc.]	1,40E-06	1,42E-06	1%	1,66E-06	18%	2,04E-06	46%	2,30E-06	64%
Human toxicity, non-cancer	[CTUh]	4,70E-07	4,74E-07	1%	5,62E-07	20%	6,83E-07	45%	7,75E-07	65%
Human toxicity, cancer	[CTUh]	2,11E-08	2,14E-08	1%	2,39E-08	13%	3,15E-08	49%	3,43E-08	63%
Acidification	[mol H+ eq]	1,57E-01	1,62E-01	3%	1,90E-01	21%	2,27E-01	44%	2,59E-01	65%
Eutrophication, freshwater	[kg P eq]	6,74E-03	6,87E-03	2%	8,23E-03	22%	9,78E-03	45%	1,13E-02	67%
Eutrophication, marine	[kg N eq]	6,44E-02	6,49E-02	1%	7,76E-02	21%	9,11E-02	41%	1,04E-01	62%
Eutrophication, terrestrial	[mol N eq]	4,72E-01	4,78E-01	1%	5,71E-01	21%	6,70E-01	42%	7,69E-01	63%
Ecotoxicity, freshwater	[CTUe]	8,19E+02	8,27E+02	1%	9,41E+02	15%	1,19E+03	45%	1,31E+03	60%
Land use	[Pt]	2,34E+02	2,49E+02	6%	3,13E+02	33%	3,15E+02	35%	3,94E+02	68%
Water use	[m3 depriv.]	1,12E+01	1,15E+01	2%	1,45E+01	29%	1,55E+01	38%	1,88E+01	67%
Resource use, fossils	[MJ]	5,14E+02	5,21E+02	1%	6,38E+02	24%	7,22E+02	40%	8,46E+02	64%
Resource use, minerals and metals	[kg Sb eq]	4,13E-04	4,16E-04	1%	4,97E-04	20%	5,81E-04	41%	6,65E-04	61%
Climate change, Fossil	[kg CO2 eq]	4,00E+01	4,04E+01	1%	4,87E+01	22%	5,68E+01	42%	6,55E+01	64%
Climate change, Biogenic	[kg CO2 eq]	1,42E-01	1,47E-01	4%	1,80E-01	27%	1,98E-01	40%	2,36E-01	67%
Climate change, Land use and LU change	[kg CO2 eq]	2,50E-02	2,52E-02	1%	2,80E-02	12%	3,94E-02	57%	4,24E-02	70%
Human toxicity, non-cancer, organics	[CTUh]	2,86E-08	2,89E-08	1%	3,43E-08	20%	4,04E-08	41%	4,61E-08	61%
Human toxicity, non-cancer, inorganics	[CTUh]	1,22E-07	1,23E-07	1%	1,40E-07	14%	1,80E-07	48%	1,98E-07	62%
Human toxicity, non-cancer, metals	[CTUh]	3,24E-07	3,27E-07	1%	3,94E-07	22%	4,69E-07	45%	5,39E-07	67%
Human toxicity, cancer, organics	[CTUh]	9,38E-09	9,45E-09	1%	1,03E-08	9%	1,41E-08	51%	1,50E-08	60%
Human toxicity, cancer, inorganics	[CTUh]	0,00E+00	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%	0,00E+00	0%
Human toxicity, cancer, metals	[CTUh]	1,17E-08	1,19E-08	2%	1,36E-08	17%	1,73E-08	48%	1,93E-08	65%
Ecotoxicity, freshwater, organics	[CTUe]	1,38E+01	1,39E+01	1%	1,48E+01	8%	2,03E+01	47%	2,14E+01	55%
Ecotoxicity, freshwater, inorganics	[CTUe]	1,91E+02	1,92E+02	0%	2,31E+02	21%	2,68E+02	40%	3,08E+02	61%
Ecotoxicity, freshwater, metals	[CTUe]	6,14E+02	6,21E+02	1%	6,95E+02	13%	8,98E+02	46%	9,79E+02	60%

Tab. 8.1.2. Risultati di caratterizzazione relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotti vetrocamera.

## 8.2 Normalizzazione

In Tab. 8.2.1 sono indicati i risultati di normalizzazione relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro sottoposto alle diverse lavorazioni: vetro float (FG, abbreviato in F), vetro basso-emissivo (CFG, abbreviato in C) e vetro stratificato (LSG, abbreviato in L); e relative combinazioni per la realizzazione di vetrocamera a doppio vetro e a triplo vetro.

NORMALIZZAZIONE	Float glass	Coated glass	Laminated glass	Double glazing			Triple glazing	
	FG	CFG	LSG	(F-L)	(C-L)	(L-L)	(F-F-L)	(L-F-L)
Climate change	1,49E-03	1,55E-03	2,52E-03	4,96E-03	5,02E-03	6,04E-03	7,04E-03	8,12E-03
Ozone depletion	3,44E-05	3,56E-05	6,45E-05	1,13E-04	1,14E-04	1,44E-04	1,55E-04	1,86E-04
Ionising radiation	1,21E-04	1,35E-04	2,42E-04	4,81E-04	4,95E-04	6,12E-04	6,76E-04	8,07E-04
Photochemical ozone formation	1,49E-03	1,53E-03	2,39E-03	4,49E-03	4,53E-03	5,42E-03	6,36E-03	7,28E-03
Particulate matter	5,61E-04	5,93E-04	9,72E-04	2,35E-03	2,38E-03	2,78E-03	3,42E-03	3,86E-03
Human toxicity, non-cancer	3,84E-04	4,04E-04	7,68E-04	2,05E-03	2,07E-03	2,45E-03	2,97E-03	3,38E-03
Human toxicity, cancer	1,49E-04	1,66E-04	3,06E-04	1,25E-03	1,26E-03	1,41E-03	1,86E-03	2,03E-03
Acidification	7,09E-04	7,88E-04	1,26E-03	2,83E-03	2,91E-03	3,42E-03	4,08E-03	4,67E-03
Eutrophication, freshwater	8,57E-04	9,35E-04	1,73E-03	4,20E-03	4,27E-03	5,12E-03	6,08E-03	7,02E-03
Eutrophication, marine	1,11E-03	1,13E-03	1,77E-03	3,29E-03	3,32E-03	3,97E-03	4,66E-03	5,34E-03
Eutrophication, terrestrial	8,20E-04	8,51E-04	1,36E-03	2,67E-03	2,70E-03	3,23E-03	3,79E-03	4,35E-03
Ecotoxicity, freshwater	3,66E-03	3,86E-03	6,41E-03	1,92E-02	1,94E-02	2,21E-02	2,78E-02	3,07E-02
Land use	6,35E-05	8,10E-05	1,48E-04	2,86E-04	3,03E-04	3,81E-04	3,85E-04	4,80E-04
Water use	2,43E-04	2,63E-04	5,09E-04	9,78E-04	9,98E-04	1,26E-03	1,35E-03	1,64E-03
Resource use, fossils	2,35E-03	2,46E-03	4,17E-03	7,91E-03	8,01E-03	9,81E-03	1,11E-02	1,30E-02
Resource use, minerals and metals	1,41E-03	1,46E-03	2,66E-03	6,48E-03	6,54E-03	7,81E-03	9,12E-03	1,04E-02

Tab. 8.2.1. Risultati di normalizzazione relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro, incluse sia le diverse lavorazioni delle lastre di vetro sia le diverse soluzioni di vetrocamera.

## 8.3 Pesatura

In Tab. 8.3.1 sono indicati i risultati di pesatura relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro sottoposto alle diverse lavorazioni: vetro float (FG, abbreviato in F), vetro basso-emissivo (CFG, abbreviato in C) e vetro stratificato (LSG, abbreviato in L); e relative combinazioni per la realizzazione di vetrocamera a doppio vetro e a triplo vetro.

PESATURA		Float glass	Coated glass	Laminated glass	Double glazing			Triple glazing	
		FG	CFG	LSG	(F-L)	(C-L)	(L-L)	(F-F-L)	(L-F-L)
Totale	[mPt]	9,83E-01	1,03E+00	1,72E+00	3,68E+00	3,72E+00	4,45E+00	5,23E+00	6,00E+00
Climate change	[mPt]	3,14E-01	3,25E-01	5,31E-01	1,05E+00	1,06E+00	1,27E+00	1,48E+00	1,71E+00
Ozone depletion	[mPt]	2,17E-03	2,25E-03	4,07E-03	7,12E-03	7,20E-03	9,09E-03	9,77E-03	1,17E-02
Ionising radiation	[mPt]	6,06E-03	6,76E-03	1,21E-02	2,41E-02	2,48E-02	3,07E-02	3,38E-02	4,04E-02
Photochemical ozone formation	[mPt]	7,11E-02	7,29E-02	1,14E-01	2,15E-01	2,16E-01	2,59E-01	3,04E-01	3,48E-01
Particulate matter	[mPt]	5,03E-02	5,32E-02	8,71E-02	2,10E-01	2,13E-01	2,49E-01	3,07E-01	3,46E-01
Human toxicity, non-cancer	[mPt]	7,07E-03	7,44E-03	1,41E-02	3,76E-02	3,80E-02	4,50E-02	5,47E-02	6,21E-02
Human toxicity, cancer	[mPt]	3,16E-03	3,53E-03	6,51E-03	2,65E-02	2,69E-02	3,01E-02	3,97E-02	4,33E-02
Acidification	[mPt]	4,40E-02	4,89E-02	7,81E-02	1,76E-01	1,81E-01	2,12E-01	2,53E-01	2,90E-01
Eutrophication, freshwater	[mPt]	2,40E-02	2,62E-02	4,84E-02	1,17E-01	1,20E-01	1,43E-01	1,70E-01	1,96E-01
Eutrophication, marine	[mPt]	3,28E-02	3,35E-02	5,23E-02	9,75E-02	9,82E-02	1,18E-01	1,38E-01	1,58E-01
Eutrophication, terrestrial	[mPt]	3,04E-02	3,16E-02	5,03E-02	9,91E-02	1,00E-01	1,20E-01	1,41E-01	1,62E-01
Ecotoxicity, freshwater	[mPt]	7,04E-02	7,41E-02	1,23E-01	3,68E-01	3,72E-01	4,23E-01	5,34E-01	5,89E-01
Land use	[mPt]	5,04E-03	6,43E-03	1,17E-02	2,27E-02	2,41E-02	3,03E-02	3,06E-02	3,81E-02
Water use	[mPt]	2,07E-02	2,24E-02	4,33E-02	8,33E-02	8,50E-02	1,07E-01	1,15E-01	1,39E-01
Resource use, fossils	[mPt]	1,96E-01	2,04E-01	3,47E-01	6,58E-01	6,67E-01	8,16E-01	9,24E-01	1,08E+00
Resource use, minerals and metals	[mPt]	1,06E-01	1,11E-01	2,01E-01	4,89E-01	4,94E-01	5,90E-01	6,89E-01	7,89E-01

Tab. 8.3.1. Risultati di pesatura relativi alla produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro, incluse sia le diverse lavorazioni delle lastre di vetro sia le diverse soluzioni di vetrocamera.

## 8.4 Analisi di sensitività

Poiché dal confronto con gli operatori del settore emergono possibili varianti in termini di spessore dei prodotti rappresentativi oggi disponibili sul mercato, si è condotta un'analisi di sensitività con l'obiettivo di valutare quanto tali assunzioni influenzino i risultati finali. Per ogni prodotto in vetro in esame è stata quindi effettuata una nuova modellizzazione sulla base di scenari alternativi, considerando diversi spessori delle lastre, correlati, nel caso di vetrocamera, anche a diverse lavorazioni delle stesse.

I risultati della fase di normalizzazione relativi al confronto tra la produzione di 1 m<sup>2</sup> di lastra in vetro con diversi spessori a seconda della lavorazione sono mostrati in Tab. 8.4.1. In particolare, per il vetro float si è passato da uno spessore di 4 mm a uno spessore di 3 mm, denunciando, come previsto, una riduzione del 25% degli impatti in tutte le categorie, in quanto tutte le risorse sia in input sia in output sono direttamente proporzionali alle quantità in gioco. Nel caso del vetro basso-emissivo, la riduzione dello spessore da 4 mm a 3 mm comporta in generale una diminuzione del 25%, limitata in alcune categorie al 24%. Infatti, in *Human toxicity cancer*, *Acidification*, *Eutrophication freshwater* e *Ecotoxicity freshwater*, la variazione percentuale è leggermente

inferiore in quanto rimangono inalterate le materie prime necessarie per la coatizzazione, dato che la superficie di rivestimento della lastra rimane costante. Per quanto riguarda invece il vetro stratificato, la tabella mostra variazioni più accentuate tra gli impatti totali dello scenario base con spessore 6 mm e quelli dello scenario alternativo di spessore 8 mm. A seconda delle categorie, esse oscillano tra il 27% e il 32%, in relazione alla variazione dei contributi dei diversi fattori in base allo spessore e quindi al peso del prodotto, ad eccezione dell'impatto dello strato in PVB che resta inalterato.

NORMALIZZAZIONE Analisi di sensitività	Float glass			Coated glass			Laminated glass		
	sp 4 mm	sp 3 mm	var %	sp 4 mm	sp 3 mm	var %	sp 6 mm	sp 8 mm	var %
Climate change	1,49E-03	1,12E-03	-25%	1,55E-03	1,16E-03	-25%	2,52E-03	3,30E-03	31%
Ozone depletion	3,44E-05	2,58E-05	-25%	3,56E-05	2,67E-05	-25%	6,45E-05	8,25E-05	28%
Ionising radiation	1,21E-04	9,07E-05	-25%	1,35E-04	1,02E-04	-25%	2,42E-04	3,10E-04	28%
Photochemical ozone formation	1,49E-03	1,12E-03	-25%	1,53E-03	1,15E-03	-25%	2,39E-03	3,15E-03	32%
Particulate matter	5,61E-04	4,21E-04	-25%	5,93E-04	4,46E-04	-25%	9,72E-04	1,27E-03	30%
Human toxicity, non-cancer	3,84E-04	2,88E-04	-25%	4,04E-04	3,04E-04	-25%	7,68E-04	9,93E-04	29%
Human toxicity, cancer	1,49E-04	1,11E-04	-25%	1,66E-04	1,26E-04	-24%	3,06E-04	3,92E-04	28%
Acidification	7,09E-04	5,32E-04	-25%	7,88E-04	6,01E-04	-24%	1,26E-03	1,64E-03	30%
Eutrophication, freshwater	8,57E-04	6,43E-04	-25%	9,35E-04	7,06E-04	-24%	1,73E-03	2,20E-03	27%
Eutrophication, marine	1,11E-03	8,31E-04	-25%	1,13E-03	8,49E-04	-25%	1,77E-03	2,33E-03	32%
Eutrophication, terrestrial	8,20E-04	6,15E-04	-25%	8,51E-04	6,39E-04	-25%	1,36E-03	1,78E-03	32%
Ecotoxicity, freshwater	3,66E-03	2,75E-03	-25%	3,86E-03	2,92E-03	-24%	6,41E-03	8,34E-03	30%
Land use	6,35E-05	4,76E-05	-25%	8,10E-05	6,08E-05	-25%	1,48E-04	1,94E-04	31%
Water use	2,43E-04	1,82E-04	-25%	2,63E-04	1,98E-04	-25%	5,09E-04	6,43E-04	27%
Resource use, fossils	2,35E-03	1,77E-03	-25%	2,46E-03	1,84E-03	-25%	4,17E-03	5,41E-03	30%
Resource use, minerals and metals	1,41E-03	1,05E-03	-25%	1,46E-03	1,10E-03	-25%	2,66E-03	3,39E-03	28%

Tab. 8.4.1. Risultati di normalizzazione relativi al confronto tra scenario base e scenario alternativo per ogni lavorazione del vetro: vetro float, vetro basso-emissivo, vetro stratificato.

L'analisi di sensitività condotta sui prodotti vetrocamera si focalizza sull'assunzione di uno strato aggiuntivo di coating (sigla abbreviata in inglese w/ c), applicato indistintamente su una delle lastre comprese nei sistemi. Infatti, dall'analisi di letteratura e delle principali dichiarazioni ambientali di prodotto presenti sul mercato, si evidenzia come il processo di coatizzazione offline e quindi il deposito magnetronico di ossidi metallici sia comunemente perseguito per aumentare le performance dei prodotti sia a doppio vetro sia a triplo vetro. Di conseguenza, si ritiene opportuno valutare il discostamento esistente nel caso di inclusione di uno strato di coating, a seconda dei casi, sulla lastra di vetro float o di vetro stratificato comprese nei vetrocamera. I risultati della fase di normalizzazione relativi al confronto tra la produzione di 1 m<sup>2</sup> di vetrocamera secondo i diversi scenari, ossia per ogni soluzione con e senza coating, sono mostrati in Tab. 8.4.2. Per tutti i vetrocamera a doppio vetro, le variazioni percentuali risultano essere inferiori all'1%, eccetto nella categoria *Acidification* che si attestano intorno al 1,2-1,5%. Invece, per tutte le soluzioni a triplo vetro, l'aggiunta di uno strato di coating comporta un aumento degli impatti inferiore all'1% in tutte le categorie. Si deduce pertanto che l'inclusione di un processo aggiuntivo di coating possa essere

considerato trascurabile per tutti i prodotti vetrocamera, non conducendo a variazioni significative in termini di impatti sia per le soluzioni a doppio vetro sia a triplo vetro.

NORMALIZZAZIONE Analisi di sensitività	Double glazing									Triple glazing					
	(F-L)	(F-L) w/ c	var %	(C-L)	(C-L) w/ c	var %	(L-L)	(L-L) w/ c	var %	(F-F-L)	(F-F-L) w/ c	var %	(L-F-L)	(L-F-L) w/ c	var %
Climate change	4,96E-03	4,97E-03	0,1%	5,02E-03	5,02E-03	0,1%	6,04E-03	6,04E-03	0,1%	7,04E-03	7,05E-03	0,1%	8,12E-03	8,12E-03	0,1%
Ozone depletion	1,13E-04	1,13E-04	0,0%	1,14E-04	1,14E-04	0,0%	1,44E-04	1,44E-04	0,0%	1,55E-04	1,55E-04	0,0%	1,86E-04	1,86E-04	0,0%
Ionising radiation	4,81E-04	4,84E-04	0,5%	4,95E-04	4,97E-04	0,5%	6,12E-04	6,14E-04	0,4%	6,76E-04	6,78E-04	0,4%	8,07E-04	8,09E-04	0,3%
Photochemical ozone formation	4,49E-03	4,50E-03	0,2%	4,53E-03	4,54E-03	0,2%	5,42E-03	5,42E-03	0,1%	6,36E-03	6,36E-03	0,1%	7,28E-03	7,29E-03	0,1%
Particulate matter	2,35E-03	2,35E-03	0,2%	2,38E-03	2,39E-03	0,2%	2,78E-03	2,79E-03	0,2%	3,42E-03	3,43E-03	0,2%	3,86E-03	3,87E-03	0,2%
Human toxicity, non-cancer	2,05E-03	2,05E-03	0,1%	2,07E-03	2,07E-03	0,1%	2,45E-03	2,45E-03	0,1%	2,97E-03	2,98E-03	0,1%	3,38E-03	3,38E-03	0,1%
Human toxicity, cancer	1,25E-03	1,25E-03	0,6%	1,26E-03	1,27E-03	0,6%	1,41E-03	1,42E-03	0,5%	1,86E-03	1,87E-03	0,4%	2,03E-03	2,04E-03	0,4%
Acidification	2,83E-03	2,87E-03	1,5%	2,91E-03	2,95E-03	1,4%	3,42E-03	3,46E-03	1,2%	4,08E-03	4,12E-03	1,0%	4,67E-03	4,71E-03	0,9%
Eutrophication, freshwater	4,20E-03	4,22E-03	0,5%	4,27E-03	4,29E-03	0,5%	5,12E-03	5,14E-03	0,4%	6,08E-03	6,11E-03	0,3%	7,02E-03	7,04E-03	0,3%
Eutrophication, marine	3,29E-03	3,30E-03	0,1%	3,32E-03	3,32E-03	0,1%	3,97E-03	3,98E-03	0,1%	4,66E-03	4,66E-03	0,1%	5,34E-03	5,34E-03	0,1%
Eutrophication, terrestrial	2,67E-03	2,67E-03	0,1%	2,70E-03	2,71E-03	0,1%	3,23E-03	3,23E-03	0,1%	3,79E-03	3,80E-03	0,1%	4,35E-03	4,36E-03	0,1%
Ecotoxicity, freshwater	1,92E-02	1,93E-02	0,5%	1,94E-02	1,95E-02	0,5%	2,21E-02	2,21E-02	0,4%	2,78E-02	2,79E-02	0,3%	3,07E-02	3,08E-02	0,3%
Land use	2,86E-04	2,86E-04	0,1%	3,03E-04	3,04E-04	0,1%	3,81E-04	3,82E-04	0,1%	3,85E-04	3,85E-04	0,1%	4,80E-04	4,81E-04	0,0%
Water use	9,78E-04	9,81E-04	0,3%	9,98E-04	1,00E-03	0,3%	1,26E-03	1,26E-03	0,2%	1,35E-03	1,36E-03	0,2%	1,64E-03	1,64E-03	0,2%
Resource use, fossils	7,91E-03	7,92E-03	0,1%	8,01E-03	8,02E-03	0,1%	9,81E-03	9,82E-03	0,1%	1,11E-02	1,11E-02	0,1%	1,30E-02	1,30E-02	0,1%
Resource use, minerals and metals	6,48E-03	6,50E-03	0,4%	6,54E-03	6,56E-03	0,4%	7,81E-03	7,83E-03	0,3%	9,12E-03	9,14E-03	0,3%	1,04E-02	1,05E-02	0,2%

Tab. 8.4.2. Risultati di normalizzazione relativi al confronto tra scenario base e scenario alternativo (coating aggiuntivo) per i vetrocamera: doppio vetro e triplo vetro.

Dai risultati dell'analisi di sensitività, emerge come l'aggiunta di uno strato ulteriore di coating sia per lo più irrilevante sugli impatti totali di tutti i prodotti vetrocamera sia a doppio vetro sia a triplo vetro. Al contrario, la scelta di spessori diversi delle lastre in vetro conduce a variazioni significative degli impatti, calcolate sulle singole lastre per tutte le lavorazioni in esame, ma potenzialmente estendibili con modeste variazioni percentuali anche ai vetrocamera. Da notare che la modifica di scenario, dettata dal cambiamento di spessore, si ripercuote in modo direttamente proporzionale non solo sulla quantità di vetro in input, ma anche per i contributi di imballaggi, fonti energetiche e idriche, trasporti e rifiuti, in quanto assunti in base alla massa del prodotto. Ciò che rimane invariato sono le materie prime aggiuntive al vetro, quali le risorse impiegate per il processo di coatizzazione (es. ossidi metallici) e per il processo di stratifica (es. strato in PVB), con i relativi impatti ambientali associati. Particolare attenzione deve quindi essere posta nell'uso dei risultati di impatto in accordo con le specificità del prodotto in vetro considerato.

## 9 Interpretazione dei risultati

In accordo con la Norma ISO 14040, sulla base di un'analisi critica dei risultati delle fasi precedenti, viene fornita l'interpretazione dello studio di ciclo di vita, al fine di comprendere la ragionevolezza dei risultati finali di impatto ambientale, spiegare le limitazioni dei risultati ottenuti, trarre conclusioni, nonché fornire raccomandazioni sulla base degli stessi risultati.

Le evidenze dell'interpretazione dei risultati del presente studio LCA di filiera, svolto in accordo alle indicazioni della ISO 14040, sono riportate nei paragrafi successivi, focalizzando l'attenzione sui risultati di normalizzazione, in quanto ritenuti più robusti rispetto ai risultati di pesatura, e sul vetro float, in quanto prodotto base per le successive lavorazioni. Da notare che nella modellizzazione sono incluse le infrastrutture dei dataset diecoinvent di *background*.

## 9.1 Categorie di impatto rilevanti

L'analisi dei risultati derivanti dalla normalizzazione in Tab. 9.1.1 mostra come le categorie di impatto più rilevanti per tutti i prodotti in vetro siano rispettivamente: *Ecotoxicity freshwater*, *Resource use fossils*, *Climate change*, *Photochemical ozone formation* e *Resource use minerals and metals*. Infatti, sia per le diverse lavorazioni delle lastre di vetro sia per le diverse soluzioni di vetrocamera, i loro contributi cumulativi si attestano intorno al 67% del totale degli impatti.

NORMALIZZAZIONE	Float glass	Coated glass	Laminated glass	Double glazing			Triple glazing	
	FG	CFG	LSG	(F-L)	(C-L)	(L-L)	(F-F-L)	(L-F-L)
Climate change	9,7%	9,5%	9,2%	7,8%	7,8%	8,0%	7,7%	7,9%
Photochemical ozone formation	9,6%	9,4%	8,8%	7,1%	7,0%	7,1%	7,0%	7,1%
Ecotoxicity, freshwater	23,7%	23,8%	23,5%	30,2%	30,1%	29,0%	30,6%	29,7%
Resource use, fossils	15,2%	15,1%	15,3%	12,5%	12,5%	12,9%	12,2%	12,6%
Resource use, minerals and metals	9,1%	9,0%	9,7%	10,2%	10,2%	10,3%	10,0%	10,1%

Tab. 9.1.1. Contributi percentuali delle categorie di impatto rilevanti nella produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro, incluse sia le diverse lavorazioni delle lastre di vetro sia le diverse soluzioni di vetrocamera.

Esaminando nel dettaglio gli impatti generati dalla produzione di una lastra in vetro float (prodotto base), si nota come *Ecotoxicity freshwater* sia la categoria più impattante, rappresentando il 23,7% sul totale dei risultati di normalizzazione. Al secondo posto troviamo la categoria *Resource use fossils*, con un contributo del 15,2%, seguita da *Climate change*, *Photochemical ozone formation* e *Resource use minerals and metals*, che concorrono rispettivamente al 9,7%, 9,6% e 9,1%. Se tali contributi percentuali si mostrano con minime variazioni per il vetro basso-emissivo e vetro stratificato, essi si diversificano per i prodotti vetrocamera tanto per l'ordine di importanza quanto in termini di incidenza. Infatti, sia per doppi vetri sia per tripli vetri, la categoria *Ecotoxicity freshwater* supera, a seconda dei casi, il 29-30% del totale degli impatti e la categoria *Resource use fossils* diminuisce al 12%. A differenza dei prodotti in lastre di vetro, tali categorie sono qui seguite dalla categoria *Resource use minerals and metals*, con un contributo del 10% e dalle categorie *Climate change* e *Photochemical ozone formation* che si attestano entrambe intorno al 7%.

Focalizzando l'attenzione sul vetro float (prodotto base), la rilevanza preponderante della categoria *Ecotoxicity freshwater* è dovuta in particolare all'utilizzo del carbonato di sodio (*soda ash*) nella miscela vetrificabile, a cui è imputato il 66% degli impatti totali. Inoltre, l'impatto del carbonato di sodio risulta significativo anche per la categoria *Resource use minerals and metals*, rappresentandone il 50% del totale. Il processo di combustione del forno fusorio è invece dominante per le rimanenti categorie. Le relative emissioni in aria costituiscono infatti il 56% degli impatti *Climate change*, il 68% degli impatti *Photochemical ozone formation*, mentre il consumo di gas naturale è responsabile del 67% degli impatti *Resource use fossils*. Tali considerazioni possono essere estese, con piccole variazioni percentuali, anche a tutti i prodotti derivanti da successive lavorazioni del vetro float, per la realizzazione di vetro basso-emissivo, vetro stratificato, vetrocamera doppio vetro e triplo vetro.

CARATTERIZZAZIONE	Float glass	Coated glass	Laminated glass	Double glazing			Triple glazing	
	FG	CFG	LSG	(F-L)	(C-L)	(L-L)	(F-F-L)	(L-F-L)
Ecotoxicity, freshwater, organics	0,7%	0,7%	0,7%	1,7%	1,7%	1,6%	1,7%	1,6%
Ecotoxicity, freshwater, inorganics	40,8%	39,1%	37,7%	23,4%	23,2%	24,6%	22,6%	23,6%
Ecotoxicity, freshwater, metals	58,6%	60,2%	61,6%	74,9%	75,1%	73,8%	75,7%	74,8%

Tab. 9.1.2. Contributi dettagliati della categoria *Ecotoxicity freshwater* (caratterizzazione degli impatti) nella produzione di 1 m<sup>2</sup> di prodotto in vetro nelle diverse lavorazioni delle lastre di vetro e soluzioni vetrocamera.

In accordo con le linee guida ILCD, data la rilevanza della categoria *Ecotoxicity freshwater*, si ritiene opportuno analizzare ed interpretare le relative sottocategorie. I risultati di caratterizzazione riportano infatti in modo separato gli impatti associati a fonti di origine organica, inorganica e metallica, consentendo di valutarne l'importanza dei contributi. *Ecotoxicity freshwater metals* emerge così come la sottocategoria più significativa, con un'incidenza intorno al 60% per le lastre singole di vetro (vetro float e successive lavorazioni), raggiungendo circa il 75% per i vetrocamera. A seguire la sottocategoria *Ecotoxicity freshwater inorganics* mostra, a seconda dei casi, una rilevanza compresa tra il 22% e il 40%, mentre *Ecotoxicity freshwater organics* presenta un contributo minimo intorno all'1%.

## 9.2 Fasi del ciclo di vita e processi rilevanti

A livello di fasi del ciclo di vita, si può notare (Tab. 9.2.1) come per il vetro float (prodotto base) la fase di reperimento dei materiali sia preponderante per le categorie *Ecotoxicity freshwater* (88%) e *Resource use minerals and metals* (96%). Invece, la fase di produzione si rivela dominante per le

categorie *Climate change* (77%), *Photochemical ozone formation* (80%) e *Resource use fossils* (76%), principalmente a causa dell'alto impatto del processo di fusione. Tuttavia, poiché i dati di inventario sono stati reperiti dai produttori in forma aggregata (ad es. fornendo i consumi energetici totali, senza suddividerli per impianto di alimentazione), non è possibile restituire i valori percentuali specifici rispetto alle sotto-fasi di produzione.

I risultati di normalizzazione del vetro float vengono quindi analizzati nel dettaglio per quanto concerne i contributi propri, da una parte, alla fase *upstream* di reperimento dei materiali (A1-A2) e, dall'altra alla fase *core* di produzione (A3). Nello specifico, la fase *upstream* di reperimento dei materiali è articolata in:

- Miscela vetrificabile, comprensiva di sabbia silicea, carbonato di sodio, dolomite, carbonato di calcio, feldspato, sodio solfato e relativi trasporti in input;
- Bagno di stagno, comprensivo di stagno, materiali ancillari, quali idrogeno e azoto liquido, e relativi trasporti in input;
- Imballaggi, comprensivi di casse di legno e stecche di carta.

La fase *core* di produzione viene invece suddivisa in:

- Consumi idrici, riforniti da acquedotto;
- Consumi energetici, comprensivi di elettricità a medio voltaggio, gas naturale e relative emissioni in aria;
- Rifiuti, comprensivi di rifiuti solidi urbani, rifiuti speciali, rifiuti da imballaggio, acque reflue e relativi trasporti in output.

Il contributo di tali fattori viene restituito di seguito in relazione alle categorie di impatto più rilevanti per il vetro float (prodotto base) e, di conseguenza, anche per tutti i prodotti ottenuti dalle successive lavorazioni. Da notare che nella modellizzazione mentre la fase di pre-produzione, ossia di approvvigionamento dei materiali, si riferisce fondamentalmente a dati secondari, la fase di produzione si basa su dati primari raccolti presso le aziende.

NORMALIZZAZIONE	Float glass	Fase di reperimento materiali				Fase di produzione			
		Miscela vetrificabile	Bagno di stagno	Imballaggi	Tot A1-A2	Consumi idrici	Consumi energetici	Rifiuti	Tot A3
Climate change	1,49E-03	19%	4%	0,08%	23%	0,03%	77%	0,06%	77%
Photochemical ozone formation	1,49E-03	18%	2%	0,11%	20%	0,02%	80%	0,04%	80%
Ecotoxicity, freshwater	3,66E-03	83%	4%	0,27%	88%	0,04%	12%	0,39%	12%
Resource use, fossils	2,35E-03	16%	8%	0,09%	24%	0,04%	76%	0,04%	76%
Resource use, minerals and metals	1,41E-03	79%	17%	0,20%	96%	0,11%	4%	0,15%	4%

Tab. 9.2.1. Contributi percentuali dei fattori considerati per la produzione di 1 m<sup>2</sup> di lastra in vetro float.

Analizzando i risultati in Tab. 9.2.1, si può notare come per tutte le categorie più rilevanti, il contributo di imballaggi, consumi idrici e rifiuti possa considerarsi trascurabile (<1%) nell'ambito della produzione del vetro float. Per quanto riguarda la categoria *Climate change* i principali impatti derivano essenzialmente dai consumi energetici in fase di manifattura (77%), seguiti da quelli imputati al reperimento dei materiali per la miscela vetrificabile (19%) e dei materiali impiegati per il bagno di stagno (4%), entrambi comprensivi dei relativi trasporti. Il contributo dei consumi energetici ammonta all'80% in *Photochemical ozone formation* dove, seppur in misura minore, la miscela vetrificabile risulta essere tra gli altri fattori più significativi (18%). Nella categoria *Ecotoxicity freshwater* l'approvvigionamento della miscela vetrificabile appare invece il contributo più rilevante (83%), seguito dai consumi energetici (12%) e bagno di stagno (4%). La miscela vetrificabile si conferma esser il contributo principale (79%) in *Resource use minerals and metals*, in cui il bagno di stagno risulta il secondo fattore in termini di impatto (17%) e i consumi energetici il terzo (4%). Infine, i maggiori impatti della categoria *Resource use fossils* sono attribuiti rispettivamente ai consumi energetici (76%), miscela vetrificabile (16%) e bagno di stagno (8%).

In aggiunta ai fattori più rilevanti per il vetro float, si esplicita la quota parte rappresentata dal vetro float nei prodotti in vetro ottenuti da successive lavorazioni, ossia vetro basso-emissivo, vetro stratificato e vetrocamera. Inoltre, per tutte le soluzioni di vetrocamera sia a doppio vetro sia a triplo vetro, si precisa il contributo del vetro in relazione alle diverse lavorazioni sottese, consentendo quindi di ottenere per differenza l'apporto dei restanti fattori (colonna "altro"), comprendenti i materiali supplementari e le lavorazioni aggiuntive.

NORMALIZZAZIONE	Float glass (FG)		Coated glass (CFG)		Laminated glass (LSG)	
	FG		FG	altro	FG	altro
Climate change	100%		97%	3%	89%	11%
Photochemical ozone formation	100%		97%	3%	93%	7%
Ecotoxicity, freshwater	100%		95%	5%	86%	14%
Resource use, fossils	100%		96%	4%	85%	15%
Resource use, minerals and metals	100%		96%	4%	79%	21%

NORMALIZZAZIONE	Double glazing (F-L)			Double glazing (C-L)			Double glazing (L-L)		Triple glazing (F-F-L)			Triple glazing (L-F-L)		
	FG	LSG	altro	CFG	LSG	altro	LSG	altro	FG	LSG	altro	FG	LSG	altro
Climate change	30%	51%	19%	31%	50%	19%	83%	17%	42%	36%	22%	18%	62%	20%
Photochemical ozone formation	33%	53%	14%	34%	53%	14%	88%	12%	47%	38%	16%	20%	66%	14%
Ecotoxicity, freshwater	19%	33%	48%	20%	33%	47%	58%	42%	26%	23%	51%	12%	42%	46%
Resource use, fossils	30%	53%	18%	31%	52%	17%	85%	15%	42%	38%	20%	18%	64%	18%
Resource use, minerals and metals	22%	41%	37%	22%	41%	37%	68%	32%	31%	29%	40%	13%	51%	36%

Tab. 9.2.2. Contributi percentuali delle lastre in vetro sul totale dei risultati di normalizzazione per ogni prodotto in vetro.

I risultati in Tab. 9.2.2 mostrano come, per il vetro basso-emissivo, la lastra in vetro float rappresenta il 95-97% del totale di tutte le categorie di impatto più rilevanti, in cui il processo di coatizzazione incide quindi per il 3-4%. Nel vetro stratificato invece le percentuali attribuite al vetro float variano in funzione della categoria, attestandosi tra il 79% e il 93% e imputando il rimanente impatto allo

strato in PVB e al processo di stratifica. Nello specifico, il processo di sospensione dello strato interposto tra le sue lastre di vetro incide notevolmente nella categoria *Resource use minerals and metals* e, unitamente al consumo di energia elettrica, anche nella categoria *Resource use fossils*. Come avviene per il vetro basso-emissivo, i materiali di imballaggio, i trasporti, i rifiuti e i consumi idrici contribuiscono solo in minima parte sul totale degli impatti.

Invece, gli impatti relativi alla produzione di vetrocamera mostrano una variazione più significativa dei contributi a seconda delle categorie in esame. Ad esempio, nel caso della soluzione semplice a doppio vetro (F-L), formata dalla combinazione di una lastra di vetro float e una di vetro stratificato, rispetto la categoria *Climate change*, il vetro float costituisce il 30% e il vetro stratificato il 51%, affidando il 19% al processo di assemblaggio e ai materiali aggiuntivi (quali distanziatore, sigillante, etc.). Tali percentuali sono confermate con lievi variazioni anche nelle soluzioni aggiuntive a doppio vetro (C-L e L-L), in cui il contributo delle lastre che compongono il vetrocamera si attesta intorno all'81-83%, lasciando ai rimanenti fattori il 17-19% del totale degli impatti. Invece, per la realizzazione di vetrocamera semplice a triplo vetro (F-F-L), gli impatti *Climate change* sono ripartiti al 42% per vetro float, 36% per vetro stratificato e 22% per i restanti materiali e processi. Ovviamente, nella soluzione aggiuntiva a triplo vetro (L-F-L), caratterizzata da due lastre di vetro stratificato e una di vetro float, aumenta l'incidenza del vetro stratificato che arriva al 62%, diminuendo al 18% l'impatto del vetro float e al 20% quello del processo di assemblaggio e dei materiali supplementari. Rispetto a quanto illustrato, in tutte le soluzioni vetrocamera si assiste ad un'inversione di tendenza, ad esempio, nella categoria *Ecotoxicity freshwater*, dove il contributo percentuale del vetro si riduce a favore di quello degli altri fattori. Qui, infatti, i rimanenti materiali e processi rappresentano la quota più significativa degli impatti, concorrendo al 42-48% del totale degli impatti dei vetrocamera a doppio vetro, fino ad arrivare al 46-51% nei vetrocamera a triplo vetro. Il contributo percentuale dei fattori "altro" risulta in rialzo in particolare a causa della quota associata alla lamiera in alluminio, che costituisce il distanziatore, alla zeolite in polvere, utilizzata come essicante, e al composto sigillante in polisolfuro, finalizzato a chiudere ermeticamente il sistema. Per tutte le soluzioni vetrocamera sia a doppio sia a triplo vetro, il sigillante rappresenta la quota di impatto più rilevante degli altri fattori anche rispetto alla categoria *Resource use minerals and metals*, richiedendo quindi particolare attenzione.

### 9.3 Flussi elementari rilevanti

L'analisi dei flussi elementari è stata condotta sui risultati di normalizzazione del vetro float, in quanto prodotto base di riferimento per tutti gli altri prodotti in vetro oggetto di studio. In particolare, essa si focalizza sulle categorie di impatto più rilevanti del sistema, ossia: *Climate change*, *Photochemical ozone formation*, *Ecotoxicity freshwater*, *Resource use fossils* e *Resource use minerals and metals*.

Nella categoria *Climate change*, il flusso elementare più rilevante è la CO<sub>2</sub> fossile, che contribuisce per il 90% al totale degli impatti. Essa è causata dalle emissioni in aria emesse durante il processo di combustione del forno fusorio, alimentato principalmente da gas naturale. Il secondo flusso in ordine di importanza risulta essere il metano fossile, la cui percentuale di incidenza è però limitata al 9%, che deriva sempre dall'impiego di gas naturale in fase di produzione ma anche dall'uso del carbonato di calcio nella formulazione della miscela vetrificabile.

Nella categoria *Photochemical ozone formation*, l'ossido di azoto risulta essere il flusso elementare più significativo con un contributo dell'89% sul totale, correlato per il 66% alle emissioni in aria provenienti dal forno fusorio e per il 23% ai rimanenti fattori. Tra questi sono degni di nota gli ossidi di azoto derivanti dalle seguenti risorse: sabbia silicea, carbonato di sodio, carbonato di calcio, azoto, trasporti via mare in input, trasporti via gomma in input, energia elettrica e gas naturale.

I flussi elementari della categoria *Ecotoxicity freshwater* afferiscono ai diversi compartimenti, in quanto includono congiuntamente le emissioni in aria, le emissioni in acqua e le emissioni nel terreno. In particolare, si evidenziano le emissioni di cloruro in acqua, con un contributo del 38%, le emissioni di alluminio, con un contributo del 38% se in aria, dell'11% se nel terreno e del 3% se in acqua, oltre alle emissioni di calcio in acqua, con un contributo del 12%. Tutti questi flussi elementari provengono in prevalenza dalla produzione del carbonato di sodio, il cui impiego risulta quindi particolarmente critico per questa categoria di impatto. In aggiunta, per le emissioni di alluminio, è importante citare il contributo di alcune materie prime, quali sabbia silicea, dolomite, carbonato di calcio, e fonti di alimentazioni impiegate, ossia elettricità e gas naturale.

Per quanto riguarda la categoria *Resource use fossils*, il consumo di gas naturale incide in modo determinante, arrivando al 76% del totale, seguito dal consumo di petrolio, di carbone e di uranio, che contribuiscono rispettivamente per il 10%, 7% e 5%. Mentre questi ultimi sono per lo più distribuiti tra le diverse risorse adoperate per la produzione di lastre in vetro float, il consumo di gas naturale è imputato all'88% al forno fusorio e al 6% alla produzione di energia elettrica.

Infine, nella categoria *Resource use minerals and metals*, i flussi elementari più rilevanti sono attribuiti al consumo di alcuni metalli, nello specifico l'oro che incide per il 77% sul totale degli impatti e lo stagno che contribuisce invece per il 15%. Da notare che la quota parte imputata all'oro deriva ancora una volta dall'impiego del carbonato di sodio (58%) e in misura minore del carbonato di calcio (18%).

## 10 Conclusioni

Nel presente report, a seguito di una descrizione della filiera di produzione di lastre piane in vetro, dei relativi prodotti rappresentativi per serramenti e infissi e delle principali tipologie di impatto (sia ambientale sia socio-economico) che la contraddistinguono, sono presentati i risultati di uno specifico studio LCA applicato alla filiera stessa. Lo studio è stato svolto sulla base di dati relativi alla filiera italiana del vetro, ricorrendo sia a dati primari raccolti presso le imprese coinvolte nel GdL, che a dati di letteratura e/o di settore rappresentativi della filiera. Come membri del GdL sono state privilegiate le aziende di produzione di vetro float attive sul territorio (Pilkington e Saint-Gobain), in quanto responsabili della produzione del prodotto base determinante per tutte le successive lavorazioni. Oltre al coinvolgimento degli esperti dei produttori leader di settore sono poi state consultate una serie di vetrerie, al fine di attestare la rappresentatività delle modellazioni effettuate per gli otto prodotti in vetro oggetto di studio: vetro float (x1), vetro basso-emissivo (x1), vetro stratificato (x1), vetrocamera doppio vetro (x3) e vetrocamera triplo vetro (x2). Tutte le soluzioni in esame soddisfano le norme di tipo meccanico-prestazionale vigenti sul territorio e, come ambito di applicazione, sono destinate alla realizzazione di finestre da costruzione.

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). Tale scelta dei confini del sistema, limitata alla sola fase di produzione, è ritenuta rilevante per rappresentare a livello nazionale la prassi esistente, escludendo le fasi downstream, caratterizzate da una crescente complessità e livello di incertezza, per focalizzarsi sulle fasi upstream e core della filiera vetro.

Non vi sono da segnalare importanti carenze di dati in quanto è stata effettuata una dettagliata raccolta di dati primari presso le aziende coinvolte nello studio di filiera, in particolare per le lastre

in vetro float, prodotto base per tutti i restanti prodotti rappresentativi, e vetro stratificato, anch'esso alla base dei sistemi vetrocamera. Tuttavia, a causa della mancanza di informazioni specifiche di supporto fornite dalle aziende interessate, nel presente report i prodotti derivati da successive lavorazioni del vetro, quali basso-emissivi, doppio vetro e triplo vetro sono stati modellati a partire da dati secondari, in seguito validati dagli esperti di settore. In un prossimo futuro potrebbero essere implementati dati primari anche per questi prodotti. Per i vetrocamera, non appena saranno disponibili dati di dettaglio relativi al contesto italiano (EPD distanziatori in fase di elaborazione) si raccomanda altresì di perfezionare la modellizzazione dei distanziatori, al momento semplificati in relazione alle informazioni oggi disponibili.

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 per la produzione di tutti i prodotti in vetro oggetto di studio sono: *Climate change, Photochemical ozone formation, Ecotoxicity freshwater, Resource use fossils e Resource use minerals and metals* (Tab. 9.1.1). La rilevanza preponderante di tali categorie di impatto è dovuta ai consumi di energia (gas naturale ed elettricità), impiegati in particolare durante il processo di fusione, e all'impiego del carbonato di sodio, quale materia prima per la miscela vetrificabile (Tab. 9.2.1).

La fase di produzione del vetro float, comprensiva di miscela vetrificabile e consumi energetici, è predominante per tutte le categorie di impatto e risulta essere il contributo più di rilievo per tutti i prodotti in vetro, le cui successive lavorazioni in termini di processi e materiali aggiuntivi influiscono in misura minore sul totale (Tab. 9.2.2).

I flussi elementari più rilevanti in fase di produzione del vetro float sono costituiti dalle emissioni di CO<sub>2</sub> fossile e ossido di azoto, derivanti dalle emissioni in aria emesse durante il processo di combustione del forno fusorio; emissioni di alluminio in aria, nel terreno e in acqua, correlate alla produzione del carbonato di sodio; e il consumo di gas naturale necessario per il processo di fusione. Inoltre, ulteriori flussi elementari significativi sono riferiti al consumo di alcuni metalli relativi alla produzione del carbonato di sodio e in misura minore del carbonato di calcio.

Da notare che a causa delle differenze metodologiche sottese ai diversi studi LCA, i risultati di impatto del presente studio di filiera non possono essere paragonati direttamente a quelli di studi LCA e certificazioni EPD di prodotti analoghi. Al fine di verificare se l'ordine di grandezza rientra in quelli presenti in letteratura, è stata quindi condotta una modellizzazione del vetro float secondo la

metodologia CML. Dai risultati si evince che gli impatti del vetro float rientrano nel range di valori di riferimento (Dalla Valle et al., 2022) per tutti i principali indicatori di impatto: *Global Warming Potential (GWP)*, *Acidification Potential (AP)*, *Eutrophication Potential (EP)*, *Total use of Primary Energy resources*, come somma della quota parte rinnovabile (PERT) e non rinnovabile (PENRT).

I risultati sull'analisi di sensitività condotta sui diversi prodotti rappresentativi hanno evidenziato come le variazioni in termini di spessori abbiano un'incidenza significativa sui risultati di impatto totali delle lastre in vetro oggetto di studio. Al contrario, l'inclusione di uno strato aggiuntivo di coating nei prodotti vetrocamera non risulta rilevante.

## 11 Bibliografia

Albert, M., Čitbajová, J., Knapčíková, L., Behún, M. and Behúnová, A., Positive environmental and economic impact of polyvinyl butyral waste material after recycled windscreen, *Acta Montanistica Slovaca* 24 (2), 120-128, 2019.

Assovetro, Dati di settore: vetro piano, Sito web Associazione Nazionale degli Industriali del Vetro, 2022, <https://www.assovetro.it/dati-di-settore/>

Assovetro, Rapporto di Sostenibilità 2020, Report Associazione Nazionale degli Industriali del Vetro, Roma, 2020, <https://www.assovetro.it/wp-content/uploads/2020/02/report-completo-low-min2.pdf>

CoReVe, Raccolta e Riciclo del Vetro Risultati 2020. Sintesi Programma Specifico di Prevenzione 2021, Report Consorzio Recupero Vetro, Milano, 2021, <https://coreve.it/wp-content/uploads/2021/10/coreve-2021.pdf>

Dalla Valle, A., Lavagna, M. and Campioli, A., Insights into LCA and EPD environmental impacts data related to glass products for windows, *Antifragile Glass*, Venezia, 2022.

DG Environment, Green Public Procurement. Windows Technical Background Report: Windows, Glazed Doors and Skylights, Report for the European Commission, Brussels, 2010, [https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/windows\\_GPP\\_background\\_report.pdf](https://ec.europa.eu/environment/gpp/pdf/windows_GPP_background_report.pdf)

Geboes, E., Architectural flat glass. Understanding the current barriers of the closed-loop alternatives to support the transition towards a circular life-cycle of flat glass, Master thesis Université Libre de Bruxelles, 2020.

GIMAV, L'industria italiana delle macchine, degli impianti, degli accessori e dei prodotti speciali per la lavorazione del vetro nel 2020, Report Associazione Italiana dei fornitori di Macchine, Impianti,

- Accessori e prodotti speciali per la lavorazione del vetro, 2021, <https://www.gimav.it/it/documenti/relazioni/7619-2020-relazione-settore/file.html>
- Glass for Europe, Key data of Europe's flat glass sector, Sito web Glass for Europe, 2022, <https://glassforeurope.com/the-sector/key-data/>
- Glass for Europe, Il vetro piano nell'Europa a emissioni zero. Innescare un ciclo virtuoso di decarbonizzazione, Report Glass for Europe, 2020, [https://glassforeurope.com/wp-content/uploads/2020/10/Decarb\\_broch\\_ITALIAN\\_for\\_WEB.pdf](https://glassforeurope.com/wp-content/uploads/2020/10/Decarb_broch_ITALIAN_for_WEB.pdf)
- Lolli, N. and Andresen, I., Aerogel vs. argon insulation in windows: A greenhouse gas emissions analysis, Building and Environment 101, 64-76, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.03.001>
- Martín, M., Centelles, X., Solé, A., Barreneche, C., Fernández, A.I. and Cabeza, L.F., Polymeric interlayer materials for laminated glass: A review, Construction and Building Materials 230, 116897, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116897>
- Martini, C., Martini, F., Salvio, M. and Toro, C., Quaderni dell'efficienza energetica: vetro, Report Enea, 2021, <https://www.pubblicazioni.enea.it/component/jdownloads/?task=download.send&id=451&catid=3&m=0&Itemid=101>
- Nan, B., Ahmed, S., Nemhauser, G. and Sokol, J., Optimization of automated float glass lines, International Journal of Production Economics 145, 561-572, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.024>
- Scalet, B.M., Garcia Muñoz, M., Sissa, A.Q., Roudier, S. and Delgado Sancho, L., Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass, JRC Reference Report, Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2013, <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/ff8a3955-d0d0-46f5-8a15-4b638896cb56>
- Shou, P., The development direction of world flat glass and energy conservation and environment protection, Glass Physics and Chemistry 41(1), 1-8, 2015.
- Stichnothe H. and Azapagic A., Life cycle assessment of recycling PVC window frames, Resources, Conservation and Recycling 71, 40-47, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.12.005>
- Soos, L., Matus, M., Pokusova, M., Cacko, V. and Babics, J., The recycling of waste laminated glass through decomposition technologies, Recycling 6, 26, 2021, <https://doi.org/10.3390/recycling6020026>.

- Souviron, J. and Khan, A.Z., The materiality of transparency: An environmental analysis of the architectural flat glass industry since 1945 in Europe, France and Belgium, *Resources, Conservation & Recycling* 174, 105779, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105779>
- Tarantini, M., Dominici Loprieno, A. and Porta, P.L., A life cycle approach to Green Public Procurement of building materials and elements: A case study on windows, *Energy* 36, 2473-2482, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.039>
- Tarantini, M., Dominici, A., Neri, P., Zinzi, M. and Oberti, I., Documento di background sui criteri ambientali minimi per l'acquisto di serramenti esterni e assimilabili che delimitano l'edificio verso l'esterno o verso locali non riscaldati da parte della pubblica amministrazione, [https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/GPP/all.to\\_43\\_relazione\\_serramenti\\_esterni.pdf](https://www.mite.gov.it/sites/default/files/archivio/allegati/GPP/all.to_43_relazione_serramenti_esterni.pdf)
- Thor Lobekk, D., Yichang, L. and Sidney, T., Sustainability of construction & demolition waste: a closed-loop supply chain for flat glass, Master thesis Linnaeus University, 2021.
- Tokatli, N., Networks as facilitators of innovation in technology-based industries: the case of flat glass, In Glückler et al. (Eds.), *Knowledge for Governance*, Springer, Charm, 441-460, 2020, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-47150-7>.
- UNI EN ISO 14040:2021. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Principi e quadro di riferimento.
- UNI EN ISO 14044:2018. Gestione ambientale - Valutazione del ciclo di vita - Requisiti e linee guida.
- Uusitalo, O., Float glass innovation in the flat glass industry, *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, Charm, 2014, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06829-9>.
- Van Den Bergh, S., Hart, R., Jelle, B.P. and Gustavsen, A., Window spacers and edge seals in insulating glass units: A state-of-the-art review and future perspectives, *Energy and Buildings* 58, 263-280, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.006>.
- Vieitez, E.R, Eder, P., Villanueva, A. and Saveyn H., End-of-Waste Criteria for Glass Cullet: Technical Proposals, JRC Scientific and Technical Reports, Publications Office of the European Union, Luxemburg, 2011, <https://op.europa.eu/it/publication-detail/-/publication/cceaa613-d31f-478f-9f6c-79f4541782cb/language-en>
- Westbroek, C.D., Bitting, J., Craglia, M., Azevedo, J.M.C. and Cullen, J.M., Global material flow analysis of glass. From raw materials to end of life, *Journal of Industrial Ecology* 25, 333-343, 2021, <https://doi.org/10.1111/jiec.13112>.

Zampori, L. and Pant, R., Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, EUR 29682 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-00654-1, DOI 10.2760/424613, JRC115959.

Zier, M., Stenzel, P., Kotzur, L. and Stolten, D., A review of decarbonization options for the glass industry, Energy Conversion and Management 10, 100083, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100083>.