

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale



Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Analisi del ciclo di vita di macchine di misura a coordinate mediante la metodologia LCA.

Relatore

Chiar.mo Prof. Paolo FINO

Correlatore

Ing. Lorenzo MERLO

Candidato

Michele LUISO

Anno Accademico 2020-2021



HEXAGON
METROLOGY

Indice

Introduzione	4
1 L'AZIENDA	6
1.1 Hexagon Manufacturing Intelligence	6
1.2 La Divisione commerciale Italia	7
1.3 Hexagon Grugliasco - esperienza di stage	7
2 LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)	10
2.1 Le Origini	11
2.2 Norme di riferimento	13
2.3 La struttura di un'analisi LCA	13
2.3.1 Definizione dell'obiettivo (Goal and Scope definition)	14
2.3.2 Analisi di inventario (LCI)	16
2.3.3 Valutazione degli impatti (LCIA)	17
2.3.4 Interpretazione dei risultati	21
2.4 Vantaggi e svantaggi di un'analisi LCA	22
2.4.1 Vantaggi	22
2.4.2 Svantaggi e limitazioni	22
3 IL SOFTWARE	23
3.1 Librerie in SimaPro	24
3.1.1 Ecoinvent	25
3.2 Implementazione del ciclo di vita	26
3.3 Modelli di valutazione dell'impatto	27
3.3.1 EPS 2000	29
3.3.2 ECO-INDICATOR 99	29
3.3.3 CML-IA	30
3.3.4 IMPACT 2002+	30
3.3.5 RECIPE	34

4	ANALISI LCA DI DUE MACCHINE CMM	36
4.1	Definizione obiettivi	36
4.2	Raccolta dati: Life cycle inventory	37
4.3	GLOBAL: raccolta dati e sviluppo in SimaPro	38
4.3.1	Materiali e Lavorazioni	38
4.3.2	Logistica	57
4.3.3	Assemblaggio	58
4.3.4	Utilizzo	60
4.4	TIGO: raccolta dati e sviluppo in SimaPro	61
4.4.1	Materiali e Lavorazioni	62
4.4.2	Logistica	73
4.4.3	Assemblaggio	73
4.4.4	Utilizzo	74
4.5	LCIA: Valutazione degli impatti	75
4.5.1	Risultati Global	75
4.5.2	Risultati Tigo	84
4.5.3	Confronto tra le due macchine	91
5	Conclusioni	94

INTRODUZIONE

La sostenibilità sta occupando un ruolo sempre più importante nelle aziende moderne, soprattutto nelle multinazionali. Avviare progetti e campagne sulla sostenibilità favorisce un grande ritorno d'immagine per l'azienda sia nei confronti dei consumatori, che dei governi, nonostante nel breve termine non ci sia quasi mai un beneficio economico.

Per questo motivo anche la Hexagon Manufacturing Intelligence negli ultimi anni sta adottando una politica ambientale per lo sviluppo di prodotti che rispettino l'ambiente e tengano conto della sostenibilità. In questo momento gli ingegneri di progettazione Hexagon hanno bisogno di informazioni più dettagliate circa l'impatto ambientale dei materiali utilizzati per la costruzione delle macchine e in generale l'impatto ambientale dei loro prodotti.

Ad Ottobre 2020 è stato avviato un progetto, comune per tutte le sedi Hexagon, finalizzato all'identificazione dell'impatto ambientale dei materiali utilizzati ed allo sviluppo di linee guida che possano essere di aiuto ai progettisti per sviluppare macchinari più sostenibili nell'immediato futuro.

In questo lavoro di tesi ho analizzato il ciclo di vita di due macchine di misura a coordinate (CMM) prodotte nella sede Hexagon di Grugliasco in modo tale da individuare i processi che possono influenzare l'ecosostenibilità dei suddetti prodotti. Per fare ciò è stato utilizzato il metodo del *Life Cycle Assessment* (LCA), un metodo standardizzato e riconosciuto a livello mondiale, quindi decisamente affidabile e trasparente. Tale metodologia di lavoro è stata associata all'utilizzo del software SimaPro di proprietà della società Pré Sustainability. Questa società ha svolto con il nostro team quattro workshop interattivi durante i quali sono state date indicazioni dettagliate su come effettuare un'analisi.

Il lavoro è cominciato con la raccolta dei dati relativi al ciclo di vita delle due macchine, suddiviso poi in quattro categorie fondamentali: Materiali e lavorazioni, Logistica, Assemblaggio, Utilizzo.

Successivamente sono state studiate le lavorazioni che subiscono i componenti principali delle due CMM grazie alle informazioni dei fornitori esterni dell'azienda. Dalle BOM delle due macchine di misura sono state estra-

polate le informazioni sulla quantità di materiali utilizzati per ogni singolo componente. È stata poi analizzata la logistica legata alla fornitura di tutti i componenti provenienti dall'EU o dalla Cina, seguita dal calcolo dell'energia consumata per l'assemblaggio delle macchine presso la sede Hexagon di Grugliasco e infine è stata calcolata l'energia consumata dalle due macchine in 10 anni di utilizzo sfruttando analisi già effettuate in precedenza all'interno dell'azienda.

Si illustra nel seguito il lavoro svolto partendo da una breve introduzione dedicata all'azienda e ai progetti sviluppati, seguita da una descrizione della struttura del metodo di LCA, del Software SimaPro, evidenziandone le librerie e i modelli di calcolo, e infine una parte sull'analisi svolta dalla raccolta dati fino all'interpretazione dei risultati con le relative conclusioni.

Quanto descritto in questa tesi è frutto del tirocinio curriculare semestrale da me svolto presso la Hexagon. Durante tale esperienza ho anche collaborato ad un progetto Globale (PLM e Common CAD comune a tutte le factory), che prevedeva la rielaborazione e conversione degli assiemi CAD Inventor presenti nell'attuale PDM Vault in formato neutro e l'importazione e allineamento alle strutture (BOM) presenti in Teamcenter trasformandoli in formato CAD NX (Siemens).

Capitolo 1

L'AZIENDA

1.1 Hexagon Manufacturing Intelligence

Hexagon è una multinazionale svedese leader nel settore dei sensori, dei software e delle soluzioni autonome. Il suo obiettivo è quello di migliorare la produttività, l'efficienza e la qualità nell'ambito delle applicazioni per l'industria, le infrastrutture, la produzione, la mobilità e la sicurezza. Hexagon conta circa 20,000 dipendenti in 50 Paesi e un fatturato netto di circa 3.9 miliardi di euro (4.4 miliardi di dollari). Le sue tecnologie stanno cercando di rendere più connessi e autonomi gli ecosistemi urbani e produttivi, garantendo un futuro più sostenibile. La divisione Manufacturing Intelligence di Hexagon vuole rendere l'impresa manifatturiera più intelligente, sfruttando i dati che si ottengono dalla progettazione e dall'ingegneria, dalla metrologia e dalla produzione.

Oggigiorno il miglioramento costante della produttività è essenziale per avere successo in un mercato altamente competitivo; i vari settori industriali sono costantemente caratterizzati da sfide e motivazioni specifiche. La Hexagon Manufacturing Intelligence collabora con i clienti per migliorarne la produttività integrando la qualità nell'intero ciclo di vita del prodotto. Grazie alla tecnologia utilizzata dall'azienda, dalle soluzioni CAE per la progettazione e l'ingegnerizzazione, alle soluzioni CAD CAM e al software complementare per le applicazioni di produzione, alle soluzioni metrologiche hardware e software, fino agli strumenti per la gestione e l'analisi dei dati, i produttori riescono a controllare la qualità in tutte le fasi essenziali dei loro processi. Le soluzioni software creano una sorta di "connessione" digitale tra tutte le fasi del processo produttivo, consentendo all'intero stabilimento di adottare un atteggiamento olistico verso la qualità e di collaborare in modo tempestivo e sicuro per ottenere i risultati desiderati. Le soluzioni hardware si avvalgono

della metrologia per introdurre attributi fisici nel file digitale e migliorare la precisione. La connessione digitale collega un ecosistema per la produzione e, con l'aggiunta di competenze e informazioni specifiche, rende possibile l'apprendimento continuo per migliorare la qualità del prodotto. Mettendo la qualità al centro dei processi si stanno sviluppando degli ecosistemi connessi autonomi per la produzione, le cosiddette "smart factory". [1]

1.2 La Divisione commerciale Italia

L'organizzazione Hexagon Manufacturing Intelligence Italia opera con sedi e personale distribuiti sul territorio nazionale per garantire la massima efficienza e rapidità di intervento locale. Un centro di coordinamento nazionale, cinque aree geografiche gestite individualmente, otto agenti esclusivi, sei centri servizi, un centro Retrofit & Aftermarket e un Centro ACCREDIA riconosciuto a livello europeo. La competenza e la pluriennale esperienza del personale di vendita su tutti i prodotti del gruppo sono ulteriormente arricchite dal supporto di tecnici specializzati in grado di eseguire studi applicativi, dimostrazioni e realizzazione di sistemi speciali e integrati. L'eccellenza dei prodotti offerti da Hexagon Manufacturing Intelligence Italia trova il suo giusto e naturale complemento nella gamma di servizi di altissima qualità che l'organizzazione di supporto tecnico e applicativo propone sull'intero territorio. Due centri di coordinamento nazionale, oltre 30 tecnici di assistenza ed esperti applicativi garantiscono ogni anno oltre 2.300 interventi di installazione, calibrazione, manutenzione, addestramento e consulenza applicativa. La distribuzione delle risorse sul territorio nazionale e la immediata disponibilità di attrezzature e ricambi originali consentono l'erogazione di un servizio tempestivo e altamente specializzato. [2]

1.3 Hexagon Grugliasco - esperienza di stage

Questo lavoro di tesi si inserisce in maniera preponderante in quella che è tutta l'attività di tirocinio curriculare svolta in azienda. Nel dettaglio lo stage ha avuto luogo presso la sede Hexagon Metrology SpA in Strada del Portone 113, Grugliasco (TO) a partire dal primo Settembre 2020 per una durata di 6 mesi. Durante il mio percorso sono stato affiancato dall' Ing. Merlo Lorenzo, tutor aziendale e correlatore, e il Prof. Fino Paolo, tutor accademico nonché mio relatore di laurea. A queste due cruciali figure va aggiunto il grande e stimolante supporto ricevuto dall'intero R&D team di Progettazione Meccanica con particolare menzione per Carbonara Francesco



Figura 1.1: Hexagon Metrology SpA, Str. del Portone 113, Grugliasco (TO)

e Rianna Davide. Tutte le figure con cui ho condiviso questa straordinaria esperienza hanno contribuito in maniera determinante all'accrescimento delle mie conoscenze e competenze sia da un punto di vista professionale, che da un punto di vista personale.

In questa sede Hexagon vi sono:

- La Direzione Generale della Divisione Commerciale Italia
- Il coordinamento delle Vendite Macchine di Misura
- Il coordinamento dei Servizi Post-vendita
- I servizi di vendita e aftermarket per l'Italia nordoccidentale
- Il principale Centro Dimostrazioni, Applicazioni e Training del territorio italiano
- Un centro ACCREDIA accreditato per la certificazione di macchine di misura e campioni di lunghezza
- La sede delle attività produttive ed amministrative, della Direzione Ricerca e Sviluppo Meccanica ed Elettronica, Marketing e Comunicazione, ed Export.

Il mio tirocinio si è sviluppato nella direzione di Ricerca e Sviluppo Meccanica, qui si occupano della progettazione di Macchine di misura a coordinate (CMM). Vengono prodotti diversi modelli a seconda della loro funzione, delle condizioni ambientali in cui devono operare e delle dimensioni del prodotto da misurare. Alcune tipologie di macchine prodotte dall'azienda sono:

- CMM a portale di piccole dimensioni
- CMM a portale e a pilastri di grandi dimensioni
- CMM a braccio orizzontale
- CMM per officina
- CMM multisensore e ottiche

Capitolo 2

LIFE CYCLE ASSESSMENT (LCA)

Come già anticipato nell'introduzione, il seguente lavoro di tesi consiste nell'analisi del ciclo di vita di due macchine CMM mediante la metodologia LCA. Di seguito verrà introdotta tale metodologia, dalle origini fino alla sua attuale struttura.

Life Cycle Assessment (LCA) è un metodo basato su prove scientifiche che valuta l'impatto ambientale e sociale di un prodotto durante l'intero suo ciclo di vita, dall'estrazione del materiale fino al riciclo o smaltimento finale. Per ogni step viene valutato tutto ciò che si estrae dalla natura e tutto ciò che viene immesso in natura. E' un metodo standardizzato e riconosciuto a livello mondiale, quindi è decisamente affidabile e trasparente. Esso permette alle aziende di migliorare il livello ambientale dei loro prodotti.

I principali motivi per cui è conveniente svolgere uno studio LCA sono:

- Identificazione di opportunità di miglioramento del ciclo di vita di un prodotto tramite l'individuazione di punti critici.
- Analisi del contributo dell'impatto ambientale delle singole fasi di vita di un prodotto per migliorarne i processi.
- Confronto dei prodotti interni o esterni all'azienda come base per la compilazione dell'EPD (enviromental product declaration).
- Base per l'identificazione dei KPI (key performance indicator) utilizzati per la gestione del ciclo di vita di un prodotto e come supporto per le decisioni manageriali.

[3]

2.1 Le Origini

Il cambiamento climatico, la scarsità delle risorse sul pianeta e i diversi problemi ambientali hanno portato le aziende, già negli anni 60, a sviluppare sempre più l'approccio dell' "Environmental Life Cycle Thinking". Cioè le industrie hanno iniziato a sviluppare nuovi metodi di analisi energetica per il risparmio di energia e la regolamentazione dei rifiuti. Il ciclo di vita dei materiali utilizzati dai grandi colossi come Mobil chemical company, Coca-Cola,... venne studiato per la prima volta negli anni 70 dall' EPA (Environmental Protection Agency) tramite un metodo di nome REPA (Resource and Environmental Pacific Analysis). Prima di allora ci si era concentrati di più sullo studio dei componenti singoli e non sull'intero ciclo di vita di un prodotto, questo fu di fatto un grande passo in avanti verso l'attuale LCA. Verso la fine degli anni 80 venne pubblicato il manuale di Analisi Energetica di Boustead e Hancock nel quale si può trovare probabilmente la prima descrizione del procedimento base dell'attuale LCA. Da quel momento in poi, negli anni successivi venne sviluppata sempre più nel dettaglio la metodologia LCA utilizzata tutt'oggi per l'analisi del ciclo di vita di materiali e prodotti. La definizione di LCA viene fornita dalla SETAC (Society of environmental Toxicology and Chemistry) nel 1993: *"Una LCA è un procedimento oggettivo che permette di valutare gli impatti ambientali associati ad un prodotto, un processo o un'attività, effettuato attraverso l'identificazione e la quantificazione dei consumi di materia, energia ed emissioni nell'ambiente, e l'identificazione e la valutazione delle opportunità per diminuire questi impatti. L'analisi riguarda l'intero ciclo di vita del prodotto ("dalla culla alla tomba"): dall'estrazione e trattamento delle materie prime, alla produzione, trasporto e distribuzione del prodotto, al suo uso, riuso e manutenzione, fino al riciclo e allo smaltimento finale."*¹

Inizialmente il metodo LCA era composto da tre fasi:

- Raccolta dati;
- Interpretazione dei dati;
- Miglioramento del sistema con prove differenti.

Successivamente negli anni 1997-98 la metodologia è stata normalizzata grazie alle norme ISO 14040 e ISO 14043, sostituite nel 2006 dalle norme ISO 14040 e ISO 14044 che riguardano rispettivamente i *"Principles and Framework"* per la prima e *"Requirements and guidelines"* per la seconda. Negli

¹SETAC, 1993

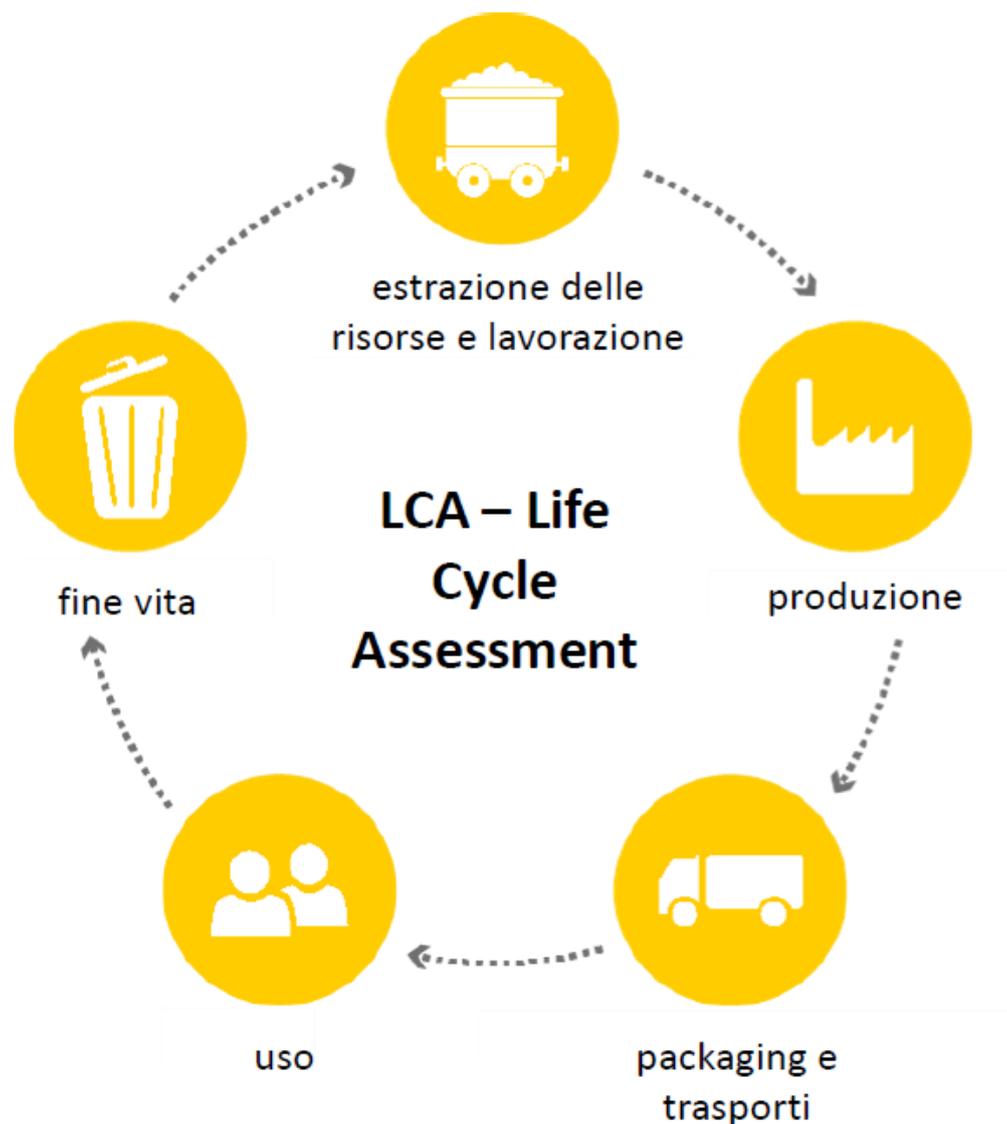


Figura 2.1: Ciclo di vita di un prodotto: from cradle to grave (Fonte: Rete clima)

ultimi anni grazie al continuo sviluppo e aggiornamento di software e database da parte di diverse compagnie che si occupano di sviluppo sostenibile, la struttura della metodologia LCA è diventata sempre più definita e standardizzata. Il cosiddetto Life Cycle Thinking sta avendo un ruolo sempre più importante nelle politiche aziendali, infatti attualmente non sono più solo i governi a spingere per uno sviluppo più sostenibile, ma anche diverse aziende private. [4]

2.2 Norme di riferimento

Le norme principali di riferimento per uno studio di LCA sono due:

ISO 14040: Principi e Struttura

ISO 14044: Requisiti e Linee guida

Queste norme sono state approvate dal CEN il 19 Giugno 2006. La prima è di carattere più generale e descrive sommariamente i principi, le fasi, i punti chiave di un'analisi LCA. La seconda è uno strumento pratico da utilizzare durante lo svolgimento di un'analisi LCA per seguirne i passaggi. E' importante seguire le norme per poter affermare che l'analisi LCA effettuata sia conforme a queste ultime e rendere così i risultati affidabili agli occhi di operatori esterni. Ovviamente l'analisi può essere effettuata in diversi modi a seconda degli scopi e difficilmente seguirà puntualmente le due norme ISO. Per esempio, le fasi di allocazione e di ponderazione delle categorie di impatto non sono previste dalle norme ma vengono comunque spesso effettuate per un'analisi più accurata del prodotto. Queste non sono le uniche norme relative ad un'analisi LCA, esse sono semplicemente le due fondamentali che fungono da supporto a tutte le altre. Un'altra normativa importante è la ISO 14025 che descrive le "Product Category Rules" (PCR) e le "Environmental Product Declarations" (EPD). Il PCR è un insieme di regole più stringenti riguardanti una singola categoria di prodotto. In pratica un gruppo di organizzazioni per ogni singola categoria di prodotto stabilisce delle linee guida meno generali rispetto a quelle descritte dalle norme ISO 14044 e ISO 14040 per la realizzazione di un'analisi più accurata di ogni categoria. La dichiarazione EPD invece è un documento redatto dall'azienda, non obbligatorio, per fornire ai produttori, consumatori e distributori informazioni dettagliate sull'impatto ambientale dei propri prodotti e dimostrare che questi ultimi rientrino nei requisiti ambientali richiesti. [5]

2.3 La struttura di un'analisi LCA

Secondo la norma ISO 14040 un'analisi LCA è composta da 4 fasi principali:

1. **Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione dello studio:** assunzioni e limiti, motivazioni, a chi è rivolta, quali prodotti studiare.
2. **Analisi dell'inventario (LCI):** raccolta dei dati utili per effettuare lo studio e calcolo delle emissioni.

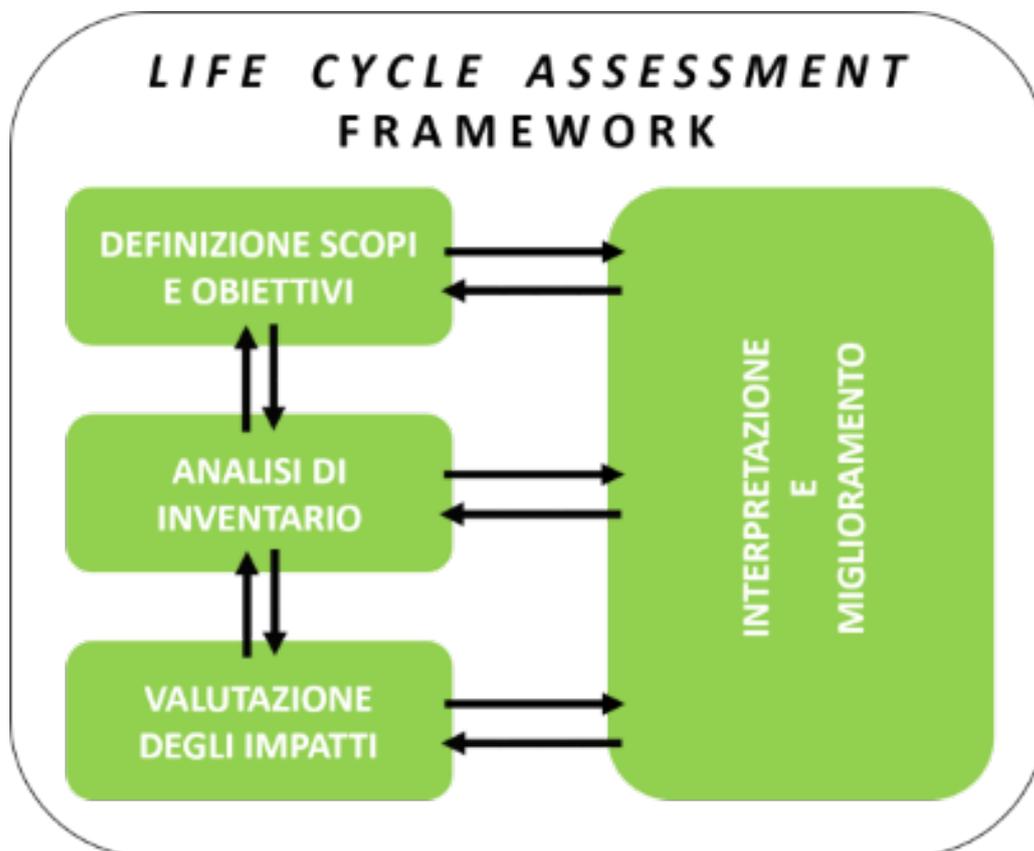


Figura 2.2: Struttura analisi LCA (Fonte: Rete clima)

3. **Valutazione degli impatti (LCIA):** serve per valutare la portata dei potenziali impatti ambientali utilizzando i risultati dell'LCI.
4. **Interpretazione dei risultati:** qualifica, verifica e valutazione dei risultati delle precedenti due fasi.

2.3.1 Definizione dell'obiettivo (Goal and Scope definition)

La definizione di un ambito e di un obiettivo è un requisito fondamentale per una corretta analisi. Questo è uno degli step obbligatori indicati dagli standard ISO. Sempre secondo norme, è possibile modificarli durante lo studio, in quanto la natura iterativa dell'analisi potrebbe prevedere dei cambiamenti in corso d'opera.

Per quanto riguarda la definizione degli obiettivi, è fondamentale:

- Indicare il tipo di pubblico a cui lo studio è rivolto e se l'analisi è interna all'azienda o deve essere divulgata esternamente. In base al pubblico l'analisi deve essere svolta diversamente in quanto ci potrebbero essere dati sensibili che l'azienda non ha intenzione di divulgare e questo ridurrebbe l'analisi a quanto possa essere reso pubblico.
- Indicare chiaramente le motivazioni per le quali si sta svolgendo l'analisi.

Invece per quanto riguarda la definizione dell'ambito dello studio bisogna considerare più fattori:

- **Limiti del sistema:**

prima di effettuare un'analisi bisogna concordare quali sono i confini dell'analisi stessa. Non facendo questa operazione, uno studio LCA potrebbe essere praticamente infinito. Con un esempio pratico, l'analisi di un prodotto che viene trasportato tramite una nave richiede a sua volta un'analisi su come è stata costruita la nave e così via per ogni componente che entra in gioco. Allora si potrebbe decidere di limitare l'analisi al consumo di carburante della nave e non alla sua produzione.

- **L'Unità funzionale:**

per quanto scritto nelle ISO 14040, essa è definita come "Una prestazione quantificata di un sistema di prodotto da utilizzare come unità di riferimento". In pratica viene utilizzata come base di normalizzazione per comparare i flussi in ingresso e uscita di due prodotti.

- **Criteri di allocazione:**

Spesso capita che l'impatto ambientale di qualche input o output è condiviso da più sottoprodotti, per esempio il consumo di energia elettrica di un impianto industriale è da suddividere per le macchine prodotte dall'azienda. Quindi bisogna trovare un modo per allocare questo consumo alle macchine. Ci sono tre modi per poterlo fare:

1. Calcolare gli input e output per ogni singolo sottoprocesso. Solitamente si scarta questa ipotesi in quanto è un lavoro per richiede un gran numero di ore e spesso non è nemmeno possibile farlo.
2. Scegliere una variabile di allocazione specifica. Quest'ultima può essere: la massa dei prodotti, la quantità, l'energia,....
3. Guadagno: come ultima risorsa di allocazione, quando non si riesce ad identificare nessuna correlazione fisica tra i differenti sottoprodotti, si utilizza il guadagno che quel sottoprodotto riesce

a procurare. L'unico problema è che negli anni spesso il valore economico di un prodotto potrebbe variare e rendere inutile l'analisi.

- **Valori di soglia:**

Occorre indicare un valore di soglia in modo tale da escludere dall'analisi tutti quei sottoprodotti che non lo raggiungono. Il valore preso in considerazione può essere di diversi tipi a seconda delle scelte di chi procede all'analisi. I tre valori più comunemente utilizzati sono:

1. Massa: se la massa di input è inferiore ad una certa soglia allora non viene presa in considerazione. Il problema è che non è possibile applicare questa selezione a tutto ciò che non sia materiale.
2. Valore economico.
3. Impatto ambientale: gli input che generano un impatto ambientale troppo basso non sono oggetto di analisi. Ma prima di effettuare l'analisi non si conosce il valore dell'impatto ambientale di un prodotto, quindi non è facile escluderlo.

- **Qualità e tipo di dati:**

i dati da ricercare devono rispettare dei requisiti scelti all'inizio dell'analisi come l'area geografica di raccolta, la precisione e variabilità, la provenienza dei dati, se sono vecchi o recenti.

- **Revisione critica:**

decidere se alla fine dell'analisi è necessaria una revisione esterna o no. Solitamente se l'analisi è interna all'azienda non è necessaria.

2.3.2 Analisi di inventario (LCI)

L'analisi dell'inventario consiste nella raccolta di dati utili. Probabilmente esso è lo step più complicato e dispendioso dell'intero studio in quanto non è sempre così semplice recuperare tutti i dati relativi al prodotto in esame. Gli input richiesti per effettuare l'analisi sono:

1. Materiali utilizzati e la loro quantità.
2. Lavorazioni effettuate sul materiale.
3. Consumo di acqua.
4. Consumo di ogni fonte di energia (elettricità, calore,...).

5. Emissioni (in acqua, terra, aria).
6. Logistica (tutti i trasporti: dai materiali grezzi fino al prodotto finito).
7. Energia e impatto ambientale dovuto all'assemblaggio del prodotto se necessario.
8. Utilizzo del prodotto (energia consumata dal prodotto finito).
9. Smaltimento e riciclo del prodotto.

I dati si possono raccogliere in due macro sottogruppi che sono: Dati Primari e Dati secondari. Per prima cosa è fondamentale costruire un flowchart del prodotto che si vuole studiare per avere un'idea sommaria di quali dati bisogna raccogliere partendo dai materiali utilizzati fino al riciclaggio del prodotto, se previsto. Il secondo step consiste nel raccogliere i dati primari stabilendo un contatto con le aziende esterne (fornitori e clienti). Questi sono dati specifici del prodotto stesso reperibili solamente attraverso domande ai referenti di ogni azienda esterna e della propria azienda. Il problema principale di questo step consiste proprio nel dover coinvolgere nell'analisi persone esterne che spesso potrebbero non accogliere la richiesta e non essere molto collaborative nel divulgare dati ritenuti confidenziali per l'azienda. Ovviamente dipende anche dal rapporto che si ha con i fornitori, se essi sono invece più disponibili è preferibile compilare un questionario da inviare al referente dell'azienda per ottenere i dati richiesti. I dati secondari invece sono dati più generici che vengono ricercati in database e librerie già esistenti, essi probabilmente sono la maggioranza dei dati necessari per effettuare l'analisi.

2.3.3 Valutazione degli impatti (LCIA)

La terza fase di un'analisi LCA consiste nella valutazione degli impatti ambientali sulla base dei dati raccolti nella fase precedente dell'inventario. Il compito dell'analista è quello di scegliere quali sono le categorie di impatto che si vogliono studiare e che quindi rispecchiano al meglio l'obiettivo dell'analisi. Difficilmente un utente sceglie singolarmente le categorie di impatto per la sua analisi, ma fa uso di modelli preimpostati a seconda del fine dell'analisi. Le categorie di impatto più utilizzate sono:

- Riduzione dell'ozono
- Tossicità per l'uomo
- Formazione di particolato

- Cambiamenti sull'Ecosistema
- Acidificazione
- Eutrofizzazione
- Uso di terra
- Tossicità marina
- Uso di acqua

Secondo la norma ISO 14040/44 questa fase è suddivisa in:

- Fasi Obbligatorie:
 1. Classificazione
 2. Caratterizzazione
- Fasi Opzionali:
 3. Normalizzazione
 4. Ponderazione

La fase di Classificazione consiste nell'associare le emissioni risultanti dal lavoro di LCI con le relative categorie di impatto. Infatti ogni tipo di emissione, consumo e gli altri output dell'LCI tendono ad impattare solo alcune delle categorie. Ad esempio l'emissione di CO_2 influenza il cambiamento climatico ma non ha nessun effetto sulla riduzione dell'ozono. Le categorie di impatto elencate in precedenza sono dette di Midpoint, esse misurano gli effetti delle emissioni. Queste categorie possono essere raggruppate in altre macro categorie dette di Endpoint che misurano i danni sul pianeta come: la salute umana, ecosistema, cambiamenti climatici e le risorse del pianeta. Le prime hanno un grado di incertezza inferiore alle seconde in quanto ci sono meno calcoli da svolgere per ottenerle e di conseguenza meno errori. Ma le categorie di Endpoint sono più semplici da capire per un pubblico esterno in quanto mostrano problemi di vita quotidiana e quindi di più facile interpretazione.

La seconda fase obbligatoria, la Caratterizzazione, serve per indicare in quali quantità un risultato derivante dall'analisi LCI vada ad influire su una categoria di impatto. I risultati sono moltiplicati per un fattore di caratterizzazione relativo al loro contributo sulla categoria. Ci sono diversi metodi di caratterizzazione basati su ricerche scientifiche, per esempio secondo alcuni

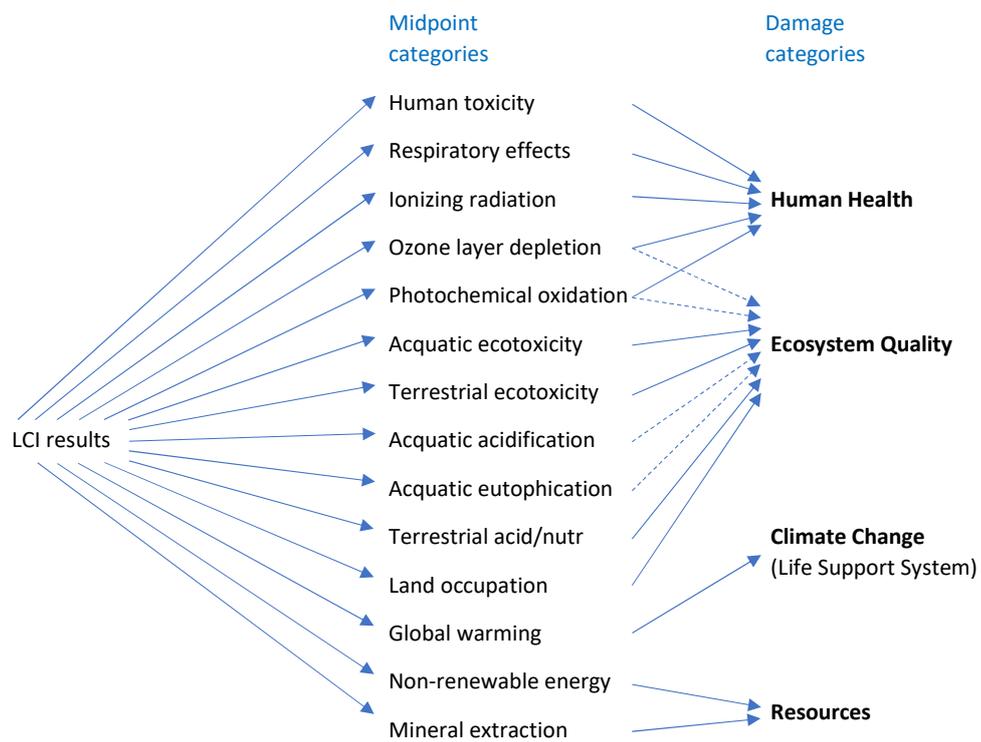


Figura 2.3: Esempio di classificazione Midpoint e Endpoint (Fonte: Elaborazione personale)

metodi la CO_2 ha un fattore di caratterizzazione pari a 1 per la categoria del “cambiamento climatico”, mentre il metano ha un fattore pari a 20. Infatti capita che un tipo di emissione possa influire su diverse categorie di impatto con diversi effetti, la fase di caratterizzazione permette appunto di valutare questi contributi. La scelta del metodo da utilizzare e quindi delle categorie di impatto dipende dagli obiettivi dell’analisi, dal pubblico a cui è rivolta e dall’uso che bisogna fare dei risultati ottenuti. Ogni metodo contiene diverse categorie di impatto, quindi l’user deve giustificare l’uso di un determinato metodo e il motivo per cui alcune categorie possono essere tralasciate. Il problema della caratterizzazione sono le unità di misura differenti dei risultati delle diverse categorie di impatto, di conseguenza non è possibile confrontarle e capire quale sia più dannosa rispetto ad un’altra. Quindi potrebbe anche risultare difficoltoso confrontare due prodotti in base ai soli primi due step (classificazione e caratterizzazione) obbligatori secondo le ISO.

Allora nella maggior parte dei casi si passa al terzo step: la Normalizzazione. Consiste nel dividere i risultati derivanti dalla caratterizzazione per un valore di riferimento standard, in modo tale da poterli confrontare molto più facilmente in quanto espressi tutti con la stessa unità di misura. Solitamente il fattore di normalizzazione potrebbe essere l’impatto ambientale di un singolo abitante, l’impatto globale o locale di un prodotto o qualsiasi altro impatto ambientale derivante da dati statistici. Con la sola Normalizzazione non è possibile vedere se una categoria abbia un impatto maggiore rispetto ad un’altra e nemmeno capire se un prodotto abbia un impatto ambientale totale maggiore rispetto ad un altro.

L’ultima fase opzionale spesso utilizzata è la Ponderazione. I risultati della normalizzazione di ciascuna categoria di impatto vengono moltiplicati per un fattore che esprime l’importanza relativa della suddetta categoria. Alla fine i risultati delle categorie possono essere sommati per ottenere un valore per l’intero prodotto e quindi poterlo comparare facilmente con altri. Questa fase, al contrario delle altre, è di tipo soggettivo, infatti secondo la ISO 1404 “La ponderazione non dovrebbe essere usata in studi LCA utilizzati per asserzioni comparative rese pubbliche”.

I metodi più utilizzati per la scelta di questi fattori sono:

- Distanza da un target prefissato: più i risultati si discostano dal valore prefissato, maggiore sarà il peso dato alla categoria di impatto
- Monetizzazione: il peso attribuito alla categoria è maggiore se è alto il costo attribuito al danno dovuto alla suddetta categoria.
- In base all’opinione di un gruppo di persone che possono essere esperti o a chi è rivolta l’analisi.

Infine è possibile svolgere altre tre analisi per valutare la qualità dei dati, anche se in questo lavoro di tesi non verranno prese in considerazione :

1. **Analisi di Contribuzione:** è possibile determinare quali processi hanno un contributo maggiore all'impatto ambientale finale in modo tale da poter tralasciare quelli con un impatto decisamente inferiore
2. **Analisi di Incertezza:** i dati nel corso degli anni o dell'analisi stessa potrebbero variare, quindi ci sono alcuni metodi che controllano la distribuzione della variazione.
3. **Analisi di sensibilità:** valuta l'influenza delle assunzioni che vengono fatte durante l'analisi

2.3.4 Interpretazione dei risultati

L'ultimo dei quattro steps di un'analisi LCA è necessario per controllare e valutare i risultati ottenuti dalle fasi di LCI e LCIA. L'obiettivo principale è quello di identificare possibili problemi dovuti a vari fattori come assunzioni errate, variazioni di dati, etc.. La ISO 14044 prevede delle analisi di:

- Completezza
- Sensitività
- Consistenza.

La prima analisi serve per capire se dai risultati delle due fasi precedenti si possa arrivare a delle conclusioni per l'obiettivo prefissato e quindi verificare se ci siano dati mancanti.

La seconda consiste nel valutare l'accuratezza dei dati e notare quanto influiscano sul risultato finale.

La terza valuta se le assunzioni prese in considerazione durante l'analisi portino all'obiettivo finale.

L'ultima fase di un'analisi completa consiste nello scrivere conclusioni da poter mostrare al pubblico prefissato. Questa fase non è da sottovalutare in quanto il pubblico a cui ci si rivolge spesso non è esperto di sostenibilità e valutazione di impatto ambientale quindi la presentazione dei risultati deve essere chiara e facilmente comprensibile. Solo se ci si rivolge ad un gruppo di esperti le conclusioni possono essere più dettagliate e di un livello tecnico maggiore. In modo opzionale si potrebbe svolgere un riesame critico dello studio. Per fare ciò bisogna coinvolgere un esperto esterno o un comitato di esperti il quale valuti se l'analisi sia conforme agli standard UNI EN ISO.

Una positività del riesame critico potrebbe conferire più credibilità all'analisi stessa se quest'ultima dovesse essere resa pubblica. Per esempio, se un'azienda dovesse fare un'analisi di paragone di un suo prodotto con il prodotto di un concorrente, un riesame critico dello studio potrebbe essere molto utile per affermare che siano stati effettivamente rispettate tutte le normative e che il confronto tra i due prodotti possa ritenersi valido. [3] [6] [7]

2.4 Vantaggi e svantaggi di un'analisi LCA

2.4.1 Vantaggi

I vantaggi di un'analisi LCA possono essere molteplici a seconda delle esigenze di chi la effettua. Questo tipo di analisi consente ai progettisti, ai fornitori, agli agenti governativi e ai singoli di fare scelte a lungo termine tenendo conto di tutti i dati messi a disposizione. Tende a portare benefici alle industrie e ai governi.

Vantaggi per le industrie:

incorporare un'analisi LCA durante la progettazione di un prodotto o di un processo e spingere verso uno sviluppo sempre più sostenibile dei prodotti, migliorerà l'immagine e il valore del marchio sia per il mercato mondiale che per i fornitori e i produttori più piccoli.

Vantaggi per i governi:

i governi mondiali si stanno sempre più movimentando verso uno sviluppo sostenibile della società impegnandosi in iniziative e programmi di supporto alle aziende. Le analisi LCA son utili per una migliore gestione dei servizi pubblici (rifiuti e trasporti), nella definizione delle politiche di prodotto e nelle decisioni per l'istituzione di tasse e incentivi.[8]

2.4.2 Svantaggi e limitazioni

Un'analisi LCA completa e dettagliata è complessa da svolgere, richiede tempi lunghi e di conseguenza costi elevati. Nei costi bisogna includere l'acquisto delle licenze per il software, il tempo impiegato dai dipendenti, e se necessario consulenze di esperti. Infatti un'azienda deve valutare se è più conveniente un corso di training per il proprio personale o affidare l'analisi direttamente ad un'azienda esterna. In base al grado di approfondimento dell'analisi, bisogna valutare la disponibilità dei dati perchè per uno studio molto dettagliato serve una quantità enorme di dati che potrebbe portare via troppo tempo.[9]

Capitolo 3

IL SOFTWARE

Per effettuare uno studio di LCA si utilizzano software presenti in commercio che rispondano alle norme ISO descritte in precedenza. Per questo lavoro di tesi è stato utilizzato il software Simapro sviluppato dalla società Prè Sustainability con cui è possibile modellare e analizzare facilmente il ciclo di vita di un prodotto e misurarne l'impatto ambientale. Oltre che per svolgere un'analisi LCA, esso può essere utilizzato anche per diverse altre applicazioni come lo sviluppo dell'EPD, il calcolo del Carbon Footprint o dell'impronta ambientale di un prodotto (PEF) e di una organizzazione (OEF). Questo software è utilizzato in più di 80 paesi nel mondo, soprattutto da:

- Agenzie di consulenza
- Università
- Enti di certificazione
- Multinazionali e industrie
- Istituti di ricerca
- Commissione Europea

Il software facilita il lavoro a chi ne fa uso e avendo un'interfaccia abbastanza intuitiva può anche essere utilizzato da non esperti.

La struttura del database del software è composta da:

1. **Project Data:**

sono i dati che crea l'user e salva per il suo progetto come "scopo e ambito", dati di inventario, scelta del metodo delle categorie di impatto.

2. **Library Data:**

sono i dati presenti nelle librerie già esistenti, da cui si possono estrapolare dati utili per lo studio. Questi dati nella maggior parte dei casi non vanno modificati a meno che non si voglia creare una propria libreria.

3. **General Data:**

sono i dati generali riguardanti fattori di conversione, unità di misura, sostanze e materiali.

[10]

3.1 Librerie in SimaPro

Come accennato in precedenza le librerie sono fondamentali per reperire tutti i dati già studiati da enti certificati e che quindi possono essere estrapolati dal software per sviluppare al meglio l'analisi. Ci sono diversi tipi di librerie nel mondo, in generale si possono suddividere in due categorie fondamentali:

- Librerie di Processo
- Librerie di Input-Output

Le prime si basano su valori fisici, cioè viene valutato l'impatto di un materiale in base a una sua proprietà fisica come la massa, volume o energia.

Per esempio l'oggetto di studio potrebbe essere:

- $1kg$ di granito
- $1m^3$ di plastica
- $1kwh$ di energia elettrica

Il secondo tipo di libreria si basa su valori economici, quindi il valore di input può essere il costo del materiale da studiare (ex. 1€ di alluminio). Questo tipo di libreria è vantaggioso se ci sono dei dati mancanti che possono essere rimpiazzati con i dati relativi al costo; non necessita di condizioni di bordo ma solamente di condizioni geografiche. Un problema invece potrebbe essere l'inflazione e i cambiamenti dei costi causati dalle continue evoluzioni della tecnologia.

Le librerie presenti nel software sono:

- **Librerie di processo:**
 - Agri-footprint

- Ecoinvent
- ELCD
- Industry data 2.0
- USLCI

- **Librerie di Input-output:**

- EU e DK database
- Swiss database

[11]

3.1.1 Ecoinvent

La libreria utilizzata in questo lavoro di tesi è Ecoinvent che ha origine in Svizzera, essa copre all'incirca 18000 set di dati nei seguenti settori industriali:

- Energia
- Trasporti,
- Materiali da costruzione
- Prodotti chimici
- Prodotti per il lavaggio
- Agricoltura
- Trattamento dei rifiuti

Oltre ad essere utilizzata per studi di LCA, è anche utilizzata per la stesura dell'EPD, per il calcolo del Carbon Footprint o semplicemente per una progettazione più sostenibile. Presenta tre tipi di allocazioni, ognuna di esse utilizza un approccio metodologico differente a seconda delle diverse scuole di pensiero sull'LCA:

1. Allocazione Cut-Off.
2. APOS: allocazione al punto di sostituzione.
3. Conseguenziale.

La metodologia Conseguenziale è utilizzata prevalentemente nei paesi scandinavi e quindi non sarà oggetto di questo lavoro di tesi. Essa viene usata per studi con una visione a lungo termine che prevedono cambiamenti che avverranno negli anni futuri.

Il metodo di allocazione per Cut-Off invece è molto utilizzato dalle aziende. In questo caso il riciclaggio dei materiali non viene considerato nell'analisi LCA. Quindi, dopo che il materiale è utilizzato per la prima volta in assoluto dall'estrazione, il processo di riciclaggio alla fine del suo ciclo di vita non viene preso in considerazione dalla prima azienda/persona che ne fa uso. Il processo di riciclaggio sarà invece considerato nell'analisi LCA effettuata dalla seconda azienda che utilizzerà il prodotto riciclato; questa non terrà conto dell'estrazione e della lavorazione del materiale primario ma soltanto del processo di riciclaggio finale. Per esempio in un'analisi in cui è coinvolta della plastica riciclata, si andrà a considerare solo gli impatti della raccolta della plastica e del processo di riciclaggio, mentre i processi di produzione della plastica non saranno presi in considerazione.

Invece nell'ultimo tipo di modello (APOS), i benefici e gli oneri di trattamenti dei rifiuti o riciclaggio vengono divisi tra il primo ciclo e il secondo ciclo.[12]

3.2 Implementazione del ciclo di vita

L'LCA viene svolto costruendo un network in cui vi siano tutti gli steps del ciclo di vita di un prodotto; partendo dall'alto con il prodotto finale fino in basso in cui vi sono probabilmente i processi di estrazione del materiale. In SimaPro, questo tipo di struttura contiene due tipi di blocchi: i *Processes* e i *Product stages*.

I Processes sono i componenti fondamentali del diagramma in quanto sono quelli che contengono i dati utili per svolgere l'analisi come: dati ambientali sulle emissioni, dati di natura economica, documentazione varia e parametri. Mentre i Product stages sono la spina dorsale del diagramma in quanto descrivono la composizione del ciclo di vita del prodotto. Non contengono dati all'interno, infatti ogni blocco di Product stages è collegato a uno o più blocchi di Processes.

Come è possibile notare dalla Figura 3.1, i blocchi in verde corrispondono ai Processes, mentre i blocchi in rosso corrispondono ai Product stages.[3]

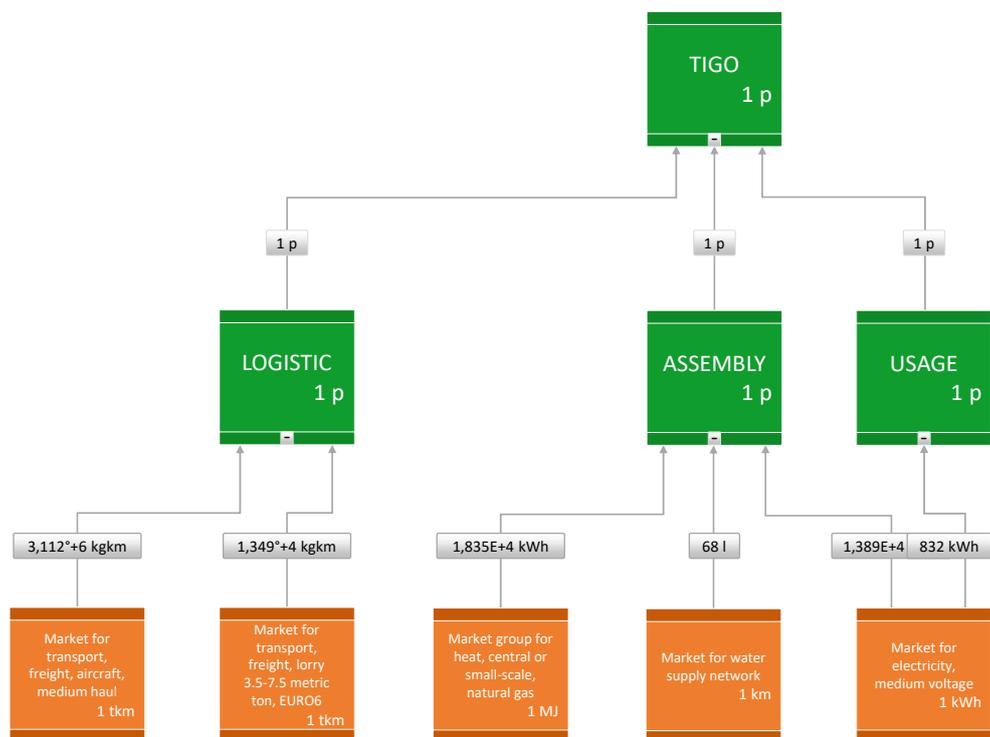


Figura 3.1: Esempio di network in SimaPro

3.3 Modelli di valutazione dell'impatto

In SimaPro ci sono diversi metodi utilizzati per la valutazione delle categorie di impatto. Solitamente un user non sceglie le categorie da coinvolgere nella sua analisi ma utilizza questi metodi. Nel proprio progetto un metodo può essere modificato, ma in questo lavoro di tesi non sarà fatto. I metodi presentati in Simapro si dividono in:

Metodi Europei

- CML-IA
- Enviromental Prices
- Ecological scarcity 2013
- EDIP 2003
- EF method
- EN 15804
- EPS 2015d

- ILCD 2011 Midpoint
- Impact 2002+

Metodi Globali

- ReCipe 2016

Metodi Nord americani

- BEES

Metodi con singolo problema

- Cumulative Energy Demand
- Cumulative Energy Demand (LHV)
- Cumulative Exergy Demand
- Ecosystem Damage Potential
- Greenhouse Gas Protocol
- IPCC 2013
- Selected LCI results
- USEtox 2

Nuovi metodi aggiornati

- CML 1992
- Eco-indicator 95
- Eco-indicator 99
- Ecological footprint
- Ecological scarcity 2006
- Ecopoints 97
- EDIP/UMIP 97
- EPD (2008)
- EPD (2013)
- EPS 2000
- IPCC 2001 GWP
- IPCC 2007
- ReCipe

I metodi principalmente utilizzati sono i seguenti:[13]

3.3.1 EPS 2000

Esso è stato il primo nel 1990 ad utilizzare un approccio Endpoint in cui vengono evidenziati i danni delle emissioni. I danni sono valutati in base al costo di riparazione, cioè al costo necessario per riparare il danno avvenuto. Le categorie di impatto che prende in considerazione sono:

- Salute umana: considera l'aspettativa di vita, malattie,...
- Capacità di produzione di ecosistemi: produzione di raccolti, legno, carne e pesce, acqua per irrigazione, acqua potabile
- Risorse abiotiche: riguarda l'esaurimento di riserve elementari, minerali e fossili
- Biodiversità: estinzione di specie
- Valori culturali: cambi nelle culture

L'unità di misura di queste categorie dopo la normalizzazione è l'ELU, l'enviromental load unit, cioè la volontà di pagare per evitare i danni.[13]

3.3.2 ECO-INDICATOR 99

Questo metodo come il precedente utilizza un approccio orientato alla visualizzazione del danno finale (damage-oriented). Le categorie che prende in considerazione sono tre:

- Danni alla Salute umana: valutando il numero di anni persi e quelli in cui si vive con disabilità (unità di misura è il DALY: Disability Adjusted Life Years)
- Danni alla qualità dell'ecosistema: espresso con la perdita di alcune specie nel tempo
- Danni alle risorse: espresso come l'energia in più necessaria per una futura estrazione di minerali e combustibili fossili

Gli step finali della normalizzazione e ponderazione sono eseguiti per le categorie di danno finali in base al danno causato da un cittadino europeo in un anno.[13]

3.3.3 CML-IA

È un metodo sviluppato dal Centro di Scienze ambientali (CML) di Leiden in Olanda. L'approccio utilizzato in questo metodo è di tipo midpoint e manca la fase di ponderazione. Le categorie presenti in questo metodo sono:

- Impoverimento delle risorse abiotiche
- Cambiamento climatico
- Impoverimento dello strato di Ozono
- Tossicità umana
- Tossicità dell'acqua
- Ecotossicità marina
- Ecotossicità terrestre
- Formazione di fotoossidante
- Acidificazione
- Eutrofizzazione

[13]

3.3.4 IMPACT 2002+

È un metodo sviluppato dall'Istituto federale svizzero della tecnologia (EPFL) nel 2005 che combina un approccio di midpoint e di endpoint, collegando 14 categorie intermedie con 4 categorie di danno.

Nell'IMPACT 2002+ le valutazioni vengono fatte principalmente a livello di midpoint e a livello di danno normalizzato. Nel primo livello, per ottenere le valutazioni bisogna utilizzare i fattori di caratterizzazione midpoint e si esprimono in kg equivalenti della sostanza di riferimento, mentre nel secondo livello sono calcolate mediante il fattore di danno normalizzato ed espresse in "points", corrispondenti a "pers.yr" e che rappresentano l'impatto medio causato, su una specifica categoria, da un individuo nell'arco di un anno in riferimento alla zona europea. Tramite un opportuno fattore, è anche possibile stimare il punteggio di danno non normalizzato, esprimendolo in DALY, PDF·m²·yr, kgeq-CO₂ o MJ. Mentre da un lato i fattori di caratterizzazione midpoint mostrano un'incertezza più bassa, se comparati con i fattori di

danno, dall'altra i punteggi di danno possono essere sommati e confrontati entro una stessa categoria (di danno), permettendo di valutare gli impatti globali. Nella struttura generale dell'IMPACT 2002+ tutti i risultati dell'analisi d'inventario sono collegati tramite 15 categorie di impatto midpoint e 4 categorie di danno quali:

- "Human health", espressa in DALY (Disability-Adjusted Life Years), ovvero in anni di invalidità;
- "Ecosystem quality", espressa in PDF·m²·yr, (Potentially Disappeared Fraction of species per m² per year) che rappresenta la frazione di specie potenzialmente scomparsa su un m² di superficie nell'arco di un anno;
- "Climate change", rappresentata in kgeq-CO₂;
- "Resources", espressa in MJ.

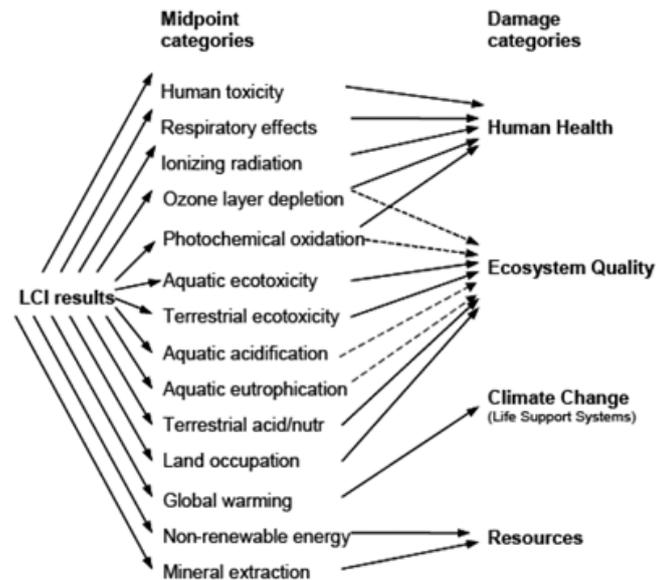


Figura 3.2: Struttura generale del metodo IMPACT 2002+, accoppiando i risultati dell'LCI alle categorie di danno tramite le categorie di impatto di Midpoint. Fonte *Jolliet et al. (2003a)*

Questo metodo è una combinazione di quattro metodi: IMPACT 2002 (Pennington et al. 2005), Eco-indicator 99 (Goedkoop e Spriensma. 2000, 2nd version, Egalitarian factors), CML (Guinée et al. 2002) e IPCC. La metodologia prevede le fasi di caratterizzazione, normalizzazione e ponderazione

come indicato dalla norma UNI EN ISO 14040.

Per la fase di caratterizzazione, i flussi elementari delle sostanze emesse vengono moltiplicati per il fattore di caratterizzazione di midpoint, ottenendo il “midpoint score”:

$$Midpointscore(S_M) = \sum (emissions_i * CF_i^m)$$

in cui:

$emissions_i$ = quantità di sostanza i emessa;

CF_i^m = fattore di caratterizzazione di midpoint relativo alla sostanza i .

Successivamente si calcola il “Damage score” (SD), moltiplicando il “midpoint score” (SM) con il fattore di danno della sostanza di riferimento relativo alla categoria di midpoint considerata (DF_{refsub}^{dm}).

$$Damagescore(S_D) = S_M DF_{refsub}^{dm}$$

Lo step successivo è la fase di normalizzazione che si ottiene dividendo il *Damage score* per il fattore di normalizzazione relativo alle categorie di danno considerate (NF^d).

$$NormalizedDamagescore(S_{ND}) = S_D / NF^d$$

La Figura 3.3 seguente riassume la struttura base di questo procedimento: in cui:

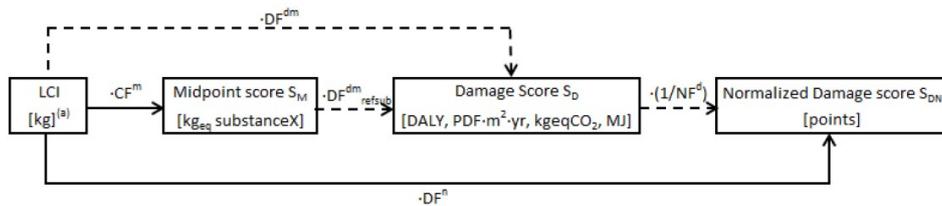


Figura 3.3: Procedimento di calcolo del Normalized Damage score

- LCI = flussi generali espressi in kg
- CF_m = fattore di caratterizzazione midpoint
- DF^{dm} = fattore di danno per le categorie midpoint considerate

- DF_{refsub}^{dm} = fattore di danno della sostanza di riferimento considerata per la categoria midpoint considerata
- DF^n = fattore di danno normalizzato
- NF^d = fattore di normalizzazione per le categorie di danno considerate

Infine, per quanto riguarda la fase di ponderazione si utilizzano fattori moltiplicativi personali. In SimaPro, in questo caso, i fattori di default sono pari a 1. [14]

Damage category (unit)	Impact category	Unit	Damage factor
Human Health (DALY)	Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	0.00105
	Non-carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.00000280
	Ionizing radiation	Bq C-14 eq	2.1e-10
	Carcinogens	kg C2H3Cl eq	0.00000280
	Respiratory inorganics	kg PM2.5 eq	0.000700
	Respiratory organics	kg C2H4 eq	0.00000213
Resources (MJ primary)	Mineral extraction	MJ surplus	1
	Non-renewable energy	MJ primary	1
Ecosystem Quality ($PDF \cdot m^2 \cdot yr$)	Aquatic ecotoxicity	kg TEG water	0.0000502
	Terrestrial ecotoxicity	kg TEG soil	0.00791
	Terrestrial acid/nutri	kg SO2 eq	1.04
	Land occupation	$m^2 org * arable$	1.09
Climate Change ($kgCO_{2eq}$)	Global warming	kg CO2 eq	1.00

Tabella 3.1: Damage category e impact category del metodo IMPACT 2002+ con i rispettivi fattori di danno estrapolati dal software SimaPro

Damage category	Fattori di normalizzazione
Human Health	7.092×10^{-3}
Resources	1.520×10^5
Ecosystem Quality	1.370×10^4
Climate Change	9.900×10^3

Tabella 3.2: Fattori di normalizzazione per le categorie di danno

3.3.5 RECIPE

Questo metodo unisce il *"problem oriented approach"* del metodo CML-IA con il *"damage oriented approach"* dell'Eco-indicator 99. Il primo definisce le categorie di impatto di tipo midpoint che hanno un'incertezza dei risultati relativamente bassa, mentre il secondo definisce le categorie di danno finali che in questo caso risultano essere tre. Moltiplicando i fattori di caratterizzazione intermedi per i fattori di danno, si ottengono i fattori di caratterizzazione finali da utilizzare nello step della caratterizzazione.

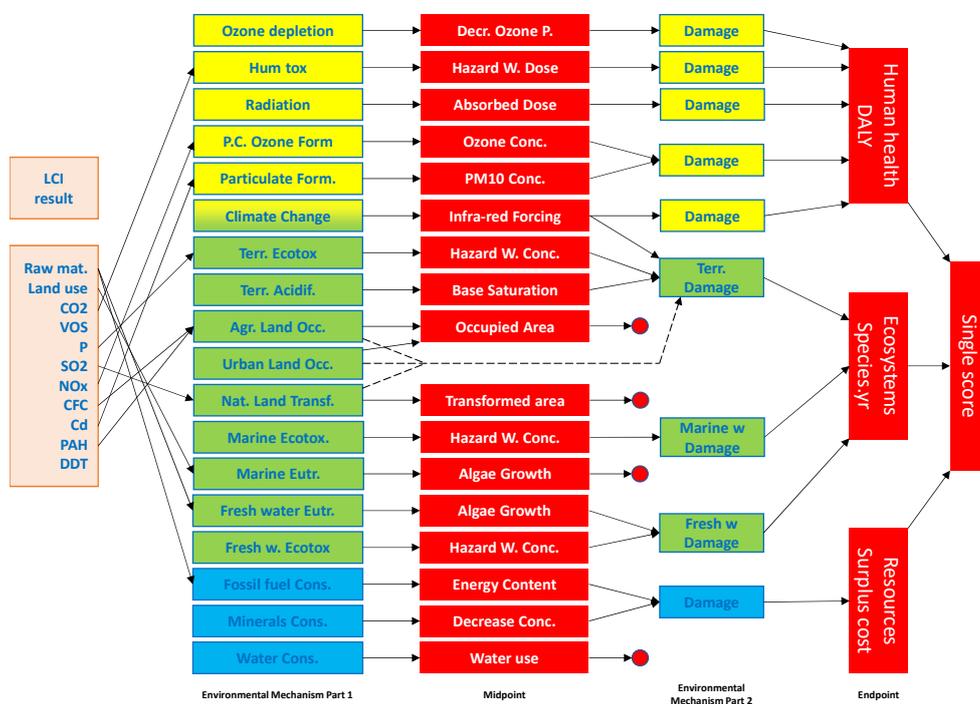


Figura 3.4: Struttura metodo Recipe

La maggior parte dei metodi basati sui modelli di danno sono fonte di incertezza, come ReCipe e Eco-indicator 99. L'incertezza può essere generata dai dati o dalla scelta del modello stesso. A questo si potrebbe rimediare con modelli di distribuzione, ma spesso non è la migliore scelta da fare. Si preferisce quindi raggruppare le differenti fonti di incertezza in tre tipi di scenari diversi secondo la "Cultural Theory" di Thompson 1990. Questi scenari sono utilizzati per raggruppare simili assunzioni e scelte e sono i seguenti:

- **Prospettiva Individualista:**

è una prospettiva a breve termine, richiede prove certe e si fonda sul concetto che la tecnologia possa evitare numerosi problemi.

- **Prospettiva Gerarchica:**

è una prospettiva a medio termine e si basa sul concetto che una buona politica possa evitare i problemi.

- **Prospettiva Egualitaria:**

è una prospettiva a lungo termine, e si basa sul concetto che qualsiasi problema possa degenerare in catastrofe e quindi si preferisce tenere in considerazione qualsiasi, anche minimo, effetto.

Capitolo 4

ANALISI LCA DI DUE MACCHINE CMM

4.1 Definizione obiettivi

Per questo lavoro di tesi è stata effettuata un'analisi "cradle to gate" di due macchine di misura a coordinate (CMM) prodotte all'interno dell'azienda. È stato esaminato il ciclo di vita delle due macchine dalla produzione (estrazione materie prime, lavorazioni meccaniche) fino all'assemblaggio; in aggiunta è stata effettuata un'analisi sulle emissioni dovute ad un utilizzo medio nel corso di 10 anni. Non è stata analizzata la fase di riciclaggio o distruzione delle macchine alla fine del loro ciclo di vita in quanto impossibile reperire dati utili, le macchine qui prodotte sono abbastanza durature e dopo la vendita, la Hexagon non riceve più aggiornamenti. L'obiettivo dell'analisi è la valutazione dell'impatto ambientale delle due macchine, confrontandole, così da poter fornire, in fase di progetto, all'azienda dati utili per comprendere come ridurre le emissioni inquinanti generate dalla produzione.

Le macchine in questione sono: GLOBAL 07.07.05 e TIGO.

Entrambe sono macchine di misura a coordinate (CMM) di piccole dimensioni, utilizzate per le misurazioni di pezzi di media grandezza.

GLOBAL:

La Global 07.07.05 è una macchina di misura a portale facente parte della famiglia di macchine Global. Le Global sono macchine altamente precise, progettate per aumentare la produttività del cliente, esse esistono in diverse dimensioni e differenti configurazioni a seconda delle esigenze del cliente. Possono essere vendute in tre differenti configurazioni: Green, Blue e Chrome. La Global che si andrà ad analizzare è una tra le più piccole. La differenza

tra le diverse configurazioni consiste nell'aggiunta di particolari che rendono la macchina più precisa e le conferiscono la possibilità di lavorare in ambienti con temperature differenti. La Global, studiata in questo lavoro di tesi, è il modello Green di dimensioni 07.07.05. [15]

TIGO:

La Tigo è una macchina di misura a coordinate per officina, interamente protetta e versatile che unisce una struttura robusta, tecnologia innovativa e flessibilità di configurazione per garantire una misura super precisa anche negli ambienti più ostili. Il suo volume di misura di 500 x 580 x 500 mm (X/Y/Z) la rende la soluzione di misura ideale per un'ampia varietà di componenti di piccole e medie dimensioni di tutti i settori industriali. La solida e robusta TIGO SF non richiede alimentazione pneumatica, al contrario della Global, e può così operare nelle ostili condizioni ambientali dell'officina. La struttura della macchina è protetta da ripari e soffiotti per impedire l'ingresso di agenti inquinanti nelle parti in movimento. TIGO SF è il sistema di misura ottimale per le aree di produzione: nella configurazione standard, il controllo e il PC sono alloggiati all'interno del supporto macchina, mentre monitor e tastiera sono collocati su di un braccio orientabile per offrire massima ergonomia e minimo ingombro. Questa configurazione stand-alone compatta può essere spostata agevolmente in caso di mutate esigenze produttive.[16]

4.2 Raccolta dati: Life cycle inventory

Il lavoro di raccolta dati si è svolto all'interno di uno stage aziendale iniziato a settembre 2020 e conclusosi a Marzo 2021. Fortunatamente, nonostante l'emergenza Covid si è riuscito a svolgere lo stage in presenza in azienda interfacciandosi spesso con la produzione e cercando di comprendere al meglio le macchine. La raccolta dei dati utili per l'analisi non è stata facile in quanto le due macchine sono molto complesse e composte da un notevole numero di componenti. Sono stati contattati tutti i fornitori dei componenti principali delle due macchine per richiedere dati relativi alle lavorazioni dei pezzi. La Hexagon affida la produzione e la lavorazione dei componenti delle macchine a fornitori esterni con sedi in Piemonte stesso, Germania o Cina. Purtroppo non si è riusciti sempre ad ottenere tutti i dati voluti da ogni fornitore, quindi alcune volte è stato anche necessario effettuare delle ipotesi per sopperire alla mancanza di questi dati. In produzione a Grugliasco gli

operatori si occupano della parte relativa all'assemblaggio della macchina, testing, collaudo e ovviamente progettazione.

Per l'analisi si è deciso di tener conto di cinque aspetti fondamentali:

- **Materiali:**

Dalla distinta della macchina estrapolata dal PLM aziendale sono stati individuati tutti i materiali di cui la macchina è composta, suddividendo i componenti per i loro materiali e calcolando la massa totale di ogni materiale come somma della massa di ogni componente.

- **Processi e lavorazioni:**

Sono stati contattati tutti i fornitori dei componenti di maggior peso per chiedere informazioni relative ai processi meccanici di lavorazione in modo tale da poterli inserire nel software per il calcolo delle emissioni.

- **Logistica:**

è stata calcolata la distanza di ogni fornitore dalla sede Hexagon di Grugliasco e moltiplicata quest'ultima per la massa dei componenti trasportati. L'unità di misura utilizzata per il calcolo delle emissioni dei veicoli per il trasporto merci è il *kgkm*.

- **Assemblaggio:**

Da analisi interne all'azienda è stato calcolato il consumo totale di energia elettrica e gas utilizzati nel corso di un anno. E' stata poi utilizzata un'allocatione di questi dati relativa alla massa delle macchine prodotte in un anno per il calcolo del consumo di ogni singola macchina.

- **Utilizzo:**

Si è supposto un utilizzo medio della macchina per la durata di 10 anni.

Per quanto riguarda la raccolta di dati secondari è stato utilizzato il Database Ecoinvent 3.6 Cut Off, incorporato nel software SimaPro utilizzato per l'analisi finale.

4.3 GLOBAL: raccolta dati e sviluppo in SimaPro

4.3.1 Materiali e Lavorazioni

La macchina si può suddividere in tre parti principali:



Figura 4.1: Global 07.07.05

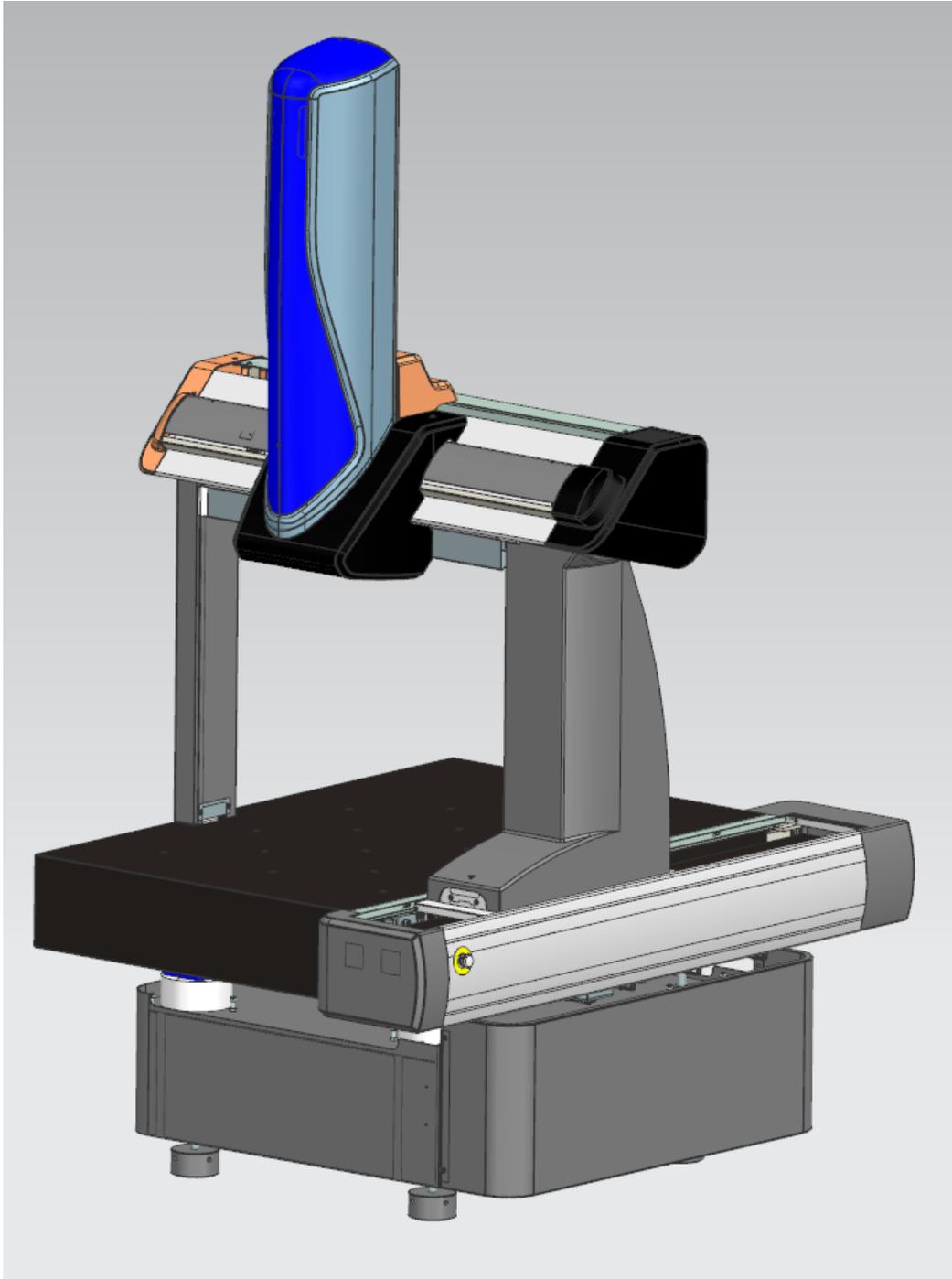


Figura 4.2: Modello 3D della Global 07.07.05

1. **Banco di supporto:** composto prevalentemente di acciaio per supportare il peso dell'intera macchina.
2. **Basamento:** composto interamente di granito, esso è il componente di gran lunga più pesante all'interno della macchina. Utilizzato per la sua stabilità dimensionale e di forma nel tempo.
3. **Portale:** composto da Spalle Sx e Dx, Trave, Carro, asse Z e ripari. I materiali utilizzati nel portale sono alluminio e ABS per i ripari.

Di seguito una tabella riassuntiva con tutti i materiali utilizzati. Si è deciso di escludere dall'analisi tutti i materiali con un valore di massa complessivo inferiore a 1kg in quanto ininfluenti per i risultati finali dell'analisi.

Acciaio	Massa [kg]
Fe 430B-Fu UNI EN 10025	1,75
C40 UNI EN 10083/1	1,1
Fe 360B-Fu UNI EN 10025	11,4
Fe P01 UNI EN 10130	95,7
X8CrNi 1910 UNI 6901	1,7
TOT	112

Alluminio	Massa [kg]
G-AlSi 7 MgMn UNI 3599	40,1
P-AlSi1MgMn UNI 9006/4	5
EN AW-6060 (Al MnSi)	4,6
Al 99.5 UNI 9001/2	13,8
AlMgSi0,5	27,5
TOT	91

Altri materiali	Massa [kg]
Granito Nero	2053
ABS	4,3

Come premessa vorrei dire che dato l'elevato numero di componenti della macchina, sarebbe stato impossibile studiare le lavorazioni di tutti i singoli componenti, quindi si sono presi come riferimento i componenti con una massa maggiore per ogni singolo materiale. Sono stati contattati i fornitori di suddetti componenti per chiedere informazioni riguardanti le lavorazioni

effettuate. Purtroppo a causa dell'emergenza Covid è stato impossibile recarsi direttamente nelle aziende per studiare in modo più approfondito tutti i processi. I componenti di maggiore impatto sono risultati:

- **Basamento in granito**



Figura 4.3: Basamento in granito della Global

Il blocco di granito utilizzato nelle macchine a portale come la Global è nettamente più grande rispetto a quello utilizzato per la Tigo come vedremo in seguito. Questo è dovuto alla forma della macchina che ha bisogno di una guida lineare per far scorrere la gamba destra lungo l'asse Y. Ciò comporta un notevole aumento della massa di Granito, nonostante questa parte in più non venga utilizzata come spazio di appoggio per i pezzi da misurare. Il granito è un materiale molto utilizzato in sala metrologica, infatti la sua superficie permette di ottenere notevoli precisioni e soprattutto consente un ottimo scorrimento dei pattini ad aria presenti in questo caso nelle macchine Global.

I motivi per cui viene utilizzato il Granito Nero come basamento per la macchina sono:

- STABILITA' DIMENSIONALE: il granito è un materiale invecchiato naturalmente per milioni di anni ed è quindi esente da qualsiasi tensione interna.
- STABILITA' TERMICA: il coefficiente di dilatazione lineare del granito è notevolmente inferiore a quello di acciaio e ghisa.
- DUREZZA: la durezza del granito è paragonabile a quella di un buon acciaio temprato.
- RESISTENZA ALL'USURA: la durezza permette infatti una maggior durata degli strumenti.
- PRECISIONE DI LAVORAZIONE: il granito permette di ottenere superfici con planarità superiore a quelle di qualsiasi altro materiale tradizionale.
- INATTACCABILITA' DAGLI ACIDI, AMAGNETICITA', ISOLAMENTO ELETTRICO, RESISTENZA ALL'OSSIDAZIONE: il granito è inossidabile e non necessita di particolare manutenzione. [17]

Il processo di produzione del blocco di granito nero utilizzato sulla macchina CMM è il seguente:

1. Estrazione blocchi di granito da cava naturale
2. Fresatura:
il granito può essere fresato con appositi utensili diamantati pur con alcuni limiti rispetto alla fresatura su metallo. In questo caso viene creata una cava a “coda di rondine”, realizzata direttamente nel granito.
3. Lucidatura:
eseguita utilizzando una lucidatrice e un mezzo di molatura molto fine.

In SimaPro è stato scelto il processo *Natural stone plate production, cut* per descrivere l'estrazione e il taglio dei blocchi di granito. Si presume che la perforazione per il processo minerario venga eseguita con aria compressa, prodotta con elettricità e che la segatura venga eseguita con fili diamantati. Le perdite di diamanti non vengono prese in considerazione anche se potrebbero essere significative in quanto non sono disponibili dati sulla produzione di diamanti.

Per ottenere un prodotto finale di 2053 kg di granito servono $2053kg + 60,2kg + 0,27kg = 2113,5kg$ di materia prima in quanto vengono rimossi 120,8 kg dopo le lavorazioni di fresatura e lucidatura.

Gli inputs per 2113,5 kg di granito sono:

Product name	Amount	Unit
electricity, medium voltage	1149.6	kWh
diesel, burned in building machine	2196.7	MJ
limestone quarry infrastructure	0.001	p

La lavorazione di fresatura è determinata dal processo denominato *Natural stone plate production, grounded* che ha i seguenti inputs per 60,2kg (è stato calcolato il volume della cava a coda di rondine, sommato ad una fresatura di 0,5 mm su ogni superficie e infine moltiplicato per la densità del granito pari a $2950 \frac{kg}{m^3}$) di materiale esportato:

Product name	Amount	Unit
electricity, medium voltage	14.8	kWh
natural stone plate, cut	66.5	kg
diesel, burned in building machine	22	MJ
industrial machine, heavy, unspecified	0.01	kg

E infine per quanto riguarda la lucidatura si utilizza il processo *natural stone plate production, polished* con i seguenti inputs per 0,27 kg di granito asportato durante la lavorazione, calcolando 0,05 mm di materiale asportato per tutta superficie:

Product name	Amount	Unit
electricity, medium voltage	0.1	kWh
natural stone plate, grounded	4.14	kg
diesel, burned in building machine	0.15	MJ

- **Ripari in ABS**

L'ABS è un polimero termoplastico opaco comunemente utilizzato nella produzione di termoformatura e stampaggio a iniezione. Viene prodotto sciogliendo il polibutadiene in monomeri liquidi di acrilonitrile e stirene. I monomeri si combinano quindi chimicamente per produrre



Figura 4.4: Cover in ABS

una molecola collegata. Il butadiene in ABS consente una robusta difesa dagli impatti, l'acrilonitrile conferisce resistenza al calore e lo stirene aggiunge rigidità. In questo caso l'ABS è stato utilizzato per produrre i ripari di alcune parti della macchina per i suoi numerosi vantaggi:

- Basso costo
- Facile da produrre
- Facile da modellare e verniciare
- Durezza e rigidezza
- Elasticità e Flessibilità
- Resistenza agli urti

Le Cover in ABS possono essere prodotte in due modi diversi: Termoformatura e stampaggio.

Lo stampaggio a iniezione di ABS comporta la fusione della plastica allo stato liquido, quindi l'utilizzo di un iniettore ad alta pressione per forzare la plastica in uno stampo a doppia faccia. A causa dell'alto costo degli utensili e dei tempi di consegna più lunghi, questo metodo di

produzione viene utilizzato per materie plastiche altamente dettagliate in cui la termoformatura non è un'opzione, come i piccoli componenti automobilistici. Tuttavia, una volta che lo strumento è stato progettato e in uso, può essere utilizzato tutte le volte che è necessario, quindi è ideale per ordini ripetuti e grandi quantità. Per le macchine CMM prodotte in azienda viene utilizzata la termoformatura, in quanto più economica. Quest'ultima è meno precisa dello stampaggio ma si è preferito ridurre i costi in questo caso poiché non è richiesta un'alta precisione per i ripari. La termoformatura dell'ABS prevede il riscaldamento di fogli di plastica fino a renderli malleabili, quindi il montaggio su uno strumento progettato su misura per ottenere la forma desiderata. Questo è un metodo più veloce ed economico per la produzione di materie plastiche grazie al minor costo degli utensili e alla progettazione più rapida.

Si possono effettuare due tipi di lavorazioni di termoformatura:

a) Sotto vuoto:

La termoformatura sottovuoto viene utilizzata per prodotti di plastica di grandi dimensioni, come vasche da bagno e vasche da bagno di automobili perché è un metodo di termoformatura rapido ed economico che viene utilizzato al meglio quando i prodotti non richiedono bordi taglienti o dettagli complessi. Dopo aver riscaldato la plastica e averla montata attorno allo strumento, viene utilizzato un aspirapolvere ad alta potenza per rimuovere l'aria tra lo strumento e la plastica, attirandola strettamente contro lo stampo per ottenere la forma precisa.

b) Pressione:

Per i prodotti che richiedono spigoli vivi, bordi e dettagli, si utilizza la termoformatura a pressione. Essa è l'opposto della termoformatura sotto vuoto; non rimuove l'aria tra lo strumento e la plastica, ma utilizza aria altamente pressurizzata per premere saldamente la plastica contro lo strumento. Questo tipo di termoformatura ABS utilizza il triplo della pressione della formatura sottovuoto, creando forme precise e complesse a un costo inferiore rispetto allo stampaggio a iniezione.

[18]

Per le cover delle macchine studiate viene preferita una termoformatura a pressione per i motivi evidenziati in precedenza.

Per implementare la produzione di ABS in SimaPro, sono stati selezionati due processi relativi alla produzione di ABS e alla termoformatura.

Il primo scelto è stato *Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer production*: i dati di questo processo derivano dall' Eco-profilo dell' Industria di plastica europea (PlasticsEurope). Non sono inclusi nel calcolo i dati relativi a: rifiuti riciclabili, quantità di aria N_2/O_2 consumata, emissione di metalli non specificati nell'aria e nell'acqua, emissione di mercaptani nell'aria, emissione nell'aria di *CFC/HCFC* non specificati, diossina nell'acqua; si presume che la quantità di "zolfo (legato)" sia inclusa nella quantità di olio grezzo.

Per produrre 1 kg di prodotto finito servono 1,06 kg di materia prima, quindi in questo caso per produrre 4,3 kg di ripari bisogna produrre 4,55 kg di ABS e gli inputs per la produzione sono:

Product name	Amount	Unit
coal slurry	-0.010	kg
waste wood, untreated	-0.001	kg
waste plastic, mixture	-0.010	kg
spoil from hard coal mining	-0.330	kg
municipal solid waste	-0.100	kg
hazardous waste, for incineration	-1.000	kg
hazardous waste, for incineration	-0.030	kg
average incineration residue	-0.090	kg
decommissioned chemical production facilities	-0.001	kg

Il secondo processo scelto nel database Ecoinvent 3.6 Cut off relativo alla termoformatura dell'ABS è *Thermoforming of plastic sheets*, nei dettagli questo processo include le seguenti attività:

- Consumo di acqua ed energia elettrica.
- Utilizzo di detersivi e solventi.
- Infrastrutture di produzione
- Emissioni nell'aria.
- Trattamento dell'acqua utilizzata
- Fine vita dei rifiuti di produzione inceneriti e riciclati esternamente.

- **Banchetto di supporto in acciaio**

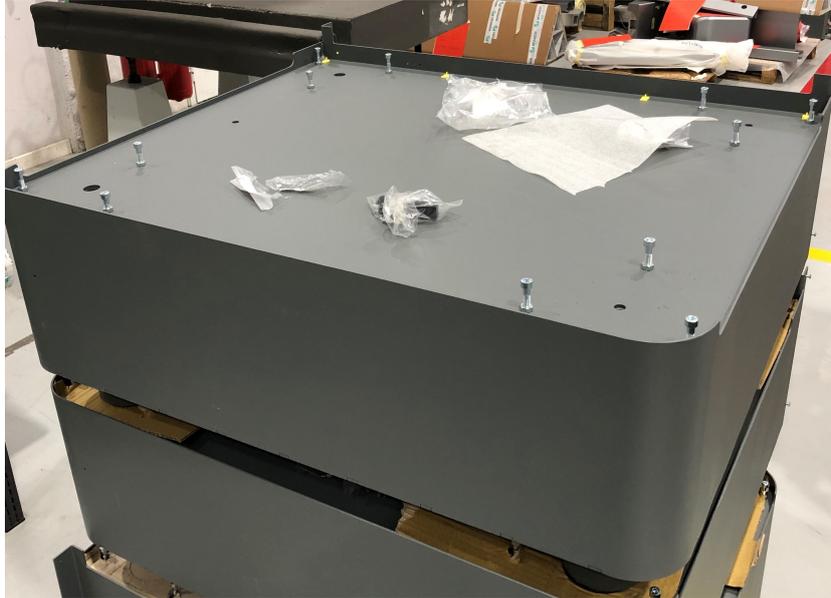


Figura 4.5: Banchetto di supporto della Global A

La maggior parte dell'acciaio utilizzato per la macchina è dovuto al banco di supporto che ha il compito di sorreggere tutti i componenti della macchina. L'acciaio utilizzato per produrlo è il "Fe P01 UNI EN 10130" che corrisponde ad una lamiera laminata a freddo per imbutitura a freddo.

Viene utilizzato l'acciaio in quanto più economico e in grado di reggere il peso della macchina sovrastante.

Il banchetto di supporto ha una massa di 85kg mentre l'acciaio totale utilizzato nella macchina è 112kg. La produzione di acciaio è affidata al processo *steel production, converter, unalloyed* che per 112 kg ha i seguenti inputs:

Product name	Amount	Unit
pig iron	100.8	<i>kg</i>
iron scrap, sorted, pressed	23.7	<i>kg</i>
oxygen, liquid	8.0	<i>kg</i>
quicklime, in pieces, loose	4.8	<i>kg</i>
iron ore concentrate	2.5	<i>kg</i>
electricity, medium voltage	2.45	<i>kWh</i>
ferronickel	0.7	<i>kg</i>
dolomite	0.31	<i>kg</i>
natural gas, high pressure	0.11	<i>m³</i>
coke	0.03	<i>MJ</i>
blast oxygen furnace converter	0.01	<i>p</i>
electric arc furnace dust	-0.12	<i>kg</i>
inert waste, for final disposal	-0.32	<i>kg</i>
basic oxygen furnace waste	-3.6	<i>kg</i>

Invece il processo utilizzato per la produzione di lamiere in acciaio è *sheet rolling, steel* i cui inputs per 85 kg sono:

Product name	Amount	Unit
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	0.03	kg
heat, district or industrial, other than natural gas	90.9	MJ
sodium dichromate	0.01	kg
water, deionised	11.5	kg
steel, low-alloyed	0.02	kg
lubricating oil	0.4	kg
sulfuric acid	0.36	kg
steel, unalloyed	7.3	kg
sludge from steel rolling	-1.71	kg
electricity, medium voltage	19	kWh
steel in car shredder residue	-0.67	kg

Successivamente le lamiere vengono saldate per ottenere la forma del banco di supporto della macchina; in questo caso si utilizza il processo *Welding, arc, steel* i cui inputs per 1m di saldatura sono:

Product name	Amount	Unit
steel, low-alloyed, hot rolled state	0.054	kg
electricity, medium voltage gas	0.03	kWh
oxygen, liquid	0.000915	kg
carbon dioxide, liquid	0.0042	kg
argon, liquid	0.024	kg

- **Trave in alluminio**

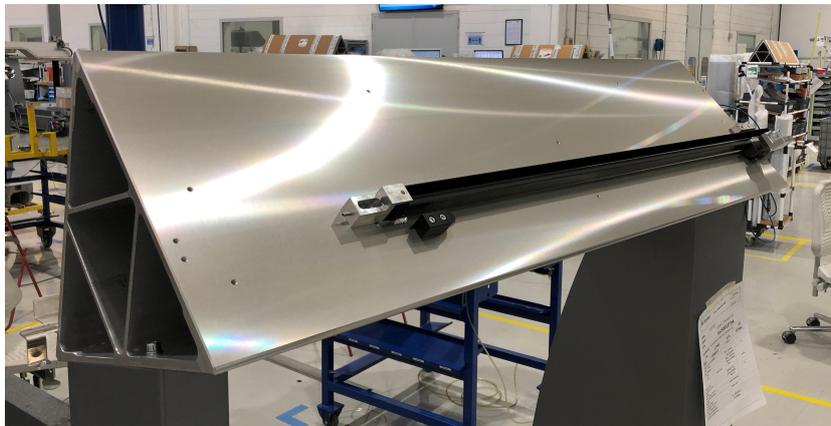


Figura 4.6: Trave asse x della Global A

La trave funge da guida per il carro lungo l'asse X della macchina, essa è prodotta da una società che si occupa di fornire alla Hexagon la maggior parte dei componenti meccanici composti in acciaio e alluminio presenti sulle macchine. La trave è composta da AlMgSi0,5 EN AW-6060, una lega di alluminio con buona resistenza alla corrosione, ottima saldabilità e buona formabilità a freddo. Viene utilizzato l'alluminio per i componenti del portale perchè essendo molto leggero, aumenta la velocità della macchina ma riduce leggermente la precisione. Un'alternativa a quest'ultimo potrebbe essere il granito per la trave e l'asse Z; esso è utilizzato in molte altre macchine di misura CMM, ma il suo utilizzo rende la macchina decisamente più pesante e, essendo più difficile da lavorare, sarebbe difficile creare forme complesse. L'azienda, ormai da anni ha adottato l'alluminio come materiale principale con una compensazione termica per cercare di raggiungere i livelli di precisione del granito.

In questo caso, la trave viene prodotta in un centro di lavoro, quindi all'interno dell'azienda, il componente non viene praticamente mai spostato. L'alluminio utilizzato è vergine, infatti è richiesto espressamente

dal gruppo di progettazione di Hexagon un alluminio non riciclato.
I processi principali che subisce sono:

1. Estrusione dell'alluminio in azienda esterna e trasporto in Precision.
2. Lavorazioni meccaniche in centro di lavoro:
Microfresatura, Lamatura, Foratura e Filettatura.
3. Anodizzazione:
per migliorare la resistenza a corrosione del materiale, aumentare la durezza superficiale, aumentare la resistenza all'usura e abrasione, diminuire il limite di fatica e fornire un moderato isolamento termico.

La trave ha una massa di 22kg e per ottenere tale risultato servono $22kg + 5,1kg + 1,10kg = 28,2kg$ di alluminio, in quanto vanno considerate le perdite di materiale dovute alle lavorazioni di fresatura e foratura calcolate in seguito. Per la produzione di alluminio in Sima-Pro viene utilizzato il processo *aluminium production, primary, ingot* che rappresenta la produzione di 1 kg di lingotto di alluminio primario. L'alluminio fuso prodotto dal processo elettrolitico viene prelevato dalle celle di riduzione, pesato, campionato e analizzato prima di essere versato in un forno di mantenimento e riscaldato a circa 750 ° C utilizzando gas naturale come combustibile. All'alluminio vengono aggiunti elementi di lega, come magnesio e silicio, per una maggiore resistenza, resistenza alla corrosione e altre proprietà. Durante il caricamento e la preparazione del forno, sulla superficie dell'alluminio fuso si formano scorie di alluminio (una fase liquida o solida). Questa miscela di ossidi di alluminio viene rifiuta per recuperare l'alluminio che altrimenti andrebbe perso.

Gli inputs per 28.2 kg sono:

Product name	Amount	Unit
aluminium, primary, liquid	28.2	kg
heat, district or industrial, natural gas	42	MJ
electricity, medium voltage, aluminium industry	2.7	kWh
heat, district or industrial, other than natural gas	2.5	MJ
silicon, metallurgical grade	0.3	kg
corrugated board box	0.05	kg
argon, liquid	0.04	kg
refractory, fireclay, packed	0.02	kg
nitrogen, liquid	0.02	kg
cryolite	0.01	kg
filter dust from Al electrolysis	-0.01	kg
inert waste, for final disposal	-0.10	kg
dross from Al electrolysis	-0.50	kg

Per l'estrusione dell'alluminio è stato scelto il processo di lavorazione *Section bar extrusion, aluminium* i cui inputs per 22 kg di lavorazione sono i seguenti:

Product name	Amount	Unit
scrap aluminium	-0.001	kg
heat, district or industrial, other than natural gas	0.58	MJ
soda ash, light, crystalline, heptahydrate	0.62	kg
waste mineral oil	-0.04	kg
filter dust from Al electrolysis	-0.45	kg
packaging film, low density polyethylene	0.05	kg
sheet rolling, steel	0.02	kg
heat, district or industrial, natural gas	59.4	MJ
corrugated board box	0.07	kg
hazardous waste, for underground deposit	-0.04	kg
municipal solid waste	-0.50	kg
scrap aluminium	-0.02	kg
waste mineral oil	-0.001	kg
sawnwood, softwood, raw, dried	0.002	m ³
steel, unalloyed	0.20	kg
electricity, medium voltage	25.08	kwh
aluminium, wrought alloy	0.30	kg

Per il processo di frestaure della trave è stato assunto che venga rimosso 0,23 kg di metallo per ogni kg del peso finale, quindi in questo caso $22kg * 0,23 = 5,1kg$. Il processo utilizzato in SimaPro è *Aluminium milling, small parts* e gli inputs utilizzati nel database sono:

Product name	Amount	Unit
waste mineral oil	-0.02	kg
aluminium, cast alloy	1.6	MJ
lubricating oil	0.02	kg
compressed air, 700 kPa gauge	1.28	kg
metal working machine, unspecified	0.0021	kg
electricity, low voltage	8.45	kwh
energy and auxilliary inputs, metal working factory	22.05	MJ
aluminium, wrought alloy	3.4	kg

Il processo di foratura sviluppato in SimaPro è *aluminium drilling, computer numerical controlled*; in questo caso si assume che venga rimosso 0.01 kg di materiale per kg di massa totale ($22kg * 0,05 = 1,10kg$). Gli inputs per questo processo sono:

Product name	Amount	Unit
waste mineral oil	-3.733E-3	kg
aluminium, cast alloy	0.32	kg
lubricating oil	0.00382	kg
metal working factory	2.02E-9	p
compressed air, 700 kPa gauge	1.28	m^3
metal working machine, unspecified	3.95E-5	kg
electricity, low voltage	0.229	kwh
energy and auxilliary inputs, metal working factory	4.41	kg
aluminium, wrought alloy	0.68	kg

E infine l'ultima lavorazione applicata sulla trave consiste nell'anodizzazione che in SimaPro viene identificata dal processo *Anodising, aluminium sheet* in cui viene considerata un'anodizzazione incolore con spessore del rivestimento di 20 um.

Per $0,9m^2$ di superficie, gli input sono:

Product name	Amount	Unit
water, decarbonised	261.429	kg
scrap aluminium	-6.722E-4	kg
heat, district or industrial, other than natural gas	7.84	MJ
waste wood, untreated	-0.04	kg
chemical, organic	0.026	kg
waste bitumen sheet	-0.0275	kg
wood chips, dry, measured as dry mass	0.0299	kg
ethoxylated alcohol (AE3)	0.003	kg
chemical factory, organics	4E-10	p
lubricating oil	0.0275	kg
polyethylene, low density, granulate	0.001	kg
sulfuric acid	0.146	kg
hazardous waste, for incineration	-1.218E-3	kg
sulfuric acid	0.146	kg
electricity, medium voltage	4.84	kWh
aluminium, wrought alloy	0.00187	kg

- **Spalla destra**

La spalla destra è un altro componente del portale, anch'esso in alluminio. Esso è il componente di alluminio di maggior peso con i suoi 28 kg, contro i 22 kg della trave. In questo caso l'alluminio utilizzato è il G-AlSi 7 MgMn UNI 3599 che ha le seguenti caratteristiche:

- Discreta resistenza meccanica a caldo.
- Sufficiente resistenza alla corrosione.
- Media lavorabilità all'utensile.
- Buona colabilità.
- Media lucidabilità.
- Piccola fragilità di ritiro.
- Buona tenuta a pressione.

Come la trave, è prodotto in un centro di lavorazione e viene scelto l'alluminio come materiale per la sua leggerezza. Ma la contrario della trave che è estrusa, la spalla è prodotta per fusione da un'azienda esterna di fonderia che a sua volta consegna il pezzo alla stessa azienda che fornisce la trave. La fase di produzione è costituita dai seguenti processi:



Figura 4.7: Spalla destra Global A

1. Costruzione pezzo tramite colata.
2. Lavorazioni meccaniche in centro di lavorazione.
3. Verniciatura.

Per quanto riguarda le lavorazioni meccaniche, esse sono le stesse della trave quindi non verranno ripetuti gli input. La differenza sostanziale tra i due componenti sono la fusione iniziale al posto dell'estrusione e la verniciatura al posto dell'anodizzazione.

Quindi in SimaPro viene utilizzato il processo *aluminium production, primary, cast alloy slab from continuous casting*. Questo set di dati rappresenta la produzione di leghe di alluminio pressofuso mediante colata continua orizzontale refrigerata diretta da alluminio liquido primario. L'alluminio liquido viene pretrattato in un forno a riverbero dove vengono aggiunti rottami di alluminio preriscaldati, additivi per leghe a base di alluminio e metalli puri per ottenere la composizione della lega desiderata. L'alluminio di scarto viene utilizzato come input

di alluminio fino al 5%. La lega di alluminio fuso viene degasata con argon e colata mediante colata continua orizzontale refrigerata diretta. Il prodotto finale viene tagliato alla lunghezza desiderata. La durata della colata varia da 2 tonnellate all'ora a 6 tonnellate all'ora a seconda del prodotto finale desiderato. Le acque reflue da refrigerazione vengono trattate in loco mediante filtrazione diffusa dell'aria e vengono principalmente riciclate a circuito chiuso. Le operazioni coperte da questo set di dati includono: pretrattamento del metallo caldo, recupero e movimentazione degli scarti di processo interno, dosaggio, leghe, trattamento dei metalli, operazioni di colata, attività di segatura e raffreddamento, manutenzione e riparazione di impianti e attrezzature, trattamento dell'aria di processo, liquidi e solidi.

Dalla lavorazione di Fresatura vengono rimossi $28kg * 0,23 = 6,44kg$ di materiale.

Dalla lavorazione di Foratura vengono rimossi $28kg * 0,05 = 1,4kg$ di materiale.

Quindi per ottenere 28 kg di prodotto finito servono $28kg + 6,44kg + 1,4kg = 35,8kg$ di materia prima.

I principali inputs per 35,8 kg di materiale sono:

Product name	Amount	Unit
heat, district or industrial, natural gas	116.1	MJ
aluminium, primary, liquid	34.2	kg
tap water	30.3	kg
electricity, medium voltage	11	kwh
aluminium scrap, new	1.8	kg
diesel, burned in diesel-electric generating set, 10MW	0.72	MJ
manganese	0.3	kg
iron pellet	0.05	kg
blast furnace slag	-0.54	kg
wastewater, average	0.1	m^3

Per quanto riguarda i restati 41 kg di alluminio dovuti ad una serie di componenti di massa trascurabile se confrontati ai componenti precedentemente studiati è stato utilizzato il processo *aluminium production, primary, ingot* per descrivere la produzione di alluminio.

4.3.2 Logistica

Per quanto riguarda la logistica, non si è tenuto conto degli spostamenti all'interno delle aziende in quanto trascurabili rispetto al trasporto dei componenti finiti dalle aziende fornitrici alla Hexagon a Grugliasco. Sono stati calcolati i kgkm trasportati da ciascuna azienda, in pratica è stata calcolata la massa totale dei componenti trasportati da una singola azienda e moltiplicata per la distanza tra quest'ultima e la sede di Grugliasco. La maggior parte dei fornitori si trovano in un raggio di 100 km, in questo caso come mezzo di trasporto utilizzato per il calcolo delle emissioni è stato considerato un furgone benzina EURO 6 come confermato dai rappresentanti delle suddette aziende. Invece per quanto riguarda le sedi cinesi, è stato considerato la nave come mezzo di trasporto.

Di seguito l'elenco di tutti i fornitori con i rispettivi dati di trasporto.

Azienda fornitrice	Mezzo di trasporto	Distanza [km]	Massa [kg]	kgkm
Fornitore 1	Truck	6	1	6
Fornitore 2	Truck	30	85	2550
Fornitore 3	Truck	60	3	180
Fornitore 4	Truck	30	4	120
Fornitore 5	Truck	70	12	840
Fornitore 6	Truck	25	13	325
Fornitore 7	Truck	12	1.3	15.6
Fornitore 8	Truck	20	55	1100
Fornitore 9	Ship	14000	12	168000
Fornitore 10	Ship	14000	2053	28742000
Fornitore 11	Ship	14000	4	56000

Quindi in totale si calcolano: 5136.6kgkm di Furgone e 28966000kgkm di Nave.

In SimaPro è stato scelto come processo *Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6* che rappresenta il servizio di trasporto merci in un camion della classe di dimensioni 3,5-7,5 tonnellate di peso lordo (PTT) e della classe di emissioni Euro VI. I dataset di trasporto si riferiscono all'intero ciclo di vita del trasporto, ovvero alla costruzione, esercizio, manutenzione e fine vita dei veicoli e delle infrastrutture stradali. Il consumo di carburante e le emissioni si riferiscono ai viaggi europei medi e ai fattori di carico e

non sono rappresentativi di uno scenario di trasporto specifico. I fattori di carico medi sono presi dal modello Tremove v2.7b (2009) e dal rapporto EcoTransIT (2011). Il consumo di carburante e le emissioni di scarico sono presi dalla v3.1 del modello HBEFA, utilizzando i dati per la Germania e senza applicare la ponderazione del modello. Esiste un numero maggiore di categorie di dimensioni utilizzate in HBEFA rispetto a ecoinvent, quindi i dati sono raggruppati in modo da adattarsi alle classi di dimensioni dei camion utilizzate in ecoinvent. La tecnologia di riduzione catalitica selettiva (SCR) è circa 3 volte più comune di quella del recupero dei gas di scarico (EGR) come misura di riduzione delle emissioni e quindi i fattori di emissione indicati nel set di dati sono ponderati per riflettere questo. Le emissioni di scarico causate dalla combustione del carburante dipendono dal carburante (tipo e quantità di carburante) o dalla classe Euro. Questi ultimi riflettono le normative sulle emissioni a cui il veicolo è conforme. Le emissioni regolamentate sono CO, NO_x, particolato (PM) e idrocarburi totali (HC). I dati della Guida per l'inventario delle emissioni (EMEP / EEA, 2013) sono stati utilizzati per le emissioni di scarico specifiche non coperte dal modello HBEFA. Le emissioni non di scarico sono contabilizzate come sottoprodotti dipendenti dal peso ed esistono come set di dati separati.

Per quanto riguarda il trasporto navale è stato utilizzato il processo denominato *transport, freight, sea, container ship*. Il set di dati rappresenta l'intero ciclo di vita del trasporto, inclusa la produzione e la manutenzione della nave, il trasporto e la costruzione del porto. Il consumo di carburante e le emissioni principali (CO₂, NO_x, SO_x, PM, NMVOC, CO, CH₄, N₂O) sono calcolati come medie ponderate rispetto alle classi di dimensione dall'IMO (2015). Sono considerate le emissioni in mare, le emissioni in aree controllate (ECA) e le emissioni nei porti dal motore principale, motore ausiliario e caldaia. La quota della durata del viaggio e del tempo di approdo all'interno delle aree controllate dalle emissioni (ECA) (dove viene utilizzata alta qualità di carburante) è stimata rispettivamente al 5% e al 50%.

4.3.3 Assemblaggio

Tutti i componenti finiti della macchina vengono prodotti da aziende esterne e inviati nella sede di Hexagon a Grugliasco, dove ci si occupa dell'assemblaggio, del collaudo e dei test finali prima della vendita. Poiché non è stato possibile calcolare l'effettivo consumo di energia per ogni singola macchina, si è tenuto conto dell'energia consumata nell'anno 2019 dall'intero impianto di Grugliasco (vedere Tabella 4.1) ed è stata suddivisa per ogni macchina utilizzando come metodo di allocazione la massa delle macchine.

Energia impianto 2019		
Energia elettrica	1354071	kWh
Consumo Gas	1788869,5	kWh
	13450	smc

Tabella 4.1: Energia consumata dall'impianto di Hexagon Grugliasco nell'anno 2019

Macchine	numero macchine prodotte (2019)	Massa [kg]
PIONEER	17	850
MICRA	1	600
TIGO	192	800
GLOBAL AA	45	600
GLOBAL A	77	900
GLOBAL B	113	1200
GLOBAL C	128	2000
GLOBAL D	91	6000
GLOBAL E	16	7000
GLOBAL F	31	8000
REFERENCE	12	6000
ALPHA	15	8000
DELTA	17	8000
LAMBDA	1	15000
VITTEK	4	7000
BRAVO	10	6000
TOT	770	1993550

Tabella 4.2: Macchine prodotte dall'impianto Hexagon di Grugliasco nell'anno 2019

Quindi allocando l'energia totale dell'impianto in base alla massa della Global A si ottengono i dati relativi all'energia consumata per produrre la singola macchina:

$$Energia_{elettrica} = 1354071 kWh \cdot \left(\frac{900kg}{1993550kg} \right) = 611,3 kWh$$

$$Consumo_{Gas} = 1788869,5 kWh \cdot \left(\frac{900kg}{1993550kg} \right) = 807,6 kWh$$

Per il calcolo dell'impatto dell'energia elettrica è stato utilizzato il dataset dal nome *Market for electricity, medium voltage* che descrive l'elettricità disponibile a livello di media tensione in Italia per l'anno 2016.

Il consumo di gas viene registrato il SimaPro tramite il processo *market group for heat, district or industrial, natural gas*.

4.3.4 Utilizzo

Per valutare la differenza di impatto ambientale delle due macchine, si è deciso di ipotizzare un utilizzo medio delle due macchine per la durata di 10 anni.

In termini di consumo le due macchine sono abbastanza differenti, infatti la Global, al contrario della TIGO, utilizza un sistema pneumatico ad aria compressa. Di conseguenza in questo caso si andrà a calcolare sia il consumo di energia elettrica, sia il consumo di aria dovuto al sistema di pattini di scorrimento e al cilindro di bilanciamento dell'asse Z.

I dati relativi al consumo della Global sono i seguenti:

Customer supply	Voltage [V]	100/120/230/240	
	Frequency [Hz]	50-60	
	Max Power [kW]	0,9	
<hr/>			
Consumption (average) (Machine+controller)	Consumption [kwh]	0,35	
	Max consumption [NL/min]	Average consumption [NL/min]	
Air bearing	64	64	
Counterbalance cylinder leakage	6	6	
Counter balance cylinder	37	18,5	
Average consumption		88,5	
Average consumption on Data sheet		90 (0,35 kwh)	

Da dati sperimentali raccolti negli anni precedenti dal reparto di progettazione della Hexagon si è evinto che una macchina viene utilizzata in media 220 giorni l'anno per 22,5 h al giorno. Quindi calcolando il consumo si ottiene:

$$\text{Ore totali di utilizzo per 10 anni} = 220gg * 22,5h * 10anni = 49500h$$

$$\text{Consumo totale all'ora} = 0,35kwh + 0,35kwh = 0,7kwh$$

$$\text{Consumo TOT macchina} = 49500h * 0,7kwh = 34650kwh$$

Anche in questo caso è stato scelto il processo *Market for electricity, medium voltage* per il calcolo dell'impatto dell'elettricità consumata dalla macchina durante il suo utilizzo.

4.4 TIGO: raccolta dati e sviluppo in SimaPro



Figura 4.8: Tigo

4.4.1 Materiali e Lavorazioni

La seconda macchina che è stata selezionata per la valutazione è leggermente differente dalla Global, infatti anche in questo caso è presente un banco di supporto composto di acciaio, un basamento in granito per l'appoggio dei pezzi da misurare, ma invece del portale in alluminio vi è una struttura composta in acciaio denominata a sbalzo. Nella Tigo il materiale predominante è l'acciaio, mentre l'alluminio è utilizzato soltanto per piccoli componenti. La ragione di ciò è il costo della macchina nettamente inferiore alla Global, questa è una macchina pensata per quei clienti che non hanno bisogno di elevate prestazioni e precisioni e di conseguenza non vorrebbero spendere grandi cifre per una macchina di misura.

I materiali utilizzati nella macchina sono i seguenti:

Acciaio	Massa [kg]
Fe 430B UNI EN 10025	8,3
C40 UNI EN 10083/1	0,52
Fe 360B-Fu UNI EN 10025	179
Fe P01 UNI EN 10130	125
TOT	312

Alluminio	Massa [kg]
PA1Si1MgMn UNI 9006/4	3,7
Al99.5 UNI 9001/2	6,6
G AlSi7MgMn UNI3599	0,6
P-ALMg0.5Si 6060 HR	0,4
TOT	11,3

Altri materiali	Massa [kg]
Granito	373
Poliuretano	9,3
ABS	5,2
GS 400-18 UNI-ISO 1083 (ghisa)	3,5

In questa macchina i componenti di cui sono state studiate le lavorazioni sono:

- **Basamento in granito**

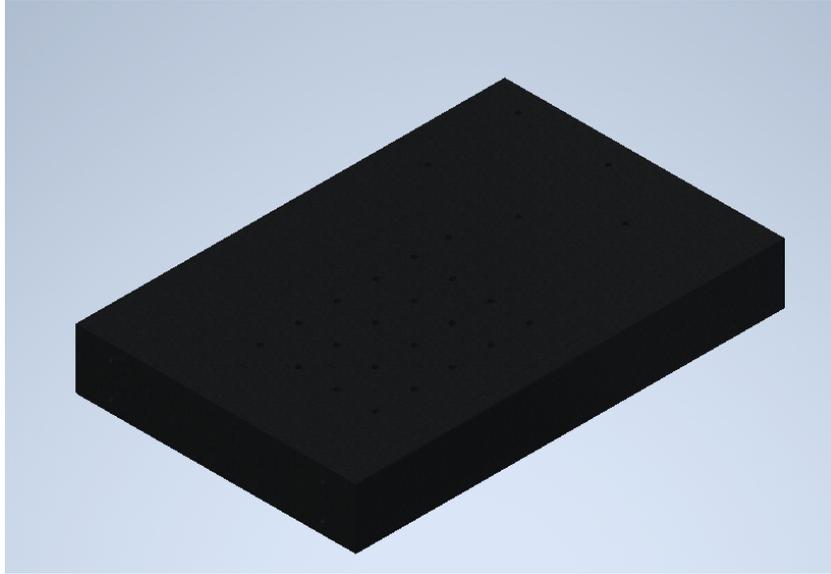


Figura 4.9: Basamento in granito della Tigo

Il basamento in granito è identico per proprietà e per ragioni di utilizzo a quello della Global. Anche le lavorazioni effettuate su quest'ultimo sono le stesse. La differenza sostanziale sta nella dimensione che è più piccola di quella della Global, infatti come si può notare dall'immagine manca la guida laterale per lo scorrimento della spalla destra. Non essendoci il portale ma una struttura a sbalzo, è possibile ridurre la massa del granito notevolmente.

Per ottenere il basamento finito di $373kg$ sono necessari $373kg + 3,3kg + 0,33kg = 376,6kg$ di materia prima, in quanto bisogna tener conto del materiale rimosso dalle lavorazioni di fresatura e lucidatura. Gli inputs del processo *Natural stone plate production, cut* per descrivere l'estrazione e il taglio dei blocchi di $376,6$ kg granito in questo caso sono:

Product name	Amount	Unit
electricity, medium voltage	208.9	kWh
diesel, burned in building machine	399.1	MJ
limestone quarry infrastructure	0.001	p

La lavorazione di fresatura è determinata dal processo denominato *Natural stone plate production, grounded*; in questo caso manca la cava a coda di rondine, di conseguenza anche la quantità di materiale fresato

è inferiore al granito della Global.

Per calcolare la quantità di materiale rimosso dal blocco iniziale di granito, è stato assunto che vengano rimossi 0,5 mm di materiale per tutta la superficie del prodotto finito per un totale di 3,3 kg.

Gli inputs per 3,3 kg di granito rimosso dalla lavorazione di fresatura sono:

Product name	Amount	Unit
electricity, medium voltage	0.98	kWh
natural stone plate, cut	4.43	kg
diesel, burned in building machine	1.47	MJ
industrial machine, heavy, unspecified	0.01	kg

E infine per quanto riguarda la lucidatura si utilizza il processo *natural stone plate production, polished* calcolando 0,05 mm di materiale rimosso per tutta la superficie del basamento per un totale di 0,33 kg.

Gli inputs per 0,33 kg di materiale asportato:

Product name	Amount	Unit
electricity, medium voltage	0.1	kWh
natural stone plate, grounded	0.41	kg
diesel, burned in building machine	0.14	MJ

- **Protezioni in poliuretano**

Le protezioni in Poliuretano servono per evitare incidenti soprattutto a chi opera sulla macchina. Vi sono tre protezioni in poliuretano: uno frontale, uno a sinistra e uno a destra che in totale pesano 9 kg. Il poliuretano è un materiale plastico molto versatile. Esistono varie tipologie di poliuretano: espanso flessibile o rigido, compatto rigido o elastico. Inoltre, è disponibile in densità differenti, che consentono una vasta gamma di soluzioni per ogni esigenza. La densità è il principale parametro di caratterizzazione del poliuretano perché ne determina le proprietà meccaniche. Bassa densità (da 33 a 60 kg/m³). I blocchi e le lastre di questa categoria sono generalmente utilizzati con finalità di isolamento termico, grazie alla bassissima conducibilità termica e all'alto potere isolante. Alta densità (da 80 a 490 kg/m³). L'aumento della densità comporta l'aumento della resistenza meccanica; per questo motivo, la caratteristica principale del poliuretano ad alta densità è la facile lavorabilità con risultati di elevata precisione.

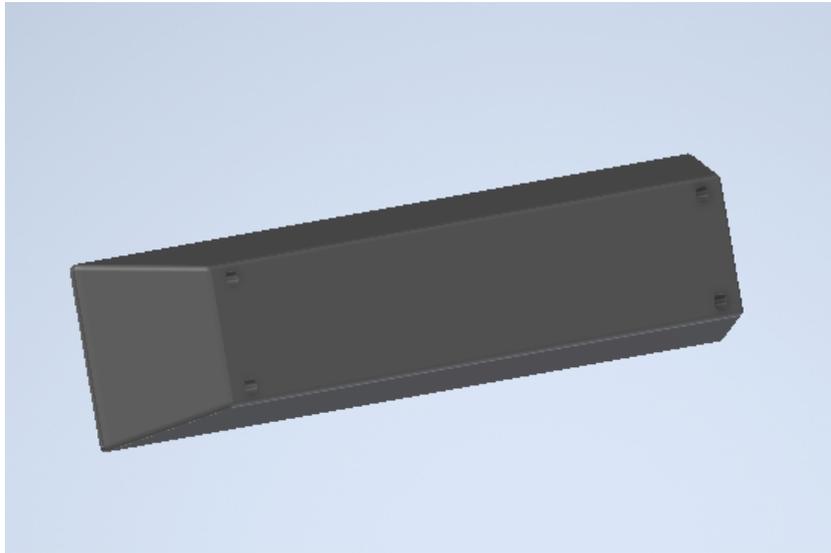


Figura 4.10: Protezioni in poliuretano

Le caratteristiche e i vantaggi principali sono:

- Lunga durata
- Resistenza agli agenti atmosferici ed impermeabilità
- Leggerezza
- Sostenibilità ambientale
- Sicurezza sanitaria: non contiene o rilascia componenti pericolosi ed è completamente privo di sostanze nocive per l'ozono
- Versatile: permette di realizzare forme semplici e complesse
- Verniciabile, permette un'infinità di finiture superficiali
- Integrabile con gli altri materiali
- Riciclabile

[19]

In SimaPro come processo per il calcolo dell'impatto ambientale della produzione del poliuretano, è stato scelto *Polyurethane production, rigid foam* che ha i seguenti inputs per 9kg di materiale:

Product name	Amount	Unit
methylene diphenyl diisocyanate	5.5	kg
polyol	3.5	kg
chemical factory, organics	0.002	p
pentane	0.5	kg
electricity, medium voltage	3.75	kWh
waste polyurethane	-0.18	kg

- **RIPARI IN ABS**

Anche in questa macchina, tutti i ripari sono prodotti in ABS termoformato. In questo caso la massa totale di ABS è leggermente superiore di quella utilizzata nella Global di circa $1kg$ per un totale di $5,2kg$.

Per produrre $5,2 kg$ di Ripari servono $5,2kg \cdot 1.06 = 5,5kg$ di ABS, i cui inputs per il processo *Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer production* sono:

Product name	Amount	Unit
coal slurry	-0.0120	kg
waste wood, untreated	-0.00120	kg
waste plastic, mixture	-0.0120	kg
spoil from hard coal mining	-0.400	kg
municipal solid waste	-0.120	kg
hazardous waste, for incineration	-1.21	kg
hazardous waste, for incineration	-0.0400	kg
average incineration residue	-0.110	kg
decommissioned chemical production facilities	-0.00120	kg

Successivamente, come nella Global, si utilizza il processo *Thermoforming of plastic sheets* per la lavorazione di termoformatura.

- **Carro in ghisa**

Il componente che scorre lungo l'asse x e che permette lo spostamento lungo quell'asse della Ram (asse verticale) è il carro. Quest'ultimo è prodotto con il materiale GS 400-18 UNI-ISO 1083 che corrisponde ad una ghisa a grafite sferoidale. La ghisa sferoidale GS 400 ha una struttura ferritica ottenuta con un trattamento termico. E' usata quando viene richiesta una buona lavorabilità e una buona lucidità dei particolari finiti. Questa lega ha una buona lavorabilità e una buona elasticità. Resistenza meccanica e duttilità sono fra le caratteristiche più

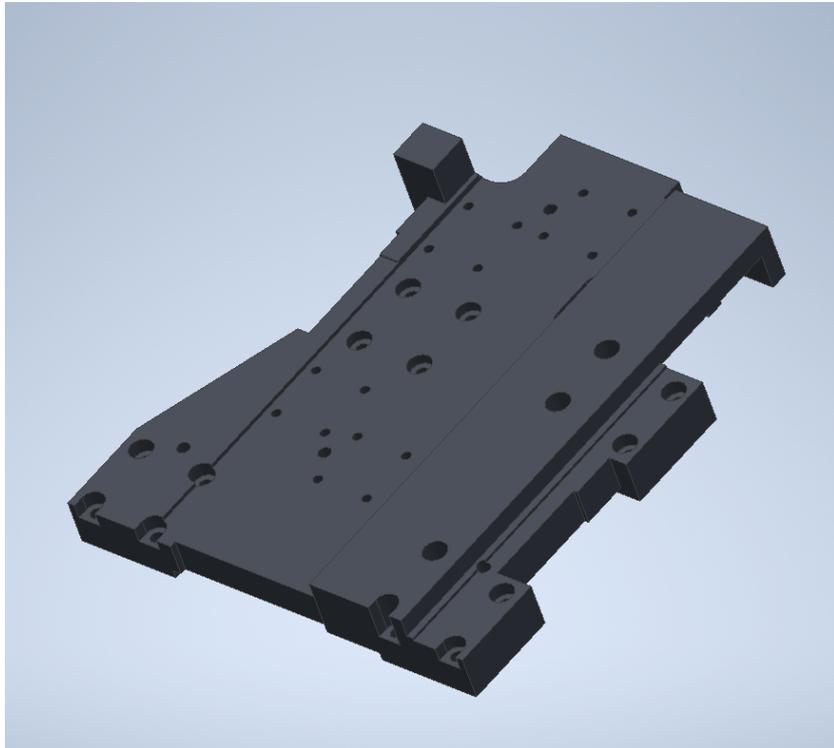


Figura 4.11: Carro per la movimentazione dell'asse x della Tigo

importanti della ghisa sferoidale. Grazie ai noduli di grafite a forma di sferoidi, la ghisa sferoidale, oltre a vantare caratteristiche meccaniche superiori alle ghise grigie, risulta essere anche più performante e più duttile. A differenza delle lamelle di grafite della ghisa grigia, infatti, gli sferoidi della ghisa sferoidale si oppongono alla propagazione delle cricche, consentendo di ottenere componenti più resistenti e performanti nel tempo. In SimaPro, la produzione di ghisa è affidata al processo *Cast iron production* che considera il trasporto del metallo in un forno elettrico ad arco, il processo di fusione, la raffinazione e la colata. Per produrre un carro di 3,5 kg sono necessari $3,5kg + 0,18kg = 3,7kg$ di materiale grezzo in quanto bisogna considerare i 0,35 kg di materiale rimosso a causa dell'estrusione. Gli inputs per 3,85 kg di produzione di ghisa sono:

Product name	Amount	Unit
hard coal	0.05	kg
quicklime, in pieces, loose	0.19	kg
inert waste, for final disposal	-0.02	kg
anode, for metal electrolysis	0.01	kg
electric arc furnace slag	-0.32	kg
oxygen, liquid	0.18	kg
iron scrap, sorted, pressed	1.35	kg
refractory, basic, packed	0.05	kg
natural gas, high pressure	0.09	m^3
pig iron	2.51	kg
electric arc furnace converter	0.001	p
electric arc furnace dust	-0.03	kg
electricity, medium voltage	1.48	kwh

Successivamente viene effettuata sul pezzo la lavorazione meccanica di foratura per poi consegnarlo alla Hexagnon a Grugliasco. In SimaPro è stato scelto il processo *cast iron drilling, computer numerical controlled*, calcolando la quantità di materiale rimosso pari a $0.05 * 3.5kg = 0.18kg$

Product name	Amount	Unit
waste mineral oil	-3.733E-3	kg
lubricating oil	0.00382	kg
metal working factory	2.02E-9	p
compressed air, 700 kPa gauge	1.28	m ³
metal working machine	0.000174	kg
electricity, low voltage	0.706	kwh
energy and auxilliary inputs, metal working factory	4.41	kg
cast iron	1	kg

- **Banchetto di supporto**

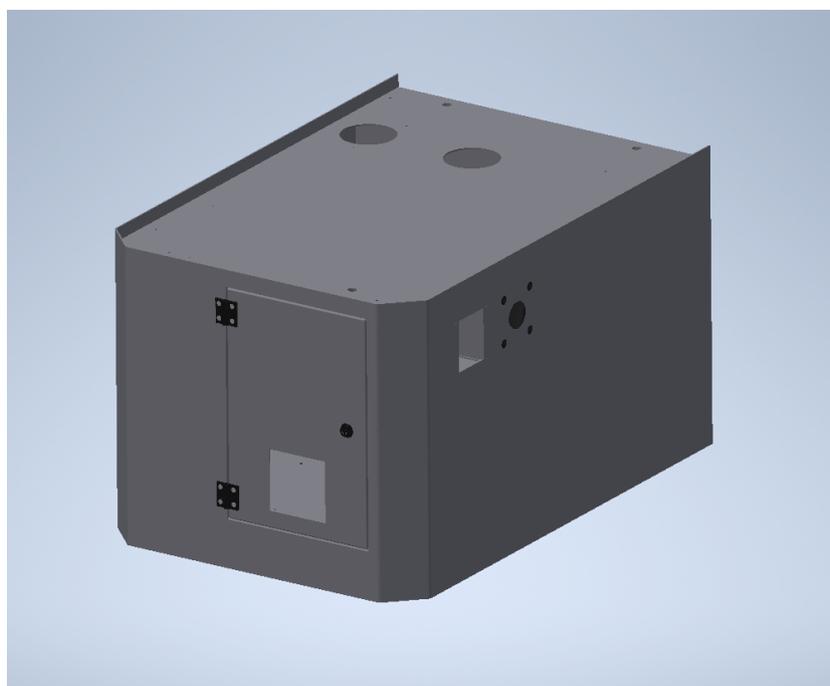


Figura 4.12: Banchetto di supporto Tigo

Anche in questa macchina, buona parte dell'acciaio utilizzato è dovuto al banchetto inferiore. In realtà nella Tigo non è il componente di acciaio più pesante infatti la base a forma di "T" che si vedrà dopo pesa circa 40 kg in più di questo componente che ha una massa di 105 kg. Tutti i componenti riguardanti la controllistica (la parte hardware di elettronica) sono inseriti all'interno di questo banchetto. Quindi in questa macchina il suo compito non è solo quello di sorreggere il granito e la struttura a sbalzo, ma anche quello di contenere altri componenti

secondari. L'acciaio utilizzato per produrlo è sempre il "Fe P01 UNI EN 10130" corrispondente ad una lamiera laminata a freddo per imbutitura a freddo.

Per la produzione dell'acciaio, come fatto per la Global, si utilizza il processo *steel production, converter, unalloyed* che è lo stesso sia per il Banchetto di supporto sia per la Trave e la Base a "T" che verranno studiate in seguito. Per questo motivo vengono calcolati gli inputs necessari per produrre tutto l'acciaio presente nella macchina che ammonta a 312 kg:

Product name	Amount	Unit
pig iron	282.2	kg
iron scrap, sorted, pressed	66.4	kg
oxygen, liquid	22.4	kg
quicklime, in pieces, loose	13.4	kg
iron ore concentrate	7.0	kg
electricity, medium voltage	6.8	kWh
ferronickel	2.0	kg
dolomite	0.90	kg
natural gas, high pressure	0.31	m ³
coke	0.08	MJ
blast oxygen furnace converter	0.03	p
electric arc furnace dust	-0.34	kg
inert waste, for final disposal	-0.9	kg
basic oxygen furnace waste	-10.1	kg

In SimaPro, il processo utilizzato per la descrizione della produzione di lamiere in acciaio è *sheet rolling, steel* i cui inputs per 105 kg sono:

Product name	Amount	Unit
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	0.04	kg
heat, district or industrial, other than natural gas	112.7	MJ
sodium dichromate	0.01	kg
water, deionised	14.3	kg
steel, low-alloyed	0.02	kg
lubricating oil	0.5	kg
sulfuric acid	0.45	kg
steel, unalloyed	9	kg
sludge from steel rolling	-2.1	kg
electricity, medium voltage	23.6	kwh
steel in car shredder residue	-0.8	kg

Anche in questo caso poi le lamiere vengono saldate per ottenere la forma del banchetto; in questo caso si utilizza il processo *Welding, arc, steel* per 1m di saldatura.

- **Trave e base "T"**

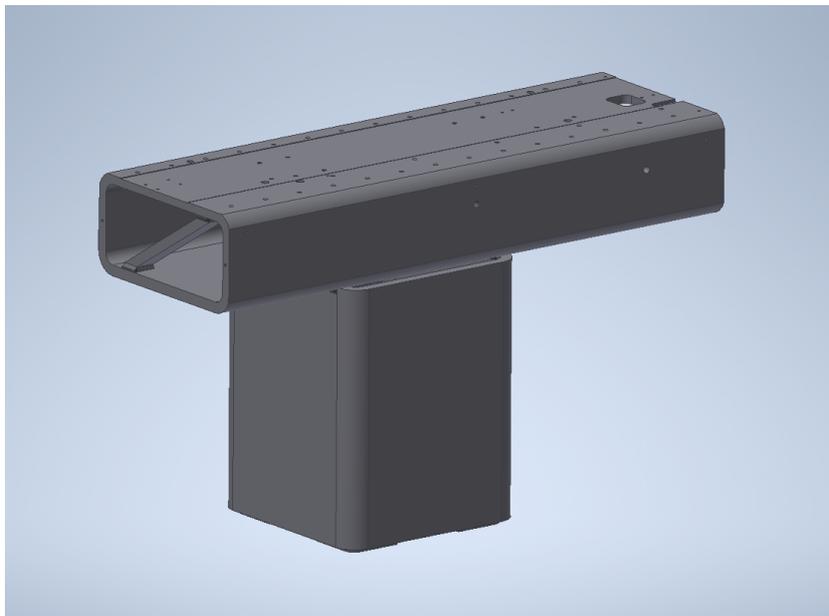


Figura 4.13: Trave asse y

La trave e la base a "T" sono gli ultimi due componenti di rilievo presenti nella Tigo. Entrambi sono prodotti in acciaio, più precisamente in Fe360BFu UNI-EN10025 e quindi laminati a caldo per ottenere una

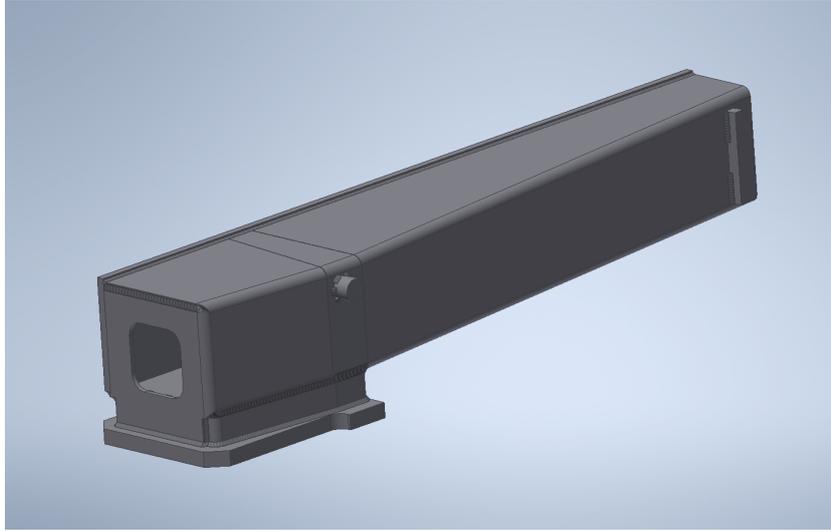


Figura 4.14: Base a forma di "T"

maggiore tenacità, resistenza agli urti e resistenza alla trazione. La trave ha una massa di 38 kg mentre la base ha una massa di 140 kg.

Le lavorazioni principali che subiscono i due componenti sono:

- Laminatura a caldo.
- Saldatura
- Foratura

In SimaPro, il processo che descrive la laminatura a caldo è *Hot rolling, steel* e per ottenere 178 kg di prodotto finale servono $178kg + 8,9kg = 186,9kg$ di materiale, i cui inputs nel processo sono:

Product name	Amount	Unit
waste mineral oil state	-0.04	kg
heat, district or industrial, natural gas gas	263.4	MJ
lubricating oil	0.72	kg
oxygen, liquid	1.27	kg
steel, unalloyed	8.90	kg
sludge from steel rolling	-2.90	kg
electric arc furnace dust	-0.23	kg
electricity, medium voltage	24.92	kwh

Successivamente vengono effettuate le lavorazioni di saldatura e foratura che in SimaPro sono descritte dai processi di *Welding, arc, steel*

per circa 1m e *Steel removed by drilling, computer numerical controlled*
per $0.05 * 178kg = 8.9kg$

4.4.2 Logistica

Anche in questo caso non si è tenuto conto degli spostamenti all'interno delle aziende in quanto trascurabili e i calcoli sono stati effettuati con lo stesso criterio della Global.

Di seguito l'elenco di tutti i fornitori con i rispettivi dati di trasporto:

Azienda fornitrice	Mezzo di trasporto	Distanza [km]	Massa [kg]	kgkm
Fornitore 1	Truck	6	0.44	2.64
Fornitore 2	Truck	30	0.17	5.1
Fornitore 3	Truck	160	0.8	128
Fornitore 4	Truck	60	120.6	7236
Fornitore 5	Truck	30	5.5	165
Fornitore 6	Truck	12	2	24
Fornitore 7	Truck	20	180	3600
Fornitore 8	Truck	10	0.04	0.41
Fornitore 9	Truck	15	3	45
Fornitore 10	Truck	180	9.25	1665
Fornitore 11	Truck	25	0.75	18.75
Fornitore 12	Truck	150	4	600
Fornitore 13	Ship	14000	373	5222000
Fornitore 14	Ship	14000	16	224000

Quindi in totale si calcolano: $13490kgkm$ di Furgone e $5446000kgkm$ di Nave.

In SimaPro sono stati utilizzati gli stessi processi della Global.

4.4.3 Assemblaggio

I dati relativi al consumo dell'energia spesa dall'intero impianto di Grugliasco nell'anno 2019 sono stati riportati in precedenza nell'elaborazione dati della Global. In questo caso si andrà solamente a svolgere il calcolo per trovare il consumo di energie dovuto alla produzione della Tigo che ha una massa di 800 kg.

$$\text{Energia elettrica} = 1354071kwh \cdot \left(\frac{800kg}{1993550kg} \right) = 543.4kWh$$

$$\text{Consumo Gas} = 1788869,5kwh \cdot \left(\frac{800kg}{1993550kg} \right) = 717.9kwh$$

Per il calcolo dell'impatto dell'energia elettrica è stato utilizzato il dataset dal nome *Market for electricity, medium voltage* che descrive l'elettricità disponibile a livello di media tensione in Italia per l'anno 2016.

Il consumo di gas viene registrato il SimaPro tramite il processo *market group for heat, district or industrial, natural gas*.

4.4.4 Utilizzo

In termini di utilizzo, la Tigo consuma nettamente meno della Global in quanto non vi è alcun sistema pneumatico ad aria compressa. Gli unici consumi sono dovuti al controller e sono i seguenti:

Customer supply	Voltage [V]	100/120/230/240
	Frequency [Hz]	50-60
	Max Power [kw]	2,5
<hr/>		
Consumption (average) (Machine+controller)	Consumption [kWh]	0,4

Da dati sperimentali raccolti negli anni precedenti dal reparto di progettazione della Hexagon è evinto che una macchina viene utilizzata in media 220 giorni l'anno per 22,5 h al giorno. Quindi calcolando il consumo si ottiene:

$$\text{Ore totali di utilizzo per 10 anni} = 220gg \cdot 22,5h \cdot 10anni = 49500h$$

$$\text{Consumo totale all'ora} = 0,4kWh$$

$$\text{Consumo TOT macchina} = 49500h \cdot 0,4kWh = 19800kWh$$

Anche in questo caso è stato scelto il processo *Market for electricity, medium voltage* per il calcolo dell'impatto dell'elettricità consumata dalla macchina durante il suo utilizzo.

4.5 LCIA: Valutazione degli impatti

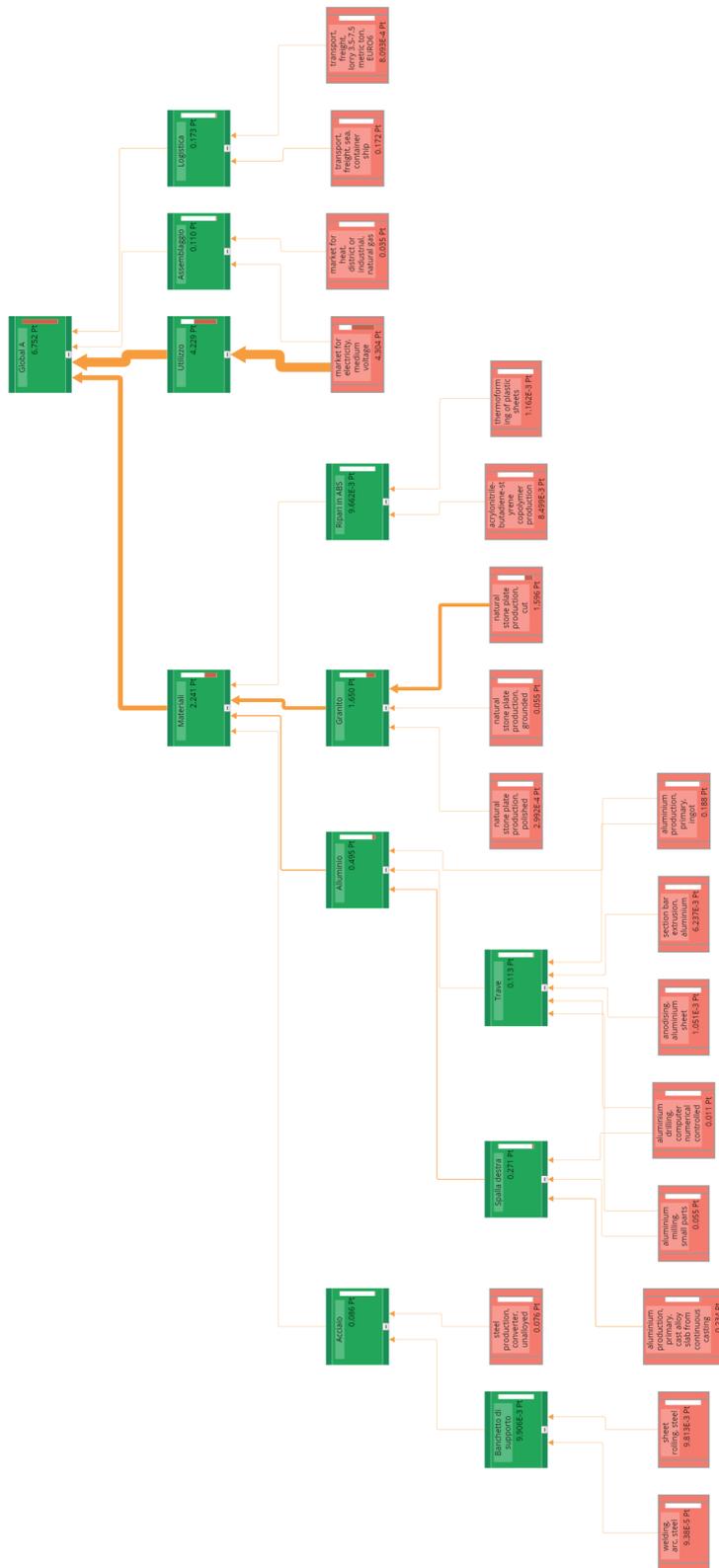
Dopo aver raccolto tutti i dati relativi al ciclo di vita delle due macchine, si passa allo step successivo dell'analisi riguardante la valutazione degli impatti mediante il software SimaPro.

E' stato creato un network per ciascuna macchina, in cui vengono mostrati i Processes e i Product stages partendo dal prodotto finito fino alle prime lavorazioni dei componenti.

Come metodo per la valutazione dell'impatto ambientale è stato utilizzato *IMPACT 2002+* che è stato ampiamente descritto nel paragrafo 3.3.

4.5.1 Risultati Global

La possibilità in SimaPro di sviluppare il network del ciclo di vita della macchina permette di distinguere a colpo d'occhio le operazioni che influiscono in modo significativo sul risultato globale da quelle che possono essere trascurate. Si nota facilmente, grazie allo spessore delle frecce, come i processi di maggiore impatto sono quelli relativi alla produzione dei materiali, in particolare la produzione di granito e la produzione di alluminio, e l'utilizzo della macchina in 10 anni.



Impact Category	Product	Normalized Value	Not Normalized Value
Climate Change	Global A	1.762	17441.1 <i>kgCO₂eq</i>
	Materiali	0.261	2579.7 <i>kgCO₂eq</i>
	Assemblaggio	0.040	393.80 <i>kgCO₂eq</i>
	Utilizzo	1.434	14197.2 <i>kgCO₂eq</i>
	Logistica	0.027	270.10 <i>kgCO₂eq</i>
Human Health	Global A	2.842	0.020 <i>DALY</i>
	Materiali	1.689	0.012 <i>DALY</i>
	Assemblaggio	0.020	0.00015 <i>DALY</i>
	Utilizzo	1.016	0.0072 <i>DALY</i>
	Logistica	0.116	0.00082 <i>DALY</i>
Ecosystem Quality	Global A	0.241	3296.7 <i>PDF · m² · yr</i>
	Materiali	0.056	767.6 <i>PDF · m² · yr</i>
	Assemblaggio	0.003	45.62 <i>PDF · m² · yr</i>
	Utilizzo	0.176	2412.1 <i>PDF · m² · yr</i>
	Logistica	0.005	71.34 <i>PDF · m² · yr</i>
Resources	Global A	1.908	290007 <i>MJprimary</i>
	Materiali	0.235	35716.3 <i>MJprimary</i>
	Assemblaggio	0.046	6995.10 <i>MJprimary</i>
	Utilizzo	1.603	243550 <i>MJprimary</i>
	Logistica	0.025	3745.10 <i>MJprimary</i>

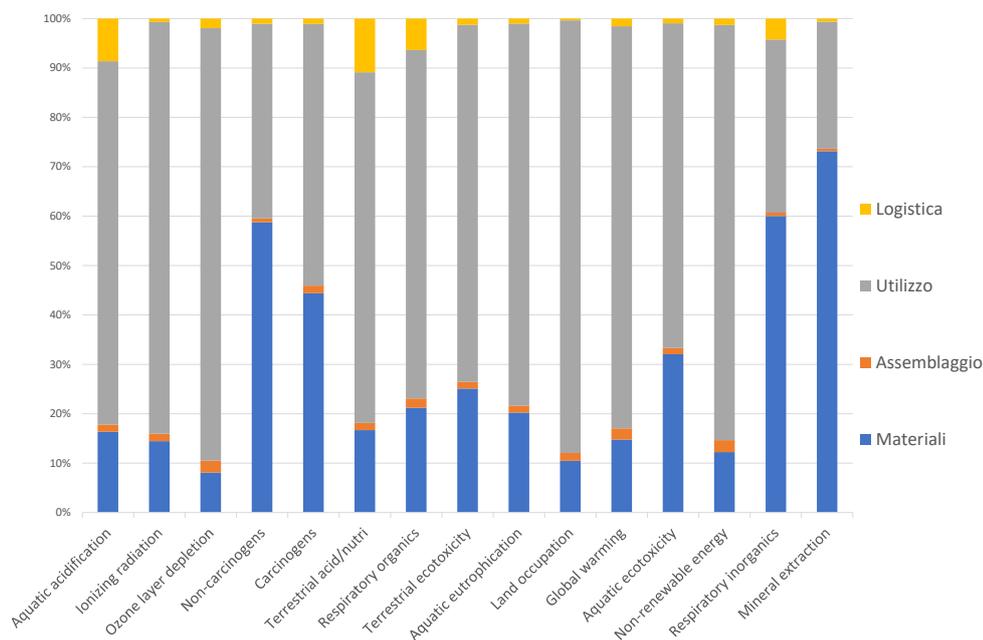
Tabella 4.3: Dati relativi alle categorie di danno normalizzate della Global

Entrando più nel dettaglio, nella Tabella 4.4 sono elencati i risultati relativi alla fase di Caratterizzazione e normalizzazione delle quattro categorie di danno. Dai risultati non normalizzati non è possibile effettuare un confronto tra i diversi processi per capire quale sia effettivamente il più dannoso, ma possono essere utili se si vogliono conoscere i valori di ogni categoria con le rispettive unità di misura. Mentre con i risultati normalizzati, espressi in punti, è possibile effettuare un confronto tra i diversi processi e tra le due macchine.

Per una miglior visione del risultato, i dati precedenti sono stati riportati nei seguenti grafici in cui verranno visualizzate le diverse categorie di impatto e di danno nelle fasi di caratterizzazione e normalizzazione.

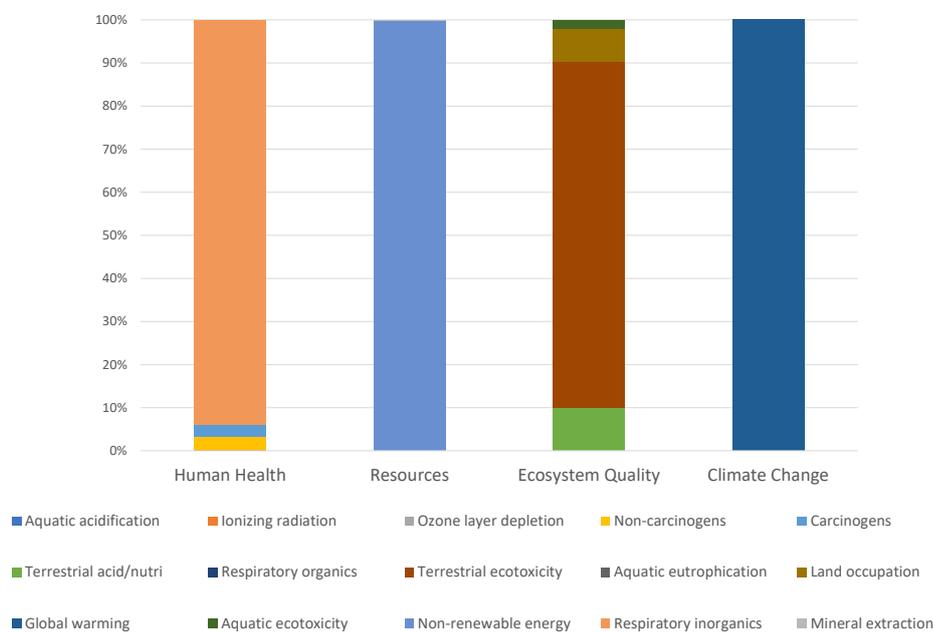
Classificazione e Caratterizzazione

Durante la fase di classificazione, le sostanze emesse dai processi presenti nel ciclo di vita della macchina vengono assegnate alle 15 categorie di impatto. Successivamente nella fase di caratterizzazione, la quantità di ogni singola emissione viene moltiplicata per un fattore di caratterizzazione relativo al contributo sulla categoria di impatto di appartenenza. Poiché ogni categoria ha un'unità di misura differente, i grafici mostrano la percentuale con la quale ogni processo (Materiali, Logistica, Assemblaggio, Utilizzo) influenza una categoria.



Risultati della fase di Caratterizzazione: categorie di impatto

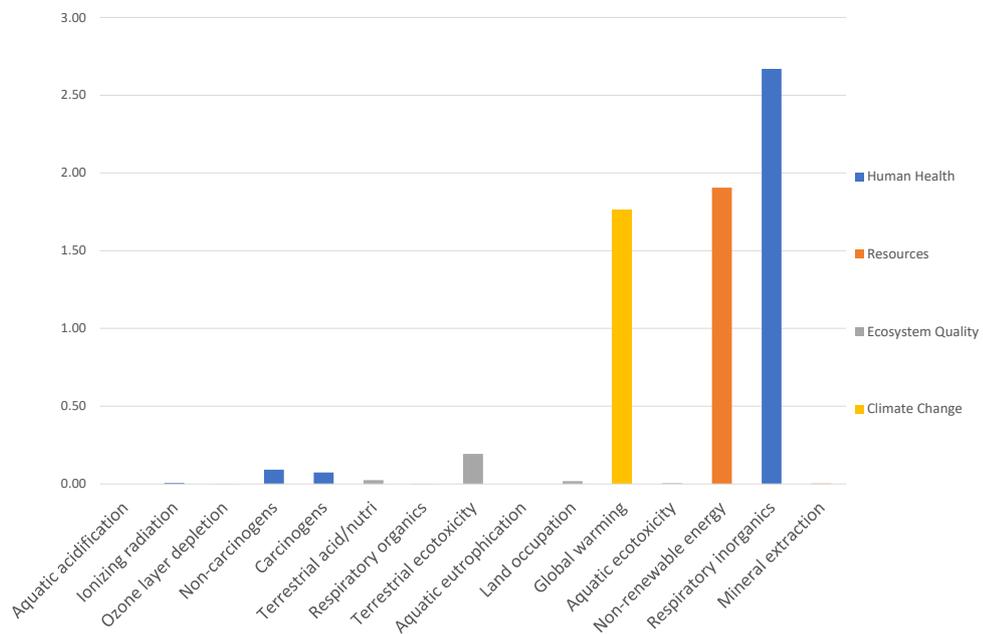
Nello step successivo, le 15 categorie di impatto vengono aggregate nelle 4 categorie EndPoint di valutazione dei danni: Salute umana, Risorse, Qualità dell'ecosistema e Cambiamento climatico. Anche in questo caso le categorie hanno unità di misura differenti, quindi non è possibile sommare i risultati per ottenere un punteggio finale della macchina.



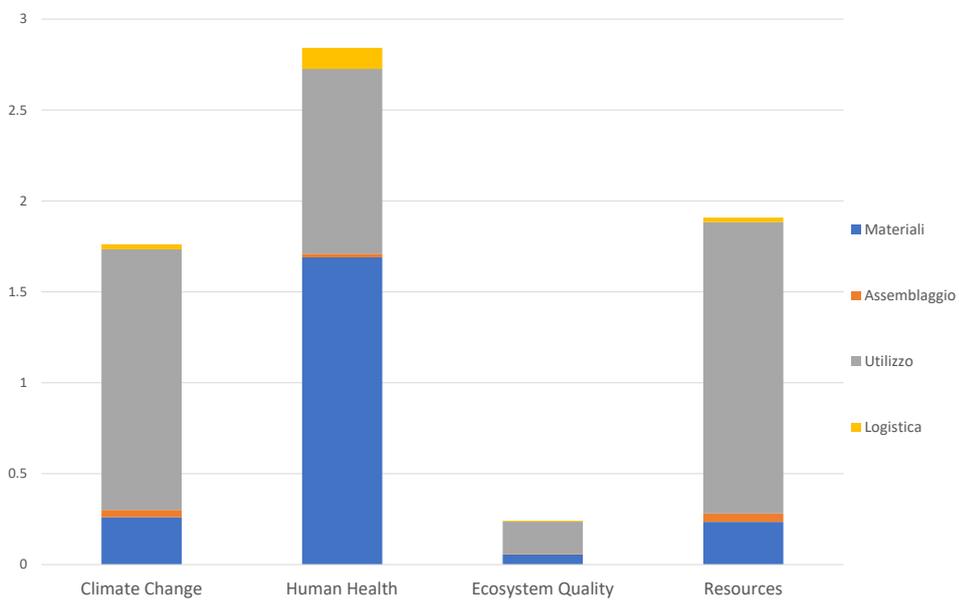
Risultati della fase di caratterizzazione: categorie di danno

Normalizzazione

In questa fase, i risultati della fase di caratterizzazione vengono divisi per dei fattori che rendono i risultati adimensionali. I fattori di adimensionalizzazione considerati in questo caso sono relativi all'impatto ambientale causato da un individuo in un anno nella zona europea. Al termine di questa operazione è possibile sommare i risultati ottenuti per esprimere l'impatto totale della macchina con un punteggio. Di seguito vengono mostrati i due grafici relativi alle categorie di impatto e di danno normalizzate in cui sarà possibile vedere quali categorie vengono più influenzate dalle emissioni della macchina.



Risultati della fase di Normalizzazione: categorie di impatto



Risultati della fase di normalizzazione: categorie di danno

Come si nota le categorie di impatto con un punteggio maggiore sono Respiratory inorganics, Non renewable energy e Global Warming che rispettiva-

mente influenzano le categorie di danno Human Health, Resources e Climate change.

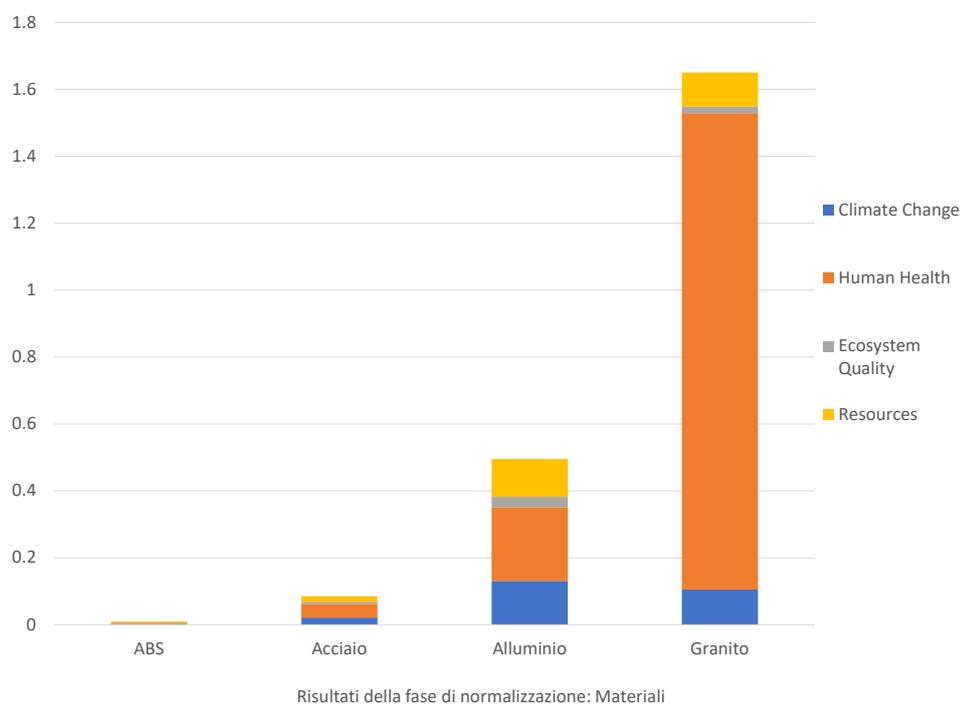
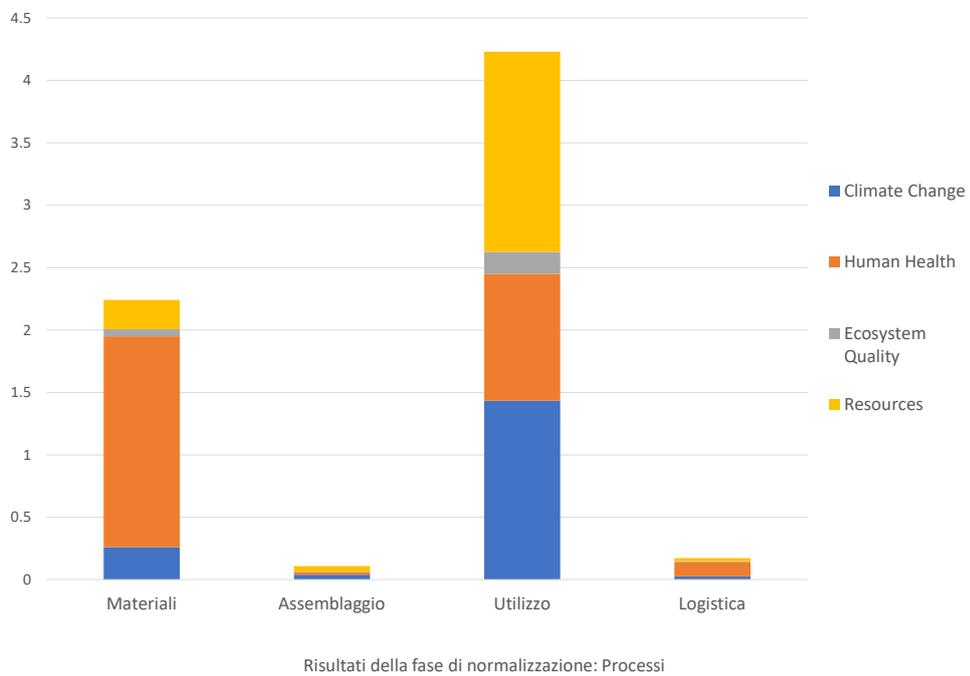
La prima valuta gli effetti sulla respirazione causati da sostanze inorganiche, le sostanze che hanno una maggiore influenza su questa categoria di impatto sono le emissioni in aria. Infatti l'unità di misura di questa categoria di midpoint è $kgPM_{2.5}eq$ che si riferisce alla quantità di polveri sottili emesse in aria con una dimensione inferiore a 2.5 micron. Più la dimensione è minima, più le polveri sono sottili e di conseguenza più dannose per la salute umana. Infatti mentre il PM 10 raggiunge solo i bronchi, la trachea e vie respiratorie superiori, il PM 2,5 è in grado di penetrare negli alveoli polmonari con eventuale diffusione nel sangue. Questa categoria di midpoint è una delle sei categorie che vengono raggruppate nella categoria di endpoint Human Health, espressa in DALY (Disability-Adjusted Life Years). Il danno che viene calcolato in questa categoria ovviamente riguarda la salute umana, in particolare vengono valutati gli anni persi a causa di una morte prematura o il tempo di vita con una qualità inferiore a causa di una malattia grave.

La seconda categoria di midpoint *Non-Renowable energy* valuta la quantità di energia non rinnovabile utilizzata nei processi che quindi porta ad una riduzione di risorse sul pianeta come categoria di danno.

Infine l'ultima categoria di impatto rilevante è *Global Warming* calcolata in $kgCO_2$ emessi ed è basata sul modello GWP 500, IPCC Climate Change 2001, ovvero sono utilizzati i fattori di caratterizzazione midpoint appartenenti alla lista IPCC del 2001, calcolati considerando un orizzonte temporale pari a 500 anni. Inoltre, i fattori di caratterizzazione sono dati solamente per le emissioni in aria.

Dai grafici si può notare come i punteggi elevati delle categorie di danno del *Climate Change* e *Resources* siano dovuti soprattutto all'utilizzo della macchina e quindi al consumo di energia elettrica mentre per quanto riguarda la categoria di *Human Health* il processo che più la influenza è la produzione dei materiali.

Entrando più nel dettaglio, dopo aver analizzato le categorie di midpoint e endpoint, si passa ad analizzare graficamente i processi e i materiali che hanno contribuito all'impatto ambientale della macchina. Di seguito vi è un grafico che illustra i punteggi dei quattro processi principali del ciclo di vita della macchina e successivamente un secondo grafico in cui vengono mostrati i punteggi relativi ad ogni singolo materiale.



Da questi grafici si nota subito come l'utilizzo della macchina per 10 anni abbia un impatto nettamente superiore rispetto alla produzione dei materiali.

La Global infatti, montando anche un sistema pneumatico ad aria compressa, ha un consumo di energia superiore alla Tigo che calcolato per 10 anni porta ad una disparità di risultati tra l'utilizzo della macchina e gli altri processi del suo ciclo di vita.

Per quanto riguarda i materiali, il contributo maggiore deriva dalla produzione del basamento in granito che possiede una massa (2053 kg) superiore rispetto alla massa totale dei componenti in acciaio e alluminio. Mentre, nonostante la massa totale dei componenti in acciaio e alluminio si simile, dal grafico si nota una certa differenza tra i due. Ciò è dovuto alla produzione per colata dell'alluminio della spalla della macchina.

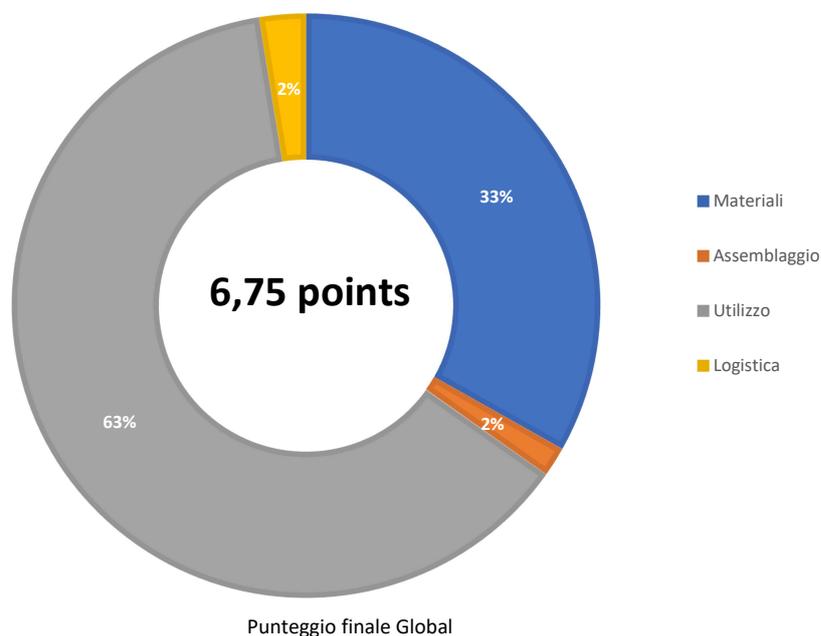
Quindi sommando i punti dei quattro processi principali del ciclo di vita, si ottiene il punteggio finale della Global che sarà successivamente confrontato con il punteggio finale della Tigo.

Materiali = 2.24 points

Logistica = 0.17 points

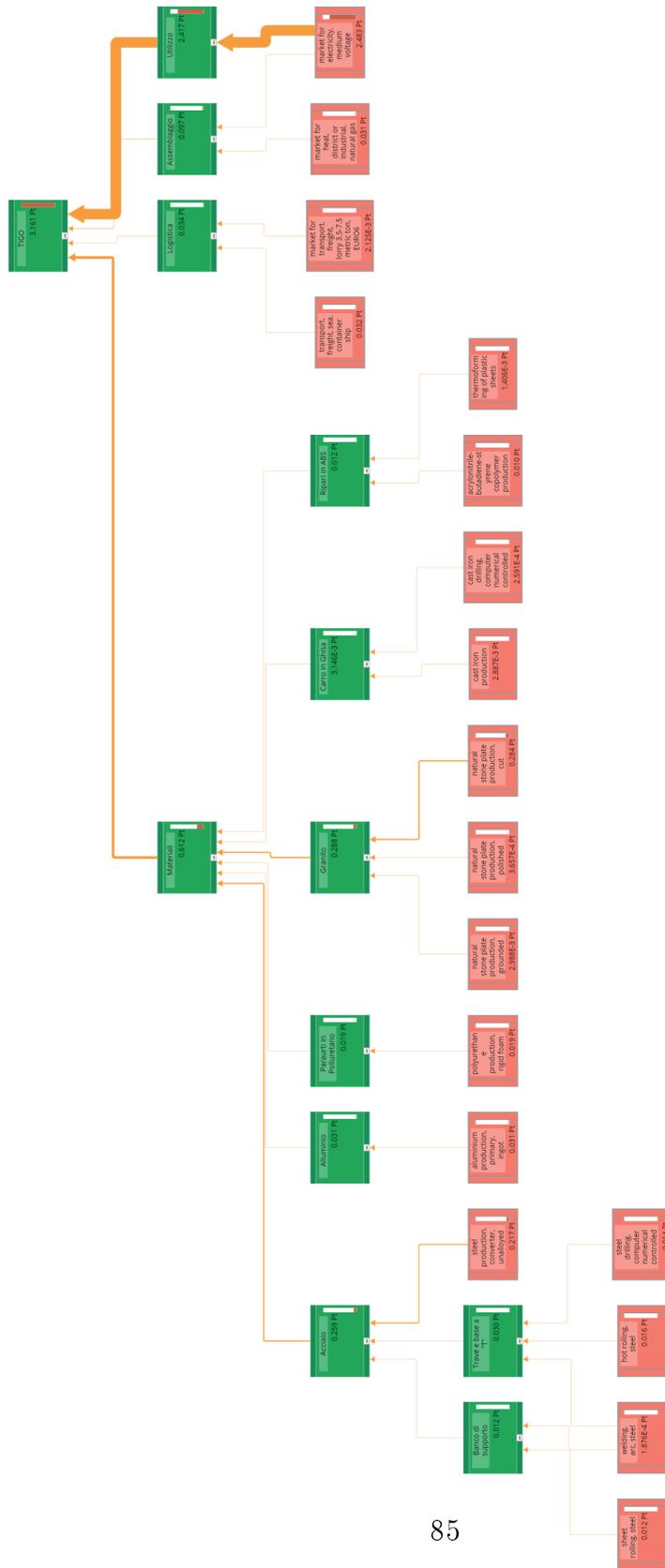
Assemblaggio = 0.11 points

Utilizzo = 4.23 points



4.5.2 Risultati Tigo

Anche per il calcolo degli impatti della Tigo è stato svolto lo stesso procedimento della Global. Nella figura seguente il network che illustra il ciclo di vita della macchina.



Impact Category	Product	Normalized Value	Not Normalized Value
Climate Change	Tigo	0.960	9502.6 <i>kgCO₂eq</i>
	Materiali	0.099	982.6 <i>kgCO₂eq</i>
	Assemblaggio	0.035	350.1 <i>kgCO₂eq</i>
	Utilizzo	0.819	8112.8 <i>kgCO₂eq</i>
	Logistica	0.006	57.05 <i>kgCO₂eq</i>
Human Health	Tigo	1.019	0.0072 <i>DALY</i>
	Materiali	0.398	0.0028 <i>DALY</i>
	Assemblaggio	0.018	0.00013 <i>DALY</i>
	Utilizzo	0.581	0.00412 <i>DALY</i>
	Logistica	0.022	0.00016 <i>DALY</i>
Ecosystem Quality	Tigo	0.131	1790.7 <i>PDF · m² · yr</i>
	Materiali	0.026	355.3 <i>PDF · m² · yr</i>
	Assemblaggio	0.003	40.55 <i>PDF · m² · yr</i>
	Utilizzo	0.101	1378.3 <i>PDF · m² · yr</i>
	Logistica	0.001	16.54 <i>PDF · m² · yr</i>
Resources	Tigo	1.051	159783.4 <i>MJprimary</i>
	Materiali	0.089	13588.2 <i>MJprimary</i>
	Assemblaggio	0.041	6218.10 <i>MJprimary</i>
	Utilizzo	0.916	139171.7 <i>MJprimary</i>
	Logistica	0.005	805.410 <i>MJprimary</i>

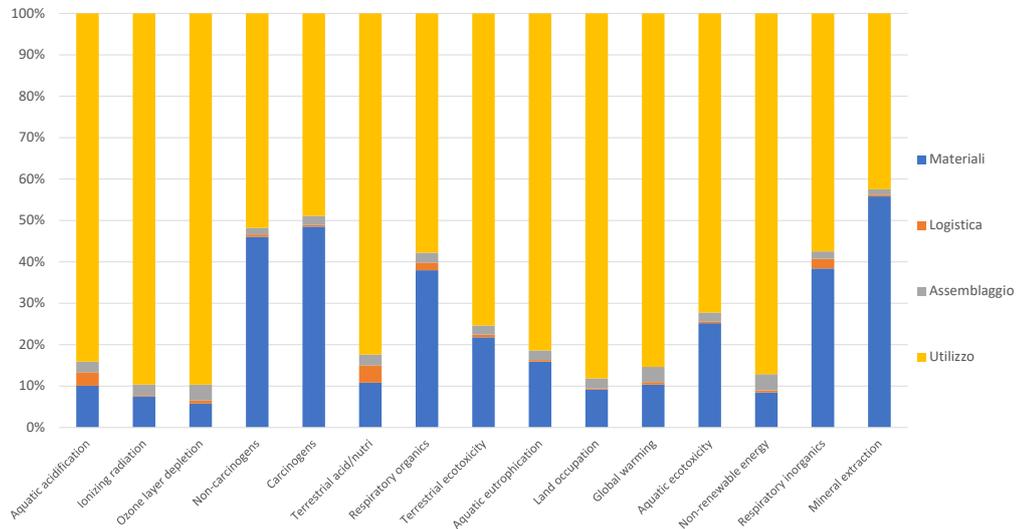
Tabella 4.4: Dati relativi alle categorie di danno normalizzate della Tigo

Nella Tabella 4.4 vi sono tutti i dati estrapolati dalla fase di caratterizzazione e normalizzazione.

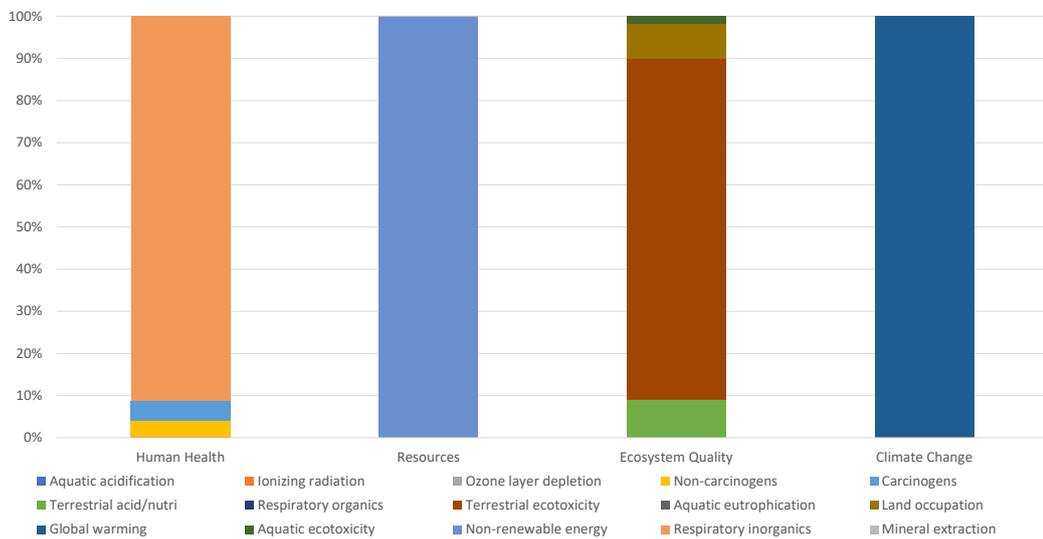
Come fatto per la Global, i dati precedenti sono stati riportati nei seguenti grafici in cui verranno visualizzate le diverse categorie di impatto e di danno nelle fasi di caratterizzazione e normalizzazione.

Classificazione e Caratterizzazione

In questa fase, non essendo i risultati normalizzati, si può solo comprendere con quale percentuale i processi del ciclo di vita della Tigo influiscano sulle categorie di impatto e di danno.



Risultati della fase di caratterizzazione: categorie di impatto

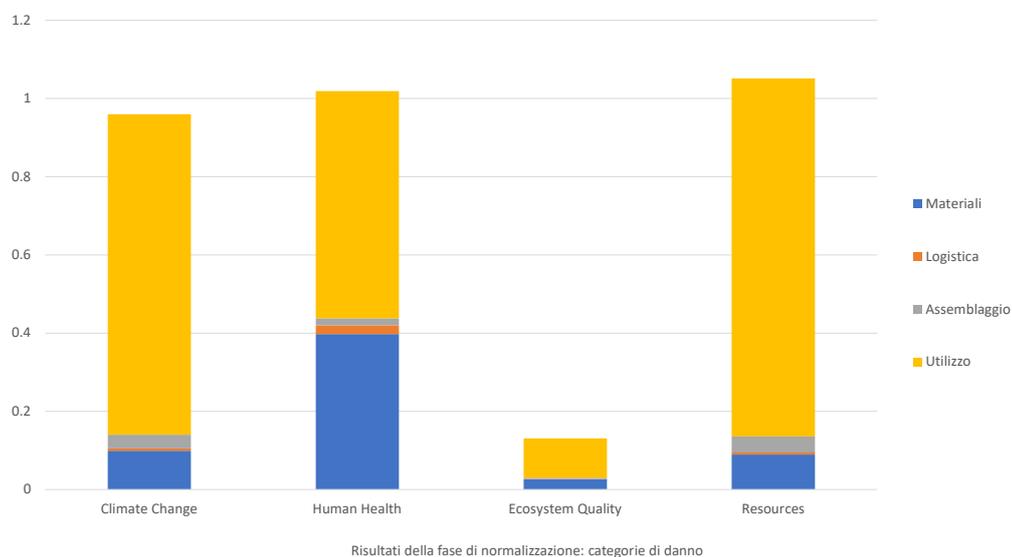
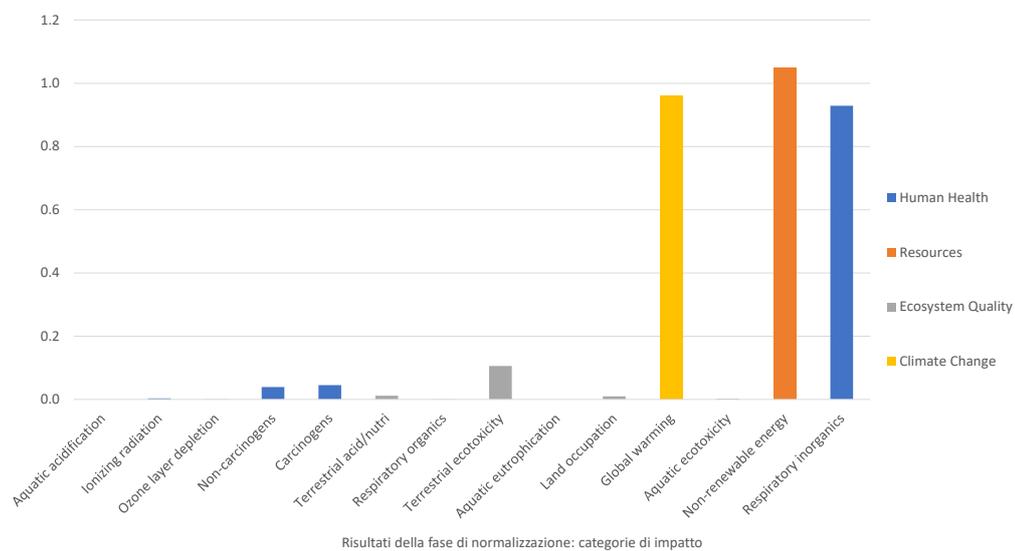


Risultati della fase di caratterizzazione: categorie di danno

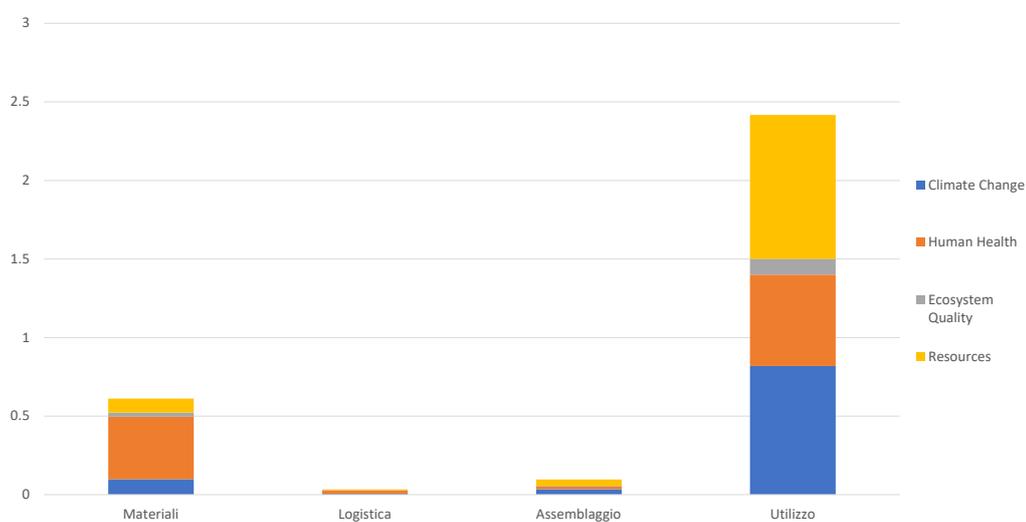
Normalizzazione

In questa fase sarà più semplice comprendere la quantità effettiva dell'influe-

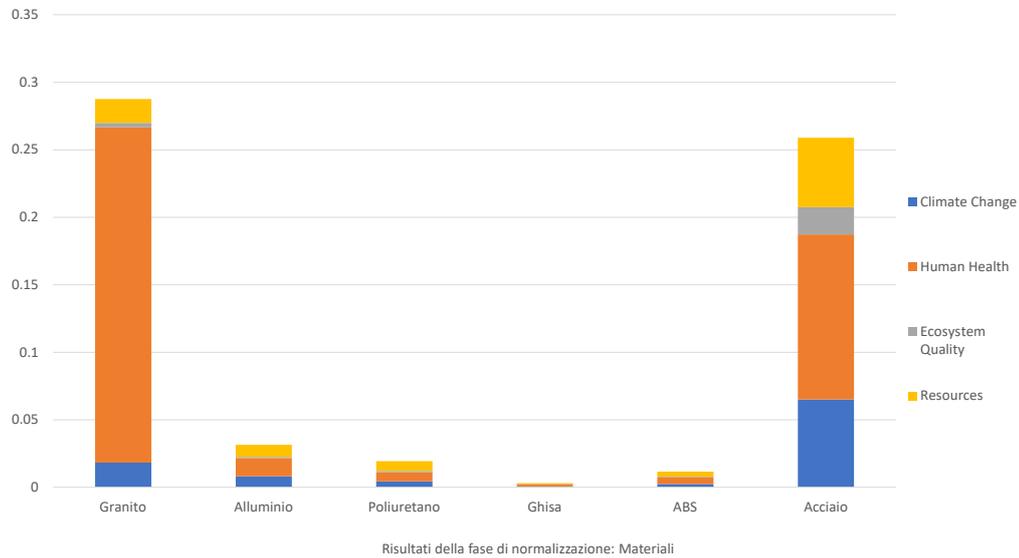
na di ciascun processo sul risultati finale. Di seguito vi sono i due grafici normalizzati relativi alle categorie di impatto e di danno.



Anche in questo caso le tre categorie di impatto più influenzate sono *Global warming*, *Non-renewable energy* e *Respiratory inorganics* che si ripercuotono rispettivamente sulle categorie di danno *Climate change*, *Resources* e *Human Health*. In questo caso però la categoria delle risorse è quella con il punteggio più alto, in quanto la produzione dei materiali, che è la principale causa dei danni sulla salute umana, non ha un ruolo rilevante come accaduto per la Global. Quindi adesso si andranno a vedere i grafici normalizzati relativi ai processi e ai materiali che compongono il ciclo di vita della Tigo.



Risultati della fase di normalizzazione: processi del ciclo di vita della Tigo



Dal primo grafico si nota come anche per quanto riguarda la Tigo, il consumo di energia elettrica per l'utilizzo della macchina provoca un impatto ambientale nettamente superiore alla produzione dei componenti.

Tra i componenti spiccano il basamento in granito e tutti i componenti prodotti in acciaio, infatti in questo caso la struttura della macchina permette di avere un basamento in granito di dimensioni e massa inferiori rispetto la Global e quindi si riduce anche l'impatto ambientale di quest'ultimo.

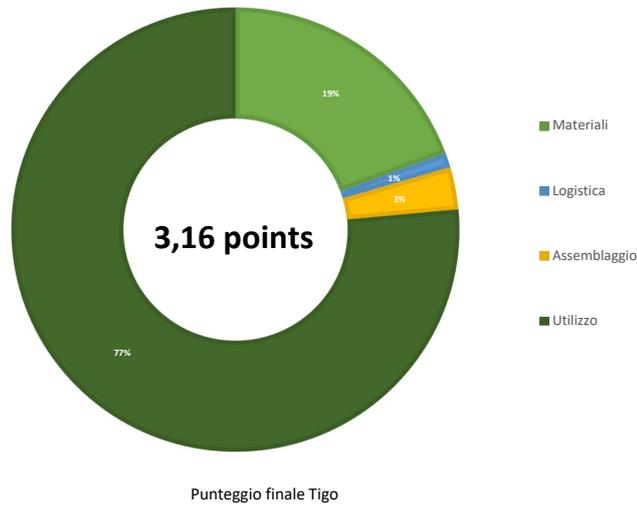
Quindi sommando i punti dei quattro processi principali del ciclo di vita, si ottiene il punteggio finale della Tigo.

Materiali = 0.61 points

Logistica = 0.03 points

Assemblaggio = 0.10 points

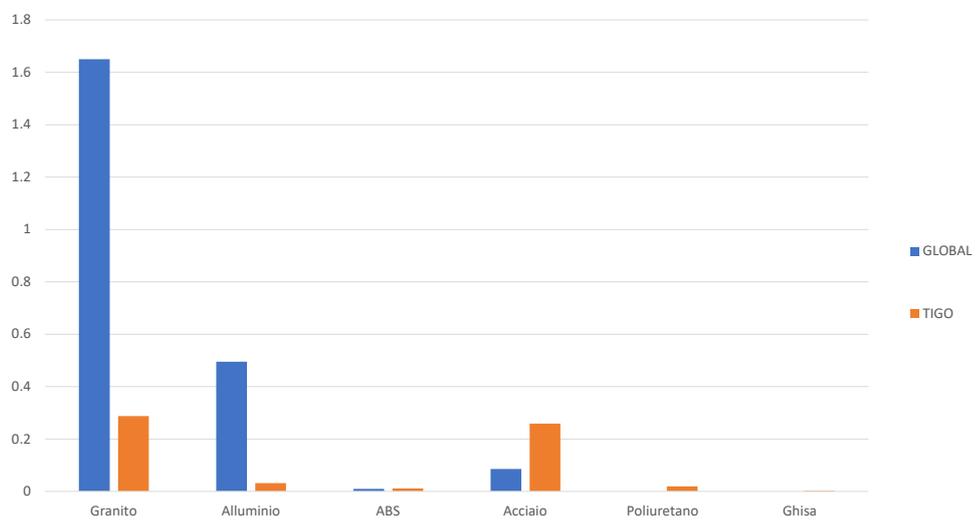
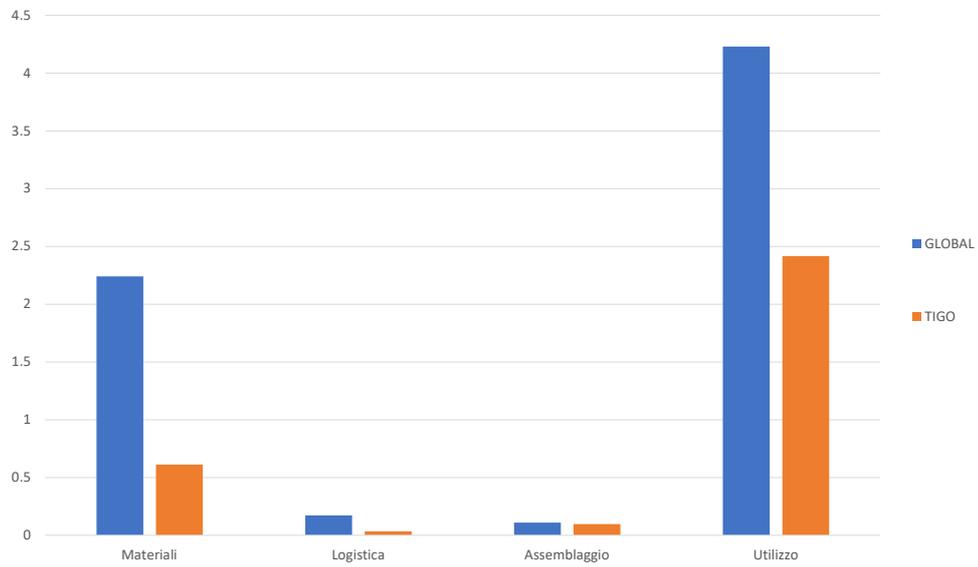
Utilizzo = 2.42 points



4.5.3 Confronto tra le due macchine

Dopo aver analizzato e valutato l'impatto ambientale delle due macchine esprimendo il risultato finale in punti, si può fare un confronto tra le due per capire cosa le differenzia e come mai una ha un punteggio doppio rispetto all'altra.

La **Global** ha un punteggio totale di **6.75** mentre la **Tigo** ha un punteggio totale di **3.16**, in entrambi i casi la quasi totalità dell'impatto è dovuto alla produzione di componenti e all'utilizzo della macchina. Di seguito due grafici in cui vi è un confronto tra i processi e i materiali delle due macchine.



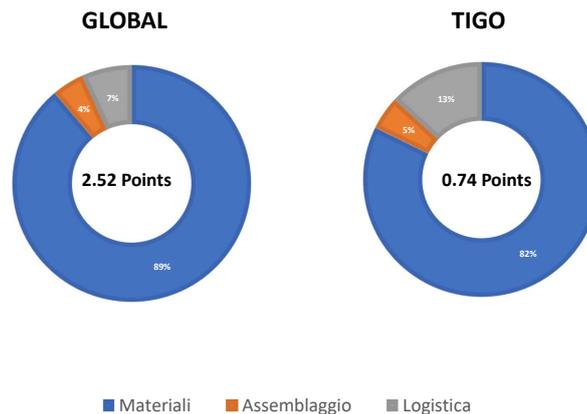
La Global è una macchina leggermente più grande e più prestante della Tigo, quindi ci si aspettava che avesse anche un impatto superiore. Per

quanto riguarda l'utilizzo, il sistema pneumatico della Global ne aumenta il consumo e di conseguenza l'impatto ambientale.

Invece per quanto riguarda i materiali, il maggior contributo è dovuto alla produzione del Basamento in Granito della Global che ha una massa notevole, esso presenta una scanalatura utilizzata solo per lo scorrimento della spalla destra che non è presente nella Tigo. Per ridurre l'impatto ambientale si potrebbe pensare ad una diversa struttura della macchina senza però variarne le prestazioni. La Tigo invece è composta prevalentemente di acciaio e il contributo all'impatto ambientale dei componenti in acciaio è superiore rispetto alla Global. Il grande divario tra le due macchine per quanto riguarda l'impatto dell'alluminio è dovuto alla produzione per colata delle due spalle della Global, infatti questo tipo di produzione ha un impatto ambientale superiore rispetto agli altri tipi di produzione dell'alluminio come l'estrusione.

Confronto senza Utilizzo della macchina

Se si elimina l'utilizzo della macchina nell'analisi e quindi si effettua una pura analisi *Cradle to Gate*, si nota come il divario di punteggio tra le due macchine si affievolisce in quanto dovuto soltanto in gran parte dalla produzione dei componenti. La Logistica e l'assemblaggio sono simili tra i due cicli di vita, infatti la Hexagon tende ad acquistare i componenti da aziende vicine alla sede.



Capitolo 5

Conclusione

Il lavoro di tesi svolto è parte integrante di un progetto che verrà portato avanti dall'azienda per migliorare l'impatto ambientale dei suoi prodotti. Questa prima analisi sul ciclo di vita di due macchine sarà la base per il futuro studio del ciclo di vita di altri prodotti e dei materiali utilizzati.

Le maggiori difficoltà nello svolgimento dello studio sono state riscontrate durante l'analisi di inventario (LCI). Non essendo i componenti prodotti in azienda ma da fornitori esterni, è stato complicato ottenere informazioni dettagliate riguardo tutte le lavorazioni, quindi è stato necessario fare alcune assunzioni per portare a termine lo studio. Per questo è stato fondamentale il contributo del database Ecoinvent 3.0 integrato nel software SimaPro nel quale sono presenti la maggior parte dei dati relativi ai vari tipi di lavorazione e produzione dei materiali utilizzati nell'analisi. Sono tutti dati provenienti da studi e ricerche svolte da enti esperti nei vari settori.

Si è visto come il software SimaPro sia molto potente e soprattutto molto utile per svolgere questo tipo di analisi, semplifica di gran lungo il lavoro dell'operatore permettendo di svolgere analisi anche complesse. In esso infatti sono presenti diversi metodi che possono essere scelti dall'operatore per effettuare la valutazione degli impatti ambientali (LCIA). L'unica pecca è che i risultati sono influenzati dall'estensione del database caricato all'interno del software. Nel nostro caso per esempio, sono state rilevate alcune lacune riguardo le lavorazioni sul granito, infatti è stata utilizzata come lavorazione quella della Pietra Naturale che è più generica ma è stata approvata lo stesso da tutti i membri del team.

Parlando invece dei risultati ottenuti, si è visto come una macchina più prestante come la Global abbia un impatto ambientale superiore rispetto ad una macchina più economica come la Tigo. La prima consuma quasi il doppio in più rispetto alla seconda a causa del suo sistema pneumatico, cosa che però la rende più precisa e più prestante. Si potrebbe invece migliorare l'impatto

riguardante la produzione di Granito, riducendo la massa del Basamento e modificandone la struttura cercando di mantenere le stesse prestazioni.

Mentre si è visto come le fasi di assemblaggio e di logistica non vadano ad influenzare il risultato finale di entrambe le macchine, risultando quasi influenti per l'analisi finale.

I progetti futuri del team di progettazione saranno quelli di migliorare e studiare nuove soluzioni più ecosostenibili tenendo in considerazione i risultati emersi da questo studio. Si potrebbe associare uno studio di carattere ambientale alla progettazione, cercando di integrare i software CAD/CAM con software come SimaPro.

Bibliografia

- [1] Hexagon Manufacturing Intelligence, [<https://www.hexagonmi.com/it-IT/about-us/about-hexagon-manufacturing-intelligence/who-we-are>].
- [2] Hexagon Manufacturing Intelligence, [<https://www.hexagonmi.com/it-IT/about-us/hexagon-manufacturing-intelligence-italia/divisione-commerciale-italia>].
- [3] PRé Consultants; Mark Goedkoop, Michiel Oele, Jorrit Leijting, Tommie Ponsioen, Ellen Meijer (january,2016). *Introduction to LCA with SimaPro*.
- [4] Giacomo Magatti (20 Febbraio 2015). *Life Cycle Assessment (LCA): origini, standard normativi e struttura operativa*. Greenreport.it[<https://www.greenreport.it/news/comunicazione/life-cycle-assessment-lca-origini-standard-normativi-e-struttura-operativa/>]
- [5] Baldo, G. L., Marino, M., & Rossi, S. (2005). *Analisi del ciclo di vita LCA: materiali, prodotti, processi*. Ed. Ambiente, Milano.
- [6] ISO. (2006). UNI EN ISO 14044. Environmental management, Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines. Ginevra.
- [7] ISO. (2006). UNI EN ISO 14040. Environmental management, Life Cycle Assessment – Principles and Framework. Ginevra.
- [8] Life cycle initiative, *Benefits of Life Cycle Approaches* [<https://www.lifecycleinitiative.org/starting-life-cycle-thinking/benefits/>]
- [9] FibreNet, *Life Cycle Assessment: Benefits and limitations* [<http://fibrenet.eu/index.php?id=blog-post-eleven#:~:text=LCA%20allows%20decision%20makers%20to, stages%20of%20the%20life%20cycle.>]

- [10] Prè Sustainability, *Sustainability software for fact-based decisions*. [<https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/>]
- [11] Prè Sustainability, *LCI databases in SimaPro*. [<https://simapro.com/databases/>]
- [12] Ecoinvent, *System Models in ecoinvent 3*. [<https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/system-models-in-ecoinvent-3.html>]
- [13] Various authors, PRé Sustainability (June 2020), *SimaPro database manual:Methods library*
- [14] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G and Rosenbaum R (2003). *IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology*.
- [15] Hexagon Manufacturing Intelligence (02 Marzo 2018) *Global S data sheet*. Germany
- [16] Hexagon Manufacturing Intelligence (Settembre 2017) *Tigo data sheet*. Germany
- [17] Microplan Group, *Il granito nella metrologia*. [<https://www.microplan-group.com/it/materiali/granito.html>]
- [18] Advanced Plastiform Inc., *Acrylonitrile butadiene styrene thermoforming and injection molding*, [<https://advancedplastiform.com/materials/abs/>]
- [19] Actiongiromari (Novembre 2016), *Poliuretano: caratteristiche & applicazioni*. [<https://actiongiromari.it/materiali/poliuretano-caratteristiche-applicazioni/>]