



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**Analisi di sensibilità per i costi e gli impatti di un innovativo processo di recupero per sfridi di materiale composito preimpregnato**

**Cost sensitivity analysis and emissions sensitivity analysis of a new prepreg scraps recovery system**

Tesi sperimentale

Relatore: Prof. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:

Edoardo Antonini

Correlatori:

Prof. Alessio Vita

Dott. Iacopo Bianchi

Anno accademico 2020/2021



# INDICE

<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	5
<b>INDICE DEI GRAFICI</b> .....	5
<b>INDICE DELLE TABELLE</b> .....	6
<b>INTRODUZIONE</b> .....	7
<b>CAPITOLO 1 ANALISI LCA</b> .....	12
1.1.    Bisogno di cambiamento .....	12
1.2.    LCA.....	14
1.3.    Fasi del LCA .....	16
<b>CAPITOLO 2 DAI MATERIALI COMPOSITI AL PROGETTO CIRCE</b> .....	18
2.1.    L'importanza e l'efficacia dei materiali compositi .....	18
2.2.    PREPREG.....	20
2.3.    Programma LIFE e progetto CIRCE .....	22
<b>CAPITOLO 3 TIPI DI PROCESSI PROD. DI MATERIALI COMPOSITI</b> .....	25
3.1.    Stampaggio a compressione .....	25
3.2.    Produzione da scarti .....	27
3.3.    Stampaggio in autoclave .....	28
<b>CAPITOLO 4 COSTI: ANALISI E DATI DI SENSIBILITA'</b> .....	30
4.1.    Introduzione all'analisi di sensibilità .....	30
4.2.    Analisi del prepreg vergine .....	31
4.3.    Analisi di sensibilità dell'energia.....	34
4.4.    Analisi di sensibilità della manodopera .....	36
4.5.    Analisi di sensibilità sul prezzo dello stampo e del controstampo .....	39
4.6.    Analisi di sensibilità sui macchinari di taglio e spellicolamento .....	42
4.7.    Analisi totale della variabilità dei costi.....	44
<b>CAPITOLO 5 CED: ANALISI DI SENSIBILITA' E CONFRONTO</b> .....	46
5.1.    Descrizione CED .....	46
5.2.    La fase di cura .....	48
5.3.    Fase di produzione degli stampi .....	50
5.4.    prepreg input.....	52
5.5.    peeling & cutting .....	54
5.6.    analisi totale della variabilità del CED .....	55

<b>CAPITOLO 6 GWP: ANALISI DI SENSIBILITA' E CONFRONTO</b> .....	58
6.1. L'importanza dei piccoli cambiamenti .....	58
6.2. Analisi di sensibilità del GWP .....	60
<b>CAPITOLO 7 ReCiPe: ANALISI DI SENSIBILITA' E CONFRONTO</b> .....	63
7.1. Un nuovo coefficiente: ReCiPe .....	63
7.2. Analisi di sensibilità del ReCiPe e confronto .....	65
<b>CAPITOLO 8 CONSIDERAZIONI FINALI</b> .....	67
8.1. L'ausilio di nuovi coefficienti .....	67
8.2. conclusioni .....	71
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	73

## **INDICE DELLE FIGURE**

<i>Figura 1.1. Fasi dell'LCA</i> .....	17
<i>Figura 2.1. Struttura materiali compositi</i> .....	19
<i>Figura 2.2. Progetto Circe</i> .....	24
<i>Figura 6.1. Variazione del livello del mare negli anni</i> .....	59

## **INDICE DEI GRAFICI**

<i>Grafico 4.1. Prepreg</i> .....	32
<i>Grafico 4.2. Labor variabile solo per la produzione da scarti</i> .....	37
<i>Grafico 4.3. Mold &amp; countermold</i> .....	40
<i>Grafico 5.1. Tooling &amp; curing</i> .....	50
<i>Grafico 6.1. Scrap vs min del CED e del GWP</i> .....	59
<i>Grafico 8.1. Istogramma su costi, CED, GWP e ReCiPe con apporto %</i> .....	69

## **INDICE DELLE TABELLE**

<i>Tabella 1.1. Etichette ISO.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabella 3.1. Costi, componenti e quantità dello stampaggio a compressione.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 3.2. Costi, componenti e quantità per la produzione da scarti.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 3.3. Costi, componenti e quantità per la produzione con autoclave.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabella 4.1. Analisi di sensibilità prepeg vergine.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabella 4.5. cutting &amp; peeling.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabella 5.1. prepeg input.....</i>	<i>53</i>
<i>tabella 6.1. GWP per le tre lavorazioni.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabella 7.1. ReCiPe delle tre lavorazioni.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabella 8.1. Tabella apporto % delle variabili sul CED.....</i>	<i>68</i>

# INTRODUZIONE

Tra gli studi contemporanei europei e mondiali più significativi in ambito aziendale c'è sicuramente la valorizzazione degli scarti.

Per troppi anni gli scarti sono stati considerati come materiale superfluo o dannoso, aumentando in maniera consistente la grandezza e, quindi, la pericolosità delle discariche. Infatti, il danno non è solo economico poiché creando un ciclo di riciclaggio, si potrebbero risparmiare soldi su materie prime o su lavorazioni già effettuate; ma anche e soprattutto ambientale, infatti i rifiuti sono nocivi per l'ambiente circostante tenuto anche conto che la loro velocità di decomposizione è bassa, se non (a volte) nulla. L'Italia è tra le prime in Europa per valorizzazione dei rifiuti industriali, questo sottolinea quanto è presente la cultura del riciclo che valorizza gli scarti trasformandoli da costo, in risorsa.

Quindi, sta diventando (e lo diventerà sempre più) fondamentale studiare l'intero ciclo di vita del prodotto che si desidera creare, partendo da studi di mercato fino ad arrivare alla deproduzione ed al riciclaggio.

Tra i materiali più impiegati in ambito edilizio, agricolo, automotive e nell'automazione industriale ci sono i compositi, l'uso di questi ha un incremento percentuale annuo consistente e studiare sistemi sostenibili per il loro riciclo sta diventando di vitale importanza.

La peculiarità di tutti questi materiali è la loro struttura: ogni materiale composito è formato da due o più componenti che, uniti diventano un materiale con caratteristiche migliori rispetto ai singoli.

I costituenti di questi materiali compositi sono di due diversi tipi: matrice o rinforzo; la matrice è costituita da una fase continua omogenea che ha la funzione di isolare il rinforzo assicurando la coesione del materiale composito ed a seconda del materiale di cui sono formati distinguiamo PMC (compositi a matrice polimerica), MMC (compositi a matrice metallica) e CMC (compositi a matrice ceramica). Il rinforzo invece ha il compito di garantire rigidità e resistenza meccanica. Si possono utilizzare matrici

termoplastiche e termoindurenti: la differenza sta nel fatto che riscaldando il termoplastico il materiale si ri-fonde e può essere riutilizzato facilmente, mentre per i termoindurenti il riciclo è più complesso poiché a seguito del riscaldamento non si ha la ri-fusione del prodotto ma una possibile degradazione. Di contro, però, bisogna sottolineare che i termoindurenti hanno proprietà meccaniche migliori.

I vantaggi dell'utilizzo delle matrici termoindurenti rispetto alle matrici termoplastiche sono: la bassa viscosità della miscela nell'istante in cui sono impregnate le fibre; la stabilità termica e la resistenza chimica; la quasi inesistenza dei problemi di creep. Di contro, gli svantaggi sono: lunghi tempi di produzione, conseguenti ai periodi di cura relativamente lunghi; la bassa deformazione a rottura, che influisce sulla bassa resistenza all'impatto.

La produzione di materiali compositi ed in particolare di compositi in fibra di carbonio richiede ingenti consumi energetici e conseguentemente un impatto ambientale non indifferente.

In dettaglio, il riciclaggio dei rifiuti CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) può essere meccanico, termico o chimico; ma bisogna sottolineare un aspetto importante (che starà alla base degli studi successivi) cioè, che le proprietà ottenute da materiali riciclati sono inferiori rispetto a quelle dei materiali vergini. Dopo il taglio degli scarti, vengono spesso recuperate fibre di carbonio grazie ad un processo di taglio che riduce la lunghezza delle stesse abbassando le proprietà meccaniche. Spesso, nell'ambito di tali applicazioni, viene considerato il riciclaggio una soluzione costosa e viene costantemente preferito l'utilizzo di discariche; lo studio illustrato nelle seguenti pagine vuole dimostrare che, non solo il riciclaggio porta enormi vantaggi a livello ambientale ma, anche un risparmio economico non sempre indifferente.

Il progetto CIRCE è un progetto Europeo basato sulla salvaguardia dell'ambiente, mira alla sperimentazione di nuovi processi di recupero di scarti di materia prima che, altrimenti, finirebbero nelle discariche. L'analisi di sensibilità ci aiuterà ad ottenere importanti risposte in questo ambito, esso riguarda il processo di recupero di scarti prodotti durante le operazioni di taglio dei rotoli preimpregnati e proprio questi, solitamente rappresentano un 30% in peso dei preimpregnati finali prodotti. Lo studio è



stato creato proprio perché il costo per la produzione di rotoli di preimpregnato è molto oneroso e richiede molta energia, quindi non si studierà solo l'eco sostenibilità per l'ambiente ma anche l'abbattimento dei costi.

Queste sperimentazioni sono state avviate da tale progetto Europeo in collaborazione con 5 aziende italiane, con l'obiettivo di riutilizzare i rifiuti di preimpregnati come materiale secondario per nuovi processi produttivi, venendo adoperati praticamente come scorte in process. Le sperimentazioni di questo progetto Europeo (Circe Project) vengono avviate partendo dallo studio dei costi del ciclo di vita (LCC) e dalla valutazione di essi (LCA) per poi analizzare le variabili in input e rilevare i cambiamenti dei risultati (output) in risposta a tali variazioni.

Si riescono ad avere i dati in input grazie al LCA e LCIA che analizzano l'intero ciclo di vita dei prodotti e che si attengono alle indicazioni delle normative ISO 14040 e ISO 14044 con l'obiettivo di valutare e confrontare gli impatti di diversi processi produttivi per l'unità funzionale (in questo caso l'unità funzionale è un provino di materiale composito preimpregnato). Essenziale per tale studio è l'analisi dell'inventario (Life Cycle Inventory) i cui dati provengono da: misure dirette (come il peso degli scarti di prepreg e il peso degli stampi); da ricerche nella letteratura scientifica (consumi energetici, input di prepreg); da alcune stime e da dati del database Ecoinvent 3.1. che ha il vantaggio di rilevare i consumi sulla produzione degli stampi e delle materie prime.

Quindi, i dati non provenendo da un'unica fonte ed essendo presenti all'interno di tale studio anche delle stime e dei dati trovati, è possibile che ci si scosti dal valore preso in considerazione con una percentuale più o meno ampia. Per rimediare a tali oscillazioni e non farsi trovare impreparati di fronte ad errori umani o di approssimazioni, verrà svolta la sopracitata analisi di sensibilità ad ogni variabile presa in considerazione. Le aziende dopo gli anni '90 hanno cominciato ad investire molto nella ricerca e nella progettazione preventiva con l'utilizzo di prototipi sia virtuali che fisici poiché attraverso studi economici si è compreso che, creare un fac-simile e testarne i difetti, risulta molto più conveniente rispetto all'immettere nel mercato un oggetto e, poi, decifrarne le problematiche (attraverso recensioni, assistenza clienti ecc..). Ciò non rende solamente i tempi più lunghi, ma, rischia d'allontanare i clienti che hanno ricevuto i primi prodotti.

Questo preambolo è utile per affermare che, prima di processare i risultati e dare una risposta univoca, verranno svolte altre analisi per avere un quadro più completo e dettagliato senza trascurare nulla.

Comunque, a parte gli utilizzi ingegneristici per il rinforzo ed il consolidamento, per il momento in Italia non esistono grandi esempi di strutture realizzate in composito. Nel mondo, invece, l'utilizzo di questo materiale tende ad aumentare sempre più: il Museo del Futuro di Dubai è una struttura composta da 1000 pannelli ignifughi in composito, così come diversi progetti infrastrutturali presenti nelle città sante di Medina, Mecca e nell'Arabia Saudita, in Gran Bretagna e paesi in via di sviluppo come Olanda e Paesi Bassi. I Materiali compositi vengono utilizzati per la loro leggerezza, per la loro resistenza e grazie alle loro ampie potenzialità è possibile realizzare forme di ogni tipo sia di grandi dimensioni, sia in pezzo unico. Il problema allora qual è in Italia? In Italia, secondo gli ultimi dati dell'ISTAT il 74,1% degli edifici residenziali è stato costruito prima del 1980, quindi necessitano di riabilitazione e riqualificazione strutturale e l'utilizzo di tali materiali potrebbe stravolgere il settore, dato che non presenta limiti quantitativi o strutturali. Quindi il problema è la mancanza di conoscenza dei compositi da parte dei progettisti, degli imprenditori e della diffidenza al loro utilizzo per mancanza di omologazioni e standard generali. Inoltre, Come abbiamo visto, la tecnologia di produzione dei compositi in prepreg è ancora vincolata a un processo di trasformazione per lo più manuale e a una dotazione di attrezzature alquanto onerosa, che, uniti al prezzo della materia prima, vanno a incidere in maniera rilevante sul costo finale del manufatto. Tutte queste problematiche portano l'Italia a guardare ancora con sospetto questi materiali che stanno avendo un ruolo centrale nei dipartimenti mondiali e sono sedi di studio in Europa, come in tutto il mondo. Il lavoro d'analisi che è stato svolto conferma come questi costi dovuti alla materia prima potrebbero essere risanati utilizzando il 100% del prepreg, valorizzando gli scarti con un sistema di recupero. Questo crea un beneficio finanziario all'azienda che potrebbe: investire i soldi risparmiati nella ricerca e nello sviluppo di nuove applicazioni per questi materiali; investirli per formare il personale; infine, impiegarli per la pubblicizzazione della loro originalità e la loro modernizzazione. Inoltre, come si è visto, il risparmio non è solo

economico ma, anche ecologico, in un mondo ormai attento alla salvaguardia dell'ambiente, lo sviluppo di questi processi di recupero renderebbe l'azienda green mantenendola al passo con i tempi futuri ove sarà premiante la diminuzione delle emissioni e dell'utilizzo delle discariche. Quindi dai grafici sviluppati in questa tesi si può notare come la produzione di preimpregnati che utilizza scarti di prepeg sia la scelta migliore, più economica e più ecologica.

Far crescere in Italia la consapevolezza che tali lavorazioni sono vincenti sia qualitativamente che dal punto di vista ecologico, sarà l'impegno futuro che permetterà alla nazione di essere tecnologicamente evoluta, al passo con i tempi.

# **CAPITOLO 1**

## **ANALISI LCA**

### **1.1. Bisogno di cambiamento**

La cura dell'ambiente e l'attenzione nelle emissioni aziendali non è rimasto costante negli anni, infatti prima degli anni '70 il coefficiente di salvaguardia ambientale era nullo e l'attenzione principale era focalizzata sulla massimizzazione dei ricavi. Il cambiamento è avvenuto nella fine degli anni '70 negli Stati Uniti ove, grazie a John Hewitt ed un gruppo di studiosi a lui affiancati, viene creata l'EIA (Environmental Impact Assessment) contenente le prime forme di controllo sulle attività a stretto contatto con l'ambiente al fine di capire come l'ambiente viene mutato da tali processi produttivi.

Il passo fondamentale del suddetto progetto però viene fatto con l'approvazione da parte del governo statunitense e la successiva creazione di un regolamento attuativo (NEPA) con il relativo obbligo della procedura di impatto ambientale per tutti i progetti pubblici.

Tale cambiamento verrà attuato da altri Stati poiché dopo la crisi petrolifera (1973), le attenzioni mondiali furono concentrate sulla valorizzazione della materia prima e sul suo risparmio, valorizzando il loro fine vita attraverso sistemi di riciclo. Per questo, in Europa tale cambiamento avvenne nel 1985, attraverso la Direttiva 337/85/CEE, che non valutava soltanto gli impatti ambientali di determinati progetti pubblici, bensì obbligava la valutazione degli impatti anche da parte di privati. Al centro delle aziende Italiane, quindi, dopo il 1985 non ci fu più soltanto la continua massimizzazione dei ricavi, ma, la biunivoca interazione economica tra ricavi e impatti; negli anni successivi al 2000, molte multinazionali hanno addirittura scelto di valorizzare l'eco sostenibilità dei loro prodotti a discapito della minimizzazione dei costi, rendendosi completamente eco friendly, per andare a pubblicizzarsi (accentuando i valori etici aziendali) in un mondo che ormai va verso quella direzione. Infatti, un recente Report Nielsen ha stabilito che un prodotto ecosostenibile è più vendibile sul mercato rispetto ad uno standard, per questo sviluppare processi di sostenibilità d'impresa favorisce un sicuro ritorno d'immagine e

pian piano, anche economico. Secondo una seconda indagine, realizzata da LinkedIn, le Millennial Generation sarebbero favorevoli ad uno stipendio parzialmente ridotto pur di lavorare in un'impresa ecosostenibile ovvero un'impresa che abbia nella propria mission e come valore principale: l'ecosostenibilità.

## 1.2. LCA

LCA è l'acronimo inglese di Life Cycle Assessment, con esso si valuta l'impatto ambientale di un prodotto durante l'intero ciclo di vita. La valutazione di questo ciclo nasce con un approccio "dalla culla alla tomba" per la valutazione dei sistemi industriali, infatti uno dei primi fattori che vengono considerati sono proprio la raccolta delle materie prime e la loro prima lavorazione, concludendosi poi quando tutte queste materie prime vengono restituite alla terra. L'innovazione che porta questo tipo di studio riguarda fattori che prima non venivano presi in considerazione che, invece spesso risultano i più inquinanti, come ad esempio l'analisi sul trasporto dei materiali. L'input fondamentale per questo tipo di studio sono: la conoscenza delle materie prime, la quantità ed il tipo di energia utilizzata ed infine, il ciclo di vita del prodotto. Il ciclo di vita di un prodotto rende il lavoro successivo più semplice e lineare poiché si riferisce alle attività principali che interessano un articolo nel corso della sua vita, dall'acquisizione delle materie prime, passando attraverso le varie fabbricazioni, lavorazioni, manutenzione ed infine loro smaltimento.

A partire dal 1997, questa valutazione diventa uno standard internazionale attraverso la sottoscrizione di norme denominate "ISO 14040" applicando alla base di ogni studio le seguenti mosse: "compilare un inventario di input e output rilevanti di un sistema produttivo; valutare gli impatti ambientali associati a tali input e output; interpretare i risultati dell'analisi dell'inventario e delle fasi di valutazione dell'impatto in relazione agli obiettivi dello studio". Inoltre, essendo tali norme valide in tutto il mondo, esse possono essere considerate una guida per il miglioramento dei prodotti esistenti poiché l'LCA può essere utilizzata per confrontare prodotti simili e determinare quale dei tanti ha impatto ambientale migliore. Possono essere diversi gli obiettivi dell'LCA ma, generalmente, vengono raggruppati in tre categorie principali: strategia aziendale, eco-design del prodotto e comunicazione & marketing.




1. Strategia aziendale: una LCA può essere usata per costruire un inventario con cui poter elaborare una strategia di sviluppo sostenibile, in tal caso definiremo gli obiettivi principali attraverso procedure e azioni a lungo termine.

2. Ecodesign: migliorare le prestazioni ambientali dei prodotti assicurandosi che tutti i soggetti interni all'azienda siano coinvolti, che gli studi siano condivisi e che i dati sviluppati mano a mano siano accessibili a tutti i componenti. Quindi, in questo caso verranno tirati dentro il progetto anche fornitori, subappaltatori e uffici acquisti che garantiranno informazioni specifiche per acquisti sostenibili.
3. Comunicazione & marketing: i fattori che orientano la costruzione di una LCA orientata alla comunicazione ed il marketing sono:
  - Differenziazione sul mercato
  - Requisiti dei clienti e tendenze del mercato
  - Requisiti normativi.

Come citato prima, in questi anni, il tema ambientale sta diventando un importante perno di orientamento del mercato. Il consumatore è sempre più attento e informato su quello che compra scegliendo prodotti che siano sostenibili con la relativa carenza di fiducia nella visione focalizzata solo sul valore economico del prodotto. A tal proposito, grazie a questi studi LCA e alle normative ISO, è stato creato un sistema di etichettatura che garantisca che i prodotti che li espongono siano progettati per limitare al minimo il loro impatto ambientale. Le etichette si dividono in 3 tipologie e si differenziano in base a chi è il proprietario del prodotto, a chi è il proprietario della specifica ambientale e chi effettua la verifica:

- etichette di I tipo (ISO 14024);
- etichette di II tipo (ISO 14021);
- etichette di III tipo (ISO 14025).

Tabella 1.1. Etichette ISO

<b>Tipo I</b>	Etichette ambientali sottoposte a certificazione di parte terza come ad esempio il marchio europeo di qualità ecologica Ecolabel (Regolamento CE 1980/2000) (Impone limiti prestazionali ed è sottoposto a verifica esterna) [ISO 14024]	
<b>Tipo II</b>	Etichette ambientali che riportano autodichiarazioni (Si riferiscono ad una specifica caratteristica del prodotto. Non è obbligatoria una verifica) [ISO 14021]	
<b>Tipo III</b>	Etichette ambientali che riportano dichiarazioni basate su parametri stabiliti e sottoposte a un controllo indipendente, quali le EPD (Dichiarazione fondata sulla quantificazione degli impatti mediante approccio LCA) [ISO 14025]	

### 1.3. Fasi del LCA

Le fasi dell'LCA sono molte ma potremmo raggrupparle in 4 macro-azioni:

1. Definizione dell'obiettivo del campo di applicazione
2. Inventario (LCIA)
3. Valutazione degli impatti (IA)
4. Valutazione dei miglioramenti

Nella prima fase saranno definiti gli scopi del LCA, il livello di dettaglio e l'affidabilità delle informazioni ma, alla base di questi studi c'è la definizione dell'unità funzionale (cioè il prodotto, il servizio), essa indica il riferimento a cui tutti i dati in ingresso ed in uscita sono normalizzati. E' quindi un riferimento necessario per consentire la comparabilità dei risultati dell'LCA, purché valutando sistemi differenti si utilizzi una base comune.

Nella seconda fase, verrà sviluppata una descrizione quantitativa di tutti i flussi di materiali ed energia che si trovano all'interno del sistema sia in ingresso che in uscita.

L'inventario è composto da 5 parti:

-Confini del sistema: prima si avvia uno studio focalizzato solamente sul processo manifatturiero rilevando flussi di materiali e emissioni ambientali, poi si estende l'analisi a monte e a valle del processo dell'intero ciclo di vita.

-Diagramma di flusso: vengono rappresentate le componenti di un sistema divise in sequenze di processi collegati da flussi di materiali.

-Raccolta dati: lo scopo di tale fase è quella di strutturare un vero e proprio bilancio ambientale per la redazione sul quale verrà verificata la qualità dei dati (età dei dati, tecnologia). In questo caso vengono valutati prima i flussi in ingresso e poi, quelli corrispondenti alle uscite.

-Regole/problemi di allocazione degli impatti: la maggior parte dei processi industriali ha più di un prodotto e ricicla i prodotti intermedi o di scarto come fossero materie prime. I flussi di materia ed energia devono essere assegnati ai differenti prodotti secondo procedure stabilite.



-Elaborazione dei dati: nell'inventario, dopo essere stati raccolti i dati sopracitati, sono trasformati in una tabella d'imptatti ambientali causati dall'unità funzionale, creando una tabella dell'inventario.

Nella terza parte, vengono valutati gli impatti in un processo tecnico-quantitativo/qualitativo. Fondamentale in questo caso sarà individuare un unico parametro che definisca il comportamento ambientale di un sistema di prodotti e farne una valutazione accurata attraverso la: classificazione, caratterizzazione, normalizzazione e la pesatura (anche se a fronte dell'ISO 14040 le uniche valutazioni obbligatorie per questa fase sono la classificazione e la caratterizzazione).

Nella quarta fase, non vengono valutati i dati, ma, vengono valutate le opzioni per ridurre gli impatti e i carichi ambientali dell'unità funzionale in studio. In quest'ultima fase c'è un'unione dei vari interessi dell'azienda nei confronti del prodotto: tecnico-economici, politico-sociali, ricettivi dei consumatori oltre che naturalmente a quelli tecnico-ambientali. Bisogna comunque sottolineare che il LCA è una metodologia basata sul confronto, quindi l'intersezione di tutti questi studi non è una soluzione assoluta, bensì, identifica un insieme d'alternative che verranno valutate soggettivamente da persone competenti e verrà scelta la migliore per il caso in questione. In ogni LCA, per avere una visione totale del problema e delle possibili soluzioni, bisogna svolgere l'analisi di sensitività che dovrà verificare l'accuratezza dei dati e la loro influenza sul risultato finale, facendo variare i dati in input, si nota come variano i risultati. Se questo studio viene fatto in maniera ottimale, permette la rilevazione tempestiva di criticità che altrimenti, con la sola contabilità, potrebbero essere rilevate troppo tardi.

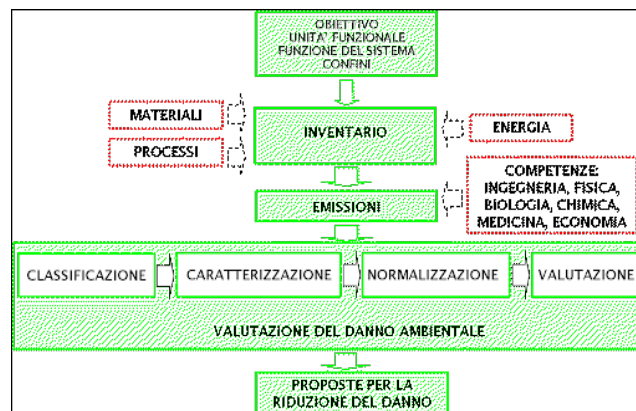


Figura 1.1. Fasi dell'LCA

# **CAPITOLO 2**

## **DAI MATERIALI COMPOSITI AL PROGETTO CIRCE**

### **2.1. L'importanza e l'efficacia dei materiali compositi**

Come parzialmente citato nell'introduzione, il tipo di materiale che verrà studiato è proprio il materiale composito. Esso, è chiamato così proprio per la sua struttura: una parte discontinua ad alta resistenza (armatura) incorporata ad una continua (matrice), queste due porzioni hanno proprietà fisiche e chimiche diverse e mantengono ciascuno la sua identità anche dopo la loro fusione ma, ciò rende il prodotto finale uno dei migliori per proprietà meccaniche.

Inoltre, questi materiali hanno una notevole flessibilità, un'elevata resistenza alla corrosione (questo grazie alla matrice, che trasferisce il carico all'armatura e la protegge da danni ambientali), una discreta leggerezza e, sempre grazie alla matrice, una buona resistenza agli urti e alla fatica. Questi materiali vengono creati valutando bene le proprietà specifiche che in possesso dell'armatura e della matrice per poi fare una selezione considerando il tipo di carico, la modalità del carico, la durata del servizio, i costi e i processi richiesti.

Mentre i metalli tradizionali sono isotropi (indipendenti dalla direzione di una grandezza definita nello spazio), i materiali compositi sono anisotropi, quindi, le loro proprietà dipendono dalla posizione delle fibre (che a loro volta possono essere lunghe o corte). Uno dei primi impieghi fu quello aereo spaziale ma, con l'abbassarsi dei prezzi stanno sostituendo i materiali tradizionalmente usati nei settori automobilistici, navali, civili; l'abbassamento dei prezzi non è dato da fenomeni aleatori, ma, dallo sviluppo di nuove tecniche di produzione, dall'innovazione e l'automazione di determinate lavorazioni; l'abbattimento dei costi sta aumentando sempre di più, facendo diventare questi materiali i più accreditati per un'area settoriale ancora più vasta in futuro.

Lo studio che verrà illustrato verterà su PMC, cioè fibre di carbonio, resina epossidica e fenolica. I compositi a matrice polimerica hanno caratteristiche meccaniche che spesso

vanno oltre quelle dei metalli tradizionali, questo grazie al processo di indurimento utilizzato per creare polimeri termoindurenti, che, una volta riscaldati non possono essere riportati nello stato iniziale ma, al massimo, passeranno ad uno stato viscoso o gommoso. Importante, è sottolineare, che se questi vengono scaldati troppo avviene il fenomeno della degradazione quindi le proprietà meccaniche della parte riciclata potrebbero essere inferiori rispetto al prodotto vergine. Le resine più utilizzate per queste applicazioni sono poliestere, epossidiche, fenoliche, sinoliche, vinilestere; durante i processi di produzione la resina scorre e riveste il rinforzo e si creano legami fibra-resina e vengono classificati in: meccanici, fisici, ionici e chimici. I materiali compositi più utilizzati sono quelli in cui sono presenti le resine epossidiche, tale termine è riferito alla resina di base non polimerizzata; e alla plastica termoindurente reticolata polimerizzata nonché alle loro proprietà che dipendono dai processi di produzione e dagli ingredienti di formazione.

Un altro tipo di resina molto utilizzata è quella fenolica: essa è stata la prima plastica termoindurente disponibile in commercio, solitamente si trova in forma liquida (ma può anche trovarsi in forma pellicolare o in polvere). Nonostante fosse una delle prime ad essere utilizzate, il suo impiego continua ad aumentare anno dopo anno (nel 2019 ne sono state prodotte 3,7 tonnellate) poiché sono caratterizzate da una buona resistenza termica, elettrica e chimica ed inoltre sono facilmente sagomabili.

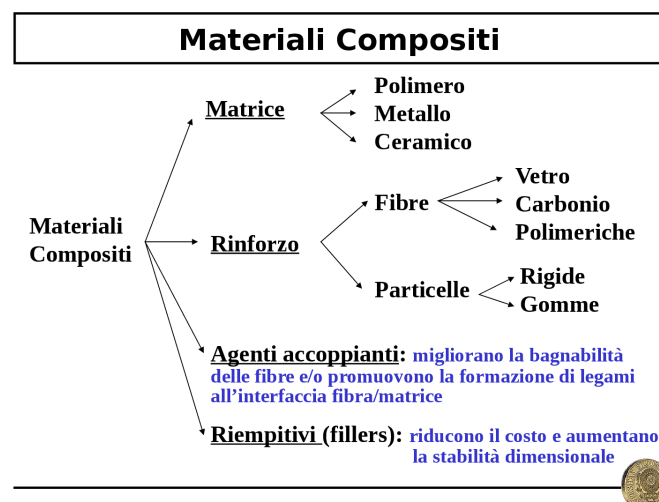


Figura 2.1. Struttura materiali compositi

## 2.2. PREPREG

Il prepreg è un materiale composito preimpregnato dove le fibre sono incorporate in una matrice polimerica, esso è uno dei componenti fondamentali per l'analisi di sensibilità che verrà svolta. Il preimpregnato non ha dei componenti ben precisi, bensì può essere costituito da diversi tipi di resine, diversi tipi di fibre ed infine, diverse forme di rinforzo. Le elevate proprietà meccaniche, il miglior controllo di resina e rinforzo e l'uniformità d'impregnazione rende questi compositi del tutto completi, infatti, dalla sovrapposizione di preimpregnati (a strati) in fibra continua unidirezionale o bidirezionale, vengono creati i laminati. La procedura di impilamento rende semplice il controllo sull'orientamento delle fibre e, una conseguente minimizzazione di errori d'impregnazione. Le due caratteristiche principali del preimpregnato sono:

1. Il livello di adesività: dipende dal volume della frazione di resina e dal grado di polimerizzazione. E' una caratteristica importante perché da essa dipende la qualità dell'adesione sia tra gli strati del laminato che tra il laminato e lo stampo.
2. La drappeggiabilità: descrive la facilità con cui il preimpregnato può assumere la forma dello stampo senza causare difetti sul prodotto finale ed è la differenza minima tra la forma del prodotto finale e la forma dello stampo;

Creare forme complesse utilizzando il prepreg come materia prima è molto complesso; i tre modi di prepregging possono essere: hot melting (impregnate con resina fusa e raffreddate prima di essere avvolte su un rotolo), filatura con resina (effetto combinato calore-pressione che garantisce l'impregnazione delle fibre) e l'immersione con solvente (fibre impregnate in un serbatoio e trascinate con una serie di rulli, infine, spostate in un forno ad aria calda per rimuovere il solvente per evaporazione). Di queste tre lavorazioni, la meno precisa è l'ultima, che rischia di lasciare residui di prepreg e causare problemi di polimerizzazione ma, viene comunque utilizzato quando le resine che vengono utilizzate sono ad alta temperatura (quindi immuni alla prima lavorazione). Nel valutare i materiali compositi si hanno:

-vantaggi: facilità di utilizzo, infatti gli operatori non sono in contatto con prodotti pericolosi, presentano una resistenza meccanica elevata, ed infine si ottiene un rapporto fibra/resina perfettamente misurato e controllato.

-svantaggi: dal momento che la resina epossidica è in una fase B, è necessaria la conservazione refrigerata a  $-18^{\circ}\text{C}$ , inoltre la vita del prodotto al di fuori del frigorifero può essere breve: da un paio di giorni fino ad un mese (a  $23^{\circ}\text{C}$ ).

### 2.3. Programma LIFE e progetto CIRCE

L'Unione Europea, dal 1992 ha intrapreso un rapido programma di ricerca e sviluppo per minimizzare gli impatti ambientali allo scopo di salvaguardare il pianeta nei confronti di fenomeni quali: cambiamenti climatici, effetto serra, buco dell'ozono e molti altri. Proprio negli anni '90 viene creato il programma LIFE, strumento di finanziamento dell'UE per portare avanti azioni contro il deterioramento climatico e ambientale; da questa data fino ad oggi sono stati finanziati 5500 progetti con un controvalore monetario di circa 7 miliardi di euro.

Per quanto riguarda il programma LIFE, esso è stato suddiviso in:

- LIFE Natura: dedicata ad azioni mature e di conservazione
- LIFE Ambiente: dedicata all'attuazione della legislazione dell'UE sull'ambiente
- LIFE Paese: dedicata ad azioni in paesi sulle rive del Mar Mediterraneo e Baltico.

Il budget attuale di 3,4 miliardi è diviso in due sottoprogrammi: 75% stanziati per l'ambiente, 25% per azioni sul clima; le quantità di denaro già utilizzate hanno portato ad una migliore qualità dell'aria, a rendere le città più verdi e soprattutto hanno aiutato le industrie nei loro programmi di modernizzazione (che avevamo come finalità la creazione di prodotti eco-friendly o la riduzione minima dei rifiuti).

Uno dei tanti progetti appartenenti al programma LIFE è CIRCE, esso ha avuto inizio nel 2019 e dovrebbe concludersi nel 2022. La "mission" di tale progetto è la creazione di un modello di economia circolare per gli scarti preimpregnati di polimeri rinforzati con fibre di carbonio non polimerizzate. In tale contesto verranno proposte delle analisi di sensibilità che verranno illustrate al capitolo 4, lo scopo è quello di riuscire a raggiungere una valorizzazione del 100% dei rifiuti trasformandoli in materia prima secondaria utile per i sistemi di produzione, sempre tenendo presente che gli scarti hanno caratteristiche meccaniche minori rispetto alle materie prime (quindi necessitano di ulteriori lavorazioni).

Lo scarto di prepreg si ha principalmente per due fattori: il fine vita cioè la perdita delle loro caratteristiche funzionali oppure scarti di rifilatura e di fine rotolo; tali scarti possono riguardare dal 25% al 50% del preimpregnato madre utilizzato. La finalità di questo progetto è recuperare l'intero accumulo di scarti (una quantità non indifferente)

che in precedenza finiva in discarica o negli inceneritori con enormi ripercussioni sull'inquinamento ambientale, quindi con tali studi si ha intenzione di determinare un nuovo metodo di utilizzo degli scarti di prepreg creando applicazioni utili e soprattutto economicamente convenienti. Attraverso l'utilizzo di tabelle Excel valuteremo proprio questi due aspetti: l'abbattimento dei costi (e quindi degli sprechi) e l'abbattimento dell'inquinamento.

In Italia i partner che hanno aderito a tale iniziativa sono state 5 aziende operanti nei settori della ricerca e dello sviluppo, una di queste è HP COMPOSITES che è leader mondiale nella creazione di componenti in fibra di carbonio, si trova ad Ascoli Piceno, ed è il coordinatore di tale progetto. La previsione fatta dai 5 partner, a progetto concluso (dopo circa 3 anni dalla sua immissione nel mercato internazionale), ha permesso di stabilire che i benefici saranno vari e importanti: 5000 tonnellate annue di prepreg recuperato, emissioni di CO2 ridotte drasticamente (circa 250000 tonnellate annue) e naturalmente, un consumo energetico ridotto (di circa 150 GWh annui). Naturalmente queste sono stime fatte in sede di ricerca, all'atto pratico potrebbero variare in eccesso o in difetto, l'unica cosa certa è l'importanza dell'innovazione che la conclusione di questo progetto porterebbe prima in Italia, poi in Europa ed infine nel mondo.

Il processo di recupero sviluppato nell'ambito del progetto CIRCE consiste nell'utilizzo di due nuove macchine per la lavorazione degli scarti di preimpregnati ottenuti dal processo di taglio dei preimpregnati di tessuto. Una di queste tagliuzzo gli scarti in piccoli pezzi (nelle tabelle successive verrà utilizzato il nome inglese "cutting scrap machine"). La dimensione e la forma degli sfridi tagliati variano a seconda delle precedenti operazioni di taglio effettuate sui rotoli preimpregnati. La seconda è una macchina di spellicolamento (peeling machine) utilizzata per staccare la carta dagli scarti di preimpregnato, in questo modo questi sono pronti per nuovi processi produttivi. Se gli scarti non vengono utilizzati subito dopo tali operazioni, devono essere conservati in un luogo refrigerato per evitare l'indurimento della resina. Il materiale vergine considerato in questo studio è un tessuto preimpregnato composto da lunghe fibre di carbonio incorporate in una resina epossidica.

Il processo di preparazione trasforma i rifiuti preimpregnati di “tessuto a fibre lunghe vergini” in piccoli pezzi di prepreg di tessuto a fibre corte. Ne consegue che le proprietà meccaniche del materiale di recupero sono inferiori rispetto a quelle del materiale vergine.

Gli scarti si possono utilizzare per: la produzione di puntali, di parti per il settore automobilistico e di freni carboceramici.

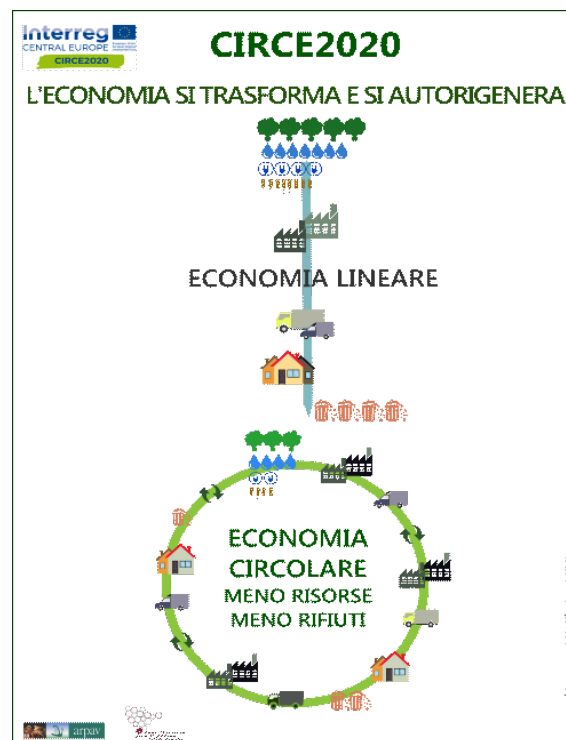


Figura 2.2. Progetto Circe



# **CAPITOLO 3**

## **TIPI DI PROCESSI PRODUTTIVI DI MATERIALI COMPOSITI**

### **3.1. Stampaggio a compressione**

Lo stampaggio a compressione (nella tabella verrà descritto come CM dall'inglese "compression molding") è una delle più antiche tecniche di lavorazione. Per adottare questo metodo bisogna utilizzare un forno o attrezzature adatte a riscaldare le materie prime, uno stampo (in questo caso composto dalla cavità o femmina, di solito attaccato alla parte inferiore della pressa e, dal pistone o maschio, che è attaccato alla parte superiore) ed una pressa idraulica con piani riscaldati. In ordine saranno necessarie le seguenti azioni:

1. Preparazione e posizionamento: la materia prima (o precarica, o carica) viene appesantita e posta nello stampo caldo e nel caso di parti spesse, la carica può essere preriscaldata. Il posizionamento della materia prima è un fattore chiave per la qualità del pezzo, poiché influenza l'orientamento della fibra, il contenuto di vuoti e la formazione della linea di maglia.
2. Chiusura stampo: lo stantuffo si abbassa e comprime la carica. All'aumentare della pressione e della temperatura, il materiale scorre e riempie la cavità, provocando la fuoriuscita di aria. Temperatura (tipicamente tra 150 e 200 ° C), pressione e velocità di chiusura stampo sono i parametri da considerare.
3. Polimerizzazione / raffreddamento: una volta che la cavità è completamente riempita, la temperatura e la pressione vengono mantenute. Nel caso di una matrice termoindurente, questo porta a una polimerizzazione completa (fase C) e la parte viene consolidata. Per la matrice termoplastica, il consolidamento avviene dopo il raffreddamento. Il tempo di indurimento dipende dal tipo di resina, dallo spessore della parte e dalla temperatura dello stampo. Il tempo di ciclo deve essere ridotto al minimo per migliorare l'efficienza economica

4. Rilascio parziale: non appena la resina è polimerizzata o ha una rigidità sufficiente, la parte viene rimossa dallo stampo con l'ausilio di perni di espulsione.

Successivamente il pezzo viene raffreddato a temperatura ambiente, mentre le superfici dello stampo vengono pulite e trattate con un distaccante, preparando gli strumenti per il ciclo successivo. Il materiale di cui deve essere composto lo stampo deve fare in modo che sia altamente resistente alle forze di taglio e alla forte compressione, per questo solitamente vengono utilizzati quelli in acciaio inossidabile o cromato. Lo stampaggio a compressione ha vantaggi e svantaggi:

- vantaggi: processo più antico rispetto agli altri (quindi i dati sulla lavorazione sono noti), più semplice, il costo degli utensili è minore, gli sprechi sono minimi, la pressione richiesta è minore rispetto ad altri e si ha un'elevata velocità di produzione.
- svantaggi: non si possono realizzare prodotti trasparenti, possono verificarsi imperfezioni superficiali (vaiolatura e ondulazione).

Tabella 3.1. Costi, componenti e quantità dello stampaggio a compressione

	COST	CM VIRGIN PRODUCTION	
		QUANTITY	COST FOR ONE PRODUCT
PREPREG	80 €/kg	0,066666667 kg	5,33 €
PREPREG WASTE	0,65 €/kg	0,028571429 kg	0,02 €
PE WASTE DISPOSAL	0,27 €/kg	0,006666667 kg	0,002 €
RELEASE AGENT	20 €/kg	0,001 kg	0,02
VACUUM BAG	1,4 €/kg		
BREATHER	25 €/kg		
RELEASE PAPER	34,5 €/kg		
LABOR	20 €/h	1 h	20,00 €
ALUMINUM MOLD CM VIRGIN	475 €	0,001333333 pezzi	0,63 €
ALUMINUM COUNTERMOLD CM VIRGIN	475 €	0,001333333 pezzi	0,63 €
ALUMINUM MOLD SCRAP	570 €		
ALUMINUM COUNTERMOLD SCRAP	570 €		
ALUMINUM MOLD AUTOCLAVE	475 €		
PRESS	15000 €	2,14041E-05 h	0,32 €
REFRIGERATOR	600 €	3,91389E-06 h	0,00 €
CUTTING MACHINE	180000 €	1,39523E-08 h	0,0025 €
AUTOCLAVE	220000 €		
CUTTING SCRAP MACHINE	20000 €		
PEELING MACHINE	6000 €		
PRESS ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	1 kWh	0,17 €
STORAGE ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,082	0,01 €
CUTTING ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,010	0,002 €
AUTOCLAVE ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh		
CUTTING SCRAP ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh		
PEELING ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh		
		<b>TOTAL</b>	<b>27,15 €</b>

### 3.2. Produzione da scarti

La produzione da scarti verrà messa a confronto con la lavorazione del punto 1 e quella che verrà illustrata nel punto 3 (prod. in autoclave), affrontando quindi temi ambientali e economici con un'analisi accurata. La riduzione dell'impatto ambientale, però, non deve influenzare le prestazioni meccaniche del materiale, che devono rimanere invariate. Sono state prese in considerazione le produzioni da scarti di prepreg e rotoli di prepreg vergine, in questo le proprietà meccaniche del preimpregnato recuperato sono inferiori a quelle del vergine, quindi si ottiene lo stesso comportamento meccanico e necessita una produzione di preimpregnato vergine minore rispetto a quello per la lavorazione di materiale riciclato. Una conseguenza di ciò è la necessità di creare stampi più pesanti per tempi di lavoro più lunghi e maggior consumi energetici. Gli impatti ambientali sono negativi poiché evitano l'indirizzo dei rifiuti in discarica. Analizzando la tabella 3.2. si evince che il prepreg vergine in input è zero, che anch'esso utilizza stampi e controstampi (diversi rispetto a quelli del vergine) e oltre alle macchine utilizzate dal vergine verranno azionate le macchine che tagliano gli scarti e di spellicolamento.

Tabella 3.2. costi, componenti e quantità per la produzione in autoclave

	COST	SCRAP PRODUCTION	
		QUANTITY	COST FOR PRODUCT
PREPREG	80 €/kg	0 kg	0,00 €
PREPREG WASTE	0,65 €/kg	0 kg	0,00 €
PE WASTE DISPOSAL	0,27 €/kg	0,007777778 kg	0,002 €
RELEASE AGENT	20 €/kg	0,001166667 kg	0,02 €
VACUUM BAG	1,4 €/kg		
BREATHER	25 €/kg		
RELEASE PAPER	34,5 €/kg		
LABOR	20 €/h	1,1 h	22,00 €
ALUMINUM MOLD CM VIRGIN	475 €	0	0,00 €
ALUMINUM COUNTERMOLD CM VIRGIN	475 €	0	0,00 €
ALUMINUM MOLD SCRAP	570 €	0,001333333 pezzi	0,76 €
ALUMINUM COUNTERMOLD SCRAP	570 €	0,001333333 pezzi	0,76 €
ALUMINUM MOLD AUTOCLAVE	475 €		
PRESS	15000 €	2,14041E-05 h	0,32 €
REFRIGERATOR	600 €	3,19635E-06 h	0,00 €
CUTTING MACHINE	180000 €	1,39523E-08 h	0,0025 €
AUTOCLAVE	220000 €		0,00 €
CUTTING SCRAP MACHINE	20000 €	2,21969E-08	0,00 €
PEELING MACHINE	6000 €	4,43937E-08	0,00 €
PRESS ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	1,2 kWh	0,20 €
STORAGE ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,0672 kW	0,01 €
CUTTING ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,010	0,002 €
AUTOCLAVE ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh		
CUTTING SCRAP ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,000388889 kWh	6,61111E-05 €
PEELING ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,006533333	0,001110667 €
			24,09 €

### 3.3. Stampaggio in autoclave

Lo stampaggio in autoclave è anche chiamato “processo sottovuoto”, ciò perché viene utilizzato un sacco a vuoto per coprire il pezzo che viene messo in autoclave dove, a pressione e temperature rigidamente controllate, vengono polimerizzate le resine. L'autoclave è fondamentalmente un recipiente che utilizza aria, vapore, azoto e CO<sub>2</sub> come gas riscaldato circolante. L'errore principale che potrebbe verificarsi in questo tipo di lavorazione è dato dal posizionamento manuale (errore umano), per cui i ricercatori stanno progettando un metodo automatizzato per eliminarlo.

La lavorazione dello stampaggio in autoclave prevede diverse fasi:

- Nella prima fase viene preparato lo stampo pulendolo con l'utilizzo di agenti distaccanti che facilitano anche l'estrazione del materiale dal pezzo, rimuovendo anche le eccedenze dello stesso.
- Nella seconda, viene tagliato un foglio sottile di fibre impregnato nella matrice polimerica (prepreg) delle dimensioni e della forma desiderata (naturalmente il prepreg viene tolto dal magazzino refrigerato e, poi tagliato).
- Nella terza fase la carta di supporto in polietilene viene rimossa dal prepreg e gli strati vengono impilati manualmente per formare un componente della forma desiderata. I metodi per sviluppare questa terza fase sono due: prima gli stampi di prepreg vengono impilati e poi, posizionati nello stampo oppure vengono depositati direttamente nello stampo. Ottenuto lo spessore desiderato, si posiziona il sacco sottovuoto e vengono eliminati aria e resina in eccesso.
- La quarta fase prevede la cura e il consolidamento all'interno dell'autoclave. La cura a sua volta si divide in 3 fasi: riscaldamento (aumento lento della temperatura all'interno dell'autoclave), la manutenzione (temperatura e pressione stabilmente costanti), il raffreddamento (l'aria fredda raffredda il laminato e la pressione all'interno del sacco aumenta). A seconda del tipo di resina utilizzata, il ciclo di polimerizzazione in autoclave può richiedere dai 30 minuti, alle quattro ore. Questo tipo di lavorazione è ottimo per la produzione di componenti di grandi dimensioni (quindi per pezzi aerospaziali e/o prototipi automobilistici), utilizza materiali

costosi ed è difficile determinarne la quantità di gas necessario poiché il metodo utilizzato è la convezione (quindi anche in questo caso, i tempi tendono a dilatarsi). Nella tabella 3.3. il processo in autoclave è di colore viola e, utilizza solo uno stampo (non ha bisogno del controstampo), non utilizza i macchinari per pressare ma, di contro, utilizza l'autoclave.

Tabella 3.3. Costi, componenti e quantità per la produzione con autoclave

	COST	AUTOCLAVE PRODUCTION	
		QUANTITY	COST FOR PRODUCT
PREPREG	80 €/kg	0,066666667 kg	5,33 €
PREPREG WASTE	0,65 €/kg	0,028571429 kg	0,02 €
PE WASTE DISPOSAL	0,27 €/kg	0,006666667 kg	0,002 €
RELEASE AGENT	20 €/kg	0,0005 kg	0,01 €
VACUUM BAG	1,4 €/kg	0,035 kg	0,05 €
BREATHER	25 €/kg	0,01 kg	0,25 €
RELEASE PAPER	34,5 €/kg	0,00034 kg	0,01 €
LABOR	20 €/h	1,5 h	30,00 €
ALUMINUM MOLD CM VIRGIN	475 €		- €
ALUMINUM COUNTERMOLD CM VIRGIN	475 €		- €
ALUMINUM MOLD SCRAP	570 €		- €
ALUMINUM COUNTERMOLD SCRAP	570 €		- €
ALUMINUM MOLD AUTOCLAVE	475 €	0,001333333 pezzi	0,63 €
PRESS	15000 €	0	- €
REFRIGERATOR	600 €	3,91389E-06 h	0,00 €
CUTTING MACHINE	180000 €	1,39523E-08 h	0,0025 €
AUTOCLAVE	220000 €	1,14155E-06 h	0,25 €
CUTTING SCRAP MACHINE	20000 €		
PEELING MACHINE	6000 €		
PRESS ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh		- €
STORAGE ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,08	0,01 €
CUTTING ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,010	0,002 €
AUTOCLAVE ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh	0,37 kWh	0,063 €
CUTTING SCRAP ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh		
PEELING ENERGY CONSUMPTION	0,17 €/kWh		
			36,64 €

## **CAPITOLO 4**

### **COSTI: ANALISI E DATI DI SENSIBILITA'**

#### **4.1. Introduzione all'analisi di sensibilità**

Lo studio dei costi delle tre modalità di produzione parte dall'analisi sulle tabelle del capitolo 3. Lo scopo dello studio è valutare il variare dei prezzi delle variabili in input purchè rimanga più conveniente la produzione da scarti. Questo tipo di studio viene chiamato "analisi di sensibilità" poiché misura quanto il problema è sensibile rispetto alle variabili che lo compongono, è un modo per prevedere il risultato di una decisione data una gamma di variabili. Lo studio delle variabili in input e delle variabili target, se fatto in maniera ottimale, permette la rilevazione tempestiva di criticità che altrimenti, con la sola continuità, potrebbero non essere rilevate o rilevate troppo tardi.

Esistono vari software e applicazioni per avviare un'analisi di sensibilità, in questo progetto è stato utilizzato un semplice foglio di calcolo: Excel; grazie alla possibilità di ripetere conti senza la continua immissione di funzioni e di calcoli, l'analisi risulta veloce e snella, l'errore è nullo e le grafiche ben organizzate. Le funzioni che verranno mostrate saranno: somma, prodotto, minimo (tra due classi di prodotti, verrà preso il valore minimo per ogni riga), differenza e la variazione percentuale.

Per svolgere l'analisi di sensibilità verrà aperta una colonna che andrà dal -100% al +100%, questo determinerà la variazione percentuale di ogni variabile ed è quella che verrà utilizzata di più poiché è essenziale per lo studio di ogni variabile in input.

## 4.2. Analisi del prepreg vergine

La prima variabile che dovrà essere processata è il prepreg, le funzionalità, la struttura e l'utilizzo sono stati largamente trattati nel capitolo 2. Nel caso dello stampaggio per compressione e in quello della produzione in autoclave il prepreg è la materia prima e, con un costo di 80 euro/kg ed una quantità di 0,067 kg/prodotto, il prezzo finale per prodotto sarà lo stesso in entrambi i casi (5,33 euro). Nel caso della produzione da scarti, il prezzo e la quantità del prepreg non sono rilevanti (la materia prima non è il prepreg ma, i suoi scarti a costo zero) quindi in questo caso verrà tenuto il prezzo della produzione che utilizza gli scarti costante (22,09) mentre verranno compiute due azioni per gli altri due processi:

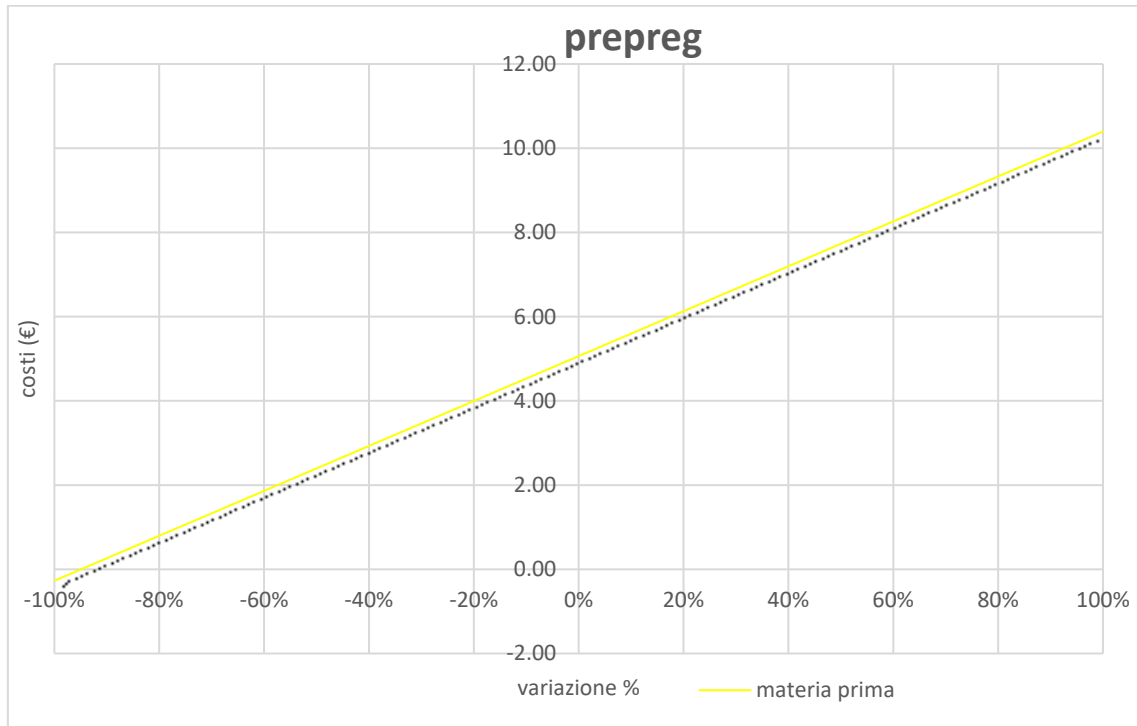
1. Si farà variare il costo del prepreg (costo al kg\*quantità per ogni prodotto) dal -100% al +100% fino ad avere una probabile oscillazione dei prezzi.
2. Per capire se, dopo questa oscillazione, conviene di più produrre materiali con compression molding o in autoclave a discapito della produzione da scarti, viene fatta la somma di tutti i costi fissi già presenti nella tabella iniziale e, alla voce "prepreg" immettere le varie percentuali di fluttuazione del prezzo del prepreg.
3. Verrà effettuata la differenza del valore totale della produzione da scarti (in questo caso costante) con il minimo del prezzo tra la produzione in autoclave e lo stampaggio a compressione che utilizza prepreg vergine
4. Valutazione del trend ottenuto.

Tabella 4.1. Analisi di sensibilità del prepreg vergine

		<b>prepreg</b>						
variazione	variabile	costo prereg per prodotto	costo cm virgin	scrap production	costo per prodotto	costo tot autoclave	cm vs cm scrap	risparmio % vs risparmio i
-100%	0,00	0,00	21,82	22,09	0,00	31,31	-0,27	-105,36%
-99%	0,80	0,05	21,87	22,09	0,05	31,36	-0,22	-104,31%
-98%	1,60	0,11	21,93	22,09	0,11	31,42	-0,16	-103,25%
-97%	2,40	0,16	21,98	22,09	0,16	31,47	-0,11	-102,20%
-96%	3,20	0,21	22,03	22,09	0,21	31,52	-0,06	-101,14%
-95%	4,00	0,27	22,09	22,09	0,27	31,58	0,00	-100,09%
-94%	4,80	0,32	22,14	22,09	0,32	31,63	0,05	-99,04%
-93%	5,60	0,37	22,19	22,09	0,37	31,68	0,10	-97,98%
-92%	6,40	0,43	22,25	22,09	0,43	31,74	0,16	-96,93%
-91%	7,20	0,48	22,30	22,09	0,48	31,79	0,21	-95,88%
-90%	8,00	0,53	22,35	22,09	0,53	31,84	0,26	-94,82%
-89%	8,80	0,59	22,41	22,09	0,59	31,90	0,32	-93,77%
-88%	9,60	0,64	22,46	22,09	0,64	31,95	0,37	-92,72%
-87%	10,40	0,69	22,51	22,09	0,69	32,00	0,42	-91,66%
-86%	11,20	0,75	22,57	22,09	0,75	32,06	0,48	-90,61%
-85%	12,00	0,80	22,62	22,09	0,80	32,11	0,53	-89,56%

Risultando la tabella di grandi dimensioni, viene illustrato solo l'andamento dal -100% al -85%, il trend completo dei valori verrà mostrato in un grafico unico:

grafico 4.1. prepreg



Interpretazione dei risultati:

L'interpretazione dei risultati è la parte più importante dell'analisi di sensibilità e non va mai trascurata poiché grazie ad essa si riesce a capire l'eventuale presenza di errori nello studio e se, i risultati hanno una tendenza conforme con le aspettative.

In questo caso, si nota che per una variazione del -100% della variabile in input "prepreg", il costo totale dello stampaggio a compressione risulta minore rispetto a quello da scarti: questo dato era tra le ipotesi che s'erano intavolate prima di compiere lo studio algebrico, infatti nel caso della produzione da scarti il costo della materia prima rimane costante, mentre negli altri due il prezzo viene diminuito del 100%. Il dato importante è che, dal -95% della variazione in poi, la differenza tra la produzione da scarti e le altre due:

- Ha segno positivo
- È continuamente crescente



Questo significa che, se il prepreg ha un aumento di prezzo consistente, la produzione che utilizza gli scarti valorizzando il loro riciclo risulterà univocamente la scelta più consigliata, più economica e con meno rischi.

L'ultima colonna della tabella 4.1. è composta da percentuali, quest'ultima disamina è fondamentale nell'ottica generale: esso descrive il rapporto del prepreg rispetto il prezzo di produzione, quindi evidenzia quanto questa variabile in input pesa sull'economia globale del sistema (in conclusione, quanto la variazione % di tale input pesa sulla scelta della produzione). Questa percentuale è stata trovata facendo:

risparmio % vs risparmio iniziale=  $\{[\text{scarti}-\text{min}(\text{due casi})]*x\}/x$

con x si intende la differenza tra il prezzo iniziale dello stampaggio per compressione che utilizza prepreg vergine e il prezzo iniziale della produzione per scarti (quindi,  $27,15-22,09=5,06$ ). Il fatto che le percentuali siano così alte evidenzia il fatto che il prezzo del prepreg ha una rilevanza netta nell'economia della scelta. Come si era visto nel grafico 4.1. all'aumentare del 100% del prezzo ci sarà un aumento della differenza delle due casistiche di 10 euro/prodotto che, è un aumento rilevante. Si poteva immaginare quest'esito dall'analisi della figura 3.1. ove dopo la voce riguardante la manodopera, il prezzo del prepreg è il maggior componente economico del prezzo totale, quindi avrà una rilevanza importante. Bisogna comunque, sottolineare un fattore importante: il prepreg viene considerato con un prezzo (allo 0% della variazione) di 80 €/kg, calcolato in eccesso, poiché secondo i dati sul prezzo di acquisto, il suo costo poteva fluttuare dai 20 €/kg fino ad un massimo di 80€/kg. Ciò è rilevante proprio perché dall'analisi di sensibilità si riesce ad evidenziare che nel range tra i 20 €/kg (che nell'analisi di sensibilità ammonta ad una variazione del -75% sul prezzo inizialmente ipotizzato) e gli 80€/kg (variazione dello 0%), la produzione da scarti risulta comunque la più economica. Quindi, per non essere più conveniente, il prezzo del prepreg deve arrivare a 3,2 €/kg (variazione del -96%), ciò è materialmente impossibile poiché il preimpregnato ha costi sicuramente e nettamente maggiori. Quindi, nonostante si utilizzi un peso così basso di prepreg (70g) per prodotto, risulta fortemente conveniente la scelta della produzione da scarti, parimenti se si considerano prodotti di automotive che pesano 20/30 kg il guadagno aumenterà esponenzialmente.

### 4.3. Analisi di sensibilità dell'energia

La seconda variabile che verrà trattata è l'energia: questo tipo di variabile non subirà un'elaborazione dettagliata poiché lo scopo principale sarà dimostrare che la sua variazione non influenza la scelta delle 3 produzioni. Infatti, osservando i dati di ogni tabella di costo, essa ha una rilevanza minima: il costo maggiore per prodotto (in relazione anche alla quantità necessaria) è di 0,20€, che se dovesse avere una variazione del 100% risulterebbe comunque una differenza minima.

Quello che si può notare è che le lavorazioni non utilizzano macchinari perfettamente omologhi: ad esempio lo stampaggio a compressione non utilizza né l'energia per mettere in funzione l'autoclave, né l'energia per tagliare gli scarti e così via.

Un'illogica conseguenza di questo studio potrebbe essere la generalizzazione del lettore nella valutazione dell'energia come economica o irrisoria nella visione del costo di ogni prodotto. Invece, ciò avviene in questa specifica lavorazione, l'energia ha poca valenza poiché ha un basso utilizzo, dato che i pezzi di lavorazione non sono di grandi dimensioni, al contrario, nel caso della creazione di pezzi più grandi sicuramente sarebbe stata necessaria più energia che ne avrebbe fatto lievitare l'incidenza.

Quindi, in questo caso specifico, avendo l'energia sempre lo stesso costo per tutte le lavorazioni e, essendo la quantità necessaria d'energia per ogni pezzo minima, l'analisi di sensibilità di questa, potrebbe sembrare inutile (poiché i valori con il tempo, variando, non cambiano la scelta del processo produttivo).

Comunque non sempre il costo dell'energia è residuale nell'economicità del prodotto, infatti risulterebbe utile, se non, necessario nei casi in cui si:

- utilizzano ingenti quantità d'energia;
- utilizzano poca energia ma, per tempi molto lunghi;
- il prezzo dell'energia risulterebbe particolarmente alto, infatti questo spesso dipende dal paese in cui viene utilizzata: ad esempio, in Italia il suo costo è molto maggiore rispetto ad altri paesi europei (in Italia viene gonfiato il prezzo dalle imposte alte e dagli oneri di sistema). Quindi, se nello studio delle casistiche, dovesse

esserci di mezzo anche il luogo di lavorazione, questa potrebbe essere una variabile fondamentale a livello economico, nella scelta.

Tutte queste ipotesi sono solo una parte di quelle che possono provocare una variazione del prezzo dell'energia, quindi, va sottolineato che le tre lavorazioni che vengono prese in considerazione sono un'eccezione rispetto alla moltitudine di casi che si potrebbe trovare nei vari mercati mondiali.

#### **4.4. Analisi di sensibilità della manodopera**

La terza variabile che verrà processata sarà la manodopera (sulle tabelle e sui grafici avrà la denominazione inglese "labor") che ha un prezzo alto nell'economia del prodotto, per cui la sua analisi è importante ed essenziale. Per la produzione da scarti e per lo stampaggio a compressione che utilizza materia prima vergine il tempo per unità di prodotto è di 1 ora, mentre, per la produzione in autoclave il tempo stimato è di 1 ora e mezza. Il prezzo al minuto è lo stesso, per cui risulteranno necessari: 30 euro per produrre un pezzo in autoclave, 20 euro per produrre un pezzo con gli altri due metodi.

Ciò evidenzia in modo palese, ancor prima d'effettuare calcoli che: al variare della manodopera (dal -100% al +100%) cambieranno poco in proporzione i prezzi infatti vengono fatti variare contemporaneamente e, una volta messi a confronto ci sarà sicuramente un andamento quasi costante della loro differenza. Per avviare tale studio verrà organizzata una tabella simile a quella riportata in precedenza (tabella 4.1.) e, fondamentale sarà verificare analiticamente che la differenza tra le produzioni rimanga per lo più costante nel tempo.

Come per ipotesi, la variazione % della differenza (scarti-minimo tra le due) rimane costante dopo una certa percentuale. Questo studio potrebbe, però, non essere utile nella scelta del tipo di lavorazione.

Così è stata provata una nuova tecnica per determinare quanto la variazione del lavoro della produzione da scarti può variare continuando ad essere quella più economica: tenere lo stampaggio a compressione e la produzione in autoclave costante e, far variare solo il costo della manodopera della produzione da scarti. Così facendo, verrà verificata quale % di variazione è ammessa per continuare ad avere un costo totale della scrap production minore rispetto le altre. Risulterà quindi uno studio mirato, preciso, conforme agli obiettivi del progetto. L'analisi della manodopera effettuata in precedenza, a livello meccanico, non è ottimale poiché da un lato si deve mettere uno sopra l'altro degli strati che hanno una forma definita e sono difficili da gestire. Quindi ha bisogno di maggior manodopera (maggior tempo); d'altra parte, con materiale di scarto si utilizzano pezzettini piccoli di scarti che vengono sistemati all'interno dello

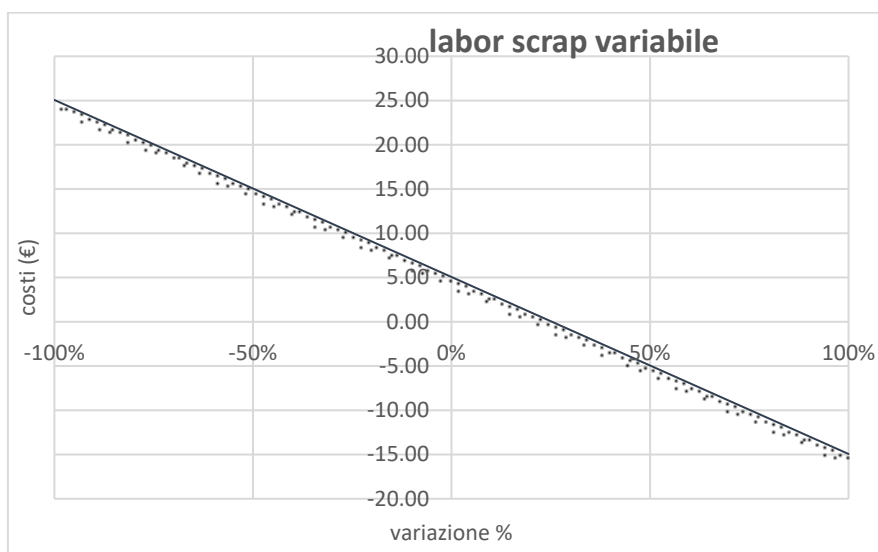
stampo (poi compattati nella pressa), quindi tendenzialmente il costo della manodopera dovrebbe diminuire. La parte interessante sarà quindi quella che andrà dallo 0% al -50% dello studio che verrà proposto.

Sviluppando la solita tabella utile per queste tipologie di analisi, la produzione da scarti risulta comunque la più economica dal -100% fino al +26%, nel caso in cui dovesse variare oltre, risulterebbe più economico lo stampaggio a compressione. Comunque, questo risultato era immaginabile poiché la manodopera è una voce di costo importante (addirittura il 90,5% per gli scarti), quindi al variare di essa, è prevedibile che cambi l'intero orientamento della scelta. In questo caso, la manodopera potrebbe avere un incremento maggiore del 26% rispetto al costo ipotizzato se:

- ✓ Il valore fosse interamente ipotizzato (senza raccolta dati o senza promuovere uno studio dettagliato)
- ✓ se ci sono stati aumenti dei costi o l'esecuzione dei lavori si presenti particolarmente difficoltosa.
- ✓ se ci sono state delle "varianti" rispetto al progetto originario.
- ✓ Se vi sono aumenti delle retribuzioni degli operai e degli impiegati, compresi quelli per le assicurazioni sociali ed ogni altro contributo obbligatorio per il datore di lavoro.

Il grafico ottenuto sarà la risultante dei dati trovati:

*grafico 4.2. Labor variabile solo per la produzione da scarti*



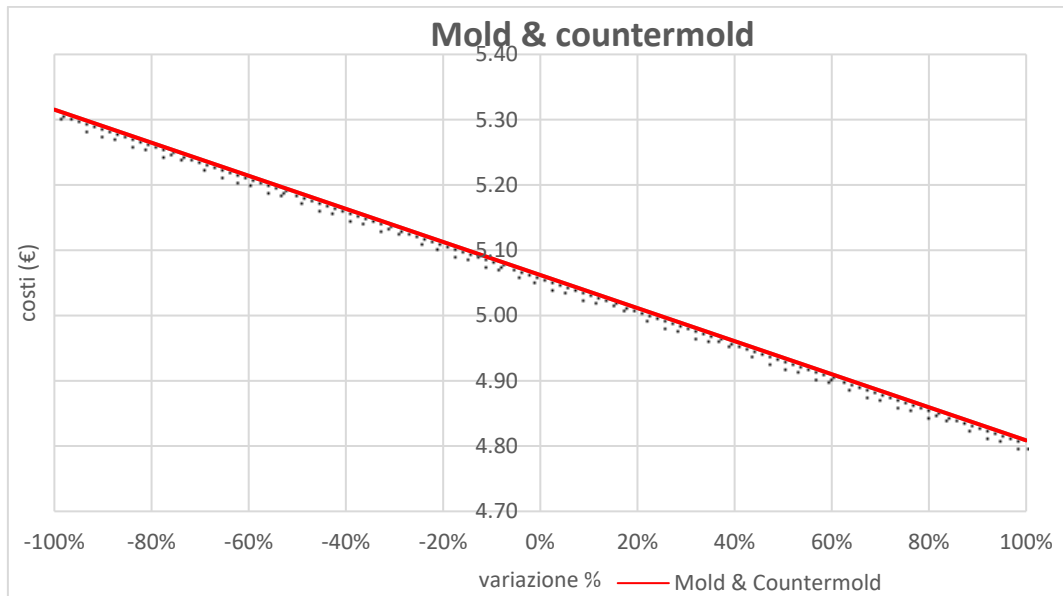
Il coefficiente angolare della retta è negativo, quindi la retta ha valori decrescenti, ciò significa che la produzione da scarti risulterà pian piano meno conveniente finché, arrivando nel quarto quadrante degli assi cartesiani, sarà decisamente meno economico dello stampaggio a compressione che utilizza prepreg vergine.

#### **4.5. Analisi di sensibilità sul prezzo dello stampo e del controstampo**

L'utilizzo dello stampo e del controstampo è strettamente dipendente al tipo di produzione che verrà effettuata. Come citato nei capitoli precedenti, il materiale più performante è l'alluminio poiché ha delle ottime qualità meccaniche, tra tutte, la leggerezza, la duttilità e la resistenza ad alte temperature.

Come si vede dalle tabelle delle 3 lavorazioni (tab. 3.1, tab. 3.2., tab. 3.3.) ognuna di esse ha uno specifico stampo e controstampo mentre, nella produzione in autoclave lo stampo maschio non viene utilizzato poiché viene esercitata una pressione verticale sulla femmina per ottenere il livello di vuoto necessario. Nell'osservare i dati trovati si può facilmente ipotizzare che la variazione di tali prezzi non è rilevante, infatti rispetto al totale ha una percentuale di incidenza rispettivamente del 4,6% (stampaggio a compressione che utilizza unicamente prepreg verine), 6,8% (produzione da scarti di prepreg) e 1,71% (produzione in autoclave). Da queste percentuali d'incidenza, però, si può evincere comunque che nella produzione da scarti tale voce è più rilevante rispetto alle altre due, quindi, si potrà dedurre che all'aumentare di tale prezzo (in percentuale) la differenza di convenienza tra la produzione da scarti e il minimo degli altri due diminuisca man mano. Creando la tabella dell'analisi di sensibilità, e procedendo ad analizzare la differenza tra la produzione da scarti e il minimo tra gli altri due casi, si nota che tali valori diminuiscono mano a mano, creando una trend negativo. Ma esso decresce in modo lento, quindi è probabile che con una variazione del 100% rimanga comunque la produzione da scarti la più economica. Per comprovare che tutte le ipotesi fatte fin ora sono giuste, escludendo la mancata considerazione di qualche elemento, ne è stato tracciato il grafico (da una variazione del -100% a 100%).

Grafico 4.3. Mold & counter mold



Lo studio del grafico ha permesso di stabilire che tutte le ipotesi avanzate sono verificate e giustificate. Naturalmente avendo un trend negativo, il coefficiente angolare della retta è negativo. Per completezza si potrebbe calcolare il coefficiente angolare, per avere una visione chiara dell'andamento (anche oltre il 100%): la retta ha equazione  $y = -0,2533x + 5,062$ , quindi il suo coefficiente angolare è  $m = -0,25$  che rispecchia a pieno tutte le ipotesi sviluppate fin ora: la retta decresce, ma in modo lento.

La retta ottenuta permette di trovare anche il punto di intersezione con l'asse x, cioè quando la differenza tra la produzione da scarti e il minimo dei valori delle altre due produzioni è uguale a zero. Questo sarà utile per capire la massima variazione della variabile in input continuando ad avere una produzione da scarti più economica.

Dalla valutazione grafica si è riscontrato che, i valori avranno ordinata nulla con una variazione percentuale del 2108,3 %, una percentuale elevatissima, che poteva essere preventivata dato che il coefficiente angolare non ha una pendenza tale da portare il grafico a grandi variazioni dell'ascissa o dell'ordinata nel breve periodo. Il costo degli stampi per la produzione da scarti è maggiore rispetto agli altri poiché per questo tipo di lavorazione gli stampi sono più grandi, quindi un aumento di volume comporta un aumento di materia prima (alluminio) e, quindi un aumento del prezzo.



A fronte dell'analisi di sensibilità, invece, la produzione con autoclave, non subisce una variazione significativa poiché nonostante lo stampo abbia lo stesso volume (e quindi la stessa quantità di alluminio, e lo stesso prezzo) dello stampaggio a compressione, non utilizzando il controstampo, la sua variazione percentuale è minima rispetto al prezzo totale. L'ipotesi che si può avanzare è che per variazioni molto importanti (ai limiti del possibile) la produzione in autoclave potrebbe essere più conveniente rispetto alle altre due produzioni, ciò avverrebbe se il prezzo dell'alluminio dovesse andare incontro ad un innalzamento importante dei prezzi. Spesso quando succedono questi imprevisti, le aziende cercano nuovi materiali da utilizzare per la creazione degli stampi e quindi continuare ad avere una produzione funzionale ed economica ma, se ciò non dovesse succedere o non si dovesse trovare una degna alternativa: la produzione per autoclave risulterebbe la migliore.

## 4.6. Analisi di sensibilità sui macchinari di taglio e spellicolamento

Prima di concludere l'analisi di sensibilità sui costi, verrà proposto un ultimo studio, quello sui macchinari di taglio e spellicolamento utilizzati soltanto per la produzione da scarti. Quindi, lo studio che verrà attuato sarà centrato solamente sulla variazione di quest'ultima tipologia di produzione e, sarà importante capire quanto può incidere l'input per la variazione della decisione sul tipo di produzione.

Già dalle tabelle iniziali (cap. 3) si può ipotizzare che questa variazione non porti a grandi cambiamenti dato che, nonostante il costo alto dei macchinari, il prezzo per la produzione di un singolo prodotto è quasi nullo.

Tabella 4.5. cutting & peeling

<b>cutting &amp; peeling</b>				
variazione	costo macchinari per prodotto	costo scrap	scarp vs min	% vs iniziale
0,00000 €	0,00000 €	22,08927 €	5,06276 €	0,01%
260,00000 €	0,00002 €	22,08929 €	5,06274 €	0,01%
520,00000 €	0,00003 €	22,08930 €	5,06272 €	0,01%
780,00000 €	0,00005 €	22,08932 €	5,06270 €	0,01%
1.040,00000 €	0,00007 €	22,08934 €	5,06269 €	0,01%
1.300,00000 €	0,00009 €	22,08936 €	5,06267 €	0,01%
1.560,00000 €	0,00010 €	22,08937 €	5,06265 €	0,01%
1.820,00000 €	0,00012 €	22,08939 €	5,06264 €	0,01%
2.080,00000 €	0,00014 €	22,08941 €	5,06262 €	0,01%
2.340,00000 €	0,00016 €	22,08943 €	5,06260 €	0,01%
2.600,00000 €	0,00017 €	22,08944 €	5,06258 €	0,01%
2.860,00000 €	0,00019 €	22,08946 €	5,06257 €	0,01%
3.120,00000 €	0,00021 €	22,08948 €	5,06255 €	0,01%
3.380,00000 €	0,00023 €	22,08950 €	5,06253 €	0,01%
3.640,00000 €	0,00024 €	22,08951 €	5,06251 €	0,01%

Anche con un costo iniziale elevato dei macchinari, il loro contributo risulta trascurabile per ogni singolo prodotto. Questo è un classico per le aziende, e spesso, tale analisi è

necessaria per capire quanto sia conveniente a livello produttivo comprare macchine di valore rispetto al prezzo unitario per prodotto: infatti, se la variazione fosse stata maggiore, si avrebbe un impatto negativo sull'azienda e per ogni unità di prodotto il prezzo sarebbe maggiore.

Valutando il risparmio dell'utilizzo della produzione che utilizza gli scarti, a discapito delle altre due lavorazioni e, facendo variare il taglio e lo spellicolamento in %, ci si è resi conto che l'andamento della variazione è molto lenta. Si è provato a verificare se, tenendo in considerazione un prezzo decisamente maggiore rispetto a quello ipotizzato (totale di 208 mila, a fronte dei 26 mila iniziali), questa differenza si sarebbe avvicinata verso lo zero (andando ad evidenziare un trend non conveniente per l'azienda se dovesse scegliere di avviare una produzione da scarti). Invece, il valore "scrap-minimo" vale esattamente 5,04891 (ipotesi 208 mila euro). Una variazione così sostanziale del costo dei macchinari (700%) potrebbe essere dovuta all'aumento del prezzo della macchina per la carenza delle materie prime che la compongono, oppure un aumento della domanda negli anni (che porterebbe ad un aumento dei prezzi), oppure il monopolio della produzione di queste macchine da parte di alcune aziende che, decidono di aumentare i prezzi a causa delle politiche fiscali, fiscali doganali e aumento obbligatorio dei salari dei dipendenti. Comunque, attraverso quest'analisi si è compreso che, anche se dovessero verificarsi questi imprevisti, la produzione da scarti sarebbe comunque quella consigliata.

Se dovessimo rappresentare graficamente l'andamento, ci si aspetta un trend negativo ma, con un'essenziale premessa: la variazione delle  $y$  (differenza di costo) sarà minima rispetto le variazioni percentuali. Nel dettaglio questo tipo di grafico avrà un andamento molto simile a quello sviluppato nel grafico 4.3. e, andando a calcolare analiticamente l'equazione della retta, essa sarà:  $y = -0,0017x + 5,061$ , ciò significa un  $m = -0,0017$ . Questo valore aumenta le informazioni riguardo questo studio, esso non ha solamente un andamento simile a quello dello stampo e del controstampo ma, diminuisce ancora più lentamente, diventando insieme all'energia uno delle voci meno rilevanti dello studio sui costi.

## 4.7. Analisi totale della variabilità dei costi

Lo studio dei costi dei capitoli precedenti è stato focalizzato sull'analisi della produzione da scarti, poiché era la finalità principale del progetto CIRCE. All'appello manca lo studio e l'analisi di sensibilità sulle emissioni ambientali che verrà trattato nel capitolo successivo (capitolo 5), quest'ultima deve essere integrata alla precedente per avere una visione totale sulle tre lavorazioni.

L'analisi dei costi è stata fatta in maniera minuziosa, considerando ogni variabile in input e facendola variare in percentuale (andando spesso anche oltre il 100%), ma perché questo è stato utile?

La risposta è immediata: non sempre i prezzi che vengono stabiliti con i fornitori rimangono costanti, le problematiche potrebbero essere interne all'azienda:

- bisogno di maggior materiale, non pre-accordato con i fornitori (materiale extra)
- bisogno di materiale con maggiori qualità meccaniche (ad esempio per gli stampi) che porta ad un aumento della materia prima (ad esempio l'alluminio)
- utilizzo dell'energia non in modo costante, quindi aumenti improvvisi di spese per l'energia.
- aumento del prezzo del lavoro orario (voce con maggior rilevanza) dovuto a fattori riguardanti: aumento obbligato degli stipendi degli operai, aumento degli stipendi con l'utilizzo di straordinari, aumento della difficoltà di lavorazione se vengono mutati i contesti lavorativi all'interno dell'azienda (diminuzione degli spazi lavorativi dovuti ad acquisto di nuovi macchinari o di altre cause interne)

Naturalmente queste opzioni possono essere viste in negativo (come fatto sopra) o in positivo (dallo 0% al -100% o meno).

Oppure, potrebbe presentarsi una variazione dei costi dovuti ai fornitori stessi, come:

- aumento o diminuzione dei costi fissi (come spedizioni)
- rottura di macchinari per la produzione di materie in process utili all'azienda
- dopo un'analisi dettagliata, il fornitore, potrebbe capire che il suo guadagno è minimo e potrebbe aumentare i prezzi in un secondo momento e, onde evitare un

altro studio olistico, valutando in percentuale quanto è aumentato, si potrebbe capire fin da subito se continua ad essere più economico produrre da scarti o negli altri due modi.

Queste ipotesi sono varie e spesso esagerate ma, nella vita di un'azienda potrebbe capitarne almeno uno o, addirittura tutte, quindi uno studio così dettagliato rende tutto più semplice. Avere una conoscenza larga delle spese e delle possibili problematiche rende l'azienda forte e invulnerabile da variazioni e fluttuazioni di prezzi, non creando confusione e instabilità ogni volta che queste si presentano.

# **CAPITOLO 5**

## **CED: ANALISI DI SENSIBILITA' E CONFRONTO**

### **5.1. Descrizione CED**

La Cumulative Energy Demand (CED) di un prodotto rappresenta l'uso diretto e indiretto di energia durante tutto il ciclo di vita, compresa l'energia consumata durante l'estrazione, la produzione e lo smaltimento delle materie prime e ausiliarie. Questo metodo è stato sviluppato subito dopo la crisi petrolifera dei primi anni '70 e permette di:

- individuare nell'intero sistema analizzato le fasi più energivore;
- fare da base per un bilancio ambientale;
- fare dei confronti con analisi in cui si considera la sola energia diretta.

Lo studio che verrà svolto è molto simile a quello effettuato per i costi (e che verrà poi riproposto anche per altri indicatori): viene stesa una tabella a doppia entrata, dove nella prima vengono elencate le tre tipologie di lavorazioni, e nell'altra le varie lavorazioni che vengono effettuate sulla materia prima, all'interno di tale tabella verrà quindi specificato l'impatto ambientale di ogni elemento.

La vera innovazione del progetto Circe è questo: non studiare solamente quale processo è più economico rispetto ad un altro ma, quale risulta: più economico, meno dannoso per l'ambiente, meno energivoro.

La cosa che bisogna specificare è che, ogni tipo di lavorazione utilizza dei macchinari diversi, materie prime diverse e metodi di taglio diversi. Quindi verrà svolta un'analisi centrata sulla lavorazione in sé e verranno fatte delle considerazioni sulle conseguenze della loro variabilità. Il prendere in considerazione anche le materie prime è alla base del CED, aspetto fondamentale di tale studio, infatti considerando gli usi diretti ed indiretti di energia riusciremo a definire se, l'impatto che ha il preimpregnato

sull'ambiente è così grande come veniva descritto ad inizio tesi. Verrà quindi dimostrato che nella produzione da scarto, non utilizzando preimpregnato vergine, gli impatti saranno minimi.

## 5.2. La fase di cura

La fase di cura (sulle tabelle e sui grafici sarà nominato "curing") della produzione da materiali di scarto è quella che ha un impatto maggiore rispetto alle altre due poiché nella produzione in autoclave consuma meno energia, mentre, tra le due alternative per compressione, quella con gli scarti è quella che consuma di più poiché gli stampi sono più pesanti.

Il concetto di base è che: utilizzando stampi più pesanti, viene utilizzato più materiale, bisogna riscaldarne di più (dovendo riscaldare gli stampi, più essi sono grandi, maggiore è l'energia termica che dovrà essere utilizzata).

Durante il ciclo di cura viene applicata una pressione che comporterà un aumento della viscosità della resina (capacità della resina di fluire, grazie proprio all'effetto di questa pressione applicata e dalla temperatura, tenuta costante). Durante questa fase, inoltre, viene eliminata la resina in eccesso:

resina effettiva-resina desiderata=resina in eccesso

inoltre, viene espulsa aria e volatili (tracce di solvente, monomeri, additivi di basso peso molecolare ecc.).

Se si dovesse, quindi, rappresentare schematicamente cosa accade durante questo processo, avremo:

- cura: durante questa fase il polimero viene scaldato sotto pressione al fine di aumentare la compattezza del materiale assicurando un buon legame fibra-matrice e minimizzare eventuali tensioni residue formatesi nella fase precedente a seguito del ciclo termico associato alla polimerizzazione;
- post-cura: durante questa fase il polimero viene riscaldato ad una temperatura superiore a quella precedente per ottenere un ulteriore indurimento della matrice (termoindurenti) ed un ulteriore rilascio delle tensioni residue eventualmente presenti. La temperatura di post-cura condiziona la temperatura critica  $T_g$  del polimero ottenuto. Per temperatura critica si intende la temperatura a cui in un



polimero termoindurente avviene la rottura dei legami della catena con conseguente rammollimento del materiale. La temperatura critica è quindi la massima temperatura in cui la matrice può operare. Questa, in funzione del materiale, delle temperature di cura e post-cura, nonché della presenza di eventuali additivi, può variare da 50 a circa 250°C.

Nell'analizzare i dati con la solita tabella di variazione, ci si rende conto che l'ipotesi avanzata nelle prime righe del capitolo risultano corrette: con una variazione del consumo di energia crescente, la differenza tra la lavorazione da scarti e il minimo tra le altre due: diminuisce. Ma, valutando questa variazione incorporandola nella differenza totale delle lavorazioni ci si rende conto che: anche se ci fosse una variazione del +300% degli impatti, la produzione da scarti risulterebbe comunque la meno energivora. Anche disegnando la retta, ci si renderebbe conto che questo andamento è decrescente, ma lentamente.

Una variazione così sostanziale (300%) è altamente improbabile in questo tipo di lavorazioni e per questi tipi di stampi, infatti tale variazione potrebbe avvenire solo per:

- aumento in volume sostanziale degli stampi
- importante aumento di materiale
- necessità di utilizzare una pressione e una temperatura molto maggiore

Quindi, potrebbe essere una variazione irraggiungibile contando che il peso preso in esame del prepreg per pezzo si aggira sui 70 grammi. Potrebbe essere, invece, facilmente raggiungibile se venissero utilizzati stampi per pezzi di automotive dove il peso sarebbe esponenzialmente maggiore e il volume aumenta con esso e di pari passo l'energia necessaria sarà n-volte maggiore rispetto a quella presa in considerazione per questo studio. Comunque, in questo contesto è praticamente impossibile arrivare a tali volumi e tali parametri.

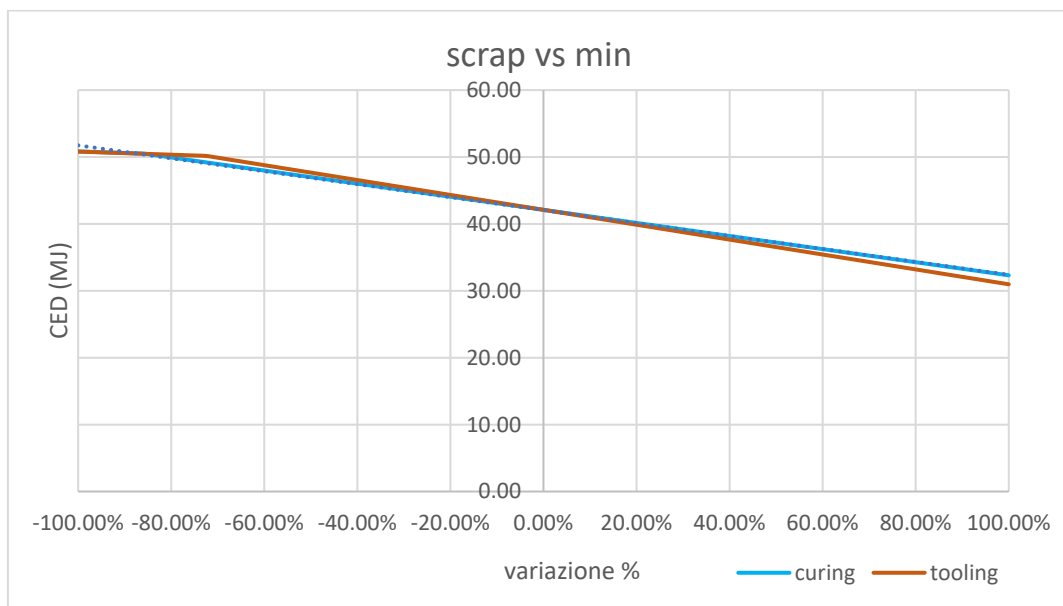
### 5.3. Fase di produzione degli stampi

La fase di produzione degli stampi (nelle tabelle e nei grafici sarà nominato “tooling”) comprende:

- il trasporto sia della materia prima che degli stampi finiti;
- il consumo energetico della fresatrice il cui impatto ha valori diversi nei tre scenari.

L'impatto totale associato alla produzione degli utensili in alluminio è stato diviso per il numero di parti che si possono produrre. Rappresenta 14,07 MJ nel primo scenario e 16,39 MJ nel secondo scenario. La differenza nel contributo degli utensili tra le prime due lavorazioni per compressione e quello in autoclave è imputabile al peso maggiore degli utensili in alluminio. La lavorazione che sfrutta l'autoclave ha il minor impatto per la fase di produzione degli stampi (5,26 MJ) perché lo stampo in alluminio è l'unico utensile necessario mentre negli altri due processi produttivi è necessario anche un controstampo. Se andassimo a valutare solamente i due parametri fin ora studiati (fase di cura e produzione degli stampi), la produzione da scarti sarebbe al primo posto per consumi energetici rispetto alle altre due, se dovessimo rappresentare entrambe in un grafico, esso sarebbe:

Grafico 5.1. tooling & curing per il CED



L'andamento era facilmente ipotizzabile. Le rette continuano ad essere nell'asse delle y positive poiché viene analizzato l'andamento totale al variare dei dati in input (in questo caso la fase di cura e produzione di stampi), ed essendo (nel totale), decisamente meno energivora la produzione da scarti, il grafico rimarrà nel primo e secondo quadrante del piano cartesiano. Ma, per enormi variazioni, potrebbe anche scendere nel quarto quadrante rendendo la differenza tra produzione da scarti e il minimo tra le altre due, sbilanciata a favore di quest'ultime.

Ma, la % di variazione è troppo alta per avere questo scenario poiché si dovrebbe avere:

- un aumento considerevole dell'utilizzo di energia da trasporti di materie prime e stampi finiti (che però è stato ben ipotizzato in sede di studio)
- un aumento energetico per l'utilizzo della fresatrice (non è altro che un motore, in questo caso molto piccolo, su cui è fissato tramite un morsetto un utensile dotato di bordi taglienti che ruotano sull'asse della fresa stessa. Il principio è lo stesso del trapano, ma le frese sono progettate per svolgere l'azione di taglio sul lato dell'utensile invece che sulla punta, quindi erodendo il materiale invece che forandolo).
- mentre, gli impatti dell'alluminio utilizzato per gli stampi dovrebbe rimanere sempre lo stesso a meno che, non venga cambiata la loro forma, la loro grandezza o le loro proprietà.

Queste variabili potrebbero portare, sì, ad un aumento o ad una diminuzione degli impatti ma, non così sostanziali da rendere la produzione da scarti meno conveniente. Per questo viene svolta l'analisi di sensibilità: capire se da una variazione probabile (dal -100% al 100%), i nostri obiettivi potrebbero avere un'inversione di marcia e, fin ora, di sostanziali cambi di rotta, non ce ne sono stati.

## 5.4. prepreg input

Se per la fase di cura e di produzione degli stampi, l'andamento degli impatti ambientali è risultato favorevole nella produzione in autoclave e nella lavorazione che usa prepreg vergine, in questo caso è univocamente spostata verso la produzione da scarti. Infatti, il progetto Circe, mira proprio a riutilizzare gli scarti per la produzione di materiale composito: rinunciando quindi ad utilizzare solamente prepreg vergine (che come vedremo, ha un impatto ambientale importante).

Nello studio avviato in questa tesi, è stato preso un valore d'impatto ambientale del prepreg di 600 MJ/kg, ma, in letteratura si trovano studi che indicano che gli impatti si aggirano tra i 200 MJ/kg e i 600 MJ/kg, per cui è stata presa in considerazione una produzione di preimpregnato per eccesso come impatti ambientali, che durante lo studio pratico potrebbe rilevarsi inferiore. Quindi, in questo caso l'analisi di sensibilità verrà svolta da -100% a +100% per completezza, ma, la parte davvero utile da analizzare sarà quella che va da -80% a +20%. Una variazione del -80% su un impatto di 600MJ/kg, comporterebbe una diminuzione dello stesso di 480 MJ/kg arrivando ad un totale di 120 MJ/kg (che sarebbe un impatto minimo, impossibile con la tecnologia attuale).

Inoltre, anche se si è preso il massimo del range come impatto ambientale, lo studio oltre lo 0% di variazione (20%) potrebbe essere utile in caso questo per fattori ambientali o di trasporti dovesse subire un aumento.

Sviluppando la tabella, si può evincere come, per una variazione del -80% (colorata in azzurro la rispettiva cella), la produzione da scarti rimane la meno energivora (non usando prepreg vergine). Sotto l'80% (dalla cella colorata in marrone, in giù), però, risulta pian piano meno conveniente, questo è dovuto ai maggiori impatti dovuti alle due variabili precedentemente osservate; mentre sopra lo 0% risulta decisamente più conveniente.

Tabella 5.1. prepeg input

prepeg input						
variabile cm vergine	variabile autoclave	totale cm vergin	totale autoclave	totale scrap	scrap vs min	% vs i
0	0	23,84	17,46	27,70	-10,24	-124,33%
0,523494215	0,523494215	24,36	17,98	27,70	-9,72	-123,08%
1,04698843	1,04698843	24,89	18,50	27,70	-9,20	-121,84%
1,570482646	1,570482646	25,41	19,03	27,70	-8,67	-120,60%
2,093976861	2,093976861	25,93	19,55	27,70	-8,15	-119,35%
2,617471076	2,617471076	26,46	20,07	27,70	-7,63	-118,11%
3,140965291	3,140965291	26,98	20,60	27,70	-7,10	-116,87%
3,664459506	3,664459506	27,50	21,12	27,70	-6,58	-115,62%
4,187953722	4,187953722	28,03	21,64	27,70	-6,05	-114,38%
4,711447937	4,711447937	28,55	22,17	27,70	-5,53	-113,14%
5,234942152	5,234942152	29,07	22,69	27,70	-5,01	-111,89%
5,758436367	5,758436367	29,60	23,21	27,70	-4,48	-110,65%
6,281930582	6,281930582	30,12	23,74	27,70	-3,96	-109,41%
6,805424798	6,805424798	30,64	24,26	27,70	-3,44	-108,16%
7,328919013	7,328919013	31,17	24,78	27,70	-2,91	-106,92%
7,852413228	7,852413228	31,69	25,31	27,70	-2,39	-105,68%
8,375907443	8,375907443	32,22	25,83	27,70	-1,87	-104,43%
8,899401658	8,899401658	32,74	26,36	27,70	-1,34	-103,19%
9,422895874	9,422895874	33,26	26,88	27,70	-0,82	-101,95%
9,946390089	9,946390089	33,79	27,40	27,70	-0,30	-100,70%
10,4698843	10,4698843	34,31	27,93	27,70	0,23	-99,46%
10,99337852	10,99337852	34,83	28,45	27,70	0,75	-98,22%
11,51687273	11,51687273	35,36	28,97	27,70	1,27	-96,97%
12,04036695	12,04036695	35,88	29,50	27,70	1,80	-95,73%

## 5.5. peeling & cutting

Lo studio di tali lavorazioni risulta quasi superfluo poiché anche con variazioni importanti, risulterà sempre un andamento simile a quello iniziale. Questo può essere spiegato poiché la fase di taglio e spellicolamento per le stime iniziali che sono state considerate hanno un impatto talmente basso che, anche raddoppiando o triplicando questi impatti, non cambia nulla sul risparmio.

Questo studio ha una doppia valenza:

- capire quanto poco siano energivore queste lavorazioni
- capire come si è lavorato in fase di raccolta dati prima degli studi del progetto

Infatti, i processi sono stati ottimizzati, consumando il meno possibile poiché sono state considerate macchine semplici per l'utilizzo che, hanno consumi molto bassi (e questa è la forza del progetto).

La fase di taglio ha impatti ambientali maggiori nelle due lavorazioni che utilizzano il preimpregnato vergine mentre, è praticamente nulla per la produzione da scarti (poiché sono pezzettini già tagliati e riutilizzati) la fase di spellicolamento è caratteristico solamente della produzione da scarti. Gli impatti sono paragonabili tra loro e, com'è meccanicamente intuibile, quelli ambientali per il taglio sono leggermente maggiori rispetto a quelli per lo spellicolamento.

Se dovessimo mettere i rispettivi dati nel solito grafico, potremmo ipotizzare d'avere una retta quasi parallela all'asse delle x, ciò significa che sarebbero giuste tutte le supposizioni fatte fin ora. Tracciando il grafico e calcolando l'equazione che ne descrive l'andamento ( $y = 0,0871x + 42,107$ ), si chiude il cerchio relativo lo studio di questa variabile: basso coefficiente angolare, che indica, poca pendenza, che implica, una minima variazione.

## 5.6. analisi totale della variabilità del CED

La somma della domanda di energia fossile, nucleare, eolica, idroelettrica e solare utilizzata durante le fasi del ciclo di vita prese in considerazione per lo studio, sono tutte espresse in MJ e convogliate nella voce ormai pluri-utilizzata: CED.

Dalle analisi svolte si può capire che, il preimpregnato è la variabile che ha impatti maggiori e, il suo riciclo è un'azione altamente conveniente. Dopo aver sviluppato già due analisi: sui costi e sul CED, si può notare come la produzione da scarti sia conveniente in entrambi i campi di studio e, che, mentre nel primo potrebbe essere leggermente più facile cadere in qualche perdita economica, in quest'ultimo studio, gli impatti ambientali sono costantemente salvaguardati. Quindi, in una visione olistica, il progetto CIRCE sembra aver avuto un riscontro positivo in ogni ambito, verrà poi approfondito l'argomento ambientale con altri due parametri che verranno analizzati rapidamente nei prossimi capitoli.

La differenza sostanziale tra costi e impatti riguarda le altre due lavorazioni: autoclave e produzione per stampaggio a compressione con utilizzo di preimpregnato unicamente vergine:

- nella valutazione dei costi, la produzione per stampaggio a compressione ha valori decisamente minori rispetto a quelli in autoclave, questo è dato dal fatto che quest'ultima ha un tempo di lavorazione (manodopera) maggiore e, quindi costi maggiori. Per cui, se l'unico parametro da analizzare fosse quello dei costi, la produzione per autoclave sarebbe indubbiamente da scartare.
- nella valutazione del CED, la produzione per autoclave ha un impatto minore rispetto allo stampaggio a compressione che utilizza preimpregnato vergine, questo è scontato poiché per la fase di cura e per la fase di produzione degli stampi gli impatti sono minimi (per la lavorazione in autoclave), mentre per la lavorazione di preimpregnato hanno gli stessi utilizzi energetici.

Quindi, nonostante il progetto CIRCE è indirizzato verso uno studio sulla produzione da materiale di scarto, non si possono non fare considerazioni sulle altre due produzioni:

se l'azienda volesse centrare la propria produzione sull'innovazione morale dell'eco-sostenibilità, dovrebbe puntare sulla produzione in autoclave, immettendo il prodotto ad un prezzo leggermente maggiore (possibile soluzione alla differenza di costi per la produzione) ma, enfatizzando il fatto che sia stato creato con un processo più eco-sostenibile (comunque molto meno rispetto a quello da scarti). Oppure, se l'azienda non volesse puntare su quest'innovazione ormai comune nei mercati contemporanei, della green-production, potrebbe puntare sullo stampaggio a compressione utilizzando preimpregnato vergine (sempre se, non fosse possibile produrre da materiali di scarto).

La scelta quindi, cadrebbe all'azienda che, facendo le proprie valutazioni potrebbe decidere se modernizzarla a discapito dei costi (comunque risanabili con metodologie di marketing) oppure puntare fortemente sull'abbattimento dei costi, tenendo conto di diverse variabili:

- nel caso in cui l'azienda fosse già attiva e sviluppasse da anni la produzione da preimpregnato vergine, passare ad una produzione in autoclave comporterebbe un esborso economico sull'acquisto di macchinari (come l'autoclave che ha un costo di 220000€) ma, è anche vero che, tali spese potrebbero essere ammortizzate dalla vendita della pressa che risulta inutile in tale processo, oppure il risparmio nel non-utilizzare il controstampo nella creazione dei prodotti. La valutazione, quindi, risulta ben più difficile di quanto si possa pensare e, non è una decisione aleatoria ma, bisogna anche considerare ogni parametro ed ogni costo
- come nel punto precedente, se l'azienda fosse già attiva, gli impiegati che si trovano a lavorare al loro interno dovrebbero sviluppare nuove abilità per stare ai passi della nuova produzione, ciò comporta perdita di: tempo, denaro e potrebbe portare ad un morale minore da parte dei lavoratori, abituati in una determinata maniera e abbandonando la loro confort zone.
- se invece, l'azienda si trovasse agli inizi della sua creazione, probabilmente, per paura di non rientrare nelle spese di produzione, nelle spese relativi ad affitti e nei salari, potrebbe puntare ad una soluzione più economica rispetto ad una più "green".



- altra ipotesi potrebbe essere quella che, l'azienda essendo già ben organizzata e composta da personale giovane e con una buona flessibilità mentale, potrebbe decidere di stare a passo con i tempi e modernizzarsi. La scelta di creare prodotti finiti attraverso una produzione con autoclave potrebbe dar lustro all' azienda, pubblicizzando la loro scelta di rinnovarsi e puntando sulla percezione dei clienti.

Queste sono solo alcune delle ipotesi, ogni azienda in sé ha un metodo proprio di ragionamento, organizzazione e mission, quindi, l'analisi di sensibilità dà valori analitici, basi su cui studiare ma, la scelta è soggettiva per ogni azienda.

# **CAPITOLO 6**

## **GWP: ANALISI DI SENSIBILITA' E CONFRONTO**

### **6.1. L'importanza dei piccoli cambiamenti**

Il potenziale riscaldamento globale (GWP) viene utilizzato per quantificare le emissioni di gas a effetto serra nell'atmosfera e il loro effetto sul riscaldamento globale e sui cambiamenti climatici. Considera il calore assorbito da un eventuale gas serra come un multiplo del calore che verrebbe assorbito dalla stessa massa di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e ne valuta gli effetti negli anni. Le stime dei valori GWP su 20 e 100 anni vengono periodicamente compilate nei rapporti dell'International Panel on Climate Change (IPCC). Quindi, sia il CED che il GWP studiano gli impatti ambientali delle tre lavorazioni ma, con una differenza sostanziale: mentre il CED valuta l'energia utilizzata (infatti l'unità di misura è il MJ), il GWP valuta i kg di CO<sub>2</sub> equivalenti.

La loro analisi è risultata molto simile e, per questo non verrà trattata in maniera dettagliata come nel caso precedente, per non rendere il lavoro ripetitivo.

Fino ai primi anni del 2000, questo tipo di coefficiente (GWP) non esisteva o, comunque, non era mai stato preso in considerazione per cicli di produzione. Invece, ultimamente, questo coefficiente viene utilizzato da quasi ogni azienda per lo studio degli impatti, spostando la centralità dai prezzi all'ecosostenibilità. Il GWP, come detto, è stato sviluppato per combattere il riscaldamento globale, ma cos'è?

Come dice la parola stessa, il riscaldamento globale è un fenomeno che indica il cambiamento del clima del pianeta e più precisamente il brusco innalzamento della temperatura terrestre sviluppatosi a partire dal XIX secolo e tutt'ora in corso. Il report dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change è il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici) sul riscaldamento di 1,5°C, il report IPBES sulla perdita di natura, mostrano con evidenza i pericoli e i costi a cui si andrebbe incontro nel caso di un'eventuale mancanza di azioni di contrasto che solo con

azioni urgenti e radicali porterebbero ad importanti benefici entro il 2030. Il riscaldamento globale avrà effetti catastrofici come l'innalzamento del livello del mare, l'incremento delle ondate di calore e dei periodi di intensa siccità, delle alluvioni, l'aumento per numero e intensità delle tempeste e degli uragani. Questi fenomeni avranno un impatto su milioni di persone, con effetti ancora maggiori su chi vive nelle zone più vulnerabili e povere del mondo, danneggeranno la produzione alimentare, minaccerebbero specie di importanza vitale, gli habitat e gli ecosistemi.

Il 2020 è stato un anno strategico per i Paesi firmatari dell'Accordo di Parigi, che cominceranno ad evitare la catastrofe climatica rivedendo gli obiettivi dei loro contributi nazionali (NDC), presentando strategie a lungo termine (LTS) ambiziose, per avvicinare il mondo all'obiettivo di limitare il riscaldamento a 1,5°C rispetto all'epoca preindustriale. Una delle tantissime conseguenze causate dal surriscaldamento globale è sicuramente lo scioglimento dei ghiacciai che causerebbero l'aumento di volume degli oceani, il conseguente inondamento di molte città costiere. Nonostante la creazione del Mose (sistema di dighe mobili), se il livello del mare si dovesse alzare di un metro, Venezia sarebbe la prima probabile città a scomparire, mentre se dovesse innalzarsi di 2-4 metri scomparirebbero Amsterdam, Amburgo e San Pietro Burgo (figura 6.1.). Queste stime non sono affatto aleatorie ma, sono analiticamente approvate dagli studi internazionali sul cambio climatico. Se ogni azienda nel suo piccolo non introducesse politiche di rinnovamento per la centralizzazione dell'eco-sostenibilità, si andrà verso un inesorabile punto di non ritorno.

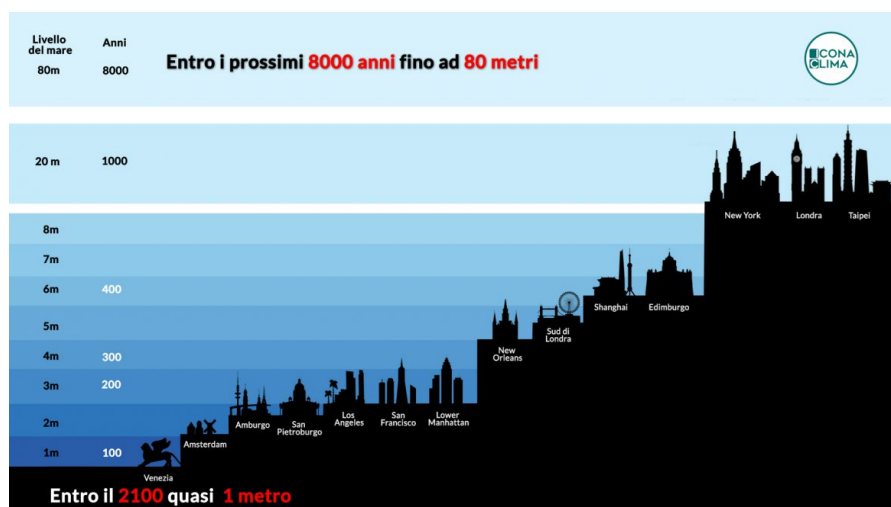


Figura 6.1. variazione del livello del mare negli anni

## 6.2. Analisi di sensibilità del GWP

Lo studio sul GWP è stato fatto come per tutti gli indici, valutando ogni variabile con: tabella d'analisi di sensibilità e il relativo grafico ma, per rendere il lavoro meno corposo, verrà svolta una descrizione unitaria delle variabili e delle loro variazioni.

Osservando la tabella di partenza (dati dagli studi svolti in dipartimento) si avrà:

*tabella 6.1. GWP per le tre lavorazioni*

	totale	PREPREG	REFRIGERATED STORAGE	CUTTING	CURING	TOOLING	AVOIDED LANDFILL	LAY UP AUTOCLAVE	SCRAP CUTTING	PEELING
VIRGIN COMPRESSION MOLDING	4,861	2,884	0,052	0,008	0,637	1,278	0			
SCRAP COMPRESSION MOLDING	2,293	0	0,042	0	0,764	1,489	-0,007		0,0002	0,003
AUTOCLAVE PRODUCTION	5,108	2,884	0,052	0,008	0,2342	0,481	0	1,44		

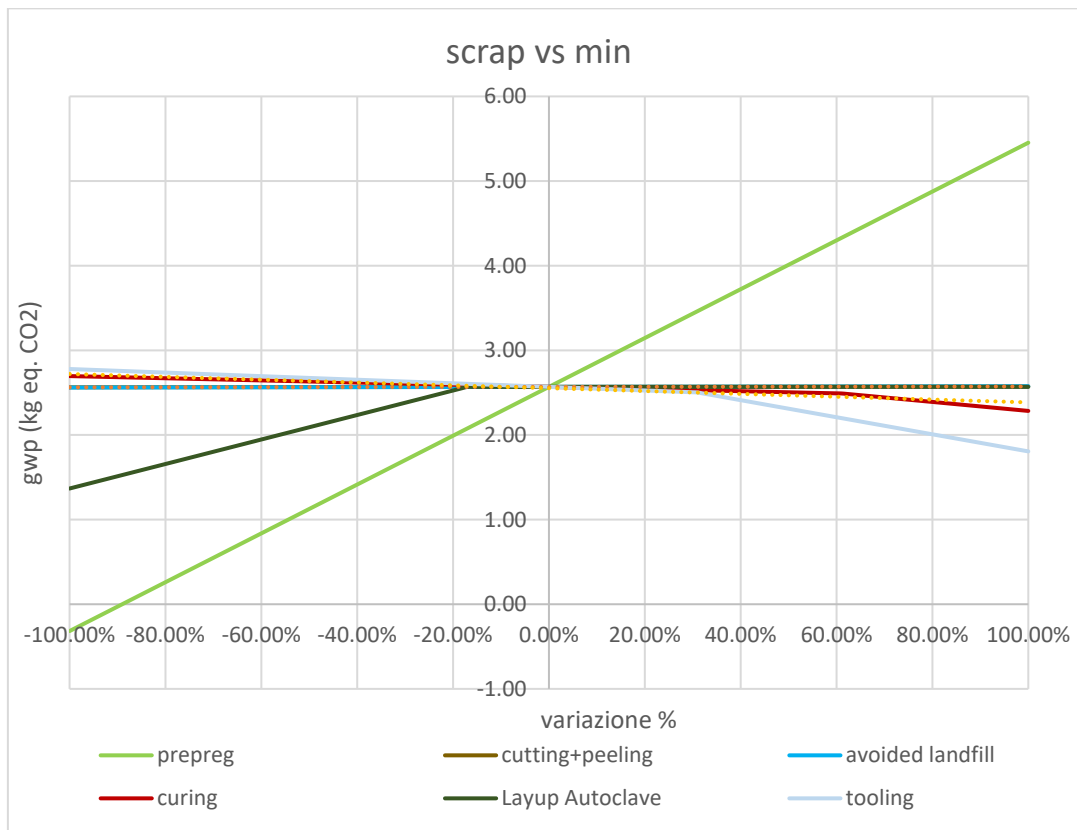
Come per i dati del CED, anche in questo caso, il preimpregnato ha una valenza maggioritaria sulla voce totale, rendendo il confronto tra le tre lavorazioni completamente sbilanciato verso la produzione da scarti. Se facessimo variare questo dato in input dallo 0% (valore attuale) al -89%, la produzione da scarti sarebbe comunque favorevole mentre, per variazioni ancora maggiori, risulterebbe sconsigliata. Una variazione positiva comporterebbe un risparmio ambientale di CO2 importante e significativo.

Mentre, per quanto riguarda la fase di produzione degli stampi, la produzione da scarti occupa la prima posizione. Questo era avvenuto anche nell'analisi fatta nel precedente capitolo e, nel paragrafo 5.3., l'argomento trova il suo approfondimento.

Allora, qual è la differenza sostanziale tra questi due coefficienti che analizzano le emissioni a livello energetico e a livello di CO2 delle lavorazioni?

Per comprendere meglio la loro minima differenza, sono stati creati due grafici rappresentati l'andamento delle variabili in input durante la solita variazione presa come riferimento (dal -100% al +100%):

Grafici 6.1. scrap vs min del CED e del gwp



Differenza 1: La principale differenza tra i risultati CED e GWP è rappresentata dal contributo percentuale della fase di lay-up per la produzione in autoclave. Utilizzando l'indicatore CED, il lay-up rappresenta circa il 10% degli impatti totali, mentre, considerando il GWP, rappresenta quasi il 30% del carico ambientale.

Differenza 2: mentre nell'analisi del CED il taglio e lo spellicolamento hanno un andamento crescente con pendenza osservabile facilmente ( $m=0,087$ ), nella valutazione della stessa variabile nel parametro GWP, esso ha una pendenza quasi impossibile da vedere senza l'utilizzo di appositi calcoli analitici ( $m=0,005$ ). Questo significa che, entrambe hanno un andamento crescente e lento ma, che i risparmi dovuti alla produzione da materiali di scarto sono più rilevanti rispetto alle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Differenza 3: la variabile che più incrementa il risparmio totale è il preimpregnato. Si potrebbe fare una piccola distinzione: mentre nel CED, comincia ad essere sconsigliata la produzione da scarti se si supera una variazione del -80%, nel GWP questo trend negativo può essere visibile solo dal -90% in poi. Questo significa che una variazione negativa compresa tra l'80% e il 90% del preimpregnato sarebbe innocuo se scegliessi come coefficiente il GWP, mentre, potrebbe condizionare la scelta sul tipo di lavorazione se scegliessi il CED.

# **CAPITOLO 7**

## **ReCiPe: ANALISI DI SENSIBILITA' E CONFRONTO**

### **7.1. Un nuovo coefficiente: ReCiPe**

Mentre il CED e il GWP sono stati creati e utilizzati nei primi anni del 2000, il coefficiente più moderno che verrà analizzato sarà il ReCiPe, esso è un acronimo composto dalle iniziali degli istituti che hanno contribuito al progetto: RIVM e Radbound University, CML e Prè. ReCiPe è un metodo per la fase LCIA che fornisce una soluzione per calcolare gli indicatori della categoria sugli impatti del ciclo di vita di un prodotto.

Vengono affrontate 18 categorie d'impatto per avere una visione completa sugli effetti di un prodotto o di un determinato processo ambientale, queste categorie sono:

1. cambiamento climatico (CC)
2. riduzione dell'ozono (OD)
3. acidificazione terrestre (TA)
4. eutrofizzazione d'acqua dolce (FE)
5. eutrofizzazione marina (ME)
6. tossicità per l'uomo (HT)
7. formazione di ossidanti fotochimici (POF)
8. formazione di particolato (PMF)
9. ecotossicità terrestre (TET)
10. ecotossicità dell'acqua dolce (FET)
11. ecotossicità marina (MET)
12. radiazioni ionizzanti (IR)

13. occupazione di terreni agricoli (ALO)
14. occupazione del suolo urbano (ULO)
15. trasformazione naturale del suolo (NLT)
16. esaurimento dell'acqua (WD)
17. esaurimento delle risorse minerali (MRD)
18. esaurimento dei combustibili fossili (FD)

Come si può notare dai coefficienti, l'approccio non è centrato su una sola problematica ma, viene considerata in modo generale, ciò potrebbe essere un limite o una risorsa. Potrebbe essere un limite se volessi valutare una sola categoria, ma, essa risulta inglobata nei valori di tale coefficiente. Potrebbe essere una risorsa se, come in questo caso, volessi valutare gli impatti ambientali totali di tutto il ciclo di vita considerando anche variabili che probabilmente sarebbero sfuggite se, prese una ad una. Un esempio chiaro potrebbe essere la tossicità per gli umani delle varie macchine e delle varie lavorazioni, oppure dalla formazione di particolato; quest'ultima è di fondamentale osservazione poiché il particolato è una sostanza creata principalmente da particelle carboniose che assorbono composti organici, queste particelle si formano durante il processo di combustione non mescolandosi con l'aria e variando le tempistiche di miscelazione del combustibile (fondamentale per tale studio sarà quindi la temperatura raggiunta dai gas in fase di combustione, dal quantitativo di ossigeno disponibile e dal tempo a disposizione).

In questo progetto, questo coefficiente viene valutato non solo per completezza, ma anche per analizzare le possibili difformità che si potrebbero riscontrare nello studio analitico dell'analisi di sensibilità.



## 7.2. Analisi di sensibilità del ReCiPe e confronto

Nonostante il coefficiente in questione sia una somma di tanti parametri, l'andamento delle variabili risulta molto simile alle altre due, la raccolta dei dati, in questo caso è rappresentabile dalla tabella seguente:

Tabella 7.1. ReCiPe delle tre lavorazioni

lavorazione	CUTTING	REFRIGERATED SCRAP	PEELING	CURING	TOOLING	AVOIDED LANDFILL	PREPREG USED CM	LAY UP AUTOCLAVE	TOTALE
scrap	0,0202	3,885	0,339	69,61	133,90	-0,74			207,01
virgin	0,7914	4,757		58,01	114,92		315,57		494,06
autoclave	0,7914	4,757		21,27	43,10		315,57	93,11	478,62

Il totale del ReCiPe della produzione da scarti è meno della metà delle altre due lavorazioni, ciò significa che nonostante le possibili variazioni che potrebbero subire le variabili, probabilmente, non cambierebbero la scelta del miglior processo produttivo.

Come negli altri due casi, il preimpregnato in input ha una rilevanza prioritaria e, si può notare che il suo unico valore supera la somma di tutte le variabili in input della produzione da scarti (315,5>207,0). Questa tendenza era osservabile anche nel CED, e nel GWP, attraverso l'analisi di sensibilità si otterrà il valore per il quale il risparmio risulta negativo: esso è -85%, come ci si aspettava è un valore praticamente impossibile da raggiungere e, in questo caso ci si attesta a metà tra il -90% del GWP e il -80% del CED.

Una considerazione che si può fare valutando i tre coefficienti presi in esame riguarda il lay up dell'autoclave: In questa fase, la carta di supporto in polietilene (PE) viene rimossa dal preimpregnato e i suoi strati vengono impilati manualmente per formare un componente della forma desiderata. Questo può essere fatto in due modi differenti: con il "lay-up strati su strati" i fogli vengono impilati e poi vengono posizionati nello stampo, mentre con il "lay-up diretto sull'utensile" si depositano i fogli direttamente nello strumento. Dopo che ogni strato è stato impilato, un'operazione di carica preliminare rimuove l'aria intrappolata tra gli strati.

Questo processo, studiato dal punto di vista delle emissioni ci fornisce delle risposte importanti: osservando i grafici finali ci si rende conto che dopo un certo valore, la differenza tra la produzione da scarti e il minimo delle altre due lavorazioni rimane costante nonostante aumenti la variazione del lay-up.

Questo comportamento comune deriva dal fatto che, prendendo il minimo tra le due lavorazioni (autoclave e produzione a compressione che utilizza materia prima vergine), una volta che viene aumentata la variazione del lay-up in autoclave, esso risulta ecologicamente ed energeticamente sconveniente, quindi verrà presa come minimo lo stampaggio a compressione che utilizza materiale vergine e, non avendo variabili che variano (poiché in entrambe le produzioni per compressione non viene usato il lay up dell'autoclave) la differenza rimane costante.

Nelle tre casistiche trattate (GWP,CED,ReCiPe) questo andamento costante non si riscontra nella stessa percentuale di variazione: nel CED avviene dall'80% in poi, nel gwp dal -17% in poi, nel ReCiPe dal 17% in poi. Questo significa che, prima delle percentuali sopracitate, ci sarà un risparmio crescente (risparmio in termini ambientali) dovuto al fatto che l'autoclave risulta più sostenibile dello stampaggio a compressione da preimpregnato vergine, dopo di che verrà ri-stabilita la convenienza di quest'ultima rispetto l'autoclave. Comunque, si è riscontrata più volte la somiglianza netta tra i tre coefficienti studiati, in questo caso anche se l'andamento risulta uguale, nel CED il comportamento sopracitato avviene per una percentuale molto elevata di variazione, rendendo l'autoclave molto consigliata (mentre se dovessimo decidere analizzando i tre coefficienti, questo tipo di produzione risulterebbe comunque sconveniente).

# **CAPITOLO 8**

## **CONSIDERAZIONI FINALI**

### **8.1. L'ausilio di nuovi coefficienti**

Avendo trattato le tre lavorazioni base sotto ogni aspetto, si possono ormai trarre delle conclusioni finali, rilevando anche quali variabili in input subiscono variazioni più significative indirizzando la scelta su una piuttosto che su un'altra. Per studiare quanto una variazione % di queste variabili, cambiano il risparmio, si può agire in due modi:

- valutare le pendenze delle rette ottenute per ciascun studio nelle quali in caso di maggiori pendenze si riscontrerà un'influenza maggiore.
- creare un grafico: nell'ascissa riportando il tipo di coefficiente che si va a considerare mentre nelle ordinate, la percentuale d'importanza sul totale delle variabili.

Difficile affermare quale delle due soluzioni sia la migliore, comunque la valutazione finale sarà la stessa, mentre il metodo per arrivare ad essi, no. Mentre nel primo caso la valutazione risulta più intuitiva e grafica, nella seconda risulterà analiticamente più precisa. Quindi, se in fase di studio si cerca di ottimizzare i tempi ed avere dei riscontri il prima possibile, la prima risulta più ovvia e veloce, mentre di contro, se si volesse avviare uno studio dettagliato, avere la certezza analitica dei dati trovati ed avere una visione olistica minuziosa, la seconda risulta essere la migliore. Quindi: entrambe le soluzioni risultano corrette ma, per avere maggior completezza e chiarezza, verranno sviluppati i grafici indicati al punto 2 precedente. Creazione delle tabelle:

Per la creazione di tali tabelle sono state utilizzate quelle create per l'analisi di sensibilità. Si utilizza un intervallo di variazione a propria discrezione e valutando di quanto variano (attraverso un delta, una differenza) i valori della colonna "scarti-minimo delle altre due lavorazioni". Nel caso specifico verrà presa una variazione del 10% (sempre) che sarà facilmente osservabile partendo dallo 0% arrivando al 10%.

N.B. Questo potrebbe essere un problema che se non viene valutato attentamente potrebbe risultare deleterio per gli studi: nella variazione dallo 0% al 10% non tutte le rette avevano un andamento lineare, bensì nel GWP il lay-up dell'autoclave risulta costante (come affermato nell'ultimo paragrafo del capitolo 5.2.). Quindi, bisogna tenere in considerazione che, se le variabili non hanno un andamento lineare in quell'intervallo, mantengono comunque una valenza se preso in un range maggiormente esteso. Questa osservazione è di massima importanza, infatti lo studio delle tabelle potrebbe evidenziare che il lay-up dell'autoclave non faccia variare nulla sul risparmio totale, invece queste considerazioni possono essere avanzate soltanto nell'intervallo minimo preso in considerazione (10%). Questo parametro, comunque, risulta l'unico che si comporta in questa maniera, quindi si continuerà a prendere tale intervallo tenendo sempre presente quella precisazione importante.

Tornando alla tabella, avendo trovato per ogni variabile in input il delta-valori, verrà fatta la loro somma totale con i risultati presi in valore assoluto e, dividendo ogni delta-valore di ogni variabile per la somma, si otterrà il loro contributo rispetto al totale. Moltiplicando i risultati trovati per 100, si troverà il loro apporto percentuale sulla valutazione finale, per rendere più chiara la procedura, verrà illustrata una delle quattro tabelle create:

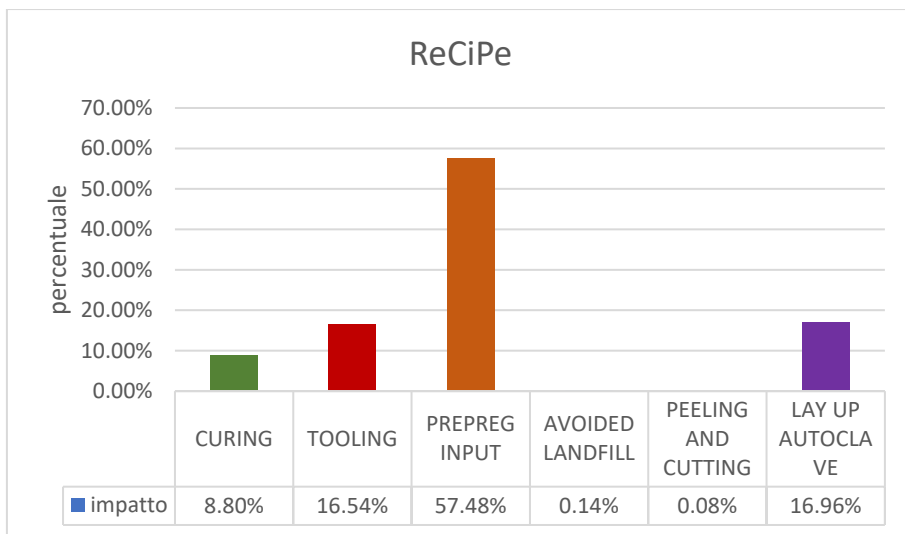
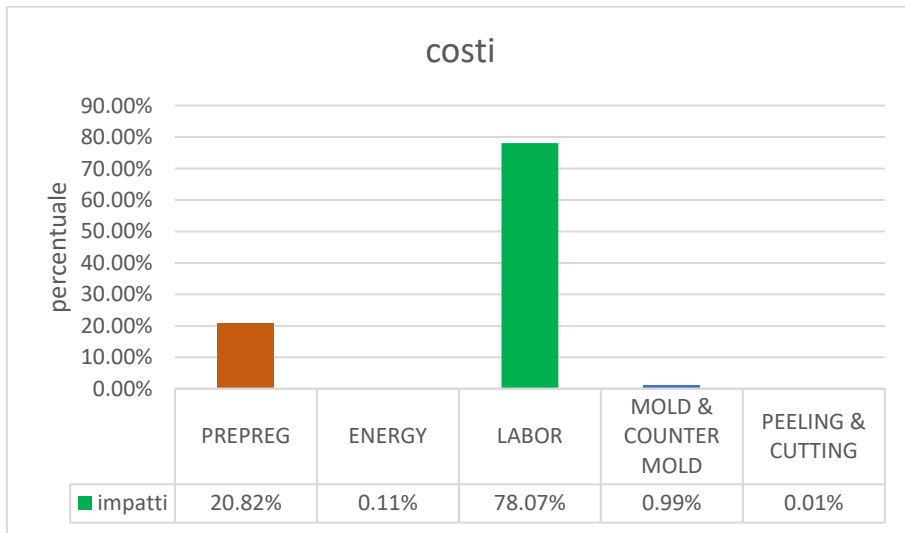
Tabella 8.1. Tabella apporto % delle variabili sul CED

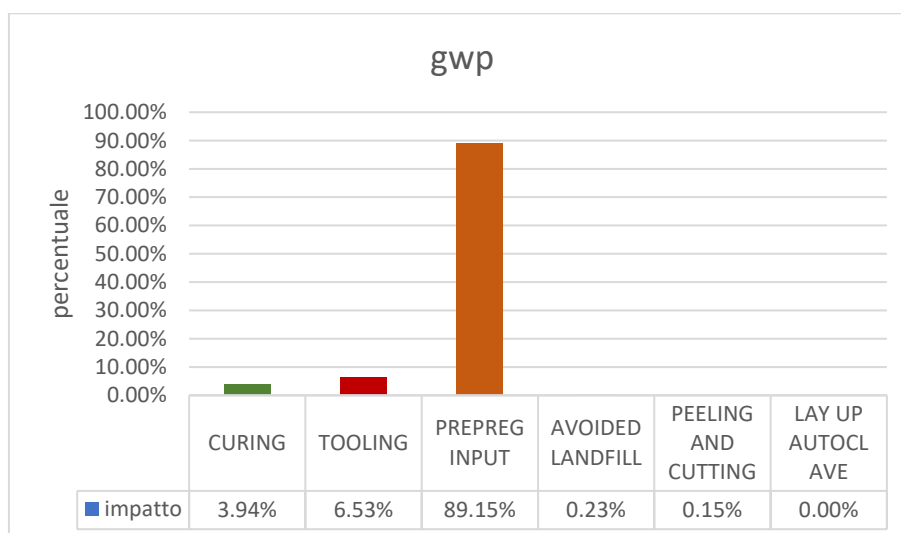
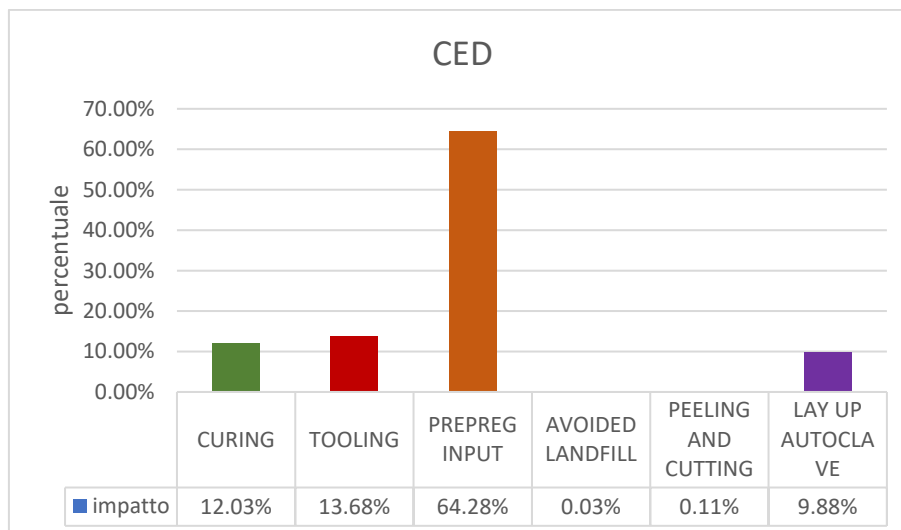
variazione fissa del 10%				
	CED	delta scrap vs min	costi/somma	in %
MJ	CURING	-0,978753993	0,120293528	12,03%
	TOOLING	-1,11	0,136803031	13,68%
	PREPREG INPUT	5,23	0,642791912	64,28%
	AVOIDED LANDFILL	0,00	0,000279491	0,03%
	PEELING AND CUTTING	0,01	0,001071107	0,11%
	LAY UP AUTOCLAVE	0,80	0,098760931	9,88%
	SOMMA	8,136381153	1	100,00%

Dopo di che, verranno creati i rispettivi grafici che, per quanto riguarda i coefficienti ambientali, avranno dei valori in % molto simili tra loro (come visto nei capitoli

precedenti e nelle rette create) mentre, per quanto riguarda i costi, verrà effettuato uno studio che avrà valenza unica e, ci si aspetta un'enorme incidenza del costo del preimpregnato sul totale, poiché lo scopo del progetto CIRCE era anche questo: salvaguardare l'ambiente tenendo comunque i profitti alti.

Grafici 8.1. Istogrammi su costi, CED, GWP e ReCiPe con apporto % delle variabili





Come si può notare, gli impatti sono molto simili e, mentre per il GWP il preimpregnato ha una valenza prossima al 90% e, le altre voci (di conseguenza) sono molto minori, per le altre (CED e ReCiPe) il loro valore si aggira intorno al 60%, avendo le altre variabili una maggiore valenza. La disquisizione sul lay-up dell'autoclave è già stata largamente considerata precedentemente.

## 8.2. conclusioni

Lo scopo del progetto CIRCE è di sviluppare due nuove macchine che riescano a recuperare e preparare gli scarti subito dopo l'operazione di taglio. Il quantitativo di scarti da taglio di solito si aggira tra il 20 e il 50%, e attualmente questi vengono conferiti in discarica; attraverso queste analisi di sensibilità e questi diagrammi si può largamente intuire che l'utilizzo di questi scarti, non solo renderebbe meno stipate le discariche ma, diventerebbe anche una necessità economica. La convenienza delle altre due lavorazioni si avrebbe solamente per variazioni impossibili dei dati in input (come la variazione del costo del prepreg da 80€/kg a 4€/kg). C'è comunque da evidenziare il fatto che, essendo un progetto in fase di sviluppo, molti valori sono stati ipotizzati e provengono da dati parziali, ad esempio il costo dei macchinari è dato dal costo dei prototipi, esso è in continuo cambiamento.

L'analisi di sensibilità è stata fondamentale per lo studio di tale processo, esso ha rafforzato la credibilità della produzione da scarti poiché i risultati rimangono robusti sotto diverse ipotesi.

Le variabili in input prese in considerazione sono quelle che hanno valenza maggiore rispetto ai costi e alle emissioni totali, tuttavia, si è verificato che anche variazioni molto consistenti di variabili a minor valenza, come ipotizzato, non cambiavano minimamente l'esito degli studi. La produzione da scarti oltre ad essere un chiaro esempio di come la ricerca tenda a minimizzare le emissioni (essendo ormai al centro delle discussioni mondiali), evidenzia come tali conseguenti innovazioni riescano a rinnovare, migliorare l'organizzazione ed i profitti aziendali. L'utilizzo di scarti di prepreg renderebbe la produzione dell'unità funzionale più economica di 3,06 €/u (rispetto alla lavorazione che utilizza il prepreg vergine) e 12,55 €/u (rispetto alla lavorazione che utilizza il prepreg vergine e l'autoclave), quindi con tassi di risparmio che variano tra l'11% ed il 34%. Questo aspetto è rilevante per la futura organizzazione di aziende che decidono di investire su tale settore e creare un'impresa che lavora il prepreg, ma, potrebbe essere anche una buona base di studio per tutte quelle aziende che già sono avviate in questo settore, e con una prospettiva a lungo periodo. Inoltre, le aziende che utilizzano processi

e/o materiali ecologici ormai sono visti con estrema positività dai clienti. Per questo sarebbe bene attuare modifiche e/o creare aziende ecologiche in questo periodo di transizione, dove tali cambiamenti vengono riconosciuti dagli acquirenti, piuttosto che attendere per paura del cambiamento per poi dover attuare le stesse politiche per leggi stringenti che favoriscono processi ecosostenibili (andando ad imporre cambiamenti che potevano essere fatti anni prima e con riscontri economici-sociali migliori).

I cambiamenti climatici e le probabili ripercussioni sul mondo sono evidenti a tutti, politiche di ecosostenibilità pian piano diventeranno obbligatorie e verranno applicate ad ogni settore produttivo, studiare fin da subito processi alternativi per anticipare tali restrizioni, renderebbe l'azienda robusta davanti a tali cambiamenti e, si troverebbe socialmente avvantaggiata ed economicamente stabile, favorendo la prevenzione alla cura.



## BIBLIOGRAFIA

[1] Cappellini M. (2016) in *La valutazione degli scarti industriali*, in Matrec Sustainable Materials & Trends.

<https://www.matrec.com/news-free/la-valorizzazione-degli-scarti-industriali-e-unopportunita-per-le-imprese>

[2] Baldoni F., Bettini V., Pesaresi L., Mencarelli E., D'Amico A. (2015) in *Analisi del ciclo di vita*, in *Esalex brochure*.

[http://www.esalex.eu/1/upload/esalex\\_brochure\\_lca\\_rev220517.pdf](http://www.esalex.eu/1/upload/esalex_brochure_lca_rev220517.pdf)[http://www.esalex.eu/1/upload/esalex\\_brochure\\_lca\\_rev220517.pdf](http://www.esalex.eu/1/upload/esalex_brochure_lca_rev220517.pdf)

[3] Forcellese, note dei corsi, Università Politecnica delle Marche (UNIVPM)

[4] Energit Luce e gas (2010), *le cause del riscaldamento globale*.

[https://energ.it/quali-sono-le-cause-del-riscaldamento globale](https://energ.it/quali-sono-le-cause-del-riscaldamento-globale)

[5] EULER HERMES Italia (2020), *Sostenibilità ambientale e imprese sostenibili*.

[https://www.eulerhermes.com/it\\_IT/news-e-approfondimenti/trade-magazine/business-trends/green-economy/sostenibilita-ambientale-e-imprese-ecosostenibili.html](https://www.eulerhermes.com/it_IT/news-e-approfondimenti/trade-magazine/business-trends/green-economy/sostenibilita-ambientale-e-imprese-ecosostenibili.html).

[6] ISO 14040 UNI EN. (2010). Valutazione del ciclo di vita Principi e quadro di riferimento. *Environmental Management*.

[7] ISO 14044 UNI EN. (2011). Valutazione del ciclo di vita Requisiti e linee guida.

*Environmental Management*.

[8] Boquillon N. e Fringant E. (2000), *Polymer networks derived from curing of epoxidized linseed oil: influence of different catalysts and anhydride hardeners*, *Polymer*, 41, 8603-8613.

[9] Malnati P. e Salvatori T. (2010), *Composites Technology*

[www.compositesworld.com/articles/interiorinnovation-the-value-proposition](http://www.compositesworld.com/articles/interiorinnovation-the-value-proposition).

[10] Evaluation.it (2018), in *Sensitivity analysis: un supporto alle decisioni di investimento*

<https://www.evaluation.it/teoria-finanza/formazione/sensitivity-analysis-un-supporto-alle-decisioni-di-investimento/>

[11] Bianchi I. (2019), in *Life Cycle Assessment and cost analysis of a new prepreg scraps recovery system*.

[12] BRT Srl Industrial Service (2021), in *Materiali Compositi*

<http://www.brtindustrialservice.com/it/materiali-composito.aspx#:~:text=I%20materiali%20compositi%20trovano%20il,settore%20dell'i%20mballaggio%20e%20sportivo.>

[13] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (2014), in *Valutazione di Impatto Ambientale (VIA)*

<https://www.isprambiente.gov.it/it/attivita/autorizzazioni-e-valutazioni-ambientali/valutazione-di-impatto-ambientale-via#:~:text=La%20VIA%20%C3%A8%20stata%20recepita,in%20materia%20di%20dann%20ambientale>

[14] InfoBuild (2013), in *Materiali compositi*

<https://www.infobuild.it/approfondimenti/materiali-compositi/#:~:text=e%20bassi%20pesi.-,Materiali%20compositi%3A%20definizione%20e%20caratteristiche,materiali%20costituenti%20che%20agiscono%20indipendentemente.>