



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Sviluppo di una metodologia per analisi di impatto ambientale del processo di saldatura di componenti di una turbina a vapore

Development of a methodology for environmental impact analysis of the welding process of steam turbine components

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Michele Germani

Tesi di Laurea di:

Luca Pantaleoni

Correlatore:

Ing. Sara Gaggioli

A.A. 2023 / 2024

Sommario

Introduzione	2
Turbina a vapore	3
Introduzione.....	3
Cicli Termodinamici.....	6
Componenti principali di una turbina a vapore.....	9
Saldature.....	14
Tecniche di saldatura.....	16
Stato dell'arte LCA	21
Introduzione.....	21
LCA di saldature in letteratura	25
Software utilizzati.....	27
Metodologia per la parametrizzazione del processo di saldatura	29
Metodo generale	29
Parametrizzazione del processo di saldatura del Support Bearing Front	31
Applicazione del modello ai supporti posteriori	39
Metodologia per analisi LCA saldature	44
Caso Studio: Analisi LCA del Support Bearing	45
Analisi supporti anteriori e posteriori	46
Conclusioni	83
Bibliografia	85

Introduzione

La turbina a vapore è una turbomacchina che sfrutta l'energia termica del vapore in pressione convertendolo in lavoro meccanico. È molto diffusa e viene impiegata in svariati campi tra cui: raffinerie, cartiere, impianti per la sintetizzazione di ammoniaca, impianti geotermici, cicli combinati.

Per avere un quadro completo della macchina è necessario analizzare, non solo le sue prestazioni, bensì anche gli impatti ambientali legati alla turbina nel suo intero ciclo vita mediante un'analisi LCA di ogni suo componente.

L'analisi LCA si occupa di calcolare gli impatti, non solo nella fase d'uso, ma in tutto il ciclo di vita, tenendo in considerazione quindi i materiali utilizzati, i processi produttivi, i trasporti fino all'eventuale recupero o smaltimento finale.

L'Università Politecnica delle Marche collabora con il dipartimento di ingegneria Turbine a Vapore di Baker Hughes con lo scopo di valutare l'impatto ambientale delle macchine prodotte.

In questo studio si descrive l'analisi LCA secondo ISO14044:2006 dei supporti anteriori e posteriori di turbine a vapore, questi sono i principali passaggi dell'attività:

- 1) Analisi di componenti di dimensioni differenti utilizzando il software LeanCost;
- 2) Sviluppo di un modello parametrico che permetta di calcolare l'impatto ambientale della saldatura mettendo in relazione la massa di materiale aggiunta durante il processo con il peso complessivo del componente;
- 3) Creazione di un modello in SimaPro dove si sono considerate, oltre alle fasi precedentemente analizzate anche la produzione delle lamiere e piastre grezze, le lavorazioni meccaniche e l'assemblaggio così da poter fare una valutazione di impatto ambientale del componente;
- 4) Correlazione fra le dimensioni dei componenti e l'impatto ambientale.

Turbina a vapore

Introduzione

La turbina a vapore è una turbomacchina che permette di convertire l'energia termica del vapore in energia meccanica che può essere utilizzata per azionare un generatore o altre macchine.

La conversione energetica avviene nello steam path, che è composto da una serie di stadi (ogni stadio è formato da due schiere di palette, una fissa e una mobile); il vapore espande nell'attraversamento di ogni stadio e l'energia del flusso viene convertita in energia cinetica, il flusso così accelerato, spingendo le palette mobili (solidali al rotore), trasferisce l'energia meccanica dal flusso al rotore.

Le turbine a vapore possono essere classificate in base alla loro applicazione:

- Generazione di potenza: azionano un generatore elettrico;
- Azionamento meccanico: azionano apparecchiature meccaniche come compressori o pompe.

Un'altra tipologia di classificazione delle turbine a vapore si basa sulla pressione di scarico:

- Backpressure (contropressione): pressione di scarico più alta di quella atmosferica;
- Condensing (a condensazione): pressione di scarico più bassa di quella atmosferica.

In entrambi i casi, la caratteristica principale della turbina a vapore è l'estrema flessibilità.

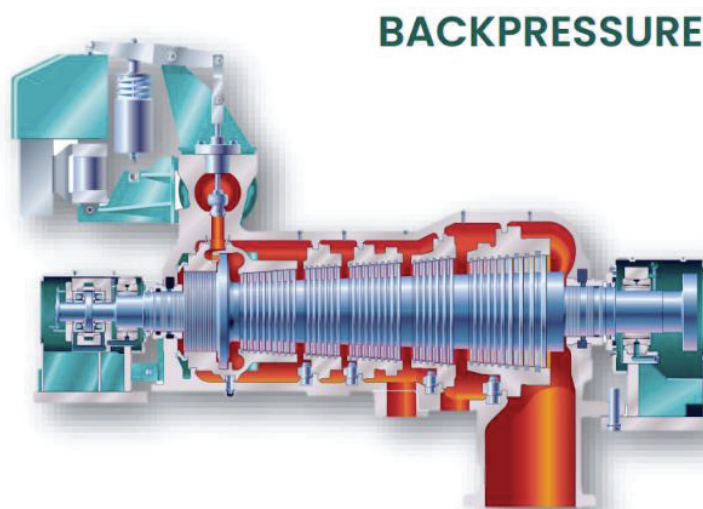


Figura 1. Turbina Backpressure [1]

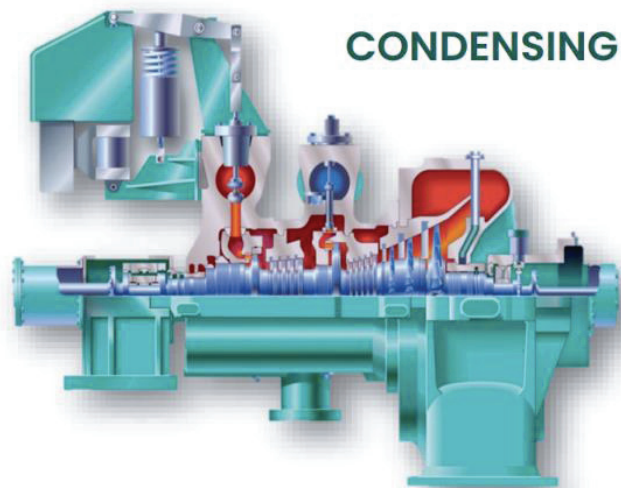


Figura 2. Turbina Condensing [1].

Infine, un'ultima classificazione delle turbine, le distingue in:

- Ad azione: l'intero salto di entalpia avviene nella parte statorica degli stadi;
- A reazione: il salto entalpico è ripartito tra parte statorica e rotorica degli stadi.

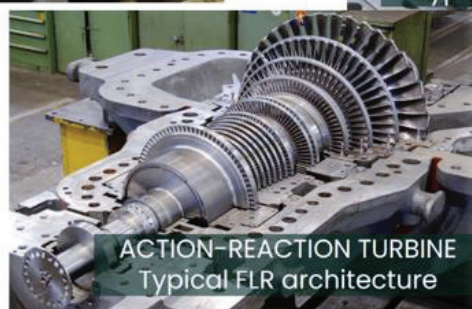
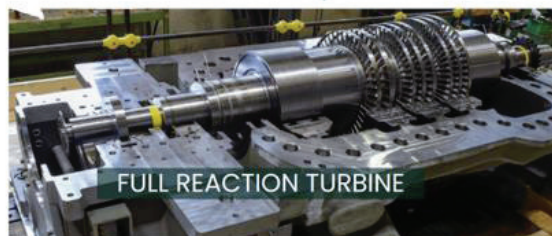


Figura 3. Turbina ad azione, reazione e azione-reazione [1].

Un semplice ciclo contenente una turbina a vapore capace di convertire l'energia termica del vapore in lavoro è schematizzato nella seguente immagine.

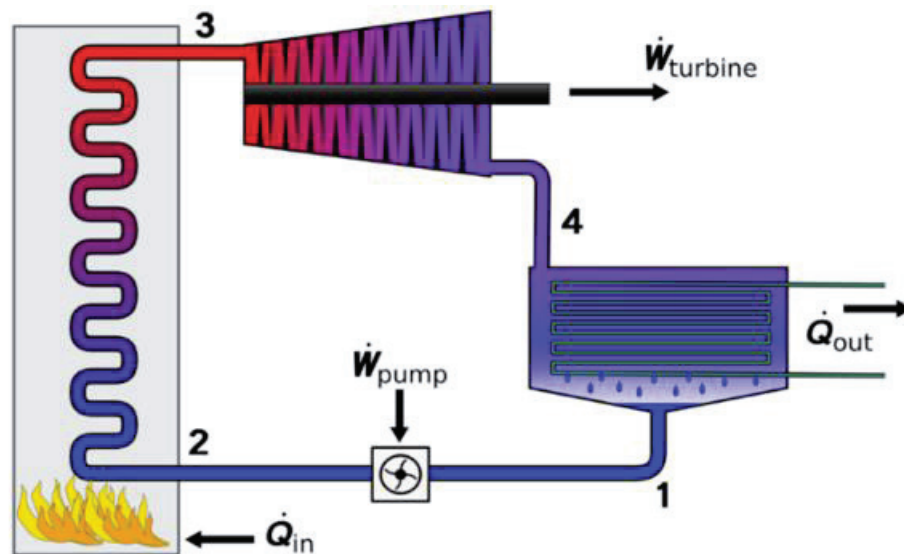


Figura 4. Schema elementare di ciclo contenete una turbina a vapore [1].

1. Acqua fredda a bassa pressione
2. Acqua fredda ad alta pressione
3. Vapore caldo ad alta pressione
4. Vapore freddo a bassa pressione

Il ciclo comprende:

- Pompa: fornendogli lavoro comprime il fluido di lavoro;
- Generatore di vapore: fornendogli calore riscalda il fluido di lavoro;
- Turbina: trasforma l'energia termica del flusso in lavoro meccanico;
- Scambiatore di calore: cede calore all'esterno.

Cicli Termodinamici

Ciclo di Carnot

Il ciclo termodinamico di riferimento, per la turbina a vapore come per tutte le macchine che lavorano tra due sorgenti a temperature diverse, è quello, puramente teorico, chiamato “Ciclo di Carnot”. Questo è il ciclo con il rendimento massimo, ed è composto da quattro trasformazioni reversibili:

- due isoterme (a temperatura costante)
- due adiabatiche (senza scambio di calore con l’ambiente esterno).

Il seguente grafico Temperatura-Entropia mostra l’andamento del ciclo Carnot.

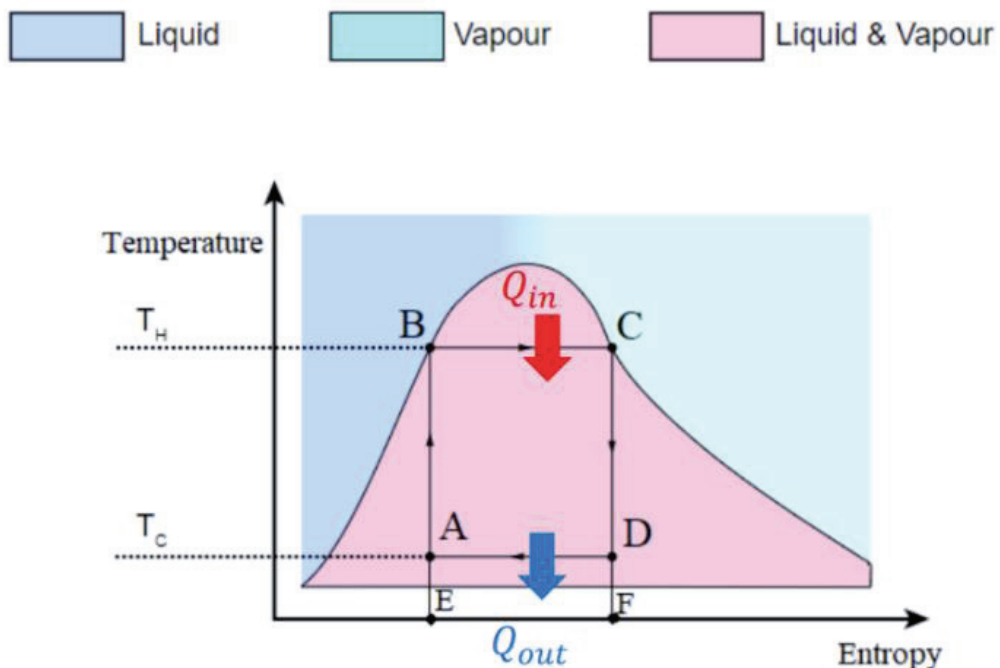


Figura 5. Ciclo Carnot [1].

Gli organi costituenti il ciclo sono:

- Compressore (A-B);
- Generatore di vapore (B-C);
- Turbina (C-D);
- Condensatore (D-A).

I punti critici del ciclo di Carnot, tralasciando l'impossibilità di realizzare trasformazioni reversibili, sono due:

1. La presenza di un flusso bifase (vapore e acqua) nella fase di compressione che richiede l'utilizzo di pompe multifase;
2. L'espansione avviene tutta dentro la campana quindi con presenza di acqua che, essendo incompressibile, non partecipa alla fase di espansione.

Al fine di mitigare gli effetti di queste due criticità sono stati proposti due cicli alternativi.

Ciclo Rankine a vapore saturo

Di seguito sono messi a confronto i due cicli, Rankine e Carnot.

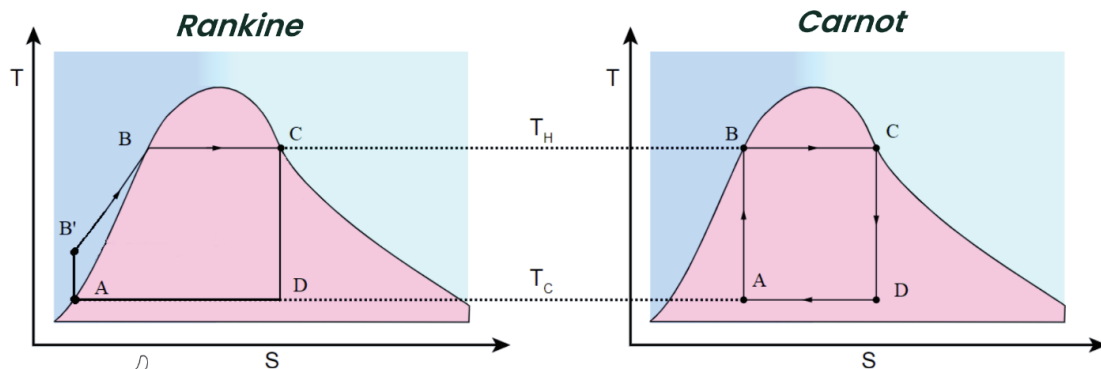


Figura 6. Confronto tra ciclo Rankine a vapore saturo e ciclo di Carnot.

Il ciclo è sempre composto da quattro trasformazioni che prevedono:

- una compressione adiabatica per opera di una pompa (A-B');
- un riscaldamento dell'acqua per opera di una caldaia che, dapprima la porta ad aumentare la sua temperatura fino a raggiungere quella di vaporizzazione, poi, mantenendo la temperatura costante, le permette il raggiungimento dello stato di vapore saturo secco (B'-B-C);
- un'espansione in turbina per produrre lavoro meccanico (C-D);
- condensazione del vapore saturo a bassa pressione nel condensatore (D-A) [2].

La principale differenza rispetto al ciclo di Carnot è che nel ciclo Rankine si ha una condensazione completa, fino a portare il fluido di lavoro allo stato di liquido saturo. Questo semplifica la realizzazione della fase di compressione superando la prima criticità evidenziata per il ciclo di Carnot [3].

Di seguito è rappresentata la schematizzazione di un impianto di ciclo Rankine.

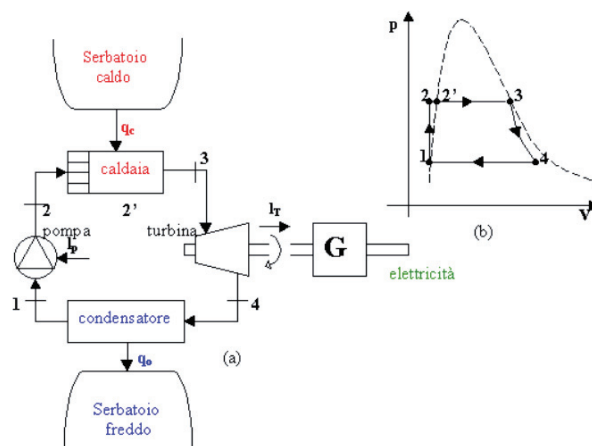


Figura 7. Schematizzazione impianto a ciclo Rankine a vapore saturo [2]

Ciclo Hirn

Il ciclo di Hirn, detto anche ciclo di Rankine a vapore surriscaldato è il ciclo più utilizzato per gli impianti a vapore e, nasce per ovviare ai limiti presentati dal ciclo di Rankine a vapore saturo.

Di seguito ne è rappresentata una schematizzazione d'impianto e il suo corrispondente grafico T-s.

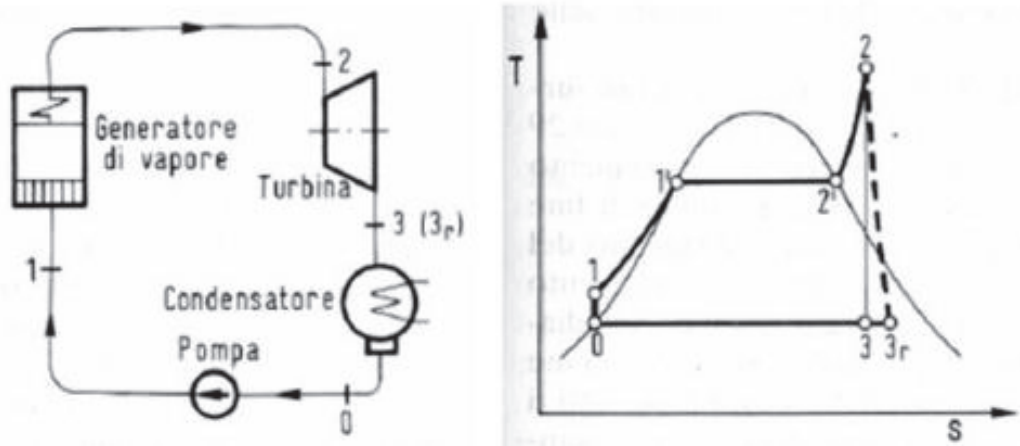


Figura 8. Schema d'impianto e grafico T-s del ciclo Hirn [3].

Rispetto al ciclo Rankine a vapore saturo, nel ciclo Hirn il vapore viene ulteriormente surriscaldato con il risultato che la maggior parte della fase di espansione avviene al di sopra della campana di saturazione, quindi con un rendimento superiore rispetto ai cicli con vapore saturo.

Componenti principali di una turbina a vapore

Nell'immagine seguente è rappresentata una turbina a vapore in cui sono stati identificati tutti i suoi elementi costituenti.

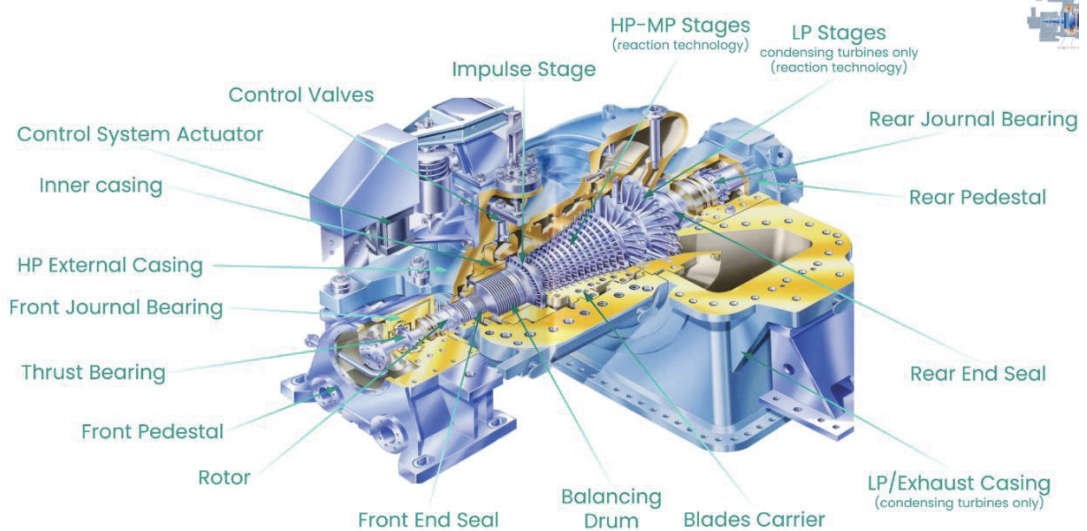


Figura 9. Identificazione degli elementi di una turbina [1].

Cassa esterna (External casing)

La cassa esterna è un recipiente in pressione, realizzato per fusione. Ha il compito di supportare le casse interne e garantisce il corretto allineamento tra le componenti statoriche e rotoriche.

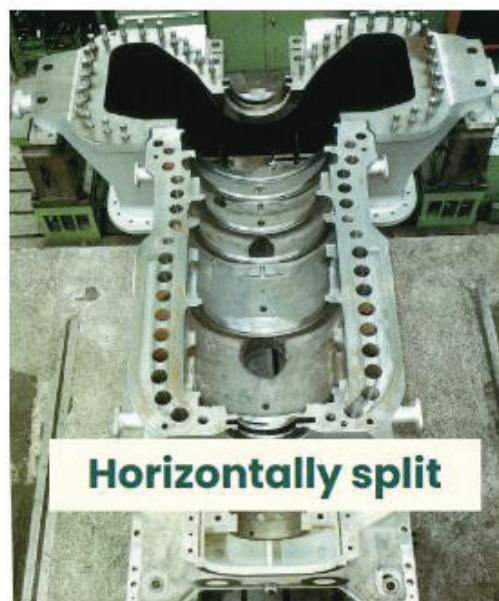


Figura 10. External casing [1].

La cassa esterna può essere divisa in tre sezioni principali:

- Sezione d'ingresso (inlet section): selezionata in base alla portata vapore da smaltire e alle sue caratteristiche (pressione e temperatura);
- Sezione intermedia (intermediate section): numero e tipo dei sottocomponenti che la compongono sono definiti in base al progetto dello steam path;
- Sezione di scarico (exhaust section): selezionata in base alla portata vapore da smaltire e alla pressione di scarico (turbina a contropressione o a condensazione) [1].

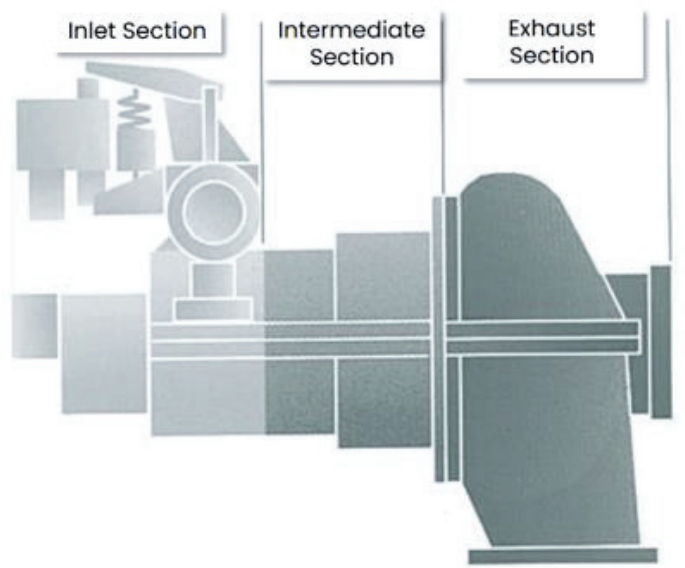


Figura 11. Sezioni principali dell'external casing [1].

Cassa interna (Inner casing)

Le casse interne sono montate all'interno della cassa esterna e possono avere differenti configurazioni:

- nozzle chamber (camera ugelli): è la cassa interna dove si trovano i canali vapore che portano il flusso dalle valvole di regolazione agli ugelli del primo stadio ed è realizzata per fusione;
- blade carriers (porta-pale): utilizzati per alloggiare la palettatura statorica di alta pressione, sono divisi orizzontalmente e realizzati per forgiatura;
- LP blade carriers (porta-pale di bassa pressione): utilizzati per pale statoriche di bassa pressione, anch'essi sezionati orizzontalmente e realizzati per fusione o per composizione di lamiere saldate fra loro.

Le casse interne sono solitamente componenti standard ma, nei blade carriers (gli elementi maggiormente personalizzabili a seconda dello steam path) la lunghezza assiale è variabile, grazie all'aggiunta o meno di parti standardizzate [1].

Supporti anteriori e posteriori

Oltre allo scopo di alloggiare i cuscinetti su cui poggia il rotore, i supporti permettono l'espansione della turbina in direzione assiale. Sono componenti standardizzati, quindi una volta che sono state selezionate le sezioni di ingresso e di scarico per la turbina, i supporti sono selezionati automaticamente.

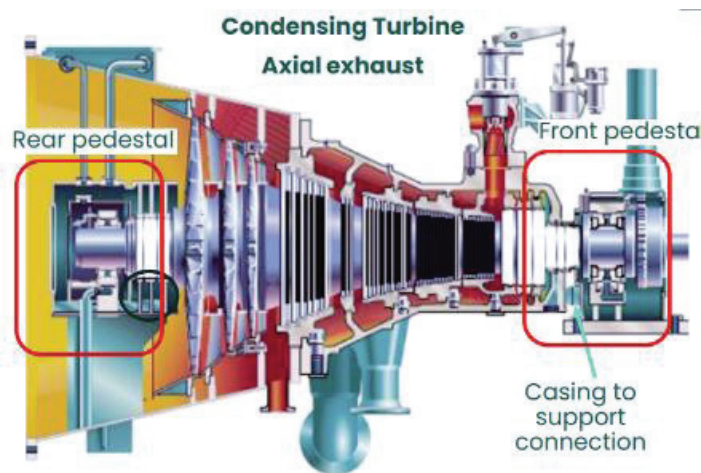


Figura 12. Supporti anteriori e posteriori [1].

Si distinguono in:

- front pedestal (supporto anteriore): la turbina è appoggiata sul supporto, nel montaggio sono installate delle rondelle regolabili per garantire un gioco che permette un'eventuale espansione termica differenziale dei componenti [1].

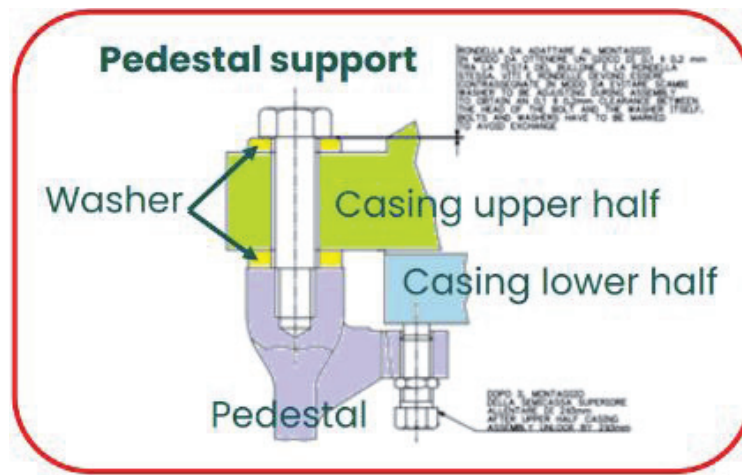


Figura 13. Montaggio supporto frontale [1].

- rear pedestal (supporto posteriore): analogamente a quello anteriore, anche questo è montato in modo tale da permettere l'espansione differenziale cassa-supporto. Inoltre, definisce il punto fisso della turbina.

Rotore

È l'elemento principale della turbina, dove l'energia del vapore viene trasformata in energia meccanica che poi viene trasferita alla macchina condotta. È realizzato per forgiatura da un singolo pezzo, sul quale vengono poi montate le palette. Una volta completato il montaggio ed essere stato soggetto a test di sopra-velocità e di equilibratura, il rotore è pronto per l'installazione [1].

La configurazione del rotore varia a seconda che la turbina sia a contropressione o a condensazione, come indicato nell'immagine seguente.

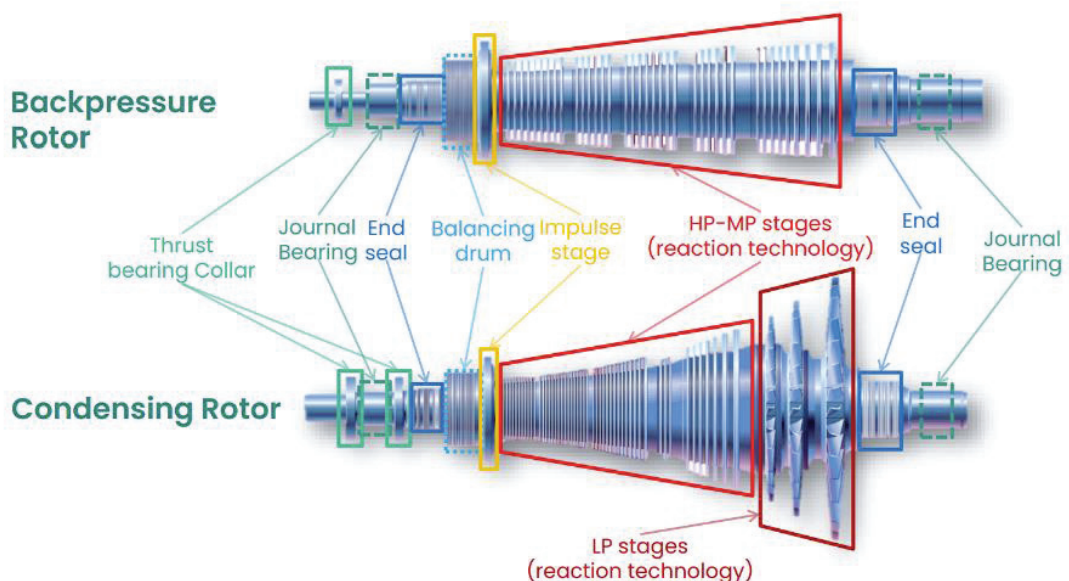


Figura 14. Configurazione del rotore in contropressione e a condensazione [1].

La differenza sostanziale sta nella presenza delle pale di bassa pressione (LP stages) cioè del gruppo di stadi dove l'espansione del vapore avviene sotto la campana di saturazione.

Cuscinetto (bearing)

Il cuscinetto è l'elemento chiave che garantisce stabilità e sicurezza durante il funzionamento. Esistono due diverse tipologie di cuscinetti:

- cuscinetto reggispira (thrust bearing): installato nel supporto anteriore con lo scopo di contrastare la spinta assiale che si genera a causa della geometria dell'albero e della caduta di pressione. È dotato di piastre di livellamento e ha la stessa capacità in entrambe le direzioni.
- Cuscinetto portante (journal bearing): installato sia nel supporto anteriore sia in quello posteriore, ha lo scopo di supportare il rotore durante il suo funzionamento [1].

Valvole di sicurezza

Le valvole sono classificate in base alla loro funzione, si distinguono:

Valvole di sicurezza:

- Valvola di arresto d'emergenza (ESV): installate sull'ingresso e in ogni iniezione intermedia della turbina con lo scopo di arrestare il flusso di vapore nel minor tempo possibile.
- Valvola di non ritorno (NRV): installata su spillamenti ed estrazioni controllate per evitare un rientro di vapore dalle tubazioni di processo che potrebbe causare un evento di overspeed;

Valvole di controllo: utilizzate per regolare il flusso del vapore e controllare così la potenza erogata dalla turbina; possono essere valvole esterne, valvole multiple, valvole a griglia.

Saldature

La saldatura è una tecnologia di giunzione che permette di unire componenti tra loro. Ha un ruolo chiave soprattutto nelle costruzioni in acciaio di dimensioni rilevanti come: navi, ponti o fondazioni offshore. Per le dimensioni del prodotto, l'operazione di saldature viene eseguita in più passaggi, a seconda della tecnologia adottata e dei parametri di processo.



Figura 15. Saldatura.

In generale, il processo di saldatura è ottenuto grazie al mescolamento, allo stato fuso, di materiale base e materiale d'apporto. Si riesce così ad ottenere il cordone di saldatura che garantisce l'unione dei due elementi.

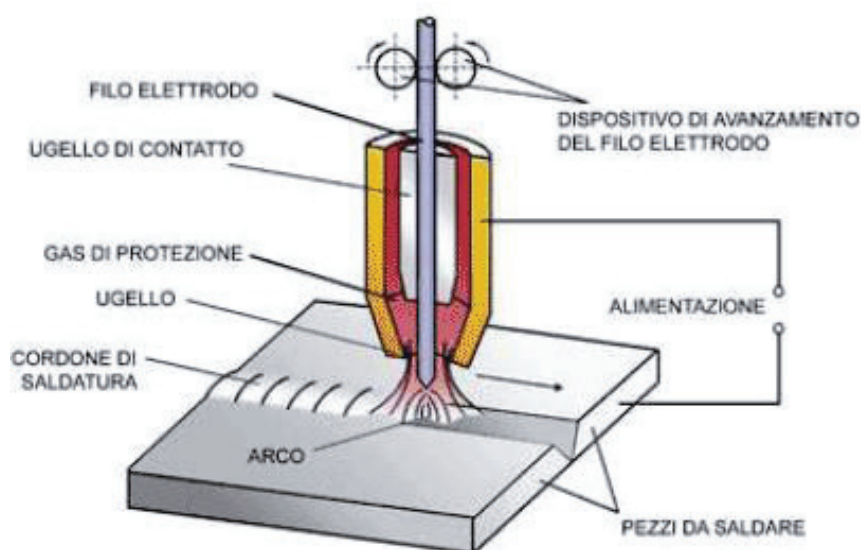


Figura 16. Operazione di saldatura tra due componenti

Le saldature possono essere classificate in base al materiale d'apporto:

- Eterogenea: unisce materiali metallici aggiungendo materiale differente da quello base;
- Omogenea: unisce materiali metallici con l'aggiunta di materiale d'apporto appartenente alla stessa famiglia di quello base;
- Autogena: unisce i componenti senza apporto di materiale metallico.

Un'ulteriore classificazione delle saldature è relativa alla tipologia di processo di realizzazione:

- Manual Metal Arc Welding (MMAW): saldatura realizzata manualmente;
- Gas Metal Arc Welding (GMAW): utilizza un gas inerte per garantire protezione dalle ossidazioni. Può essere eseguita sia manualmente che in maniera automatica ed è impiegata prevalentemente per saldare pezzi di spessori elevati;
- Laser-Arc Hybrid Welding (LAHW): si avvale dell'utilizzo di un laser per alterare termicamente zone molto piccole. Il suo principale vantaggio è la velocità d'esecuzione del processo.

La tecnologia GMAW è una delle più utilizzate essendo un processo ad alta potenza che permette di ridurre tempi e costi di realizzazione. Se automatizzata consente di raggiungere velocità di deposizione, potenza di processo e produttività superiori alla GMAW manuale. Quest'ultima però presenta il vantaggio di avere la capacità di compensare le deviazioni geometriche e permettere la regolazione dei parametri all'interno del processo [9].

A differenza della precedente, LAHW permette di raggiungere velocità ancora più elevate. Inoltre, il minor numero di passate necessarie consente un risparmio delle risorse, minore distorsione e, di conseguenza, ridotti lavori di finitura richiesti. Il problema critico si verifica nelle strutture di grandi dimensioni e con tolleranze elevate, in quanto questa tipologia di saldatura richiede una preparazione dei bordi ad alta precisione (es. tramite fresatura o taglio ad acqua). Inoltre, a causa della sua limitata profondità, se si hanno materiali spessi, può essere necessario eseguire passaggi di riempimento aggiuntivi con altre tecnologie di saldatura ad arco, per ottenere i requisiti richiesti [9].

L'ultima tipologia analizzata è quella manuale MMAW, è molto popolare nei cantieri edili visto che non necessita di gas di protezione, garantisce grande flessibilità e prevede costi ridotti per attrezzature ed elettrodi. Lo svantaggio principale di questo processo è la sua bassa produttività, a causa delle limitate velocità di saldatura, a cui vanno aggiunti i tempi necessari per il cambio dell'elettrodo e la rimozione della scoria [9].

Oltre alla produttività del processo, per scegliere la migliore tipologia di saldatura bisogna tenere in considerazione:

- Forma, dimensioni e materiale dei prodotti da saldare;

- Lotto produttivo richiesto;
- Operazioni di pre e post-saldatura da realizzare;
- Impatti conseguenti sia a livello ambientale che relativo alla salute degli operatori coinvolti.

Tecniche di saldatura

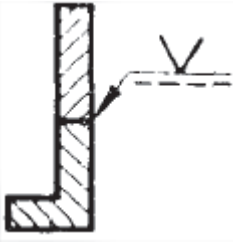
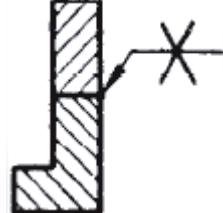
È possibile identificare tre differenti tecniche di saldatura:

- Saldatura a piena penetrazione (Complete joint penetration);
- Saldatura a parziale penetrazione (Partial joint penetration);
- Saldatura ad angolo (Fillet Joint).

Saldatura a piena o parziale penetrazione

La saldatura è definita a piena penetrazione se il cordone attraversa l'intera area di contatto delle parti saldate.

La tabella che segue mostra le diverse configurazioni possibili di una saldatura a piena penetrazione.

<i>Joint design</i>	<i>ILLUSTRATION</i>	<i>SYMBOL</i>
CJP SINGLE V		
CJP DOUBLE V		
CJP SINGLE BEVEL		

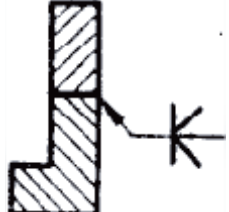
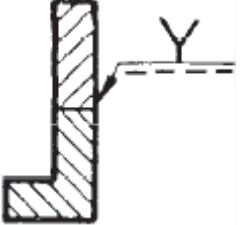
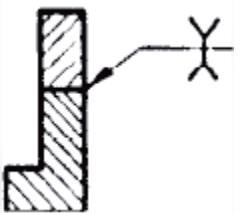
CJP DOUBLE BEVEL		
CJP T SINGLE BEVEL+ FILLET		

Tabella 1. Possibili configurazioni della saldatura a piena penetrazione con relativo simbolo identificativo [10].

Viceversa, si parla di saldatura a parziale penetrazione, se il cordone non attraversa l'intera area delle parti saldate.

La tabella che segue mostra le diverse configurazioni possibili di una saldatura a parziale penetrazione.

<i>Joint design</i>	<i>ILLUSTRATION</i>	<i>SYMBOL</i>
PJP SINGLE V butt joint		
PJP DOUBLE V butt joint		
PJP SINGLE BEVEL butt joint		

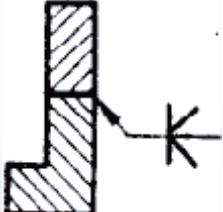
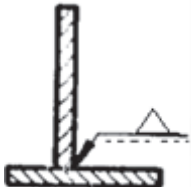
PJP DOUBLE BEVEL butt joint		
PJP T SINGLE BEVEL+ FILLET		
PJP T DOUBLE BEVEL + (double) FILLET*		

Tabella 2. Possibili configurazioni della saldatura a parziale penetrazione con relativo simbolo identificativo [10].

Prima della saldatura a piena o parziale penetrazione è necessario eseguire la cianfrinatura, ovvero un'operazione meccanica che favorisce la giunzione dei due pezzi.

La cianfrinatura consiste nel tagliare, smussare o modellare i bordi così da creare un angolo ("cianfrino") che favorisca la penetrazione del materiale d'apporto. Può essere di diverse forme come a V, U, o a X.

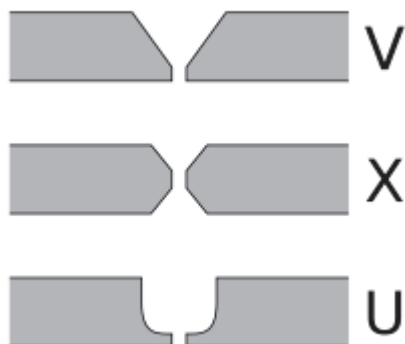


Figura17. Diverse configurazioni di cianfrinatura.

L'immagine che segue mostra un esempio di una saldatura a piena penetrazione con configurazione a “doppio V” e a “V”.

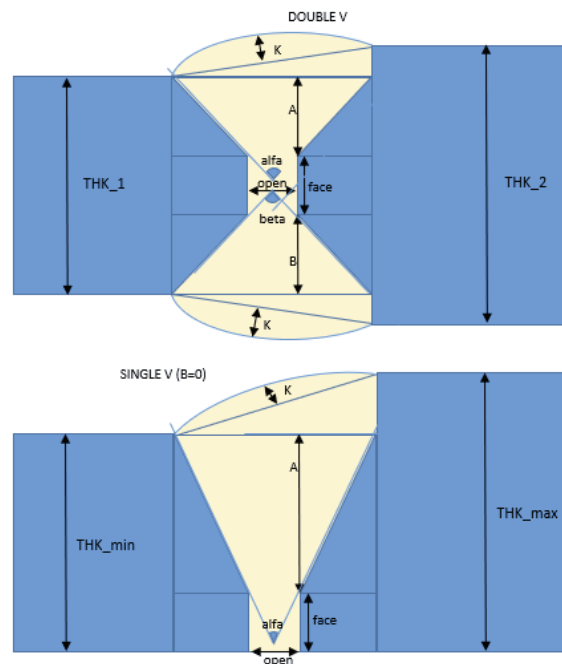


Figura 18. Saldatura a piena penetrazione a “doppio V” e a “V” [10].

Dalla figura 18 si ha che:

- A : dimensione della saldatura;
- K : spessore del cappuccio che garantisce la convessità della saldatura;
- $Open$: vale 0 se la saldatura è a parziale penetrazione, altrimenti è diverso da 0;
- THK_1 , THK_2 , THK_{min} , THK_{max} : sono gli spessori dei pezzi da saldare.

Saldatura ad angolo

È una tipologia di saldatura che si riferisce all'unione di due pezzi perpendicolari tra loro o che formano un angolo. Può avere due differenti configurazioni:

- a T;
- perimetrale.

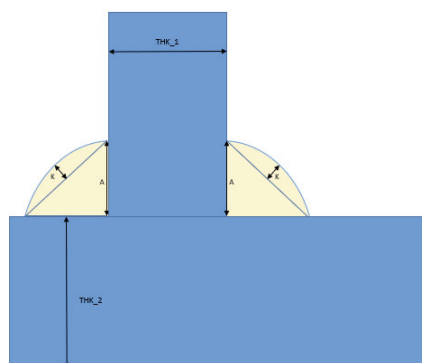


Figura 19. Saldatura ad angolo a T [10].

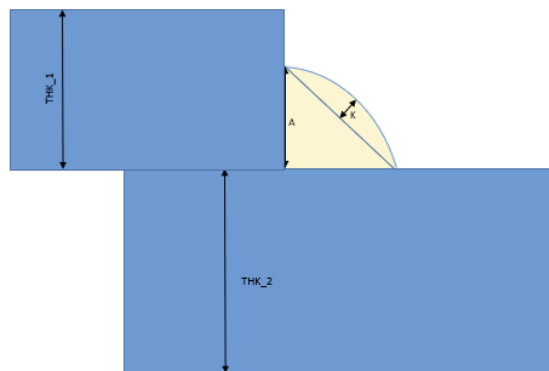


Figura 20. Saldatura ad angolo perimetrale [10].

Dalle figure 19 e 20 si ha che:

- A : dimensione della saldatura;
- K : spessore del cappuccio che garantisce la convessità della saldatura;
- THK_1 , THK_2 : sono gli spessori dei pezzi da saldare.

Stato dell'arte LCA

Introduzione

I gas serra sono specifici gas presenti nell'atmosfera (es, CO₂) che riescono a trattenere una buona parte della componente dell'infrarosso della radiazione solare, sono quindi fondamentali per mantenere una temperatura abitabile nel pianeta.

L'avvento della rivoluzione industriale ha portato a un utilizzo sempre maggiore di combustibili fossili, generando un aumento di concentrazioni di gas serra nell'atmosfera. Questo è il fattore principale che ha causato il fenomeno di riscaldamento globale con conseguenti impatti ecologici e ambientali (eventi meteorologici estremi, innalzamento del livello del mare, ecc.). Negli ultimi anni sono stati registrati progressi nella diminuzione di emissioni di gas serra ma, nonostante ciò, le concentrazioni continuano ad aumentare. Questo è dovuto al cosiddetto "tempo di resistenza", ovvero il tempo necessario per ottenere una rimozione completa dall'atmosfera della CO₂ attraverso processi naturali. Alcuni di questi processi portano ad una completa rimozione in meno di cinque anni, altri ne impiegano anche centinaia. Questo fa sì che l'obiettivo principale non sia la stabilizzazione dell'emissione di CO₂, bensì una sua significativa diminuzione.

In quest'ottica nasce l'analisi LCA (life cycle assessment), una metodologia mirata a valutare gli impatti ambientali associati a un qualsiasi prodotto, processo o attività. Generalmente prende in esame l'intero ciclo di vita del prodotto ed è per questo definita "from cradle to grave" ("dalla culla alla tomba") valutando il consumo delle risorse naturali e i suoi rilasci nelle differenti fasi di:

- Produzione;
- Trasporto;
- Uso;
- Manutenzione;
- Riciclo/smaltimento.

È possibile eseguire anche un'analisi ridotta dell'impatto che, escludendo alcune fasi, si concentra sull'estrazione delle materie prime e sulle loro successive lavorazioni, fino alla realizzazione del prodotto finito. Questo tipo di analisi è definita "from cradle to gate" ("dalla culla alla tomba") ed è di particolare interesse per le industrie manifatturiere in quanto consente di focalizzarsi sul ciclo di produzione, permettendo di valutarne gli impatti e di definire migliorie nei processi.

In entrambi i casi la finalità principale è quella di identificare le eventuali opportunità di miglioramento delle prestazioni ambientali del prodotto nel corso del suo ciclo di vita, ma permette anche di:

- Informare il progettista riguardo le decisioni da prendere;
- Selezionare indicatori rilevanti di performance ambientali, incluse misurazioni tecniche.

La ISO 14040 del 2006 [4] e la ISO 14044 sempre del 2006 [5] sono due normative che contengono informazioni su concetti e procedure dell'LCA, in particolare è possibile dividere l'analisi LCA in quattro fasi differenti:

1. Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione;
2. Analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI);
3. Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA);
4. Interpretazione.



Figura 21. Processo di analisi LCA.

Definizione dell'obiettivo e campo di applicazione

In primo luogo, deve essere ben precisata la motivazione dello studio che può variare tra:

- Danno ambientale ad un ecosistema;
- Valutazione di impatto ambientale;
- Emissioni di CO₂;
- Identificazione di opportunità di miglioramento del prodotto.

Oltre allo scopo deve essere definita anche l'unità funzionale (l'oggetto dell'analisi) e l'unità di misura. L'unità funzionale può essere:

- Prodotto;
- Attività umana;
- Processo produttivo.

Successivamente dovranno essere definite anche le categorie di impatto ambientale, le metodologie di calcolo applicate, la qualità dei dati raccolti e, come ultimo, andranno definiti i confini del sistema, ovvero le fasi che saranno oggetto di studio. È possibile identificare quattro differenti fasi:

- Fase Material: prevede l'estrazione e la processazione dei materiali.
- Fase Produzione: comprende le lavorazioni effettuate per l'ottenimento dei componenti e il loro successivo assemblaggio;
- Fase d'uso: è la fase di utilizzo del prodotto comprendente anche la manutenzione necessaria;
- Fase Fine Vita: prende in esame gli scenari messi in atto per lo smaltimento finale del prodotto. Tali scenari possono essere open-loop (prevedono incenerimento o discarica) oppure closed-loop (con un riutilizzo o un riciclo).

Analisi dell'inventario del ciclo di vita (LCI)

È la fase che prevede la raccolta di tutti i dati e dei procedimenti di calcolo per poter poi individuare gli elementi in ingresso e in uscita nel sistema che deve essere analizzato. Questo processo è iterativo, ciò implica che il sistema è meglio conosciuto all'aumentare delle informazioni acquisite ed è quindi possibile identificare nuovi requisiti o limitazioni sui dati raccolti per poter continuare a soddisfare gli obiettivi di studio. Come indicato dalla normativa ISO 14044 del 2006 [5] i dati possono essere distinti in:

- Elementi in ingresso dell'energia, materie prime in ingresso, materiali ausiliari o altre entità fisiche in ingresso;
- Prodotti, coprodotti e rifiuti;
- Emissioni in aria e scarichi nell'acqua e nel suolo;
- Altri aspetti ambientali.

Una volta terminata la fase di raccolta dei dati si passa al procedimento di calcolo ovvero:

- Validazione dei dati raccolti;
- Correlazione dai dati ai processi unitari;
- Correlazione dei dati al flusso di riferimento dell'unità funzionale.

Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA)

Lo scopo di questa fase è quello di valutare la portata di eventuali impatti ambientali sulla base dei dati ottenuti dall'LCI. Quindi in questo processo vengono associati i dati di inventario a specifiche categorie d'impatto ambientale e ad indicatori di categoria per favorire la comprensione di tali impatti. Le fasi caratterizzanti questo processo sono:

- Selezione di categorie di impatto, di indicatori di categoria e di modelli di caratterizzazione;

- Assegnazione dei risultati dell'LCI (classificazione);
- Calcolo dei risultati di indicatore di categoria(caratterizzazione);
- Risultati di indicatore di categoria, risultati di LCIA.

Alcune delle principali categorie d'impatto che possono essere prese in esame sono:

- Global Warming: aumento della temperatura media atmosferica globale;
- Eutrofizzazione: disturbo dell'equilibrio nutrizionale nel suolo e nei corsi/serbatoi d'acqua a causa dell'aumento delle emissioni di nutrienti (es. azoto) che possono provocare impoverimento di ossigeno;
- Impoverimento delle risorse, acqua: m³ di acqua utilizzati in relazione alla sua scarsità locale;
- Impoverimento delle risorse abiotiche: utilizzo di combustibili fossili (petrolio, gas e carbone) provenienti dal sottosuolo.

È necessario tenere presente che LCA tratta solo problemi ambientali specificati nell'obiettivo e nel campo di applicazione, questo implica che non ho una valutazione completa di tutti i problemi ambientali associati all'oggetto in studio.

Interpretazione

È la fase finale dove si combinano i risultati ottenuti dalle due fasi precedenti (analisi di inventario e valutazione di impatto) ottenendo dei risultati coerenti con l'obiettivo e il campo di applicazione, al fine di individuare criticità, spiegare limitazioni e fornire raccomandazioni. In questa fase è possibile anche fare confronti con risultati già presenti in letteratura.

LCA di saldature in letteratura

In letteratura è stato possibile riscontrare diverse analisi LCA eseguite sul processo di saldatura, per verificarne l'impatto. Uno studio eseguito da Sproesser, Chang, Pittner, Finkbeiner e Rethmeier ha permesso di mettere a confronto quattro diverse tipologie di saldature e verificarne gli effetti sull'ambiente. Le quattro tipologie prese in esame sono:

- MMAW: eseguita manualmente a più passate con alimentazione standard ed elettrodi rivestiti di rutilo di diametro variabile da 2,5 a 4 mm;
- GMAW in arco spray convenzionale;
- GMAW in arco spray modificato: sia in questo che nel caso precedente si considera una fonte di alimentazione commerciale e un asse lineare per la movimentazione della torcia;
- LAHW: comprendente un laser la cui testa, insieme alla torcia, viene montata su un braccio robotico [6].

L'analisi è stata eseguita tramite il software Gabi e i primi risultati ottenuti sono indicati dalla seguente figura.

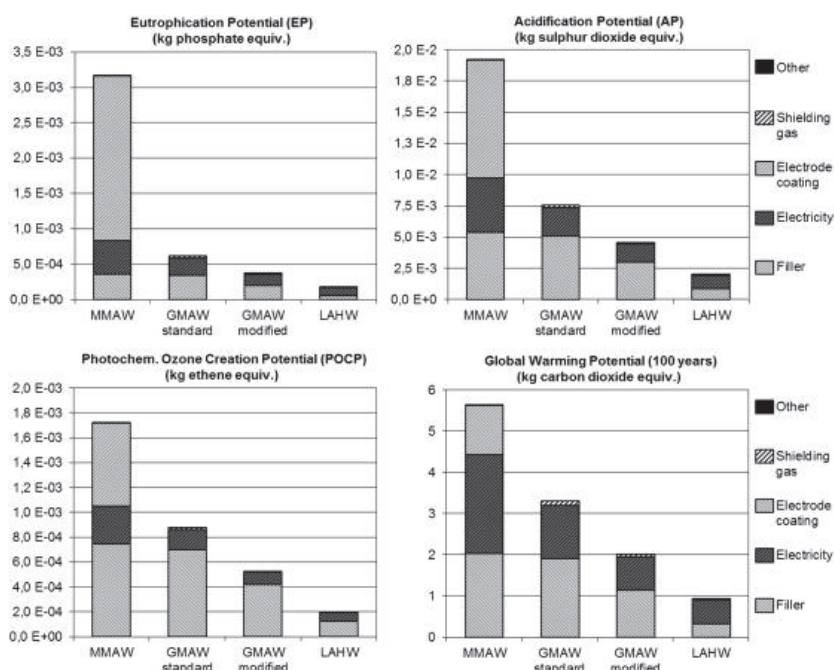


Figura 22. Confronto dei diversi impatti ambientali delle quattro saldature prese in esame [6].

Dai grafici si evince come gli impatti dei processi manuali (in questo caso MMAW), risultano essere significativamente maggiori rispetto a quelli automatici selezionati, mentre LAHW è il metodo meno impattante. Inoltre, tra le tecniche GMAW, quella ad arco spray modificato ha un impatto minore rispetto a quello standard.

Ulteriori analisi hanno evidenziato come nel GMAW e LAHW la quota principale degli oneri ambientali è causata dal materiale d'apporto, mentre per l'MMAW il rivestimento di rutilo dell'elettrodo contribuisce in maniera importante all'impatto ambientale.

Di conseguenza emerge che è sempre meglio preferire i metodi automatici (GMAW e LAHW), rispetto a quelli manuali (MMAW) che presentano un consumo molto

elevato di materiale ed elettricità, tenendo però sempre presente che il design del giunto e la scelta del materiale hanno un ruolo chiave negli impatti finali ottenuti [6].

Successivamente, un altro studio eseguito sempre da Sproesser, Pittner e Reithmeier, ha permesso di valutare l'efficienza energetica della saldatura a gas inerte metallico (GMAW).

Nello specifico è stata analizzata l'efficienza della saldatura TGMW (GMAW in tandem) che utilizza due teste poste in sequenza per ottenere un maggiore tasso di deposizione.

Ciò che si è ottenuto è che la TGMW ad alta potenza, porta una riduzione del consumo di elettricità del 23% e una diminuzione del tempo richiesto del 55% [7].

Nel 2016, Sangwan, Hermann, Egede, Bhakar e Singer hanno effettuato un'analisi LCA "dalla culla alla tomba" per valutare gli impatti ambientali che uno studente della sezione di saldatura, nelle sedi di laboratorio di un'università indiana, genera in un anno. Da questa ricerca è emerso che:

- la fase relativa all'estrazione e preparazione dei materiali grezzi è la più impattante a causa del tipo di acciaio impiegato;
- la fase di utilizzo è la seconda più impattante a causa dell'elettricità utilizzata durante il processo e dei fumi generati;
- l'acquisizione, uso e fine vita dell'acciaio utilizzato, così come del rame (presente nel raddrizzatore e nelle barre di riempimento), ha grande rilievo nell'impatto globale finale [8].

Infine, nel 2015, un ulteriore studio si è soffermato non solo sull'analizzare l'impatto ambientale di differenti tipologie di saldature, ma ha preso in esame anche l'effetto che questo processo ha sugli operatori interessati. I fumi che si generano in questa operazione sono pericolosi e devono essere monitorati per garantire la sicurezza dei lavoratori. Infatti, le saldature generano una miscela di fumi composti da una gamma di metalli che si sono volatilizzati dall'elettrodo di saldatura. La maggior parte di questi fumi è composta da ossidi di ferro, ma sono presenti anche cromo, manganese e nichel. Un'esposizione eccessiva dei saldatori in questo ambiente può provocare danni polmonari acuti e cronici, cancro ai polmoni e possibili danni a cuore, reni e sistema nervoso centrale.

Ciò che emerge dalla ricerca è che, mentre con la saldatura automatica (LAHW) è possibile completare l'operazione con un minor numero di passate, di materiale fuso e di volume totale di saldatura (per l'elevata densità di potenza), nella saldatura manuale (MMAW) la bassa velocità di saldatura, e il ridotto tasso di deposizione portano a tempi di processo elevati. In quest'ultimo caso, quindi, c'è un maggiore impatto ambientale e un aumento delle emissioni dei fumi rispetto al caso precedente. In definitiva, l'impiego di processi automatici e ad alta potenza è sempre preferibile a quella manuale, sia in termini di impatti ambientali sia a livello di rischi sanitari [9].

Quindi, come emerso dagli articoli analizzati, esiste la possibilità, mediante l'utilizzo di software come Gabi o SimaPro di valutare gli impatti ambientali relativi al processo di saldatura.

Software utilizzati

Per poter eseguire lo studio in esame è stato necessario l'utilizzo di tre software differenti:

- Siemens NX;
- LeanCost;
- SimaPro.

Siemens NX



Figura 23. Software Siemens NX.

È un software che offre soluzioni di progettazione, simulazione e produzione, supportando ogni aspetto dello sviluppo del prodotto. È il risultato dell'evoluzione di un software precedente chiamato "Unigraphics" basato su librerie e modelli sviluppati da Parasolid.

In questo studio è stato utilizzato per poter ottenere i singoli componenti del supporto (parte superiore, parte inferiore ed eventuali anelli) e poterne inoltre calcolare il loro peso, informazione utile successivamente nella modellazione SimaPro.

LeanCost



Figura 24. Software LeanCost.

È un software che, avvalendosi di un approccio analitico, consente la costificazione dei prodotti. LeanCost, infatti, grazie alla sua integrazione con sistemi CAD 3D, riesce ad analizzare le caratteristiche geometriche del modello e ad associargli un ciclo di lavorazione. Questo consente di avere come output una stima oggettiva dei tempi e dei costi di produzione.

L'utilizzo di questo software è stato determinante per riuscire ad ottenere informazioni relative sia alla quantità di materiale aggiunto durante il processo di saldatura, sia per poter calcolare i tempi necessari per il suo completamento (informazione necessaria per calcolare il consumo energetico).

SimaPro



Figura 25. Software SimaPro.

Software che aiuta a rendere misurabile lo sviluppo sostenibile di un prodotto e gli obiettivi in termini di sostenibilità. SimaPro, infatti, grazie alle indicazioni fornite, permette di migliorare il ciclo di vita e l'impatto ambientale dell'oggetto preso in esame.

In questo studio il software è stato utilizzato per l'analisi dei prodotti presi in esame, permettendo la modellazione del materiale e dei processi produttivi, grazie anche alla possibilità di inserire il modello parametrico sviluppato per la saldatura.

Metodologia per la parametrizzazione del processo di saldatura

Metodo generale

Lo scopo di questo studio è effettuare l'analisi LCA dei supporti per turbina a vapore. Questi componenti sono realizzati mediante saldatura di piastre e lamiere, pertanto, la prima attività svolta è stata la costruzione di un modello parametrico che permetta di correlare la massa di materiale aggiunto durante il processo di saldatura con la massa del componente preso in esame, è stato quindi necessario eseguire un'analisi dettagliata delle saldature su prodotti con stesse funzionalità e forme ma dimensioni differenti.

Per poter analizzare le saldature di un supporto è necessario per prima cosa partire dalla tavola 2D dell'oggetto preso in esame e classificare tutte quelle presenti, assegnando loro colori differenti a seconda della tipologia di saldatura di appartenenza.

Una volta completata la classificazione, il prodotto deve essere scomposto nei suoi componenti costituenti, così da poterli analizzare singolarmente.

Avvalendosi del software LeanCost, dopo aver importato il singolo componente e specificato il materiale, viene lanciata l'analisi del pezzo. A questo punto si confrontano le saldature identificate nella tavola 2D con quelle automaticamente riconosciute dal software, per verificare la presenza di eventuali difformità. Si procederà quindi con l'aggiunta di eventuali saldature mancanti o con la modifica della tipologia di appartenenza tra le saldature individuate automaticamente.

Tenendo conto che l'obiettivo dell'indagine è di ottenere la massa di materiale aggiunto e il tempo impiegato per eseguire il processo, partendo dal file LeanCost modificato, si esegue l'esportazione Excel dei dati così da avere tutte le informazioni necessarie. Tra tutti i dati esportati vengono presi in considerazione:

- la massa totale di materiale aggiunto;
- il tempo necessario per la realizzazione della saldatura;
- il tempo impiegato per eseguire la saldatura a punti (tack welding).

Nell'andare ad analizzare le saldature su LeanCost, è utile tenere presente che il software riconosce tre differenti tecnologie:

- GATW (TIG): è la saldatura ad arco di tungsteno e gas che utilizza il calore generato da un arco elettrico stabilito tra un elettrodo di tungsteno non consumabile e il pezzo in lavorazione, per fondere il metallo nell'area del giunto.
- SMAW: è la saldatura ad arco con elettrodo rivestito, questa tecnica può essere utilizzata su tutti i materiali ferrosi e in tutte le posizioni di saldatura.
- GMAW: è la saldatura ad arco con gas e metallo che utilizza un elettrodo a filo solido continuo che viaggia attraverso la pistola di saldatura. È accompagnata da un gas di protezione per proteggerla dalle contaminazioni [10].

Inoltre, avviene una distinzione tra i tipi principali di saldatura:

- CJP (penetrazione completa del giunto): quando il cordone attraversa tutta l'area di contatto delle parti saldate;
- PJP (penetrazione parziale): quando l'area attraversa solo parzialmente l'area di contatto tra le parti;
- FJ (saldatura a cordone): processo di unione di due pezzi di metallo se sono perpendicolari o ad arco [10].

Un'ulteriore distinzione viene fatta per le passate di saldatura che possono essere:

- Single V;
- Double V;
- Single bevel;
- Double bevel;
- T fillet;
- T single bevel + fillet;
- Perimeter fillet [10].

Tutte queste classificazioni contengono le informazioni necessarie per permettere a LeanCost di calcolare il tempo effettivo di saldatura e la massa di materiale aggiunto.

Per quanto riguarda l'operazione di puntatura (tack welding), il tempo è calcolato utilizzando la seguente formula:

$$TackWeldingTime = \frac{\frac{WeldingBeadLength}{RootTravelSpeed}}{\frac{RootEfficiencyPercentage}{100}}$$

Figura 26. Formula per il calcolo del tack welding time [10].

Dove:

- Welding Bead Length: è la lunghezza del cordone di saldatura;
- Root Travel Speed: è la velocità di avanzamento, considerata sempre pari a quella stabilita nella prima passata;
- Root Efficiency Percentage: considerato il 40% per le saldature a penetrazione completa, in quanto meno efficienti essendo richiesta una certa distanza da mantenere tra i pezzi da saldare; per gli altri tipi è fissato al 70%.

Ripetendo questo processo di analisi su prodotti con forme e funzionalità molto simili ma dimensioni differenti, grazie alle informazioni ottenute, è possibile creare il modello parametrico desiderato.

Viene preso come parametro la massa di materiale aggiunto e non la lunghezza del cordone di saldatura perché altrimenti non si riuscirebbe a tener conto del numero di passate eseguite durante il processo.

Parametrizzazione del processo di saldatura del Support Bearing Front

In questa indagine l'oggetto di studio sono i supporti anteriori di turbine a vapore, in particolare sono stati analizzati supporti anteriori di tre differenti dimensioni elencati di seguito in ordine crescente di dimensioni e massa:

- Front 1
- Front 2
- Front 3

Di seguito le immagini che mostrano i tre supporti anteriori analizzati.

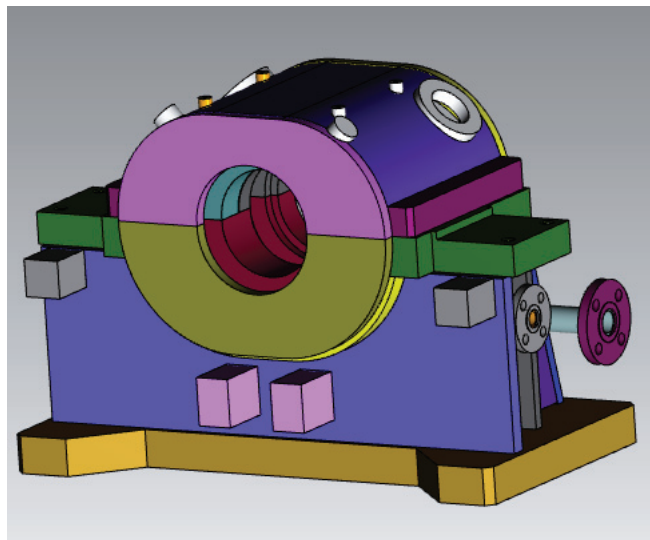


Figura 27. Supporto anteriore "Front 1"

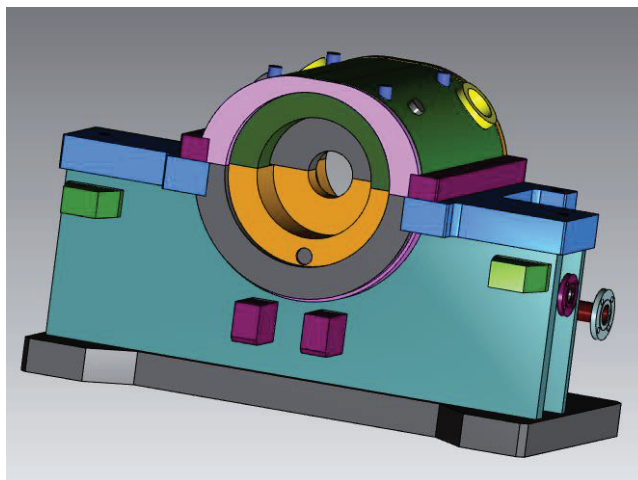


Figura 28. Supporto anteriore "Front 2".

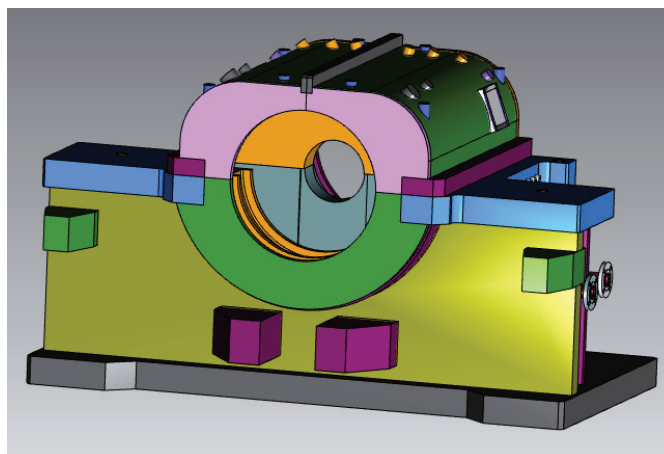


Figura 29. Supporto anteriore “Front 3”.

Lo scopo è quello di creare un modello parametrico per le saldature in cui il peso del materiale aggiunto nel processo di saldatura è in funzione della massa del supporto.

Essendo il procedimento svolto analogo per tutti e tre, verrà analizzato nel dettaglio solo quello eseguito per il Front 1.

Identificazione Saldature

Nel supporto della turbina analizzato sono state individuate quattro diverse tipologie di saldature:

- Complete joint penetration (CJP);
- Partial joint penetration (PJP);
- Partial joint penetration + Fillet joint (PJP+FJ);
- Fillet joint (FJ).

A ciascuna di esse è stato assegnato un colore, come specificato nella tabella sottostante.

Tipologia saldature	Colore assegnato	Numero di saldature trovate
CJP	Blu	9
PJP	Verde	6
PJP+FJ	Giallo	19
FJ	Arancione	5

Tabella 3. Colore associato a ciascuna tipologia di saldatura

Successivamente sulla tavola 2D del componente sono state individuate tutte le saldature presenti evidenziandole col colore della tipologia di appartenenza.

Quindi nel modello 3D del componente preso in esame sono state evidenziate, una per una, tutte le saldature come indicato dalle tavole così da avere un quadro generale tridimensionale di tutte le saldature realmente esistenti. Questo procedimento è rappresentato nelle seguenti figure.

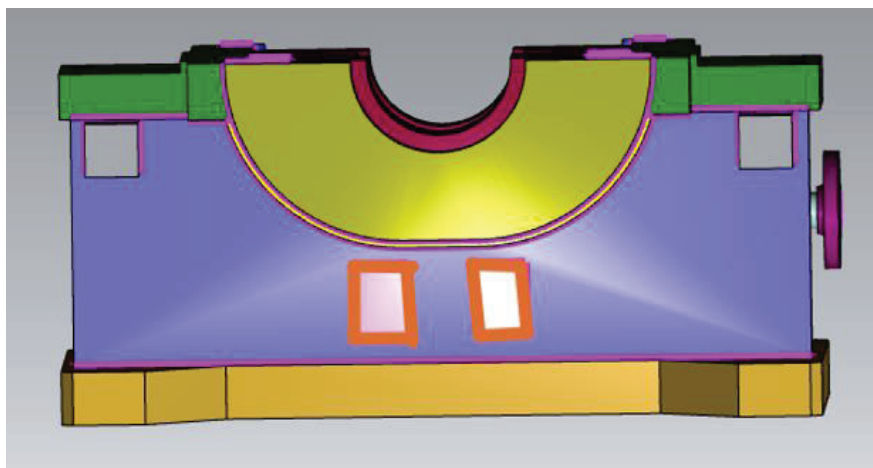


Figura 30. Identificazione di una saldatura "PJP+FJ" in arancione.

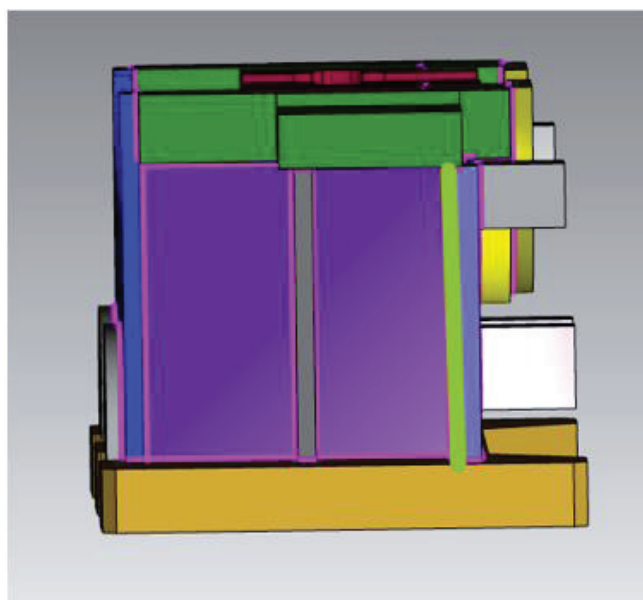


Figura 31. Identificazione di una saldatura "PJP" in verde.

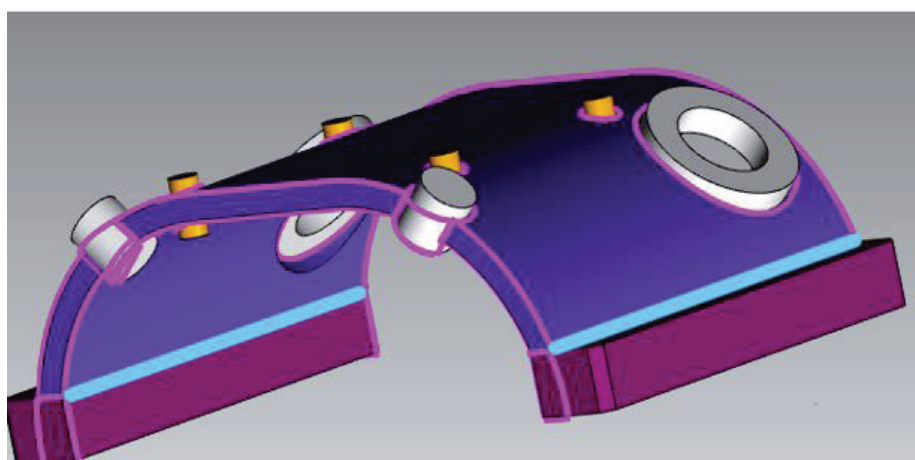


Figura 32. Identificazione di una saldatura "CJP" in azzurro.

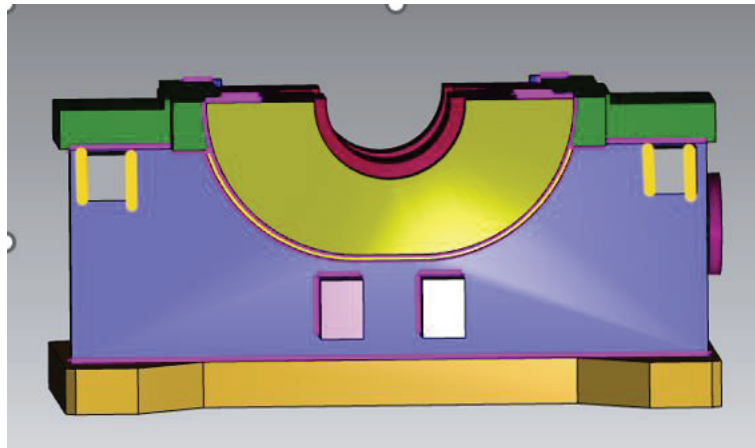


Figura 33. Identificazione di una saldatura “FJ” in giallo.

Analisi saldature

Il supporto si compone di quattro parti:

- Parte inferiore: è il componente con funzione strutturale, contiene gli alloggiamenti dei cuscinetti, le tubazioni per l’olio e definisce l’interfaccia col basamento e l’allineamento della turbina;
- Semianelli A e B: servono per il centraggio dei cuscinetti;
- Parte superiore: è il coperchio posto sopra i semianelli.

Ciascuna parte deve essere importata singolarmente su LeanCost per poter essere analizzata. In questo caso specifico non è stato necessario importare i due semianelli in quanto non presentano saldature, essendo composti entrambi da un pezzo unico.

Prima di far sì che il software possa eseguire l’analisi è stato necessario specificare la logica da attuare (Baseplate) e il materiale (S275), come riportato nelle figure seguenti.

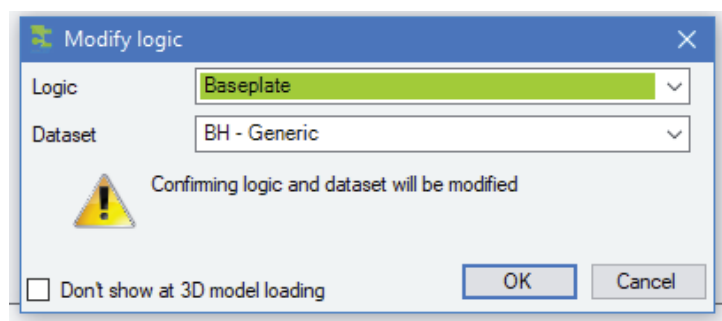


Figura 34. Logica del programma selezionata.

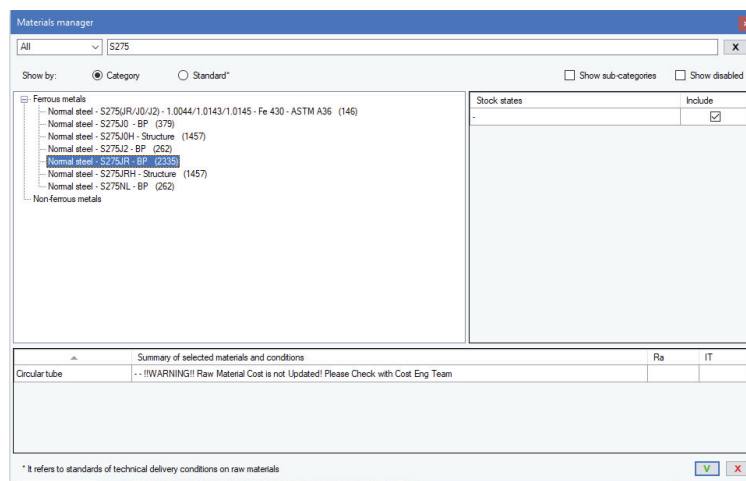


Figura 35. Selezione del materiale su LeanCost.

A questo punto è stato possibile lanciare l'analisi, così da poter individuare le saldature che il software è in grado di riconoscere automaticamente.

Una volta terminata l'analisi è stato eseguito il confronto tra le saldature individuate manualmente sulle tavole e quelle riconosciute automaticamente dal software, tenendo conto che quest'ultime sono tutte considerate da LeanCost come appartenenti alla categoria Complete/Partial joint penetration. Quindi se delle saldature presenti nelle tavole non erano state riconosciute dal software, queste sono state aggiunte manualmente; mentre tutte le saldature appartenenti alla categoria "Fillet" e "Partial+Fillet" si sono dovute modificare andando a cambiare le operazioni di saldatura così da renderle della tipologia corretta. Il percorso seguito è indicato nelle figure successive.

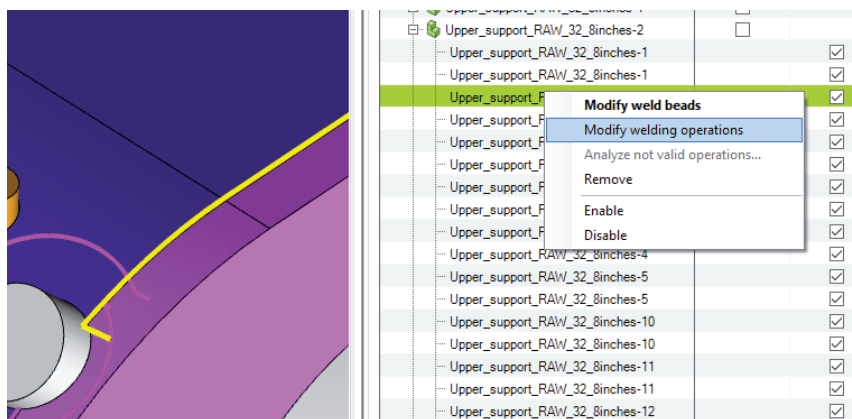


Figura 36. Modifica della tipologia di saldatura.

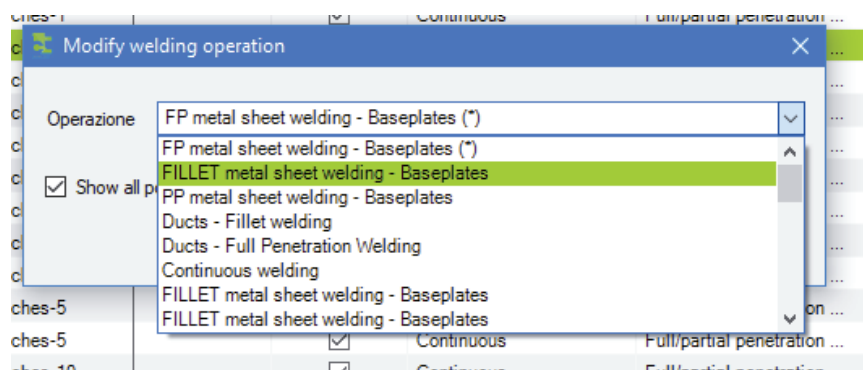


Figura37. Selezione dell'operazione di saldatura.

Una volta terminato il controllo di tutte le saldature è stata fatta l'esportazione dei dati tramite file Excel, lì sono contenuti i dati necessari per la creazione del modello parametrico.

Questa procedura è stata ripetuta per gli altri due supporti frontali.

Creazione modello parametrico

Dai file Excel contenenti l'esportazione dei dati è stato possibile ricavare le informazioni necessarie per la creazione del modello parametrico. In particolare, tra tutti i parametri esportati, ne sono stati presi in considerazione tre:

- **Weld weight:** indica il peso di ogni saldatura individuata sul componente;
- **Tack welding:** indica il tempo necessario per la creazione di giunti di saldatura temporanei per mantenere i componenti nelle loro posizioni durante la fase di fabbricazione.
- **Welding:** indica il tempo impiegato per eseguire la saldatura finale.

Nell'immagine seguente sono indicati i parametri presi in esame per la creazione del modello.

weld length (mm)	weld weight (kg)	Chamfering (h)	Tack welding (bead length) (h)	Welding (h)	Weld cleaning/pickling (h)	NDT (h)	Chamfering (€)	Tack welding (bead length) (€)	Welding (€)	Weld cleaning/pickling (€)	NDT (€)
------------------	------------------	----------------	--------------------------------	-------------	----------------------------	---------	----------------	--------------------------------	-------------	----------------------------	---------

Figura 38. Parametri presi in esame per la creazione del modello parametrico.

Eseguendo la sommatoria di tutti gli elementi delle tre colonne evidenziate in figura, si sono ottenute le due seguenti tabelle, una per la parte superiore e una per la parte inferiore.

Parte superiore (supporto anteriore)				
Front	Massa finito (kg)	Massa saldatura (kg)	Welding time (h)	Welding hours (h)
1	77	16,40	11,87	12,37
2	211	14,62	11,55	12,05
3	649	61,65	46,77	47,27

Tabella 4. Dati relativi alla parte superiore del supporto anteriore.

Parte inferiore (supporto anteriore)				
Front	Massa finito (kg)	Massa saldatura (kg)	Welding time (h)	Welding hours (h)
1	632	27,30	24,61	25,11
2	2345	172,20	118,70	119,20
3	7160	284,77	200,41	200,91

Tabella 5. Dati relativi alla parte inferiore del supporto anteriore.

Successivamente i dati ricavati dalle tabelle 2 e 3 sono stati sommati tra loro così da ottenere le informazioni globali per ciascun supporto, come riportato nella tabella 4.

Supporto anteriore				
Front	Massa finito (kg)	Massa saldatura (kg)	Welding time (h)	Welding hours (h)
1	709	43,70	36,48	37,48
2	2556	186,82	130,25	131,25
3	7809	346,42	247,18	248,18

Tabella 6. Informazioni globali dei tre supporti anteriori.

Welding time è considerato la somma dell'Operation time, ovvero il tempo per eseguire la saldatura a punti (tack welding) e la saldatura vera e propria, mentre welding hours è il welding time a cui è stato aggiunto il tempo di settaggio (pari a 0,5 h).

A questo punto, tramite interpolazione lineare, è stato possibile creare il modello parametrico, mettendo in relazione la massa della saldatura in funzione della massa del finito.

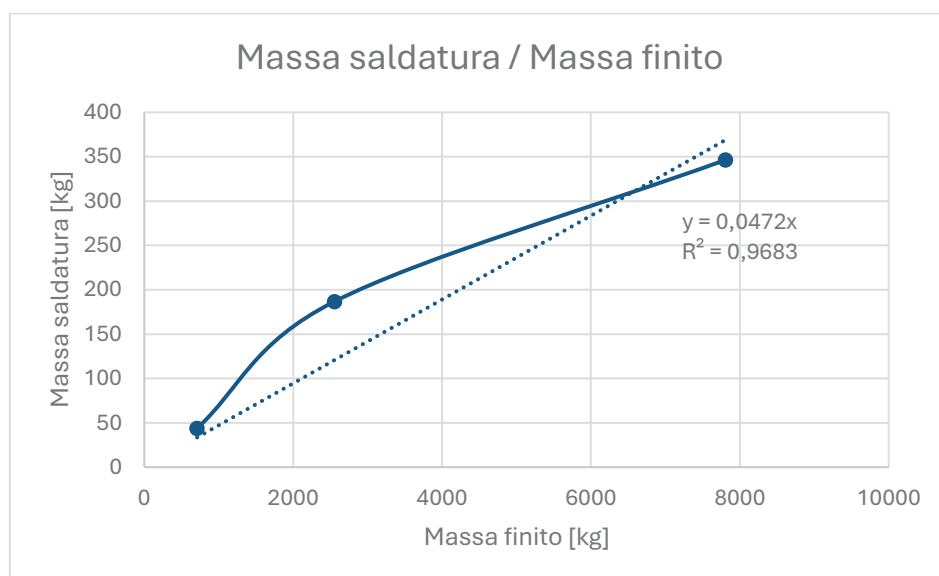


Figura 39. Modello parametrico della massa di materiale aggiunto in saldatura in funzione della massa del supporto anteriore.

In particolare, la relazione lineare che permette di calcolare la quantità di materiale aggiunto in funzione della massa del componente è:

$$y = 0,0472x$$

dove:

- y = massa di materiale aggiunto [kg]
- x = massa del finito del componente [kg]

Inoltre, dalle informazioni ricavate dall'analisi, è stata trovata una relazione lineare sia tra welding time e massa della saldatura (welding weight), sia tra welding hours e massa di saldatura, come riportato nelle seguenti figure.

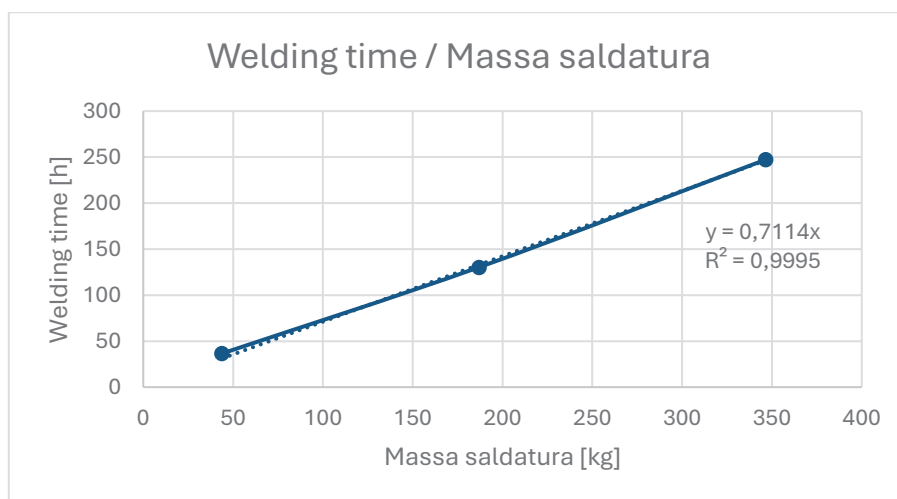


Figura 40. Relazione tra welding time e massa della saldatura (per supporti anteriori).

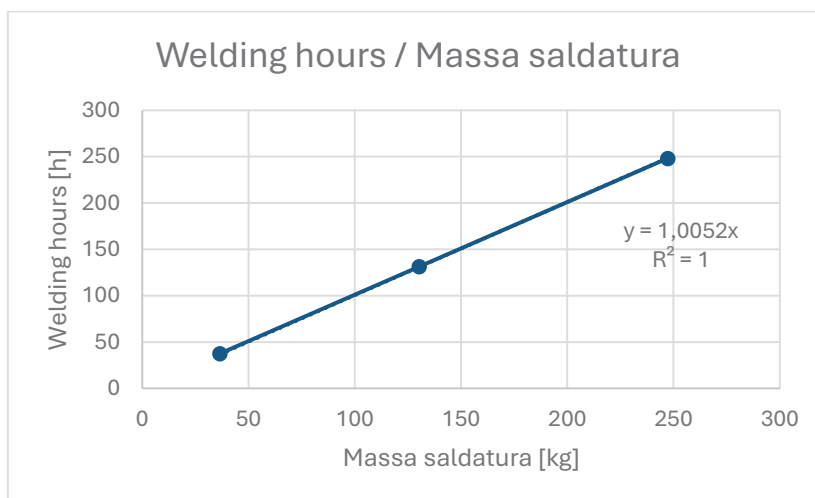


Figura 41. Relazione tra welding hours e massa della saldatura (per supporti anteriori).

Nei supporti anteriori la relazione che lega il Welding time con la massa della saldatura è:

$$y = 0,7114x$$

dove:

- y = Welding time
- x = massa di materiale aggiunto con la saldatura

Mentre quella che lega il Welding hours con la massa della saldatura è:

$$y = 1,0052x$$

dove:

- y = welding hours
- x = massa di materiale aggiunto con la saldatura

Applicazione del modello ai supporti posteriori

Il modello parametrico ottenuto per i supporti anteriori (front) è stato applicato anche a quelli posteriori (rear) per verificarne la validità per questa famiglia di prodotti.

Le taglie dei rear prese in esame sono elencate di seguito in ordine crescente di dimensione e massa:

- Rear 1;
- Rear 2;
- Rear 3;
- Rear 4.

Le immagini di seguito raffigurano i quattro supporti posteriori.

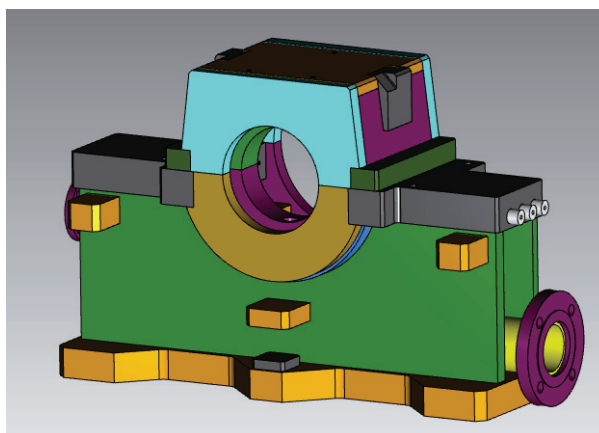


Figura 42. Supporto posteriore “Rear 1”.

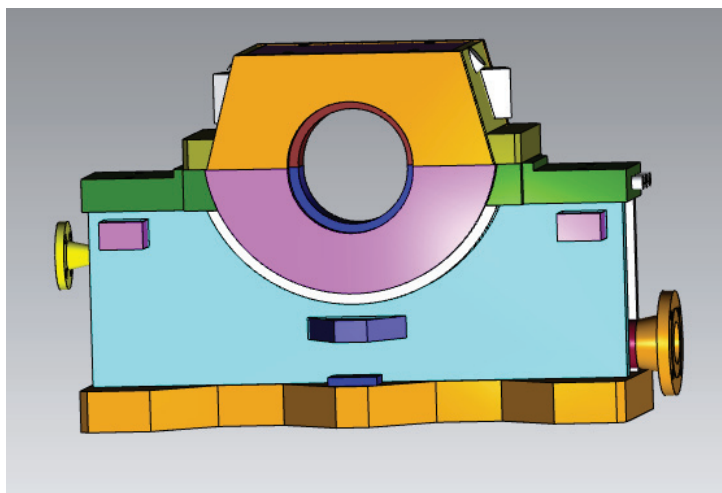


Figura 43. Supporto posteriore "Rear 2".

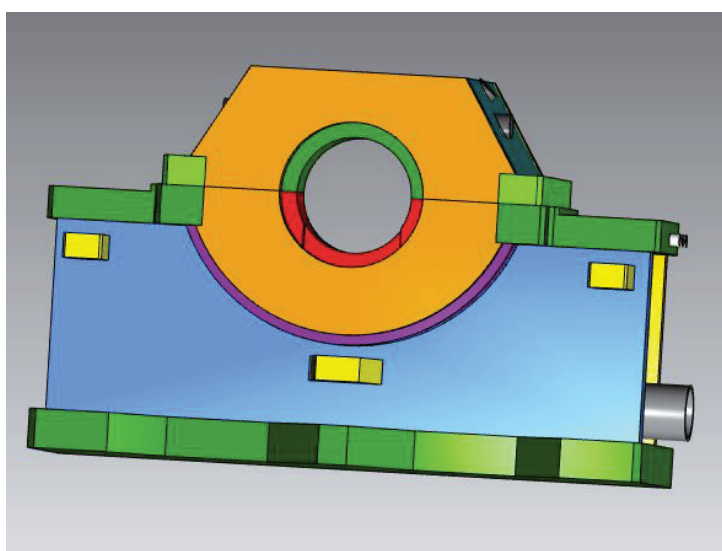


Figura 44. Supporto posteriore "Rear 3".

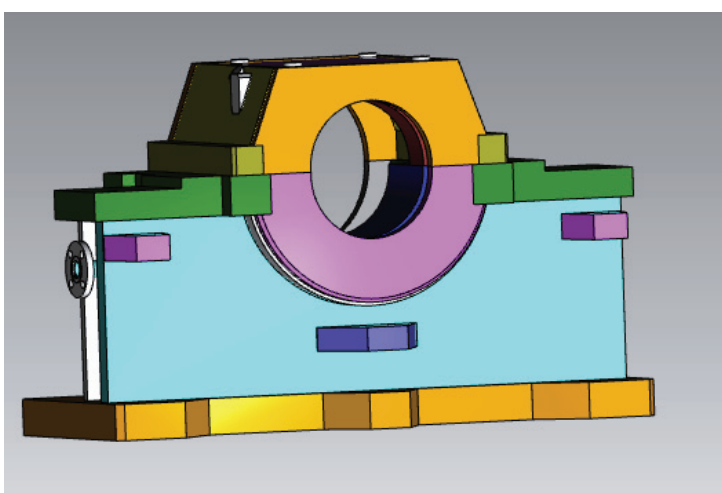


Figura 45. Supporto posteriore "Rear 4".

Essendo, per dimensioni e massa, molto simile al Front 2, si è deciso di utilizzare il Rear 4 per verificare se il modello parametrico creato precedentemente possa essere valido anche per i supporti posteriori. È stata ripetuta l'analisi delle saldature vista in precedenza per il supporto posteriore Rear 4 ma, la massa di materiale aggiunto nel processo di saldatura è risultata molto minore rispetto al suo analogo anteriore. Quindi si è proceduto con l'analisi delle saldature anche degli altri tre supporti posteriori con l'obiettivo di creare un nuovo modello parametrico a loro dedicato.

Le tabelle di seguito mostrano i risultati ottenuti.

Parte superiore (supporto posteriore)				
Rear	Massa finito (kg)	Massa saldatura (kg)	Welding time (h)	Welding hours (h)
1	31	1,99	2,27	2,77
2	65	5,40	4,85	5,35
3	115	9,94	8,16	8,66
4	196	11,22	9,20	9,70

Tabella 7. Dati relativi alla parte superiore del supporto posteriore.

Parte inferiore (supporto posteriore)				
Rear	Massa finito (kg)	Massa saldatura (kg)	Welding time (h)	Welding hours (h)
1	225	11,04	10,93	11,43
2	463	15,07	14,45	14,95
3	772	23,33	19,97	20,47
4	1974	47,13	37,42	37,92

Tabella 8. Dati relativi alla parte inferiore del supporto posteriore.

Sommando le informazioni ottenute per la parte inferiore e quella posteriore è stato possibile ricavare le informazioni globali per i supporti posteriori.

I risultati finali sono identificati nella tabella 7 sottostante.

Supporto posteriore				
Rear	Massa finito (kg)	Massa saldatura (kg)	Welding time (h)	Welding hours (h)
1	264	13,03	13,20	14,20
2	550	20,47	19,30	20,30
3	930	33,27	28,13	29,13
4	2006	58,35	46,62	47,62

Tabella 9. Informazioni globali dei quattro supporti posteriori.

Dalle informazioni ottenute è stato possibile realizzare il modello parametrico anche per i supporti posteriori.

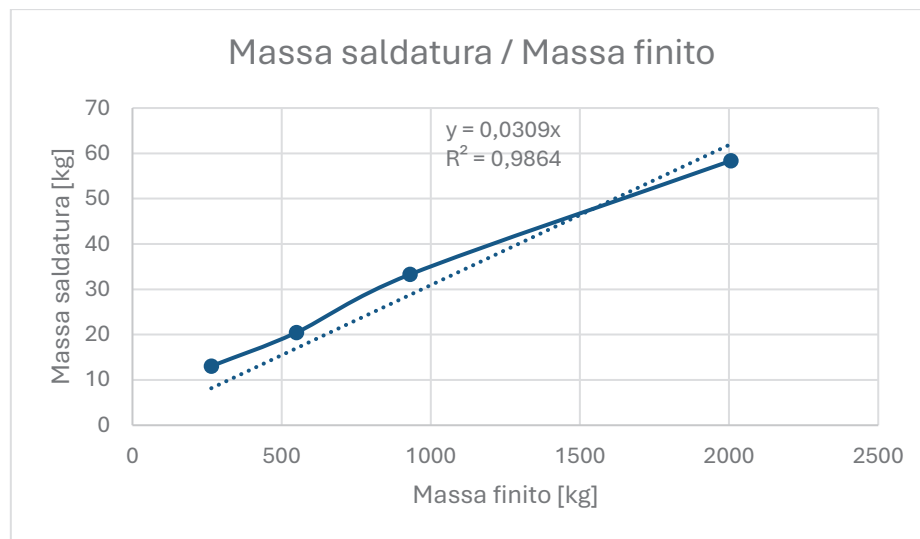


Figura 46. Modello parametrico della massa di materiale aggiunto in saldatura in funzione della massa del supporto posteriore.

In particolare, la relazione lineare che permette di calcolare la quantità di materiale aggiunto in funzione della massa del componente è:

$$y = 0,0309x$$

dove:

- y = massa di materiale aggiunto [kg]
- x = massa del finito del componente [kg]

Inoltre, dalle informazioni ricavate dall'analisi, è stata trovata una relazione lineare sia tra welding time e massa della saldatura (welding weight), sia tra welding hours e massa di saldatura, come riportato nelle seguenti figure.

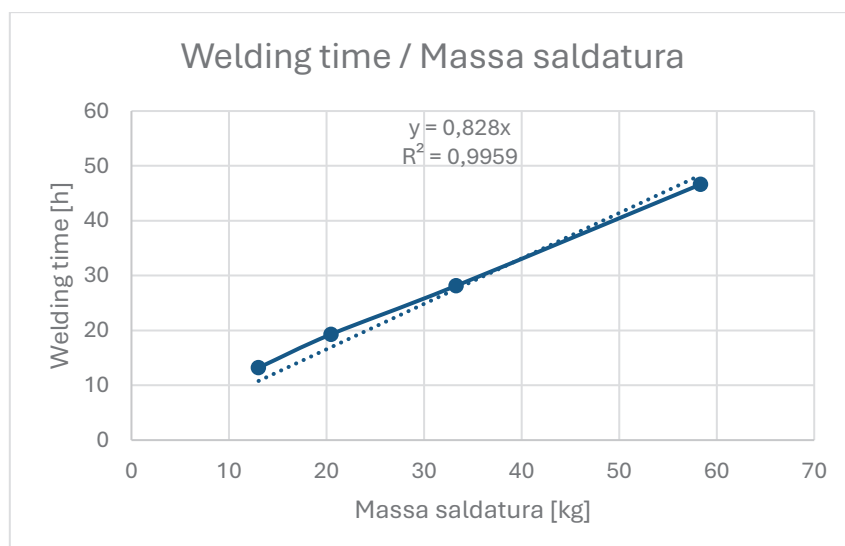


Figura 47. Relazione tra welding time e massa della saldatura (per supporti posteriori).

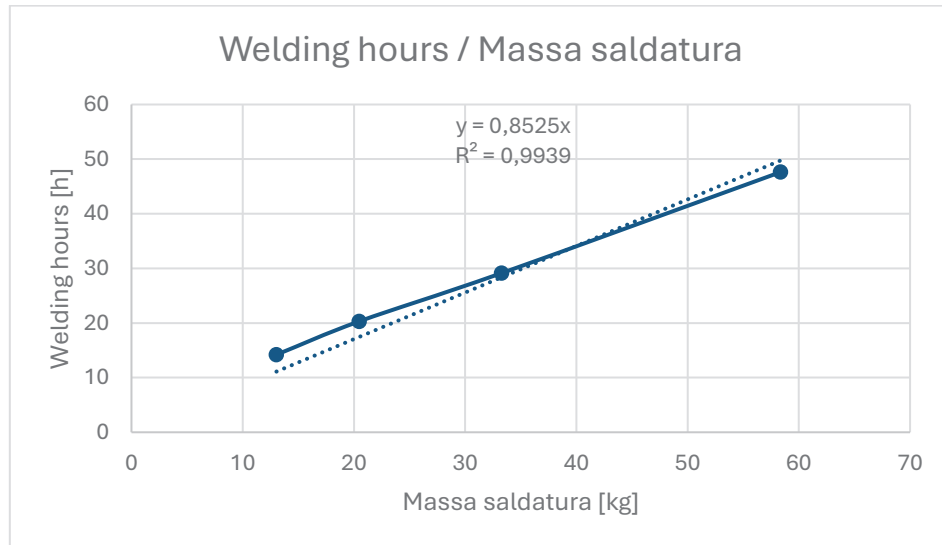


Figura 48. Relazione tra welding hours e massa della saldatura (per supporti posteriori).

Nei supporti posteriori la relazione che lega il Welding time con la massa della saldatura è:

$$y = 0,828x$$

dove:

- y = Welding time
- x = massa di materiale aggiunto con la saldatura

Mentre quella che lega il Welding hours con la massa della saldatura è:

$$y = 0,8525x$$

dove:

- y = welding hours
- x = massa di materiale aggiunto con la saldatura

Metodologia per analisi LCA saldature

Una volta creato il modello parametrico per riuscire a identificare la massa di materiale aggiunto nel processo di saldatura e i tempi necessari per l'esecuzione del processo, è stato possibile sviluppare la modellazione dei supporti in SimaPro. L'obiettivo principale di questa fase è quello di ottenere l'impatto globale dei supporti in tutto il loro ciclo di vita. Per ottenere ciò è stata eseguita una parametrizzazione sia dell'energia consumata (Electricity), sia del materiale applicato (Materials).

Parametrizzazione dell'energia impiegata

Per valutare l'energia totale impiegata nel processo di saldatura ("Electricity") è stata considerata sia quella utilizzata nella fase di stand-by (macchina accesa ma non operativa), sia quella necessaria nella fase operativa. Le due energie ottenute sono state sommate come indicato nella formula che segue:

$$\text{Electricity} = \text{Stand-by power} * \text{Welding hours} + \text{Welding power} * \text{Welding time} \quad (1)$$

In cui:

- Electricity = energia impiegata per il processo di saldatura [kWh]
- Stand- by power = energia impiegata nelle fasi di stand-by (pari a 0,5 kW) [kW]
- Welding hours = tempo impiegato per la fase di set-up e per la realizzazione vera e propria del processo [h]
- Welding power = energia impiegata per il processo di saldatura [kW]
- Welding time = tempo impiegato per la sola fase operativa di realizzazione della saldatura [h].

Tenendo conto che le saldature prese in esame appartengono tutte alla categoria GMAW (ad arco spray), è stata ricavata la "Welding power" dalla seguente formula:

$$\text{Welding power} = \text{Efficiency} * \text{Amperage} * \text{Voltage} \quad (2)$$

Mentre l'efficienza è assunta pari a 0,9 (dato utilizzato da LeanCost), i valori di amperaggio e voltaggio considerati sono quelli medi tra quelli che sono stati forniti dall'azienda, per la tipologia di saldatura considerata, e riportati nella tabella sottostante.

	Diametro (mm)	Range di amperaggio (A)	Range di voltaggio (V)	Velocità di lavoro (mm/min)
GMAW (spray arc)	1,2	230-260	24-26	230-240

Tabella 10. Range di valori di amperaggio, voltaggio e velocità di lavoro per la saldatura ad arco.

Parametrizzazione della fase Materials

Per quanto riguarda la fase Materials, dal database Ecoinvent è stata ricavata la quantità di filo consumato nel processo per ogni metro di saldatura:

$$\text{Wire consumption} = 0,0536 \text{ kg/m}$$

Da cui è possibile ricavare i metri di saldatura:

$$\text{Metri di saldatura} = \text{massa di materiale aggiunto nella fase di saldatura} / 0,0536 \text{ [m]}.$$

Tenendo presente che la massa di materiale aggiunto nella fase di saldatura, grazie alla creazione del precedente modello parametrico, è in funzione della massa del finito.

La modellazione dell'operazione di saldature è indicata nella seguente figura.

Products									
Outputs to technosphere: Products and co-products	Amount	Unit	Quantity	Allocation	Category	Comment			
Welding, arc, steel, BH (Italy) processing Cut-off, U	1	kg	Mass	100 %	Me-,Transformation	Massa della saldatura			
Add									
Inputs									
Inputs from nature	Sub-compartment	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 2SD	Min	Max	Comment	
Add									
Inputs from technosphere: materials/fuels									
Argon, liquid (RER) market for argon, liquid Cut-off, U		0.0237/CFW = 0.442	kg					(4,5,5,1,1,na)	
Carbon dioxide, liquid (RER) market for Cut-off, U		0.00411/CFW = 0.0767	kg					(4,5,5,1,1,na)	
Electronics, for control units (GLO) market for Cut-off, U		1.0E-5/CFW = 0.000187	kg					(5,5,5,3,3,na)	
Oxygen, liquid (RER) market for Cut-off, U		0.000915/CFW = 0.0171	kg					(4,5,5,1,1,na)	
Steel, low-alloyed, hot rolled (GLO) market for Cut-off, U		0.0536/CFW=0	kg					(4,5,5,1,1,na)	
Add									
Inputs from technosphere: electricity/heat									
Electricity, medium voltage (IT) market for Cut-off, U		0.7382*Efficiency*Amperage*Voltage/1000+0.7435	kWh					(3,5,5,3,1,na)	
Add									

Figura 49. Modellazione dell'operazione di saldatura in SimaPro.

Caso Studio: Analisi LCA del Support Bearing

In questo studio è stato valutato l'impatto ambientale per la realizzazione dei supporti (anteriori e posteriori) di turbine a vapore, adottando una metodologia conforme alle normative ISO 2006a 14040 e ISO 2006b 14044 che contengono le linee guida per l'esecuzione del life-cycle assessment.

I componenti presi in esame sono stati modellati su SimaPro, scomponendoli nei suoi elementi costituenti, e ne sono stati valutati gli impatti, tenendo in considerazione sia la fase Material, sia quella relativa all'energia consumata per la realizzazione del prodotto finale.

Analisi supporti anteriori e posteriori

Sono stati presi in considerazione due diverse categorie di supporti, quelli anteriori e quelli posteriori.

I tre supporti anteriori presi in esame sono indicati di seguito, in ordine crescente di dimensioni:

- Front 1;
- Front 2;
- Front 3.

Mentre i quattro supporti posteriori presi in esame, anch'essi indicati in ordine di dimensione crescente, sono:

- Rear 1;
- Rear 2;
- Rear 3;
- Rear 4.

Essendo tutti formati dagli stessi componenti costituenti e, poiché si eseguono le stesse lavorazioni, il processo di analisi in SimaPro è analogo per tutti e sette i supporti analizzati. Per questo motivo verrà illustrata solo l'analisi relativa al Front 1.

Definizione obiettivo

L'oggetto preso in esame in questo studio è il supporto anteriore della turbina a vapore di dimensioni minori, con lo scopo di valutarne gli impatti ambientali ottenuti per la sua realizzazione.

Per quantificare gli impatti sono state utilizzate le seguenti categorie:

- **Climate change:** potenziale di surriscaldamento globale totale nell'arco temporale di cento anni [kg CO₂ eq];
- **Ozone depletion:** danneggiamento dello strato di ozono nell'arco temporale di cento anni [kg CFC11 eq];
- **Ionising radiation:** quantificazione dell'impatto delle radiazioni ionizzanti sulla popolazione [kBq U-235 eq];
- **Photochemical ozone formation:** potenziale contributo alla formazione di ozono fotochimico [kg NMVOC eq];
- **Human toxicity, non-cancer:** aumento della morbidità non cancerogena nella popolazione totale, nell'unità di un chimico emesso [CTUh];
- **Human toxicity, cancer:** aumento della morbidità cancerogena nella popolazione totale, nell'unità di un chimico emesso [CTUh];
- **Acidification:** valutazione dell'impatto delle sostanze acidificanti negli ecosistemi terrestri e delle acque dolci [mol H⁺ eq];
- **Eutrophication, freshwater:** livello di contaminazione delle acque dolci [kg P eq];

- **Eutrophication, marine:** livello di contaminazione delle acque marine [kg N eq];
- **Eutrophication, terrestrial:** valutazione dell'impatto delle sostanze eutrofizzanti negli ecosistemi terrestri [mol N eq];
- **Ecotoxicity, freshwater:** valutata in CTUe (Comparative Toxic Unit for ecosystems);
- **Land use:** indice della qualità del suolo [Pt];
- **Water use:** impoverimento della risorsa idrica [m³ depriv];
- **Resource use:** impoverimento delle risorse abiotiche, in termini di combustibili fossili [MJ];
- **Resource use, minerals and metals:** impoverimento delle risorse abiotiche minerali e metalliche [kg Sb eq] [11].

Per quanto riguarda i confini del sistema, sono state prese in considerazione sia la fase relativa ai materiali (prevede l'estrazione e la processazione dei materiali), sia quella relativa alla produzione (comprendente le lavorazioni effettuate per l'ottenimento dei singoli componenti costituenti e il loro successivo assemblaggio) pertanto si svolge un'analisi di tipo "from cradle to gate".

Life cycle inventory

Per prima cosa, grazie alle tavole 2D, è stato possibile riconoscere i quattro componenti costituenti:

- Semianello A;
- Semianello B;
- Parte inferiore;
- Parte superiore.

Questi sono stati inseriti in SimaPro per andarli ad analizzare singolarmente, come illustrato nella figura seguente.

Name	Project
HALF RING A	BH Project
HALF RING B	BH Project
LOWER SUPPORT	BH Project
UPPER SUPPORT	BH Project

Figura 50. Scomposizione del supporto nei suoi elementi costituenti.

A questo punto si è passato a modellare i singoli componenti costituenti. La modellazione dei semianelli è la stessa, poiché differiscono solo per la massa, ed è illustrata nella figura seguente.

Name	Status	Comment
HALF RING A	None	

Materials/Assemblies	Amount	Unit	Distribution	SD2 or 25C	Min	Max	Comment
S275	16	kg	Undefined				Finished Mass
S275	25-16 = 9	kg					Machining Mass

Processes	Amount	Unit	Distribution	Min	Max	Comment
Sheet rolling, steel (Italy) processing Cut-off, U	25	kg	Undefined			
Steel removed by milling, average (Italy) steel milling, average Cut-off, U	9	kg	Undefined			

Figura 51. Modellazione di un semianello.

Per quanto riguarda la fase Material è stato selezionato il materiale “S275”, precedentemente modellato in SimaPro, in cui:

- **Finished Mass:** massa del semianello finito;
- **Machining Mass:** massa del materiale asportato nelle lavorazioni (differenza tra massa del grezzo e del finito).

Per quanto riguarda invece i processi, sono stati considerati:

- **Sheet Rolling:** fase di preproduzione del componente;
- **Steel removed by milling:** fase di rimozione del materiale che permette di ottenere il finito partendo dal grezzo. Per semplificazione, nel processo di fresatura (milling), è stata considerata anche la massa di materiale rimossa per tornitura, in quanto non risultano esserci differenze rilevanti negli impatti ottenuti e nell’energia impiegata tra i due processi.

Da considerare inoltre che, entrambi i processi inseriti, sono stati modellati considerando il mix energetico italiano presente nel database Ecoinvent versione 3.6.

Analogamente si è passato alla modellazione delle due parti del supporto (quella superiore e quella inferiore) che, a differenza dei semianelli, hanno in aggiunta anche il processo di saldatura. La figura seguente mostra il procedimento eseguito per la parte inferiore del supporto Front 1 (che differirà da quella superiore solo per i valori delle masse da inserire).

Figura 52. Modellazione della parte inferiore del supporto.

Per quanto riguarda la fase Material:

- **Finished Mass:** massa del finito;
- **Pre-machining Mass:** massa del semigrezzo ottenuta dalle lamiere saldate pre-lavorazione finale;
- **Machining Mass:** massa di materiale asportato mediante operazioni di tornitura, fresatura e foratura per ottenere così il finito;
- **Welding Mass:** massa di materiale aggiunto durante il processo di saldatura, in funzione della massa del finito, ottenuta grazie all'applicazione del modello parametrico implementato precedentemente.

Le masse sopra riportate sono legate tra loro dalle seguenti relazioni:

$$\text{Finished Mass} = \text{Pre-machining Mass} - \text{Machining Mass}$$

$$\text{Welding Mass} = \text{coeff} * \text{Finished Mass}$$

In cui:

coeff = 0.0472 per supporti anteriori

coeff = 0.0309 per supporti posteriori

Andando ad analizzare i processi invece:

- **Sheet Rolling:** fase di riproduzione del componente, si calcola il suo impatto partendo dal grezzo;
- **Steel removed by milling:** fase di rimozione del materiale che permette di ottenere il finito partendo dal semigrezzo. Per semplificazione, nel processo di fresatura (milling), è stata considerata anche la massa di materiale rimossa per tornitura, in quanto non risultano esserci differenze rilevanti negli impatti ottenuti e nell'energia impiegata tra i due processi.
- **Welding, arc, steel:** operazione di saldatura calcolata partendo dalla massa di materiale aggiunto nel processo considerato.

Anche in questo caso, come per i semianelli, i processi sono stati modellati considerando il mix energetico italiano disponibile nel database Ecoinvent versione 3.6.

La modellazione fatta per il Front 1 verrà ripetuta anche per gli altri supporti a disposizione.

Successivamente è stato possibile calcolare anche l'energia utilizzata per il processo di saldatura, grazie alla formula (1).

I risultati ottenuti sono indicati nella tabella sottostante.

Front	Electricity [kWh]
1	201.114,74
2	718.068,75
3	1.362.703,84

Tabella 11. Consumi di energia elettrica per i supporti anteriori

Rear	Electricity [kWh]
1	72.778,32
2	106.409,38
3	155.091,93
4	257.036,02

Tabella 12. Consumi di energia elettrica per i supporti posteriori

Valutazione degli impatti

Con questa fase si arriva al calcolo dei degli impatti ambientali dei supporti. Da tenere presente che l'analisi eseguita in questo caso è "from cradle to gate" (dalla culla al cancello) ovvero vengono valutati gli impatti ambientali delle fasi "Material" e "Production", senza considerare quelle successive di uso, manutenzione e fine vita.

Nei grafici ottenuti, riportati in seguito, sono indicati:

- **Material – Finished:** impatto della fase Material relativo alla massa del finito;
- **Material – Machining:** impatto della fase Material relativo alla massa di materiale asportato per ottenere il finito partendo dal pre-machining;
- **Material – Welding:** impatto della fase Material relativa alla massa di materiale aggiunto nel processo di saldatura;
- **Preproduction:** impatto relativo alla fase di preproduzione (Sheet rolling);
- **Manufacturing:** impatto relativo alla fase di lavorazione che porta alla realizzazione del finito (Steel removed by milling);
- **Welding:** impatto relativo al processo di saldatura.

Front 1

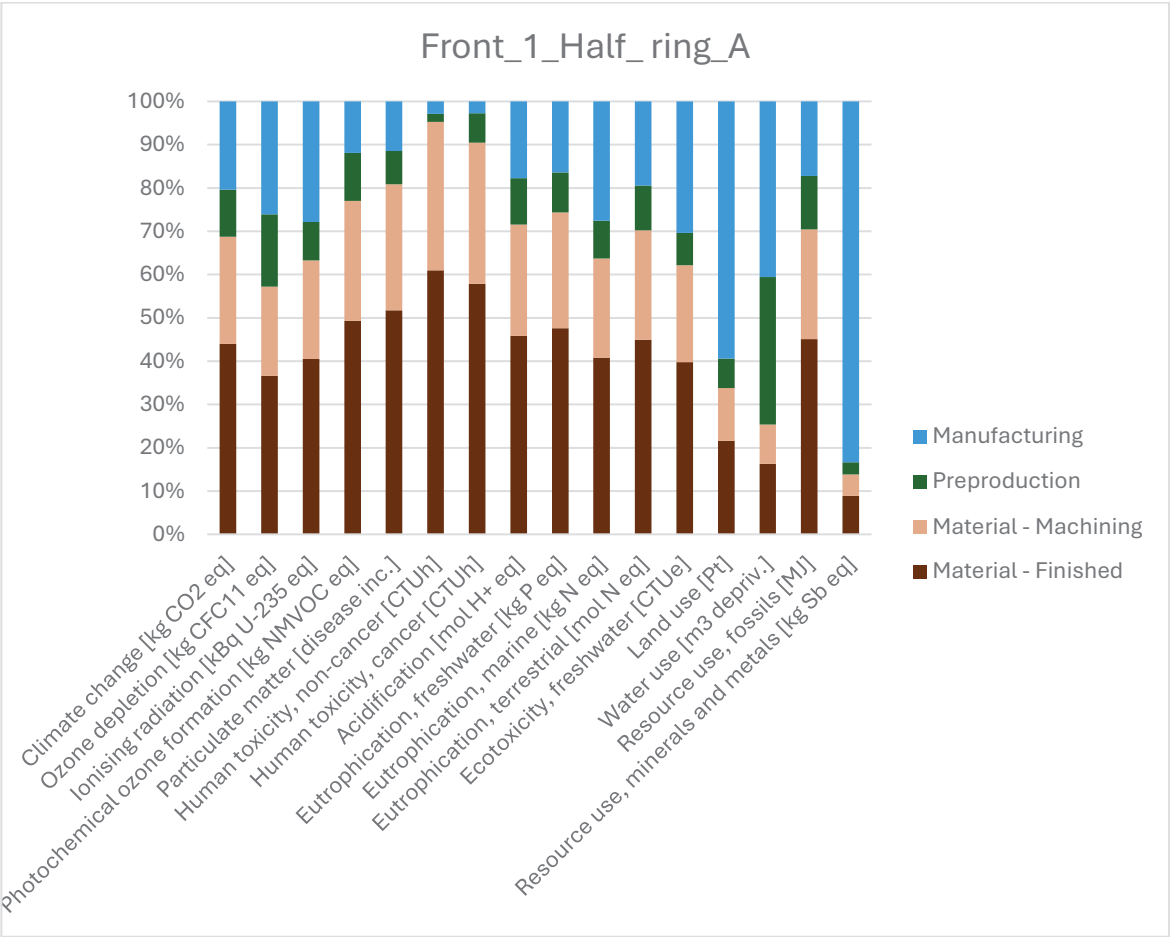


Figura 53. Impatti Half ring A del Front 1.

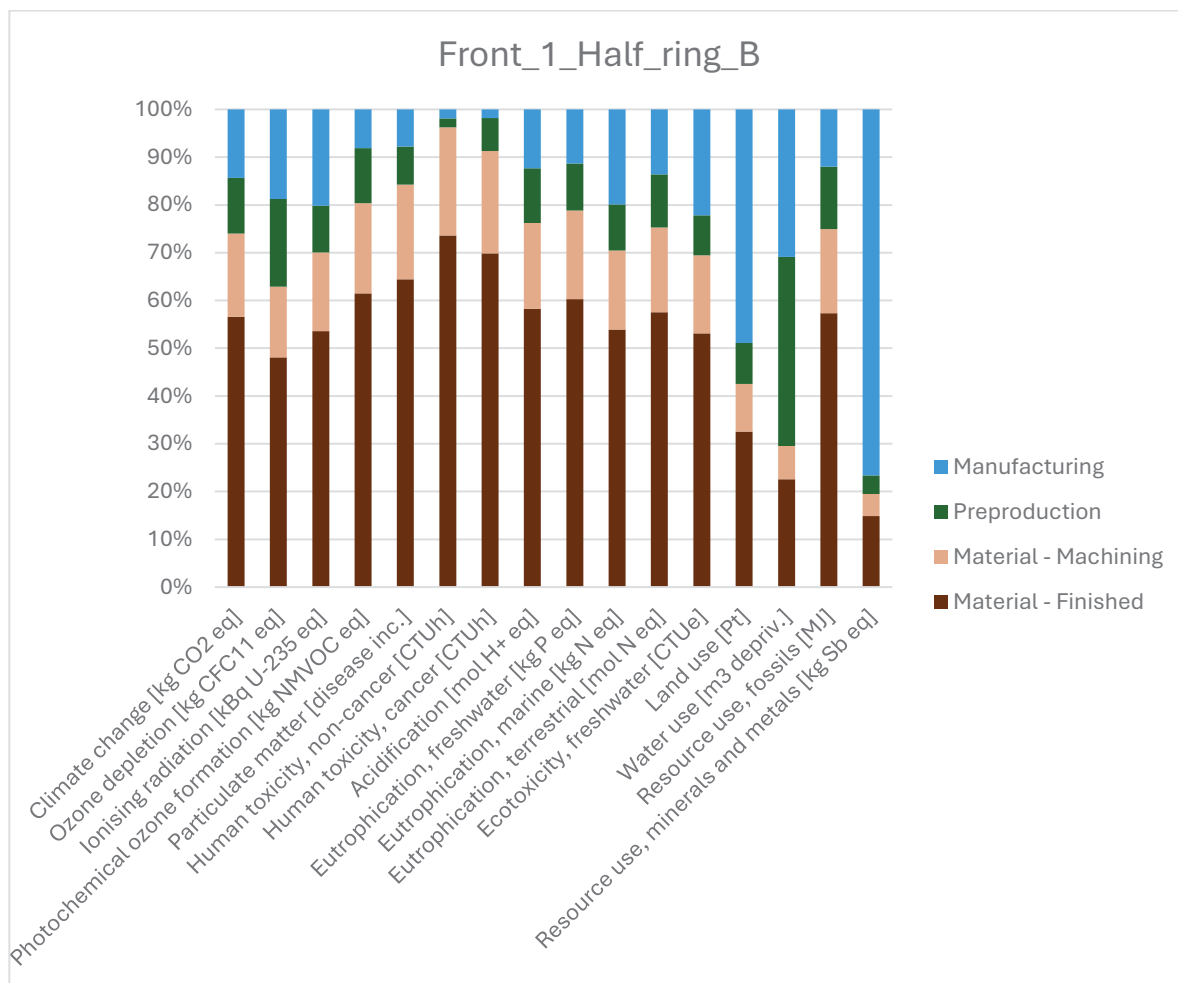


Figura 54. Impatti Half ring B del Front 1.

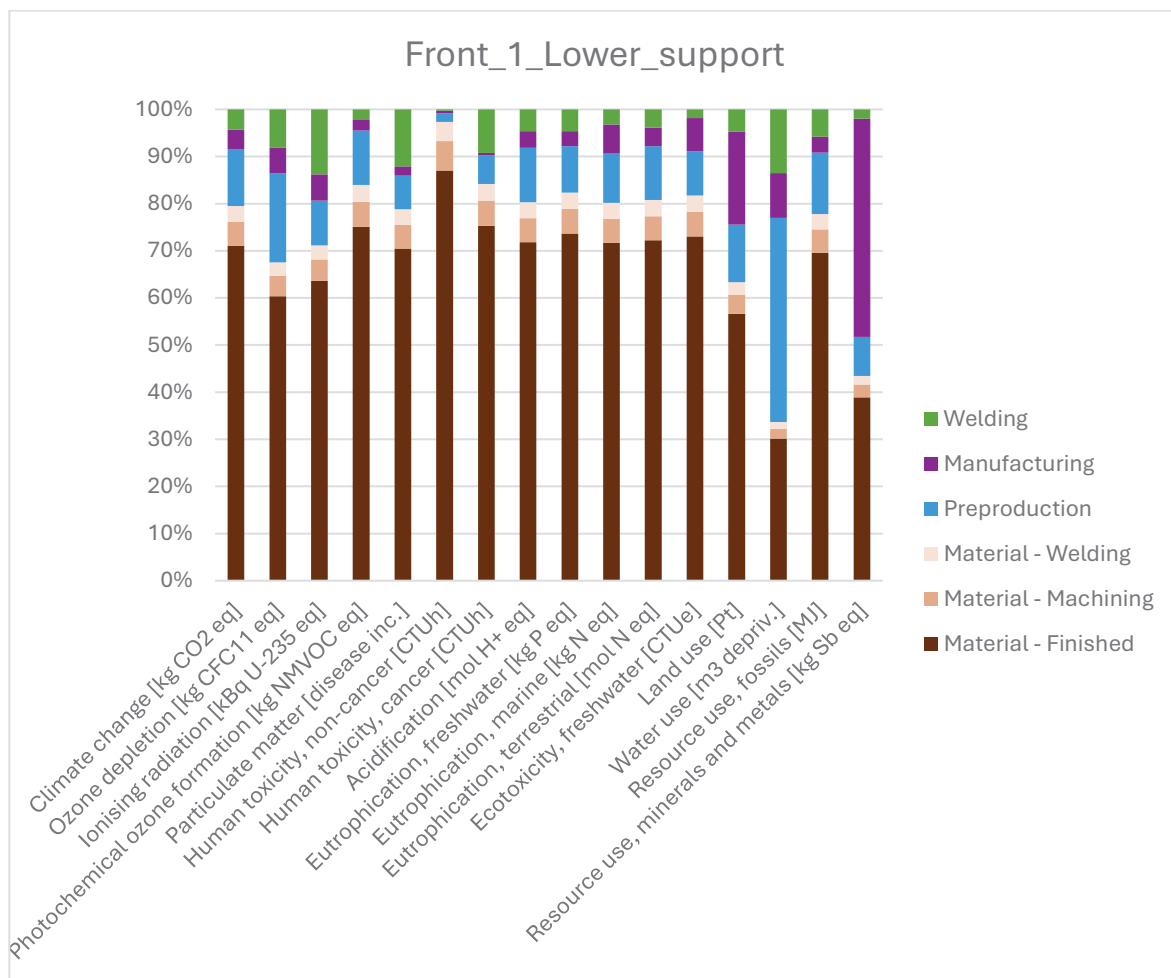


Figura 55. Impatti Lower support del Front 1.

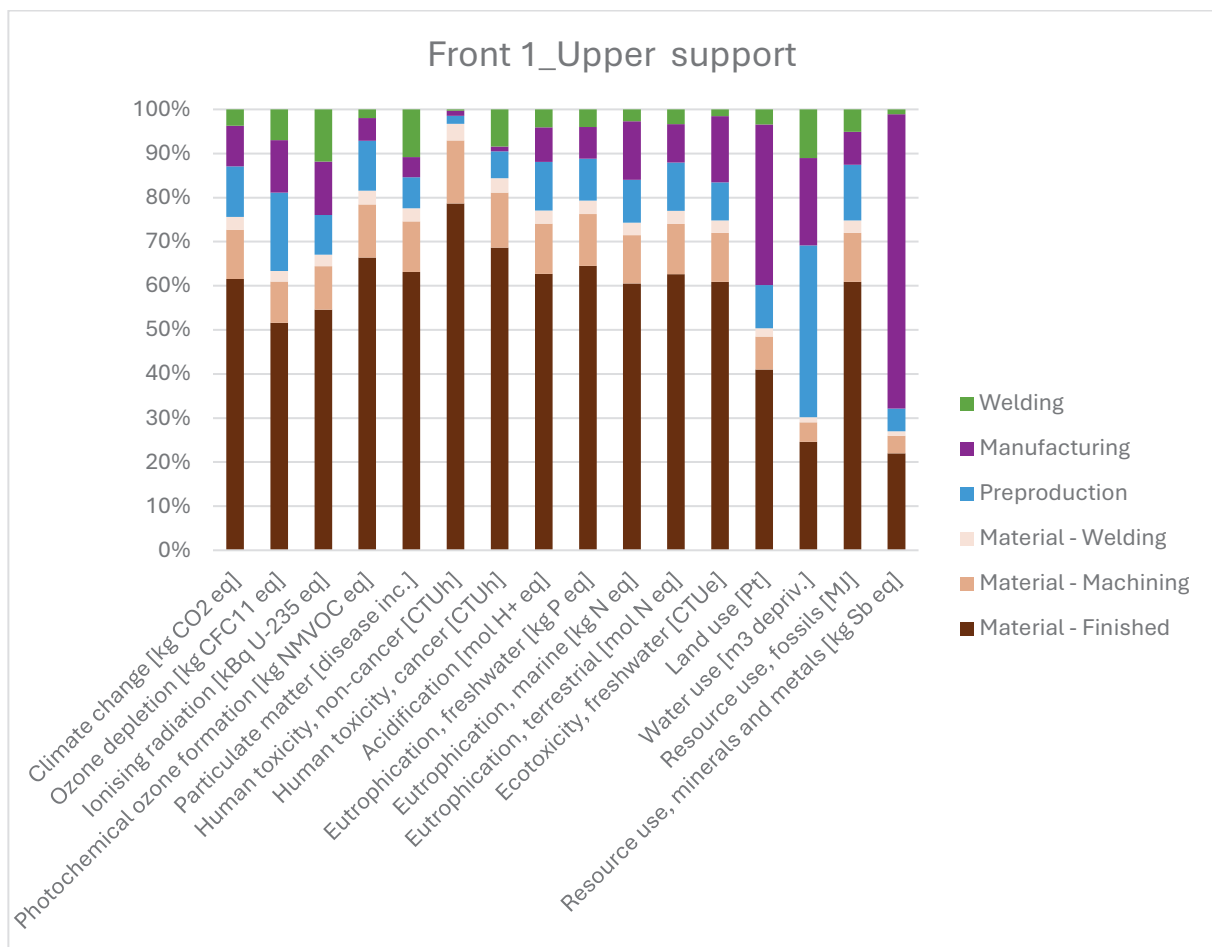


Figura 56. Impatti Upper support del Front 1.

La tabella sottostante confronta gli impatti delle fasi analizzate per la categoria “Climate Change” dei componenti del Front 1.

Front 1							
Climate change	Massa %	Material Finished %	Material Machining %	Material Welding %	Preproduction %	Manufacturing %	Welding %
Half ring A	2,9	44	24,76	0	10,87	20,37	0
Half ring B	7,9	56,58	17,41	0	11,69	14,32	0
Upper part	10,6	61,52	11,19	2,9	11,49	9,2	3,7
Lower part	78,6	71,1	5,06	3,36	12,04	4,16	4,28

Tabella 13. Confronto delle fasi analizzate per la categoria “Climate change” dei componenti del Front 1.

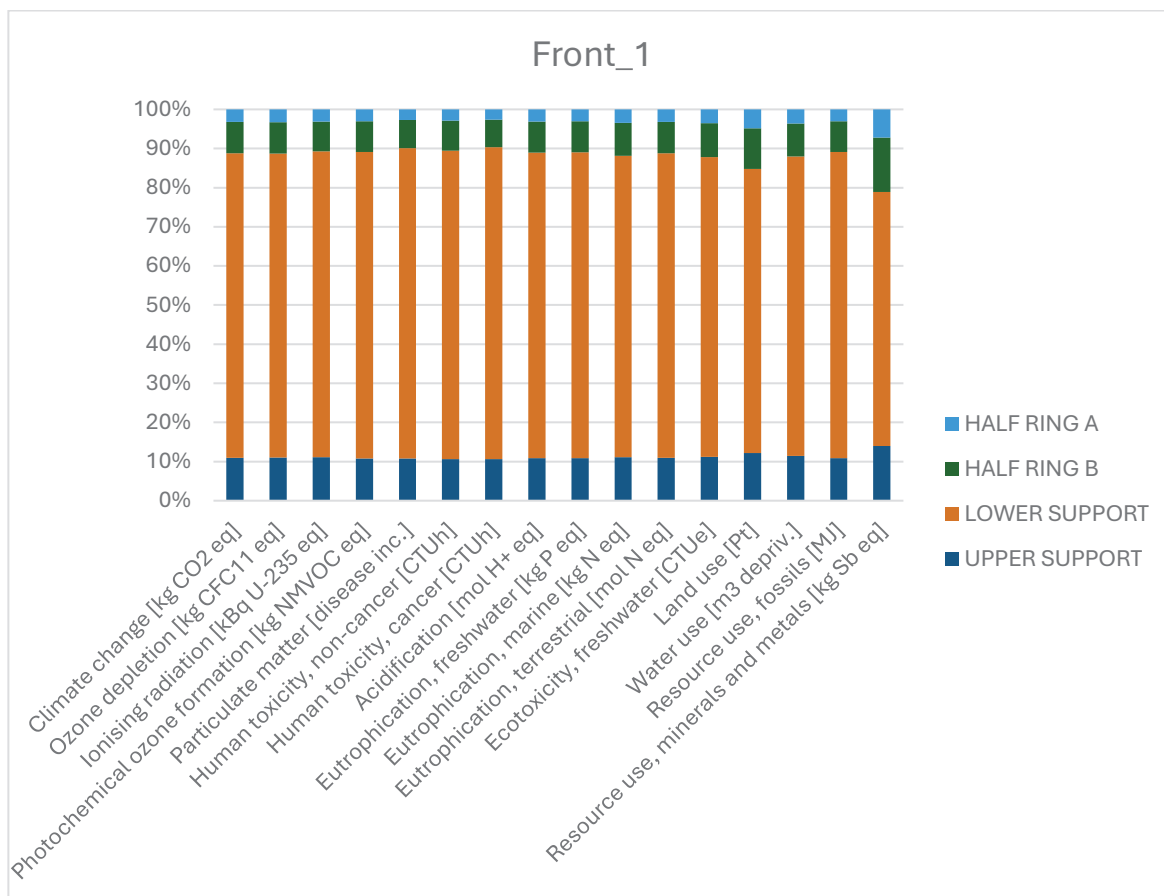


Figura 57. Confronto tra impatti dei componenti del Front 1.

Front 2

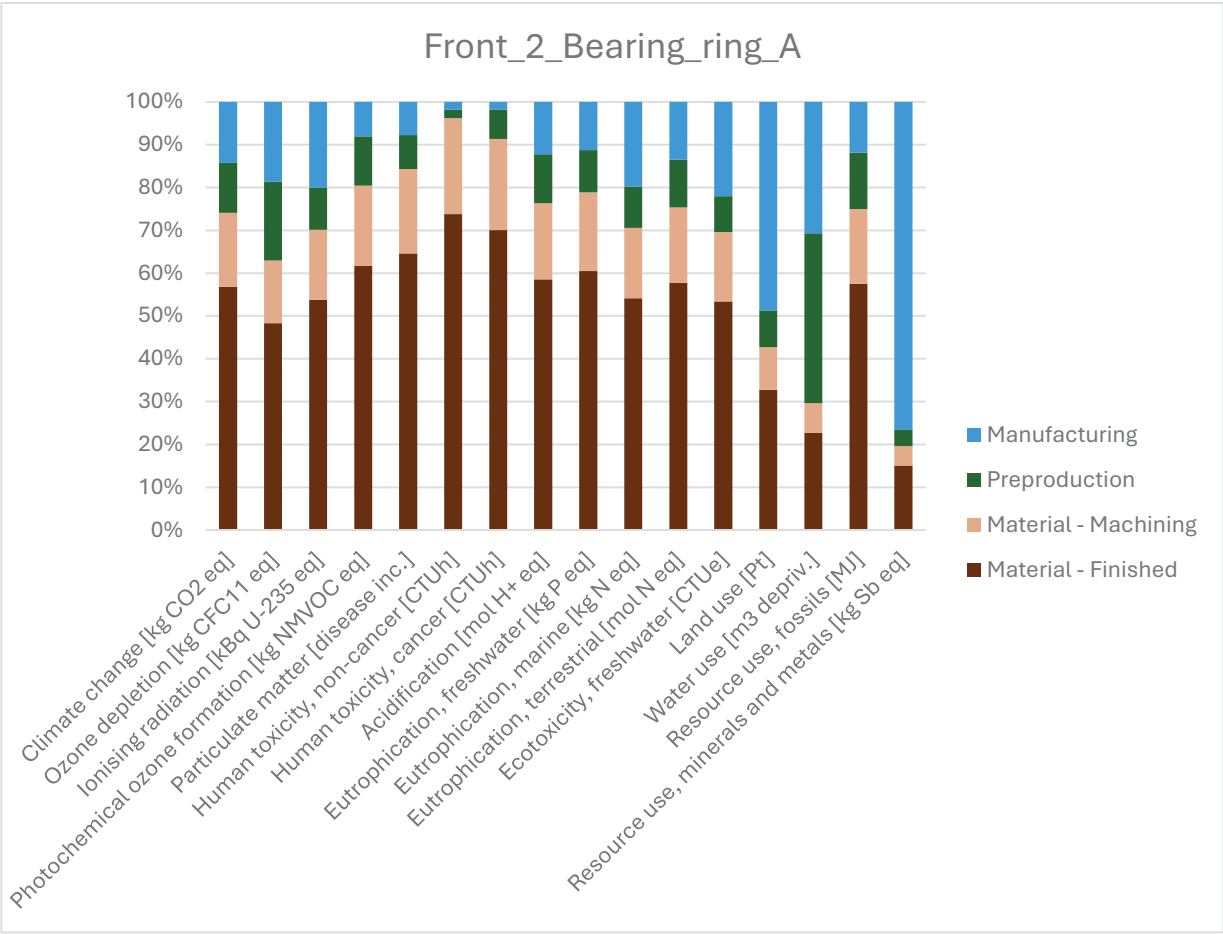


Figura 58. Impatti Bearing ring A del Front 2.

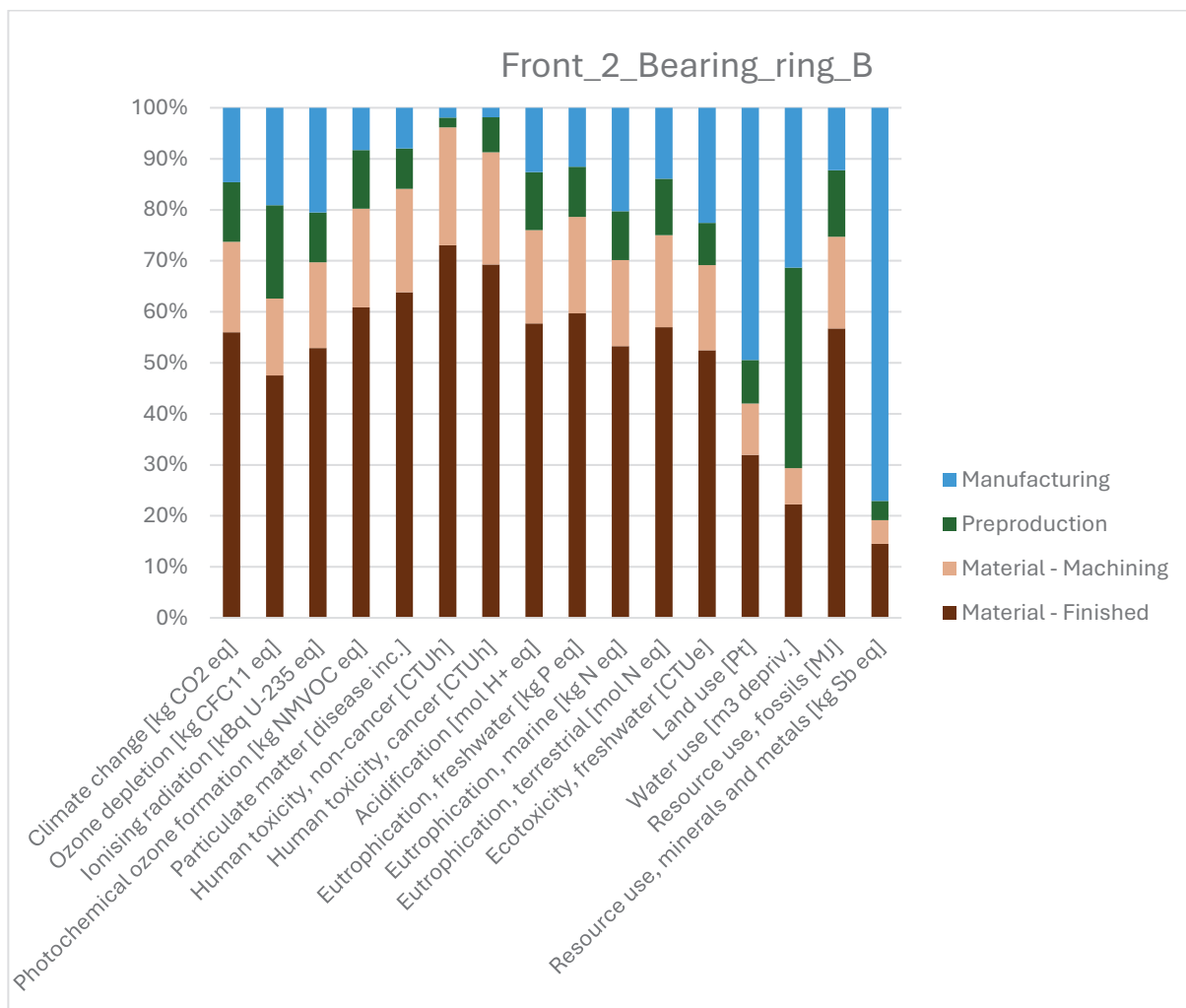


Figura 59. Impatti Bearing ring B del Front 2.

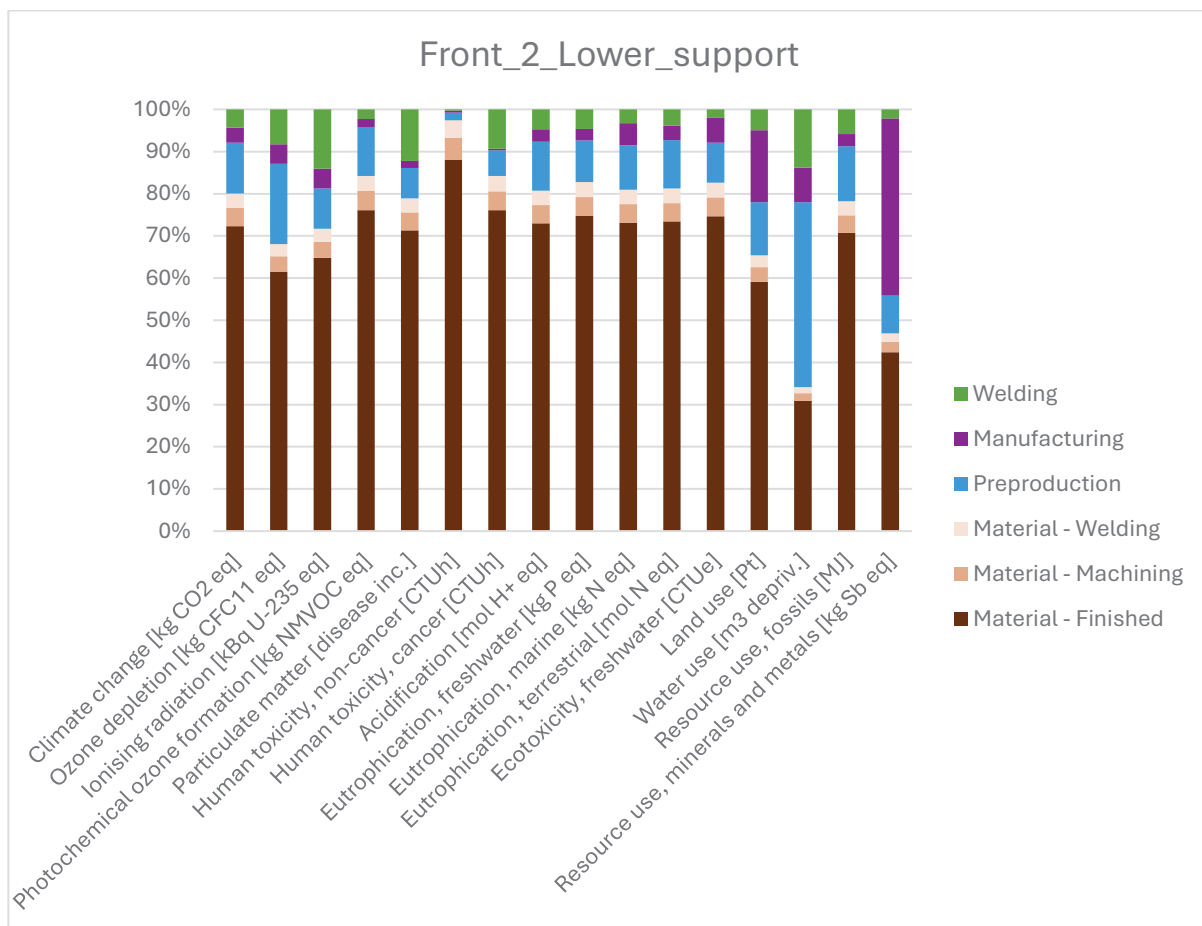


Figura 60. Impatti Lower support del Front 2.

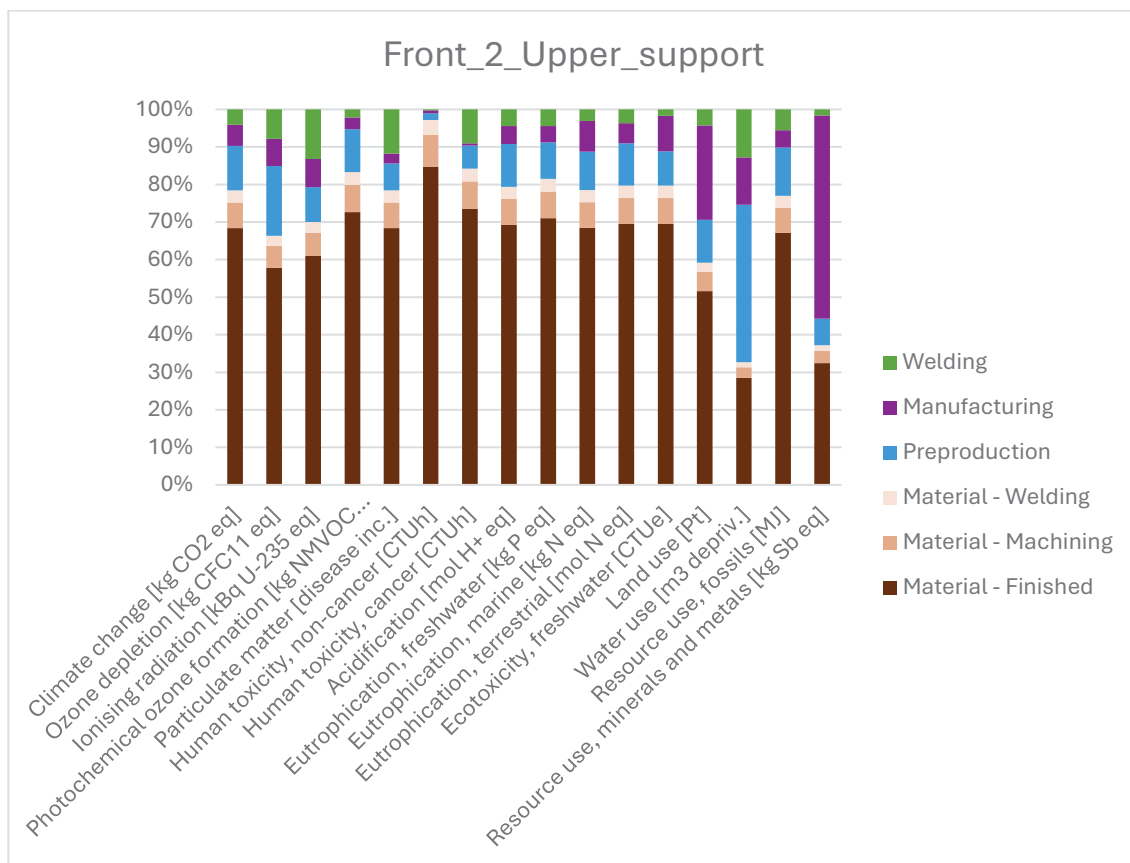


Figura 61. Impatti Upper support del Front 2.

La tabella sottostante confronta gli impatti delle fasi analizzate per la categoria “Climate Change” dei componenti del Front 2.

Front 2							
Climate change	Massa %	Material Finished %	Material Machining %	Material Welding %	Preproduction %	Manufacturing %	Welding %
Bearing ring A	7	56,79	17,28	0	11,7	14,22	0
Bearing ring B	1,8	56	17,75	0	11,65	14,6	0
Lower part	83,4	72,32	4,29	3,41	12,10	3,53	4,35
Upper part	7,8	68,37	6,81	3,23	11,88	5,6	4,11

Tabella 14. Confronto delle fasi analizzate per la categoria “Climate change” dei componenti del Front 2.

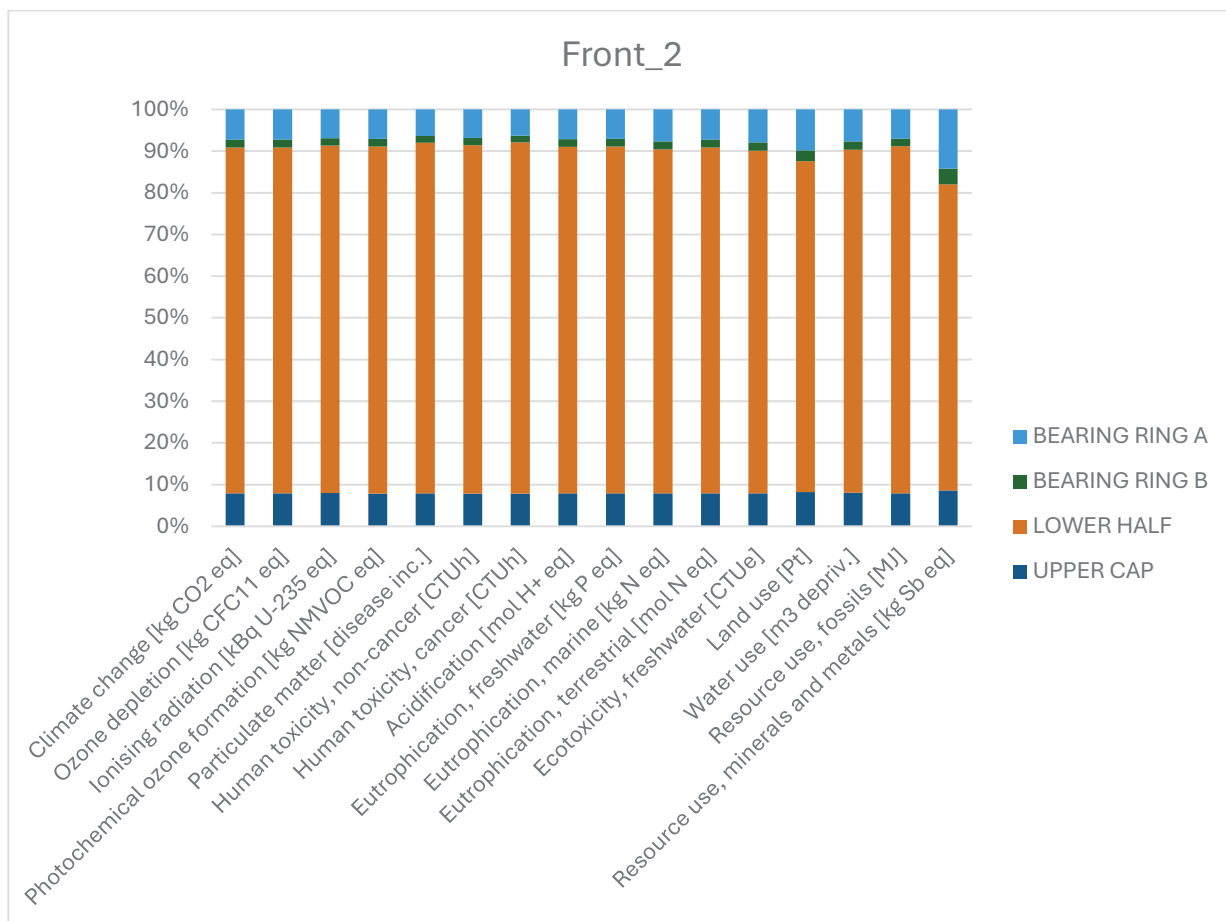


Figura 62. Confronto tra impatti dei componenti del Front 2.

Front 3

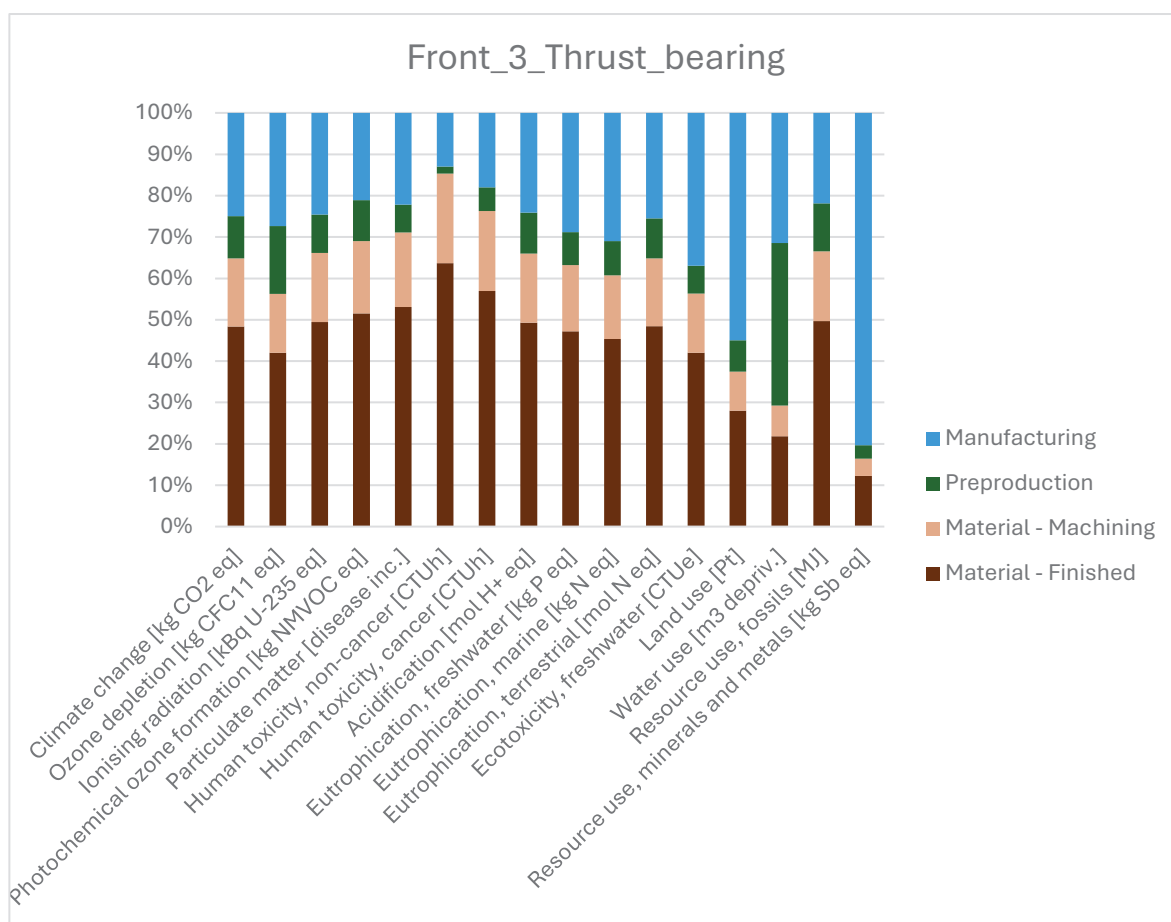


Figura 63. Impatti Thrust bearing del Front 3.

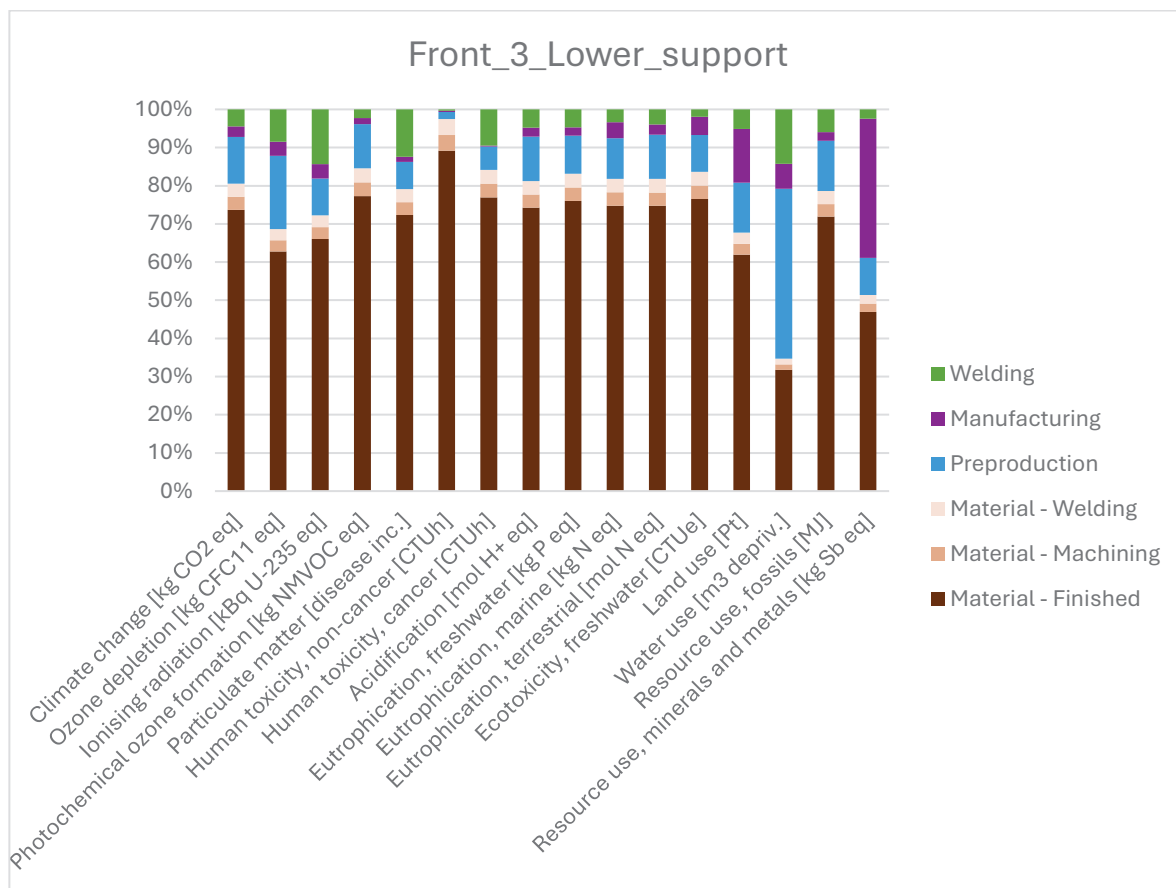


Figura 64. Impatti Lower support del Front 3.

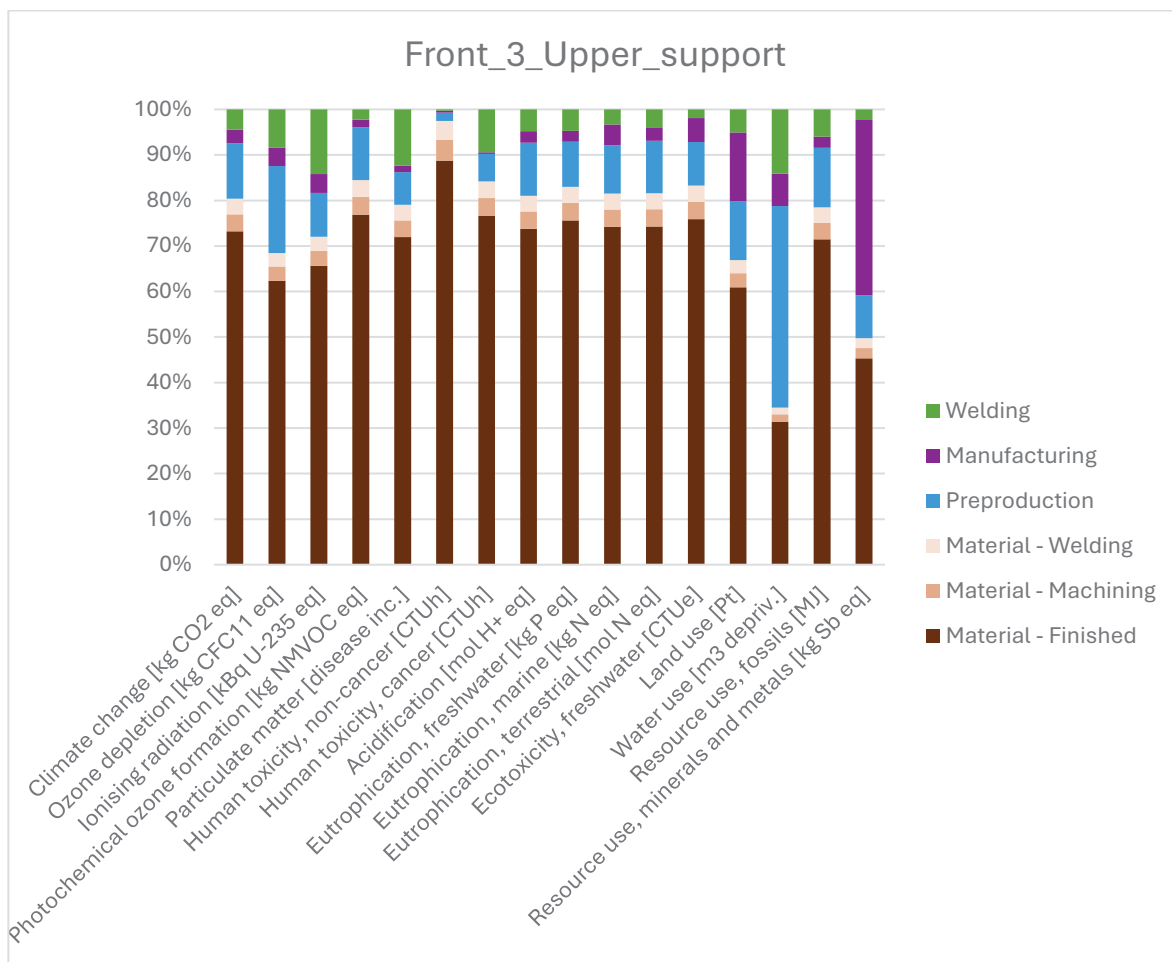


Figura 65. Impatti Upper support del Front 3.

La tabella sottostante confronta gli impatti delle fasi analizzate per la categoria “Climate Change” dei componenti del Front 3.

Front 3							
Climate change	Massa %	Material Finished %	Material Machining %	Material Welding %	Preproduction %	Manufacturing %	Welding %
Thrust bearing	8,24	48,38	16,42	0	10,24	24,96	0
Lower part	84,1	73,66	3,43	3,48	12,18	2,82	4,43
Upper part	7,66	73,2	3,72	3,46	12,15	3,06	4,41

Tabella 15. Confronto delle fasi analizzate per la categoria “Climate change” dei componenti del Front 3.

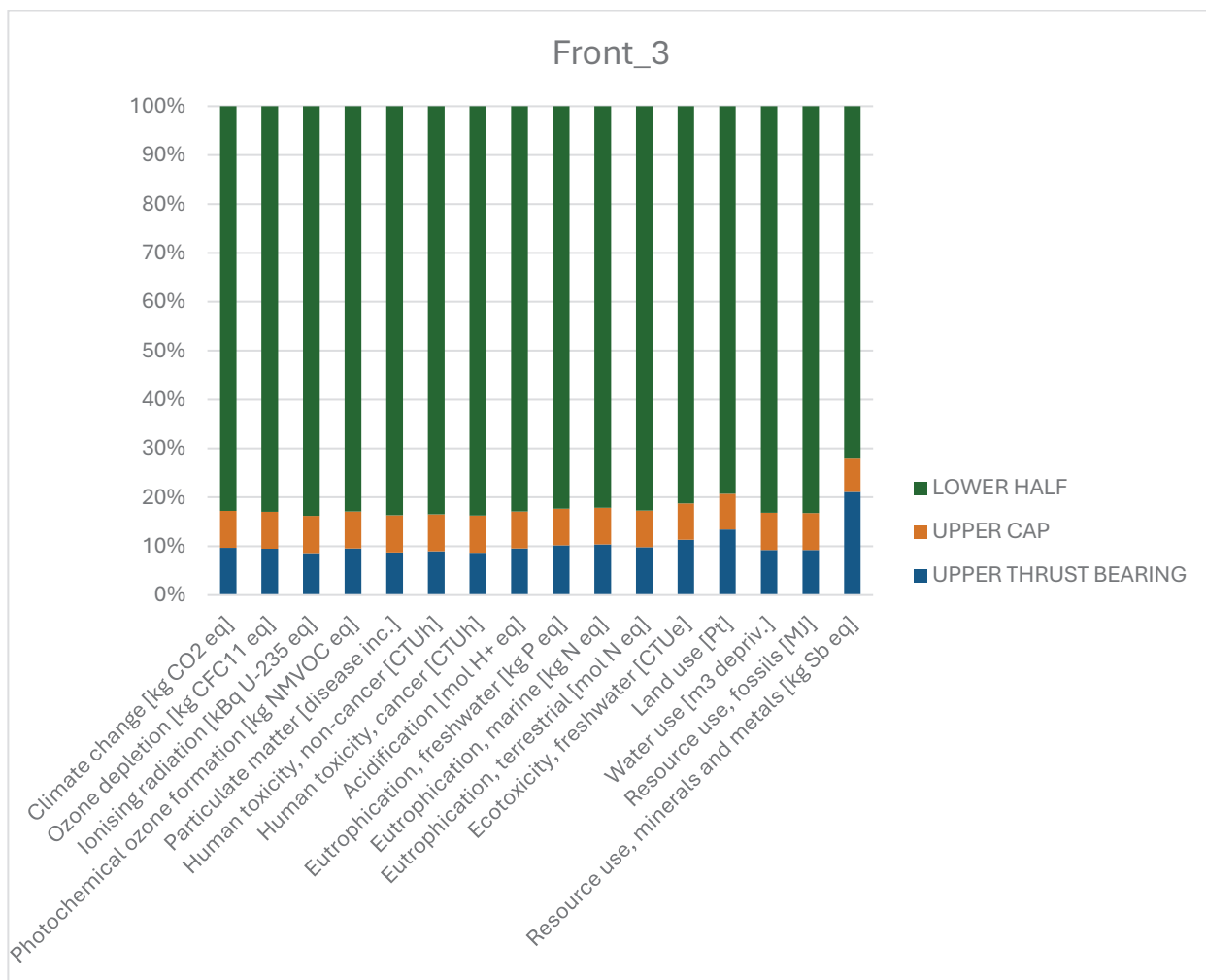


Figura 66. Confronto tra impatti dei componenti del Front 3.

Per concludere l'analisi sono stati confrontati tra loro gli impatti dei tre supporti anteriori finora analizzati singolarmente.

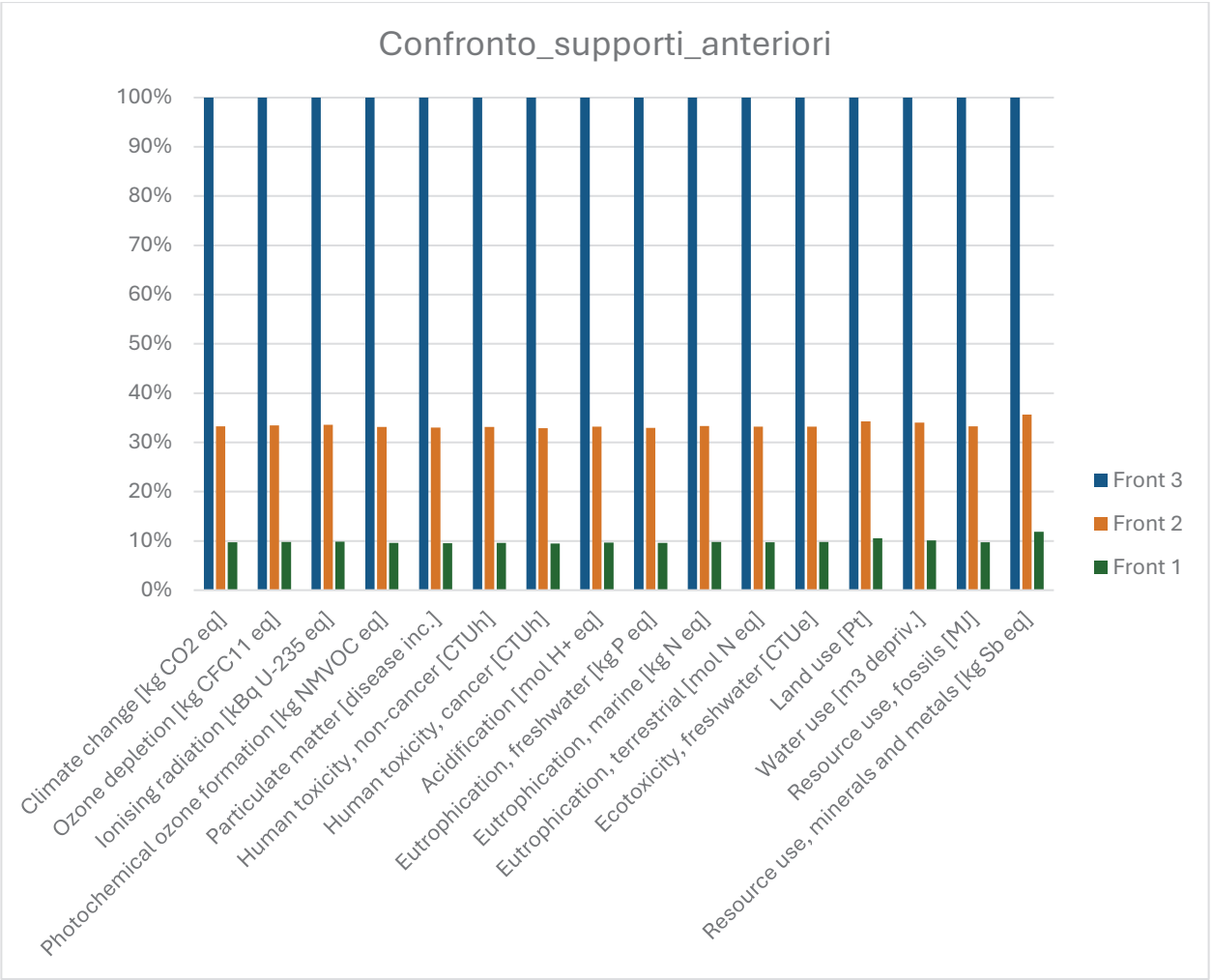


Figura 67. Confronto tra impatti dei tre supporti anteriori.

Analogamente il processo è stato eseguito per i supporti posteriori.

Rear 1

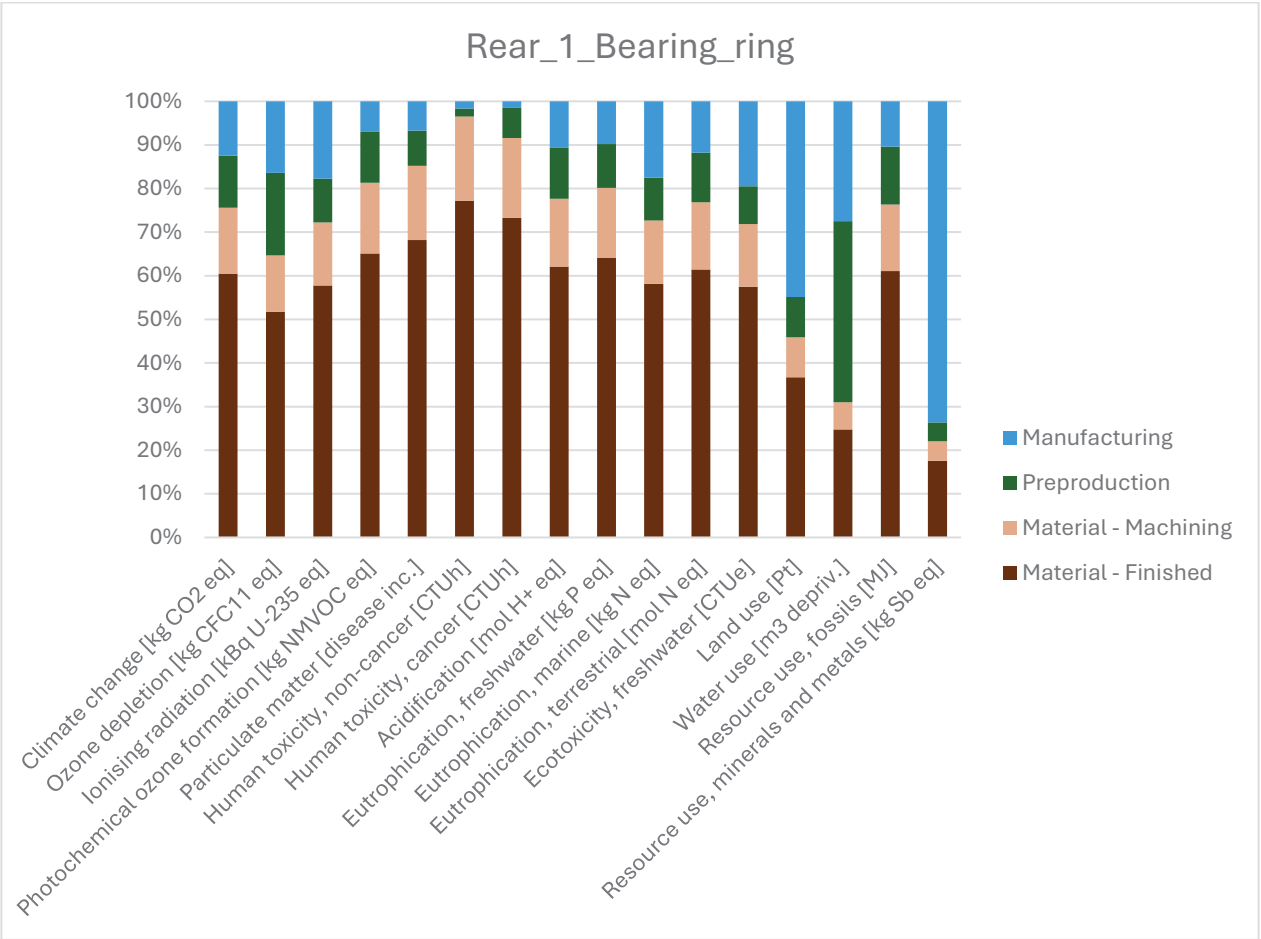


Figura 68. Impatti Bearing ring del Rear 1.

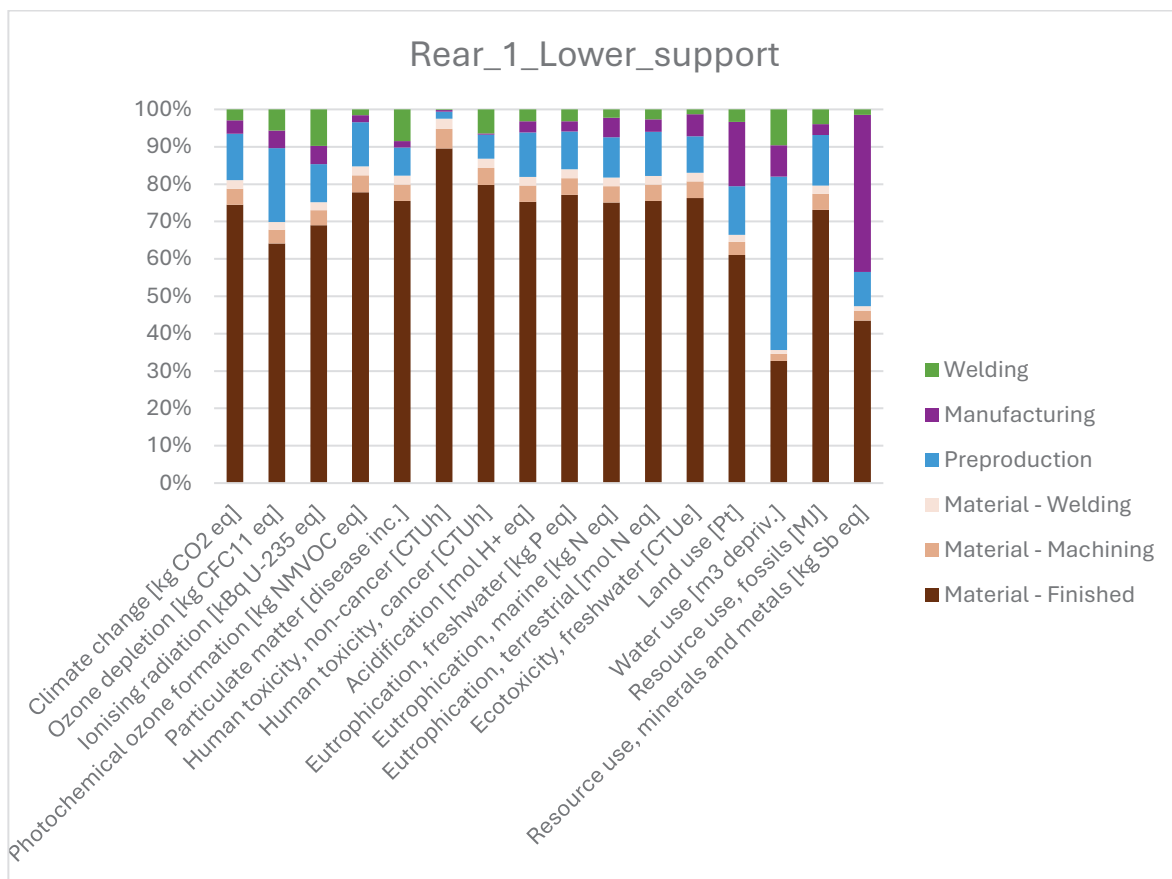


Figura 69. Impatti Lower support del Rear 1.

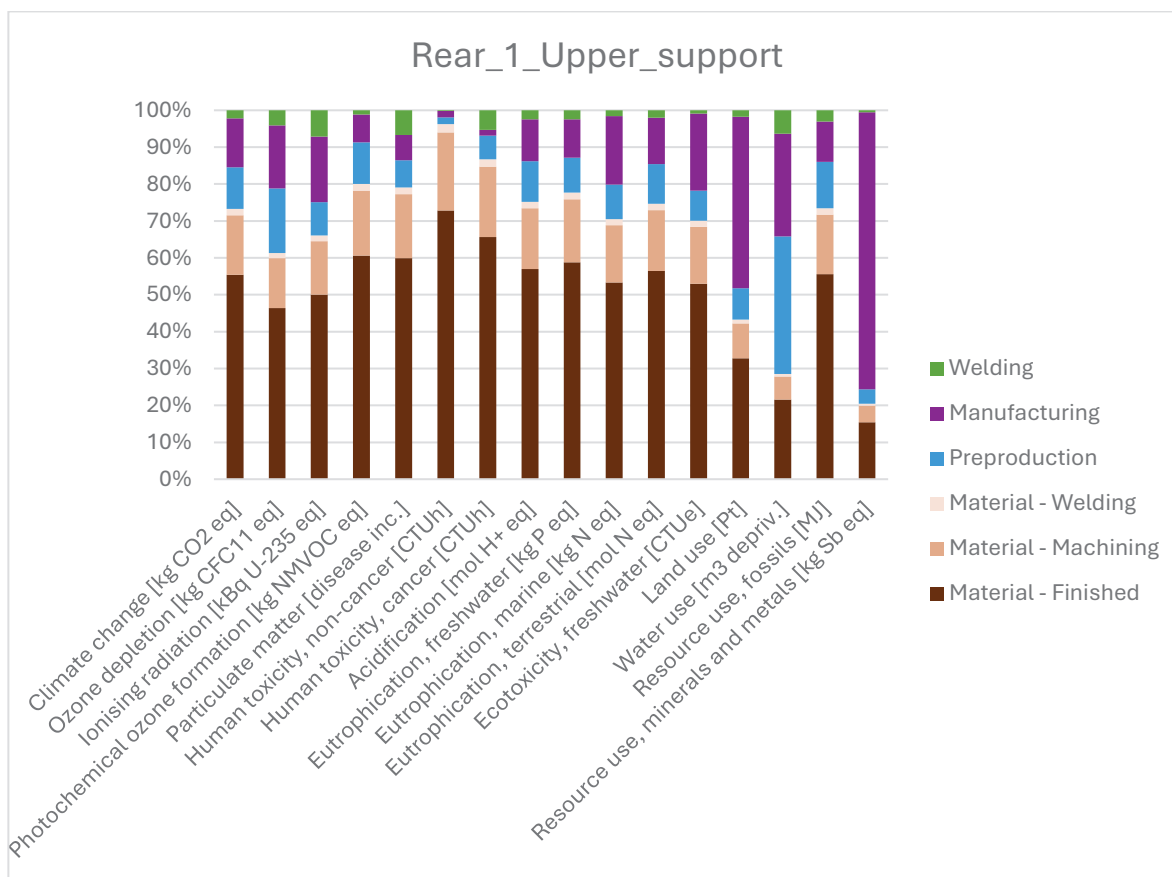


Figura 70. Impatti Upper support del Rear 1.

La tabella sottostante confronta gli impatti delle fasi analizzate per la categoria “Climate Change” dei componenti del Rear 1.

Rear 1							
Climate change	Massa %	Material Finished %	Material Machining %	Material Welding %	Preproduction %	Manufacturing %	Welding %
Bearing ring	3,47	60,49	15,12	0	11,95	12,44	0
Lower part	82,63	74,47	4,30	2,30	12,45	3,54	2,94
Upper part	13,9	55,45	16,1	1,71	11,31	13,24	2,19

Tabella 16. Confronto delle fasi analizzate per la categoria “Climate change” dei componenti del Rear 1.

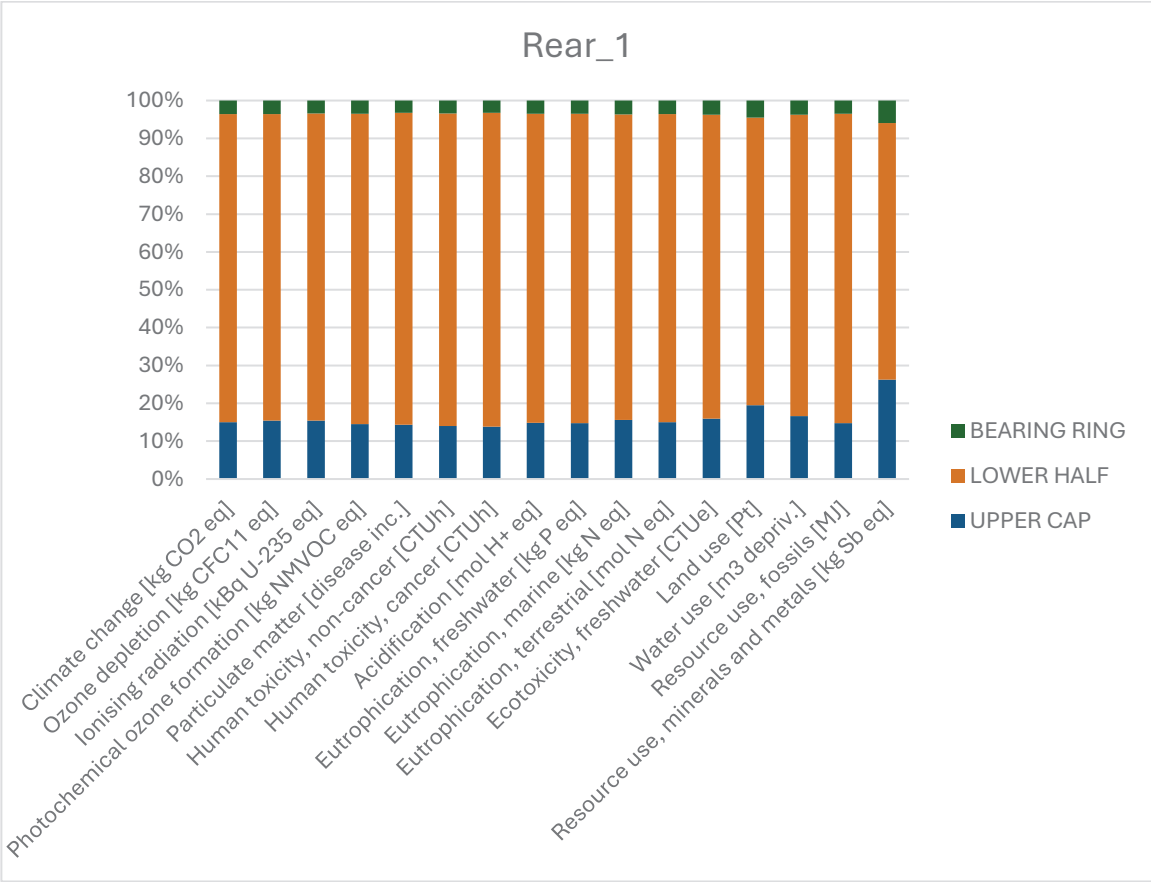


Figura 71. Confronto tra impatti dei componenti del Rear 1.

Rear 2

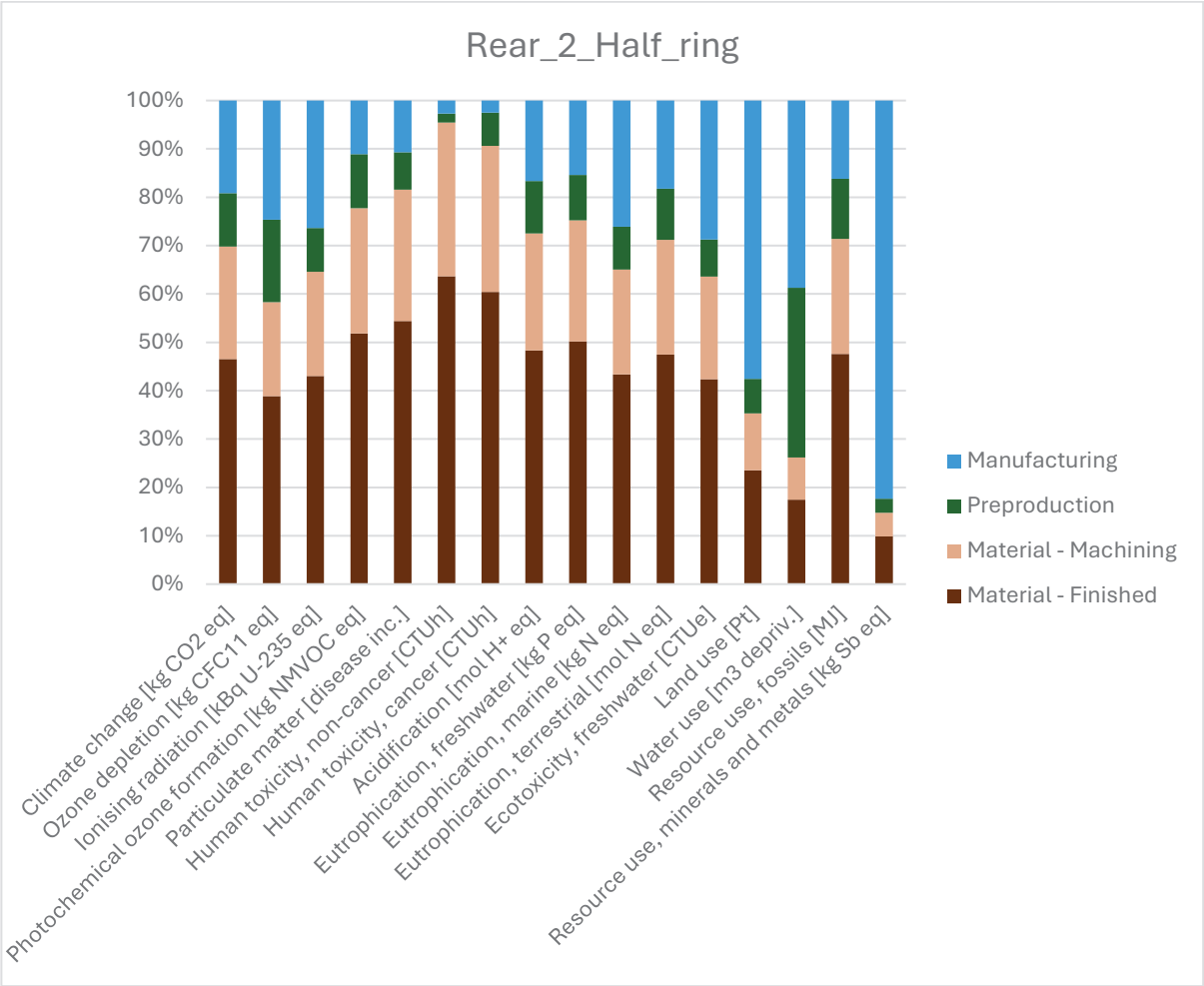


Figura 72. Impatti Half ring del Rear 2.

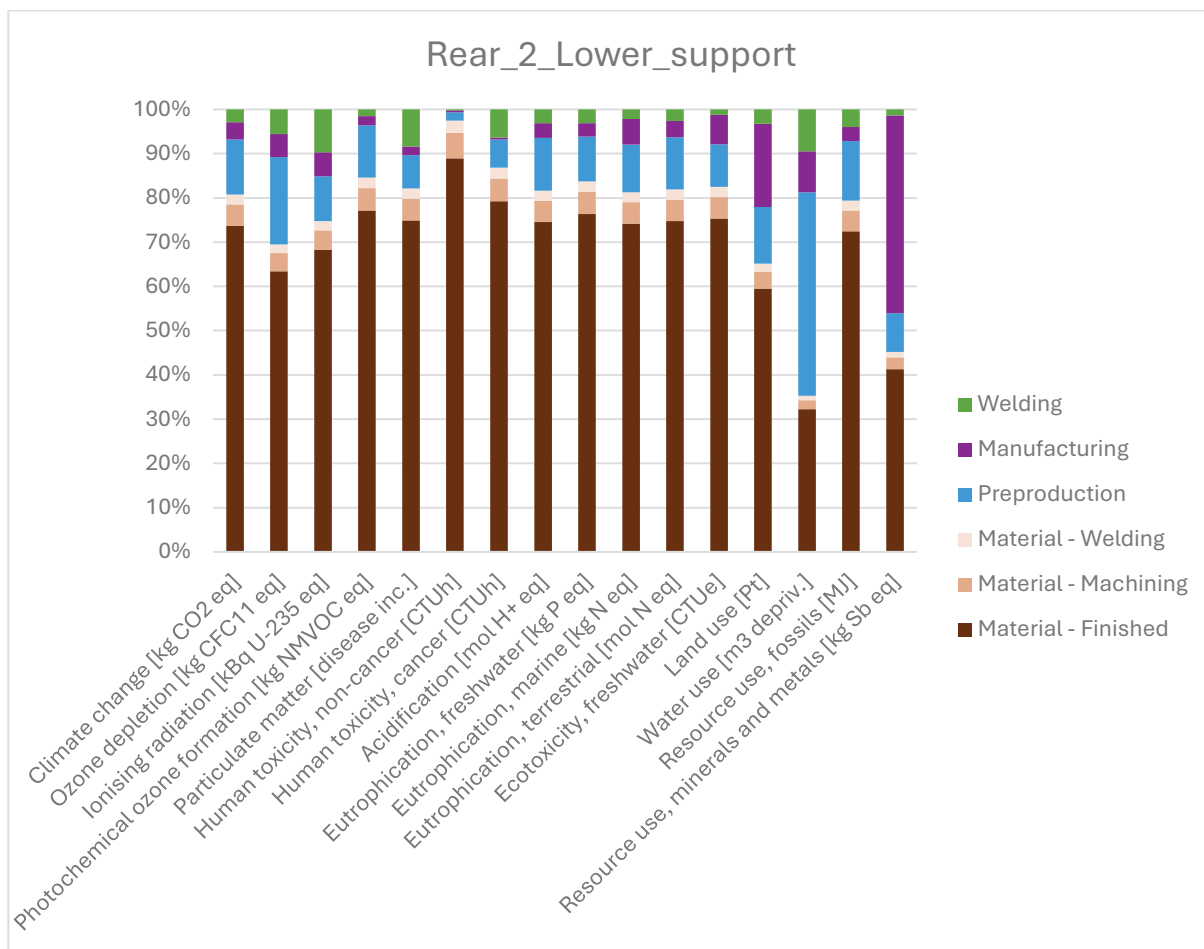


Figura 73. Impatti Lower support del Rear 2.

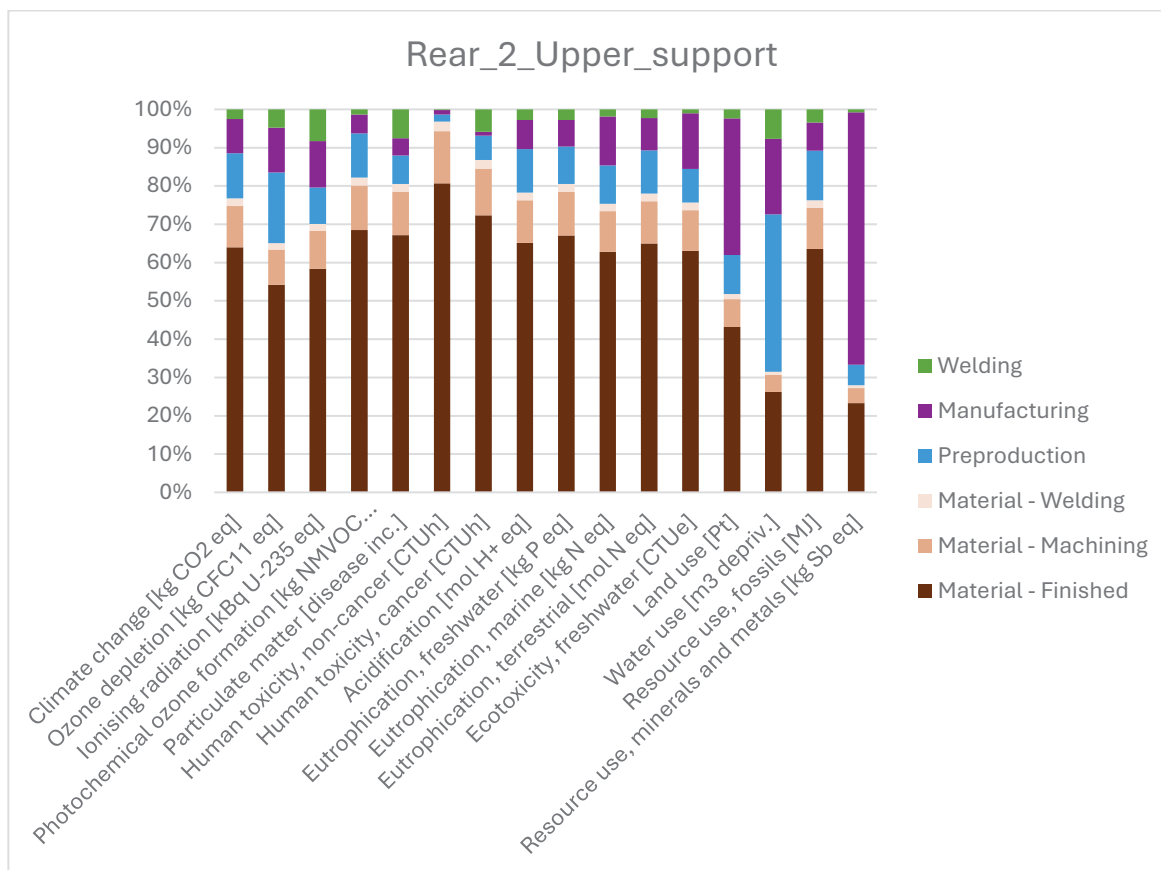


Figura 74. Impatti Upper support del Rear 2.

La tabella sottostante confronta gli impatti delle fasi analizzate per la categoria “Climate Change” dei componenti del Rear 2.

Rear 2							
Climate change	Massa %	Material Finished %	Material Machining %	Material Welding %	Preproduction %	Manufacturing %	Welding %
Half ring	3,6	46,55	23,27	0	11,03	19,15	0
Lower part	83,6	73,71	4,78	2,28	12,40	3,93	2,9
Upper part	12,8	63,96	10,82	1,98	11,82	8,9	2,52

Tabella 17. Confronto delle fasi analizzate per la categoria “Climate change” dei componenti del Rear 2.

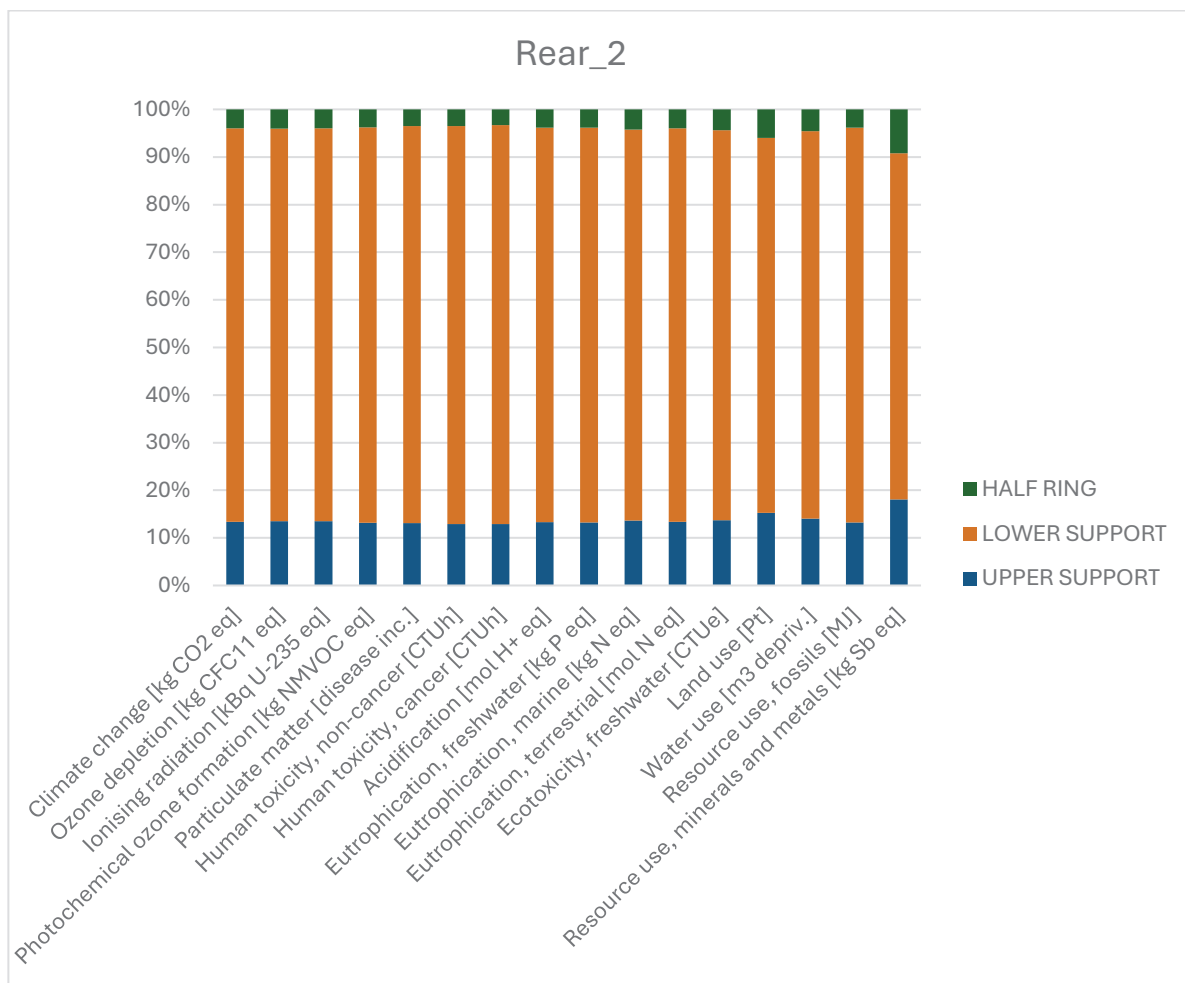


Figura 75. Confronto tra impatti dei componenti del Rear 2.

Rear 3

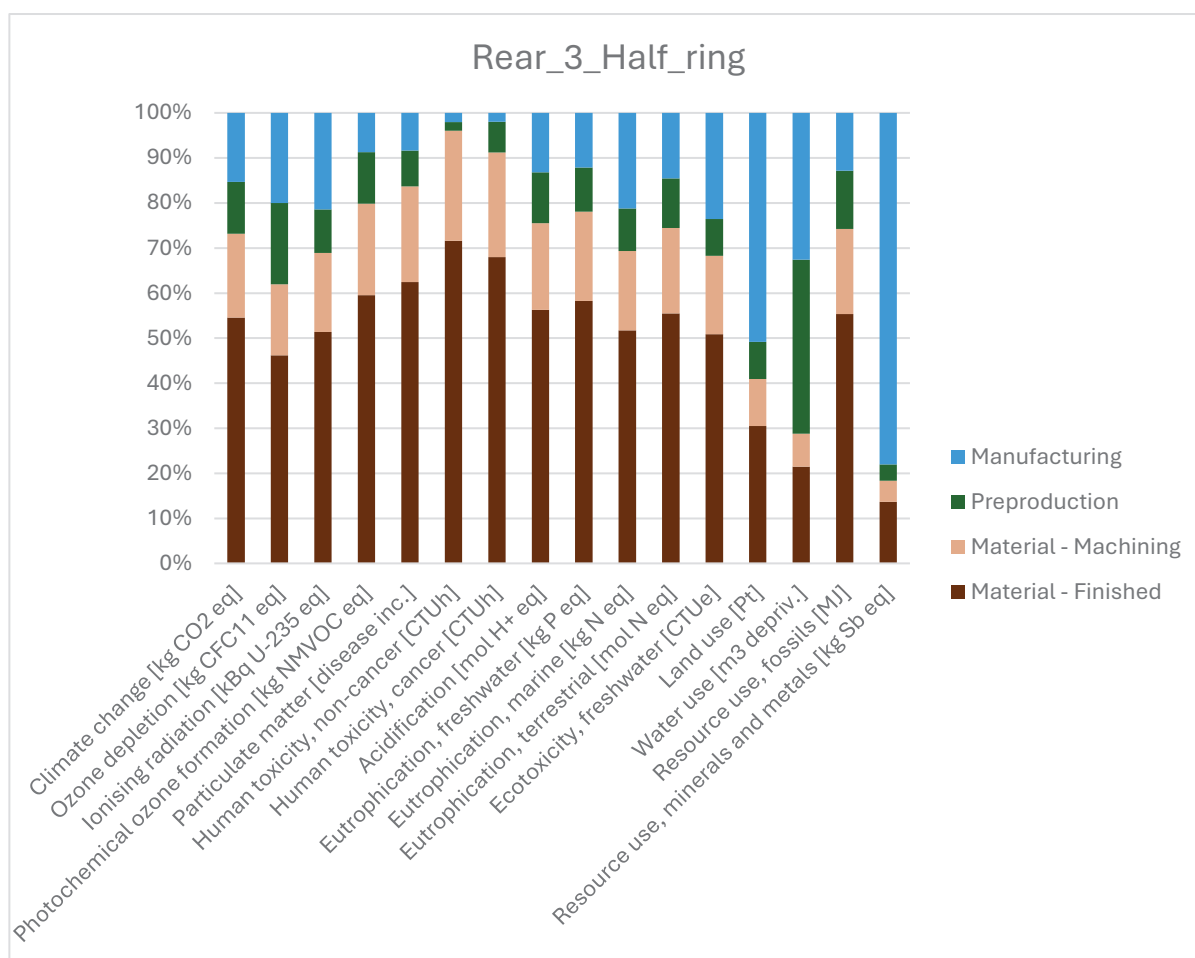


Figura 76. Impatti Half ring del Rear 3.

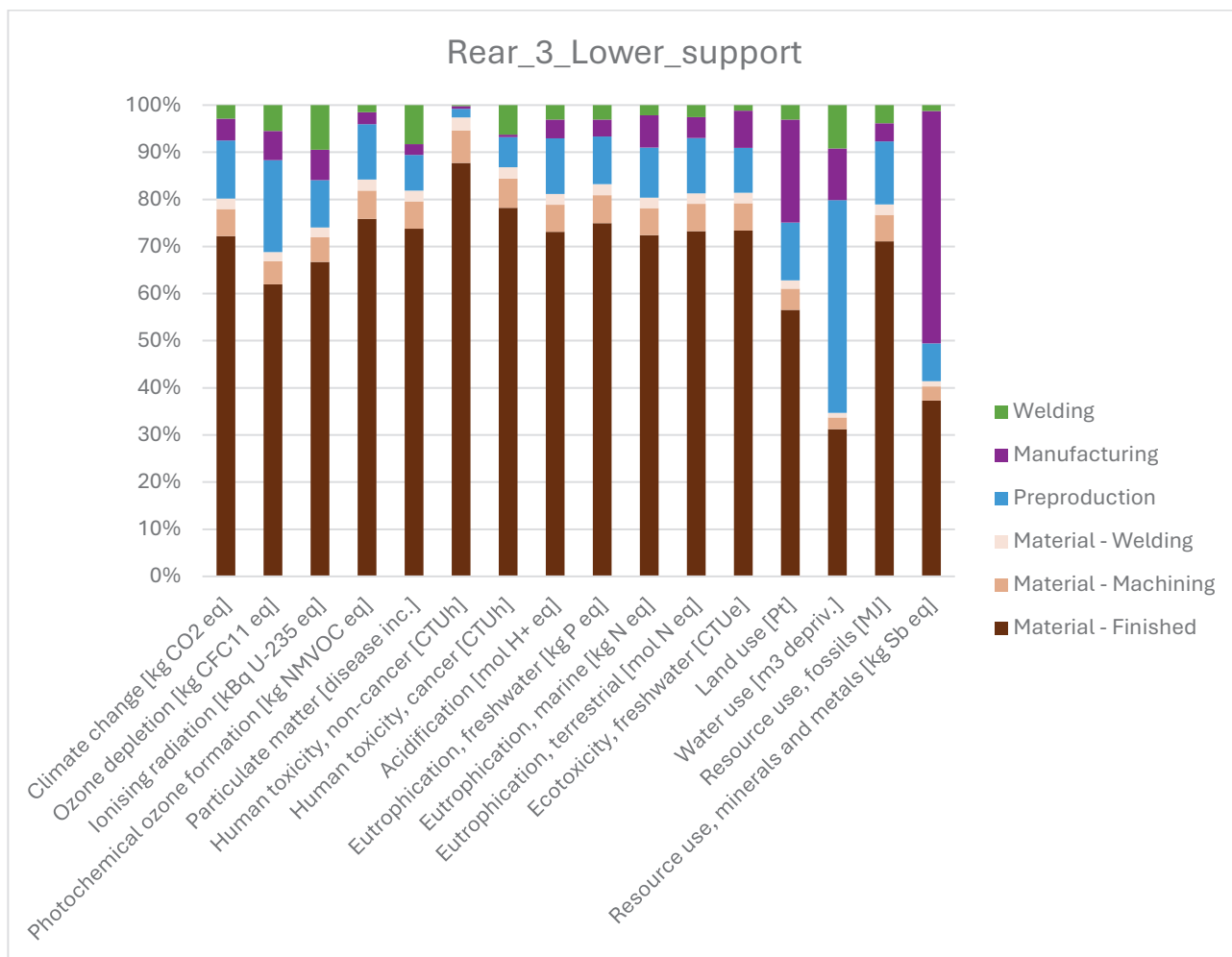


Figura 77. Impatti Lower support del Rear 3.

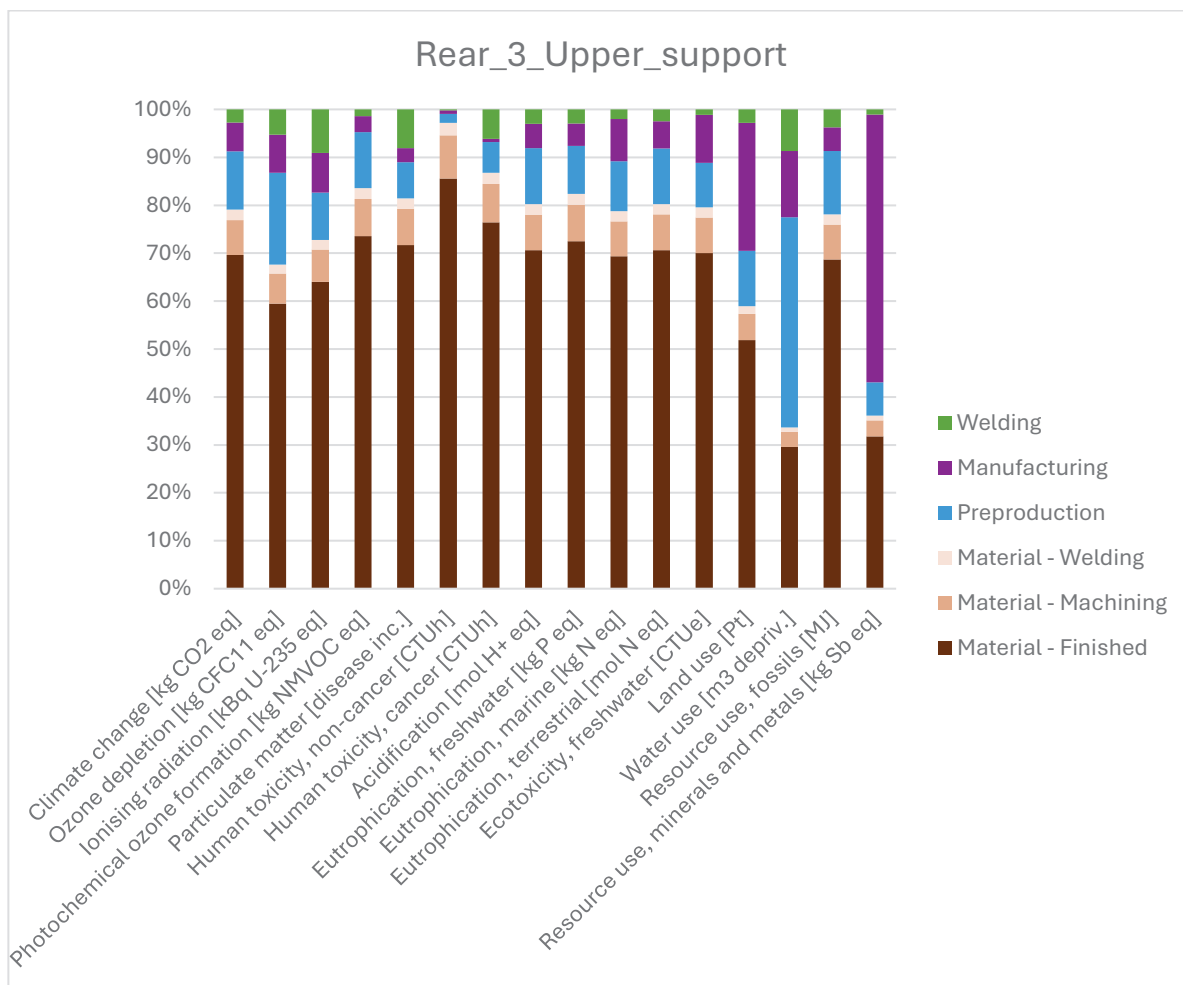


Figura 78. Impatti Upper support del Rear 3.

La tabella sottostante confronta gli impatti delle fasi analizzate per la categoria “Climate Change” dei componenti del Rear 3.

Rear 3							
Climate change	Massa %	Material Finished %	Material Machining %	Material Welding %	Preproduction %	Manufacturing %	Welding %
Half ring	5,8	54,55	18,6	0	11,55	15,3	0
Lower part	81,8	72,21	5,71	2,23	12,31	4,69	2,85
Upper part	12,4	69,6	7,33	2,15	12,16	6,02	2,74

Tabella 18. Confronto delle fasi analizzate per la categoria “Climate change” dei componenti del Rear 3.

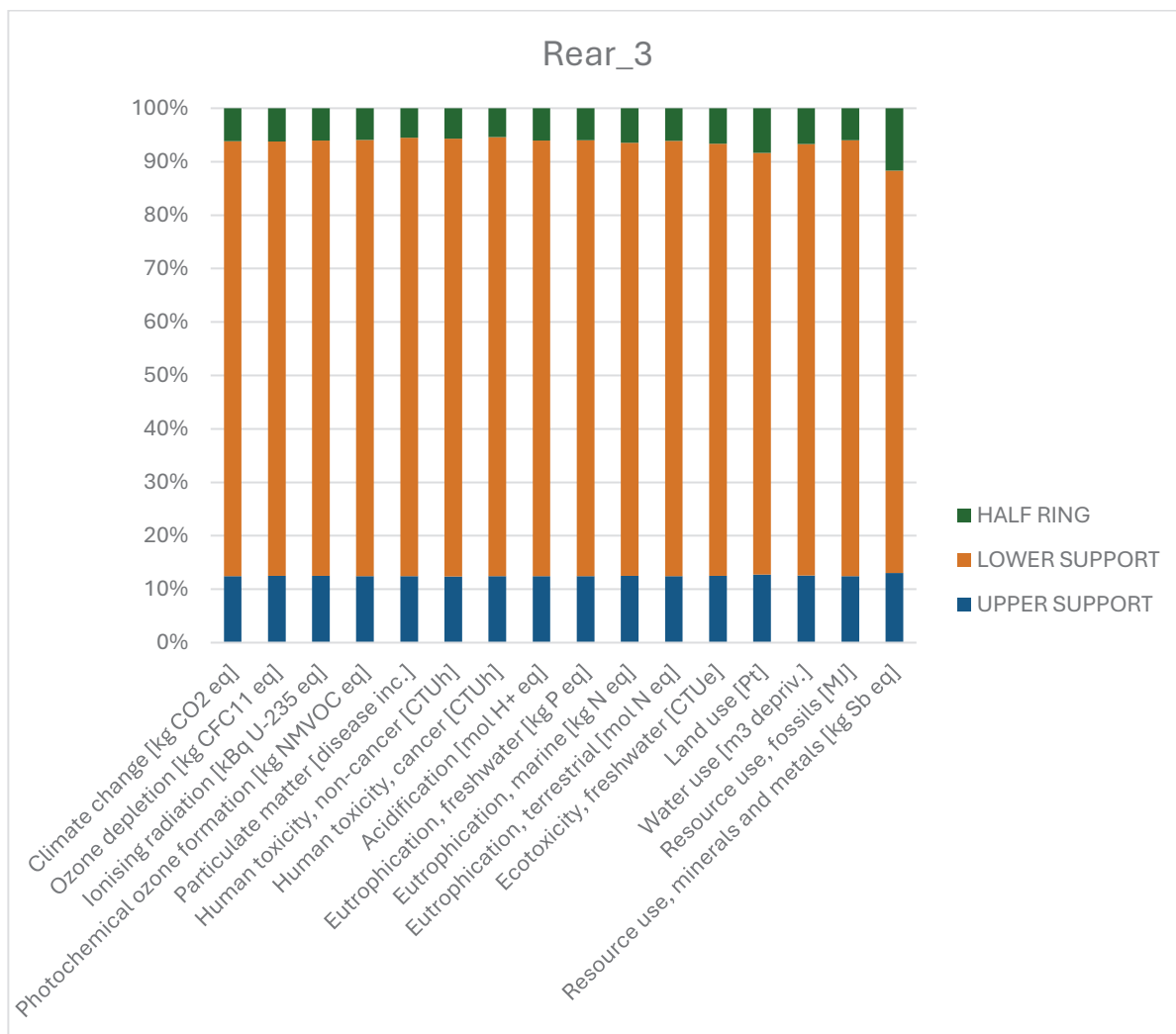


Figura 79. Confronto tra impatti dei componenti del Rear 3.

Rear 4

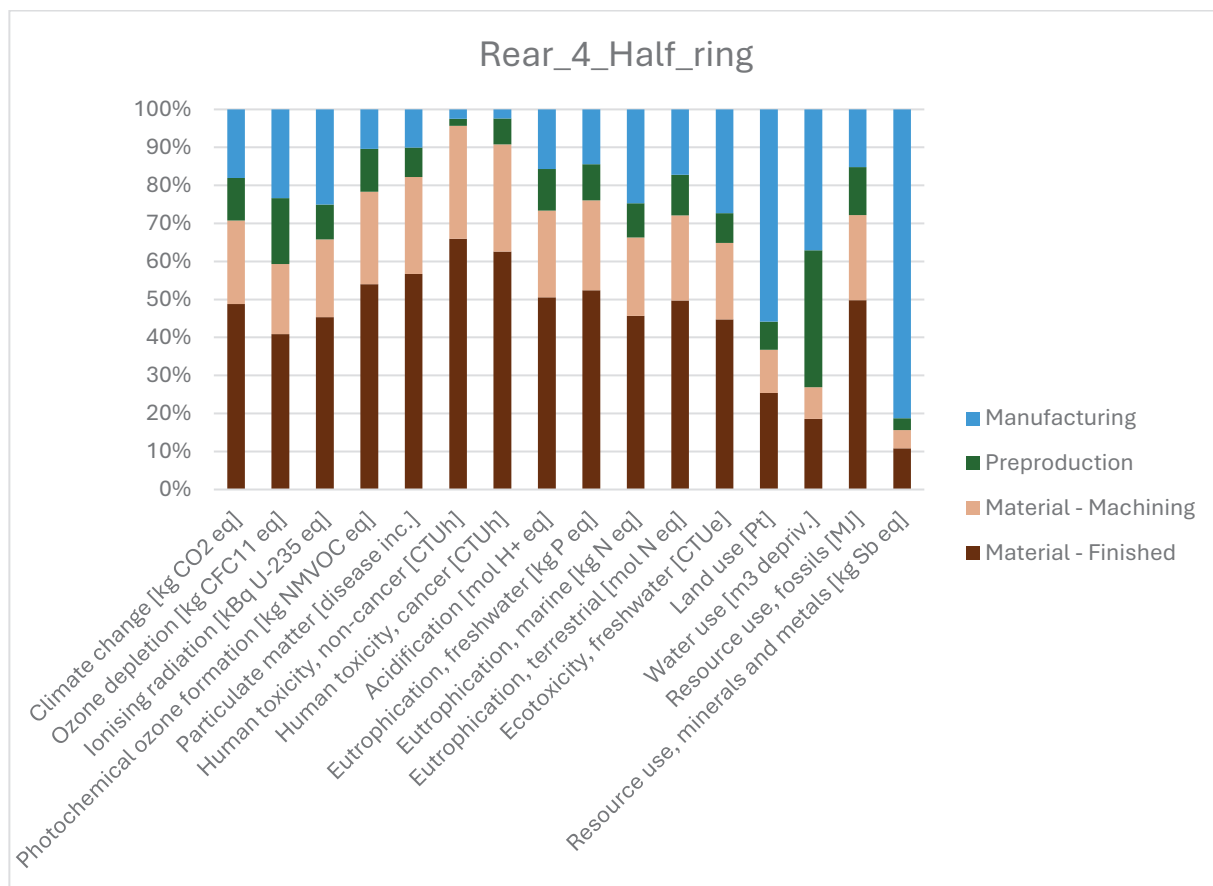


Figura 80. Impatti Half ring del Rear 4.

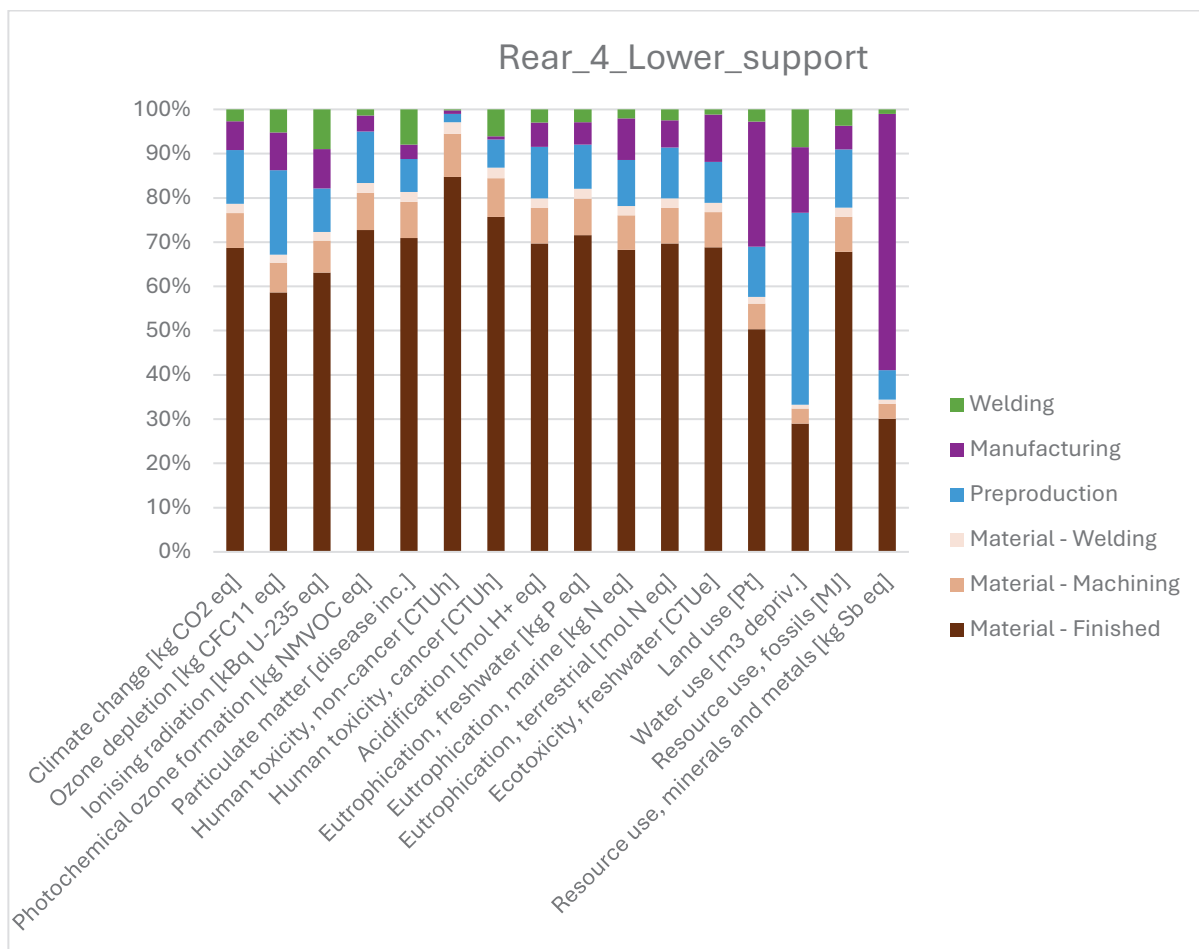


Figura 81. Impatti Lower support del Rear 4.

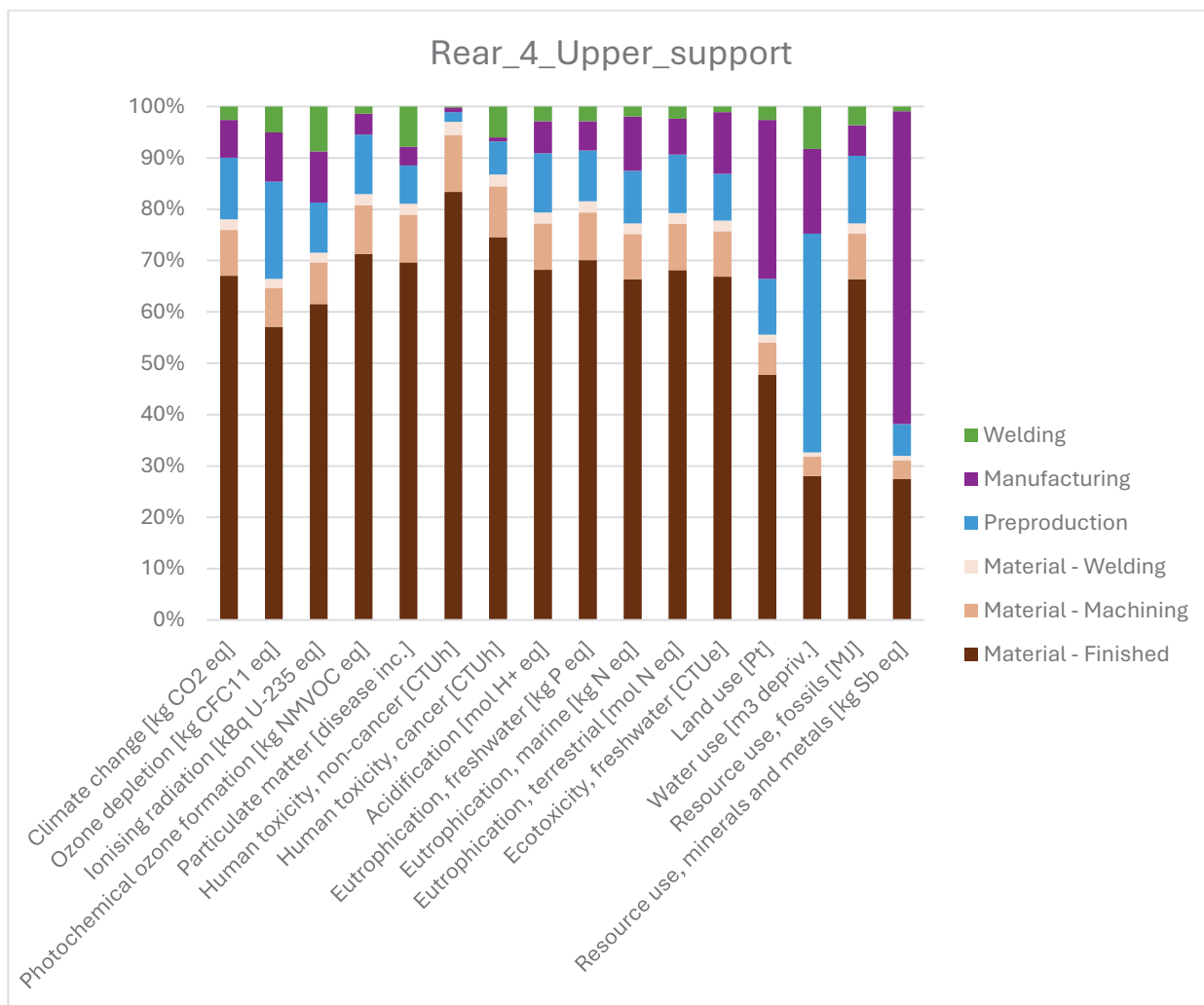


Figura 82. Impatti Upper support del Rear 4.

La tabella sottostante confronta gli impatti delle fasi analizzate per la categoria “Climate Change” dei componenti del Rear 4.

Rear 4							
Climate change	Massa %	Material Finished %	Material Machining %	Material Welding %	Preproduction %	Manufacturing %	Welding %
Half ring	2,6	48,8	21,96	0	11,18	18,06	0
Lower part	87,6	68,65	7,91	2,12	12,1	6,52	2,7
Upper part	9,8	67,07	8,9	2,07	12	7,32	2,64

Tabella 19. Confronto delle fasi analizzate per la categoria “Climate change” dei componenti del Rear 4.

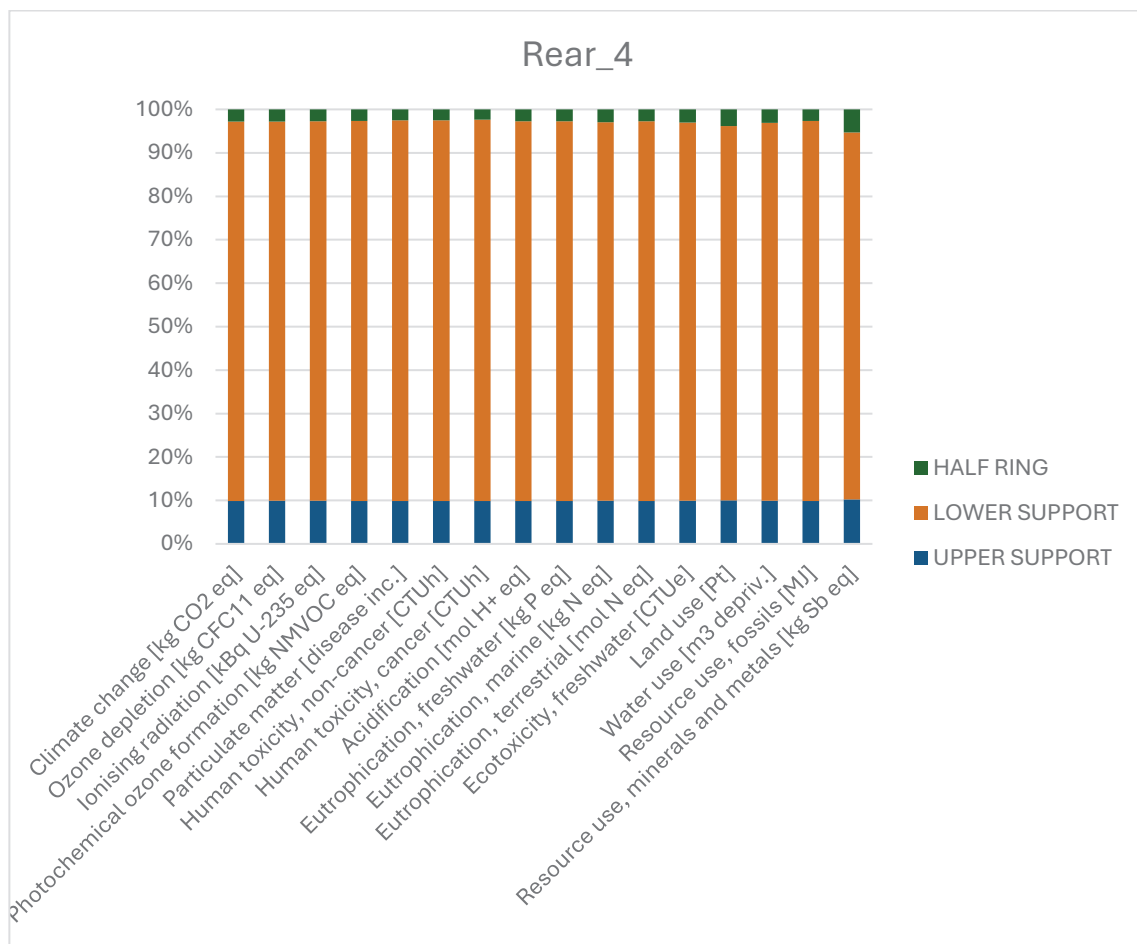


Figura 83. Confronto tra impatti dei componenti del Rear 4.

Infine, anche per i Rear sono stati confrontati gli impatti dei quattro supporti che, finora, sono stati analizzati singolarmente.

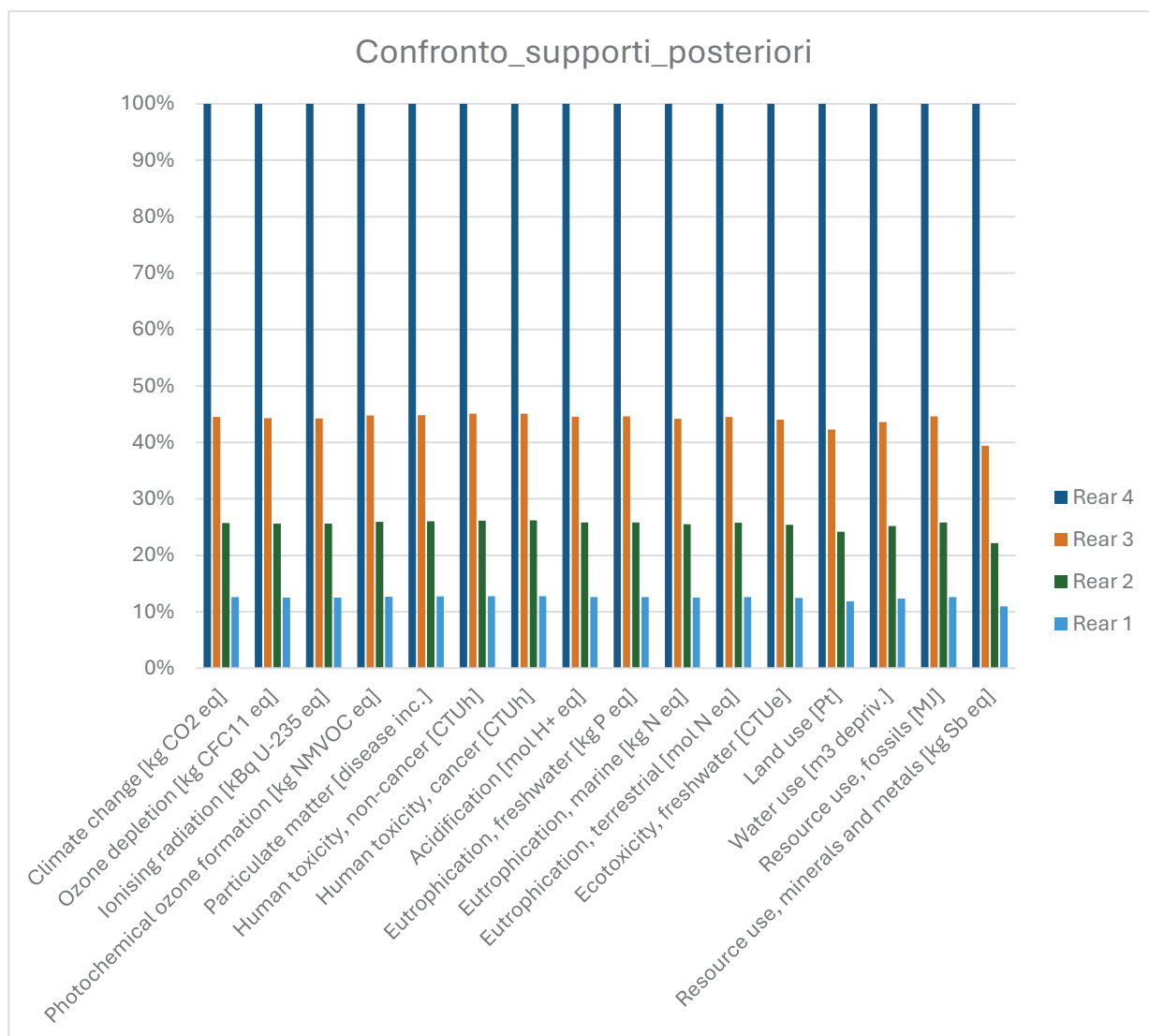


Figura 84. Confronto tra impatti dei quattro supporti posteriori.

Interpretazione dei risultati

Dall'analisi dei risultati ottenuti emerge:

- Per ciascuno dei singoli componenti dei supporti (sia anteriori che posteriori) la fase “Material” relativa all'estrazione e processazione dei materiali risulta essere la più impattante in tutte le categorie considerate.
- Confrontando tra loro i componenti di ciascun supporto, il lower support (parte inferiore) risulta essere sempre quello maggiormente impattante. Principalmente questo è dovuto alla sua massa, nettamente superiore agli altri, ma anche al fatto che, essendo formato da diversi componenti,

necessita di più lavorazioni e operazioni di assemblaggio rispetto agli altri (parte superiore e semianello).

- Come da attese, confrontando tra loro i supporti completi (sia anteriori sia posteriori), si ottiene che gli impatti hanno un andamento direttamente proporzionale alla massa. Il risultato finale porta quindi ad avere il Front 3 circa dieci volte più impattante del Front 1 in tutte le categorie d'impatto considerate. Analogamente nei supporti posteriori si ha lo stesso rapporto tra il Rear 1 e il Rear 4.
- L'impatto della saldatura, analizzata nella prima parte dello studio, non è trascurabile, sebbene non risulti essere particolarmente rilevante. Infatti, dalle tabelle 13-19 emerge come la saldatura contribuisca a circa il 3-4% dell'impatto totale per la categoria "Climate change".

Tenendo presente che i supporti debbano garantire le prestazioni richieste, per ridurre gli impatti, si potrebbe intervenire nel loro design per:

- Ridurre la massa totale del supporto, così da intervenire nella fase "Material" (quella nettamente più impattante);
- Avere un finito di forme e dimensioni molto simili al semilavorato, così da poter ridurre gli impatti ottenuti dalle lavorazioni;
- Cercare di ridurre il numero di componenti, così da limitare il numero di saldature che, soprattutto nella parte inferiore, risultano avere un impatto piuttosto rilevante.

Infine, per abbassare l'impatto delle lavorazioni, è possibile considerare l'utilizzo di energia rinnovabile.

Conclusioni

L'obiettivo principale di questo studio è stato valutare l'impatto ambientale dei supporti (anteriori e posteriori) di una turbina a vapore.

Il primo passo è stato quello di analizzare dettagliatamente le saldature dei tre supporti anteriori a disposizione, valutando il peso di materiale apportato durante il processo. Essendo stato riscontrato un andamento approssimabile ad un comportamento lineare, è stato possibile realizzarne un modello parametrico.

Il modello parametrico ottenuto per i supporti anteriori è stato applicato anche ai supporti posteriori, ottenendo però un errore non trascurabile. Quindi, la stessa operazione è stata ripetuta con i supporti posteriori, creando così un modello a loro dedicato.

Successivamente si è passati alla valutazione degli impatti, grazie alla modellazione in SimaPro. Dall'analisi dei sette supporti (tre anteriori e quattro posteriori) sono emersi risultati analoghi:

- La parte inferiore del supporto (lower support) è quella maggiormente impattante in tutte le categorie considerate, questo è dovuto sia ad una massa superiore rispetto agli altri, sia alle numerose lavorazioni richieste per la sua realizzazione;
- La fase "Material", relativa all'estrazione e alla processazione dei materiali, è quella più impattante;
- L'andamento degli impatti è direttamente proporzionale alla massa dei supporti analizzati.
- L'impatto delle saldature non è trascurabile per la parte inferiore e superiore del supporto.

La tesi aveva l'obiettivo di correlare gli input geometrici noti con l'impatto ambientale per i supporti front e rear di una turbina a vapore. Per il calcolo dell'impatto ambientale la massa del finito e del semilavorato erano note. Il dato mancante in input era la massa di saldatura. L'obiettivo è stato raggiunto sviluppando un metodo per parametrizzare il processo di saldatura, in modo tale da ottenere il dato mancante in funzione della massa finito. In questo modo per calcolare l'impatto ambientale di un nuovo supporto basterà dare in input al modello la massa del finito e quella del semilavorato.

Garantendo la funzionalità dei supporti, per ottenere una riduzione degli impatti, si potrebbe cercare di intervenire nel design, cercando di:

- Ridurre la massa dei supporti, così da abbattere la fase "Material";
- Approfondire la conoscenza del processo produttivo delle lamiere per capire se è presente materiale riciclato, questo potrebbe ridurre l'impatto della produzione di materiale base;

- Modificare la geometria del supporto, così da avere un finito molto simile al grezzo, riducendo il materiale asportato e, di conseguenza, l'impatto delle lavorazioni;
- Limitare il numero di componenti (soprattutto per la parte inferiore) così da diminuire le saldature presenti.

L'utilizzo di energia rinnovabile è una possibile soluzione per ridurre gli impatti relativi alle lavorazioni.

Bibliografia

- [1] Materiale ufficio tecnico turbina a vapore Baker Hughes.
- [2] Corso di Fisica tecnica, Prof. Angelo Farina, Università degli Studi di Parma.
- [3] Tesi di laurea “Otimizzazione di un Organic Rankine Cycle per applicazione geotermica al variare della temperatura della fonte” di Alessandra Stella, Università degli Studi di Padova.
- [4] ISO, 2006a. 14040:2006 – Environmental management – LCA – Principles and Framework.
- [5] ISO, 2006b. 14044:2006 -Environmental management – LCA _ Requirements and Guidelines.
- [6] Gunther Sproesser, Ya-Ju Chang, Andreas Pittner, Matthias Finkbeiner, Michael Rethmeier “Life Cycle assessment of welding technologies for thick metal plate welds”, Journal of Cleaner Production, dicembre 2015.
- [7] G. Sproesser, A. Pittner, and M. Rethmeier, “Increasing Performance and Energy Efficiency of Gas Metal Arc Welding by a High Power Tandem Process,” Procedia CIRP, vol. 40, pp. 643–648, 2016.
- [8] K. S. Sangwan, C Hermann, P. Egede, V. Bkakar, J. Singer “Life Cycle Assessment of Arc Welding and Gas Welding Processes”, Procedia CIRP, Volume 48, pp. 62-67, 2016.
- [9] Y. Chang, G. Sproesser, S. Neugebauer, K. Wolf, R. Scheumann, A. Pittner, M. Rethmeier, M. Finkbeiner, “Environmental and Social Life Cycle Assessment of Welding Technologies”, Procedia CIRP, Volume 26, pp. 293-298, 2015.
- [10] “Book of Knowledge”, LeanCost.
- [11] “Linee guida per la valutazione degli impatti ambientali secondo la metodologia PEF”, Life CO2 PES&PEF, Le foreste che rigenerano l’economia.