

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali per
l'Industria 4.0

Tesi di Laurea Magistrale



**Politecnico
di Torino**

Analisi LCA comparativa tra tre tecniche di produzione di cofani auto
in CFRP: innovazione e sostenibilità con anima Koridion e nuovo
sistema di cura con induzione 3D

Relatore:

Prof. Marco Sangermano

Candidata:

Beatrice Ugo

Tutor aziendale:

Giampaolo Marcolin

Anno accademico 2024/2025

Ringraziamenti

Mi piacerebbe spendere alcune parole per ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine in questi anni al Politecnico e in questa fase finale del mio percorso universitario.

Ci tengo a ringraziare Alia Mentis S.r.l., che mi ha permesso di avvicinarmi al mondo aziendale in maniera proattiva e mi ha dato modo di imparare qualcosa di nuovo ogni giorno. Ringrazio il mio tutor aziendale Giampaolo Marcolin per la sua pazienza e per avermi accompagnata nello sviluppo del mio progetto di tesi. Un grazie va anche al mio relatore, Marco Sangermano, per essere stato un punto di riferimento nel corso di questi anni di università ed avermi sempre trasmesso positività ed entusiasmo.

Voglio inoltre ringraziare la mia famiglia, a partire dai miei genitori e i miei nonni, fino agli zii, i cugini e tutte le persone che mi vogliono bene. Hanno sempre creduto in me e mi hanno spronata durante tutto il mio percorso da studentessa, fin da quando ero piccola. Mi hanno insegnato che è bello essere curiosi e voler espandere i propri orizzonti. Un grazie di cuore va a mia mamma perché mi ha sempre dato forza e mi ha fatto credere nelle mie capacità. Un grazie speciale va a Massimiliano, il quale è stato di grande supporto e conforto, anche nei momenti più difficili. Ringrazio Anna perché mi ha fatta sentire capita e accolta. Grazie mille a tutti i miei amici, sia quelli nuovi e che quelli vecchi, perché mi hanno donato tanti sorrisi e spensieratezza. Per ultimo, ma non meno importante, un sincero ringraziamento va ai miei compagni di corso perché con loro ho potuto confrontarmi, crescere e creare tanti bei ricordi di questi anni di studio.

Sono grata a tutti voi per il supporto che mi avete dato e non vedo l'ora di scoprire assieme il prossimo capitolo della mia vita.

Abstract

Al giorno d'oggi, vi è una sempre più forte necessità di valutare in maniera oggettiva e ripetibile la sostenibilità delle industrie e dei loro prodotti. Per rispondere a questa esigenza, sono state sviluppate una serie di metodologie standardizzate per l'analisi di impatto ambientale: la più comune e completa è la metodologia Life Cycle Assessment (LCA), una particolare tecnica di analisi che indaga tutte le fasi del ciclo vita di un bene o un servizio e associa ad ognuna di esse un valore di impatto ambientale mediante una serie di indicatori.

Il lavoro di tesi, effettuato presso l'azienda Alia Mentis S.r.l. e in collaborazione con Studio Fieschi & Soci, consiste in un'analisi LCA comparativa riguardante tre diverse tecniche di produzione di un cofano per autovetture realizzato in materiale composito rinforzato con fibra di carbonio. La prima è la tecnica tradizionale, la quale consiste nel realizzare separatamente le due mezzerie del cofano, cuocerle in autoclave e infine incollarle per ottenere il pezzo finito. La seconda tecnica prevede l'utilizzo di un'anima polimerica realizzata con un materiale brevettato da Alia Mentis, "Koridion", che permette di ottenere il cofano come pezzo monolitico, senza incollaggi. Anche in questo caso la cottura viene svolta in autoclave. La terza tecnica, invece, prevede l'impiego dell'anima Koridion e un sistema di cura innovativo sviluppato da Alia Mentis che sfrutta tecniche a induzione tridimensionale per il riscaldamento dello stampo. Il sistema integrato è denominato "Koridion 2.0".

Nel primo capitolo verrà introdotto lo studio, approfondendo le basi su cui si fonda la metodologia LCA e la correlazione della metodologia con l'Agenda 2030. Nel secondo capitolo sarà illustrata la situazione attuale del mercato dei materiali compositi e verranno spiegate nel dettaglio le diverse tecniche di produzione, a partire da quelle più tradizionali, fino ad arrivare a quelle più innovative proposte da Alia Mentis. Nel terzo capitolo, sarà sviluppato il caso studio, dettagliando attentamente le diverse fasi che compongono un'analisi LCA.

I risultati ottenuti risultano di grande interesse: già solo implementando l'utilizzo dell'anima è possibile risparmiare sul quantitativo di materia prima e consumabili e questo porta ad una riduzione delle emissioni di CO₂ equivalente del 25%. Invece, se si sceglie un metodo di cottura del composito più efficiente rispetto all'autoclave, è possibile arrivare ad una riduzione delle emissioni del 54% rispetto al caso tradizionale. Questo valore è straordinario se si pensa che è associato a delle performance molto elevate garantite da una formatura omogenea in tutto il pezzo, un'ottima resa estetica e ad un'ingente riduzione dei costi di produzione. In futuro, si intende proseguire la ricerca per ampliare le potenzialità del materiale Koridion e delle nuove tecniche di riscaldamento ad induzione, favorendo ulteriori progressi e innovazioni nel settore.

Sommario

Ringraziamenti	iii
Abstract	v
Sommario	vi
Indice delle Figure.....	I
Indice delle Tabelle	III
Acronimi	IV
1. Introduzione	1
1.1 Presentazione Alia Mentis.....	1
1.2 Cos'è il Life Cycle Assessment	2
1.3 Origini della metodologia LCA	4
1.4 Le fasi dell'analisi.....	5
1.5 Riferimenti normativi.....	10
1.6 Limiti della metodologia.....	11
1.7 Relazioni tra metodologia LCA e obiettivi dell'agenda 2030.....	11
2. Materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio e applicazioni in ambito automotive	13
2.1 Scenario corrente del mondo dei compositi e del settore dei trasporti	13
2.2 CFRP: proprietà e processo produttivo tradizionale	15
2.2.1 Proprietà delle fibre di carbonio	15
2.2.2 Formatura in stampo chiuso in autoclave	16
2.2.3 Formatura in stampo chiuso in pressa	18
2.2.4 Svantaggi dei metodi di formatura tradizionale e possibili migliorie.....	19
2.3 Core attualmente diffusi nel settore automotive	20
2.3.1 Rohacell.....	20
2.3.2 Intivato.....	21
2.4 Koridion, materiale innovativo per core espandenti	22
2.4.1 Proprietà e vantaggi delle anime attive Koridion	23
2.4.2 Processo produttivo delle anime.....	26
2.4.3 Co-laminazione delle anime all'interno dei CFRP	26
2.4.4 Sistema integrato "Koridion 2.0": una nuova via alla formatura dei CFRP.....	26
3. Caso studio: Life Cycle Assessment di Koridion e sistema integrato Koridion 2.0 rispetto al processo di formatura tradizionale	31

3.1 Obiettivo dell'analisi e confini del sistema.....	31
3.1.1 Obiettivo.....	31
3.1.2 Unità funzionale	31
3.1.3 Confini del sistema.....	32
3.1.4 I tre processi a confronto	33
3.2 Life Cycle Inventory	36
3.2.1 Inventario materiali	36
3.2.2 Sfridi di materiale e scrap-rate.....	41
3.2.3 Fornitori e trasporti.....	43
3.2.4 Destino materiali	44
3.2.5 Energia.....	44
3.2.7 Stampi.....	46
3.2.8 Stampi 3D-printed	51
3.3 Life Cycle Impact Assessment.....	53
3.3.1 Modellazione	53
3.3.2 Calcolo degli impatti	60
3.4 Risultati ottenuti e interpretazione	62
3.4.1 Risultati per singolo processo di formatura	62
3.4.2 Confronto tra le fasi di lavorazione	63
3.4.3 Confronto cumulativo tra tutti i processi	65
Conclusioni	67
Appendice	69
Capitolo 3 - Paragrafo 3.4. - Risultati.....	69
Riferimenti	73

Indice delle Figure

Figura 1: Ciclo di vita di un prodotto [1]	2
Figura 2: LCA framework [3]	5
Figura 3: Correlazione tra emissioni e categorie di impatto [4].....	6
Figura 4: Categorie di impatto incluse nel PEF, metodi e indicatori [5]	7
Figura 5: Metodi di calcolo degli impatti [4]	9
Figura 6: Schematizzazione del metodo di calcolo degli impatti [4]	9
Figura 7: Obiettivi Agenda 2030 applicabili all'analisi LCA, immagine adattata da [8]	11
Figura 8: Applicazione materiali compositi in Europa per settore [11]	13
Figura 9: Set-up per formatura di compositi in autoclave in stampo chiuso e sacco (immagine adattata da [13]).....	17
Figura 10: Set-up per la formatura di compositi in pressa in stampo chiuso (immagine adattata da [13]).....	18
Figura 11: Schema del processo tradizionale di incollaggio di materiale composito.....	18
Figura 12: Sezione di un sandwich di CFRP con core Rohacell.....	20
Figura 13: Core in Intivato, preformato [18].....	21
Figura 14: Sedile: a sinistra, anima Koridion inserita nel sandwich in CFRP; a destra, sedile dopo cottura.....	22
Figura 15: Maniglia per automobile: a sinistra, pezzo cotto; a destra anima Koridion.....	22
Figura 16: Braccio porta remi per imbarcazione da canottaggio contenente anima Koridion	22
Figura 17: Casco per ciclismo contenente anima Koridion	22
Figura 18: Lastra in materiale Koridion.....	23
Figura 19: Sezione di un braccio per canottaggio con inserto metallico.....	23
Figura 20: Schema di un laminato sandwich.....	24
Figura 21: Resa post-formatura dell'interno di cavità: a sx con anima Koridion, a dx senza anima ma con sacco	25
Figura 22: Superficie di un sandwich contenente anima Koridion	25
Figura 23: Carbon-look con anima Koridion	25
Figura 24: Macchinario "K2.0", vista frontale con stampo in compressione.....	27
Figura 25: Macchinario "K2.0", dettaglio sul piano ad induzione della pressa	28
Figura 26: A sx, stampo con circuiti induttivi; a dx, distribuzione di temperatura sulle superfici delle due mezzerie dello stampo	29
Figura 27: Flat Induction Heater mode	29
Figura 28: Cofano d'auto in analisi: a sx, pezzo finito; a dx, anima Koridion	31
Figura 29: Schematizzazione dei tre processi di formatura del cofano d'auto in oggetto.....	33
Figura 30: Modello CAD stampo master	34
Figura 31: Modello CAD stampo cofano per autoclave, da chiuso	35
Figura 32: Modello CAD stampo per K2.0.....	35
Figura 33: Funzionamento processo WAAM [24]	51
Figura 34: Dataset Fibra di Carbonio.....	54
Figura 35: Dataset Carbon Pre-preg 200.....	55
Figura 36: Dataset Fase Laminazione e Cottura	56

Figura 37: Dataset Lega 7021- materia prima.....	57
Figura 38: Dataset Lega 7021 - completo	57
Figura 39: Dataset Stampo Koridion 2.0.....	58
Figura 40: Mix energetico per contratti di fornitura da fonti non rinnovabili relativo all'anno 2023 [33]	59
Figura 41: Risultati Processo Tradizionale.....	62
Figura 42: Risultati Processo Koridion	62
Figura 43 Risultati Processo Koridion 2.0	63
Figura 44: Confronto GWP-total tra i tre processi in analisi con distinzione tra le fasi di lavorazione	64
Figura 45: Confronto GWP-total degli stampi tra i tre processi in analisi.....	65

Indice delle Tabelle

Tabella 1: Fattori di caratterizzazione IPCC (2013) per alcuni gas serra [4]	8
Tabella 2: Inventario Materiali in Input - Caso 1	37
Tabella 3: Inventario Materiali in Input - Caso 1 dopo cut-off	38
Tabella 4: Densità Materiali	39
Tabella 5: Materiali in Input per Composito	41
Tabella 6: Materiali in Input per Composito con surplus	43
Tabella 7: Energia in Input con surplus	45
Tabella 8: Materiali in Input per Stampi	47
Tabella 9: Elenco Stampi.....	48
Tabella 10: Fattori di distribuzione degli impatti sul numero di pezzi prodotti	48
Tabella 11: Materiali in Input per Stampi mediati sul numero di pezzi prodotti.....	49
Tabella 12: Materiali in Output per Stampi.....	50
Tabella 13: Energia per Stampi con surplus	50
Tabella 14: Inventario Stampo in Invar realizzato con WAAM	52
Tabella 15: Categorie di impatto EN 15804.....	60
Tabella 16: Confronto Risultati per singolo contributo.....	63
Tabella 17: Risultati Caso 4 (stampi WAAM).....	64
Tabella 18: Sommario Risultati.....	65
Tabella 19: Risultati Processo Tradizionale in termini di indicatori mid-point.....	69
Tabella 20: Risultati Processo Koridion in termini di indicatori mid-point	70
Tabella 21: Risultati Processo Koridion 2.0 in termini di indicatori mid-point	71

Acronimi

ADPE	Abiotic Depletion Potential, elements
ADPF	Abiotic Depletion Potential, fossil
AP	Acidification Potential
CF	Carbon fiber
CFRP	Carbon-fiber-reinforced polymer
CTE	Coefficiente di espansione termica
DED	Direct Energy Deposition
EF	Environmental Footprint
EP	Eutrophication Potential
EOL	End of Life
EPD	Environmental Product Declaration
GF	Glass fiber
GWP	Global Warming Potential
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
OEM	Original Equipment Manufacturer
ODP	Ozone Depletion Potential
PEF	Product Environmental Footprint
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential
QG	Quality Gate
Tg	Temperatura di transizione vetrosa
UdM	Unità di misura
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
WDP	Water Deprivation Potential

1. Introduzione

1.1 Presentazione Alia Mentis



ALIA MENTIS

UNCONVENTIONAL INNOVATION

Fondata nel 2012 da Giuseppe Paronetto, Alia Mentis S.r.l. è un'azienda italiana attiva nel settore delle scienze dei materiali, focalizzata sullo sviluppo e industrializzazione di tecnologie innovative. Attualmente, l'azienda ha sede a Montebelluna (TV) e conta circa 50 dipendenti. Le soluzioni di Alia Mentis trovano applicazione in diversi settori specialistici, tra cui l'automotive, l'aerospaziale, lo sportivo e il medicale. L'azienda è, in questo momento, in possesso di quattro tecnologie brevettate:

- **Logic Coating:** un particolare coating conduttivo che permette di stampare circuiti elettronici direttamente su un substrato;
- **Xelion:** un materiale estremamente resistente agli impatti, che disperde l'energia imposta in modo efficiente e permette di migliorare le prestazioni di abbigliamento protettivo e dispositivi di sicurezza;
- **Casidion:** materiale rivoluzionario per caschi protettivi che offre uno dei più alti livelli di protezione disponibili sul mercato;
- **Koridion:** il primo core per la formatura attiva dei materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio (CFRP), il quale presenta una struttura ultraleggera che si espande con l'aumento della temperatura.

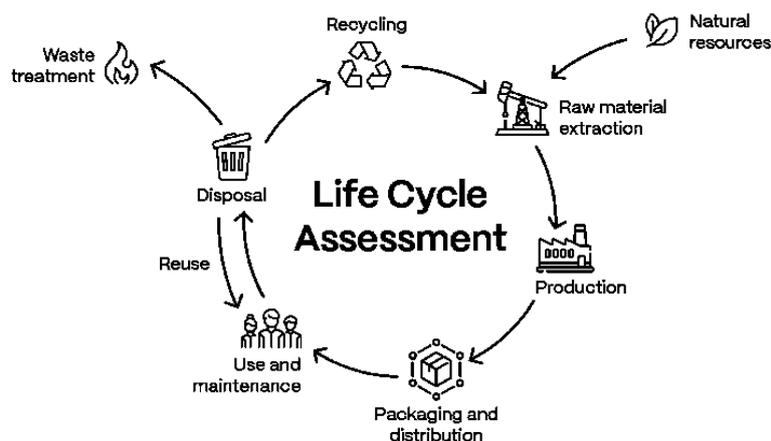
L'azienda è in possesso delle certificazioni UNI EN ISO 9001 e IATF 16949 per la gestione del sistema qualità nell'industria automobilistica.

Per ulteriori informazioni, è possibile visitare il sito ufficiale al seguente link:

<https://www.alia-mentis.com/>

1.2 Cos'è il Life Cycle Assessment

L'LCA è una metodologia di analisi utilizzata in ambito industriale atta a quantificare in maniera oggettiva e ripetibile l'impronta ambientale di un determinato prodotto o servizio, ovvero stabilisce quanto questo vada a modificare l'ecosistema Terra. È uno strumento complesso basato su norme ben determinate e standardizzate, che verranno approfondite maggiormente nel paragrafo 1.5. Quando si parla di ciclo vita si devono considerare le seguenti fasi: estrazione delle materie prime, lavorazione di queste e produzione del prodotto finito, trasporto, fase d'uso e fine vita (detto anche End of Life, EOL). Il fine vita può essere di due tipologie, ovvero smaltimento o riciclo. Nel caso in cui si parli di smaltimento, il ciclo vita è detto "ciclo aperto", perché le materie prime non vengono più reimmesse nel ciclo e quindi per avere un nuovo prodotto c'è bisogno di utilizzare della materia prima vergine. Nel caso in cui si abbia il completo riciclo della materia prima, il ciclo è detto "ciclo chiuso", in quanto non vi è bisogno di utilizzare materiale vergine per un nuovo ciclo, ma è sufficiente la materia prima che è stata riciclata. Il secondo caso è quello ottimale dal punto di vista ambientale, in quanto riduce lo sfruttamento delle risorse naturali e l'inquinamento dell'ambiente. Le fasi del ciclo vita di un prodotto vengono schematizzate in Figura 1.



Source: Swiss Federal Office for the Environment (BAFU) (2022)

Figura 1: Ciclo di vita di un prodotto [1]

L'analisi può essere condotta seguendo due approcci differenti, i quali pongono due diversi limiti al sistema da considerare. La prima delle due tipologie di approccio è la "**cradle to grave**", la quale prevede di considerare tutte le fasi del ciclo vita, compreso il fine vita; questo approccio è più completo ed è da preferire perché da una visione globale sulle emissioni relative al prodotto. Il secondo approccio è detto, invece, "**cradle to gate**": in questo caso si vanno a considerare solamente le fasi antecedenti la distribuzione/vendita del prodotto; non si tiene dunque conto né della fase d'uso né del fine vita. Questo approccio è utilizzabile quando ci si vuole concentrare in particolar modo sull'efficientamento del processo produttivo o quando non si hanno sufficienti informazioni sulle fasi di utilizzo e smaltimento.

I principali obiettivi di un'analisi LCA possono essere riassunti nei seguenti punti:

- i. **riduzione degli impatti ambientali** associati a prodotti già in commercio: in questo caso è necessario andare a modificare la filiera di approvvigionamento delle materie prime, efficientare i processi produttivi e la rete di distribuzione e migliorare la gestione degli scarti e dei rifiuti;
- ii. **compensazione delle emissioni:** prevede l'adesione da parte dell'azienda a specifici programmi di compensazione forniti da terzi; questi programmi sono volti a generare un impatto positivo sull'ambiente e compensare l'impatto negativo generato dalla produzione; tuttavia, non si va ad agire direttamente alla radice del problema, ma si vanno solamente a mitigare i danni;
- iii. **eco-progettazione (ecodesign):** un nuovo prodotto viene ideato con l'ottica di avere un impatto ambientale ridotto a priori; per fare ciò, vengono scelte materie prime sostenibili e riciclabili e/o processi non convenzionali ma a maggiore efficienza; si parla in questo caso di Life Cycle Thinking;
- iv. **richiedere etichettature ambientali:** le etichettature esistenti oggi sono di tre tipologie differenti: le prime sono etichettature su base volontaria che vengono rilasciate da un ente certificatore indipendente, come ad esempio l'EU Ecolabel, e sono etichette che certificano il ridotto impatto ambientale di un determinato prodotto; questo tipo di etichettatura serve ad indirizzare il consumatore verso una scelta più consapevole; il secondo tipo di etichettatura non prevede la certificazione da un ente esterno ma riportano semplicemente un'auto-dichiarazione del produttore; alcuni esempi sono i claim "riciclabile" o "compostabile"; la terza tipologia di etichettatura è basata su studi LCA e riporta gli impatti ambientali in maniera chiara e confrontabile; tra queste rientrano le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (EPD).
- v. **rilasciare dichiarazioni:** un'azienda che si trova in possesso di uno studio LCA peer-reviewed può presentare i risultati ottenuti ad un ampio pubblico, facendosi pubblicità tramite i propri canali o sito web.
- vi. **confrontare** prodotti simili o aventi la stessa funzione per identificare quello con il minore impatto; questo può poi essere comunicato ai potenziali clienti.

1.3 Origini della metodologia LCA

La metodologia LCA affonda le sue radici nella necessità di comprendere i risvolti sull'ambiente legati al consumo di risorse e le emissioni associate alla produzione di un determinato prodotto. L'analisi emerge nei primi anni '60, durante l'epoca delle prime crisi ambientali, grazie ad alcuni ricercatori che per la prima volta decidono di studiare i processi di produzione dal punto di vista ambientale. Negli anni '70 vengono diffusi i primi studi di impatto ambientale, come ad esempio, quello della Coca Cola riguardante alcune opzioni di packaging. Questo studio viene diffuso sotto il nome di Resource and Environmental Profile Analysis (REPA). Negli anni '80 si inizia ad avere una metodologia più strutturata che include anche gli impatti ambientali complessivi e non solo i consumi energetici. Il termine LCA viene coniato successivamente, nel 1993, durante il congresso della Society of Environmental Toxicology and Chemistry. Nel 1997 viene introdotta la norma ISO 14040, poi aggiornata nel 2006. Questa normativa è la prima che va a stabilire in maniera dettagliata come deve essere condotto uno studio LCA. Sempre nel 2006 viene introdotta la norma ISO 14044 a complemento alla norma 14040. Negli anni 2000 si ha inoltre lo sviluppo di software specializzati e database globali che permettono una più facile e precisa realizzazione di questo tipo di analisi.

L'LCA rappresenta uno dei pilastri delle politiche ambientali Europee: queste politiche mirano ad un uso sostenibile delle risorse, ad una produzione e consumo il meno impattante possibile, all'utilizzo dell'etichettatura ambientale (eco-labelling) come strumento di certificazione, alla progettazione ecocompatibile (eco-design) e all'eco-innovazione per poter prevenire la creazione di rifiuti. Alcune delle principali direttive sviluppate dagli enti europei sono:

- Direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti;
- COM(2011) 571 definitivo - Tabella di marcia verso un'Europa efficiente nell'impiego delle risorse;
- COM(2008) 397 definitivo - sul piano d'azione "Produzione e consumo sostenibili" e "Politica industriale sostenibile";
- Regolamento (CE) No 66/2010 relativo al marchio di qualità ecologica dell'Unione europea (Ecolabel UE);
- COM(2013) 196 definitivo - Costruire il mercato unico per i prodotti verdi. Migliorare le informazioni sulle prestazioni ambientali dei prodotti e delle organizzazioni [2].

1.4 Le fasi dell'analisi

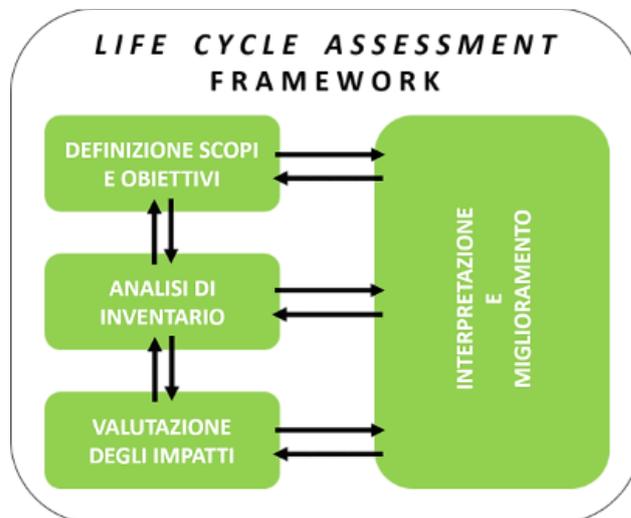


Figura 2: LCA framework [3]

L'analisi del ciclo di vita è un processo iterativo che viene suddiviso in quattro fasi principali:

1. definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione
2. analisi di inventario (LCI, Life Cycle Inventory)
3. valutazione dell'impatto (LCIA, Life Cycle Impact Assessment)
4. interpretazione dei risultati

La definizione dell'obiettivo e dei confini del sistema è forse la fase più importante perché permette di avere uno scopo ben chiaro e stabilisce i limiti al di fuori dei quali non è richiesto di indagare. Questo permette di semplificare il lavoro e concentrarsi solo sugli aspetti rilevanti ai fini dell'analisi. È fondamentale che l'analisi condotta sia sempre in accordo con l'obiettivo stabilito e quindi, nel caso lo si ritenesse necessario, è possibile andarlo a modificare in corso d'opera. Nella fase iniziale viene inoltre definita l'unità funzionale che viene indagata: si può considerare ad esempio, un'unità (bene finito e pronto per essere venduto) oppure la massa o il volume di materiale a fine processo. Come vedremo nel Capitolo 3, due o più processi che presentano la medesima unità funzionale possono essere comparati in maniera molto agevole.

Nella fase di LCI si vanno a raccogliere i dati relativi ai flussi elementari in ingresso e in uscita: per ogni processo o fase di lavorazione sono necessarie delle risorse (materie prime ed energia) e vengono prodotti scarti, rifiuti ed emissioni (scarti di materia prima, acque reflue, rifiuti solidi o liquidi, fumi). I dati che si possono misurare direttamente sono detti dati primari (o foreground data) e sono sempre preferiti. Se alcuni dati non sono reperibili in azienda, si fa riferimento ad articoli scientifici o database internazionali e questi dati vengono detti di tipo secondario (o background data). Quando si utilizzano fonti di questo tipo, bisogna fare attenzione che i dati siano riferiti a processi comparabili con il processo in analisi.

La fase di LCIA è la fase in cui si va ad associare ad ogni dato presente nell'inventario un certo impatto ambientale. Questa fase è generalmente svolta con l'ausilio di software ad-hoc, come ad esempio SimaPro, grazie ai quali è possibile modellizzare tutto il processo e rendere più veloce e automatizzato il calcolo degli impatti. In primo luogo, si va ad associare ad ogni dato di inventario un certo quantitativo di emissioni. Questo solitamente viene fatto utilizzando database supportati da SimaPro, come ad esempio Ecoinvent. Ogni dataset è specifico per un determinato materiale e contiene le quantità (in massa) di gas climalteranti e altre sostanze attive sulla biosfera che vengono emessi per produrre un kilogrammo di quel materiale. Successivamente si passa alla fase di classificazione: ogni emissione viene associata ad una o più categorie di impatto alle quali contribuisce. In Figura 3 vengono mostrate, a titolo di esempio, alcune correlazioni tra emissioni e categorie di impatto più comuni.

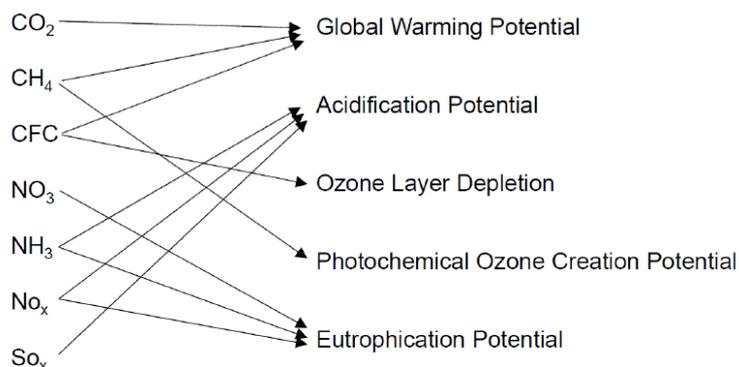


Figura 3: Correlazione tra emissioni e categorie di impatto [4]

Una categoria di impatto rappresenta uno specifico tipo di danno ambientale ed è descritta da un indicatore caratteristico. In Figura 4 sono mostrate alcune categorie di impatto e i relativi indicatori.

Impact category		Impact category Indicator (unit of measure)	Description
	Climate change, total	Radiative forcing as global warming potential – GWP100 (kg CO ₂ eq)	Increase in the average global temperature resulting from greenhouse gas emissions (GHG)
	Ozone depletion	Ozone Depletion Potential – ODP (kg CFC-11 eq)	Depletion of the stratospheric ozone layer protecting from hazardous ultraviolet radiation
	Human toxicity, cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	Impact on human health caused by absorbing substances through the air, water, and soil. Direct effects of products on humans are not measured
	Human toxicity, non-cancer	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	
	Particulate matter	Impact on human health (disease incidence)	Impact on human health caused by particulate matter emissions and its precursors (e.g. sulfur and nitrogen oxides)
	Ionising radiation, human health	Human exposure efficiency relative to U-235 (kBq U-235 eq)	Impact of exposure to ionising radiations on human health
	Photochemical ozone formation, human health	Tropospheric ozone concentration increase (kg NMVOC eq)	Potential of harmful tropospheric ozone formation ("summer smog") from air emissions
	Acidification	Accumulated Exceedance – AE (mol H ⁺ eq)	Acidification from air, water, and soil emissions (primarily sulfur compounds) mainly due to combustion processes in electricity generation, heating, and transport
	Eutrophication, terrestrial	Accumulated Exceedance – AE (mol N eq)	Eutrophication and potential impact on ecosystems caused by nitrogen and phosphorous emissions mainly due to fertilizers, combustion, sewage systems
	Eutrophication, freshwater	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (kg P eq)	
	Eutrophication, marine	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (kg N eq)	
	Ecotoxicity, freshwater	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	Impact of toxic substances on freshwater ecosystems
	Land use	Soil quality index, representing the aggregated impact of land use on: Biotic production; Erosion resistance; Mechanical filtration; Groundwater replenishment (Dimensionless – pt)	Transformation and use of land for agriculture, roads, housing, mining or other purposes. The impact can include loss of species, organic matter, soil, filtration capacity, permeability
	Water use	Weighted user deprivation potential (m ³ world eq)	Depletion of available water depending on local water scarcity and water needs for human activities and ecosystem integrity
	Resource use, minerals and metals	Abiotic resource depletion – ADP ultimate reserves (kg Sb eq)	Depletion of non-renewable resources and deprivation for future generations
	Resource use, fossils	Abiotic resource depletion, fossil fuels – ADP-fossil (MJ)	

Figura 4: Categorie di impatto incluse nel PEF, metodi e indicatori [5]

Ogni emissione che viene associata ad una determinata categoria deve poi essere convertita in una sostanza di riferimento che è stata scelta come indicatore per quella categoria. Questo passaggio viene detto caratterizzazione e si basa sull'attribuzione di un "peso specifico", detto fattore di caratterizzazione, rispetto al riferimento scelto. Per comprendere meglio questo concetto vediamo l'esempio del Global Warming Potential (GWP), la categoria di impatto che va a quantificare l'incremento sull'effetto serra operato da parte di gas climalteranti. I fattori di caratterizzazione relativi al GWP di una serie di gas sono riportati in Tabella 1. Si noti che per questa specifica categoria di impatto, l'unità di misura è la CO₂ equivalente e dunque i "pesi" dei gas vengono espressi in riferimento ad essa. Ad esempio, 1 kg di metano è equivalente a 28 kg di CO₂ in termini di impatto relativo all'effetto serra: questo vuol dire che il metano è 28 volte più impattante del riferimento.

Tabella 1: Fattori di caratterizzazione IPCC (2013) per alcuni gas serra [4]

Gas Serra	kg CO ₂ equivalenti
CO ₂ (anidride carbonica)	1
CH ₄ (metano)	28
N ₂ O (ossido di diazoto)	265
HFC-141b	782
HFC-134a	1300
CFC-12	10200
SF ₆ (sulfurhexafluoride)	23500

Per calcolare l'indice della categoria di impatto, espresso nell'unità di misura equivalente, si va a moltiplicare ogni fattore di caratterizzazione per la relativa quantità di gas e poi si vanno a sommare tutti questi contributi. Proseguendo con l'esempio del GWP, vediamo la formula per il calcolo del GWP cumulativo:

$$GWP = \sum_X GWP_X * q_X$$

dove GWP_X è il Global Warming Potential del gas X e q_X è la quantità di gas X.

È importante sottolineare che il calcolo degli impatti non è una procedura univoca, ma varia in base al metodo di calcolo utilizzato. Esistono molti metodi di calcolo (si veda la Figura 5), ma i più comuni sono il metodo ReCiPe, il metodo EPD (Environmental Product Declaration), il metodo EF (Environmental Footprint) e il metodo IPCC, sviluppato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change delle Nazioni Unite.

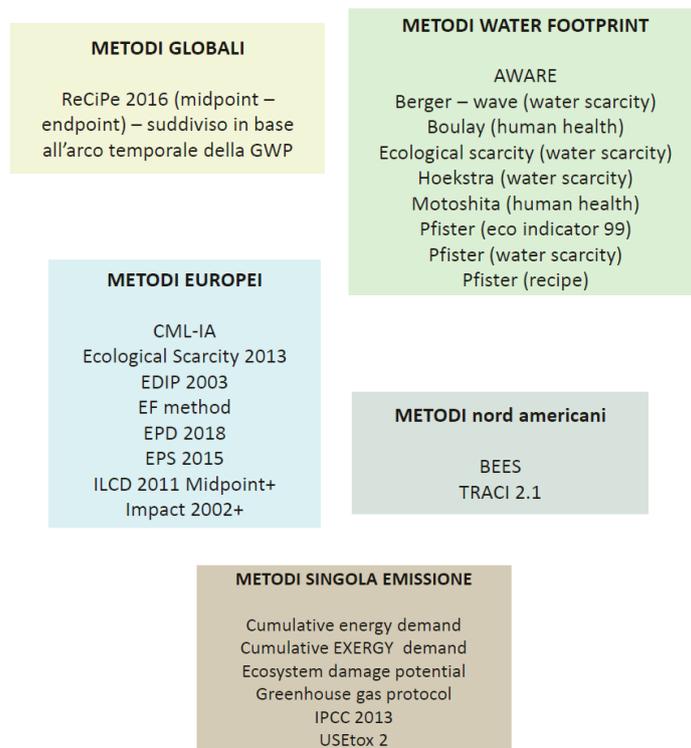


Figura 5: Metodi di calcolo degli impatti [4]

Generalmente, i metodi vengono distinti in due tipologie: mid-point o end-point. I metodi mid-point forniscono i valori di impatto secondo le diverse categorie di impatto, ma non vanno a quantificare l’effetto cumulativo su macrocategorie più generali. Al contrario, i metodi end-point vanno a pesare i contributi provenienti dagli indicatori mid-point per valutare i danni sulla salute umana, i danni sull’ecosistema e l’utilizzo di risorse. Per comprendere al meglio questo punto, si osservi la Figura 6.

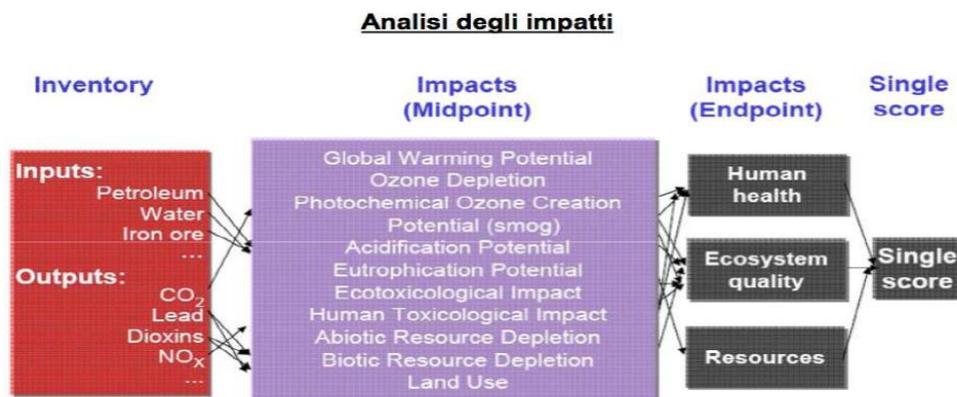


Figura 6: Schematizzazione del metodo di calcolo degli impatti [4]

Volendo è possibile calcolare uno score cumulativo detto “single score”, ma è difficile stabilire la sua rilevanza ed efficacia. Generalmente, è sufficiente fermarsi agli indicatori mid-point in quanto sono ritenuti molto più affidabili.

L’ultimo caposaldo di un’analisi LCA è la fase di interpretazione. Questa è una fase trasversale alle altre tre, che permette di identificare le aree di maggiore impatto ambientale e valutare la completezza, sensibilità e consistenza dello studio [6]. I risultati devono essere presentati in maniera chiara e coerente e non devono essere manipolati per cercare di indurre il lettore a leggere lo studio in un determinato modo. Le conclusioni e le raccomandazioni permettono all’azienda o all’organizzazione che effettua lo studio di operare, in un momento successivo, alcune strategie atte a ridurre l’impatto ambientale del prodotto, come ad esempio il miglioramento del design, l’uso di materie prime meno impattanti ove possibile, la scelta di fornitori locali rispetto a fornitori esteri, l’efficientamento degli impianti o il miglioramento della gestione delle risorse.

1.5 Riferimenti normativi

I riferimenti normativi per questo tipo di analisi sono due norme sviluppate dall’Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) e riconosciute a livello mondiale: la normativa UNI EN ISO 14040 e la UNI EN ISO 14044.

La normativa ISO 14040 è intitolata “Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo vita – Principi e quadro di riferimento” e descrive in maniera dettagliata il contesto e i principi sui quali si fonda l’analisi del ciclo vita. Nello specifico, viene definito il ciclo vita, vengono definite le fasi dell’LCA e vengono stabiliti i principi di trasparenza, coerenza, completezza e accuratezza. Questa normativa è concepita per fornire una visione di insieme sull’analisi LCA e perciò non entra eccessivamente nei dettagli tecnici, come invece fa la normativa 14044 [6].

La normativa ISO 14044, intitolata “Gestione Ambientale – Valutazione del ciclo di vita – Requisiti e linee guida”, completa e approfondisce la descrizione dell’analisi, fornendo dettagli tecnici per l’applicazione della metodologia LCA. Al suo interno vengono prescritti alcuni requisiti che l’analisi deve rispettare, come ad esempio i criteri per stabilire i confini e le ipotesi del sistema, i requisiti per la raccolta, la gestione e la qualità dei dati, le indicazioni sulle metodologie di caratterizzazione e sulle categorie di impatto e le linee guida su come valutare la significatività dei risultati e come garantire che siano coerenti con gli obiettivi. Viene inoltre stabilito come devono essere trattate le incertezze e le limitazioni metodologiche e vengono imposti i criteri per una revisione indipendente, necessaria per la credibilità dello studio. Infine, viene specificato che i risultati siano documentati in maniera trasparente e chiara [7].

1.6 Limiti della metodologia

La metodologia LCA presenta alcuni limiti che vanno presi in considerazione quando si vuole effettuare uno studio accurato. In primo luogo, è una metodologia che richiede di effettuare alcune assunzioni e dunque, queste assunzioni devono essere buone se si vuole ottenere un risultato che abbia valore. In secondo luogo, è difficile essere precisi se non si hanno molte informazioni riguardo la materia prima: è quindi necessaria una certa trasparenza tra chi svolge lo studio e i fornitori. È molto importante prestare attenzione alla qualità di tutti i dati che vengono utilizzati. È altresì importante utilizzare metodi compatibili se si va ad operare un confronto tra diversi studi LCA. Infine, la metodologia LCA si limita a valutare gli impatti ambientali e non affronta gli aspetti economici o sociali. Pertanto, sono state definite metodologie specifiche per questi scopi, denominate Life Cycle Costing (LCC) e Social Life Cycle Assessment (S-LCA).

1.7 Relazioni tra metodologia LCA e obiettivi dell'agenda 2030



Figura 7: Obiettivi Agenda 2030 applicabili all'analisi LCA, immagine adattata da [8]

La metodologia del Life Cycle Assessment è profondamente interlacciata agli obiettivi di sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030. Infatti, è una metodologia atta ad analizzare gli impatti ambientali in termini di consumi di energia, materie prime ed emissioni ed ha lo scopo di poter modificare i comportamenti umani in ottica di una maggiore sostenibilità. L'obiettivo che più viene interessato è l'Obiettivo 12 - "Consumo e Produzione Responsabili" perché un'analisi di questo tipo permette alle aziende di avere un'idea delle aree più impattanti della loro produzione e di conseguenza implementare strategie per mitigare gli impatti più rilevanti. Altri obiettivi vengono toccati solamente in parte, come ad esempio l'Obiettivo 3 - "Salute e Benessere", che ad esempio è legato al calcolo degli impatti di sostanze tossiche oppure l'Obiettivo 6 - "Acqua Pulita e Servizi Igienico-Sanitari" perché nell'analisi LCA si va a quantificare il consumo di acqua corrente. Un ulteriore obiettivo che si relaziona con l'analisi LCA è il 7 - "Energia Pulita e Accessibile", perché nell'implementazione di azioni mitiganti degli impatti c'è anche l'efficientamento energetico o il minore utilizzo di energia proveniente da fonti fossili. L'LCA è anche fondamentale per gli Obiettivi 13 - "Lotta al Cambiamento Climatico", 14 - "Vita sott'Acqua" e 15 - "Vita sulla Terra", sempre perché va ad indagare gli impatti che determinati processi hanno sul nostro ecosistema. Infine, è collegabile all'obiettivo 11 - "Città e comunità sostenibili" perché è uno strumento che permette di compiere azioni concrete verso un mondo più sostenibile [9].

2. Materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio e applicazioni in ambito automotive

I materiali compositi sono ampiamente utilizzati nel settore automotive perché uniscono due proprietà indispensabili al giorno d'oggi: leggerezza e resistenza. In questo capitolo verrà dapprima analizzato il contesto in cui sono inseriti questi materiali, poi verrà fatta una panoramica generale sulle proprietà e i metodi di produzione dei materiali compositi e infine si tratteranno nel dettaglio alcune tecniche innovative per la trasformazione dei CFRP, rese possibili grazie all'utilizzo di un'anima polimerica da inserire all'interno del materiale composito.

2.1 Scenario corrente del mondo dei compositi e del settore dei trasporti

Quello dei materiali compositi è un settore molto dinamico che copre diverse aree di applicazione: tra le principali figurano l'area delle costruzioni e delle infrastrutture, il settore dei trasporti, quello dello sport e l'industria elettrica ed elettronica. Già solo prendendo in considerazione questi settori possiamo capire l'importanza dei compositi nel mondo industriale: queste cinque aree rappresentano una grande fetta del settore secondario. Tuttavia, è attualmente diffuso un certo malessere in tutta l'industria dei materiali compositi: sebbene i dati globali mostrino una tendenza crescente e un volume totale produttivo di 13 milioni di tonnellate nel 2023, in Europa la produzione è diminuita di un 8% rispetto al 2022, per un totale di 2 milioni e mezzo di tonnellate di materiale composito prodotto. La Germania è il Paese europeo con il volume produttivo maggiore anche se ha subito un forte rallentamento negli ultimi anni. A seguire troviamo Spagna e Portogallo, l'Italia e i Paesi dell'est Europa, i quali, assieme alla Germania, contano per i due terzi della produzione europea di materiali compositi [10].

Il settore dei trasporti è il principale attore in questo scenario: in Europa circa il 50% delle applicazioni dei materiali compositi sono destinate a quest'area, come mostrato in Figura 8.

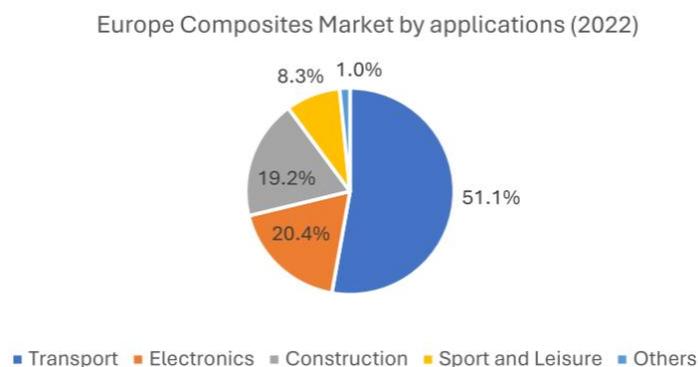


Figura 8: Applicazione materiali compositi in Europa per settore [11]

Il settore dei trasporti contribuisce a circa il 5-10% del PIL (prodotto interno lordo) mondiale e per un 5% al PIL europeo. Secondo alcune stime dell'Organizzazione Internazionale del Lavoro,

vede impiegati globalmente oltre 100 milioni di lavoratori ed è fondamentale non solo come industria a sé stante, ma data anche la sua funzione essenziale per il commercio e per il funzionamento di molte altre industrie. Questo settore ha subito grandi fluttuazioni negli ultimi anni a causa di diversi fenomeni che si sono verificati e si stanno tuttora verificando: in primis la pandemia che ha rallentato la produzione di componenti e chip ed ha quindi rallentato tutta la catena di fornitura, poi l'aumento dei prezzi dell'energia dovuto alla guerra in Ucraina e infine una crisi più generale dovuta alle politiche green europee che impongono la conversione a motore elettrico e l'abbattimento delle emissioni di CO₂ entro il 2035. Questo pone i costruttori, anche chiamati Original Equipment Manufacturers (OEM) e i trasformatori, detti Tier 1 o Tier 2, in uno scenario critico: il settore necessita di ingenti cambiamenti per potersi risollevar.

Contrariamente alla tendenza generale, la produzione di compositi rinforzati con fibra di carbonio (CFRP) ha subito una crescita del 10,5% nel 2023 rispetto all'anno precedente [10]. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che la fibra di carbonio, essendo di partenza una materia prima più costosa, trova applicazione in alcune nicchie del settore dei trasporti: spesso la troviamo in automobili di lusso o da corsa, ma anche in aerei ed elicotteri o imbarcazioni da competizione. In tutti questi casi è fondamentale ottenere ottime prestazioni e quindi il prezzo ha una rilevanza inferiore. Quindi, per il momento, i CFRP non sono particolarmente coinvolti dalla crisi del settore automobilistico, in quanto non vengono utilizzati per la produzione di massa di automobili e, ad ogni modo, trovano applicazione anche in altri settori.

L'impatto ambientale del settore dei trasporti è stato valutato in recenti studi effettuati dall'Agenzia Europea dell'Ambiente, i quali riportano che circa il 25% delle emissioni totali di gas serra è imputabile al settore in oggetto: di queste circa un 71,7% sarebbe dovuto al trasporto stradale, un 14% al trasporto marittimo, un 13,4% al trasporto aereo e meno dello 0,4% al trasporto ferroviario [12]. Per questo motivo, è fondamentale ridurre le emissioni del settore dei trasporti e in particolare di quelli su strada. Attualmente l'industria sta concentrando sull'alleggerimento dei veicoli, perché questo comporta una riduzione del consumo di carburante e una conseguente riduzione delle emissioni dirette di CO₂ che provengono dalla sua combustione. Tuttavia, sarebbe necessario adottare un approccio circolare e più sostenibile, ripensando tutte le fasi della vita di un veicolo e non solo la fase di utilizzo. Sarebbe quindi doveroso concentrare gli sforzi anche sui seguenti aspetti:

- la scelta di materiali riciclati o poco impattanti dal punto di vista ambientale;
- l'impiego un mix di energia pulita per tutte le fasi della lavorazione, compresa l'estrazione delle materie prime;
- l'impiego di mezzi di trasporto per la logistica poco impattanti;
- il risparmio energetico nello stabilimento produttivo;
- la compensazione delle emissioni;
- il riuso delle materie prime e il riciclo a fine vita.

Per questo motivo uno studio di impatto ambientale può essere un primo strumento che permette di indagare tutte le fasi del ciclo produttivo e può dare una visione d'insieme dei consumi e degli impatti di un determinato prodotto. Grazie a questa analisi è possibile individuare le aree di processo che presentano maggiori criticità e andarle a migliorare in seguito.

2.2 CFRP: proprietà e processo produttivo tradizionale

I materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio (CFRP) sono una particolare classe di materiali compositi che vengono oggi ampiamente utilizzati nell'industria dei trasporti per la loro resistenza, leggerezza e facilità di lavorazione. Sono processabili tramite diversi metodi di formatura, che vanno dalla stesura manuale (hand lay-up) a metodi più automatizzati. Di seguito ci si concentrerà sulla laminazione manuale accoppiata a formatura in autoclave o in pressa, che sono le metodologie più comunemente impiegate nel settore automotive.

2.2.1 Proprietà delle fibre di carbonio

Le fibre di carbonio presentano un'elevata resistenza a trazione (σ), un elevato modulo di Young (E) e hanno una densità pari a $1,8 \text{ g/cm}^3$. Si suddividono in fibre ad alto modulo elastico ($E= 390\text{-}760 \text{ GPa}$ e $\sigma= 2400\text{-}3400 \text{ MPa}$) e fibre ad alta resistenza ($E= 240\text{-}280 \text{ GPa}$ e $\sigma= 4100\text{-}5100 \text{ MPa}$). I CFRP possiedono quindi una strength-to-weight ratio molto alta, che può anche superare quella dell'acciaio: permettono, dunque, un efficientamento dei veicoli sia in termini di prestazioni che di alleggerimento. Queste fibre sono molto durevoli e hanno un'elevata stabilità dimensionale grazie al bassissimo coefficiente di espansione termica (CTE), che solitamente è prossimo allo zero. In alcuni casi il CTE delle fibre di carbonio è negativo e quando vengono accoppiate con una matrice dal CTE positivo, si può ottenere un composito con CTE nullo, ovvero un materiale che non espande né contrae al variare della temperatura perché matrice e fibre compensano le rispettive tendenze. Questa caratteristica è ottimale per oggetti che devono lavorare in temperatura e devono rispettare alcuni vincoli dimensionali senza andare incontro a deformazione. Mantengono pressoché inalterate le loro proprietà meccaniche anche oltre i 1500°C , a patto che non ci si trovi in ambiente ossidante. In quest'ultimo caso, le fibre iniziano ad ossidare già da temperature più basse, attorno i 500°C [13]. Sono in generale resistenti alla corrosione in ambienti sfavorevoli, quali umidità, neve e pioggia. Le fibre di carbonio possiedono un'elevata conducibilità termica ed elettrica. Tuttavia, presentano problemi di compatibilità con l'alluminio, in quanto le fibre di carbonio hanno un elevato potenziale elettrochimico e, quando sono a contatto con l'alluminio e in presenza di elettrolita, si viene ad innescare un effetto pila. L'alluminio inizia quindi a corrodersi per cessione di ioni, mentre il carbonio risulta protetto. Questo problema in realtà non è molto frequente nei CFRP in quanto le fibre non sono a contatto con l'esterno grazie alla resina polimerica che funge da barriera isolante [14].

Le fibre di carbonio si possono trovare nelle seguenti forme:

- monofilamento, ovvero come singolo filamento continuo di circa $10 \mu\text{m}$ di diametro;
- fascio di filamenti paralleli tra loro non torsionati (tow);
- filato (spun yarn), ovvero un assemblato di filamenti che vengono mantenuti assieme grazie al torsionamento;
- filo assemblato (roving), ovvero un assieme di spun yarn, tutti paralleli tra di loro e non torsionati tra loro;
- tessuti, costituiti da spun yarn che vengono intrecciati tra loro secondo schemi prestabiliti.

I tessuti possono essere monodirezionali, bidirezionali o multi-assiali a seconda di quante sono le direzioni principali dei fili che li compongono. Nel caso di tessuto monodirezionale, tutti i fili sono disposti lungo un'unica orientazione e possono essere tenuti assieme da cuciture. I bidirezionali sono i più comuni e sono composti da fili di trama e di ordito. I fili di trama sono posti trasversalmente rispetto alla lunghezza del tessuto, mentre i fili di ordito sono posti parallelamente alla lunghezza del tessuto. Le armature che si possono ottenere dall'intreccio di trama e ordito sono diverse, ma gli esempi più classici sono la tela piana (plain weave), la saia (twill) e il raso (satin). Infine, i tessuti multi-assiali sono tessuti in cui le fibre di rinforzo sono disposte parallelamente le une alle altre lungo un certo piano e poi vengono sovrapposti due o più piani a diversa orientazione. Le più classiche sono le bi-assiali con orientazione $0^\circ/90^\circ$ o $\pm 45^\circ$ [15].

I tessuti possono essere venduti così come sono (secchi) o già impregnati con resina (pre-preg). Le resine più classiche sono quelle termoindurenti, come le resine epossidiche, ma anche quelle termoplastiche stanno pian piano acquisendo una maggiore importanza nel mondo nei compositi.

2.2.2 Formatura in stampo chiuso in autoclave

Il più comune processo di formatura dei CFRP è quello che prevede l'utilizzo di un'autoclave. L'autoclave è un particolare tipo di forno industriale nel quale viene inserito del gas inerte, solitamente azoto. Il gas, in combinazione con l'alta temperatura, permette di formare il composito e quindi ottenere l'oggetto della forma desiderata.

Il materiale di partenza è, in genere, una fibra di carbonio preimpregnata di resina termoindurente. La resina non è in partenza reticolata, perché così il materiale risulta drappeggiabile sullo stampo. Per non farla reticolare, i rotoli di pre-preg vengono stoccati in una cella frigo, anche per diversi mesi. Quando devono essere usati, i rotoli vengono estratti dal frigo e tagliati con una macchina da taglio, detta anche plotter, seguendo geometrie prestabilite. I fogli tagliati vengono confezionati in un sacchetto di plastica per creare un kit, ovvero l'unità fondamentale di pelli¹ che serve a realizzare un pezzo completo.

Il kit viene quindi mandato alla laminazione, dove l'operatore va a stendere i vari strati sullo stampo, seguendo delle orientazioni prestabilite. Per far aderire bene gli strati allo stampo e tra loro è consuetudine mettere il pezzo sottovuoto più volte, man mano che vengono applicati gli strati. Per fare ciò si va a mettere lo stampo all'interno di un sacco che presenta una valvola per l'aspirazione dell'aria. Per far sì che il sacco non si incolli alla pelle più esterna durante la messa sottovuoto, si va ad appoggiare un film distaccante al di sopra dello stampo. In aggiunta viene impiegato un tessuto aeratore per permettere il passaggio dell'aria verso la valvola di aspirazione. Il vuoto viene creato connettendo la valvola alla pompa di aspirazione mediante un tubo. In questo step è importante che il sacco sia sovradimensionato rispetto allo stampo in modo da poter creare il maggior numero di grinze con il sacco in eccesso. Qualora non ci fossero piegature del sacco lungo tutta la superficie del pezzo ci potrebbero essere delle zone in cui l'aria fa fatica a passare e quindi non si riuscirebbe ad aspirare tutta l'aria. Inoltre, in assenza di grinze, si potrebbe tirare troppo il sacco in alcuni punti e romperlo. Dopo aver tenuto il sacco in vuoto per una ventina di

¹ Le pelli sono gli strati di fibra di carbonio già tagliati secondo la geometria prestabilita.

minuti, si apre il sacco e si procede con gli strati successivi. Alla fine del processo di laminazione si mette lo stampo in un nuovo sacco, detto sacco finale, si chiude con del nastro sigillante e si mette sottovuoto.

Quindi si prende il sacco e lo si va a mettere in autoclave per la cottura. Il set-up di formatura in autoclave viene mostrato in Figura 9.

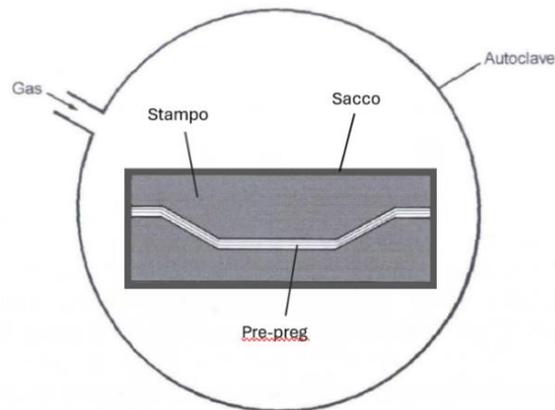


Figura 9: Set-up per formatura di compositi in autoclave in stampo chiuso e sacco (immagine adattata da [13])

Durante la cottura viene innalzata la temperatura, la resina fluidifica, reticola e infine solidifica irreversibilmente quando il pezzo viene raffreddato.

Nel caso di componenti con cavità interne è spesso utilizzato un sacco anche all'interno della cavità. In cottura, viene iniettato del gas dentro questo sacco interno ed esso si espande, comprimendo le pelli dall'interno verso lo stampo. La pressione viene in questo caso applicata sia dall'interno che dall'esterno. La pressione esterna, come detto in precedenza, viene applicata da un gas di azoto che viene iniettato all'interno dell'autoclave.

Il ciclo di cura in autoclave può durare anche alcune ore e le variabili tempo e temperatura dipendono dalla dimensione del pezzo e altre variabili legate al sistema resina del pre-preg, che vengono raccolte nel Technical Data Sheet (TDS). Dopo il mantenimento, il pezzo viene raffreddato all'interno dell'autoclave, secondo una rampa di temperatura decrescente e l'azoto presente all'interno viene rimpiazzato con aria al fine di poter aprire il forno. Dopo l'estrazione, il sacco viene aperto e viene estratto il pezzo curato dallo stampo. Il processo sacco-vuoto-autoclave permette di ottenere dei buoni risultati in termini di qualità del pezzo finale, specialmente in termini di assenza di vuoti o assenza di eccessi di resina. Molto spesso per realizzare assemblati di forma complessa si vanno poi ad incollare assieme più pezzi già curati.

2.2.3 Formatura in stampo chiuso in pressa

Il processo di formatura in pressa è analogo al caso precedente, cambia solo il metodo di consolidamento della resina. Dunque, dopo il processo di laminazione, si chiude lo stampo e si ripone sul piano della pressa. Il piano è riscaldato così da poter fluidificare la resina e innescare la reticolazione. Una volta azionata la pressa, il piano superiore scende e mette in compressione lo stampo. Il set-up del processo viene mostrato in Figura 10.

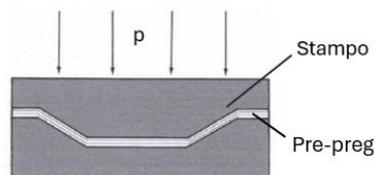


Figura 10: Set-up per la formatura di compositi in pressa in stampo chiuso (immagine adattata da [13])

Anche qui il ciclo ha una durata nell'ordine delle ore. In questo caso si ha il vantaggio di non avere utilizzo di azoto; le presse generalmente non sono isolate e sono a contatto con l'ambiente esterno. Solo in alcuni casi viene effettuata una compressione sottovuoto, con il fine di aumentare la resa finale del composito e diminuirne ulteriormente la porosità. In questo caso non viene utilizzato un sacco e il raffreddamento può essere effettuato in aria o in una stazione di raffreddamento ad acqua.

Anche in questo caso, se due pezzi devono formare un oggetto unico, vengono incollati assieme e l'interno rimane vuoto, come schematizzato in Figura 11.

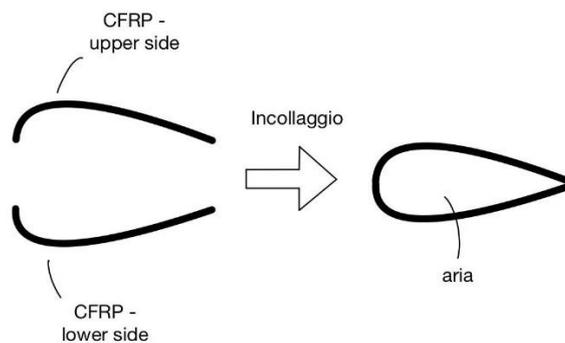


Figura 11: Schema del processo tradizionale di incollaggio di materiale composito

Un piccolo vincolo legato all'utilizzo della pressa è che gli stampi non devono avere sporgenze, ma devono avere sia la superficie superiore che quella inferiore piatta, in modo da avere un'applicazione della pressione omogenea su tutto pezzo.

2.2.4 Svantaggi dei metodi di formatura tradizionale e possibili migliorie

Il mondo dei materiali compositi tradizionali, pur essendo ricco di potenzialità, presenta parecchi problemi:

- costo elevato della materia prima rispetto ai classici materiali metallici: il problema del costo è un problema che spesso si presenta quando si vogliono utilizzare materiali ad alte prestazioni; questo è dovuto sia al materiale di per sé sia alle lavorazioni necessarie per realizzarlo o trasformarlo;
- processi di formatura energivori, lunghi e costosi (autoclave);
- ampio utilizzo di consumabili, ovvero materiali usa e getta, quali sacchi, tessuto distaccante, tessuto aeratore e nastro sigillante;
- incollaggio, step critico che può peggiorare le proprietà meccaniche ed estetiche, nonché aumentare le probabilità di scarto del componente finale.

Per ovviare a questi problemi le strategie adottabili sono le seguenti: innanzi tutto si può cercare di ridurre il quantitativo di materiale utilizzato, così da avere un costo inferiore. In secondo luogo, è importante svincolarsi dall'uso dell'autoclave e transire verso metodi di formatura alternativi, riducendo così il dispendio energetico, di gas nobile e di consumabili. Infine, è desiderabile eliminare la fase di incollaggio delle due mezzerie per ottenere un vantaggio in termini di velocità del processo e in termini di scarti.

2.3 Core attualmente diffusi nel settore automotive

Un settore di innovazione nel mondo dei materiali compositi è quello delle anime e, in particolare, delle anime polimeriche strutturali da accoppiare ai CFRP. Queste anime sono realizzate utilizzando materiali a bassa densità, ma che presentano una buona rigidità e resistenza. In questo modo, l'utilizzo dell'anima non comporta un incremento sostanziale della massa del componente finale, ma ne va a migliorare le prestazioni meccaniche. Inoltre, il core² può, in alcuni casi, andare ad apportare dei vantaggi dal punto di vista di risparmio di materiale (pre-preg, consumabili, colla) ed eventualmente eliminare alcune fasi del processo tradizionale (incollaggio). Questi vantaggi verranno approfonditi successivamente, caso per caso.

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse proposte in termini di core per materiali compositi e ogni proposta differisce per alcune caratteristiche e modo di impiego. Nei successivi paragrafi vengono presentati due dei più comuni materiali per anime: Rohacell e Intivato. Questi materiali rappresentano due classi ben distinte di materiale per anima e due metodologie di impiego differenti.

2.3.1 Rohacell

Rohacell è il nome commerciale di un materiale espanso a base di polimetacrilimmide (PMI). La sua microstruttura è a celle 100% chiuse, che gli conferisce un'elevata rigidità, ma anche una certa fragilità. La sua densità è compresa tra 30 e 200 kg/m³ [16], ma solitamente nei settori aerospaziale e automotive di lusso, si prediligono densità comprese tra 50 e 130 kg/m³, poiché offrono un buon compromesso tra leggerezza e resistenza meccanica. La schiuma Rohacell è in grado di sopportare compressioni fino a 2 MPa e presenta proprietà di assorbimento di energia di impatto e infatti può essere utilizzata in applicazioni quali caschi o altri componenti che devono resistere agli urti.



Figura 12: Sezione di un sandwich di CFRP con core Rohacell

Questo materiale mantiene le proprietà meccaniche fino a 180°C e in alcune formulazioni anche fino ai 220°C. Non è ignifugo, ma ha una bassa emissione di fumi ed è molto stabile dimensionalmente in temperatura. È un materiale che assorbe una certa quota di umidità e quindi necessita di essere essiccato prima di essere impiegato, specialmente se deve essere trattato a

² I termini core e anima sono sinonimi

temperature al di sopra dei 100°C perché altrimenti si andrebbe in contro alla generazione di vapore e si andrebbe ad inficiare l'adesione al tessuto pre-impregnato. Rohacell viene venduto sotto forma di pannelli che possono poi essere lavorati mediante processi di fresatura, foratura, tornitura o sabbiatura. In questo modo gli si conferisce la forma desiderata. Tuttavia, si genera una quantità rilevante di materiale di scarto. È adatto sia a processi che vedono l'utilizzo di pre-preg, sia quelli con infusione di resina e RTM [17].

2.3.2 Intivato

Intivato è un materiale per anime a base poliuretanicica che, a differenza di Rohacell, può essere preformato tramite stampaggio e non richiede quindi una lavorazione alle macchine utensili. Possiede un'intrinseca leggerezza (75 kg/m^3) e un'elevata stabilità alle alte temperature. È capace di soddisfare geometrie molto complesse e può essere accoppiato a tutti i processi di formatura tradizionale dei compositi, come ad esempio il Resin Transfer Moulding (RTM), l'autoclave e il Press Forming.



Figura 13: Core in Intivato, preformato [18]

2.4 Koridion, materiale innovativo per core espandenti

Koridion è il nome commerciale di una tecnologia sviluppata e brevettata dall'azienda Alia Mentis. Si tratta di un materiale polimerico espandente che viene impiegato per realizzare core per strutture sandwich in materiale composito. I principali settori di impiego sono il settore automotive, il settore aerospaziale e quello dello sport. Alcuni esempi di applicazione già ben consolidati sono cofani, tetti, sedili e maniglie di automobili, bracci porta remi per imbarcazioni da canottaggio o ancora ruote e caschi per il ciclismo.



Figura 14: Sedile: a sinistra, anima Koridion inserita nel sandwich in CFRP; a destra, sedile dopo cottura



Figura 15: Maniglia per automobile: a sinistra, pezzo cotto; a destra anima Koridion



Figura 16: Braccio porta remi per imbarcazione da canottaggio contenente anima Koridion



Figura 17: Casco per ciclismo contenente anima Koridion

2.4.1 Proprietà e vantaggi delle anime attive Koridion

Koridion è un materiale polimerico a bassa densità (dai 30 ai 200 g/l a seconda delle applicazioni). Si presenta come una schiuma self-standing, dura e piuttosto rigida che possiede però un certo grado di deformabilità di tipo non elastico. Le caratteristiche di viscoelasticità sono enfatizzate dalla microstruttura del materiale, che presenta celle sia aperte che chiuse. Dalla Figura 18 è possibile rendersi conto della consistenza di questo materiale.



Figura 18: Lastra in materiale Koridion

In realtà, Koridion, più che un singolo materiale, è una famiglia di compound derivante da una matrice comune di componenti. A seconda del progetto, viene preparato un compound ad hoc che soddisfi i requisiti e le prestazioni richieste.

Possedendo una microstruttura differente rispetto a quella dei materiali visti in precedenza, anche le proprietà meccaniche e di lavorabilità risultano differenti. Presenta ottime proprietà di smorzamento delle vibrazioni e assorbimento degli impatti. Inoltre, è un materiale non infiammabile fino a 2300°C: questa è un requisito fondamentale per realizzare componenti che potrebbero venire a contatto con gas caldi, scintille o persino fiamme. Al contrario di altri materiali che vengono utilizzati per realizzare core per CFRP, ha un assorbimento di resina trascurabile e lo stoccaggio è molto facile, in quanto non richiede condizioni stringenti in termini di umidità o temperatura e nemmeno pretrattamenti antecedenti al caricamento nello stampo. Infatti, non è necessario né un trattamento di drying né l'applicazione di un film adesivo sullo stampo per facilitarne l'adesione durante il processo di formatura dell'anima. Koridion permette altresì una facile integrazione con inserti in materiali diversi, come quelli in metallo che spesso servono per il fissaggio ad altri componenti o a strutture, come visibile in Figura 19.



Figura 19: Sezione di un braccio per canottaggio con inserto metallico

La caratteristica principale che rende unico questo materiale è che le anime realizzate con Koridion partecipano al processo di formatura del composito dall'interno: quando viene innalzata la temperatura, il compound espande e genera una pressione positiva (fino a 6 bar) sui fogli di carbonio che lo ricoprono. Il carbonio preimpregnato è quindi spinto dall'interno verso lo stampo e questa pressione è bilanciata dalla pressione esercitata dalla pressa o dal gas presente all'interno dell'autoclave. Questo bilanciamento permette una compattazione ottimale dei fogli, un'omogenea distribuzione della resina e una copiatura dello stampo perfetta. Questo contributo attivo alla cura del carbonio permette di diminuire il numero di strati totali del pacco laminare di carbonio del pezzo finale, senza variare i risultati estetici e prestazionali, ma diminuendone significativamente il peso (per alcuni progetti con un risparmio di materiale anche del 40%). Questa diventa una caratteristica interessante anche dal punto di vista economico, dato che permette di utilizzare una minore quantità di materia prima preimpregnata. Questa riduzione sarà un punto fondamentale dell'analisi LCA che vedremo meglio nel Capitolo 3.

Per di più, realizzare componenti utilizzando un core permette di risparmiare sul lato dei consumabili e dei materiali ausiliari, quali sacchi, distaccante, aeratore, sigillante e colla. In primo luogo, non vengono impiegati sacchi per formare l'interno del pezzo perché questo compito viene svolto dall'anima; questo è vantaggioso anche perché non si deve prevedere un foro di accesso per il sacco in mezzo allo stampo e quindi non si va a compromettere la meccanica dell'oggetto finale (come invece avveniva nel caso di formatura tradizionale). In secondo luogo, il pezzo finale non è frutto dell'incollaggio di due parti che sono state laminate separatamente, ma al contrario è un oggetto monolitico realizzato in un unico step di laminazione. Si parla di laminazione "one-shot". La struttura del sandwich viene schematizzata in Figura 20. È possibile notare che l'anima riempie l'interno del pezzo in CFRP, che nel caso di formatura tradizionale era vuoto.

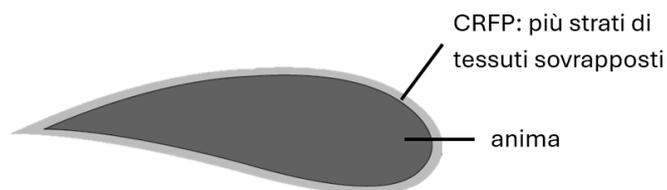


Figura 20: Schema di un laminato sandwich

In alcuni casi, il core non è un pezzo unico, ma viene realizzato come due o più parti distinte, in modo da rendere più maneggevoli gli stampi e agevolare l'inserimento all'interno del composito in fase di laminazione. Le parti, una volta inserite all'interno del laminato e sottoposte al ciclo di cura, compensano i vuoti e aderiscono tra loro, legandosi chimicamente ed evitando qualsiasi tipo di difettosità estetica sulla superficie esterna del pezzo in CFRP. Al contrario, se si esegue una formatura di tipo tradizionale (senza anima ma con sacco nel quale viene insufflato del gas per esercitare una pressione all'interno di cavità), purtroppo si riesce ad avere un controllo sulla pressione inferiore e un maggior rischio che il materiale venga deformato se si trova tra due sacchi che lo comprimono con forze di intensità differente. Come è possibile osservare in Figura 21, grazie a tecniche di tomografia, nel caso di Koridion (a sinistra), il materiale di rinforzo che è presente tra le due parti di core segue perfettamente la geometria del pezzo, mentre nel caso tradizionale con i sacchi (a destra), questo non avviene.

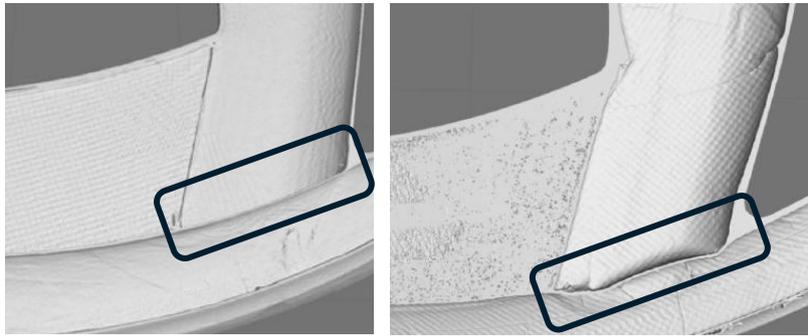


Figura 21: Resa post-formatura dell'interno di cavità: a sx con anima Koridion, a dx senza anima ma con sacco

L'anima non genera marcature sulla faccia esterna del pezzo e quindi si possono realizzare facilmente oggetti con estetica carbon-look (Figura 22 e Figura 23). L'ottima resa superficiale è data anche dalla facile stesura della resina, che si distribuisce in maniera uniforme lungo tutta la superficie senza aggregarsi.



Figura 22: Superficie di un sandwich contenente anima Koridion

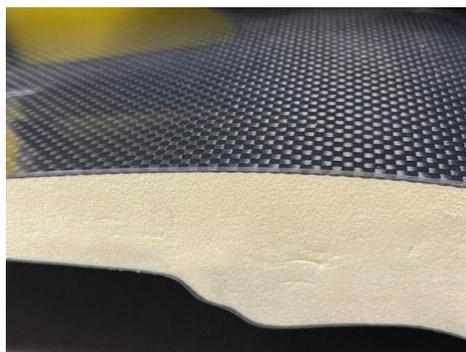


Figura 23: Carbon-look con anima Koridion

Un'innovazione rispetto agli altri core è la possibilità di laminare direttamente sull'anima: le pelli di carbonio possono essere fatte aderire direttamente sulla superficie al core, senza l'ausilio di uno stampo. Questo permette di andare a preparare in anticipo grandi quantità di laminati e andarli a stoccare in frigo per il tempo desiderato, non occupando più gli stampi per tempi lunghi e andando così ad abbattere in maniera significativa i tempi di produzione dei componenti in carbonio; il laminato viene inserito nello stampo solo al momento della cottura.

2.4.2 Processo produttivo delle anime

In partenza, le materie prime si trovano sotto forma di polvere. Queste devono essere dosate accuratamente per ottenere un compound che abbia le proprietà desiderate. Lo step successivo è il riempimento dello stampo. Gli stampi sono fatti in lega di alluminio e vengono realizzati internamente all'azienda mediante asportazione di truciolo da blocco. Dopo il riempimento dello stampo, lo si va a chiudere e si fa cuocere l'anima in forno oppure in pressa. Generalmente si sceglie la cottura in pressa perché garantisce una migliore distribuzione del calore e permette un'ottimizzazione dei costi in quanto il consumo energetico è inferiore. Il materiale, una volta cotto, è consolidato ed ha copiato perfettamente la forma dello stampo.

2.4.3 Co-laminazione delle anime all'interno dei CFRP

La procedura è quasi analoga a quella della laminazione tradizionale, ma con piccole differenze. Prima vengono laminate separatamente le due metà del pezzo, ognuna nel suo stampo. In questo caso vengono effettuati vari cicli di pre-vuoto per far aderire bene gli strati di pre-preg allo stampo e gli uni sugli altri. Successivamente viene inserito il core nell'avvallamento di una delle due metà e gli eventuali inserti in carbonio o metallo. Si chiude quindi il tutto sovrapponendo la seconda metà del pezzo alla prima. Si sigilla lo stampo mediante l'utilizzo di viti e bulloni cosicché non si apra in cottura e il pezzo non si deformi. Nel caso di cottura in autoclave, si va a mettere tutto lo stampo all'interno di un sacco, che va poi chiuso e messo sottovuoto. Nel caso di cottura in pressa non viene utilizzato il sacco. Durante il ciclo di cottura, la resina del pre-preg diventa meno viscosa e reticola, mentre il core espande e genera una pressione che mette in compressione le fibre dall'interno. Il pezzo dopo cottura viene raffreddato (in aria o acqua): la resina indurisce e il composito si consolida secondo la forma imposta dallo stampo. Quando il pezzo è freddo può essere estratto. Viene quindi rifinito e carteggiato e poi può essere verniciato e montato.

2.4.4 Sistema integrato "Koridion 2.0": una nuova via alla formatura dei CFRP

L'anima Koridion è già, di per sé, in grado di risolvere molti dei problemi delle tecniche di produzione tradizionale, precedentemente evidenziati nel Paragrafo 2.2.4. Tuttavia, alcune questioni rimangono ancora irrisolte.

Nel caso in cui si vada ad utilizzare Koridion in associazione all'autoclave:

- non si risolve il problema dell'utilizzo di un sacco sottovuoto in cui chiudere il pezzo finale;
- la forma dello stampo in carbonio può modificarsi leggermente quando messo in autoclave;
- i cicli di cura del composito sono lunghi (diverse ore);
- non è possibile automatizzare il processo in quanto l'autoclave deve essere caricata e scaricata manualmente.

Nel caso in cui Koridion venga utilizzato nella formatura in pressa:

- non è possibile utilizzare sistemi resina a reticolazione veloce per lo scarso controllo dei tempi di riscaldamento e delle rampe di temperatura;
- difficoltà nel gestire il raffreddamento dello stampo.

L'idea è stata quindi quella di creare un nuovo macchinario che potesse unire i pregi di autoclave e pressa: è nato così il sistema integrato Koridion 2.0, un sistema equalizzatore di temperatura e pressione interna ed esterna al sistema sandwich, che garantisce anche il vuoto integrale su tutto il volume utile. Per maggiore praticità, d'ora in avanti questo macchinario verrà indicato con la sigla "K2.0". In Figura 24 e Figura 25 vengono mostrate due visuali differenti del macchinario, una a piastre chiuse, dove in mezzo vi è inserito uno stampo e una a piastre aperte, con il piano di lavoro libero.



Figura 24: Macchinario "K2.0", vista frontale con stampo in compressione

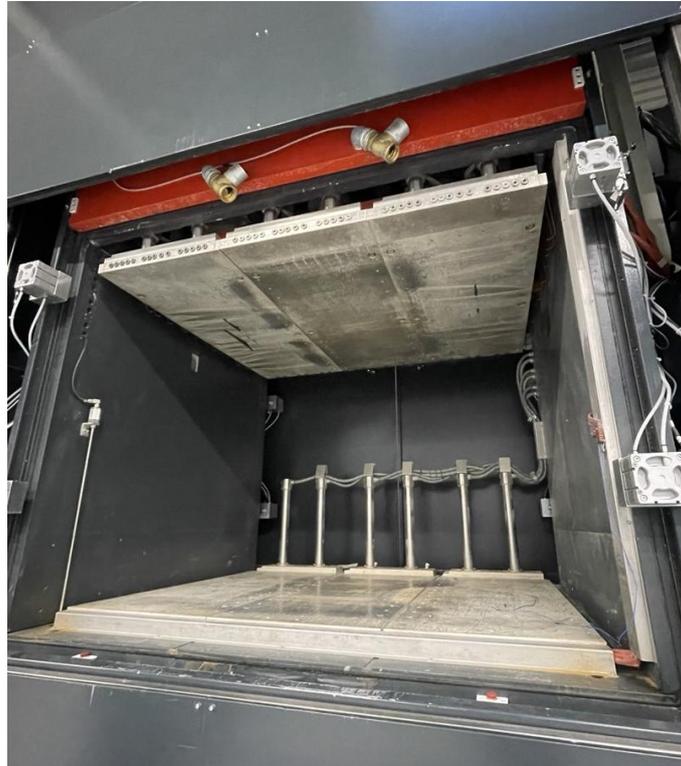


Figura 25: Macchinario "K2.0", dettaglio sul piano ad induzione della pressa

Questo macchinario presenta la possibilità di riscaldare lo stampo sia mediante resistenze, sia tramite un sistema di induttori elettromagnetici. Il riscaldamento ad induzione è una tecnica di riscaldamento innovativa che permette di sfruttare le correnti parassite che si vengono a generare all'interno di un materiale magnetico quando esso viene immerso all'interno di un campo magnetico variabile nel tempo. Queste correnti generate all'interno del materiale conduttore danno vita a delle perdite di tipo Joule, ovvero delle perdite di energia sotto forma di calore, che portano il materiale a riscaldarsi. Il vantaggio dell'induzione è che permette un controllo puntuale della temperatura dello stampo e un rilevante risparmio energetico. La temperatura viene controllata da remoto e segue perfettamente la temperatura di set-point (quella che viene impostata a monte).

Il sistema per il riscaldamento a induzione presenta due diverse modalità di funzionamento:

- modalità Shell-Tool: questa modalità prevede l'utilizzo di uno stampo realizzato in materiale ferromagnetico o paramagnetico che viene cablato, come mostrato in Figura 26. Nella cablatura viene fatta scorrere corrente alternata che dà origine ad un campo magnetico. Il campo magnetico permette allo stampo di riscaldarsi secondo il principio di induzione elettromagnetica illustrato in precedenza [19].



Figura 26: A sx, stampo con circuiti induttivi; a dx, distribuzione di temperatura sulle superfici delle due mezzerie dello stampo

- modalità Flat Induction Heater: questa modalità prevede l'utilizzo di un induttore combinato con una piastra metallica sulla quale viene appoggiato lo stampo, come da Figura 27. In questo caso lo stampo non è cablato e può essere realizzato anche in materiale amagnetico, come ad esempio l'alluminio o alcuni tipi di acciaio inossidabile [20] [21]. Questa modalità è particolarmente interessante perché permette di utilizzare, in alternativa agli stampi cablati, dei classici stampi da pressa (gli stessi che venivano utilizzati nel processo di formatura tradizionale in pressa).



Figura 27: Flat Induction Heater mode

Il riscaldamento ad induzione è molto efficiente: si stima infatti che sia possibile ridurre il dispendio energetico per il riscaldamento di un macchinario del 50%, ma si può arrivare fino all'80% in alcuni casi. Si ottengono tempi di riscaldamento inferiori fino all'80% rispetto ai classici metodi di riscaldamento con resistenze [22].

Ci sono quattro diverse modalità di raffreddamento del pezzo al termine della cura:

- a) doccia ad acqua;
- b) vasca di immersione contenente acqua;
- c) azoto liquido che fuoriesce da ugelli;
- d) circuiti di raffreddamento ad olio presenti sullo stampo.

Queste quattro modalità vengono scelte o meno in base alle dimensioni del pezzo e possono anche essere combinate tra loro. Finora la modalità più utilizzata è quella che prevede l'immersione totale del pezzo all'interno della vasca di raffreddamento. La vasca si trova al di sotto del piano inferiore della pressa ed è una vasca stagna; quindi, l'acqua che vi è all'interno viene riutilizzata un numero quasi infinito di volte. Questa tipologia di raffreddamento è molto efficiente e poco impattante sull'ambiente.

3. Caso studio: Life Cycle Assessment di Koridion e sistema integrato Koridion 2.0 rispetto al processo di formatura tradizionale

3.1 Obiettivo dell'analisi e confini del sistema

3.1.1 Obiettivo

L'obiettivo della seguente analisi LCA è quello di comparare tre diverse metodologie di produzione di materiale composito a matrice polimerica rinforzato con fibra di carbonio sotto il punto di vista dell'impatto ambientale. I metodi di produzione considerati sono tre e vengono riportati di seguito:

- Caso 1: formatura tradizionale in autoclave;
- Caso 2: formatura tradizionale in autoclave, associata all'utilizzo dell'anima Koridion;
- Caso 3: formatura tramite il sistema integrato "Koridion 2.0", che per convenienza chiameremo "K2.0", associata anch'essa all'impiego dell'anima Koridion.

La seguente analisi LCA è inserita in un contesto di ricerca industriale ed è volta a dimostrare come l'innovazione tecnologica apportata da Koridion, comporti drastici miglioramenti dei processi di produzione impiegati da Tier 1 e OEM, non solo dal punto di vista economico e prestazionale ma anche sul fronte della sostenibilità.

3.1.2 Unità funzionale

Come unità funzionale da analizzare è stato scelto per tutti e tre i casi un cofano d'auto di dimensioni 158x125x20 cm. L'anima utilizzata per questo specifico caso ha densità di 40 g/l.



Figura 28: Cofano d'auto in analisi: a sx, pezzo finito; a dx, anima Koridion

3.1.3 Confini del sistema

Le assunzioni fatte a priori sono state le seguenti:

- approccio cradle-to-gate: si è scelto di prendere in considerazione le fasi di approvvigionamento della materia prima, di trasporto fino al quartier generale di Alia Mentis e le fasi di trasformazione della materia prima fino a creare il prodotto finito. Le fasi di trasporto, utilizzo e fine vita del prodotto sono state escluse dall'analisi perché sarebbero state identiche in tutti e tre i casi e quindi non sarebbero state rilevanti al fine della comparazione tra i tre metodi di produzione indagati; inoltre sono fasi che avvengono dopo la commercializzazione del bene finito (nel nostro caso, dopo l'acquisto di un'automobile) e perciò non sono fasi rilevanti per il target dello studio, ovvero gli OEM e i Tier 1;
- esclusione dallo studio degli impatti associati ai consumi generali dello stabilimento come illuminazione e riscaldamento;
- esclusione della fase di verniciatura: la verniciatura sarebbe da considerare come uguale per tutti e tre i casi e quindi non apporta differenze tra i tre metodi; è inoltre una fase molto variabile a seconda del finish che si vuole ottenere (carbon-look o verniciatura coprente, matte o gloss); è altresì un'operazione che non viene svolta internamente all'azienda quindi sarebbe stato complesso reperire informazioni accurate a riguardo;
- esclusione dei tasselli e delle staffe: sono pezzi che servono al fissaggio meccanico, variano da costruttore a costruttore, ma non è detto che siano sempre presenti; anche se fossero state considerate, si sarebbe dovuto prendere un caso specifico e adottarlo per tutte e tre le tecniche di produzione; dunque, sono parti non sono rilevanti ai fini di quest'analisi;
- volume produttivo totale di 3000 unità³: supponendo di dover realizzare 3000 cofani, si potrà andare a distribuire in maniera omogenea sul numero di pezzi tutto l'impatto associato alla stampistica (lo vedremo meglio nel Paragrafo 3.2.6).
- produzione del cofano localizzata interamente in Italia;

³ Tremila pezzi è una buona stima del numero di auto prodotte per uno specifico modello nel contesto di vetture di lusso.

3.1.4 I tre processi a confronto

In Figura 29 vengono schematizzate le fasi principali dei tre diversi processi di produzione del cofano auto oggetto di studio.

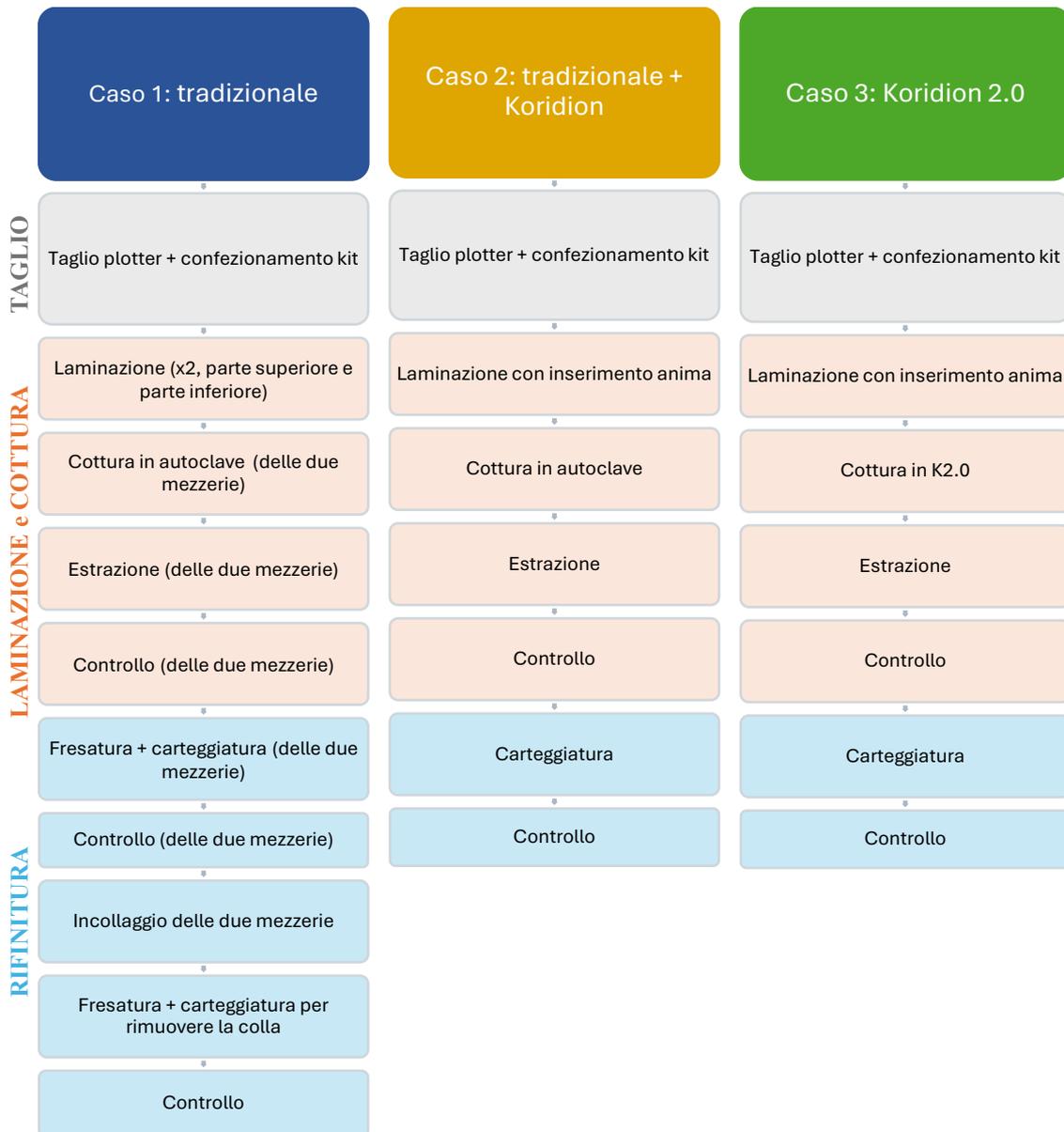


Figura 29: Schematizzazione dei tre processi di formatura del cofano d'auto in oggetto

Caso 1 – metodo di formatura tradizionale

Il metodo tradizionale (Caso 1) prevede la creazione di due mezzerie mediante l'utilizzo di due stampi aperti: una mezzeria sarà la metà superiore del cofano, mentre l'altra sarà la metà inferiore. Si parte dal taglio dei pre-preg di fibra di carbonio secondo le geometrie prestabilite. Successivamente le pelli vengono laminate all'interno dello stampo e vengono realizzate così la mezzeria superiore e quella inferiore. Successivamente si vanno a cuocere le due mezzerie in autoclave e a fine ciclo di cottura, si vanno ad estrarre e a controllare. La fase finale prevede di rifinire le due mezzerie, incollarle assieme per ottenere il cofano intero e andare a rifinire un'ultima volta per rimuovere la colla in eccesso.

Gli stampi utilizzati in questo caso sono due (uno per ogni mezzeria) e sono realizzati in CFRP a partire da uno stampo master fatto in lega di alluminio 7021⁴. Il modello CAD dello stampo master viene riportato in Figura 30 con le quotature della massima larghezza e la massima lunghezza.

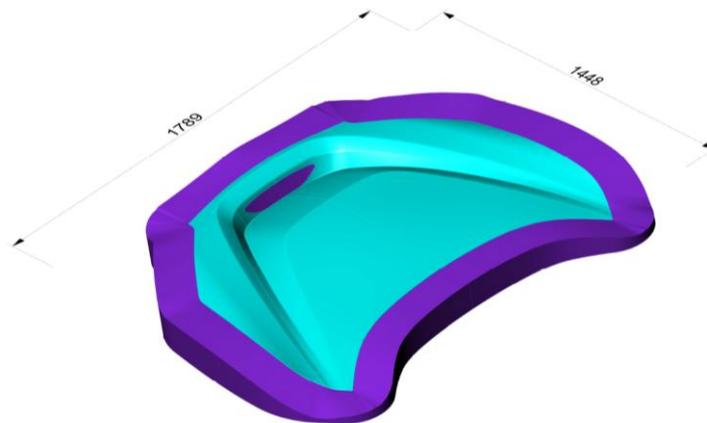


Figura 30: Modello CAD stampo master

In questo caso (Caso 1) è stato scelto il processo di formatura in autoclave e non quello in pressa in quanto quasi la totalità dei pezzi grandi, come ad esempio cofani, tetti o bracci, vengono realizzati in autoclave. Il motivo è che i pezzi grandi hanno una resa ottimale solo se vengono curati in autoclave.

Caso 2 – metodo di formatura tradizionale + Koridion

Il Caso 2 è simile al Caso 1, ma non prevede la realizzazione in due stampi separati della metà inferiore e della metà superiore del cofano, bensì prevede la creazione di un pezzo monolitico che contiene al suo interno un'anima realizzata in materiale Koridion. L'anima viene realizzata mediante l'utilizzo di uno stampo apposito, realizzato in lega di alluminio 5083. Invece, lo stampo per il composito è, come nel caso precedente, uno stampo in CFRP che viene laminato a partire

⁴ Si utilizza uno stampo master quando bisogna realizzare uno stampo in CFRP perché c'è bisogno di avere una geometria da seguire per poter dare la forma richiesta ai fogli di pre-preg.

da uno stampo master in lega di alluminio 7021. Si riporta in Figura 31 il modello dello stampo in CFRP una volta chiuso, quindi con le due metà sovrapposte.

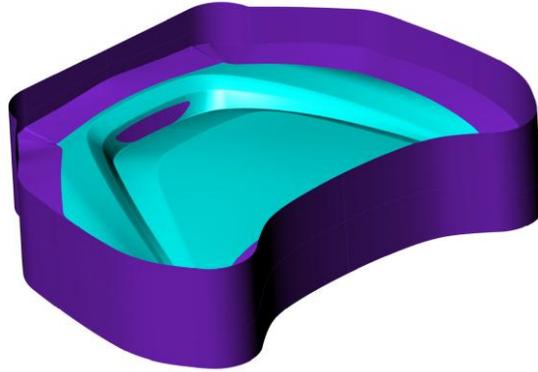


Figura 31: Modello CAD stampo cofano per autoclave, da chiuso

Questo caso (Caso 2) è stato definito con lo scopo di evidenziare solamente le modifiche che conseguono dall'impiego delle anime Koridion e perciò non è stato modificato il metodo di cura del composito, l'autoclave.

Caso 3 – metodo di formatura innovativo + Koridion

Il Caso 3, invece, rappresenta l'evoluzione del secondo caso verso una maggiore efficienza produttiva: comporta quindi l'utilizzo di un macchinario differente per effettuare il processo di cura. La K2.0, come spiegato in precedenza, è una particolare pressa che viene riscaldata mediante un sistema ad induzione e lavora in vuoto. Lo stampo che viene utilizzato in questo caso è uno stampo adatto ad una pressa e presenta perciò alcuni volumi aggiuntivi che sono necessari per poter distribuire equamente la forza su tutto il pezzo. Anche in questo caso viene inserita all'interno del CFRP un'anima polimerica realizzata con Koridion. Lo stampo è realizzato in lega di alluminio 7021 e non prevede l'utilizzo di master, ma viene fresato direttamente da blocco. Il modello CAD di questo stampo viene riportato in Figura 32 con i massimi ingombri.

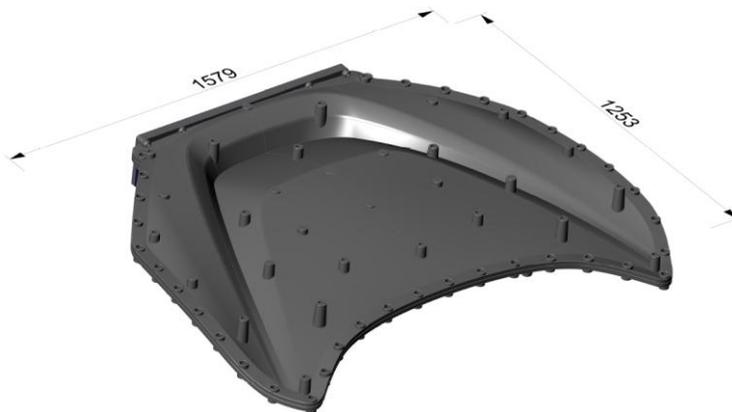


Figura 32: Modello CAD stampo per K2.0

3.2 Life Cycle Inventory

La fase di Life Cycle Inventory prevede di andare a realizzare un inventario completo di tutti i materiali e i flussi energetici che entrano in gioco nel processo produttivo in analisi. È inoltre importante andare a considerare gli output dei processi, che possono essere gli sfridi di lavorazione, i materiali ausiliari che vengono buttati a fine processo o anche le percentuali di pezzi scartati ai controlli qualità. La raccolta dati è stata effettuata presso l'azienda Alia Mentis durante i mesi di ottobre, novembre e dicembre 2024. Ad inizio gennaio 2025, sono stati raccolti anche i dati relativi agli stampi utilizzati per i tre differenti processi produttivi. In generale, la fase di inventario è stata la fase più lunga di tutta l'analisi.

3.2.1 Inventario materiali

Il processo seguito per effettuare l'inventario dei materiali è il seguente:

1. Identificazione dei materiali per il Caso 1 a partire dalla distinta base fornita;
2. Cut-off per materiali di massa inferiore all'1% sul totale;
3. Misurazione o ricerca delle densità dei materiali;
4. Conversione delle quantità note in kilogrammi grazie alle densità;
5. Identificazione materiali per il Caso 2 a partire da quelli del Caso 1;
6. Misurazione delle quantità di materiali necessarie (già in kilogrammi);
7. Identificazione dei materiali per il Caso 3 a partire da quelli del Caso 1;
8. Misurazione delle quantità di materiali necessarie (già in kilogrammi);

Nei tre sottoparagrafi sottostanti, vediamo con maggiore dettaglio i passaggi svolti. Sono stati distinti i tre processi di formatura del materiale composito per maggiore chiarezza.

Caso 1 – metodo di formatura tradizionale

Si è partiti da una distinta base di un cofano realizzato secondo il processo di formatura tradizionale. All'interno della distinta base sono elencati tutti i materiali necessari a realizzare un singolo cofano e le relative quantità. I materiali totali per questo primo caso erano 26 e vengono riportati in Tabella 2.

Tabella 2: Inventario Materiali in Input - Caso 1

<i>Identificazione gestionale</i>	<i>Materiale</i>
<i>CARBON P.PREG 200 47%</i>	Fibra di carbonio pre-impregnata
<i>VETRO P.PREG 600 EGLASS 32%</i>	Fibra di vetro pre-impregnata
<i>CARBON P.PREG 245 TWILL 45%</i>	Fibra di carbonio pre-impregnata
<i>TESSUTO PEEL PLY 60GSM H1520MM</i>	Nylon
<i>TESSUTO VETRO 17GR/MQ E GLASS</i>	Fibra di vetro
<i>ETICH.2PS 50X30H POLIESTERE B.CO</i>	Poliestere
<i>ETICH.2PS 36X20H POLIES. B.CO 5000 PZ</i>	Poliestere
<i>TUBOLARE LD-120 H.1000 RIGENERATO</i>	Polietilene rigenerato
<i>TESSUTO ASSORB. POLY-FLEX 120G/MQ</i>	Poliestere
<i>SACCO A VUOTO 50MY 60"H150CM 200M</i>	Nylon
<i>NASTRO SIGILLANTE 12MMX3MMX15M</i>	Gomma sintetica
<i>FILM DIST.30MY H150CM FORATO</i>	Polietilene
<i>FILM DISTACCANTE A2500</i>	Polietilene
<i>TESSUTO PEEL PLY 85 G/MQ</i>	Nylon
<i>SILICONE SR-INTENSIFLEX BIANCO</i>	Silicone
<i>GOMMA VULC.PRESSURE STRIP</i>	Gomma sintetica
<i>NASTRO ADESIVO FLASH TAPE</i>	Nastro adesivo
<i>DISTACCANTE XTEND 832 3,66 LT=2,6K</i>	Resina siliconica
<i>SEALER XTEND XTR 3,617 LT</i>	Resina poliuretanic
<i>DISTACCANTE MOLD WIZ UFC-L/NA (3KG)</i>	Resina siliconica
<i>PROFILO A VETRO PE ESP.25/35</i>	Polietilene espanso
<i>DISCO ABRASIVO COMBIDISC CD</i>	Disco abrasivo
<i>DISCO ABRASIVO CD</i>	Disco abrasivo
<i>COLLA DP620NS BLACK 3M 400ML</i>	Adesivo poliuretanic
<i>COLLA 3M 08694 310ML</i>	Colla poliuretanic
<i>TONDO GOMMA SOCAPRENE D.10MMNERO</i>	Gomma sintetica

A questo punto è stato operato un primo cut-off, ovvero sono stati esclusi dai successivi step e anche dal calcolo finale degli impatti, alcuni materiali perché erano stati utilizzati in quantità talmente basse, da renderli irrilevanti. Sono stati dunque eliminati 8 materiali e ne sono rimasti 18. In Tabella 3 vengono riportate le materie prime in input a seguito di cut-off:

Tabella 3: Inventario Materiali in Input - Caso 1 dopo cut-off

<i>Identificazione gestionale</i>	<i>Materiale</i>
<i>CARBON P.PREG 200 47%</i>	Fibra di carbonio pre-impregnata
<i>VETRO P.PREG 600 EGLASS 32%</i>	Fibra di vetro pre-impregnata
<i>CARBON P.PREG 245 TWILL 45%</i>	Fibra di carbonio pre-impregnata
<i>TESSUTO PEEL PLY 60GSM H1520MM</i>	Nylon
<i>TESSUTO VETRO 17GR/MQ 20103A E GLASS</i>	Fibra di vetro
<i>TESSUTO ASSORB. POLY-FLEX 120G/MQ</i>	Poliestere
<i>SACCO A VUOTO 50MY 60"H150CM 200M</i>	Nylon
<i>NASTRO SIGILLANTE 12MMX3MMX15M</i>	Gomma sintetica
<i>FILM DIST.30MY H150CM FORATO</i>	Polietilene
<i>FILM DISTACCANTE A2500</i>	Polietilene
<i>TESSUTO PEEL PLY 85 G/MQ</i>	Nylon
<i>SILICONE SR-INTENSIFLEX BIANCO</i>	Silicone
<i>GOMMA VULC.PRESSURE STRIP</i>	Gomma sintetica
<i>DISTACCANTE XTEND 832 3,66 LT=2,6K</i>	Resina siliconica
<i>SEALER XTEND XTR 3,617 LT</i>	Resina poliuretanic
<i>DISTACCANTE MOLD WIZ UFC-L/NA (3KG)</i>	Resina siliconica
<i>COLLA DP620NS BLACK 3M 400ML</i>	Adesivo poliuretanic
<i>COLLA 3M 08694 310ML</i>	Colla poliuretanic

Dato che i database che si sarebbero dovuti utilizzare nella parte di LCIA riportavano gli impatti ambientali di una determinata sostanza per kilogrammo di sostanza, è stato necessario andare a ricavare le densità di questi 18 materiali, così da poter operare una conversione dalle unità di misura riportate nella distinta base (che spesso erano unità di volume o di area) ad unità di misura di massa. Per quanto riguarda i tessuti pre-preg, è stato necessario pesare un quadrato 30 cm x 30 cm; una volta nota la sua massa e la sua area, è stata ricavata una densità espressa in kg/m². La densità superficiale è stata quindi moltiplicata per l'estensione nota (riportata nella distinta in termini di m²) e si sono così ottenuti i kg di tessuto pre-preg. In questo modo si è tenuto conto sia della fibra sia della resina impregnante. Non sarebbe stato possibile, infatti, lavorare solo con la grammatura del tessuto perché sarebbe stata omessa completamente la massa della resina del pre-preg. Un analogo procedimento di pesata e conversione attraverso la densità superficiale è stato seguito anche per tutti i consumabili, ovvero quei materiali ausiliari necessari per la laminazione del CFRP. Tra essi figurano il sacco per il vuoto, il tessuto aeratore, i tessuti distaccanti e il tessuto peel-ply. Per quanto riguarda il nastro sigillante, invece, è stato pesato ed è stata ricavata una densità lineare. Per quanto riguarda il resto dei materiali, è stato necessario reperire la densità all'interno delle schede tecniche del materiale o anche cercare in letteratura. Questo vale per il silicone, la pressure-strip, i sealer e i distaccanti per lo stampo e la colla. Le densità delle materie prime vengono riportate in Tabella 4.

Tabella 4: Densità Materiali

Identificazione Gestionale	Materiale	Densità	Udm
<i>CARBON P.PREG 200 47%</i>	Fibra di carbonio	0,3770	kg/m ²
<i>VETRO P.PREG 600 EGLASS 32%</i>	Fibra di vetro	1,0780	kg/m ²
<i>CARBON P.PREG 245 TWILL 45%</i>	Fibra di carbonio	0,5220	kg/m ²
<i>TESSUTO PEEL PLY 60GSM H1520MM</i>	Nylon	0,0600	kg/m ²
<i>TESSUTO VETRO 17GR/MQ 20103A E GLASS</i>	Fibra di vetro	0,0170	kg/m ²
<i>ETICH.2PS 50X30H POLIESTERE B.CO</i>	Poliestere	cut-off	
<i>ETICH.2PS 36X20H POLIES. B.CO 5000 PZ</i>	Poliestere	cut-off	
<i>TUBOLARE LD-120 H.1000 RIGENERATO</i>	Polietilene rigenerato	cut-off	
<i>TESSUTO ASSORB. POLY-FLEX 120G/MQ</i>	Poliestere	0,1200	kg/m ²
<i>SACCO A VUOTO 50MY 60"H150CM 200M</i>	Nylon	0,0596	kg/m ²
<i>NASTRO SIGILLANTE 12MMX3MMX15M</i>	Gomma sintetica	0,0340	kg/m
<i>FILM DIST.30MY H150CM FORATO</i>	Polietilene	0,0275	kg/m ²
<i>FILM DISTACCANTE A2500</i>	Polietilene	0,0275	kg/m ²
<i>TESSUTO PEEL PLY 85 G/MQ</i>	Nylon	0,0821	kg/m ²
<i>SILICONE SR-INTENSIFLEX BIANCO</i>	Silicone	0,0010	kg
<i>GOMMA VULC.PRESSURE STRIP</i>	Gomma sintetica	2025,6158	kg/m ³
<i>NASTRO ADESIVO FLASH TAPE</i>	Nastro adesivo	cut-off	
<i>DISTACCANTE XTEND 832 3,66 LT=2,6K</i>	Resina siliconica	0,7200	kg/l
<i>SEALER XTEND XTR 3,617 LT</i>	Resina poliuretana	0,7500	kg/l
<i>DISTACCANTE MOLD WIZ UFC-L/NA (3KG)</i>	Resina siliconica	0,7740	kg/l
<i>PROFILO A VETRO PE ESP.25/35</i>	Polietilene espanso	cut-off	
<i>DISCO ABRASIVO COMBIDISC CD</i>	Disco abrasivo	cut-off	
<i>DISCO ABRASIVO CD</i>	Disco abrasivo	cut-off	
<i>COLLA DP620NS BLACK 3M 400ML</i>	Adesivo poliuretano	1,0540	kg/l
<i>COLLA 3M 08694 310ML</i>	Colla poliuretana	1,1740	kg/l
<i>BECCUCCIO MIXER PER COLLA 3M</i>		cut-off	
<i>TONDO GOMMA SOCAPRENE D.10MMNERO</i>	Gomma sintetica	cut-off	

A questo punto è stato possibile convertire tutte le quantità in kilogrammi.

Caso 2 – Metodo di formatura tradizionale + Koridion

Nel Caso 2, ovvero quello che prevede la formatura in autoclave e l'utilizzo dell'anima Koridion, sono state apportate due modifiche sostanziali rispetto al caso precedente.

La prima modifica riguarda le fasi del processo produttivo: chiaramente, tutte le fasi che nel Caso 1 venivano svolte due volte (una volta per ogni mezzera) sono state ridotte ad un'unica fase perché grazie all'anima Koridion è possibile ottenere un pezzo monolitico fin dallo step di laminazione. Le fasi interessate da questa modifica sono state le fasi di laminazione, estrazione, controllo, fresatura e carteggiatura. La fase di incollaggio, invece, è stata completamente eliminata grazie all'anima Koridion. Queste modifiche hanno ridotto le materie prime necessarie

per realizzare il composito da 18 a 12, come vedremo in Tabella 5. Nel Caso 2, infatti, non vengono utilizzati il film distaccante A2500, il tessuto peel-ply, il silicone, la pressure-strip di gomma e le due tipologie di colla.

La seconda modifica rispetto al Caso 1 riguarda il consumo di materia prima: come anticipato nel Capitolo 2, l'utilizzo di Koridion permette di risparmiare fino al 30% di pre-preg, grazie alla riduzione delle quantità di strati di carbonio necessari per ottenere il pezzo finito e di ridurre ingentemente l'uso di consumabili; per questo motivo è stato possibile andare a considerare degli input di materia prima ridotti rispetto al Caso 1. Nello specifico, sono state prese come input le seguenti quantità:

- il 70% dei tessuti pre-preg di fibra di carbonio e di fibra di vetro rispetto al Caso 1;
- il 20% rispetto alle quantità del Caso 1 per il tessuto assorbente e il distaccante perché questi materiali vengono riutilizzati 5 volte per effettuare più prevuoti;
- il 120% di nastro sigillante e sacco a vuoto rispetto al Caso 1 perché questi materiali vengono impiegati per 1 cottura in autoclave e 5 prevuoti;

Inoltre, sia in questo caso che nel prossimo, vi è l'inserimento dell'anima Koridion. I materiali utilizzati per fabbricare l'anima non possono essere condivisi per segreto aziendale. Per questo motivo, tutti i dati relativi alle quantità di materia prima necessaria a realizzare una singola anima e, di conseguenza, anche i dati di impatto dei diversi componenti, verranno riportati come valore cumulativo all'interno della voce "anima". Nel caso del cofano, l'anima pesa 1,5 kg.

Caso 3 – Metodo innovativo di formatura + Koridion

Nel Caso 3, ovvero quello che sfrutta l'anima Koridion e la cottura in "K2.0" riscaldata tramite induzione, sono state effettuate piccole modifiche rispetto al Caso 2. Le modifiche non riguardano le fasi di processo, che sono le stesse del Caso 2. I consumabili variano di poco: il nastro sigillante e il sacco sono stati divisi per cinque rispetto al Caso 1 perché mediante l'utilizzo della pressa non è più necessario il sacco finale, ma si conteggiano solo i consumabili richiesti per i prevuoti.

L'anima, come nel caso precedente ha un peso totale di 1,5 kg.

Le quantità (in kilogrammi) di materiale necessario a realizzare il composito vengono riportate in Tabella 5. Si distingue tra i tre diversi processi di formatura.

Tabella 5: Materiali in Input per Composito

<i>Identificazione gestionale</i>	CASO 1	CASO 2	CASO 3
	Quantità (kg)		
<i>CARBON P.PREG 200 47%</i>	1,827	1,279	1,279
<i>VETRO P.PREG 600 EGLASS 32%</i>	0,019	0,019	0,019
<i>CARBON P.PREG 200 47%</i>	1,877	1,314	1,314
<i>CARBON P.PREG 245 TWILL 45%</i>	1,830	1,281	1,281
<i>TESSUTO VETRO 17GR/MQ E GLASS</i>	0,033	0,033	0,033
<i>TESSUTO ASSORB. POLY-FLEX 120G/MQ</i>	0,492	0,043	0,043
<i>SACCO A VUOTO 50MY 60"HI 50CM 200M</i>	0,947	0,479	0,080
<i>NASTRO SIGILLANTE 12MMX3MMX15M</i>	1,081	0,649	0,108
<i>FILM DIST.30MY HI50CM FORATO</i>	0,028	0,003	0,003
<i>FILM DISTACCANTE A2500</i>	0,151		
<i>TESSUTO PEEL PLY 85 G/MQ</i>	0,091		
<i>SILICONE SR-INTENSIFLEX BIANCO</i>	0,001		
<i>GOMMA VULC.PRESSURE STRIP</i>	0,054		
<i>DISTACCANTE XTEND 832 3,66 LT=2,6K</i>	0,036	0,072	0,072
<i>SEALER XTEND XTR 3,617 LT</i>	0,038	0,075	0,075
<i>DISTACCANTE MOLD WIZ UFC-L/NA (3KG)</i>	0,030	0,060	0,060
<i>COLLA DP620NS BLACK 3M 400ML</i>	0,153		
<i>COLLA 3M 08694 310ML</i>	0,018		

3.2.2 Sfridi di materiale e scrap-rate

A questo punto, è stato necessario andare a definire quali fossero le quantità di materiale scartato sia in termini di sfridi, sia al controllo qualità.

Per quanto riguarda gli sfridi, si è osservato che gli unici sfridi rilevanti erano quelli ottenuti durante la fase di taglio e sono stati quantificati come un 6% di sfrido per i tessuti non estetici (CARBON P.PREG 200 e VETRO P.PREG), mentre un 20% di sfrido per il tessuto estetico (CARBON P.PREG 245 TWILL).

Successivamente, ci si è occupati degli scrap-rate, ovvero della percentuale di pezzi scartati ad ogni quality gate. Come prima cosa, sono stati identificati i quality gate (QG) dei tre processi di formatura: un primo QG dopo la fase di estrazione del pezzo a seguito della cottura (per tutti e tre i casi), un secondo QG dopo la fase di fresatura (solo per Caso 1) e un terzo QG dopo la carteggiatura (per tutti e tre i processi). Nel Caso 1 è stato definito uno scrap-rate del 4% per ognuna delle fasi sopraelencate. Nel Caso 2 e Caso 3 è stato definito uno scrap-rate del 4% per la fase di controllo post-cottura e dell'1,5% nella fase di carteggiatura. È importante notare che gli scrap-rate delle fasi di rifinitura sono diversi tra il metodo tradizionale e gli altri due metodi di formatura. Nel Caso 1, infatti, si ha una percentuale di scarto superiore perché la fase di incollaggio ha un'alta probabilità di cattiva riuscita, mentre nei casi 2 e 3 non c'è lo step di incollaggio e basta una rifinitura più rapida: quindi, è più difficile commettere errori in questa fase.

Gli scrap-rate sono stati tenuti in considerazione ragionando in maniera ritrosiva: se alla fine voglio ottenere una certa quantità, allora prima del QG devo avere una certa percentuale aggiuntiva di materiale secondo la formula:

$$\text{Quantità da produrre} = \frac{\text{Quantità desiderata}}{1 - \text{scarto}}$$

Vediamo ora nel dettaglio le conversioni che sono state operate per i diversi metodi di formatura del composito.

Caso 1 – metodo tradizionale

Come abbiamo visto, in questo caso erano presenti 3 QG, ognuno con scrap-rate del 4%. Dunque, per ottenere 1 cofano, prima dell'ultimo QG è necessario processare il seguente numero di pezzi:

$$x = \frac{1}{1 - 0,04} = 1,0417$$

Per avere 1,0417 pezzi da processare prima dell'ultimo QG, bisogna avere prima del penultimo QG il seguente numero di pezzi:

$$x = \frac{1,0417}{1 - 0,04} = 1,0851$$

Per avere 1,0851 pezzi da processare prima dell'penultimo QG, è necessario avere il seguente numero di pezzi prima del primo QG:

$$x = \frac{1,0851}{1 - 0,04} = 1,1303$$

Quindi, per il Caso 1, le quantità in input sono state modificate nella seguente maniera:

- le materie prime usate prima dell'ultimo QG sono state divise per 0,96;
- le materie prime usate prima del penultimo QG sono state divise per 0,9216 (che è $0,96*0,96$);
- le materie prime usate prima del primo QG sono state divise per 0,8847 (che è $0,96*0,96*0,96$);

Caso 2 e 3 – metodi di formatura con anima Koridion

Questi casi, prevedevano un primo QG con un 4% di scrap-rate e un secondo QG con un 1,5% di scrap-rate. Il ragionamento è stato analogo a quello del precedente caso e, non essendo presenti materie prime utilizzate solamente prima dell'ultimo QG, ha portato a dividere per 0,9456 (cioè $0,985*0,96$) tutte le materie prime le materie prime sottoposte ad entrambi i QG;

In sono elencate le quantità relative alle materie prime della parte di materiale composito, comprensive di surplus dovuto allo scarto.

Tabella 6: Materiali in Input per Composito con surplus

<i>Identificazione gestionale</i>	CASO 1	CASO 2	CASO 3
	Quantità (kg)		
<i>CARBON P.PREG 200 47%</i>	2,065	1,209	1,209
<i>VETRO P.PREG 600 EGLASS 32%</i>	0,022	0,018	0,018
<i>CARBON P.PREG 200 47%</i>	2,122	1,242	1,242
<i>CARBON P.PREG 245 TWILL 45%</i>	2,069	1,211	1,211
<i>TESSUTO VETRO 17GR/MQ E GLASS</i>	0,037	0,031	0,031
<i>TESSUTO ASSORB. POLY-FLEX 120G/MQ</i>	0,556	0,046	0,046
<i>SACCO A VUOTO 50MY 60"HI 50CM 200M</i>	1,070	0,507	0,084
<i>NASTRO SIGILLANTE 12MMX3MMX15M</i>	1,222	0,686	0,114
<i>FILM DIST.30MY HI 50CM FORATO</i>	0,032	0,003	0,003
<i>FILM DISTACCANTE A2500</i>	0,170		
<i>TESSUTO PEEL PLY 85 G/MQ</i>	0,103		
<i>SILICONE SR-INTENSIFLEX BIANCO</i>	0,002		
<i>GOMMA VULC.PRESSURE STRIP</i>	0,122		
<i>DISTACCANTE XTEND 832 3,66 LT=2,6K</i>	0,041	0,076	0,076
<i>SEALER XTEND XTR 3,617 LT</i>	0,042	0,079	0,079
<i>DISTACCANTE MOLD WIZ UFC-L/NA (3KG)</i>	0,034	0,063	0,063
<i>COLLA DP620NS BLACK 3M 400ML</i>	0,160		
<i>COLLA 3M 08694 310ML</i>	0,019		

Anima

Lo scrap-rate dell'anima è stato stimato pari all'1%. Di conseguenza, la massa di 1,5 kg relativa ad un singolo cofano è stata divisa per 0,99, ottenendo così 1,515 kg. In questo modo si tiene conto che per ottenere un certo numero di anime, se ne devono fabbricare di più.

3.2.3 Fornitori e trasporti

Per realizzare un'analisi LCA completa, è necessario avere informazioni circa la provenienza delle materie prime utilizzate nel processo in analisi. Perciò, una parte dell'inventario, è stata dedicata al reperimento di informazioni riguardo i fornitori di Alia Mentis e la loro geolocalizzazione nel mondo. Chiaramente, non ci è permesso rivelare i fornitori per questioni di privacy. È possibile però affermare che sono tutti italiani e che le spedizioni ad Alia Mentis avvengono mediante mezzi di trasporto su ruote.

3.2.4 Destino materiali

Un aspetto molto importante dell'analisi LCA riguarda il destino dei materiali. L'approccio cradle-to-gate permette di trascurare il fine vita dell'oggetto finale (il cofano) ma non permette di trascurare il destino degli sfridi di lavorazione e dei materiali ausiliari alla produzione.

Come già detto in precedenza, gli unici sfridi della lavorazione sono gli sfridi di pre-preg ottenuti nella fase di taglio. I pre-preg di carbonio vengono ritirati da una ditta competente e destinati a recupero energetico.

Per quanto riguarda i consumabili, si ha che il tessuto assorbente viene destinato a recupero energetico, mentre i film distaccanti, il sacco e il nastro sigillante vengono inviati a riciclo, in quanto materie plastiche.

3.2.5 Energia

Un aspetto rilevante per l'analisi di impatto ambientale è lo studio dei consumi energetici relativi ai processi studiati. Nello specifico, è necessario andare a quantificare l'energia elettrica utilizzata, in termini di kWh ed eventualmente quantificare altri vettori energetici presenti. Nel caso studio in oggetto, era presente anche una quota di aria compressa necessaria a far funzionare la fresa manuale utilizzata durante la rifinitura del pezzo finale.

Il consumo di energia relativo ad uno specifico macchinario è stato ricavato moltiplicando la potenza nominale (in kW) per il tempo di funzionamento (in ore). I macchinari che sono stati considerati sono i seguenti: dosatore, mixer e pressa per la realizzazione dell'anima; plotter per il taglio dei pre-preg, autoclave o K2.0 per la cottura del composito e frese per la rifinitura.

Visti gli scrap-rate descritti in precedenza, i consumi di energia sono stati aumentati come descritto di seguito.

Caso 1:

- 12% aggiuntivo per i consumi relativi al taglio e alla cottura;
- 8% aggiuntivo per i consumi relativi alla rifinitura;

Casi 2 e 3:

- 1% aggiuntivo per i consumi di energia relativi all'anima;
- 5,5% aggiuntivo per i consumi relativi al taglio e alla cottura;
- 1,5% aggiuntivo per i consumi relativi alla rifinitura;

Si riportano in Tabella 7 i consumi energetici, distinguendo tra i tre processi di formatura.

Tabella 7: Energia in Input con surplus

	<i>Identificazione gestionale</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Quantità</i>	<i>UdM</i>	<i>Fase</i>
<i>CASO 1</i>	PLOTTER	Elettricità	2,36	kWh	Taglio
	AUTOCLAVE	Elettricità	254,31	kWh	Laminazione
	FRESA CNC	Elettricità	15,09	kWh	Fresatura
	FRESA MANUALE	Aria compressa	68,36	L	Carteggiatura
<i>CASO 2</i>	PLOTTER	Elettricità	1,57	kWh	Taglio
	AUTOCLAVE	Elettricità	118,97	kWh	Laminazione
	FRESA MANUALE	Aria compressa	58,46	l	Carteggiatura
	DOSATORE	Elettricità	1,01	kWh	Anima
	MIXER	Elettricità	1,18	kWh	Anima
	PRESSA	Elettricità	28,54	kWh	Anima
<i>CASO 3</i>	PLOTTER	Elettricità	1,57	kWh	Taglio
	K2.0 CON INDUZIONE	Elettricità	17,06	kWh	Laminazione
	FRESA MANUALE	Aria compressa	58,46	l	Carteggiatura
	DOSATORE	Elettricità	1,01	kWh	Anima
	MIXER	Elettricità	1,18	kWh	Anima
	PRESSA	Elettricità	28,54	kWh	Anima

È necessario notare che nei Casi 2 e 3, il consumo energetico associato al taglio plotter è ridotto rispetto al Caso 1 perché è stata tagliata una quantità inferiore di materiale. Inoltre, l'energia richiesta dall'autoclave nel Caso 2 è la metà di quella del Caso 1 perché nel Caso 1 all'interno di un'autoclave ci stanno le due mezzerie, mentre nel Caso 2 ci stanno due pezzi monolitici (ma a noi interessa un solo pezzo e quindi in questo caso devo considerare la metà dell'energia richiesta per un ciclo di autoclave). Per quanto riguarda la cottura nel Caso 3, abbiamo una quota di energia inferiore perché il macchinario K2.0 è meno energivora rispetto all'autoclave. La fresatura e la carteggiatura sono fatte, nel Caso 1, con due tipologie differenti di frese, una a controllo numerico che richiede dell'energia elettrica e una manuale che funziona ad aria compressa. Per i casi 2 e 3 è necessaria solo la fresa manuale ad aria compressa e il tempo richiesto è inferiore quindi il volume di aria compressa necessaria è inferiore rispetto al Caso 1. Gli input energetici associati all'anima Koridion sono presenti solo nei casi 2 e 3.

3.2.7 Stampi

Gli stampi sono stati trattati in maniera a sé stante rispetto ai materiali e all'energia relativi alla parte in carbonio e all'anima, in quanto richiedono particolari ragionamenti che vengono presentati a seguire.

Identificazione stampi richiesti per ogni caso e materiali

Come prima cosa, è stato fondamentale capire quali stampi sono necessari per realizzare ognuno dei tre diversi processi di formatura. Per quanto riguarda il Caso 1, si è visto che era necessario solo uno stampo (due mezzerie) in CFRP per la formatura del composito. Questo stampo però richiede intrinsecamente uno stampo master in lega di alluminio per poter essere realizzato. Lo stesso discorso vale anche per il Caso 2, al quale però si va ad aggiungere uno stampo per l'anima, sempre fatto in lega di alluminio. Nel Caso 3, invece, non viene utilizzato uno stampo in CFRP per la formatura del composito, bensì in lega di alluminio e perciò non è richiesto lo stampo master. Rimane necessario lo stampo per l'anima.

Identificazione quantità di materiale

Dopodiché, è stato studiato quanto materiale è necessario per realizzare ognuno dei suddetti stampi. Per quanto riguarda gli stampi in lega di alluminio, si parte da un blocco e lo si lavora per asportazione di truciolo con una fresa a controllo numerico computerizzato (CNC). Il blocco ha la forma di un parallelepipedo e le sue dimensioni corrispondono alle massime dimensioni di lunghezza, larghezza e altezza dello stampo che si vuole realizzare, aumentate di una decina di centimetri per lato. Si ricava quindi il volume del blocco di partenza e lo si moltiplica per la densità della lega ($2,85 \text{ g/cm}^3$ per 7021 e $2,66 \text{ g/cm}^3$ per 5083) per ottenere la massa totale di materiale necessario a realizzare quello stampo. Bisogna notare che operando in questo modo, si va a tenere conto anche del materiale che verrà rimosso durante la fresatura del blocco; questo è fondamentale per l'analisi LCA perché, per poter stimare l'impatto associato alla realizzazione di uno stampo, non basta sapere la quantità di materiale che costituisce lo stampo, ma bisogna anche tenere conto del materiale scartato. Per quanto riguarda gli stampi in CFRP, è bastato andare a moltiplicare la quantità in metri quadri di pre-preg per la densità del tessuto stesso (ricavata mediante la pesata di un quadrato di tessuto di dimensioni note). Sono stati così ottenuti i kilogrammi di pre-preg richiesti per realizzare uno stampo. Gli sfridi di lavorazione sono trascurabili in questo caso perché il tessuto viene tagliato in quadrati a partire da una bobina (la striscia di tessuto è di forma rettangolare). I consumabili invece sono stati ritenuti trascurabili per i motivi che vedremo successivamente quando analizzeremo la quota di materiale per stampi normalizzata sulla produzione di un singolo cofano.

In Tabella 8 si riportano i materiali in input relativi agli stampi. Si distingue, come fatto in precedenza, tra i tre processi di formatura del composito (Caso 1, Caso 2 e Caso 3).

Tabella 8: Materiali in Input per Stampi

	<i>Identificazione gestionale</i>	<i>Materiale</i>	<i>Quantità</i>	<i>UdM</i>
<i>CASO 1</i>	master stampo per composito	lega alluminio 7021	3078	kg
	stampo per composito	pre-preg carbonio 200, 40% resina epossidica	10,65	kg
		pre-preg carbonio 1000, 36% resina epossidica	82,28	kg
	consumabili		trascurabili	
<i>CASO 2</i>	stampo anima	lega alluminio 5083	2071	kg
	master stampo per composito	lega alluminio 7021	3078	kg
	stampo per composito	pre-preg carbonio 200, 40% resina epossidica	10,65	kg
		pre-preg carbonio 1000, 36% resina epossidica	82,28	kg
	consumabili		trascurabili	
<i>CASO 3</i>	stampo anima	lega alluminio 5083	2071	kg
	stampo composito induzione	lega alluminio 7021	2071	kg
	cavi per induzione		86,80	kg

Scrap-rate e normalizzazione dei materiali in input sul numero di pezzi prodotti

A questo punto, è stato necessario ragionare circa l'impatto di uno stampo rispetto all'unità funzionale. Infatti, avendo scelto come unità funzionale un singolo cofano auto, non era possibile pensare di associare uno o più stampi alla produzione di un singolo cofano perché altrimenti l'impatto ambientale dello stampo sarebbe stato molto più rilevante rispetto all'impatto dell'oggetto in sé. Dunque, è stato necessario andare a pensare agli stampi come un qualcosa di riutilizzabile un certo numero di volte e in questo modo l'impatto è stato suddiviso tra i pezzi prodotti con quello stampo. All'inizio si era pensato di considerare la vita utile dello stampo, ma ben presto ci si è resi conto che spesso, per produzioni limitate e stampi in materiale metallico, lo stampo viene usato un numero di volte inferiori alla sua vita utile (che per gli stampi metallici potrebbe essere di decine o centinaia di migliaia di pezzi). Allora si è ragionato nella seguente maniera: è stato definito un numero di pezzi da produrre, cioè 3000 pezzi nel caso di questo studio perché si sta parlando di auto di lusso a serie limitata ed è stato stabilito che uno stampo metallico durante la sua vita viene utilizzato per produrre solo quel dato numero di pezzi e non di più. Per gli stampi fatti di CFRP, invece, la vita utile è di 120 stampate e quindi sono necessari più stampi in CFRP per realizzare i 3000 pezzi desiderati.

Lo scrap-rate gioca, nel caso degli stampi, un ruolo di estrema rilevanza. Infatti, il numero di pezzi da realizzare per ottenere 3000 pezzi buoni è di 3391 pezzi per il processo tradizionale e di 3173 pezzi per i processi Koridion e Koridion 2.0. Dunque, il numero di stampi in CFRP che devono essere realizzati varia in base al processo di formatura prescelto (perché è dipendente dal numero di pezzi). Per quanto riguarda l'anima, è necessario fabbricare 3030 anime per ottenerne 3000 di utilizzabili.

In Tabella 9 vengono elencate le quantità totali di stampi che bisogna realizzare per ognuna delle metodologie di produzione del composito, al fine di realizzare 3000 pezzi buoni.

Tabella 9: Elenco Stampi

	<i>Tipologia stampo</i>	<i>Quantità</i>
CASO 1	master stampo per composito	1
	stampo per composito in CFRP	29
CASO 2	stampo anima	1
	master stampo per composito	1
	stampo per composito in CFRP	27
CASO 3	stampo anima	1
	stampo per composito in lega di alluminio per induzione	1

È stato dunque ricavato un fattore che permettesse di spalmare la quantità di materiale ed energia necessarie a realizzare uno stampo sul numero di pezzi prodotti. Per fare ciò è stata utilizzata la seguente formula:

$$\text{Fattore di conversione} = \frac{n^{\circ} \text{ stampi necessari}}{n^{\circ} \text{ di pezzi}}$$

I fattori di conversione, distinti tra il caso tradizionale (Caso 1) e i casi innovativi Koridion (Caso 2) e Koridion 2.0 (Caso 3), vengono riportati in Tabella 10.

Tabella 10: Fattori di distribuzione degli impatti sul numero di pezzi prodotti

	<i>n stampi/pezzo con scrap-rate</i> <i>CASO 1</i>	<i>n stampi/pezzo con scrap-rate</i> <i>CASI 2 e 3</i>
stampo anima		0,0003300
master stampo per composito	0,0002949	0,0003152
stampo per composito in CFRP	0,0085520	0,0085093
stampo per composito in alluminio (induzione)	0,0002949	0,0003152
stampo per composito in invar (induzione)	0,0002949	0,0003152

Questi fattori sono stati moltiplicati per le quantità di materiale riportate in Tabella 8 e si sono ottenute le quantità mostrate in Tabella 11.

Tabella 11: Materiali in Input per Stampi mediati sul numero di pezzi prodotti

	Identificazione gestionale	Materiale	Quantità	UdM
<i>CASO 1</i>	master stampo per composito	lega alluminio 7021	0,908	kg
	stampo per composito	pre-preg carbonio 200, 40% resina epossidica	0,091	kg
		pre-preg carbonio 1000, 36% resina epossidica	0,704	kg
	consumabili		trascurabili	
<i>CASO 2</i>	stampo anima	lega alluminio 5083	0,683	kg
	master stampo per composito	lega alluminio 7021	0,970	kg
	stampo per composito	pre-preg carbonio 200, 40% resina epossidica	0,091	kg
		pre-preg carbonio 1000, 36% resina epossidica	0,700	kg
	consumabili		trascurabili	
<i>CASO 3</i>	stampo anima	lega alluminio 5083	0,683	kg
	stampo composito induzione	lega alluminio 7021	0,653	kg
	cavi per induzione		0,027	kg

A questo punto, è d'obbligo sottolineare che i consumabili sono stati trascurati perché le quantità già basse per il singolo stampo (Tabella 8), sono state moltiplicate per il fattore di conversione relativo allo stampo in CFRP e sono state ottenute delle quantità di consumabile estremamente basse. Questo conferma che i consumabili usati per realizzare lo stampo in CFRP siano irrilevanti rispetto all'unità funzionale.

Materiali in output

Gli scarti di materiale sono relativi solamente ai trucioli di lega di alluminio provenienti dal processo di fresatura CNC. Nello specifico, per il Caso 1 si ha uno scarto di 1788 kg sui 3078 kg del blocco di partenza per lo stampo master. Si ottiene così uno stampo che pesa 1290 kg. Per il Caso 2, abbiamo due stampi interessati da scarti: il master in lega 7021 e lo stampo per anime in lega 5083. Lo stampo per anime pesa 692 kg e il blocco di partenza pesa 2071 kg: lo scarto è dunque di 1379 kg. Lo stampo master, invece, pesa 1290 kg e il blocco di partenza pesa 3078 kg: in questo caso, lo scarto di materiale ammonta a 1788 kg. Per il Caso 3, abbiamo sia lo stampo per anime (analogo al caso precedente) sia lo stampo per il composito, questa volta realizzato in lega di alluminio 7021, che possiede una massa di 118 kg (escludendo il cablaggio per il riscaldamento ad induzione). La quota di materiale scartato in questo caso è di 1953 kg su 2071 kg del blocco di partenza. Chiaramente, anche nel conteggio delle quantità di materiale in output,

si è moltiplicato per i fattori di conversione, così da ottenere una quota di materiale da stampo scartata per ogni cofano prodotto (vedi Tabella 12).

Tabella 12: Materiali in Output per Stampi

<i>Identificazione gestionale</i>	CASO 1	CASO 2	CASO 3
	Quantità (kg)		
stampo anima		0,455	0,455
master stampo per composito	0,527	0,564	
stampo per composito			0,616

Energia in input

Per le quantità di energia è stato seguito lo stesso procedimento: sono stati moltiplicati i consumi relativi alla produzione di un singolo stampo per i fattori di conversione relativi allo specifico stampo che si stava considerando. Sono stati così ottenuti i consumi di energia elettrica riferiti all'unità funzionale (si veda la Tabella 13).

Tabella 13: Energia per Stampi con surplus

	<i>Identificazione gestionale</i>	<i>Macchinario</i>	<i>Quantità</i>	<i>UdM</i>
<i>CASO 1</i>	master stampo per composito	CNC	1,961	kWh
	stampo per composito in CFRP	Autoclave cura	0,299	kWh
	stampo per composito in CFRP	Autoclave post-cura	0,556	kWh
	stampo per composito in CFRP	Plotter	0,026	kWh
<i>CASO 2</i>	stampo anima	CNC	2,195	kWh
	master stampo per composito	CNC	2,096	kWh
	stampo per composito in CFRP	Autoclave cura	0,298	kWh
	stampo per composito in CFRP	Autoclave post-cura	0,553	kWh
<i>CASO 3</i>	stampo per composito in CFRP	Plotter	0,026	kWh
	stampo anima	CNC	2,195	kWh
	stampo per composito in lega di alluminio	CNC	2,096	kWh

3.2.8 Stampi 3D-printed

In aggiunta alle valutazioni riguardanti gli stampi attualmente utilizzati a livello industriale, si è voluto studiare e valutare l'impatto di un'ulteriore tecnica di produzione degli stampi: il 3D printing, che verrà presto implementata all'interno di Alia Mentis.

L'idea è partita dal voler sostituire le leghe di alluminio con un materiale che presenti una minore dilatazione al riscaldamento per ovviare ai problemi di distorsione del pezzo dovuta alla dilatazione dello stampo. Tra i materiali possibili, è stato scelto l'Invar, una lega nickel-ferro (36% nickel e 64% ferro) che presenta un CTE di circa $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [23]. Questo CTE è compatibile con quello delle fibre di carbonio ed è di ordine di grandezza inferiore rispetto al CTE della lega di alluminio 7021. Sarebbe dunque essere un'ottima scelta per la realizzazione di stampi adatti alla formatura di materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio. Tuttavia, l'Invar è un materiale molto costoso: il prezzo medio è di 50€/kg, mentre quello della lega 7021 è di circa un decimo, cioè 5€/kg. Per questo motivo una lavorazione per asportazione di truciolo sull'Invar è impensabile perché genererebbe un'ingente perdita di materiale e non risulterebbe conveniente. Per evitare questi sprechi si è pensato di realizzare gli stampi in Invar mediante una tecnica di 3D printing: la tecnica prescelta è la Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), una particolare tecnica di Direct Energy Deposition (DED) che consente di fondere localmente un filo di materiale metallico grazie all'energia generata da un arco elettrico. In questo modo si va a depositare del metallo strato per strato per creare un oggetto tridimensionale, come mostrato in Figura 33.

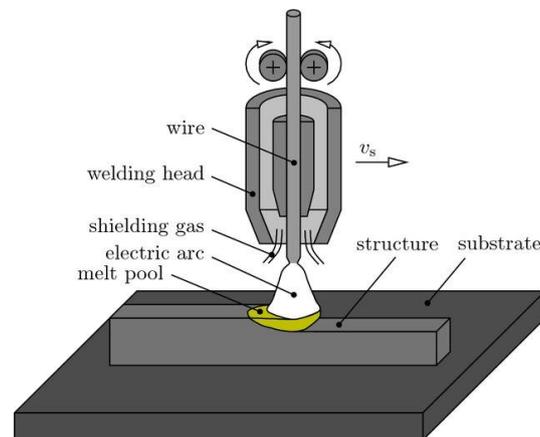


Figura 33: Funzionamento processo WAAM [24]

Si è scelta questa particolare tecnologia di 3D printing perché permette di andare a realizzare oggetti di grandi dimensioni in tempi relativamente brevi, ovvero con alte velocità di deposizione; per pezzi molto grandi e con finitura superficiale non elevatissima, vi è un risparmio in termini di costo rispetto ad altre tecnologie di stampa 3D, come ad esempio la Laser Powder Bed Fusion (LPBF) [25].

Una volta scelta la tecnologia di fabbricazione dello stampo, è stato studiato il suo funzionamento, al fine di ottenere informazioni riguardo il consumo energetico, il tempo di deposizione e il consumo di gas schermanti. Da una ricerca in bibliografia [26], è stato possibile stabilire che una deposizione WAAM tipica presenta le seguenti caratteristiche:

- tasso di deposizione di 2 kg/h;
- consumo energetico: 2,46 kWh per kg di materiale depositato;
- consumo di gas: 12 l/min;

Il gas utilizzato è generalmente una miscela di argon al 98% con il 2% di CO₂.

È stato quindi definito un caso studio aggiuntivo rispetto ai tre visti fino ad ora: è stato chiamato Caso 4 ed è sostanzialmente identico al Caso 3 tranne che per lo stampo adibito alla formatura del composito, che adesso viene realizzato con tecnica WAAM. Quindi è sempre presente l'anima Koridion e la metodologia di cottura rimane la macchina K2.0.

Andiamo ora a dettagliare i materiali in input e in output per questo caso e anche i consumi energetici. Dato che i dati per la parte di materiale composito sono uguali al Caso 3, andiamo a dettagliare solo i dati relativi agli stampi (vedere Tabella 14).

Tabella 14: Inventario Stampo in Invar realizzato con WAAM

Input (materiali)				
Identificazione gestionale	Quantità	Quantità/UF	UdM	Commenti
stampo anima in lega di alluminio 7021	2071	0,6835	kg	
stampo composito induzione in Invar	233,31	0,0735	kg	
cavi per induzione	86,80	0,0274	Kg	
Input (energia)				
Descrizione	Quantità	Quantità/UF	UdM	Commenti
CNC	6650	2,1947	kWh	stampo anima
WAAM	573,94	0,1809	kWh	stampo composito
gas (miscela argon 98% e CO ₂ 2%)	83991	26,4740	l	stampo composito
Output				
Descrizione	Quantità	Quantità/UF	UdM	Commenti
lega di alluminio 7021	1379	0,4551	kg	stampo anima
Massa totale stampo anima	692	0,2284	kg	
Massa totale stampo composito induzione in Invar	233,31	0,0735	kg	

3.3 Life Cycle Impact Assessment

La fase di calcolo degli impatti è stata svolta presso Studio Fieschi & Soci, nella sede di Venezia ed ha richiesto all'incirca un mese, a partire da metà gennaio 2025. Il software utilizzato per l'analisi è SimaPro e il database a cui si è fatto riferimento è Ecoinvent nella sua ultima versione, la 3.11.

Il Life Cycle Impact Assessment, è una fase in cui si vanno a riorganizzare i dati raccolti durante la fase di inventario e si va ad associare ad ogni input e output un impatto ambientale mediante l'utilizzo di una serie di indicatori. Il metodo scelto per condurre questa fase di calcolo degli impatti è l'Environmental Footprint 3.1 (EF 3.1). Questo metodo è stato sviluppato dalla Commissione Europea nell'ambito del progetto PEF (Product Environmental Footprint) ed è un metodo che si sposa bene con la norma UNI EN 15804: 2019 "*Sostenibilità delle costruzioni – Dichiarazioni ambientali di prodotto – Regole quadro di sviluppo per categoria di prodotto*", una normativa che stabilisce le regole PCR (Product Category Rules) atte a condurre uno studio di impatto ambientale relativo a prodotti da costruzione. Dato che al giorno d'oggi non esiste una normativa PCR specifica per i materiali compositi rinforzati con fibra di carbonio, l'assimilazione ad un prodotto da costruzione è parsa adeguata. Inoltre, il metodo EF prevede la possibilità di realizzare un'EPD (Environmental Product Declaration) e questa è una possibilità che Alia Mentis non esclude di poter realizzare in un futuro [27].

La fase di LCIA ha previsto un primo step di modellazione seguito da una fase di calcolo degli impatti. Nella fase di modellazione sono stati scelti o creati dataset che rappresentassero i processi, i flussi e le attività del ciclo di vita del cofano. I dataset utilizzabili erano di due tipi: dataset production, che rappresentano la produzione di un bene relativa ad una certa area geografica, oppure dataset market, rappresentano una media di consumo di un bene e comprendono anche i trasporti dal luogo di produzione al mercato. Per questo studio sono stati tendenzialmente utilizzati dataset production e i trasporti sono stati modellati a parte. Durante la fase di calcolo degli impatti, sono state utilizzate tre funzioni di SimaPro: "Analyse", che permette di ottenere gli impatti relativi ad un determinato dataset, "Compare", che permette di comparare gli impatti di due dataset e "Network", che permette di rappresentare mediante un diagramma ad albero i contributi dei diversi dati sull'impatto totale.

3.3.1 Modellazione

La fase di modellazione sul software SimaPro ha seguito il seguente flusso logico:

1. modellazione di dataset relativi ai materiali: prima si è cercato tra quelli già disponibili su database Ecoinvent; ove non presenti, sono stati creati sulla base di dati raccolti in letteratura;
2. aggregazione dei dataset relativi ai materiali per formare dataset relativi ad una specifica fase del processo produttivo (es. fase di taglio, fase di laminazione e cottura, fase di fresatura);
3. modifica dei dataset creati per conteggiare anche gli scarti di materiale;
4. creazione di un dataset relativo all'anima;

5. creazione di dataset per gli stampi, comprendenti sia i materiali che il processo di produzione;
6. creazione di dataset per il fine vita degli stampi;
7. modellazione dei trasporti lungo tutta la catena di fornitura;
8. modellazione del mix energetico specifico del fornitore di energia di Alia Mentis.

Vediamo nel dettaglio questi passaggi.

Modellazione dataset materiali

Come prima cosa è stato necessario andare a modellare tutti i materiali utilizzati per la realizzazione del composito. Si è partiti dalla fibra di carbonio: questo materiale non era presente nel database Ecoinvent e perciò è stato modellato utilizzando dei dati di tipo secondario reperiti in letteratura. Da [28] è stato estrapolato l'inventario per la creazione delle fibre di carbonio, mentre da [29] sono stati presi i consumi energetici. In Figura 34 si riporta il dataset relativo alla fibra di carbonio non impregnata.

Outputs to technosphere: Products and co-products							
Amount	Unit	Quantity	Allocation %				
1	kg	Mass	100 %				
Add line							
Outputs to technosphere: Avoided products							
Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment	
Add line							
Inputs							
Inputs from nature							
Amount	Unit	Comment					
Add line							
Inputs from technosphere: materials/fuels							
Amount	Unit						
0,02	kg						
0,01	kg						
1,89	kg						
0,01	kg						
0,1	kg						
0,02	kg						
2,77	kg						
Add line							
Inputs from technosphere: electricity/heat							
Amount	Unit	Distribution	SD2	Min	M	Comment	
33,4	kWh	Undefined					
370,2	MJ	Undefined					
Add line							
Outputs							
Emissions to air							
Subcomp.	Amount	Unit	Distribution	SD	I.	Max	Comment
	0,63	kg	Undefined				
	0,33	kg	Undefined				
	0,66	kg	Undefined				
Add line							
Emissions to water							
Subcomp.	Amou.	Unit	Comment				
Add line							

Figura 34: Dataset Fibra di Carbonio

Successivamente si è andati a costruire un dataset per ognuno dei tessuti pre-preg. All'interno sono confluiti sia il dataset della fibra di carbonio sia quello della resina impregnante. Ai due dataset relativi alle materie prime del pre-preg è stata attribuita una quantità (in termini di massa) in base alla percentuale di impregnazione del tessuto e conoscendo i kilogrammi di pre-preg consumati. In aggiunta, è stata inserita la quantità di energia necessaria a tessere e impregnare il tessuto, come visibile in Figura 35.

Outputs to technosphere: Products and co-products				Amount	Unit	Quantity	Allocation %			
\$ Carbon Fibre PREPREG 200				1	kg	Mass	100 %			
Add line										
Outputs to technosphere: Avoided products				Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add line										
Inputs										
Inputs from nature				Amount	Unit	Comment				
Add line										
Inputs from technosphere: materials/fuels				Amount	Unit					
\$ Carbon Fibre NO Prepreg				0,53	kg					
\$ Epoxy resin, liquid (RoW) market for epoxy resin, liquid Cut-off, U				0,47	kg					
Add line										
Inputs from technosphere: electricity/heat				Amount	Unit	Distribution	SD2	Min	M	Comment
Electricity, medium voltage (GLO) market group for electricity, medium voltage Cut-off, I				44,1	MJ	Undefined				
Add line										

Figura 35: Dataset Carbon Pre-preg 200

Analogamente è stato modellato il tessuto pre-preg in fibra di vetro. Successivamente è stato modellato anche il tessuto vetro (non impregnato).

Creazione dataset delle fasi di processo

I dataset sopracitati sono stati fatti confluire all'interno di un dataset chiamato "Produzione materie prime".

Poi sono stati creati altri tre dataset contenenti input di materiali e/o input energetici per le fasi di taglio, laminazione e cottura e fresatura. Nello specifico, nella fase di taglio è stata quantificata l'energia richiesta dal plotter per tagliare tutti i pre-preg, nella fase di laminazione e cottura sono stati inseriti tutti i consumabili e i materiali ausiliari e anche la quota di energia spesa in autoclave o in K2.0, nella fase di fresatura sono state inserite le quantità di colla solo per il caso tradizionale e gli input di energia elettrica e aria compressa per l'azionamento delle frese.

Conteggio scarti di materiale

Lo scarto relativo alla materia prima è stato aggiunto all'interno del dataset della fase corrispondente. Il dato è stato aggiunto come input (vedi Figura 36) e tiene conto delle risorse associate alla fase di preparazione del rifiuto allo smaltimento. Siccome tutti gli scarti che riguardano il materiale composito e la sua formatura sono sottoposti a recupero energetico, allora è stata considerata solo l'operazione di sorting del materiale. In questo modo, non si considera l'impatto dell'incenerimento dato che da esso ne ricavo dell'energia utilizzabile per altri scopi.

Outputs to technosphere: Products and co-products						Amount	Unit	Quantity	Allocation %	W		
§ 3 - LAMINAZIONE + COTTURA + ESTRAZIONE + CONTROLLO QUALITA'						1	p	Amount	100 %			
Add line												
Outputs to technosphere: Avoided products						Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add line												
Inputs												
Inputs from nature						Amount	Unit	[S E I A Comment				
Add line												
Inputs from technosphere: materials/fuels						Amount	Unit					
§ Nylon 6, Plastic Film (RER)						0,4515+0,6186+0,0649+0,0380+0,0661 = 1,24	kg					
§ Textile, nonwoven polyester (RoW) textile production, nonwoven polyester, needle-punched Cut-off, U						0,2441	kg					
Polyethylene, low density, granulate (RER) polyethylene production, low density, granulate Cut-off, U						0,0159+0,0852+0,0159+0,0852+0,3120 = 0,514	kg					
Synthetic rubber (RER) synthetic rubber production Cut-off, U						0,0609+0,0609 = 0,122	kg					
Polyester resin, unsaturated (RER) polyester resin production, unsaturated Cut-off, U						0,0339	kg					
Silicone product (RER) silicone product production Cut-off, U						0,0011+0,0011 = 0,0022	kg					
Chemical, inorganic (GLO) chemical production, inorganic Cut-off, U						0,0407+0,0424 = 0,0831	kg					
§ Nastro adesivo						0,611+0,611 = 1,22	kg					
Waste polyethylene, for recycling, sorted (Europe without Switzerland) treatment of waste polyethylene, for recycling, unsorted, sorting Cut-off, U						3,2773+0,004 = 3,28	kg					
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 (RER) transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 Cut-off, U						847+182 = 1,03E3	kgkm					
Transport, freight, sea, container ship (GLO) transport, freight, sea, container ship Cut-off, U						626	kgkm					
Add line												
Inputs from technosphere: electricity/heat						Amount	Unit	Distribution	SD2	Min	M	Comment
Electricity, medium voltage (IT) market for electricity, medium voltage Cut-off, U						254,313	kWh	Undefined				
Add line												

Figura 36: Dataset Fase Laminazione e Cottura

Modellazione dataset anima

Il dataset relativo all'anima è stato composto sommando i dataset degli elementi che la costituiscono. È stato possibile in questa istanza confrontare il dato relativo alla carbon footprint di Koridion calcolata su SimaPro con dati di carbon footprint forniti dall'azienda produttrice e si è osservato che i dati erano pressoché analoghi. Questo ci ha permesso di confermare la bontà della nostra analisi per quanto concerne l'anima.

Modellazione dataset stampi

Sono quindi stati modellati gli stampi relativi ad ognuno dei tre processi di formatura. I dataset sono stati chiamati "Stampo Tradizionale", "Stampo Tradizionale+Koridion", "Stampo Koridion 2.0" e "Stampo Koridion 2.0 – 3D". All'interno di uno specifico dataset stampo sono stati racchiusi tutti gli input relativi a tutti gli stampi utilizzati con quello specifico processo (per evitare fraintendimenti, sarebbe stato più opportuno chiamare questi dataset "Stampi" e non "Stampo"). Ad esempio, nel dataset "Stampo Koridion 2.0", è stato inserito sia lo stampo in lega di alluminio 7021 per la cottura del composito, sia lo stampo in lega di alluminio 5083 per l'anima. Come prima cosa, è stato necessario creare dei dataset per la materia prima (leghe di alluminio), in quanto non presenti nel database Ecoinvent. Per fare ciò, è stata considerata la composizione della lega (come input di materia prima), una quota di energia per la fusione e una quota di energia relativa alle lavorazioni che vengono fatte sulla lega per ottenere il blocco da fresare. Nello specifico, la composizione della lega 7021 è stata ricavata da [30], mentre quella della lega 5083 è stata presa da [31]. In Figura 37 vengono mostrati tutti gli elementi presenti all'interno della lega 7021 e le relative quantità.

Outputs to technosphere: Products and co-products						Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Wa		
§ Aluminium alloy 7021 (, AlMg3 [RoW]) aluminium alloy production, AlMg3 Cut-off, U						1,0	kg	Mass	100 %	Nc		
Add line												
Outputs to technosphere. Avoided products						Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add line												
Inputs												
Inputs from nature						Amount	Unit	Comment				
Add line												
Inputs from technosphere: materials/fuels						Amount	Unit					
Aluminium, cast alloy [GLO] market for aluminium, cast alloy Cut-off, U						0,928803	kg					
Silicon, metallurgical grade [GLO] market for silicon, metallurgical grade Cut-off, U						0,00046	kg					
Cast iron [GLO] market for cast iron Cut-off, U						0,0013	kg					
Copper, cathode [GLO] market for copper, cathode Cut-off, U						0,00004	kg					
Manganese [GLO] market for manganese Cut-off, U						0,000097	kg					
Magnesium [GLO] market for magnesium Cut-off, U						0,0128	kg					
Chromium [GLO] market for chromium Cut-off, U						0,00002	kg					
Zinc [GLO] market for zinc Cut-off, U						0,0561	kg					
Titanium [GLO] market for titanium Cut-off, U						0,00038	kg					
Add line												
Inputs from technosphere: electricity/heat						Amount	Unit	Distribution	SD2	Min	M	Comment
Electricity, medium voltage [AU] market for electricity, medium voltage Cut-off, U						0,040352213	kWh	Lognormal	1,6:			(4,2,5,5,1,na) Literature disaggregated
Electricity, medium voltage [NZ] market for electricity, medium voltage Cut-off, U						0,008076451	kWh	Lognormal	1,6:			(4,2,5,5,1,na) Literature disaggregated
Electricity, medium voltage [RAF] market group for electricity, medium voltage Cut-off, U						0,042568874	kWh	Lognormal	1,6:			(4,2,5,5,1,na) Literature disaggregated

Figura 37: Dataset Lega 7021- materia prima

Le lavorazioni fatte sulla lega di prima fusione sono state modellizzate mediante un dataset già presente nel database Ecoinvent denominato “metal working” che conteneva in input una quota di energia elettrica per la lavorazione del metallo. In aggiunta, si è andati a modificare il dataset della lega andando ad aggiungere una quota di materiale in input extra, in modo da tenere conto degli scarti derivanti dal metal working. Come visibile in Figura 38, per la lega 7021 si hanno due voci all'interno del dataset: 1,2 kg di materia prima, 1 kg di materiale sottoposto a metal working.

Outputs to technosphere: Products and co-products						Amount	Unit	Quantity	Allocation %	Wa		
§ Al 7021 (RER)						1	kg	Mass	100 %	Nc		
Add line												
Outputs to technosphere. Avoided products						Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add line												
Inputs												
Inputs from nature						Amount	Unit	Comment				
Add line												
Inputs from technosphere: materials/fuels						Amount	Unit					
§ Aluminium alloy 7021 (, AlMg3 [RoW]) aluminium alloy production, AlMg3 Cut-off, U						1,227	kg					
§ Metal working, average for aluminium product manufacturing [RER] metal working, average for aluminium product manufacturing Cut-off, U						1	kg					
Add line												
Inputs from technosphere: electricity/heat						Amount	Unit	Distribution	SD2	Min	M	Comment
Add line												

Figura 38: Dataset Lega 7021 - completo

Successivamente, sono state inserite tra gli input del dataset dello stampo considerato, le quantità di lega 7021 e/o lega 5083 che formavano il blocco di partenza, eventualmente la massa dei cavi per l'induzione ed è stata aggiunta anche una quota di materiale scartato che viene riciclato. Infatti, quando un materiale non ha come fine vita la discarica o la termovalorizzazione, ma il riciclo, l'approccio metodologico prescelto (in accordo con le norme ISO 14040-44 ed EN 15048) impone che non si vada a metterlo tra gli output, bensì tra gli input. Dunque, per la quota di materiale che viene riciclata, si considera solo l'impatto derivante dall'operazione di riciclo e non l'impatto imposto dall'estrazione della materia prima. Si noti che, in fase di riciclo, SimaPro non consente di andare a dettagliare quale specifica lega di alluminio è interessata ma consente semplicemente di stabilire una macrocategoria, come ad esempio acciaio, alluminio, plastica, etc. Ricapitolando un dataset stampo contiene la materia prima in input, l'energia necessaria alla realizzazione dello stampo (autoclave per stampi in CFRP e fresatura CNC per stampi in metallo) e gli scarti di lavorazione che vengono sempre conteggiati tra gli input. È importante anche citare che, non conoscendo con sicurezza il primo fornitore di leghe di alluminio (molto probabilmente non italiano), è stata fatta una pesatura grazie alle stime provenienti dall'International Aluminium Institute [32]. Queste mostravano le tonnellate di materiale prodotto per Paese nell'anno 2024. Si è osservato che la Cina è il maggiore produttore globale di alluminio, seguita dalla regione del Sud-est asiatico. In base a questi dati è stato modificato il mix energetico per la produzione di energia elettrica e di conseguenza sono variate anche le emissioni totali riferite alla produzione di un kilogrammo di lega di alluminio. A titolo di esempio, si riporta di seguito il dataset dello stampo Koridion 2.0 (Figura 39).

Outputs to technosphere: Products and co-products				Amount	Unit	Quantity	Allocation %	W.		
§ Stampo Koridion 2.0				1	p	Amount	100 %			
Add line										
Outputs to technosphere: Avoided products				Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment
Add line										
Inputs										
Inputs from nature			Amount	Unit	E	SE	I	N	Comment	
Add line										
Inputs from technosphere: materials/fuels				Amount	Unit					
§ Al 5083 (RER)				0,68349835	kg					
§ Al 7021 (RER)				0,6527792	kg					
§ Aluminium scrap, post-consumer, prepared for melting (RER) treatment of aluminium scrap, post-consumer, by collecting, sorting, cleaning, pressing Cut-off				1,070701112	kg					
Cable, three-conductor cable (GLO) cable production, three-conductor cable Cut-off, U				0,02735936/1,04 = 0,0263	m					
Add line										
Inputs from technosphere: electricity/heat			Amount	Unit	Distribution	SD2	Min	M	Comment	
§ Re-Power Mix 2023 - Electricity, medium voltage (IT) market for electricity, medium voltage			4,290799472	kWh	Undefined					
Add line										

Figura 39: Dataset Stampo Koridion 2.0

Modellazione dataset fine vita stampi

Per quanto riguarda il fine vita dello stampo, sono stati creati altri quattro dataset, ognuno relativo ad uno specifico processo di produzione degli stampi. Per gli stampi in metallo il fine vita è il riciclo: per questo motivo, si va ad aggiungere al dataset solo l'impatto dato dalla preparazione al riciclo (sorting, cleaning e pressing) e non si considera la fase di rifusione. Per gli stampi in CFRP, i quali vengono sottoposti a recupero energetico, il ragionamento è analogo: si considerano solo gli impatti derivanti dalla fase di preparazione all'incenerimento (sorting). Le quantità di materiale da smaltire sono pari al peso dello stampo.

Modellazione trasporti

Il penultimo passaggio operato in questa fase è stato la modellazione dei trasporti. Per fare ciò è bastato inserire all'interno dei dataset dei materiali già esistenti (sia quelli del composito, sia quelli dell'anima) un dataset denominato "Transport" già presente nel database Ecoinvent che permette di quantificare le emissioni derivanti dal trasporto. Per la precisione, sono stati utilizzati due dataset differenti: uno per il trasporto con camion e uno per il trasporto con nave. Si veda la Figura 36, dove sono impiegate entrambe le tipologie di trasporto.

Modellazione mix energetico

Da ultimo, è stato modellato il mix energetico dell'azienda che fornisce l'energia elettrica ad Alia Mentis, in modo da ottenere una migliore stima dell'impatto relativo all'utilizzo di energia elettrica. Il dataset ottenuto è stato quindi utilizzato per sostituire tutte le entrate dei dataset precedentemente creati, in cui compariva una generica energia elettrica. In Figura 40 è riportato il mix considerato.

Fonti primarie utilizzate	per contratto
Fonti rinnovabili	7,02%
Carbone	18,96%
Gas naturale	62,32%
Prodotti petroliferi	1,66%
Nucleare	2,99%
Altre fonti	7,05%

Figura 40: Mix energetico per contratti di fornitura da fonti non rinnovabili relativo all'anno 2023 [33]

3.3.2 Calcolo degli impatti

Gli indicatori selezionati per questo studio sono gli indicatori “core” di tipo mid-point suggeriti dalla norma EN 15804. Sono indicatori ottimali per la realizzazione di uno studio LCA, il quale abbia una futura possibilità di trasformarsi in un’EPD. In totale sono 8 e li riportiamo in Tabella 15, corredati di unità di misura.

Tabella 15: Categorie di impatto EN 15804

Impact Category	Unit
GWP-Total	kg CO ₂ eq
- GWP-Fossil	kg CO ₂ eq
- GWP-biogenic	kg CO ₂ eq
- GWP-LULUC	kg CO ₂ eq
Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC11 eq
Acidification potential (AP)	mol H ⁺ eq
Eutrophication, freshwater (EP-fw)	kg P eq
Eutrophication, marine (EP-marine)	kg N eq
Eutrophication, terrestrial (EP-terr.)	mol N eq
Photochemical ozone formation (POCP)	kg NMVOC eq
Abiotic depletion, minerals&metal (ADPE)	kg Sb eq
Abiotic depletion, fossil (ADPF)	MJ
Water (use) deprivation potential (WDP)	m ³ depriv.

Il global warming potential (GWP) da un’indicazione sul periodo di attività in atmosfera di un gas ad effetto serra. In particolare, è possibile distinguere tra tre diverse sottocategorie di GWP: il GWP-fossile; il GWP-biogenico e il GWP-LULUC. Il primo riguarda le emissioni derivanti dalla combustione di fonti fossili, come ad esempio la benzina o il petrolio. L’indicatore “GWP-biogenico” considera la CO₂ assorbita dall’atmosfera durante la crescita della biomassa e trattenuta nel materiale per tutta la sua vita utile e anche le emissioni rilasciate nell’aria a seguito della combustione o del decadimento della biomassa. Il GWP-LULUC riguarda le emissioni di gas a effetto serra che si verificano in relazione all’utilizzo del suolo.

Il potenziale di riduzione dell’ozono (ODP) indica quanto alcuni radicali di gas alogeni vadano a distruggere lo strato di ozono presente in atmosfera, il ricopre un ruolo fondamentale nella regolazione delle radiazioni solari.

Il potenziale di acidificazione (AP), invece, quantifica quanto una determinata specie chimica possa rendere più acidi il suolo e le acque, danneggiando così l’ecosistema che ne è interessato. Di conseguenza, la possibilità di avere vita in un determinato luogo è minore, anche a causa della carenza di nutrienti come potassio e calcio, i quali vengono disciolti da sostanze acide (come le piogge acide).

Il potenziale di eutrofizzazione (EP) riguarda l'aumento di produzione vegetale dovuto all'apporto di sostanze nutritive (provenienti ad esempio da fertilizzanti). Un eccesso di alghe nei fondali marini va a ridurre la quantità di ossigeno all'interno dell'acqua e porta ad una distruzione della biodiversità acquatica. L'indicatore viene diviso in tre sottocategorie: l'EP-freshwater, che riguarda le acque dolci, l'EP-marine, che interessa i mari e gli oceani e l'EP-terrestrial che concerne l'aumento di nutrienti nel suolo.

Il potenziale di ossidazione fotochimica (POCP) è una misura dell'inquinamento degli strati più bassi di aria. Questo tipo di inquinamento è dovuto a sostanze organiche come i NMVOC (non-methane volatile organic compounds) e ossidi di azoto, che reagiscono tra loro e formano quello che comunemente chiamiamo smog.

Il potenziale di esaurimento di risorse, declinato in esaurimento di metalli e minerali (ADPE) ed esaurimento di fonti fossili (ADPF), quantifica il consumo delle risorse del nostro pianeta, che si sa essere limitate.

Infine, il potenziale di utilizzo di acqua (WDP) indica l'impatto di un'attività o un prodotto sulla disponibilità di acqua nella regione in cui viene prelevata. Tiene infatti conto della scarsità locale e della quantità di acqua utilizzata [34].

3.4 Risultati ottenuti e interpretazione

Tra i risultati ottenuti dallo studio, sono stati selezionati quelli maggiormente significativi e sono stati riportati sotto forma di grafici e tabelle per poter avere una più chiara e semplice visualizzazione dei dati.

3.4.1 Risultati per singolo processo di formatura

Inizialmente, sono stati calcolati gli impatti ambientali relativi ai singoli processi. In Appendice vengono riportati tutti i dati ottenuti (si vedano la Tabella 19, la Tabella 20 e la Tabella 21). Per poter visualizzare i dati in maniera chiara e poter confrontare l'importanza delle diverse fasi di un processo, sono stati realizzati tre diagrammi a torta (Figura 41, Figura 42 e Figura 43) che riportano le quote di GWP riferite alle materie prime, oltre che alle fasi della lavorazione e agli stampi.

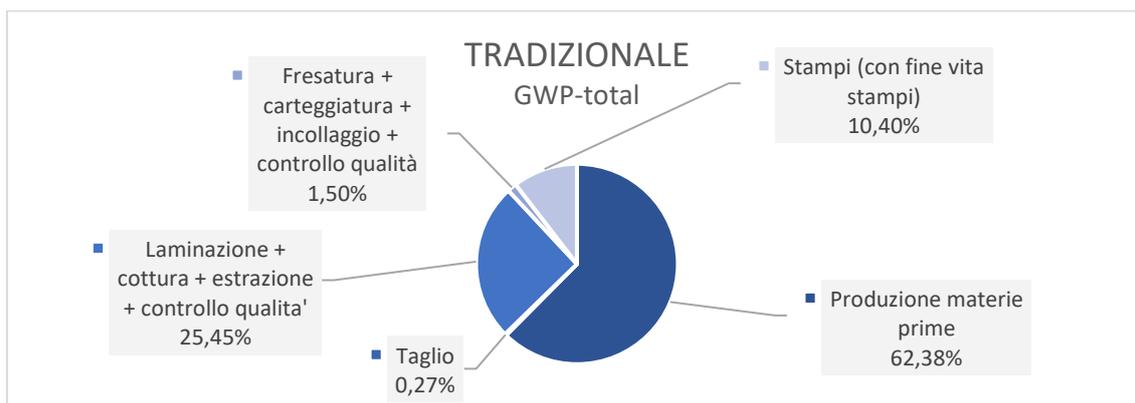


Figura 41: Risultati Processo Tradizionale

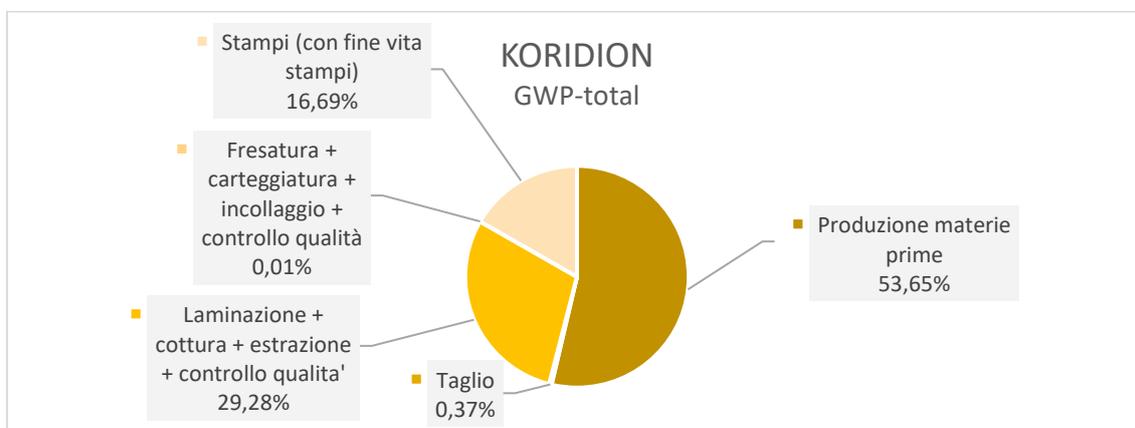


Figura 42: Risultati Processo Koridion

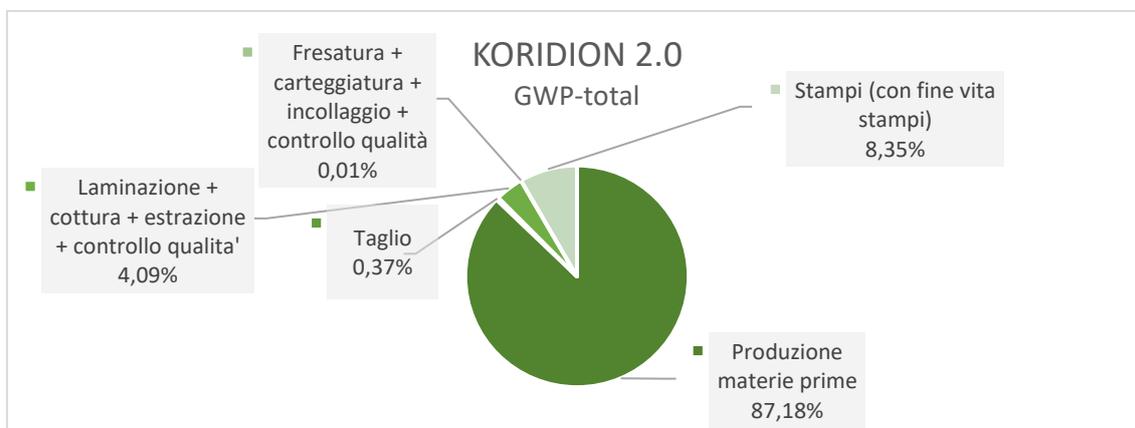


Figura 43 Risultati Processo Koridion 2.0

Si noti che per tutti i processi di produzione, il contributo maggiore al GWP è dato dalla produzione di materia prima. Il secondo contributo più rilevante è quello della laminazione e della cottura, seguito dalla produzione degli stampi. Un'eccezione è fatta nel caso Koridion 2.0, dove il contributo dello stampo sorpassa quello della laminazione, perché la cottura con il macchinario K2.0 è molto efficiente. L'impatto percentuale della materia prima diminuisce nel caso Koridion perché gli stampi assumono un peso maggiore rispetto al caso tradizionale, a causa dell'aggiunta dello stampo per l'anima. Nel caso Koridion 2.0 invece, la maggior parte dei contributi al GWP vale qualche unità o frazioni di unità e, di conseguenza, l'impatto della materia prima supera l'87% delle emissioni di gas serra totali. In tutti e tre i casi le fasi di taglio e di fresatura sono irrilevanti.

3.4.2 Confronto tra le fasi di lavorazione

Successivamente, sono stati confrontati tra loro i GWP totali dei singoli contributi alla produzione.

Tabella 16: Confronto Risultati per singolo contributo

	Impact Category	Unit	TRADIZIONALE Fibra di Carbonio	KORIDION	VARIAZIONE RISPETTO TRADIZIONALE	KORIDION 2.0	VARIAZIONE RISPETTO TRADIZIONALE	VARIAZIONE RISPETTO KORIDION
MATERIE PRIME	GWP-Total	kg CO2 eq	282,8926	183,2494	-35,22%	183,2494	-35,22%	0,00%
LAMINAZ. +COTTURA	GWP-Total	kg CO2 eq	115,3984	100,0139	-13,33%	8,588778	-92,56%	-91,41%
STAMPI	GWP-Total	kg CO2 eq	47,16559	56,99949	20,85%	17,55408	-62,78%	-69,20%

È stato osservato che sia per il caso Koridion che per il caso Koridion 2.0, una riduzione della materia prima utilizzata ha portato ad una riduzione delle emissioni del 35%. Per quanto riguarda la fase di laminazione, si ha una riduzione di GWP del 13% implementando l'anima Koridion ed un'importante riduzione del 92% rispetto al caso tradizionale, implementano il sistema integrato Koridion 2.0. Il Caso 2 però comporta un aumento del 20% di emissioni di gas serra relative alla produzione degli stampi. Nel Caso 3 invece, il trend ritorna nel range di riduzione delle emissioni, sfiorando un -63% rispetto alle emissioni relative alla produzione degli stampi del Caso 1.

Si osservi la Figura 44 per una migliore visualizzazione di questi dati.

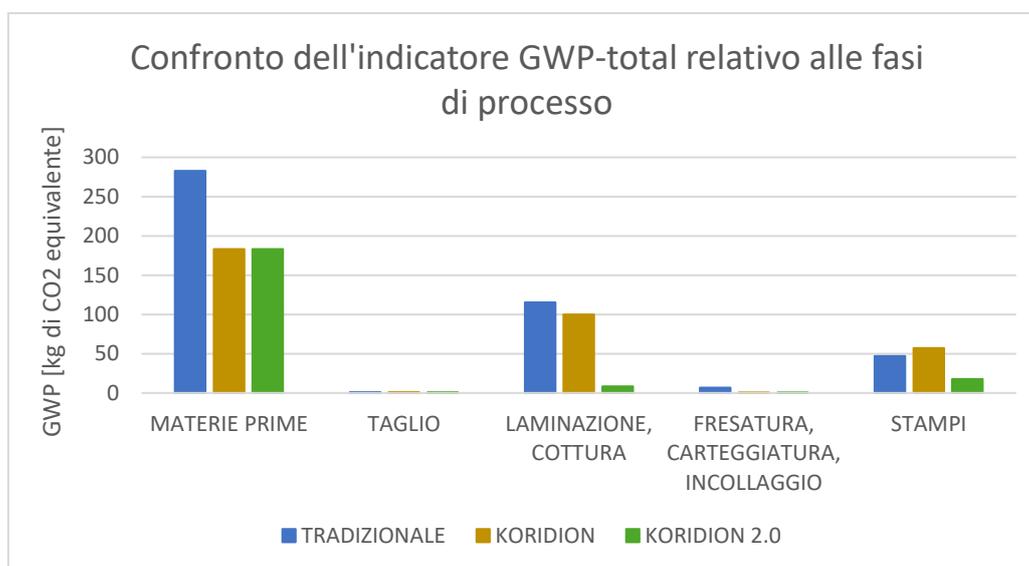


Figura 44: Confronto GWP-total tra i tre processi in analisi con distinzione tra le fasi di lavorazione

In aggiunta, è possibile osservare in Tabella 17 le migliori in termini di GWP apportate dallo stampo realizzato con tecniche di 3D printing.

Tabella 17: Risultati Caso 4 (stampi WAAM)

	Impact Category	Unit	KORIDION 2.0 Stampo 3D	VARIAZIONE RISPETTO TRADIZIONALE	VARIAZIONE RISPETTO KORIDION	VARIAZIONE RISPETTO KORIDION 2.0 Stampo CNC
STAMPI	GWP-Total	kg CO2 eq	9,912979	-78,98%	-82,61%	-43,53%

In questo caso, il risparmio rispetto al caso degli stampi tradizionali è approssimativamente del 79%, mentre rispetto al caso Koridion 2.0 classico con stampo realizzato per fresatura CNC la variazione ammonta ad un 43%. Dunque, è possibile affermare che realizzare stampi con la tecnologia WAAM è una scelta vincente sia in termini di risparmio di materiale e riduzione del costo, ma anche dal punto di vista ambientale.

Per una migliore visualizzazione degli impatti derivanti dalla produzione degli stampi si osservi la Figura 45.

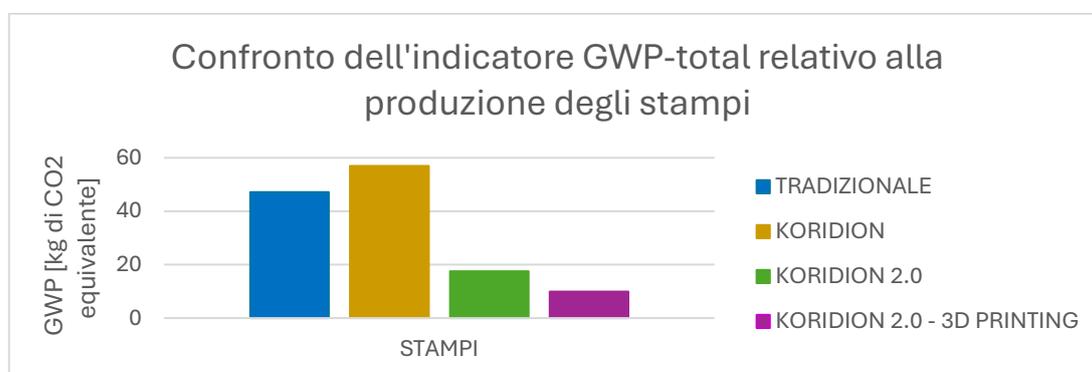


Figura 45: Confronto GWP-total degli stampi tra i tre processi in analisi

3.4.3 Confronto cumulativo tra tutti i processi

Nella Tabella 18 si trovano i valori cumulativi per ognuno degli indicatori prescelti e per ogni metodo di fabbricazione del materiale composito. Sono riportati i confronti dei metodi innovativi rispetto al metodo tradizionale e anche quello del metodo Koridion 2.0 rispetto al metodo Koridion standard.

Tabella 18: Sommario Risultati

Impact Category	Unit	TRADIZIONALE	KORIDION	VARIAZIONE RISPETTO TRADIZIONALE (%)	KORIDION 2.0	VARIAZIONE RISPETTO TRADIZIONALE (%)	VARIAZIONE RISPETTO KORIDION (%)
GWP-Total	kg CO2 eq	453	342	-25%	210	-54%	-38%
- GWP-Fossil	kg CO2 eq	453	341	-25%	210	-54%	-38%
- GWP-biogenic	kg CO2 eq	0,70	0,31	-55%	0,26	-63%	-17%
- GWP-LULUC	kg CO2 eq	0,28	0,21	-27%	0,16	-43%	-23%
Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC11 eq	5,42E-05	3,31E-05	-39%	2,64E-05	-51%	-20%
Acidification potential (AP)	mol H+ eq	4,86	3,62	-25%	2,47	-49%	-32%
Eutrophication, freshwater (EP-fw)	kg P eq	1,18E-02	9,92E-03	-16%	5,87E-03	-50%	-41%
Eutrophication, marine (EP-marine)	kg N eq	2,07	1,44	-31%	1,08	-48%	-25%
Eutrophication, terrestrial (EP-terr.)	mol N eq	22	15	-31%	11	-48%	-25%
Photochemical ozone formation (POCP)	kg NMVOC eq	4,99	3,62	-28%	2,62	-48%	-28%
Abiotic depletion, minerals&metal (ADPE)	kg Sb eq	1,10E-03	8,65E-04	-22%	7,09E-04	-36%	-18%
Abiotic depletion, fossil (ADPF)	MJ	6826	4927	-28%	3100	-55%	-37%
Water (use) deprivation potential (WDP)	m3 depriv.	130	61	-53%	43	-67%	-30%

Si consideri l'indicatore di GWP totale perché di più facile interpretazione per il pubblico a cui lo studio è rivolto. È possibile affermare che: il processo Koridion comporta un'emissione di gas climalteranti inferiore del 25% rispetto al caso tradizionale, mentre il processo integrato Koridion 2.0 riduce drasticamente le emissioni, arrivando ad un -54%.

Altri due indicatori rilevanti sono l'ADPE e l'ADPF, che analizzano rispettivamente il consumo di minerali e metalli e il consumo di risorse fossili. Per il caso Koridion, si rileva una diminuzione del 22% dell'ADPE e del 28% dell'ADPF rispetto al caso tradizionale. Invece, per il caso Koridion 2.0, la riduzione di ADPE risulta essere del 36%, mentre quella di ADPF raggiunge il 55%.

Gli altri indicatori hanno delle tendenze analoghe: i valori si aggirano attorno a riduzioni del 20-30% rispetto al caso tradizionale per il caso Koridion (Caso 2) e a riduzioni del 40-60% rispetto al caso tradizionale per il caso Koridion 2.0 (Caso 3). Il processo Koridion 2.0 comporta delle riduzioni di tutti gli indicatori in un range che va dal 17% al 41% rispetto al caso Koridion. In generale, il processo produttivo Koridion 2.0 risulta il meno impattante rispetto agli altri processi produttivi considerati per tutte le categorie d'impatto.

Conclusioni

La presente tesi aveva l'obiettivo di realizzare un'analisi di Life Cycle Assessment comparativa tra tre differenti processi produttivi impiegati nella fabbricazione dei materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio per applicazioni nel settore automotive. L'analisi è stata condotta secondo i principi normativi di riferimento e ha permesso di identificare criticità e vantaggi ambientali delle diverse soluzioni tecnologiche.

Dallo studio emergono differenze significative in termini di impatti ambientali tra i tre processi analizzati: il metodo tradizionale è risultato essere quello maggiormente impattante a causa del consumo rilevante di materia prima ed energia primaria; il metodo tradizionale associato all'utilizzo dell'anima Koridion ha riscontrato alcuni benefici in termini di risparmio di materiale, anche se la voce di impatto relativo agli stampi è risultata più elevata rispetto a quella del caso tradizionale, a causa dell'aggiunta dello stampo per l'anima; infine, è stato constatato che il sistema integrato Koridion 2.0, permette di apportare delle migliorie dirompenti al processo, in quanto permette di ridurre sostanzialmente sia il consumo di materiale che di energia elettrica e fornisce la possibilità di aumentare le proprietà dei pezzi e la resa, grazie un sistema ottimizzato. Tutto ciò rende Koridion 2.0 un'alternativa vantaggiosa rispetto ai metodi tradizionali.

Un'ulteriore indagine circa i metodi di fabbricazione degli stampi, ha evidenziato che l'adozione di tecnologie di 3D printing, come la Wire Arc Additive Manufacturing, può apportare un miglioramento consistente in termini di risparmio di materiale e di riduzione di emissioni.

L'analisi LCA ha inoltre confermato come l'adozione di tecnologie innovative sia un passo fondamentale verso il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile delineati dall'Agenda 2030, in particolare, l'obiettivo 12 che è legato al consumo e alla produzione responsabile. Riducendo l'impatto dei veicoli di nuova generazione è possibile contribuire concretamente alla transizione ecologica del settore dei trasporti.

In conclusione, il confronto tra i tre processi produttivi ha dimostrato come l'innovazione tecnologica possa giocare un ruolo chiave nella riduzione dell'impatto ambientale dei materiali compositi. L'integrazione di materiali avanzati come Koridion e nuove metodologie di produzione, come il sistema integrato Koridion 2.0 e la tecnica WAAM per la produzione degli stampi, rappresentano una direzione strategica per il futuro del settore automotive, contribuendo alla realizzazione di veicoli più sostenibili e performanti. Proseguire su questa strada con ulteriori ricerche e sviluppi applicativi sarà cruciale per consolidare i benefici ambientali e industriali evidenziati in questo studio.

Appendice

Capitolo 3 - Paragrafo 3.4. - Risultati

Tabella 19: Risultati Processo Tradizionale in termini di indicatori mid-point

TRADIZIONALE							
Impact Category	Unit	Total	Produzione materie prime	Taglio	Laminazione + cottura + estrazione + controllo qualità	Fresatura + carteggiatura + incollaggio + controllo qualità	Stampi (con fine vita stampi)
GWP-Total	kg CO2 eq	453	283	1,22	115	6,81	47,17
- GWP-Fossil	kg CO2 eq	453	283	1	115	7	47
- GWP-biogenic	kg CO2 eq	0,70	1,33E-01	4,18E-03	4,55E-01	2,67E-02	7,72E-02
- GWP-LULUC	kg CO2 eq	0,28	2,12E-01	2,82E-04	1,84E-02	3,75E-03	4,70E-02
Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC11 eq	5,42E-05	4,25E-05	2,34E-08	6,09E-06	1,64E-07	5,44E-06
Acidification potential (AP)	mol H+ eq	4,86	3,87	0,00	0,41	0,03	5,48E-01
Eutrophication, freshwater (EP-fw)	kg P eq	1,18E-02	8,01E-03	2,13E-05	2,15E-03	1,47E-04	1,43E-03
Eutrophication, marine (EP-marine)	kg N eq	2,07	1,77	0,00	0,07	0,00	2,32E-01
Eutrophication, terrestrial (EP-terr.)	mol N eq	22	19	8,68E-03	7,66E-01	4,65E-02	2,49
Photochemical ozone formation (POCP)	kg NMVOC eq	4,99	4,09	0,00	0,33	0,02	5,50E-01
Abiotic depletion, minerals&metal (ADPE)	kg Sb eq	1,10E-03	5,11E-04	2,90E-06	3,16E-04	2,68E-05	2,46E-04
Abiotic depletion, fossil (ADPF)	MJ	6826	4156	18	1888	111	653
Water (use) deprivation potential (WDP)	m3 depriv.	130	40	1	78	4	7,40

Tabella 20: Risultati Processo Koridion in termini di indicatori mid-point

KORIDION							
Impact Category	Unit	Total	Produzione materie prime	Taglio	Laminazione + cottura + estrazione + controllo qualità	Fresatura + carteggiatura + incollaggio + controllo qualità	Stampi (con fine vita stampi)
GWP-Total	kg CO2 eq	342	183	1,25	100	2,59E-02	57,00
- GWP-Fossil	kg CO2 eq	341	183	1,25	99,95	2,59E-02	57
- GWP-biogenic	kg CO2 eq	0,31	0,13	6,36E-04	5,17E-02	3,18E-05	1,27E-01
- GWP-LULUC	kg CO2 eq	0,21	0,13	1,84E-04	1,51E-02	3,37E-05	6,33E-02
Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC11 eq	3,31E-05	2,53E-05	1,96E-08	2,24E-06	4,39E-10	5,51E-06
Acidification potential (AP)	mol H+ eq	3,62	2,34	4,45E-03	6,81E-01	2,30E-04	5,98E-01
Eutrophication, freshwater (EP-fw)	kg P eq	9,92E-03	5,02E-03	4,09E-05	3,08E-03	1,53E-06	1,78E-03
Eutrophication, marine (EP-marine)	kg N eq	1,44	1,05	7,97E-04	1,42E-01	3,35E-05	2,40E-01
Eutrophication, terrestrial (EP-terr.)	mol N eq	15	11	8,91E-03	1,58	3,91E-04	2,57
Photochemical ozone formation (POCP)	kg NMVOC eq	3,62	2,53	3,48E-03	4,98E-01	1,33E-04	5,79E-01
Abiotic depletion, minerals&metal (ADPE)	kg Sb eq	8,65E-04	3,67E-04	1,91E-06	1,57E-04	1,93E-06	3,37E-04
Abiotic depletion, fossil (ADPF)	MJ	4927	2752	17	1397	4,00E-01	760
Water (use) deprivation potential (WDP)	m3 depriv.	61	34	2,13E-01	18	5,72E-03	9,22

Tabella 21: Risultati Processo Koridion 2.0 in termini di indicatori mid-point

KORIDION 2.0							
Impact Category	Unit	Total	Produzione materie prime	Taglio	Laminazione + cottura + estrazione + controllo qualità	Fresatura + carteggiatura + incollaggio + controllo qualità	Stampi (con fine vita stampi)
GWP-Total	kg CO2 eq	210	183	0,78	8,59	1,40E-02	17,55
- GWP-Fossil	kg CO2 eq	210	183	0,78	8,55	1,39E-02	17
- GWP-biogenic	kg CO2 eq	0,26	0,13	2,77E-03	3,22E-02	2,97E-05	8,93E-02
- GWP-LULUC	kg CO2 eq	0,16	0,13	1,74E-04	1,79E-03	2,98E-05	2,97E-02
Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC11 eq	2,64E-05	2,53E-05	1,52E-08	8,86E-07	2,01E-10	1,68E-07
Acidification potential (AP)	mol H+ eq	2,47	2,34	2,57E-03	3,25E-02	1,83E-04	1,00E-01
Eutrophication, freshwater (EP-fw)	kg P eq	5,87E-03	5,02E-03	1,37E-05	1,73E-04	1,43E-06	6,64E-04
Eutrophication, marine (EP-marine)	kg N eq	1,08	1,05	4,89E-04	5,34E-03	1,57E-05	1,60E-02
Eutrophication, terrestrial (EP-terr.)	mol N eq	11	11	5,52E-03	6,10E-02	1,96E-04	1,78E-01
Photochemical ozone formation (POCP)	kg NMVOC eq	2,62	2,53	2,36E-03	2,58E-02	6,08E-05	5,70E-02
Abiotic depletion, minerals&metal (ADPE)	kg Sb eq	7,09E-04	3,67E-04	1,83E-06	3,10E-05	1,89E-06	3,07E-04
Abiotic depletion, fossil (ADPF)	MJ	3100	2752	12	140	2,31E-01	196
Water (use) deprivation potential (WDP)	m3 depriv.	43	34	4,48E-01	5,58	5,03E-03	3,48

Riferimenti

- [1] “Life Cycle Assessment - ecoinvent.” Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: <https://ecoinvent.org/life-cycle-assessment/>
- [2] Prof. Marina Mistretta, “Dispense di introduzione all’LCA,” 2022. [Online]. Available: https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1463_2021_542_40876.pdf
- [3] “LCA - Life Cycle Assessment (Analisi del ciclo di vita) | Rete Clima.” Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: <https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/>
- [4] R. Ing. PhD. Stefanini, “VALUTAZIONE DEL CICLO DI VITA (LCA): PRINCIPI, QUADRO DI RIFERIMENTO, REQUISITI E LINEE GUIDA,” *Università di Parma*.
- [5] M. Damiani, N. Ferrara, and F. Ardente, “Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods,” Luxembourg, 2022. doi: 10.2760/11564.
- [6] “ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- [7] “Gestione ambientale con la UNI EN ISO 14044 - UNI - Ente Italiano di Normazione.” [Online]. Available: <https://www.uni.com/gestione-ambientale/>
- [8] “Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile - Agenzia per la coesione territoriale.” Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/>
- [9] E. Sanyé-Mengual and S. Sala, “Life Cycle Assessment support to environmental ambitions of EU policies and the Sustainable Development Goals,” *Integr Environ Assess Manag*, vol. 18, no. 5, pp. 1221–1232, Sep. 2022, doi: 10.1002/IEAM.4586.
- [10] E. Witten and V. Mathes, “The European market for Fiber-Reinforced Plastics / Composites 2023 Market developments, Trends, challenges and prospects,” 2024. [Online]. Available: www.avk-tv.de
- [11] U.S. Commercial Service - Department of Commerce, “EUROPE COMPOSITES OVERVIEW 2024,” 2024.
- [12] “Emissioni di CO2 delle auto: i numeri e i dati. Infografica | Tematiche | Parlamento europeo.” [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20190313STO31218/emissioni-di-co2-delle-auto-i-numeri-e-i-dati-infografica>
- [13] C. Badini, *Materiali Compositi per l’Ingegneria*. Celid, 2013.

- [14] “Fibra di carbonio - Wikipedia.” [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_di_carbonio
- [15] “What are the Terminology, Types, and Formats of Reinforcement Fiber?” [Online]. Available: <https://www.addcomposites.com/post/reinforcement-fibers-terminology-types-and-formats>
- [16] “ROHACELL® Product Information for Safe Use.” [Online]. Available: <https://performance-foams.evonik.com/en/downloads/product-information>
- [17] “Choose the ROHACELL® PMI foam for your application and process - Evonik Industries.” [Online]. Available: <https://performance-foams.evonik.com/en/products-and-solutions/rohacell>
- [18] “CARUS | Composites.” [Online]. Available: <https://www.carus.it/composites/>
- [19] “Shell tools - Corebon.” [Online]. Available: <https://corebon.com/our-solutions/shell-tools/>
- [20] “Heated plates and tools - Corebon.” [Online]. Available: <https://corebon.com/our-solutions/heated-plates-and-tools/>
- [21] “Il magnetismo nelle diverse tipologie di acciaio inox | Fitting Service.” [Online]. Available: <https://www.fittingservice.it/il-magnetismo-nelle-diverse-tipologie-di-acciaio-inox/>
- [22] “Induction heating - Corebon.” [Online]. Available: <https://corebon.com/our-technology/induction-heating/>
- [23] “Invar - Wikipedia.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Invar>
- [24] J. A. Tröger, R. Sartorti, W. Garhuom, A. Düster, and S. Hartmann, “Full-field validation of finite cell method computations on wire arc additive manufactured components,” *Archive of Applied Mechanics*, vol. 94, no. 9, pp. 2431–2449, Sep. 2024, doi: 10.1007/s00419-024-02616-3.
- [25] “La produzione additiva ad arco di filo (WAAM) spiegata | MakerVerse.” Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: https://www.makerverse.com/it/risorse/stampa-3d/produzione-additiva-ad-arco-di-filo-spiegata-da-waam/?utm_source=chatgpt.com
- [26] I. H. Shah, N. Hadjipantelis, L. Walter, R. J. Myers, and L. Gardner, “Environmental life cycle assessment of wire arc additively manufactured steel structural components,” *J Clean Prod*, vol. 389, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136071.
- [27] “Environmental Performance Indicators | EPD International.” Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.environdec.com/pcr/env-perf-indic/gpi5>
- [28] L. Jacquet, A. le Duigou, and O. Kerbrat, “A Proposal for a Carbon Fibre-Manufacturing Life-Cycle Inventory: A Case Study from the Competitive Sailing Boat Industry,” *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.3390/jcs8070276.

- [29] K. Ramachandran, C. L. Gnanasagaran, and A. Vekariya, “Life cycle assessment of carbon fiber and bio-fiber composites prepared via vacuum bagging technique,” *J Manuf Process*, vol. 89, pp. 124–131, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.068.
- [30] Baratè Santino S.r.l., “Scheda tecnica lega di alluminio 7021.” [Online]. Available: www.barate.it
- [31] CO.ME.F.I. Metalli S.r.l., “Scheda tecnica lega di alluminio 5083.”
- [32] “Primary Aluminium Production - International Aluminium Institute.” Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production>
- [33] “Mix energetico Repower.” Accessed: Feb. 16, 2025. [Online]. Available: <https://www.repower.com/it/noi/informazioni-e-servizi/mix-energetico>
- [34] “Indicators of Resource Use | EPD International.” Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: <https://www.environdec.com/pcr/env-perf-indic/gpi5/indic-resource-use>