



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica – Progettazione meccanica
Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

**Validazione di strumenti semplificati a supporto della
progettazione sostenibile**

Validation of simplified tools to support sustainable design

Relatore:

Prof. Ing. **Michele Germani**

Tesi di Laurea di:

Luca Norscia

Correlatrice:

Prof.ssa Ing. **Marta Rossi**

Anno accademico 2023/2024

Indice

Introduzione.....	1
1. Storia della sostenibilità ambientale	2
1.1 Anni Sessanta.....	3
1.2 Anni Settanta	3
1.3 Anni Ottanta.....	4
1.4 Anni Novanta.....	6
1.5 Anni Duemila.....	8
2. Economia circolare	10
2.1 Benefici dell’economia circolare.....	10
2.2 Le mosse dell’Unione Europea	13
2.2.1 Pacchetto ‘Pronti per il 55%’	13
2.3 Design for X	15
2.3.1 Design for Environment (DfE).....	15
2.3.2 Design for Recycling (DfR)	16
2.3.3 Design for Disassembly (DfD).....	17
2.4 Facilità di disassemblaggio a supporto dell’economia circolare.....	17
2.4.1 Gestione dei rifiuti RAEE.....	18
2.5 Valutazione della facilità di disassemblaggio	19
2.5.1 Metodo U-effort.....	20
2.5.2 Metodo Philips ECC.....	21
2.5.3 Metodo di Kroll	21
2.5.4 Metodo di Desai & Mital.....	22
2.5.5 Confronto tra i metodi di calcolo del tempo di smontaggio	22
2.6 Motivazioni dello sviluppo del SW ElectroSpindleTool	24
3. Strumenti software.....	26
3.1 ElectroSpindleTool	26

3.1.1 Component Structure.....	27
3.1.2 Environmental Impacts.....	28
3.1.3 Recyclability Index.....	30
3.1.4 Disposal Collection	32
3.1.5 Liaisons View	32
3.1.6 Disassembly Index.....	34
3.2 SimaPro	39
3.3 SolidEdge	44
4. Primo caso studio: meccanismo biella manovella.....	46
4.1 Environmental Impacts.....	47
4.2 Validazione impatto ambientale.....	50
4.3 Recyclability Index	54
4.4 Validazione indici di riciclabilità.....	54
4.5 Disassembly Index.....	56
4.6 Validazione degli indici Ch e Cr	61
4.7 Dipendenza degli indici di disassemblaggio dalla massa.....	64
5. Secondo caso studio: meccanismo glifo.....	73
5.1 Environmental Impacts.....	74
5.3 Validazione impatto ambientale.....	76
5.3 Recyclability Index.....	81
5.4 Validazione indici di riciclabilità.....	82
5.5 Disassembly Index.....	83
5.6 Validazione degli indici Ch e Cr	85
5.7 Dipendenza degli indici di disassemblaggio dalla massa.....	86
6. Terzo caso studio: valvola di regolazione.....	94
6.1 Environmental Impacts.....	95
6.2 Validazione impatto ambientale.....	96

6.3 Recyclability Index.....	100
6.4 Validazione indice di riciclabilità	100
6.5 Disassembly Index.....	101
6.6 Validazione degli indici <i>Ch</i> e <i>Cr</i>	103
6.7 Dipendenza degli indici di disassemblaggio dalla massa.....	103
7. Conclusioni.....	109
Sitografia	113
Ringraziamenti	114

Introduzione

Nell'era contemporanea, caratterizzata da una crescente sensibilità ambientale e da una spinta verso la sostenibilità, la valutazione dell'impatto ambientale dei prodotti e la valutazione della loro riciclabilità acquisiscono un'importanza fondamentale. In questo contesto la presente tesi si propone di valutare l'impatto ambientale di diversi prodotti utilizzando come principale strumento ElectroSpindleTool, software progettato e sviluppato all'interno dell'Università Politecnica delle Marche in collaborazione con l'azienda HSD. Il software permette la valutazione dell'impatto ambientale del prodotto in esame prendendo in considerazione tre fasi del suo ciclo di vita: estrazione delle materie prime, fase di utilizzo e gestione del fine vita, il quale può avvenire tramite smaltimento in discarica, incenerimento con recupero di energia piuttosto che riciclo dei materiali. L'analisi quantitativa dell'impatto ambientale del prodotto è accompagnata dalla valutazione degli indici di riciclabilità che analizzano la compatibilità ambientale del prodotto.

Un aspetto cruciale affrontato in questa tesi è la complessità di disassemblaggio del prodotto. La facilità con cui un prodotto può essere smontato influenza significativamente la sua riciclabilità e la gestione sostenibile dei rifiuti. Per la valutazione di tale caratteristica il software ElectroSpindleTool permette di calcolare gli indici di disassemblaggio, i quali prendono in considerazione fattori quali il numero e la dimensione dei componenti piuttosto che la tipologia di giunzione.

I risultati resi disponibili dal software ElectroSpindleTool sono stati opportunamente validati per assicurarne l'affidabilità. La validazione dei risultati relativi all'impatto ambientale dei prodotti è stata svolta attraverso l'ausilio del software SimaPro. Invece, la validazione dei risultati relativi agli indici di riciclabilità e disassemblaggio è stata eseguita mediante l'uso di un tool excel, il quale rappresenta la base progettuale che ha consentito lo sviluppo del software stesso.

In conclusione, la presente tesi non solo quantifica l'impatto ambientale dei prodotti in esame valutandone anche la riciclabilità e la difficoltà di disassemblaggio, ma offre delle valide motivazioni nell'uso del software ElectroSpindleTool. Infatti, tale software fornisce informazioni preziose per ingegneri e progettisti contribuendo al dibattito sulla sostenibilità e promuovendo pratiche di progettazioni sempre più ecocompatibili.

1. Storia della sostenibilità ambientale

Nel corso della storia l'uomo ha dovuto far fronte ad una serie di sfide ambientali che hanno mutato il nostro pianeta minacciandone la sostenibilità. Le problematiche ambientali hanno assunto forme diverse nel corso dei secoli ma in ogni caso si sono rese necessarie azioni urgenti per proteggere il nostro ambiente e per assicurare un futuro sostenibile alle generazioni a venire.

Nell'antichità, le prime civiltà dovettero affrontare sfide ambientali per lo più localizzate, come deforestazione o erosione del suolo dovute all'attività agricola intensiva e all'estrazione delle risorse naturali. Tuttavia, l'esponenziale crescita demografica e l'avvento della rivoluzione industriale hanno causato un aggravamento dei problemi ambientali sia in termini di complessità che di espansione su scala globale. Infatti, nel XX e XXI secolo, l'inquinamento atmosferico da parte delle aziende, l'utilizzo eccessivo di risorse naturali e la produzione abnorme di rifiuti hanno causato effetti negativi nei confronti dell'ambiente e della salute umana.

Con il progredire del XX secolo è maturata notevolmente la consapevolezza ambientale e sono stati compiuti sforzi per porre rimedio ai danni ambientali causati dall'uomo. Allo stesso tempo però sono emerse nuove sfide, come il cambiamento climatico dettato dall'aumento delle emissioni dei gas serra, perdita della biodiversità causata da una spasmodica deforestazione, urbanizzazione incontrollata e crisi dei rifiuti. In questi ultimi decenni, la pressione nell'affrontare tali sfide è cresciuta notevolmente, portando a siglare degli accordi internazionali come il Protocollo di Kyoto e l'Accordo di Parigi, i cui obiettivi principali sono quelli di ridurre l'emissione di gas serra e limitare l'incremento della temperatura globale.

Ad oggi, l'umanità si trova di fronte alla necessità di combattere una vera e propria crisi ambientale e l'adozione delle energie rinnovabili, l'introduzione di attività agricole eco-friendly piuttosto che l'utilizzo di mobilità sostenibile rappresentano solo alcune delle armi a nostra disposizione.

1.1 Anni Sessanta

La storia della sostenibilità ambientale nasce negli anni '60 con i primi movimenti ambientalisti che cominciano a trovare voce sull'onda della famigerata rivoluzione del '68¹. Il primo che ebbe il coraggio di mettere in discussione la sostenibilità del modello economico lineare, tipico delle società capitalistiche dell'epoca, fu l'economista Kenneth Boulding in "The Economist of the Coming Spaceship Earth" pubblicato nel 1966. In esso, Boulding delinea due tipi di economia paragonandoli a due diversi personaggi: un cowboy e un'astronauta. Il cowboy, spinto da un'implacabile sete di conquista e di consumo, si limita a guardare le sterminate pianure che lo circondano. L'astronauta, invece, è fortemente consapevole del sistema che lo ospita, ossia la navicella spaziale "Terra", conoscendone i limiti ed i cicli che ne controllano il funzionamento.

Boulding, quindi, ebbe l'idea rivoluzionaria di considerare la Terra come un sistema chiuso: gli esseri umani possono ottenere le risorse di cui hanno bisogno solo dalla Terra e solo su di essa possono immettere scorie e rifiuti.

1.2 Anni Settanta

Se gli anni '60 sono stati quelli in cui l'etica ambientalista iniziò a farsi largo nella coscienza civile, d'altro canto solo negli anni '70 vennero intraprese le prime azioni istituzionali importanti. Proprio nel 1970 venne istituita la Giornata Mondiale della Terra (Earth Day), il 22 aprile. Nel 1972 il Club di Roma² pubblicò il Rapporto sui limiti dello sviluppo, noto anche come Rapporto Meadows. Nello stesso anno si tenne la Conferenza di Stoccolma, precursore della moderna Conferenza delle parti (COP), alla quale aderirono oltre cento diversi governi e centinaia di ONG³. Dalla conferenza

¹ Fenomeno socioculturale verificatosi a cavallo del 1968 caratterizzato da movimenti di massa socialmente eterogenei (studenti, lavoratori, intellettuali e minoranze etniche) che interessarono tutti gli stati del mondo. Tali ribellioni furono caratterizzate da una vasta gamma di rivendicazioni e richieste, spesso inerenti a questioni sociali, politiche, culturali ed economiche.

² Fondato nell'aprile del 1968 dall'imprenditore italiano Aurelio Peccei e dallo scienziato Alexander King, è un'associazione non governativa e no-profit, di scienziati, attivisti e alti dirigenti, la cui missione è quella di agire come catalizzatore dei cambiamenti globali individuando i principali problemi e le relative soluzioni.

³ Organizzazioni senza fini di lucro impegnate nella cooperazione internazionale allo sviluppo, spesso a carattere umanitario o sociale, riconosciute ufficialmente dal Ministero degli Esteri e in alcuni casi accreditate presso organismi internazionali come l'Unione Europea o il Consiglio Economico e Sociale delle Nazioni Unite.

prese vita la cosiddetta Dichiarazione di Stoccolma che incorpora 26 principi su diritti e responsabilità umane in ambito ambientale, ai quali si sono ancorati accordi, trattati e convenzioni fino agli anni 2010, e che hanno segnato altrettante tappe verso la definizione di sviluppo sostenibile e l'individuazione delle strategie per il suo conseguimento.

Tale decade fu contrassegnata anche dalla crisi energetica del 1973, con la quale si intende un brusco aumento del costo del greggio e dei suoi derivati. Infatti, nel '73 l'OPEC⁴ (Organization of the Petroleum Exporting Countries) decise di aumentare i prezzi del petrolio e di limitarne la produzione. Tale scelta fu dettata da una molteplicità di fattori, tra i quali l'aumento dell'inflazione, la svalutazione del dollaro statunitense e la politica estera degli Stati Uniti e dei suoi alleati nei confronti di Israele nell'ambito del conflitto arabo-israeliano. Le misure dell'OPEC causarono un'impennata senza precedenti dei prezzi del greggio e una drastica interruzione del flusso delle forniture di petrolio verso i paesi importatori.

La crisi petrolifera non fece altro che attirare ulteriormente l'attenzione dell'opinione pubblica sul tema ambientale e dimostrò la forte dipendenza tra crisi ambientale e crisi socioeconomica. Ad esempio, in Italia nel 1974 nacque la figura del Ministro dell'Ambiente, il cui ministero però venne introdotto solo nel 1986.

1.3 Anni Ottanta

Il 1987 fu un anno fondamentale nella storia della sostenibilità ambientale. Infatti, in tal anno venne pubblicato il Rapporto di Brundtland "Our Common Future" da parte della Commissione mondiale su Ambiente e Sviluppo, che presenta una definizione contemporanea di sviluppo sostenibile: *«Lo sviluppo sostenibile, lungi dall'essere una definitiva condizione di armonia, è piuttosto un processo di cambiamento tale per cui lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e i cambiamenti istituzionali siano resi coerenti con i bisogni futuri oltre che con gli attuali».*

⁴ Organizzazione internazionale fondata nel 1960 con l'obiettivo di coordinare la produzione e l'esportazione di petrolio al fine di ottenere un equilibrio tra domanda e offerta. Ad oggi è costituita da 13 Paesi membri, situati principalmente in Medio Oriente, Africa e America Latina. Tra i principali partecipanti si annoverano l'Arabia Saudita, l'Iran, l'Iraq, gli Emirati Arabi Uniti, il Kuwait e altri.

La definizione di sviluppo sostenibile proposta dal Rapporto di Brundtland pone particolare enfasi su due diversi concetti. Il primo è quello di ‘bisogni essenziali’, con l’obiettivo di garantire a tutti, soprattutto ai cittadini dei paesi più poveri, gli strumenti per usufruire di un modello di sviluppo più sostenibile. Il secondo è relativo ai limiti dello sviluppo sostenibile, dettati dai livelli tecnologici raggiunti, dalle risorse disponibili e dalla capacità da parte del pianeta di assorbire gli effetti negativi derivanti dalle attività umane.

Lo sviluppo sostenibile nasce dalla combinazione di tre aspetti:

- Sostenibilità ambientale, che si basa sull’utilizzo sostenibile delle risorse;
- Sostenibilità economica, che si basa sulla capacità di creare lavoro e sostentamento per le popolazioni;
- Sostenibilità sociale, che si basa sull’equità e sulla capacità di garantire le condizioni di benessere umano.



Figura 1.1: Ambiente, società ed economia a favore della sostenibilità ambientale

La sostenibilità ambientale, sociale ed economica può essere immaginata come tre grandi cerchi. Avvicinandoli essi tendono a sovrapporsi dando origine ad una piccola area comune, la quale rappresenta proprio lo sviluppo sostenibile. Questo approccio integrato ha l’obiettivo di assicurare uno sviluppo sostenibile che tenga conto delle sue diverse sfaccettature.

Nel 1987, a seguito della scoperta nel 1985 di un “buco” nello strato di ozono⁵ sopra l’Antartide, venne redatto il Protocollo di Montreal, uno dei trattati più efficaci mai negoziati, entrato in vigore nel 1989. Il protocollo di Montreal mira a ridurre e successivamente porre termine all’utilizzo di sostanze chimiche che danneggiano lo strato di ozono, come i clorofluorocarburi (CFC), utilizzate specialmente nell’ambito della refrigerazione, condizionamento dell’aria ed aerosol.

1.4 Anni Novanta

Nel 1992, i rappresentanti di 172 Paesi si riunirono nell’ambito della “United Nations Conference on Environment and Development” (UNCED) di Rio de Janeiro, con lo scopo di risolvere problemi relativi alla povertà e alla disparità tra paesi industrializzati e paesi in via di sviluppo, nonché problemi di carattere sociale, economico ed ambientale.

I Paesi partecipanti alla Conferenza di Rio sottoscrissero tre accordi non vincolanti a livello internazionale: l’Agenda 21, la Dichiarazione di Rio e la Dichiarazione dei principi per la gestione sostenibile delle foreste. Inoltre, vennero sottoscritte anche due Convenzioni giuridicamente vincolanti, ossia la Convenzione quadro sui cambiamenti climatici e la Convenzione sulla diversità biologica.

L’Agenda 21 è un programma d’azione globale in tutti i settori dello sviluppo sostenibile. È divisa in quattro sezioni: dimensioni economiche e sociali, conservazione e gestione delle risorse per lo sviluppo, rafforzamento del ruolo delle forze sociali e strumenti di attuazione.

La Dichiarazione di Rio sull’ambiente e sviluppo stabilisce i diritti e gli obblighi degli Stati in 27 principi. Riconosce i principi di causalità e precauzione come fondamentali, e definisce la lotta alla povertà, politiche demografiche adeguate, la riduzione delle forme di produzione e consumo non sostenibili, un’ampia informazione e la partecipazione delle popolazioni ai processi decisionali come prerequisiti per lo sviluppo sostenibile.

⁵ Il buco dell’ozono consiste nella riduzione dello spessore dello strato di ozono nell’atmosfera terrestre, tale fascia ci protegge dai raggi ultravioletti. Attualmente il “buco” si trova prevalentemente sopra il Polo Sud e si espande del 5% ogni 10 anni.

La Dichiarazione dei Principi per la gestione sostenibile delle foreste stabilisce i principi per la gestione, la conservazione e l'uso sostenibile delle foreste.

La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici ha l'obiettivo di limitare le emissioni di gas serra ad un livello che non possa mettere il pericolo il clima mondiale. Però, solo con il successivo protocollo di Kyoto, sono state definite in modo giuridicamente vincolante le riduzioni delle emissioni di gas serra.

La Convenzione sulla biodiversità ha l'obiettivo principale che quest'ultima non venga messa in pericolo nel medio e lungo periodo. Tale convenzione è entrata in vigore in Svizzera solo nel 1995.

Nel 1997, con la terza Conferenza delle Parti venne pubblicato il celebre Protocollo di Kyoto, entrato però in vigore solo nel 2005 a seguito della ratifica della Russia. Rappresenta il primo accordo internazionale che incorpora gli obiettivi dei principali Paesi industrializzati nella riduzione di alcuni gas serra, tra cui:

- Biossido di carbonio (CO₂);
- Metano (CH₄);
- Protossido di azoto (N₂O);
- Idrofluorocarburi (HFC);
- Perfluorocarburi (PFC);
- Esafluoruro di zolfo (SF₆).

La caratteristica principale del Protocollo di Kyoto è quella di stabilire degli obiettivi vincolanti e quantificanti per i Paesi ad esso aderenti in termini di riduzione delle emissioni dei gas serra. Infatti, essi si impegnavano a ridurre le loro emissioni di gas ad effetto serra, nel periodo 2008-2012, di almeno il 5% rispetto ai livelli del 1990.

Il protocollo di Kyoto permette ai Paesi aderenti di raggiungere i propri obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra sfruttando dei meccanismi basati sul mercato, denominati "Meccanismi flessibili".

L'Emissions Trading Internazionale (ET) consente lo scambio di crediti tra Paesi industrializzati con un'economia in fase di transizione: un paese che ha raggiunto e superato il proprio obiettivo in termini di riduzione delle emissioni di gas serra può cedere attraverso l'ET tali crediti ad un paese che, al contrario, non è stato in grado di ottemperare ai propri impegni di riduzione delle emissioni di gas serra.

- Meccanismo di Sviluppo Pulito (Clean Development Mechanism, CDM): consente ai Paesi industrializzati e ad economia in transizione di realizzare progetti nei Paesi in via di sviluppo, che producano benefici ambientali in termini di riduzione delle emissioni di gas serra e di sviluppo economico e sociale dei Paesi ospiti e nello stesso tempo generino crediti di emissione (CER) per i Paesi che promuovono gli interventi;
- Implementazione Congiunta (Joint Implementation, JI): consente ai Paesi industrializzati e ad economia in transizione di realizzare progetti per la riduzione delle emissioni di gas-serra in un altro paese dello stesso gruppo e di utilizzare i crediti derivanti (ERU), congiuntamente con il paese ospite.

1.5 Anni Duemila

Il 2015 fu un anno caratterizzato da due momenti focali: l'Accordo di Parigi e la stesura dell'Agenda 2030 con i suoi diciassette obiettivi di sviluppo sostenibile.

La ventunesima Conferenza delle Parti tenutasi a Parigi nel 2015 rappresenta il primo importante risultato in termini di sviluppo sostenibile, ossia un patto climatico internazionale siglato dai 196 Paesi membri dell'UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). Il patto siglato è però non vincolante, infatti si basa sul principio della responsabilità comune ma differenziata. L'impegno inderogabile sottoscritto in tale patto climatico è la necessità di mantenere l'aumento della temperatura *«ben al di sotto dei 2 °C»*. Una delle disposizioni chiave dell'accordo è l'istituzione di un meccanismo di revisione degli impegni dei Paesi, infatti, la revisione avrà luogo ogni cinque anni con lo scopo di aumentare gradualmente le ambizioni.

Nel settembre del 2015 venne redatto dai 193 Paesi membri dell'ONU⁶ la cosiddetta Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. Essa incorpora 17 obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Sustainable Development Goals, SDGs), per un totale di 169 traguardi da raggiungere entro il 2030. L'avvio ufficiale dell'Agenda 2030 coincise con l'inizio del successivo anno 2016.

Gli SDGs rappresentano obiettivi comuni su un insieme di questioni importanti per lo sviluppo sostenibile: la lotta alla povertà, l'eliminazione della fame e il contrasto al cambiamento climatico, per citarne solo alcuni. 'Obiettivi comuni' significa che essi riguardano tutti i Paesi e tutti gli individui: nessuno ne è escluso, né deve essere lasciato indietro lungo il cammino necessario per portare il mondo sulla strada della sostenibilità.

L'agenda 2030 si basa su 5 concetti fondamentali (le cinque P):

- Persone, eliminare fame e povertà in tutte le sue forme, garantendo dignità ad ogni singolo individuo;
- Prosperità, assicurare vite prospere ed in sintonia con la natura;
- Pace, promuovere società pacifiche ed inclusive;
- Partnership, promuovere alleanze tra i diversi Paesi aderenti all'Agenda;
- Pianeta, proteggere le risorse del pianeta per le generazioni a venire.

«La nuova Agenda è una promessa da parte dei leader a tutte le persone in tutto il mondo. È un'Agenda per le persone, per sradicare la povertà in tutte le sue forme, un'Agenda per il Pianeta, la nostra casa». Queste sono state le parole di Ban Ki Moon, Segretario Generale delle Nazioni Unite, riguardo l'Agenda 2030.

⁶ L'ONU è un'organizzazione intergovernativa a carattere mondiale. Tra i suoi obiettivi si annoverano il mantenimento della pace e della sicurezza mondiale, lo sviluppo e le relazioni amichevoli tra le nazioni. Ad oggi, l'ONU conta 193 membri, compresi tutti gli stati indipendenti indiscussi ad eccezione della Città del Vaticano.

2. Economia circolare

L'economia circolare rappresenta un modello economico e industriale volto a minimizzare la produzione di rifiuti e l'utilizzo delle risorse, promuovendo il completamento dei cicli dei materiali attraverso il riutilizzo, la riparazione, il riciclo e la rigenerazione dei prodotti e dei loro componenti. Tale approccio si contrappone al tradizionale modello lineare di "prendere, produrre, usare e gettare", che ha dominato l'economia mondiale fin dall'inizio della rivoluzione industriale. L'economia circolare si basa su tre principi fondamentali: progettare prodotti che evitino la produzione di rifiuti e inquinamento, mantenere i prodotti e i materiali in uso il più a lungo possibile, e rigenerare i sistemi naturali.



Figura 2.1: Sostegno dell'economia circolare lungo il ciclo di vita del prodotto

2.1 Benefici dell'economia circolare

L'economia circolare garantisce un'ampia gamma di benefici che vanno ben oltre la semplice riduzione di rifiuti. Questi possono essere classificati secondo tre diverse categorie: benefici ambientali, economici e sociali.

1. Benefici ambientali

I benefici ambientali dell'economia circolare sono vasti e profondi, uno dei principali è una mirata riduzione della quantità dei rifiuti prodotti. Infatti, mentre nell'economia lineare i prodotti sono pensati e progettati per avere una

vita utile breve, diventando alla fine dei semplici rifiuti che finiscono in discarica o negli inceneritori con conseguenze negative nei confronti dell'ambiente, l'economia circolare, invece, incentiva la progettazione di prodotti con una vita utile molto lunga promuovendo pratiche di riuso, riciclo o recupero di energia. Questa nuova visione progettuale permette che i materiali, seppur già utilizzati in precedenza, possano essere reintegrati all'interno di un nuovo ciclo produttivo, riducendo la necessità di smaltimento in discarica e quindi l'accumulo di rifiuti¹.

Essendo il modello dell'economia circolare incentrato sul principio di utilizzare i materiali il più a lungo possibile, contribuisce in maniera rilevante a ridurre la necessità di estrarre nuove materie prime, favorendo così la tutela delle risorse naturali, degli ecosistemi e della biodiversità. Questa pratica è estremamente importante in un'ottica globale di risorse limitate e domanda sempre più crescente, infatti, basti pensare che il valore totale degli scambi di materie prime (importazioni più esportazioni) tra l'UE e il resto del mondo è quasi triplicato dal 2002. Ad oggi l'UE importa materie prime più di quanto esporta, ciò nel 2021 ha generato un deficit commerciale dal valore di 35,5 miliardi di euro. Quindi, la promozione del riutilizzo e riciclo di materiali che sta alla base dell'economia circolare, oltre che generare degli effetti positivi nei confronti dell'ambiente comporta dei benefici anche in ambito economico e geopolitico, riducendo la dipendenza verso altri paesi in termini di importazione di materie prime.

Altro beneficio importante che deriva dal riutilizzo dei materiali o dal loro riciclo è la riduzione delle emissioni di gas serra. Infatti, le attività di estrazione e di lavorazione delle materie prime sono ad alta intensità energetica e producono significative emissioni di CO_2 nell'atmosfera². La creazione di prodotti più affidabili, in sintonia con l'approccio dell'ecodesign, aiuta a ridurre il consumo di risorse ed energia, poiché si stima che circa l'80%

¹ Nell'Unione Europea ogni anno si producono più di 2,2 miliardi di tonnellate di rifiuti. L'UE esporta anche parte dei suoi rifiuti, infatti nel 2022, le esportazioni di rifiuti dell'UE verso paesi terzi hanno raggiunto i 32,1 milioni di tonnellate, evidenziando una leggera diminuzione del 3% rispetto i dati del 2021.

² Secondo l'Agenzia europea dell'ambiente, i processi industriali e l'uso dei prodotti sono responsabili del 9,10% delle emissioni di gas serra nell'UE, mentre la gestione dei rifiuti rappresenta il 3,32%

dell'impatto ambientale di un prodotto sia determinato proprio durante la sua fase di progettazione.

2. Benefici economici

I benefici economici dell'economia circolare sono importanti sia a livello macroeconomico che per le singole imprese. La riduzione della dipendenza dalle materie prime comporta una maggiore efficienza dei processi produttivi all'interno della singola azienda, ottenendo risparmi significativi. Infatti, l'adozione di materiali riciclati riduce la necessità di acquisto di materie prime costose, contribuendo sensibilmente alla riduzione dei costi di produzione. Allo stesso tempo, l'adozione del modello di progettazione dell'ecodesign, permette la realizzazione di prodotti mirati alla durabilità e alla riparabilità, tali aspetti comportano un ulteriore risparmio economico nella fase di gestione del fine vita e smaltimento dei rifiuti.

Altro aspetto estremamente importante dell'economia circolare è la creazione di nuovi mercati e opportunità di lavoro, infatti, modelli di business come il riuso, la riparazione e il riciclo trovano sempre più strada, rappresentando essi i cardini di questo approccio. Inoltre, la necessità di sviluppare nuove tecnologie, processi e prodotti per supportare il passaggio verso l'economia circolare, promuove l'innovazione e la competitività delle aziende che mirano a poter diventare leader nel settore dell'innovazione generando maggior appeal nei confronti dei clienti.

3. Benefici sociali

Ai benefici ambientali ed economici citati in precedenza bisogna aggiungere anche quelli appartenenti alla sfera sociale. La riduzione di inquinamento e della quantità di rifiuti, temi fondamentali per l'economia circolare, aiutano a creare ambienti urbani e rurali più puliti, il che può portare ad una riduzione delle malattie legate all'inquinamento ambientale e ad un miglioramento della salute generale della popolazione. Inoltre, le opportunità di lavoro e i nuovi modelli di business che l'economia circolare porta con sé, favoriscono una

distribuzione più equa delle risorse tra la popolazione, riducendo le disparità socioeconomiche all'interno della comunità³.

2.2 Le mosse dell'Unione Europea

L'11 dicembre 2019 viene presentato dalla Commissione Von der Leyen il Green Deal europeo, il quale stabilisce una rigida tabella di marcia per il conseguimento di un'economia circolare ad impatto climatico zero, in cui la crescita economica non sia dipendente dall'uso delle risorse. L'obiettivo è quello di creare un'economia circolare che permetta di raggiungere entro il 2050 la neutralità climatica e fermare la perdita di biodiversità.

«Se vogliamo raggiungere la neutralità climatica entro il 2050, preservare il nostro ambiente naturale e rafforzare la competitività della nostra economia, la nostra economia deve diventare pienamente circolare. Il nostro modello economico di oggi è ancora, per lo più, lineare: solo il 12 % delle materie secondarie e delle risorse vengono reintrodotti nell'economia. Molti prodotti si rompono troppo facilmente, non possono essere riutilizzati, riparati o riciclati, o sono monouso. Esiste un enorme potenziale da sfruttare sia per le imprese che per i consumatori e con il piano odierno abbiamo avviato una serie di interventi volti a trasformare il modo in cui i prodotti sono fabbricati e consentire ai consumatori di effettuare scelte sostenibili a proprio vantaggio e a beneficio dell'ambiente». Queste sono state le parole pronunciate da Frans Timmermans, Vicepresidente esecutivo responsabile per il Green Deal europeo.

2.2.1 Pacchetto 'Pronti per il 55%'

Il pacchetto "Pronti per il 55%", presente all'interno del Green Deal europeo, ha l'obiettivo di tradurre in normativa le ambizioni del Green Deal in materia climatica. Il pacchetto proposto offre un quadro coerente ed equilibrato per il raggiungimento degli obiettivi climatici dell'UE, in grado di:

- Garantire una transizione giusta e socialmente equa;

³ Si stima che nell'UE grazie all'economia circolare possano esserci circa 700.000 nuovi posti di lavoro entro il 2030 determinando inoltre un aumento del PIL dello 0,5%.

- Mantenere e rafforzare l'innovazione e la competitività delle aziende europee assicurando parità di condizioni rispetto agli operatori economici dei paesi terzi;
- Sostenere la posizione leader dell'UE nella lotta globale contro i cambiamenti climatici.

Con l'adozione del pacchetto "Pronti per il 55%" l'UE e i suoi Stati membri si impegnano, in maniera giuridicamente vincolante, a ridurre le emissioni di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030, rispetto ai livelli del 1990.

Alcune delle principali proposte sono:

- Riforma del Sistema di Commercio delle Emissioni (ETS): la riforma ha l'obiettivo di ridurre il numero di crediti di emissione disponibili nel mercato, incoraggiando così una maggiore riduzione delle emissioni da parte delle imprese;
- Obiettivi di riduzione delle Emissioni Settoriali: vengono introdotti obiettivi nella riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra in settori come il trasporto, edilizia, agricoltura e industria. Tali sforzi sono necessari affinché l'UE raggiunga l'obiettivo di una riduzione complessiva del 55% delle emissioni di gas ad effetto serra entro il 2030;
- Rafforzamento delle energie rinnovabili e dell'efficienza energetica: si prevede di aumentare l'utilizzo nell'area UE delle fonti rinnovabili, al fine di promuovere l'utilizzo di energia pulita nei diversi settori della società e ridurre il consumo complessivo di energia;
- Tassonomia delle attività economiche sostenibili: si propone una tassonomia delle attività economiche sostenibili, che definisce quali sono i criteri per giudicare se un'attività sia o meno sostenibile in termini ambientali. Ciò ha lo scopo di favorire il finanziamento delle attività sostenibili scoraggiandone invece quello delle attività dannose per l'ambiente;

- Riforma della Politica Agricola Comune (PAC): si prevedono nuove misure di finanziamento per le aziende agricole che intendano adottare pratiche agricole sostenibili, come la promozione dell'agricoltura biologica, al fine di rendere l'agricoltura europea più sostenibile.

2.3 Design for X

L'approccio dell'economia circolare, modello economico che mira a ridurre la quantità dei rifiuti prodotti favorendo la riparazione, il riuso e il riciclo dei materiali, è strettamente correlato al concetto di Design for X.

Il Design for X, anche noto come DfX, è un approccio progettuale che mira a soddisfare un obiettivo specifico che l'azienda si prefigge di raggiungere. La "X" nella denominazione "Design for X" è una variabile che può rappresentare diversi obiettivi o criteri di design, come la manutenibilità, la producibilità, la sostenibilità, la sicurezza, e molti altri. Attenzionando in particolare il fine vita del prodotto si riporta di seguito una spiegazione dettagliata di alcuni dei più comuni approcci DfX.

2.3.1 Design for Environment (DfE)

Il Design for Environment (DfE), noto anche come eco-design, è un approccio progettuale che integra riflessioni prettamente ambientali durante le fasi di sviluppo e progettazione del prodotto. Lo scopo principale del DfE è quello di minimizzare l'impatto ambientale del prodotto prendendo in considerazione l'intero ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino alla fase di smaltimento del prodotto. Un aspetto fondamentale del Design for Environment è la scelta dei materiali costituenti il prodotto:

- Materiali sostenibili: si utilizzano materiali provenienti da fonti rinnovabili o che sono facilmente riciclabili;
- Materiali non dannosi: si evita l'utilizzo di sostanze chimiche pericolose o tossiche sia per la salute umana che per l'ambiente.

La riduzione dell'impatto ambientale di un prodotto passa anche attraverso l'efficienza energetica dello stesso, infatti tale approccio progettuale mira sia a sviluppare prodotti che siano in grado di consumare poca energia durante la propria fase di utilizzo che a ottimizzare (riducendo principalmente le emissioni di carbonio) i processi produttivi necessari alla loro realizzazione.

2.3.2 Design for Recycling (DfR)

Il Design for Recycling (DfR) è un approccio progettuale che mira alla progettazione e sviluppo di prodotti che possano essere facilmente riciclati al termine della loro vita utile. Lo scopo principale del DfR è facilitare il recupero ed il riciclo dei materiali costituenti il prodotto, riducendo in maniera sensibile la quantità di rifiuti. L'ottenimento di questo obiettivo passa inevitabilmente, per una scelta accurata dei materiali, come nel caso del Design for Environment:

- Materiali riciclabili: si favorisce l'utilizzo di materiali riciclati o riciclabili come metallo o vetro, mentre viene evitato l'uso di materiali che non hanno infrastrutture di riciclaggio disponibili;
- Materiali monocomponente: si favorisce la realizzazione del prodotto attraverso l'utilizzo di un solo materiale o di pochi materiali che possano essere separati agevolmente durante la fase di disassemblaggio;
- Evitare materiali compositi: viene evitato l'utilizzo di materiali compositi in quanto estremamente difficili da separare in fase di disassemblaggio del prodotto;
- Compatibilità dei materiali: favorire l'utilizzo di materiali compatibili, ossia materiali che possano essere riciclati mediante le medesime infrastrutture, ottimizzando così la fase di riciclo.

2.3.3 Design for Disassembly (DfD)

Il Design for Disassembly (DfD) è un approccio progettuale che mira alla realizzazione di prodotti che possano essere agevolmente disassemblati al termine del loro ciclo di vita. Tale approccio favorisce il recupero ed il riutilizzo dei materiali minimizzando la quantità dei rifiuti prodotti, proprio per questo motivo il DfD è particolarmente rilevante nell'ambito dell'economia circolare che mira ad utilizzare i materiali il più a lungo possibile. Gli aspetti chiave del Design for Disassembly sono molteplici:

- Scelta dei materiali: si favorisce l'utilizzo di materiali riciclati e riciclabili evitando l'utilizzo di sostanze tossiche che possano causare effetti negativi sulla salute umana e sull'ambiente;
- Scelta dei metodi di giunzione: preferire l'utilizzo di viti, clip o altre tipologie di giunzioni che possano essere rimosse facilmente rispetto a saldature o adesivi. Inoltre, vengono favorite tipologie di giunzioni che richiedono strumenti facilmente accessibili per il loro smontaggio;
- Riduzione della complessità: preferire la progettazione di prodotti costituiti da pochi componenti che siano facilmente identificabili e separabili. Inoltre, si favorisce l'utilizzo di componenti standardizzati;
- Accessibilità dei componenti: bisogna assicurare che i componenti siano facilmente accessibili e removibili. Ciò può essere favorito da una struttura modulare del prodotto in esame dove i singoli componenti possono essere sostituiti o aggiornati senza la necessità di disassemblare l'intero prodotto.

2.4 Facilità di disassemblaggio a supporto dell'economia circolare

Come affermato in precedenza, le strategie di economia circolare incoraggiano azioni concrete mirate a prolungare la vita utile dei prodotti. Le attività di riparazione e riutilizzo di un prodotto piuttosto che il riciclo dei suoi materiali costituenti necessitano tutte di un accesso facilitato ai componenti del prodotto stesso. Di conseguenza, la riduzione dei tempi necessari alla fase di smontaggio e dei suoi

relativi costi comporta un aumento della fattibilità economica di aumentare la vita utile del prodotto, in accordo con i principi dell'economia circolare.

Proprio per questo motivo la Commissione Europea ha considerato la possibilità di definire delle linee guida di progettazione mirate a facilitare, sia in termini di tempo che di energia, la fase di disassemblaggio dei prodotti. Nonostante tale intento comune, ad oggi, non esiste un vero e proprio metodo standardizzato che permetta di valutare in maniera rigorosa la facilità di smontaggio di un prodotto, prendendo in considerazione sia il tempo impiegato che le energie utilizzate.

Il piano d'azione messo in atto dall'Unione Europea per l'economia circolare ha espresso la necessità di definire degli standard sull'efficienza dei materiali con l'obiettivo di definire futuri metodi di progettazione ecocompatibile in termini di durabilità, riparabilità e riciclabilità dei prodotti, come stabilito nell'articolo COM(2015) reso disponibile dalla Commissione Europea in data 2/12/2015.

Pertanto, è fondamentale definire una metrica che sia in grado di valutare la facilità di disassemblaggio in modo tale da quantificare la misura in cui sia effettivamente realistico smontare i componenti senza distruggerli al fine del loro riutilizzo o della loro riparazione. Nei paesi industrializzati, il riciclaggio dei prodotti complessi (perlopiù prodotti di natura elettronica) avviene mediante un processo di sminuzzamento e con la separazione automatizzata dei materiali costituenti il prodotto. Tale modalità permette un tasso di recupero molto elevato di alcuni materiali come acciaio o alluminio, mentre mostra delle criticità per quanto riguarda il recupero dei metalli preziosi e di particolari materie plastiche. Quindi, favorire le attività di disassemblaggio comporta dei benefici non solo in termini di durata della vita utile del prodotto ma anche in termini di recupero dei metalli preziosi e delle materie plastiche. Proprio nell'ambito del recupero dei materiali preziosi e pericolosi di un prodotto, l'UE ha deciso di introdurre nel 2012 delle vere e proprie direttive mirate a gestire in maniera efficiente i rifiuti provenienti da apparecchi elettronici.

2.4.1 Gestione dei rifiuti RAEE

L'acronimo RAEE sta per "Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche", ossia rappresenta tutti quei rifiuti provenienti da oggetti che per

funzionare dipendono dalla corrente elettrica o che sono alimentati da pile e batterie. La gestione dei rifiuti RAEE, classificabili come rifiuti domestici piuttosto che professionali, viene definita dal Decreto Legislativo 14 marzo 2014 n. 49 entrata in vigore il 13 agosto 2012, il quale recepisce la Direttiva europea 2012/19/UE.

Il sistema di raccolta RAEE si basa su un modello multi-consortile che coinvolge diversi attori, ciascuno con le proprie responsabilità ma legati da un obiettivo comune, ossia collaborare nell'ottica dell'economia circolare fornendo una gestione sostenibile nell'ambito dei rifiuti elettronici.

La direttiva RAEE viene applicata ad una vasta gamma di apparecchiature elettriche ed elettroniche, inclusi grandi elettrodomestici, elettrodomestici da cucina, apparecchiature informatiche e di telecomunicazione, attrezzatura sportiva e altri. La stessa direttiva impone ai produttori di tali apparecchiature di assumersi la responsabilità in merito alla gestione dei rifiuti provenienti dai propri prodotti commercializzati, infatti, essi sono tenuti a finanziare ed organizzare la raccolta, il trattamento ed il riciclo di tali rifiuti elettronici. Allo stesso tempo viene richiesto ai produttori di garantire una progettazione dei propri prodotti mirata a facilitare il recupero dei materiali a fine vita. La direttiva include anche delle disposizioni per prevenire illeciti nell'ambito dello smaltimento dei rifiuti elettronici, come ad esempio l'esportazione degli stessi verso paesi terzi non coperti dalla direttiva in esame.

2.5 Valutazione della facilità di disassemblaggio

Le metriche per valutare la facilità di disassemblaggio possono essere classificate:

1. Metriche assolute come tempo o energia;
2. Metriche relative come efficacia della progettazione.

I dati necessari per ottenere le metriche assolute sono nettamente più facile da ricavare. Tra le metriche assolute il tempo viene riconosciuto come un valido indicatore di disassemblaggio in quanto ricavabile facilmente, mentre altre metriche, come l'energia, sono ritenute più difficili da ricavare e comprendere. A supporto di

quanto appena riportato, il tempo è già stato utilizzato come metrica assoluta per la valutazione della facilità di disassemblaggio nell'ambito dell'etichettatura ambientale dei prodotti da parte di EcoLabel UE.

Il tempo di smontaggio parziale o completo di un prodotto può essere determinato attraverso due vie alternative: misurazione diretta oppure calcolo basato sui parametri del prodotto. La modalità più semplice è rappresentata dalla misurazione diretta del tempo di smontaggio di prodotti appartenenti alla stessa categoria da parte di più operatori aventi diversa esperienza. Tale modalità diretta, seppur la più semplice, presenta delle criticità: è una metodologia ad alta intensità di lavoro e non riproducibile in quanto influenzato da diversi fattori umani. Inoltre, eventuali effetti, in termini di tempo di smontaggio, dovute a modifiche progettuali a monte, non possono essere valutate a priori se non attraverso una nuova misurazione diretta. Proprio a causa di tali criticità è stato sviluppato un metodo in cui il tempo di smontaggio viene calcolato con una formula standardizzabile che utilizza come input parametri geometrici e fisici del prodotto stesso.

In letteratura scientifica possono essere annoverati due diversi approcci per la valutazione del tempo di smontaggio:

1. Approccio basato sulle proprietà del prodotto e sul tipo di connettori presenti in esso;
2. Approccio basato sulla tipologia di movimenti basilari necessari per le attività di smontaggio del prodotto.

Alla prima categoria appartiene il metodo U-effort, mentre i principali metodi appartenenti alla seconda categoria sono il metodo Philips ECC, il metodo Kroll e il metodo Desai & Mital.

2.5.1 Metodo U-effort

Il metodo U-effort è stato sviluppato da Sodhi come supporto ai progettisti nell'attuazione della progettazione per il disassemblaggio (Design for Disassembly, DfD). In tale metodo il tempo di smontaggio viene calcolato per ogni connettore tenendo conto delle sue proprietà fisiche, più precisamente il

metodo U-effort calcola per ogni connettore l'indice UFI (Unfastening Effort Index, indice dello sforzo di sgancio) che permette di tenere conto delle caratteristiche del connettore come forma e dimensione che inevitabilmente vanno ad influenzare il tempo di smontaggio dello stesso. Il metodo U-effort calcola il tempo di smontaggio per connettore (espresso in secondi) da parte di operatori con media esperienza.

Il punteggio UFI di ciascun connettore viene calcolato sulla base della tipologia di connettore in esame e su una serie di attributi, che ad esempio nel caso di una vite potrebbero essere la lunghezza, il diametro, la forma della testa piuttosto che l'uso o meno di rondelle.

2.5.2 Metodo Philips ECC

Il metodo Philips ECC è stato sviluppato dal famoso produttore di elettronica di consumo con l'obiettivo di valutare con precisione i costi relativi alla fase di smontaggio del prodotto. Il tempo di smontaggio viene calcolato sulla base di un database contenente i tempi per lo smontaggio delle diverse tipologie di connettori e per le attività specifiche come il cambio degli strumenti piuttosto che la movimentazione dei componenti. Quindi una volta nota la sequenza di smontaggio e la tipologia di connettore in esame, il modello determina automaticamente la movimentazione richiesta, lo strumento necessario e il tempo di smontaggio in base alle informazioni riportate nel database.

2.5.3 Metodo di Kroll

Kroll ha sviluppato un metodo che permette di calcolare il tempo necessario allo smontaggio sulla base del MOST e di esperimenti di smontaggio manuale effettuati con computer, tastiere, monitor e stampanti. Sono state definite 16 diversi compiti fondamentali di smontaggio (ad esempio svitare, girare o forare) e 4 categorie di complessità: accessibilità, posizionamento, forza e speciale, quest'ultima tiene conto di aspetti non standard del prodotto in esame. Il metodo di Kroll presuppone che l'operatore conosca la sequenza di smontaggio e che gli strumenti necessari a ciò siano disponibili. I risultati così

ottenuti permettono di confrontare in modo quantitativo i tempi di smontaggio dello stesso prodotto, il quale può essere soggetto a diverse modifiche progettuali in modo tale da identificare lo sviluppo progettuale che maggiormente è in linea con i principi del Design for Disassembly. Inoltre, tale metodo permette la previsione dei costi relativi alla fase di smontaggio parziale o completa del prodotto.

2.5.4 Metodo di Desai & Mital

Gli studiosi Desai e Mital hanno implementato un metodo che permette di valutare i tempi di smontaggio sulla base di cinque fattori: forza necessaria alle attività di smontaggio, movimentazione dei componenti, utilizzo degli strumenti necessari allo smontaggio, accessibilità ai componenti del prodotto ed agli elementi di connessione e posizionamento degli strumenti. Questo metodo definisce dapprima il tempo di smontaggio delle attività di base al quale vengono sommati tempi aggiuntivi sulla base dei cinque fattori citati in precedenza. Inoltre, il valore finale del tempo di smontaggio può essere soggetto ad una penalizzazione dovuta a particolari posture che devono essere assunte dall'operatore che effettua le attività di smontaggio.

2.5.5 Confronto tra i metodi di calcolo del tempo di smontaggio

I principali svantaggi del metodo U-effort sono dovuti al fatto che ciascuna tipologia di connettore è caratterizzato da attributi causali e dal relativo peso nel calcolo del tempo di smontaggio. Quindi, alla base del calcolo del tempo di smontaggio è necessario che vi sia la conoscenza degli attributi causali e dei relativi pesi delle diverse tipologie di connettori, ciò riduce sensibilmente la possibilità di applicazione di tale metodo per una vasta gamma di prodotti che presentano diversi tipi di elementi di fissaggio. Inoltre, il metodo U-effort tiene conto esclusivamente del tempo necessario per la disconnessione degli elementi di fissaggio trascurando altri fattori come il tempo necessario all'identificazione del tipo di connettore, al cambio degli strumenti piuttosto che alla loro movimentazione. Nella pratica delle attività di smontaggio si registra che la quota relativa alla fase di disconnessione delle connessioni

rappresenta neanche il 50% del tempo totale necessario allo smontaggio, da ciò consegue che il tempo calcolato con il metodo U-effort deve essere maggiorato tenendo conto di tutti gli altri aspetti non presi in considerazione dal metodo ma che inevitabilmente hanno un peso specifico importante nelle attività di smontaggio del prodotto.

L'applicazione dei metodi Philips ECC e Kroll a prodotti elettronici come monitor hanno mostrato risultati molto simili tra loro e congruenti con il tempo di smontaggio calcolato in maniera diretta. Mentre il metodo di Kroll non è specifico per una particolare categoria di prodotto, consentendone l'applicazione a diverse classi di prodotti elettronici, il metodo Philips ECC è specifico per determinate categorie di prodotto, quindi, la sua applicazione ad altre categorie non contemplate all'origine del suo sviluppo provoca una sensibile riduzione della precisione e attendibilità dei risultati. Il metodo di Kroll permette di ottenere risultati con buona attendibilità in quanto tiene in considerazione una vasta gamma di condizione delle attività di smontaggio, ma allo stesso tempo la stima dei tassi di difficoltà vengono effettuati dall'operatore e ciò può essere fonte di ambiguità in quanto soggetta a valutazioni prettamente umane.

Il principale svantaggio del metodo Desai & Mital è da riscontrare nella valutazione del tempo di smontaggio in quanto tiene conto esclusivamente del tempo necessario alla disconnessione dei connettori trascurando i tempi necessari al raggiungimento degli strumenti, alla loro manipolazione e al loro riposizionamento nella posizione iniziale, da ciò ne deriva che la stima ottenuta del tempo di smontaggio risulta incompleta. Al contrario del metodo Philips ECC che si basa su un ampio database riportante le medie dei tempi di smontaggio misurate, i metodi di Desai & Mital e di Kroll hanno radici più comuni in quanto il tempo di smontaggio calcolato si basa su studi dei tempi e movimenti degli operatori che effettuano attività di smontaggio in condizioni di vita reale.

La seguente tabella riassume gli obiettivi e le principali criticità dei metodi precedentemente analizzati.

Metodo	Obiettivo	Tipologia di approccio al calcolo	Vantaggi / Svantaggi
U-effort	A sostegno della progettazione mirata al disassemblaggio (Design for Disassembly)	Basato sulle proprietà dei connettori	Oggettivo: basato sulle proprietà del prodotto Elevato sforzo per la modellazione di nuovi tipi di connettori
Philips ECC	Calcolo dei costi EoL	Basato su un database contenente gli effettivi tempi di smontaggio	Semplice: basato su misurazioni dirette Specifico del prodotto
Kroll	A sostegno del Design for Disassembly (DfD)	I fattori che influenzano il disassemblaggio sono valutati con il MTM	Flessibile: basato sull'analisi del tempo e del movimento Basato sul MTM, il quale è considerato poco pratico
Desai & Mital	A sostegno della progettazione mirata al riciclo (Design for Recycling)	Tempo base per le tipologie di connettori e punteggi di difficoltà basati sul MOST	Flessibile: basato sull'analisi del tempo e del movimento Può portare a dettagli eccessivi Tassi di difficoltà soggettivi

Tabella 2.1: Obiettivi, caratteristiche e vantaggi/svantaggi dei metodi di valutazione della complessità di disassemblaggio presenti in letteratura scientifica

2.6 Motivazioni dello sviluppo del SW ElectroSpindleTool

Come anticipato in precedenza la letteratura scientifica ci fornisce dei metodi più o meno accurati che valutano la complessità di disassemblaggio di un prodotto, ma la maggior parte di questi necessita di misurazioni dirette del tempo di smontaggio da parte di un operatore, rendendo tale procedura poco pratica e dispendiosa sia in termini economici che di tempo. Da tale mancanza è nata la necessità di sviluppare un software che in maniera semi automatica permetta di valutare sia l'impatto ambientale che la complessità di disassemblaggio del prodotto in esame. L'Università Politecnica delle Marche, in collaborazione con l'azienda HSD, ha colto questa sfida

riuscendo a sviluppare un software che permette di valutare l'impatto ambientale del prodotto e la sua complessità di disassemblaggio sfruttando unicamente il file CAD dell'assieme in esame. Sia la valutazione dell'impatto ambientale che della complessità di disassemblaggio sono accompagnate dal calcolo di opportuni indici come quello di riciclabilità e di complessità di maneggevolezza piuttosto che di smontaggio. Il software sviluppato è denominato ElectroSpindleTool in quanto l'azienda collaboratrice aveva la necessità di condurre una valutazione nei confronti di un elettro mandrino, ma ciò non limita il campo di applicazione dello strumento, infatti, il software può essere utilizzato per condurre valutazioni nei confronti di qualsiasi tipologia di prodotto, elettronico, meccanico o altro.

L'ultimo decennio è stato caratterizzato da una crescita rilevante della sensibilità ambientale da parte dei clienti, questo significa che in fase di acquisto c'è una maggiore propensione nella scelta di prodotti che abbiano una forte compatibilità ambientale. La possibilità di sfruttare un software come ElectroSpindleTool rappresenta un enorme vantaggio per le aziende, in quanto permette di rivisitare la fase di progettazione del prodotto secondo quelli che sono i canoni dettati dall'eco-design, presentando quindi sul mercato prodotti a basso impatto ambientale e permettendo all'azienda di acquisire maggiore competitività nella propria fascia di mercato.

3. Strumenti software

Nella realizzazione di questo progetto di tesi sono stati utilizzati principalmente tre strumenti software: ElectroSpindleTool, SimaPro e SolidEdge. Di seguito si passa in rassegna le principali caratteristiche e funzionalità dei tre software.

3.1 ElectroSpindleTool

ElectroSpindleTool è un software sviluppato internamente all'Università Politecnica delle Marche, il cui obiettivo principale è la valutazione dell'impatto ambientale e della complessità di disassemblaggio del prodotto in esame mediante il calcolo di opportuni indici, il tutto utilizzando come input il file CAD dello stesso.

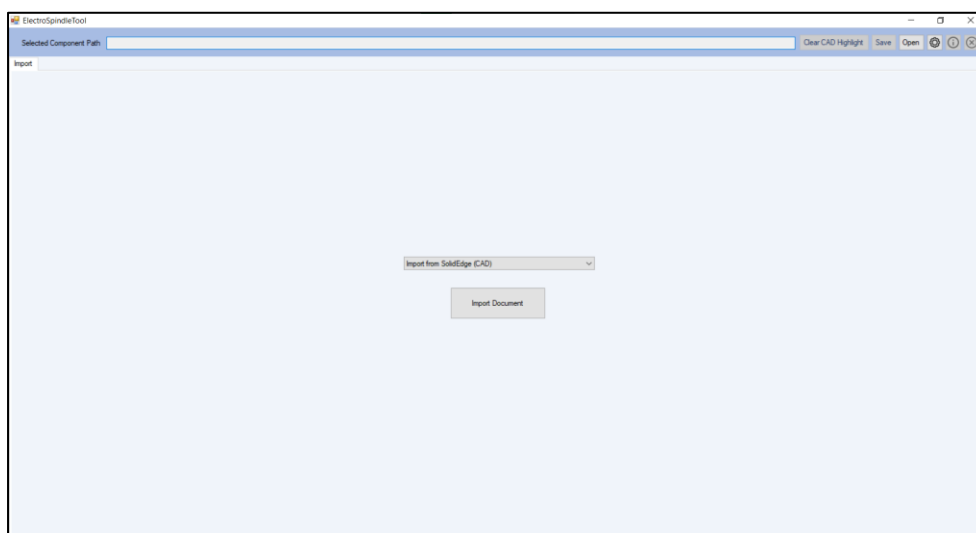


Figura 3.1: Interfaccia iniziale software ElectroSpindleTool

La schermata iniziale del software suggerisce la possibilità di importare un file CAD contenente l'assieme oggetto di analisi. L'importazione del file CAD avviene in modalità automatica, infatti, all'apertura del software ElectroSpindleTool è sufficiente tenere selezionata la finestra di SolidEdge relativa all'assieme interessato. La fase di importazione non riguarda esclusivamente il file d'assieme, bensì con esso vengono importate anche una serie di informazioni relative, ad esempio, al materiale assegnato ai singoli componenti, alla loro massa, piuttosto che alle relazioni di assemblaggio utilizzate per la realizzazione dell'assieme partendo dalle singole parti. Terminata la fase di importazione il software si presenta suddiviso in sei principali moduli:

- Component Structure;
- Environmental Impacts;
- Recyclability Index;
- Disposal Collection;
- Liaisons View;
- Disassembly Index.

Di seguito si analizzano in maniera dettagliata le principali funzionalità dei sei moduli citati in precedenza.

3.1.1 Component Structure

Component	Component Description	Material	Mass [g]	Obstruction [mm]	Is Atomic	Component Type
sempunto par		Cast iron	3.0591	140.01x140x12mm		
elemento elastico par (3 occurrences)		Plastics - ABS	0.0032	27.41x27.4x16.01mm		
rosetta spessore 1 par (3 occurrences)		Steel low-alloyed	0.0021	19.24x19.23x2.01mm		
Anello 12 UNI 7435 par (3 occurrences)		Steel low-alloyed	0.0005	17.83x16.91x1.01mm		Retaining rings (cylindrical)
perno filettato par (3 occurrences)		Steel low-alloyed	0.0442	13.83x13.82x40mm		Screw standard head
rosetta UNI 1751 - 810 par (3 occurrences)		Steel low-alloyed	0.0028	25.21x25.21x2.21mm		
Dado M10 UNI 5588 par (3 occurrences)		Steel low-alloyed	0.0116	24.22x22.63x0.01mm		Nut
rosetta spessore 2 par (3 occurrences)		Steel low-alloyed	0.0042	25.1x25.1x4.01mm		

Figure 3.2: Interfaccia Component Structure software ElectroSpindleTool

Il modulo denominato “Component Structure” ha l’obiettivo di visualizzare l’assieme importato da SolidEdge ed i rispettivi componenti. Qualora nell’assieme importato fossero presenti dei sottoassiami, per visualizzarne i componenti sarà necessario fare un doppio click sul nome dello stesso. I componenti costituenti l’assieme vengono presentati sottoforma di lista, nella quale per ognuno di esso vengono indicate una serie di informazioni:

- Component: i componenti vengono citati utilizzando lo stesso nome assegnato in fase di realizzazione dell’assieme in SolidEdge e per

ognuno di esso viene riportata una descrizione (Component Description) qualora fosse presente.

- **Material:** ad ogni componente viene assegnato il corrispondente materiale. Le informazioni relative ai materiali vengono importate da SolidEdge ma questi possono presentarsi con una dicitura diversa in quanto il software ElectroSpindleTool sfrutta i database di SimaPro per la selezione dei materiali, e di conseguenza utilizza una nomenclatura attinente ad esso.
- **Obstruction:** per ogni componente viene indicato l'ingombro espresso in mm, più precisamente vengono riportate le misure del più piccolo parallelepipedo in grado di contenerlo interamente.
- **Component Type:** ad ogni componente viene attribuita la propria tipologia di appartenenza. Tale classificazione viene svolta automaticamente dal software sulla base del nome assegnato al componente ma, in presenza di mancanze od errori, è possibile settare manualmente tale assegnazione. Per tipologie di componenti si indicano le diverse possibili modalità di collegamento tra i componenti presenti nell'assieme. Le modalità di collegamento disponibili sono: retaining rings/circlips, screw speciality head, nut, adhesive, rivets/straples, headless nail or pin, releasable clips, tape, headful nail, screw standard head, glued screw stadard head e velcro/zipper. Questa fase di assegnazione ai componenti della propria categoria di appartenenza è estremamente importante in quanto, sulla base di essa, il software in seguito valuterà quantitativamente la complessità di disassemblaggio del prodotto.

3.1.2 Environmental Impacts

Il modulo "Environmental Impacts" ha l'obiettivo principale di mostrare in maniera quantitativa l'impatto ambientale del prodotto, il tutto coadiuvato dall'utilizzo di appositi grafici.

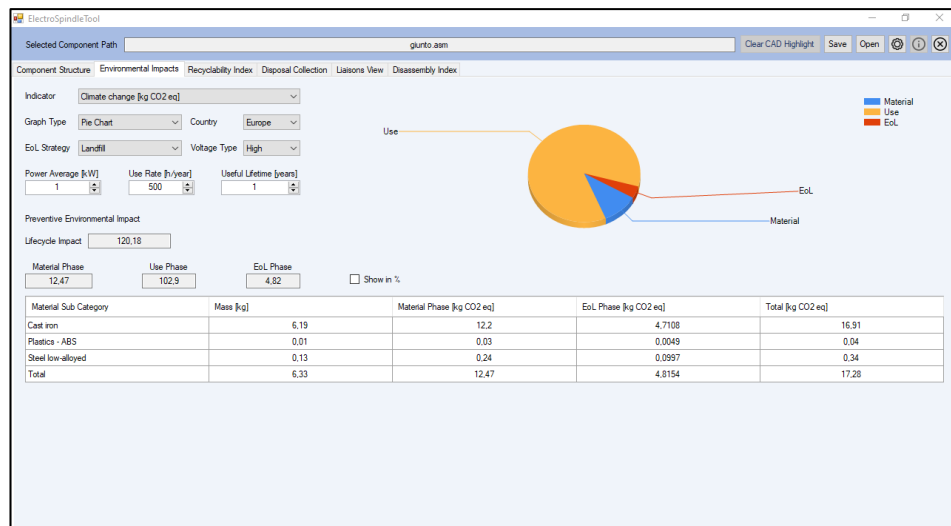


Figura 3.3: Interfaccia Environmental Impact software ElectroSpindleTool

Mediante l'apposito menù a tendina denominato "Indicator" si ha la possibilità di valutare l'impatto ambientale del prodotto in esame facendo riferimento a diverse categorie d'impatto, in accordo con quanto riportato nelle rispettive normative europee.

La valutazione dell'impatto ambientale del prodotto viene svolta considerando esclusivamente la fase di estrazione delle materie prime costituenti il prodotto, la sua fase di utilizzo e la fase di gestione del fine vita dello stesso. Affinché possa essere valutata la fase di utilizzo del prodotto è necessario settare una serie di impostazioni:

- Consumo elettrico del prodotto quando è in funzione [KW];
- Tasso di utilizzo del prodotto [h/year];
- Durata della vita utile del prodotto [year];
- Tipo di voltaggio (basso, medio o alto);
- Paese in cui il prodotto viene assemblato ed utilizzato.

La valutazione della fase di fine vita del prodotto può essere condotta secondo tre diverse strategie: Landfill (smaltimento in discarica), Incineration (incenerimento con recupero di energia) oppure Recycling (recupero e riciclo dei materiali). Terminata la fase di settaggio di tutte le impostazioni, il

suddetto modulo permette di visualizzare l'impatto ambientale del prodotto attraverso uno schema che riporta le diverse categorie di materiali costituenti il prodotto e per ognuna di essa il corrispondente impatto ambientale suddiviso nelle tre fasi precedentemente analizzate. Il risultato conseguito è facilmente interpretabile grazie all'ausilio di appositi grafici (Pie chart, Bar chart o Stacked Bar 100 chart) che permettono di visualizzare visivamente l'intero impatto ambientale del prodotto suddiviso nelle tre fasi prese in considerazione.

3.1.3 Recyclability Index

Il modulo "Recyclability Index" permette di valutare la riciclabilità o meno del prodotto dipendentemente dai materiali di cui è costituito. L'analisi di riciclabilità viene svolta settando la tipologia di categoria d'impatto da prendere in considerazione e la strategia di gestione di fine vita (opzionabile su Landfill o Incineration).

La valutazione viene eseguita attraverso il calcolo di due indici, rispettivamente RBR_n e R_{cyc} . La formula utilizzata dal software per il calcolo dell'indice RBR_n è la seguente:

$$RBR_n = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{recyc,i} \times RCR_{ij} \times (V_{n,ij} + D_{n,ij} - R_{n,ij})}{\left(\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times V_{n,ij} + M_n + U_n + \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times D_{m,ij} \right)} \quad [3.1]$$

I parametri presenti all'interno della formula sono i seguenti:

- $m_{recyc,i}$: indica la massa riciclabile di ogni materiale. Se un materiale è riciclabile viene considerata la sua massa per intero, se invece il materiale non è riciclabile allora $m_{recyc,i} = 0$;
- RCR_{ij} : rappresenta l'indice di riciclaggio intrinseco del materiale;
- $D_{n,ij}$: riguarda l'impatto relativo alla strategia di End of Life (EoL);

- $V_{n,ij}$: riguarda l'impatto relativo alla fase di estrazione dei materiali del prodotto;
- $R_{n,ij}$: riguarda l'impatto relativo alla strategia EoL con riciclo;
- m_{ij} : rappresenta la massa di ogni materiale, indipendentemente che sia riciclabile o meno;
- M_n : rappresenta l'impatto relativo alla lavorazione (processo produttivo) del prodotto;
- U_n : rappresenta l'impatto relativo alla fase d'uso del prodotto.

Invece, la formula utilizzata per il calcolo dell'indice R_{cyc} è la seguente:

$$R_{cyc} = \frac{\sum_{k=1}^n (m_k \times R_{cyc,k})}{m_{tot}} \times 100\% \quad [3.2]$$

I parametri presenti all'interno della formula sono i seguenti:

- m_k : indica la massa riciclabile di ogni materiale, equivale a $m_{recyc,i}$ presente nella formula dell'indice RBR_n ;
- $R_{cyc,k}$: rappresenta l'indice di riciclaggio intrinseco del materiale, equivale a RCR_{ij} presente nella formula dell'indice RBR_n ;
- m_{tot} : rappresenta la somma delle masse di ogni materiale, equivale a m_{ij} presente nella formula dell'indice RBR_n .

Anche in questo modulo i risultati conseguiti possono essere visualizzati mediante una Pie chart nella quale vengono mostrate diverse porzioni rappresentanti i materiali costituenti il prodotto. La dimensione di ogni porzione è proporzionale all'abbondanza del corrispondente materiale (espresso in massa %) all'interno del prodotto. Le diverse porzioni vengono rappresentate con tonalità azzurra se il corrispondente materiale è riciclabile oppure in rosso qualora non lo fosse.

3.1.4 Disposal Collection

Il modulo “Disposal Collection” permette di visualizzare i materiali che costituiscono il prodotto in esame classificandoli secondo la propria categoria di appartenenza. Lo scopo di questo modulo è mostrare la compatibilità a livello di smaltimento dei materiali che si trovano all’interno del prodotto in esame. La compatibilità dei materiali viene valutata sia a livello di gruppo, ovvero se tutti i materiali di un assieme sono composti dalla stessa classe di materiale (ad esempio alluminio, ferro, acciaio o altro) che a livello di sottogruppo, ovvero se tutti i materiali di un assieme sono composti dallo stesso tipo di materiale (ad esempio acciaio cromato, acciaio legato o altro). Tale analisi è estremamente importante nell’ottica di smaltimento del prodotto, infatti, se il gruppo o sottogruppo fosse realizzato con lo stesso materiale non si dovrebbero riscontrare problemi durante la fase di smaltimento, mentre in caso opposto tale fase potrebbe risultare molto più complessa e dispendiosa.

Utilizzando la metodologia appena descritta tale modulo mostra tutti i componenti appartenenti all’assieme sottoforma di lista e per ognuno di essi viene specificato il nome del componente (assegnatogli in SolidEdge), la sua massa, il nome del materiale ed infine la categoria e sottocategoria di appartenenza del materiale. Inoltre, mediante appositi grafici e tabelle, è possibile osservare la percentuale di massa di ciascuna categoria o sottocategoria di materiale rispetto alla massa complessiva dell’intero prodotto.

3.1.5 Liaisons View

Il modulo “Liaisons View” permette la visualizzazione dei collegamenti tra i componenti presenti nel prodotto. L’individuazione dei diversi collegamenti viene svolta automaticamente dal software sulla base sia del nome assegnato a ciascun componente che delle relazioni di vincolo utilizzati nella realizzazione dell’assieme all’interno di SolidEdge. Il modulo si presenta con la seguente interfaccia:

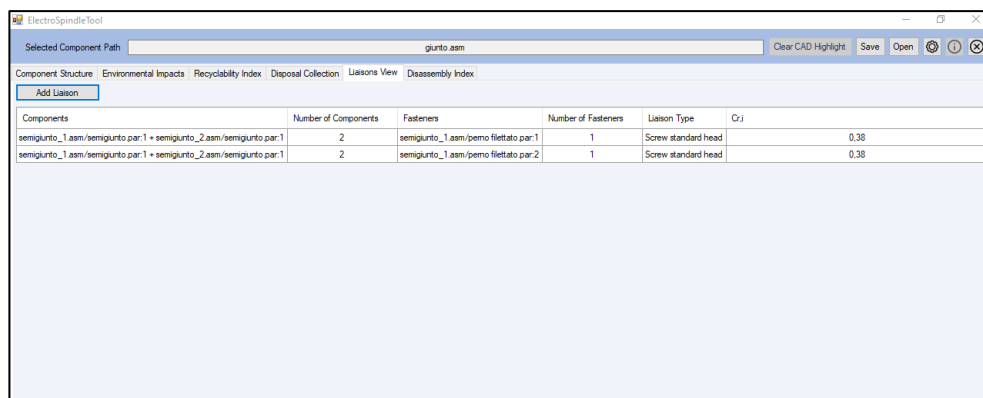


Figure 3.4: Interfaccia Liaisons View software ElectroSpindleTool

Per ciascun collegamento individuato all'interno del prodotto sono riportate una serie di informazioni. Partendo dalla colonna di sinistra e andando verso destra si leggono specifiche relative a:

- Nomi dei componenti che costituiscono il collegamento;
- Numero di componenti costituenti il collegamento in esame;
- Componenti “fasteners”, ossia gli elementi di collegamento che permettono l'unione tra i diversi componenti (vedi paragrafo 3.1.1);
- Numero dei componenti fasteners;
- Tipologia di collegamento;
- Indice di complessità di disassemblaggio $C_{r,i}$.

Qualora vi fossero delle mancanze o inesattezze nell'individuazione dei collegamenti da parte del software si ha la possibilità di intervenire manualmente modificando o eliminando un collegamento esistente oppure creando ex novo un collegamento mediante la funzione denominata “Add Liaison”. Qualora si decidesse di creare un nuovo collegamento si aprirebbe una finestra come quella riportata di seguito:

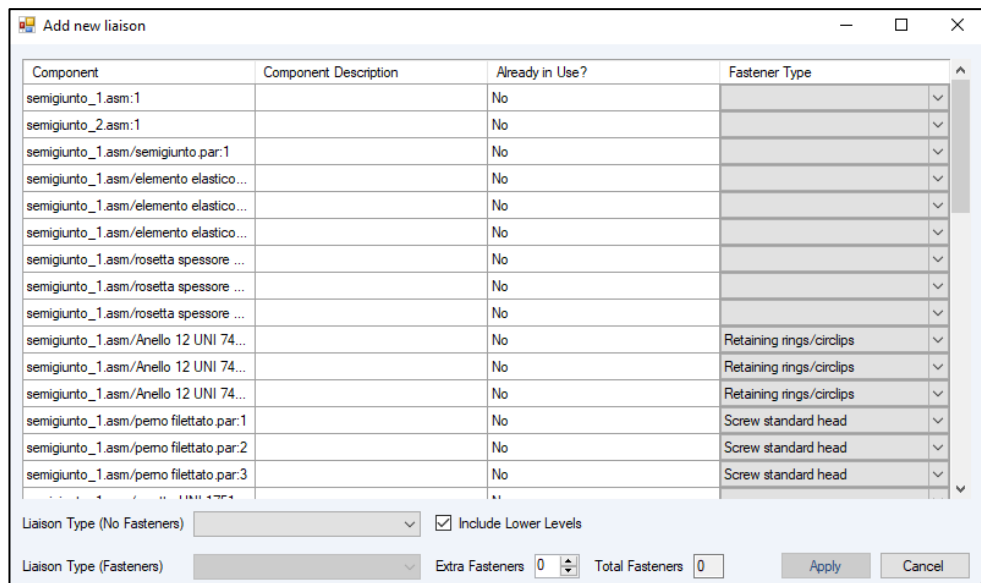


Figure 3.5: Interfaccia di inserimento collegamenti all'interno del software ElectroSpindleTool

Mediante questa interfaccia si ha la possibilità di inserire nuovi collegamenti selezionando manualmente, mediante il tasto destro del cursore, i componenti che costituiscono il collegamento stesso. Il software, durante la selezione, è in grado di riconoscere automaticamente i componenti fasteners evidenziandoli di arancione. Qualora l'assieme sia caratterizzato da uno o più sottoassiemi, per avere accesso ai componenti di quest'ultimi, è necessario applicare la spunta alla funzione "Include Lower Levels". Nell'elaborazione dell'assieme all'interno del software SolidEdge è possibile che alcuni elementi di collegamento, come ad esempio piccole viti, vengano trascurate. Questi elementi, non essendo presenti all'interno del file CAD importato, non vengono riconosciuti da ElectroSpindleTool. Il software però permette di bypassare questa criticità, infatti, si ha comunque la possibilità di selezionare i componenti costituenti il collegamento e nel momento della selezione degli elementi fasteners, non essendo questi presenti, si utilizza la funzione "Extra Fasteners" selezionandone sia il numero che la tipologia.

3.1.6 Disassembly Index

Quest'ultimo modulo denominato "Disassembly Index" permette la valutazione dell'indice di complessità di disassemblaggio. I componenti dell'assieme vengono mostrati sottoforma di lista e per ognuno di essi vengono riportati:

- L'indice di manovrabilità C_h ;
- L'indice di rimozione C_r ;
- L'indice I_{com} che risulta essere una media dei primi due.

L'indice di manovrabilità è definito come:

$$C_h = \frac{\sum C_{h,f}}{3}$$

$$\sum C_{h,f} = Rating_{size} + Rating_{Thickness} + Rating_{Mass} \quad [3.3]$$

Per il calcolo di $Rating_{size}$, $Rating_{Thickness}$ e $Rating_{Mass}$ è necessaria la valutazione del Size, del Thickness e dell'Operation Type.

Il Size rappresenta la diagonale della superficie sul piano tra le dimensioni di ingombro x, y e z:

$$Size = \sqrt{[max(x, y, z)]^2 + [somma(x, y, z) - max(x, y, z) - min(x, y, z)]^2} \quad [3.4]$$

Il Thickness, invece, rappresenta la dimensione minima tra x, y e z, ovvero lo spessore della parte:

$$Thickness = min(x, y, z) \quad [3.5]$$

Per evitare problemi relativi all'orientamento della parte rispetto al suo sistema di orientamento, le formule del Size e del Thickness risultano svincolate da tale aspetto.

L'Operation Type indica la possibilità di maneggiare il componente con una mano, con due mani piuttosto che in maniera automatizzata qualora il suo ingombro e/o massa siano elevati. Tale fattore, infatti, è definito attraverso la massa [Kg] e il Size [mm]. Entrando con queste due variabili all'interno della seguente tabella è possibile definire l'Operation Type.

		Mass [Kg]					
		< 1.125	< 2.25	< 3.375	< 4.5	< 20	> 20
Size [mm]	< 38	one hand	one hand	one hand	one hand	two hands	automation
	< 70	one hand	one hand	two hands	two hands	two hands	automation
	> 70	two hands	two hands	two hands	two hands	two hands	automation

Tabella 3.1: Logica di definizione dell'Operation Type

Determinati il Size, il Thickness e l'Operation Type è possibile calcolare il $Rating_{size}$, $Rating_{Thickness}$ e il $Rating_{Mass}$.

Per il calcolo del $Rating_{size}$ si utilizzano le seguenti formule:

$$\text{One hand: } Rating_{size} = 0.0003 * Size^2 - 0.0239 * Size + 0.9887$$

$$\text{Two hand: } Rating_{size} = 10^{-6} * Size^2 - 0.0013 * Size + 0.8983$$

[3.6]

Il $Rating_{Thickness}$ viene calcolato attraverso le seguenti formule:

$$\text{One hand: } Rating_{Thickness} = 0.0003 * Thickness^2 - 0.0199 * Thickness + 0.8703$$

$$\text{Two hand: } Rating_{Thickness} = 10^{-6} * Thickness^2 - 0.0013 * Thickness + 0.8983$$

[3.7]

Infine, il $Rating_{Mass}$ viene calcolato mediante la seguente formula:

$$Rating_{Mass} = 0.1778 * Mass$$

[3.8]

L'indice di rimozione $C_{r,i}$ consiste in un calcolo fatto per un singolo collegamento. Nel caso in cui siano presenti più collegamenti, una parte sia collegata a più parti oppure due parti siano collegati mediante molteplici collegamenti, si ripete il calcolo N-volte quanti sono i collegamenti (Number of Liaison) e si sommano tutti i $C_{r,i}$. Nel caso in cui lo stesso collegamento connetta più parti viene introdotto il parametro N_{pl} che indica il numero di

parti coinvolte in un singolo collegamento. In tal modo l'impatto della complessità di disassemblaggio è ripartito sul numero di parti coinvolte.

$$C_{r,i} = \frac{U_{effort} + \frac{R_{NumT} + R_{TR} + R_{OT}}{3}}{2N_{pl}}$$

$$C_r = \sum_1^N C_{r,i}$$

[3.9]

Il Rating Number of Tools Required R_{NumT} è calcolato mediante la seguente tabella:

Number of Tools	Rating
0 tools	0
1 tool	0.3
2 - 3 tools	0.6
> 4 tools	1

Tabella 3.2: Logica di definizione del Rating Number of Tools

Il Rating Tool Required R_{TR} è calcolato mediante la seguente tabella:

Tools Required	Rating
None	0
Air gun	0.3
Mechanic	0.6
Special	1

Tabella 3.3: Logica di definizione del Rating Tools Required

L'Operation Type è un parametro valutato in automatico attraverso la massa e il size come indicato nella tabella esaminata per il calcolo dell'indice di manovrabilità C_h . Il Rating Operation Type R_{OT} è calcolato in base alla seguente tabella:

Operation Type	Rating
None	0
One hand	0.3
Two hand	0.6
Automation	1

Tabella 3.4: Logica di definizione del Rating Operation Type

Ricapitolando quanto affermato in precedenza è possibile ricavare il valore del Rating relativo a ciascuna tipologia di collegamento sfruttando la seguente tabella. È necessario ricordare che con il termine “Fastener” si indica la presenza di un elemento di collegamento, invece, con il termine “No Fastener” si intende che il collegamento è ricavato direttamente sulla parte.

Fastener	Descrizione	Rating	Number of Tools	Tools Required
Retaining Rings / Circlips	Anelli di ritenzione	0,83	1 tool	Mechanic
Screw speciality head	Vite testa speciale	0,73	1 tool	Special
Nut	Dado	0,23	1 tool	Mechanic
Adhesive	Adesivo	0,70	0 tools	None
Rivets/Staples	Rivetti	0,67	1 tool	Mechanic
Nail w/o head or Pin	Chiodo senza testa o spillo	0,60	1 tool	Mechanic
Releasable Clips	Clip	0,60	0 tools	None
Tape	Nastro	0,57	0 tools	None
Nail with Head	Chiodo con testa	0,50	1 tool	Mechanic
Screw standard head	Vite con testa standard	0,47	1 tool	Mechanic
Glued screw standard head	Vite con testa standard con colla	0,83	2 tools	Mechanic
Velcro / Zipper	Velcro / Cerniera	0,83	0 tools	None
Free Part	Parte libera	0	0 tools	None
No Fastener	Descrizione	Rating	Number of Tools	Tools Required
Interference Fit_weak	Interferenza debole	0,63	1 tool	Air gun
Interference Fit_strong	Interferenza forte	1,00	2-3 tools	Mechanic
Integrally Threaded Part	Parte autofilettata	0,73	1 tool	Mechanic
Cylindrical Snapfit	Snapfit cilindrico	0,53	0 tools	None
Seam/Crimp Joint	Seam/Crimp Joint	0,53	0 tools	None
Cantilever Snapfit	Cantilever Snapfit	0,43	0 tools	None
Socket and Plug	Presca e spina	0,40	0 tools	None
Free part	Parte libera	0	0 tools	None

Tabella 3.5: Schema riassuntivo riportante il Rating dei collegamenti fastener e non fastener con descrizione del numero e della tipologia di tools necessari al loro smontaggio

Infine, la logica alla base del calcolo dell' U_{effort} è riportata nella seguente immagine. Anche in tal caso è necessario tenere presente che, il Number of Liaison indica il numero di collegamenti, cioè quanti collegamenti sono presenti su quella specifica parte o assieme, mentre il Number of Fastener

indica quante volte si ripete quello specifico elemento fastener per l'accoppiamento analizzato.

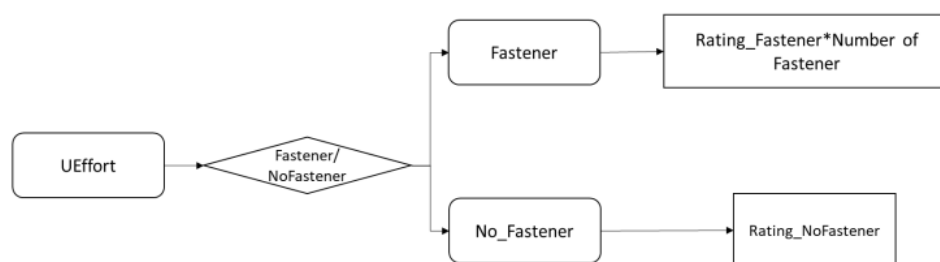


Figura 3.6: Logica di definizione del parametro U Effort

3.2 SimaPro



Figure 3.7: Logo software SimaPro

SimaPro è un software di valutazione del ciclo di vita (LCA) in grado di valutare l'impatto ambientale di prodotti e processi sulla base di una serie di indicatori, tra cui le emissioni di gas serra, l'utilizzo di risorse naturali e l'acidificazione del suolo. Il software SimaPro è distribuito in Italia dalla 2B (To-be), la quale si occupa dello sviluppo di soluzioni su misura per le esigenze dei propri clienti. È adatto ad un'ampia gamma di applicazioni, tra cui il reporting di sostenibilità, lo studio dell'impronta di carbonio e acqua, preparazione di dichiarazioni ambientali piuttosto che lo sviluppo di prodotti. In particolare, in ambito industriale, il software SimaPro è estremamente utile per identificare, lungo il ciclo di vita del prodotto, le fasi caratterizzate da un maggiore impatto ambientale in modo tale che si possa intervenire con lo scopo di migliorare la compatibilità ambientale dello specifico prodotto o servizio.

Gli strumenti utilizzati dal software per il calcolo degli impatti ambientali di un prodotto o servizio prendono il nome di “tools” e si basano sui processi disponibili all'interno del database LCA e sulla successiva elaborazione di questi dati. Tali tools sono costituiti da dataset, di processi e flussi unitari, secondo cui il software modella il prodotto in esame.

Gli input di cui ha bisogno il software sono tutte le informazioni specifiche del prodotto, ad esempio tipologia di materiale, peso, processi produttivi, modalità e costo di trasporto, tipologia di imballaggio e altro, allo stesso tempo sono necessarie informazioni relative alla riciclabilità o meno del materiale utilizzato piuttosto che la sua composizione chimica. Il software elaborando tutti i dati di input elabora in output l'impronta ambientale del prodotto o servizio esaminato secondo gli indicatori selezionati.

L'utilizzo del software SimaPro si esplica nei seguenti passaggi:

1. Definizione degli obiettivi: prima di procedere con l'analisi dell'impatto ambientale del prodotto o servizio è necessario stabilire gli obiettivi dell'analisi. Ad esempio, lo scopo dell'analisi potrebbe essere la valutazione ambientale di un nuovo prodotto da commercializzare piuttosto che il confronto con uno già esistente, oppure l'analisi potrebbe essere mirata all'individuazione, lungo il ciclo di vita del prodotto delle fasi che contribuiscono maggiormente al suo impatto ambientale totale.
2. Acquisizione dei dati: per condurre un'accurata analisi ambientale SimaPro necessita di una vasta gamma di dati che possono interessare diverse aree, tra cui informazioni sulle materie prime, sui processi produttivi, sull'energia utilizzata, sulla modalità di trasporto e di utilizzo del prodotto piuttosto che sulla gestione del fine vita dello stesso. SimaPro include un ampio database di inventari del ciclo di vita (Life Cycle Inventory, LCI) che fornisce informazioni predefinite sui vari processi e materiali, ma allo stesso tempo l'utente ha la possibilità di inserire nuovi dati o importarli da altre fonti.
3. Modellazione del ciclo di vita: una volta inseriti i dati, l'utente ha la possibilità di creare un modello del ciclo di vita del prodotto/servizio all'interno del software. Tale modellizzazione del ciclo di vita del prodotto permette di mettere in correlazione le diverse fasi tra loro.
4. Analisi dell'impatto: in seguito all'inserimento di tutti i dati e alla modellizzazione del ciclo di vita del prodotto, SimaPro valuta l'impatto ambientale del sistema in esame valutando gli effetti ambientali

dipendentemente dalla categoria d'impatto ambientale presa in considerazione.

5. Interpretazione dei risultati: al termine della valutazione dell'impatto ambientale SimaPro fornisce una serie di grafici e schemi che facilitano la comprensione del sistema in esame, permettendo di comprendere le modalità di intervento mirate al miglioramento della compatibilità ambientale del sistema analizzato.

Nel software SimaPro sono disponibili vari database:

- Ecoinvent: è una delle banche dati LCI più estese e maggiormente utilizzate. Contiene dati dettagliati su migliaia di processi industriali, materiali, risorse naturali utilizzate nei processi. Inoltre, include informazioni su energia, trasporti, agricoltura e molto altro.
- US LCI Database: include informazioni su processi industriali, trasporti, agricoltura e altri settori rilevanti per il mercato americano, risultando estremamente utile per gli utenti che si concentrano sul mercato statunitense.
- Agri-Footprint: banca dati contenente informazioni sui prodotti agricoli come tipologie di colture, mangimi, prodotti alimentari e biomasse.
- ELCD: contiene informazioni ufficiali, relative a materiali, energia, trasporti e gestione dei rifiuti, provenienti dalle principali industrie europee ed approvate dalle associazioni industriali.
- Database Input Output: banche dati contenenti perlopiù informazioni relative al settore economico.
- Industry Data Library: include dati raccolti dalle associazioni di categoria.

Una volta selezionato il database opportuno e definito il confine del sistema si procede con la modellizzazione del sistema stesso, sfruttando le informazioni in nostro possesso. Alla voce “fasi del prodotto” vengono elencate cinque macroaree:

1. Assemblaggio

2. Ciclo di vita
3. Scenario di fine vita
4. Disassemblaggio
5. Riuso

All'interno della voce "Assemblaggio" si definisce l'inventario di prodotto, partendo dall'insieme completo per poi passare ai vari sottogruppi mediante la correlazione genitore-figlio, fino a giungere alle materie prime e/o ai semilavorati di partenza. In seguito, si definisce lo Scenario di fine vita specificando quali pezzi o materiali andranno incontro ad un processo di riciclo (definendone anche la percentuale) o riutilizzo, piuttosto specificando la tipologia di smaltimento (discarica o incenerimento con recupero di energia) previsto per le parti non riciclabili o riutilizzabili. Nella voce "Ciclo di vita" si definisce tutta la vita del prodotto richiamando i dati inseriti nelle voci precedenti e inserendo la stima dei consumi durante la fase di uso del prodotto.

Una volta definito il sistema da analizzare si procede con il calcolo dell'impatto ambientale che necessita la scelta dei modelli di caratterizzazione e degli indicatori di categoria dipendentemente dagli aspetti che si vogliano analizzare nello studio in corso. I risultati dell'analisi vengono presentati sottoforma di dati quantificati numericamente, attraverso l'ausilio di tabelle e istogrammi.

SimaPro utilizza una serie di indicatori ambientali per valutare l'impatto ambientale di prodotti, processi o servizi durante l'analisi del ciclo di vita. Questi indicatori sono utilizzati per valutare gli aspetti negativi del prodotto, quindi, un indicatore positivo indica una condizione sfavorevole e tanto più è elevato il valore di tale indicatore tanto più gli effetti sono gravi. Tra gli indicatori ambientali maggiormente utilizzati nelle analisi LCA sono:

- Il Carbon Footprint: tale indicatore valuta le emissioni di gas serra associate a un prodotto/servizio durante l'intero ciclo di vita. Le emissioni di gas serra solitamente vengono espresse in termini di equivalente di anidride carbonica (CO₂ eq).

- Il Potenziale di Acidificazione dell'ambiente: tale indicatore valuta l'impatto delle emissioni di sostanze acide nei confronti dell'ambiente, le quali possono contribuire all'acidificazione del suolo e dell'acqua.
- Il potenziale di Eutrofizzazione: tale indicatore valuta l'impatto delle emissioni di nutrienti come azoto piuttosto che fosforo nei confronti dell'ambiente, le quali possono contribuire all'eccessiva crescita di alghe nell'ambiente acquatico portando a fenomeni di eutrofizzazione.
- La Formazione di Ozono Fotochimico: tale indicatore valuta l'impatto delle emissioni di sostanze che contribuiscono alla formazione di ozono a livello del suolo, un inquinante atmosferico dannoso per la salute umana e l'ambiente.

Gli indicatori di impatto vengono aggregati alle categorie d'impatto ambientale, infatti, essi devono essere in linea con i parametri definiti a livello internazionale, secondo quanto definito dall'International Organization for Standardization (ISO) e riportato nella norma UNI EN ISO 14044. Le categorie d'impatto ambientale sono definite secondo principi fisici e tengono conto dei rapporti ecologici causa-effetto tra gli indicatori d'impatto. Tra di esse possono essere citate le più comuni:

- Deplezione delle risorse non rinnovabili;
- Deplezione delle risorse naturali rinnovabili;
- Cambiamenti climatici;
- Acidificazione dell'ambiente;
- Eutrofizzazione;
- Formazione di ozono a livello del suolo;
- Ecotossicità terrestre ed acquatica.

3.3 SolidEdge



Figure 3.8: Logo software SolidEdge

Solid Edge è un software di progettazione assistita da computer (CAD) 3D sviluppato da Siemens Digital Industries Software. Si distingue per la sua tecnologia avanzata e le sue funzionalità in grado di coprire l'intero ciclo di vita della progettazione meccanica. Solid Edge viene utilizzato da ingegneri e progettisti di vari settori in quanto fornisce un potente strumento di modellazione, simulazione, gestione dei dati e altri strumenti.

Una delle caratteristiche più innovative di Solid Edge è la tecnologia di sincronizzazione (Synchronous Technology), che combina i vantaggi della modellazione parametrica e della modellazione diretta. Mentre la modellazione parametrica consente agli utenti di definire relazioni geometriche e vincoli che mantengono l'integrità del modello durante le modifiche, la modellazione diretta consente modifiche rapide e intuitive senza dover navigare attraverso un albero delle feature complesso. Questo approccio ibrido permette una maggiore flessibilità e velocità durante la fase di progettazione.

Il software include anche strumenti specifici per la progettazione di parti in lamiera, facilitando operazioni come lo sviluppo piatto e la creazione di pieghe, tagli e fori. Oltre alla realizzazione delle parti SolidEdge permette la creazione di assieme a partire dai singoli componenti precedentemente ottenuti, inoltre strumenti come "l'Interference Detection" aiutano a identificare e risolvere le interferenze tra i componenti, prevenendo problemi in fase di produzione.

Il software in questione integra, inoltre, potenti strumenti di simulazione e analisi per valutare le prestazioni dei progetti. L'analisi agli elementi finiti (FEA) permette di eseguire analisi strutturali, termiche e dinamiche sui componenti, aiutando a

identificare e risolvere problemi potenziali prima della produzione. La simulazione del movimento consente di analizzare il comportamento degli assiemi in movimento, migliorando l'affidabilità e la funzionalità del prodotto finale.

La combinazione di flessibilità, potenza e facilità d'uso fa di Solid Edge una scelta eccellente per le aziende e professionisti che cercano di migliorare la loro capacità di progettazione e di velocizzare i loro processi di sviluppo prodotto.

4. Primo caso studio: meccanismo biella manovella

Il primo caso studio si concentra sulla valutazione dell'impatto ambientale e della complessità di disassemblaggio di un meccanismo biella-manovella. Di seguito si riporta un'immagine del sistema in esame.

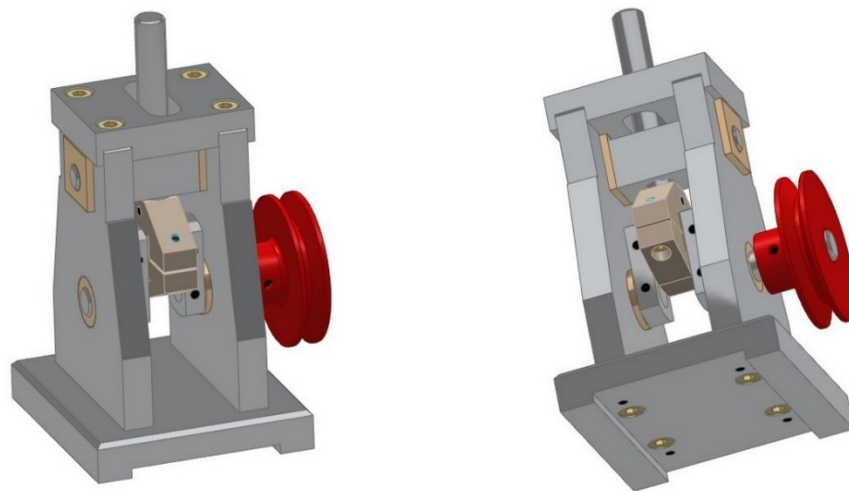


Figura 4.1: Meccanismo biella-manovella

L'assieme si presenta costituito da tre diversi sottoassiemi: 'supporto', 'puleggia', ed 'albero', ai quali si aggiunge un'ulteriore componente denominato 'pattino' per la realizzazione dell'assieme finale, per un totale di 38 componenti. A ciascun componente costituente il prodotto è stato assegnato un opportuno materiale all'interno del software SolidEdge. L'assegnazione del materiale a ciascun componente rappresenta una fase essenziale per la successiva valutazione dell'impatto ambientale del prodotto all'interno del software ElectroSpindleTool.

Componente	Materiale	Densità [Kg/mm3]	Massa [Kg]	Occorrenze nell'assieme
Base	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,8942	1
Vite M6 brugola esagonale	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,006	8
Spina 4 x 24	X10CrNi18.8	7,90E-06	0,0023	4
Supporto	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,6082	2
Bronzina circolare supporto	Lega di rame con 90% di bronzo	8,80E-06	0,0287	2
Bronzina rettangolare supporto	Lega di rame con 90% di bronzo	8,80E-06	0,064	2
Piastra	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,2353	1

Albero 2	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,0461	1
Puleggia	Alluminio 1060	2,71E-06	0,0794	1
Spina 4 x 20	X10CrNi18.8	7,90E-06	0,0019	4
Corpo di manovella	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,034	2
Fusto di biella	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,0211	1
Albero 1	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,0194	1
Morsetto up	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,0722	1
Morsetto down	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,0556	1
Bronzina quad	Lega di rame con 90% di bronzo	8,80E-06	0,0326	1
Vite M4 x 10 brugola esagonale	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,002	2
Albero 3	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,07	1
Spina 4 x 10	X10CrNi18.8	7,90E-06	0,0013	1
Pattino	Acciaio inossidabile 420	7,75E-06	0,0990	1
			3.17	38

Tabella 4.1: Tabella riportante i componenti presenti nell'assieme con relativa massa, densità del materiale e numero di occorrenze

L'importazione del file CAD di SolidEdge all'interno del software ElectroSpindleTool è seguita immediatamente dalla definizione degli elementi di collegamento presenti all'interno dello stesso. Gli unici elementi fasteners presenti nel prodotto sono:

- Vite M6 brugola esagonale presente in 8 occorrenze all'interno del sottoassieme “supporto” e definiti come Screw speciality head (vite a testa speciale);
- Vite M4 x 10 brugola esagonale presente in 2 occorrenze nel sottoassieme “albero” e definiti come Screw speciality head.

4.1 Environmental Impacts

Alla fase di definizione degli elementi fasteners segue la valutazione dell'impatto ambientale del prodotto all'interno di ElectroSpindleTool. Sulla base dell'assegnazione dei materiali svolta in precedenza all'interno di SolidEdge il software permette di visualizzare mediante un grafico a torta le categorie e sottocategorie di materiali presenti nel prodotto in esame specificandone le relative masse.

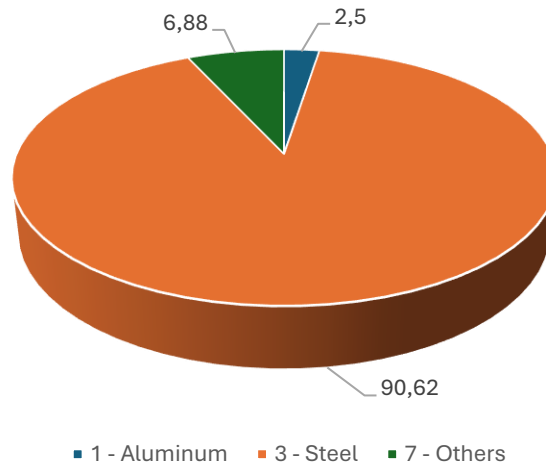


Figura 4.2: Grafico a torta riportante i materiali costituenti il prodotto con le relative masse in percentuale

Sub Category	Mass [kg]	Category [%]	Assembly [%]
1.1	0,08	100	2,5
3.3	2,87	100	90,62
7.12	0,22	100	6,88

Tabella 4.2: Sottocategorie di materiali presenti nel prodotto con relative masse

La determinazione dell'impatto ambientale del prodotto da parte del software avviene prendendo in considerazione tre fasi del ciclo di vita del prodotto: Material Phase (fase di estrazione dei materiali), Use Phase (fase di utilizzo del prodotto) ed EoL Phase (fase di gestione del fine vita del prodotto). L'impatto della fase di utilizzo viene valutata sulla base del consumo di energia elettrica da parte del prodotto, quindi, ciò presuppone il settaggio delle seguenti impostazioni all'interno del software:

- Power Average: 1 KW;
- Use Rate: 1000 h/years;
- Useful Lifetime: 5 years;
- Country: Italy;
- Voltage Type: Low.

Nella seguente tabella vengono riportati i materiali che costituiscono l'assieme in esame specificandone la propria sottocategoria di appartenenza. Inoltre, nelle ultime due colonne viene riportata la massa del singolo materiale e quella totale della sottocategoria.

Material Sub Category	Material	Material mass [Kg]	Sub Category mass [Kg]
1.1 - Aluminum 1 series	Alluminio, 1060	0,0794	0,0794
3.3 - Chromium steel	Acciaio inossidabile, 420	2,8493	2,8693
	Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,02	
7.12 - Others - Bronze	Bronzo, 90%	0,218	0,218
		3,1667	3,1667

Tabella 4.3: Sottocategorie di materiali presenti nel prodotto con relative masse

Selezionando come indicatore ambientale “Climate change [Kg CO₂ eq]” e alternando le varie strategie di gestione di fine vita (Landfill, Incineration o Recycling) il software restituisce i seguenti risultati:

Material Sub Category	Material Phase [Kg CO ₂ eq]	EoL Phase Landfill [Kg CO ₂ eq]	EoL Phase Incineration [Kg CO ₂ eq]	EoL Phase Recycling [Kg CO ₂ eq]
1.1 - Aluminum 1 series	1,09	0,0604	0,1521	-5,6039
3.3 - Chromium steel	13,26	2,1875	0,0115	-0,4252
7.12 - Others - Bronze	1,86	0,1660	0,0173	-1,5821
Totale	16,21	2,4139	0,1809	-7,6112

Tabella 4.4: Impatto ambientale della Material Phase ed EoL Phase restituiti dal software ElectroSpindleTool

Osservando la precedente Tabella 4.4 è possibile notare che i valori relativi all'impatto ambientale della fase di riciclo dei materiali vengono presentati dal software con segno negativo. Infatti, i benefici derivanti dalla fase di riciclo possono essere attribuiti o al prodotto di monte, i cui materiali vengono riciclati, o al prodotto di valle, il quale verrà costruito con materiali riciclati in precedenza. Non essendoci la possibilità di prevedere il successivo processo produttivo, i benefici derivanti dal riciclo dei materiali vengono attribuiti direttamente al prodotto in esame riducendo così il suo impatto ambientale complessivo.

Per quanto riguarda la fase di utilizzo il software restituisce, in base ai parametri definiti in precedenza, un impatto ambientale di 2162,99 Kg CO₂ eq.

4.2 Validazione impatto ambientale

I risultati presentati dal software ElectroSpindleTool relativi all'impatto ambientale del prodotto necessitano di una validazione attraverso l'utilizzo del software SimaPro. La banca dati utilizzata in SimaPro per la ricerca dei relativi impatti ambientali è Ecoinvent 3 – allocation at point of substitution – system, mentre il metodo utilizzato per la valutazione degli impatti è EF 3.0 Method / EF 3.0 normalization and weighting set.

Di seguito si riportano gli impatti ambientali unitari [Kg CO₂ eq/Kg] e complessivi [Kg CO₂ eq] relativi alla fase di estrazione dei materiali:

Material	Mass [Kg]	Description	Material Phase [Kg CO ₂ eq/Kg]	Material Phase [Kg CO ₂ eq]
Alluminio, 1060	0,0794	Aluminium, wrought alloy {GLO} market for APOS, S	13,7	1,0878
Acciaio inossidabile, 420	2,8493	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S	4,61	13,1353
Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,02	Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S	1,81	0,0362
Bronzo, 90%	0,218	Bronze {GLO} market for APOS, S	8,54	1,8617
	3,1667			16,1210

Tabella 4.5: Impatto ambientale Material Phase ottenuto sfruttando il software SimaPro

Sulla base dei parametri precedentemente definiti, relativi all'utilizzo di energia elettrica durante la fase d'uso del prodotto, si riporta di seguito una tabella contenente l'impatto ambientale unitario e complessivo specifico all'utilizzo di elettricità a basso voltaggio in Italia.

Country	Voltage Type	Description	Use Phase [Kg CO2 eq/Kg]	Use Phase [Kg CO2 eq]
Italy	Low	Electricity, low voltage {IT} market for APOS, S	0,433	2165

Tabella 4.6: Impatto ambientale relativo all'utilizzo di elettricità in Italia ottenuto sfruttando il software SimaPro

Per quanto riguarda l'impatto ambientale della fase di utilizzo, il valore di 2165 Kg CO2 eq è ottenuto moltiplicando l'impatto unitario relativo al consumo di energia elettrica a basso voltaggio in Italia [Kg CO2 eq/KW] per il numero di KW utilizzati in un anno dal prodotto e per il numero di anni di utilizzo dello stesso.

Di seguito si riportano inoltre gli impatti ambientali unitari [Kg CO2 eq/Kg] e complessivi [Kg CO2 eq] relativi alle diverse strategie di gestione del fine vita: smaltimento in discarica, incenerimento con recupero di energia e riciclo dei materiali.

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase Landfill [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase Landfill [Kg CO2 eq]
Alluminio, 1060	0,0794	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0604
Acciaio inossidabile, 420	2,8493	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	2,1683
Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,02	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0152
Bronzo, 90%	0,218	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,1659
	3,1667			2,4099

Tabella 4.7: Impatto ambientale della fase di smaltimento in discarica dei materiali ottenuto sfruttando il software SimaPro

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase Incineration [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase Incineration [Kg CO2 eq]
Alluminio, 1060	0,0794	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration APOS, S	0,218	0,0173

Acciaio inossidabile, 420	2,8493	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,1507
Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,02	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,0011
Bronzo, 90%	0,218	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,0115
	3,1667			0,1806

Tabella 4.8: Impatto ambientale della fase di incenerimento dei materiali con recupero di energia ottenuto sfruttando il software SimaPro

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase Recycling [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase Recycling [Kg CO2 eq]
Alluminio, 1060	0,0794	Aluminium (waste treatment) {GLO} recycling of aluminium APOS, S	-19,9	-1,5801
Acciaio inossidabile, 420	2,8493	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-5,5561
Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,02	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-0,039
Bronzo, 90%	0,218	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-0,4251
	3,1667			-7,6003

Tabella 4.9: Impatto ambientale della fase di riciclo dei materiali ottenuto sfruttando il software SimaPro

I risultati riportati nella quinta colonna delle precedenti tabelle sono ottenuti moltiplicando l'impatto unitario [Kg CO2 eq/Kg] relativo allo specifico materiale per il valore della massa con il quale esso è presente nel prodotto in esame (seconda colonna).

Phase	ElectroSpindleTool	SimaPro	Errore [%]
Material Phase	16,21	16,1210	+0,55
Use Phase	2162,99	2165	-0,09
EoL Phase Landfill	2,4139	2,4099	+0,17
EoL Phase Incineration	0,1809	0,1806	+0,17
EoL Phase recycling	-7,6112	-7,6003	+0,14

Tabella 4.10: Confronto risultati ottenuti dal software ElectroSpindleTool con quelli ottenuti in SimaPro

Dalla precedente tabella 4.10 è possibile notare come l'errore percentuale tra i risultati ottenuti dai due software sia in valore assoluto sempre al di sotto dell'1 %, ciò a dimostrazione dell'elevata affidabilità del software ElectroSpindleTool nella valutazione dell'impatto ambientale del prodotto. In seguito alla validazione dei risultati ottenuti è possibile comprendere che il ciclo di vita del prodotto che permette di minimizzare l'impatto ambientale complessivo è quello che prevede una gestione del fine vita dello stesso attraverso attività di riciclo dei materiali. Nella tabella seguente, oltre a dimostrare visivamente quanto detto in precedenza, si nota quanto siano quasi perfettamente sovrapponibili i risultati ottenuti con i due diversi strumenti.

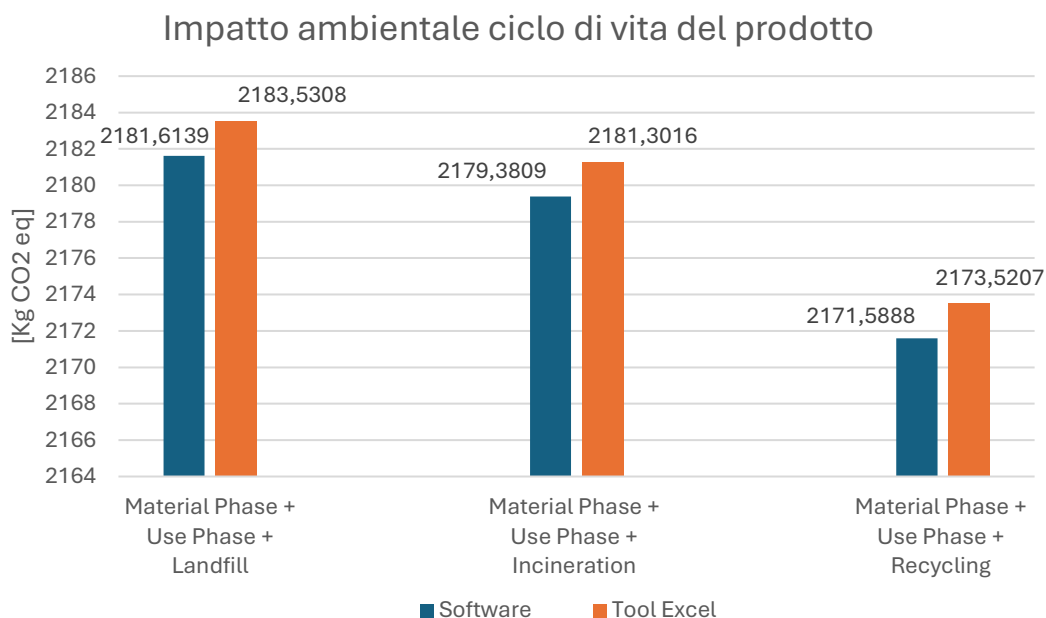


Figure 4.3: Confronto dei risultati ottenuti con i due diversi strumenti relativi all'intero impatto ambientale del prodotto

4.3 Recyclability Index

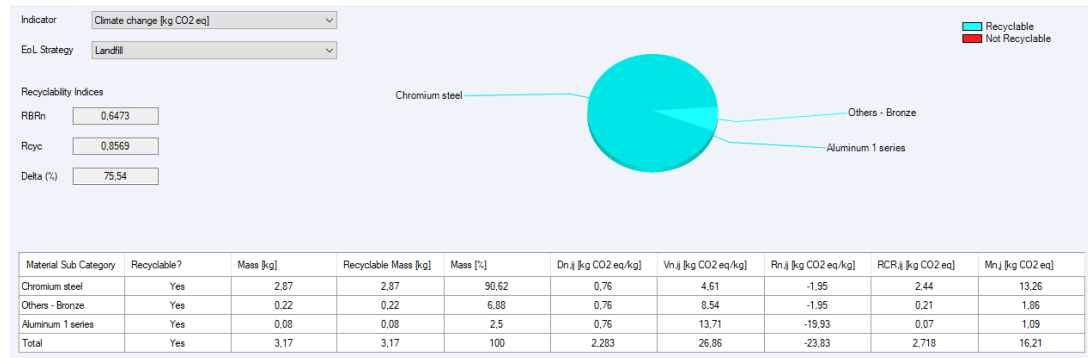


Figure 4.4: Modulo "Recyclability Index" in ElectrSpindleTool per la valutazione degli indici di riciclabilità

Il modulo “Recyclability Index” presente nel software ElectroSpindleTool permette la valutazione dei due indici di riciclabilità RBR_n e R_{cyc} . Nello specifico il software costruisce una tabella nella quale vengono riportate sotto forma di lista tutte le sottocategorie di materiali presenti all’interno del prodotto in esame e per ciascuna di esse vengono specificate una serie di indici: $D_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg], $V_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg], $R_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg], RCR_{ij} [Kg CO2 eq] e $M_{n,j}$ [Kg CO2 eq]. Tale modulo restituisce un valore dell’indice RBR_n pari a 0.6473 ed un valore dell’indice R_{cyc} pari a 0.8569 (85.69 %).

4.4 Validazione indici di riciclabilità

I valori degli indici RBR_n e R_{cyc} ottenuti mediante il modulo “Recyclability Index” del software necessitano di essere validati. La validazione viene effettuata sfruttando un tool excel che rappresenta la base di partenza che ha permesso lo sviluppo del software stesso.

Material Sub Category	1.1 Aluminum 1 series	3.3 Chromium steel		7.12 Others - Bronze	
Material	Alluminio, 1060	Acciaio inossidabile, 420	Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	Bronzo, 90%	
Recyclability	Yes	Yes	Yes	Yes	
m_{ij} [Kg]	0,0794	2,8493	0,02	0,218	3,1667
$m_{recyc,i}$ [Kg]	0,0794	2,8493	0,02	0,218	3,1667
$D_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	0,761	0,761	0,761	0,761	

$V_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	13,7	4,61	1,81	8,54
$R_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	-19,9	-1,95	-1,95	-1,95
RCR_{ij}	0,85	0,85	0,85	0,95
$M_{n,j}$ [Kg CO2 eq]	1,0878	13,1353	0,0362	1,8617

Tabella 4.11: Tool Excel per la validazione degli indici di riciclabilità

Riprendendo quanto già anticipato nel capitolo 3 i parametri mostrati nella precedente tabella rappresentano:

- $m_{recyc,i}$: indica la massa riciclabile di ogni materiale;
- RCR_{ij} : rappresenta l'indice di riciclaggio intrinseco del materiale;
- $D_{n,ij}$: riguarda l'impatto relativo alla strategia di End of Life (EoL);
- $V_{n,ij}$: riguarda l'impatto relativo alla fase di estrazione dei materiali del prodotto;
- $R_{n,ij}$: riguarda l'impatto relativo alla strategia EoL con riciclo;
- m_{ij} : rappresenta la massa di ogni materiale, indipendentemente che sia riciclabile o meno;
- M_n : rappresenta l'impatto relativo alla lavorazione (processo produttivo) del prodotto.

Il prodotto in esame è costituito da soli materiali riciclabili, quindi, la loro massa riciclabile $m_{recyc,i}$ coincide perfettamente con la massa con la quale essi sono presenti nel prodotto stesso, ossia con m_{ij} . Sfruttando le formule [3.1] e [3.2] riportate nel capitolo 3 e facendo la sommatoria su tutti i materiali presenti nel prodotto si ottiene:

$$RBR_n = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{recyc,i} \times RCR_{ij} \times (V_{n,ij} + D_{n,ij} - R_{n,ij})}{\left(\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times V_{n,ij} + M_n + U_n + \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times D_{m,ij} \right)} = 0,6471$$

$$R_{cyc} = \frac{\sum_{k=1}^n (m_k \times R_{cyc,k})}{m_{tot}} \times 100 = 85,69 \%$$

Nel calcolo dell'indice di riciclabilità RBR_n il fattore U_n è stato impostato ad un valore pari a zero.

	ElectroSpindleTool	Tool Excel	Errore [%]
RBR_n	0,6473	0,6471	+0,03
R_{cyc}	85,69	85,69	0

Tabella 4.12: Confronto indici di riciclabilità tra ElectroSpindleTool e Tool Excel

Da come si può facilmente notare dalla precedente tabella 4.12 i risultati forniti dal software ElectroSpindleTool in termini di indici di riciclabilità sono perfettamente coincidenti con quanto ottenuto con il tool excel a conferma dell'ottima affidabilità del software in studio.

4.5 Disassembly Index

Il software ElectroSpindleTool oltre a permettere la valutazione dell'impatto ambientale e dell'indice di riciclabilità del prodotto rappresenta un valido strumento per la valutazione della difficoltà di disassemblaggio del prodotto stesso. Affinché il software possa valutare la difficoltà di disassemblaggio del prodotto mediante gli appositi indici è necessario definire i collegamenti presenti nell'assieme in esame attraverso il rispettivo modulo "Liaisons View". La seguente tabella riporta tutti i collegamenti presenti nel prodotto.

Components	Number of components	Fasteners	Number of Fasteners	Liasion Type
supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:1	2	supporto.asm/Vite M6.par:3	1	Screw speciality head
supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:1	2	supporto.asm/Vite M6.par:4	1	Screw speciality head
supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:2	2	supporto.asm/Vite M6.par:1	1	Screw speciality head
supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:2	2	supporto.asm/Vite M6.par:2	1	Screw speciality head
supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Spina 4.par:1	2		0	Weak fit interference

supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Spina 4.par:3	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Spina 4.par:2	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Base.par:1 + supporto.asm/Spina 4.par:4	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:1 + supporto.asm/Spina 4.par:1	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:1 + supporto.asm/Spina 4.par:3	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:2 + supporto.asm/Spina 4.par:2	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:2 + supporto.asm/Spina 4.par:4	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:1 + supporto.asm/Bronzina circolare supporto.par:2	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:2 + supporto.asm/Bronzina circolare supporto.par:1	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:1 + supporto.asm/Bronzina rettangolare supporto.par:1	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Supporto.par:2 + supporto.asm/Bronzina rettangolare supporto.par:2	2		0	Weak fit interference
supporto.asm/Piastra.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:1	2	supporto.asm/Vite M6.par:7	1	Screw speciality head
supporto.asm/Piastra.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:1	2	supporto.asm/Vite M6.par:8	1	Screw speciality head
supporto.asm/Piastra.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:2	2	supporto.asm/Vite M6.par:5	1	Screw speciality head
supporto.asm/Piastra.par:1 + supporto.asm/Supporto.par:2	2	supporto.asm/Vite M6.par:6	1	Screw speciality head
puleggia.asm/Puleggia.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:1	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Albero 2.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:1	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Albero 2.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:2	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Corpo di manovella.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:2	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Corpo di manovella.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:3	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Fusto di biella.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:3	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Fusto di biella.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:4	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Corpo di manovella.par:2 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:4	2		0	Strong fit interference

puleggia.asm/Corpo di manovella.par:2 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:5	2		0	Strong fit interference
puleggia.asm/Albero 1.par:1 + puleggia.asm/Spina 4 x 20.par:5	2		0	Strong fit interference
albero.asm/Albero 3.par:1 + albero.asm/Spina 4 x 10.par:1	2		0	Strong fit interference
albero.asm/Morsetto up.par:1 + albero.asm/Spina 4 x 10.par:1	2		0	Strong fit interference
albero.asm/Bronzina quad.par:1 + albero.asm/Morsetto up.par:1	2		0	Weak fit interference
albero.asm/Bronzina quad.par:1 + albero.asm/Morsetto down.par:1	2		0	Weak fit interference
albero.asm/Morsetto up.par:1 + albero.asm/Morsetto down.par:1	2	albero.asm/Vite M4 x 10.par:1	1	Screw speciality head
albero.asm/Morsetto up.par:1 + albero.asm/Morsetto down.par:1	2	albero.asm/Vite M4 x 10.par:2	1	Screw speciality head
Pattino.par:1 + albero.asm/Albero 3.par:1	2		0	Weak fit interference
Pattino.par:1 + supporto.asm/Bronzina rettangolare supporto.par:1	2		0	Weak fit interference
Pattino.par:1 + supporto.asm/Bronzina rettangolare supporto.par:2	2		0	Weak fit interference
puleggia.asm/Albero 2.par:1 + supporto.asm/Bronzina circolare supporto.par:2	2		0	Weak fit interference
puleggia.asm/Albero 1.par:1 + supporto.asm/Bronzina circolare supporto.par:1	2		0	Weak fit interference
puleggia.asm/Fusto di biella.par:1 + albero.asm/Bronzina quad.par:1	2		0	Weak fit interference

Tabella 4.13: Elenco dei collegamenti presenti nel prodotto definiti mediante il modulo "Liaisons View" presente nel software ElectroSpindleTool

Sulla base dei collegamenti precedentemente definiti il software permette di valutare gli indici C_h , C_r e I_{com} di ciascun elemento presente nell'assieme e di valutare visivamente i valori ottenuti mediante appositi grafici a colonne.

Component	C_h	C_r	I_{com}
Base.par:1	0,59	2,39	1,49
Bronzina circolare supporto.par:1	0,39	0,46	0,43
Bronzina circolare supporto.par:2	0,39	0,46	0,43
Bronzina rettangolare supporto.par:1	0,38	0,46	0,42
Bronzina rettangolare supporto.par:2	0,38	0,46	0,42
Piastra.par:1	0,57	1,36	0,97
Spina 4.par:1	0,45	0,46	0,46

Spina 4.par:2	0,45	0,46	0,46
Spina 4.par:3	0,45	0,46	0,46
Spina 4.par:4	0,45	0,46	0,46
Supporto.par:1	0,58	2,39	1,48
Supporto.par:2	0,58	2,39	1,48

Tabella 4.14: Indici Ch , Cr e I_{com} dei componenti appartenenti al sottoassieme "supporto"

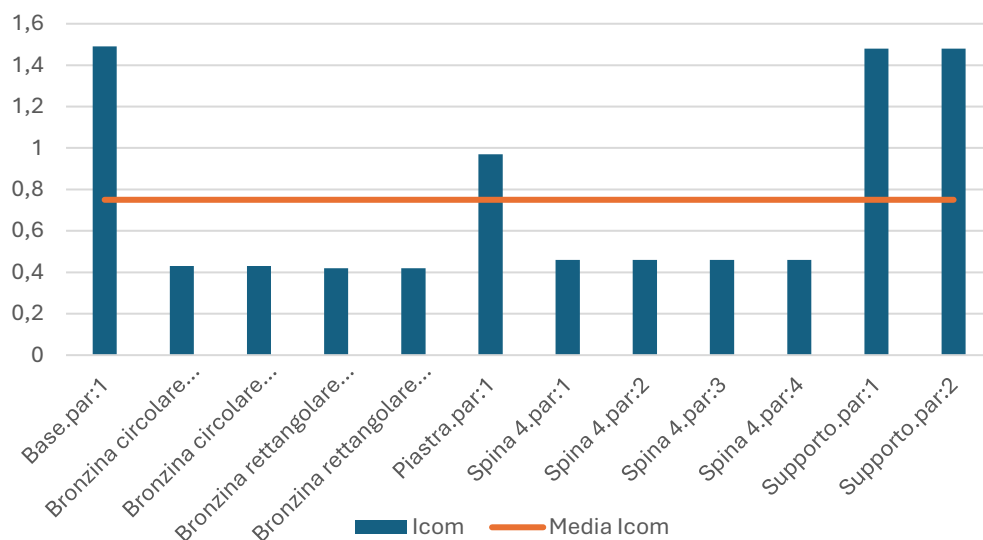


Figure 4.5: Indice I_{com} dei componenti appartenenti al sottoassieme "supporto"

Quindi, per il sottoassieme “supporto” il software restituisce un valore max dell’indice I_{com} pari a 1,49, un valore minimo pari a 0,42 ed un valore medio pari 0,75. Il componente che presenta in tale sottoassieme la maggiore difficoltà di disassemblaggio è il componente Base.

Di seguito si analizzano i valori degli indici di disassemblaggio anche degli altri due sottoassiemi del prodotto in esame.

Component	C_h	C_r	I_{com}
Albero 2.par:1	0,43	0,98	0,7
Puleggia.par:1	0,56	0,4	0,48
Spina 4 x 20.par:1	0,47	0,75	0,61
Spina 4 x 20.par:2	0,47	0,75	0,61
Spina 4 x 20.par:3	0,47	0,75	0,61
Spina 4 x 20.par:4	0,47	0,75	0,61
Spina 4 x 20.par:5	0,47	0,75	0,61
Corpo di manovella.par:1	0,42	0,75	0,58
Corpo di manovella.par:2	0,42	0,75	0,58

Fusto di biella.par:1	0,4	0,98	0,69
Albero 1.par:1	0,41	0,61	0,51

Tabella 4.15: Indici Ch , Cr e I_{com} dei componenti appartenenti al sottoassieme "puleggia"

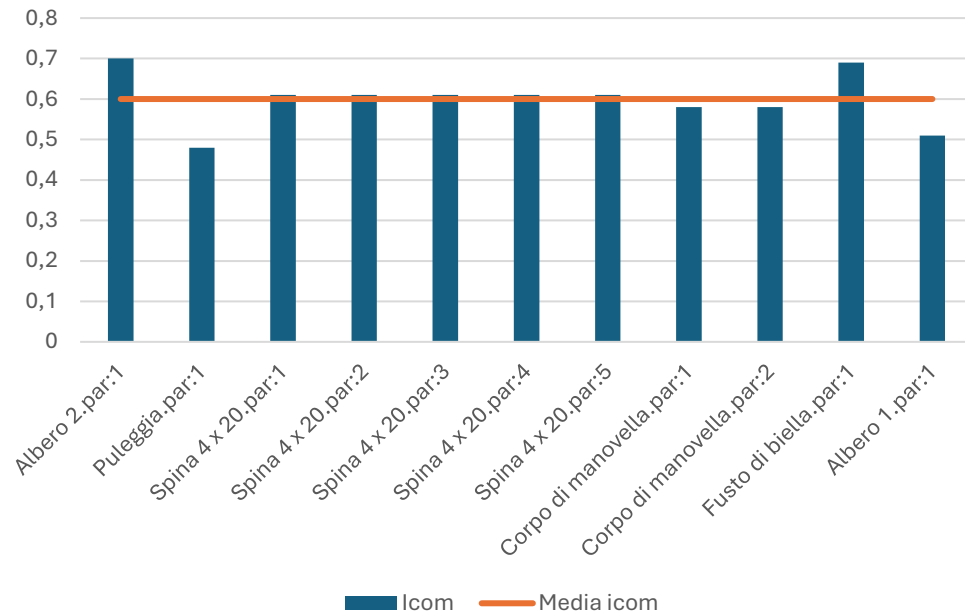


Tabella 4.6: Indice I_{com} dei componenti appartenenti al sottoassieme "puleggia"

Per il sottoassieme “puleggia” il software valuta il componente Albero 2 come quello con maggiore difficoltà di disassemblaggio con un valore $I_{com} = 0,7$. Il valore minimo dell’indice I_{com} è pari a 0,48, mentre il valore medio si assesta a 0,6.

Infine, si analizza il sottoassieme “albero”:

Component	C_h	C_r	I_{com}
Morsetto up.par:1	0,43	1,24	0,83
Bronzina quad.par:1	0,4	0,7	0,55
Morsetto down.par:1	0,42	0,86	0,64
Albero 3.par:1	0,56	0,66	0,61
Spina 4 x 10.par:1	0,49	0,75	0,62

Tabella 4.16: Indici Ch , Cr e I_{com} dei componenti appartenenti al sottoassieme "albero"

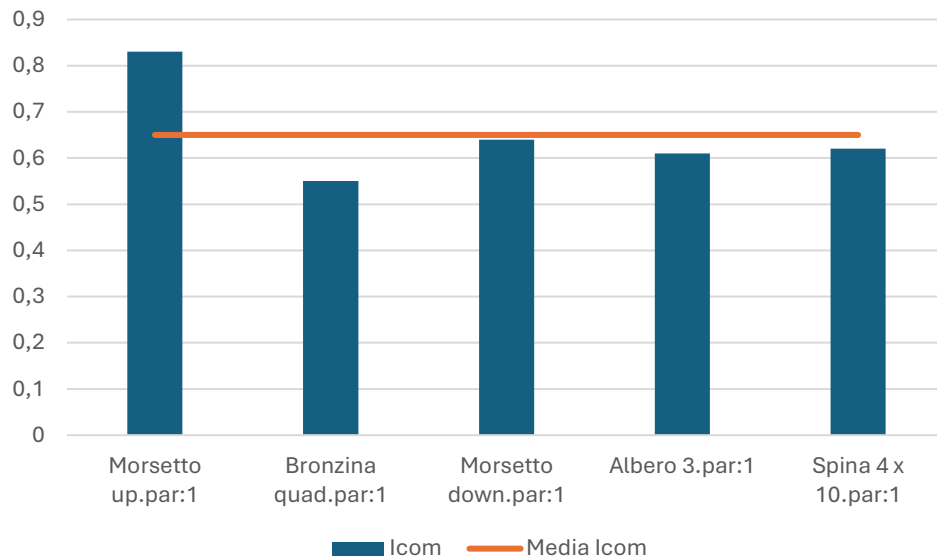


Figure 4.7: Indice I_{com} dei componenti appartenenti al sottoassieme "albero"

Nel sottoassieme “albero” il componente che possiede il valore più elevato dell’indice I_{com} è il Morsetto up con un valore pari a 0,83. Il valore minimo dell’indice I_{com} è pari a 0,55 mentre il valore medio si assesta a 0,65.

Come anticipato all’inizio di tale capitolo, l’assieme in questione è costituito da tre sottoassiami “supporto”, “puleggia” e “albero”, ai quali si aggiunge un ultimo componente denominato Pattino caratterizzato dagli indici $C_h = 0,57$, $C_r = 0,77$ e $I_{com} = 0,67$.

4.6 Validazione degli indici C_h e C_r

In maniera analoga a quanto effettuato in precedenza per gli indici di riciclabilità, anche gli indici di manovrabilità C_h e rimozione C_r necessitano di essere validati attraverso l’utilizzo del tool excel.

La validazione degli indici di disassemblaggio necessita la realizzazione di un file excel particolarmente elaborato. Nel foglio excel vengono riportati tutti i componenti che costituiscono il prodotto, per ciascun componente viene dedicato un numero di righe pari al numero di collegamenti che esso presenta con altre parti; quindi, ciascuna riga è dedicata ad un apposito collegamento (fastener o non fastener).

Per ciascuna riga, e quindi per ciascun collegamento, sono riportate un serie di informazioni:

- Componente in esame (il quale risulta essere collegato ad un secondo elemento);
- Massa del componente in [g] e [Kg];
- Numero di collegamenti che presenta il componente in esame;
- Tipo di collegamento: fastener o non fastener;
- Tipologia di collegamento fastener (ad esempio Screw speciality head o Screw standard head) o non fastener (ad esempio Interference Fit weak piuttosto che Interference Fit strong);
- Parte con cui è accoppiato il componente in esame;
- Numero di parti coinvolte nel collegamento;
- Number of tools (sfruttando la logica della tabella 3.5);
- Rating Number of tools (sfruttando la logica della tabella 3.2);
- Operation Type (sfruttando la logica della tabella 3.1);
- Rating Operation Type (sfruttando la logica della tabella 3.4);
- Tool Required (sfruttando la logica della tabella 3.5);
- Rating Tool Required (sfruttando la logica della tabella 3.3);
- Ingombro (x, y e z) del componente in esame;
- Size (sfruttando la formula [3.4]);
- Rating Size (sfruttando la formula [3.6]);
- Thickness (sfruttando la formula [3.5]);

- Rating Thickness (sfruttando la formula [3.7]);
- Number of Fasteners presenti nel collegamento (qualora il collegamento sia non fastener bisogna apporre uno zero nella suddetta cella);
- U Effort (sfruttando la logica riportata nella figura 3.6);
- Rating Mass (sfruttando la formula [3.8]).

Definendo i precedenti parametri per ciascun collegamento che ogni componente del prodotto presenta, è possibile ricavare tramite il suddetto tool excel gli indici C_h , C_r e I_{com} .

Come anticipato nel paragrafo 3.1.6 attraverso la formula [3.3] l'indice C_h è dipendente dai tre fattori di Rating: $Rating_{Size}$, $Rating_{Thickness}$ e $Rating_{Mass}$.

Essendo i parametri Size, Thickness e Mass caratteristiche proprie del componente, ciascun componente del prodotto sarà caratterizzato dal proprio ed unico indice di manovrabilità C_h .

Sempre riprendendo quanto anticipato nel paragrafo 3.1.6 tramite la formula [3.9] l'indice $C_{r,i}$ è specifico del collegamento in esame, quindi, se lo stesso componente fosse caratterizzato da più collegamenti con altre parti, allora a ciascuno di questi collegamenti sarà attribuito il proprio indice $C_{r,i}$, invece l'indice di rimozione C_r è unico per il componente in esame e quindi sarà determinato dalla sommatoria dei singoli indici $C_{r,i}$ specifici dei diversi collegamenti.

Quindi, utilizzando la formula [3.9] presente nel paragrafo 3.1.6 è possibile ricavare mediante il tool excel il valore degli indici C_h e C_r di ciascun componente del meccanismo biella-manovella.

Component	C_h	C_r	I_{com}
Base	0,5927	2,3967	1,4947
Supporto.par:1	0,5761	2,3967	1,4864
Supporto.par:2	0,5761	2,3967	1,4864
Piastra	0,5727	1,3667	0,9697
Spina 4.par:1	0,4498	0,4650	0,4574
Spina 4.par:2	0,4498	0,4650	0,4574
Spina 4.par:3	0,4498	0,4650	0,4574
Spina 4.par:4	0,4498	0,4650	0,4574

Bronzina circolare supporto.par:2	0,3910	0,4650	0,4280
Bronzina circolare supporto.par:1	0,3910	0,4650	0,4280
Bronzina rettangolare supporto.par:1	0,3804	0,4650	0,4227
Bronzina rettangolare supporto.par:2	0,3804	0,4650	0,4227
Puleggia	0,5577	0,4000	0,4789
Albero 2	0,4256	0,9825	0,7041
Corpo di manovella.par:1	0,4187	0,7500	0,5843
Corpo di manovella.par:2	0,4187	0,7500	0,5843
Fusto di biella	0,4014	0,9825	0,6919
Albero 1	0,4150	0,6075	0,5112
Spina 4 x 20.par:1	0,4733	0,7500	0,6116
Spina 4 x 20.par:2	0,4733	0,7500	0,6116
Spina 4 x 20.par:3	0,4733	0,7500	0,6116
Spina 4 x 20.par:4	0,4733	0,7500	0,6116
Spina 4 x 20.par:5	0,4733	0,7500	0,6116
Albero 3	0,5624	0,6575	0,6099
Morsetto up	0,4261	1,2408	0,8335
Morsetto down	0,4192	0,8658	0,6425
Bronzina quad	0,4046	0,6975	0,5510
Spina 4 x 10	0,4879	0,7500	0,6190
Pattino	0,5672	0,7725	0,6698

Tabella 4.17: Indici C_h , C_r e I_{com} dei componenti del prodotto ricavati dal Tool Excel

Confrontando le precedenti tabelle, più precisamente le tabelle 4.14, 4.15 e 4.16 con la tabella 4.17, è possibile notare che i valori degli indici C_h e C_r e I_{com} resi disponibili dal software ElectroSpindleTool sono perfettamente coincidenti con quanto ottenuto manualmente con il Tool Excel, a dimostrazione dell'elevata affidabilità del software anche nella valutazione della complessità di disassemblaggio dei vari componenti presenti all'interno dell'assieme.

4.7 Dipendenza degli indici di disassemblaggio dalla massa

L'indice di manovrabilità C_h è fortemente dipendente dalle dimensioni del componente in esame in quanto esso risulta essere la sommatoria dei tre Rating: $Rating_{size}$, $Rating_{Thickness}$ e $Rating_{Mass}$. Infatti, ipotizzando un aumento o una riduzione del volume del componente, a parità di densità del materiale costituente, si otterrà una variazione dell'ingombro (size), dello spessore e della massa. Quindi, ciò determina una variazione numerica dei tre fattori di Rating.

Invece, la dipendenza dell'indice di rimozione C_r dall'ingombro e dalla massa del componente è nettamente meno evidente rispetto a quanto accade per l'indice C_h . Come anticipato in precedenza l'indice C_r è dato dalla somma dei singoli indici $C_{r,i}$ specifici dei collegamenti caratterizzanti il componente in esame ed osservando la formula dell'indice $C_{r,i}$ (formula [3.9] nel paragrafo 3.1.6) si nota che l'unico parametro dipendente dall'ingombro e quindi dalla massa del componente è il Rating Operation Type. Infatti, l'Operation Type indica la possibilità di maneggiare il componente con una o due mani oppure in maniera automatizzata attraverso l'ausilio di dispositivi meccanici. La definizione dell'Operation Type avviene sulla base di due variabili: il Size [mm] e la massa [Kg]. Quindi, all'aumentare dell'ingombro e della massa del componente è probabile, ad esempio, che lo stesso non sia più maneggiabile con una mano ma che siano necessarie entrambe. La variazione dell'Operation Type comporta una modifica anche del valore del suo Rating, secondo la logica riportata nella tabella 3.4 presente nel capitolo 3.

Di conseguenza, essendo l'indice I_{com} una media degli indici C_h e C_r anche quest'ultimo sarà dipendente dalla massa del componente in esame.

$$I_{com} = \frac{C_h + C_r}{2}$$

$$C_h = \frac{\sum C_{h,f}}{3}$$

$$\sum C_{h,f} = \text{Rating}_{size} + \text{Rating}_{Thickness} + \text{Rating}_{Mass}$$

$$C_h = f(\text{massa})$$

$$C_r = \sum_1^N C_{r,i}$$

$$C_{r,i} = \frac{U_{effort} + \frac{R_{NumT} + R_{TR} + R_{OT}}{3}}{2N_{pt}}$$

$$C_r = f(\text{massa})$$

$$I_{com} = f(\text{massa})$$

Figure 4.8: Dipendenza degli indici di disassemblaggio Ch , Cr e $Icom$ dall'ingombro e dalla massa del componente

Sulla base di quanto affermato in precedenza sono state effettuate delle modifiche sull'assieme biella-manovella appena analizzato. Più precisamente, ciascun componente del prodotto in esame è stato scalato x0,5, x2 e x4 rispetto alle sue dimensioni originarie facendo però rimanere invariato il materiale costituente. L'apporto di tali modifiche ha l'obiettivo di analizzare la variazione dell'indice di

manovrabilità e rimozione dei singoli componenti rispetto a quanto ottenuto in precedenza con la scala originaria dell'assieme.

		Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Densità [Kg/mm3]	Volume [mm3]	Volume [mm3]	Volume [mm3]	Volume [mm3]
Sottoassieme “supporto”					
Base	7,75E-06	14330,824	114646,591	917172,725	7337381,802
Spina 4	7,90E-06	37,339	298,713	2389,705	19117,638
Supporto	7,75E-06	9746,354	77970,829	623766,636	4990133,084
Bronzina circolare supporto	8,80E-06	407,622	3260,973	26087,785	208702,283
Bronzina rettangolare supporto	8,80E-06	909,528	7276,225	58209,803	465678,427
Piastra	7,75E-06	3771,155	30169,238	241353,906	1930831,25
Sottoassieme “puleggia”					
Albero 2	7,75E-06	738,159	5905,275	47242,199	377937,591
Puleggia	2,71E-06	3674,538	29396,303	235170,422	1881363,437
Spina 4 x 20	7,90E-06	31,056	248,448	1987,581	15900,648
Corpo di manovella	7,75E-06	544,789	4358,31	34866,479	278931,832
Fusto di biella	7,75E-06	338,368	2706,943	21655,545	173244,359
Albero 1	7,75E-06	311,418	2491,346	19930,769	159446,149
Sottoassieme “albero”					
Morsetto up	7,75E-06	1157,053	9256,425	74051,403	592411,225
Morsetto down	7,75E-06	891,593	7132,74	57061,921	456495,373
Bronzina quad	8,80E-06	463,58	3708,637	29669,098	237352,787
Albero 3	7,75E-06	1121,305	8970,439	71763,512	574108,1
Spina 4 x 14	7,90E-06	21,631	173,049	1384,395	11075,161
Pattino	7,75E-06	1586,656	12693,245	101545,958	812367,666

Figure 4.18: Tabella riportante i volumi dei singoli componenti nelle quattro diverse scale dell'assieme

Nelle seguenti tabelle e figure si effettua un confronto degli indici C_h , C_r e I_{com} per ciascun componente dell'assieme prendendo in considerazioni le quattro diverse scale realizzate. Nel confronto degli indici di disassemblaggio sono stati trascurati gli elementi fasteners.

Componente	Scala x 0,5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
	Ch	Ch	Ch	Ch
Base	0,4966	0,5927	0,8262	1,0000
Supporto.par:1	0,5157	0,5761	0,82754	1,00000
Supporto.par:2	0,5157	0,5761	0,82754	1,00000
Piastra	0,37526	0,57274	0,63515	0,80097
Spina 4.par:1	0,52470	0,44979	0,41896	0,56181
Spina 4.par:2	0,52470	0,44979	0,41896	0,56181
Spina 4.par:3	0,52470	0,44979	0,41896	0,56181
Spina 4.par:4	0,52470	0,44979	0,41896	0,56181

Bronzina circolare supporto.par:2	0,44672	0,39097	0,44504	0,63098
Bronzina circolare supporto.par:1	0,44672	0,39097	0,44504	0,63098
Bronzina rettangolare supporto.par:1	0,43639	0,38037	0,46982	0,75849
Bronzina rettangolare supporto.par:2	0,43639	0,38037	0,46982	0,75849
Puleggia	0,39093	0,55774	0,55012	0,78057
Albero 2	0,43880	0,42563	0,56592	0,67281
Corpo di manovella.par:1	0,46684	0,41869	0,57204	0,64739
Corpo di manovella.par:2	0,46684	0,41869	0,57204	0,64739
Fusto di biella	0,47883	0,40139	0,44055	0,60717
Albero 1	0,49591	0,41495	0,38539	0,61045
Spina 4 x 20.par:1	0,53597	0,47325	0,41132	0,56620
Spina 4 x 20.par:2	0,53597	0,47325	0,41132	0,56620
Spina 4 x 20.par:3	0,53597	0,47325	0,41132	0,56620
Spina 4 x 20.par:4	0,53597	0,47325	0,41132	0,56620
Spina 4 x 20.par:5	0,53597	0,47325	0,41132	0,56620
Albero 3	0,42698	0,56238	0,55600	0,73312
Morsetto up	0,43140	0,42615	0,57521	0,82600
Morsetto down	0,43317	0,41918	0,56857	0,70562
Bronzina quad	0,48752	0,40459	0,39269	0,65564
Spina 4 x 10	0,55411	0,48790	0,41216	0,41979
Pattino	0,40733	0,56716	0,56915	0,80357

Tabella 4.19: Confronto indice Ch dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

Per semplicità di esposizione nella seguente figura i componenti presenti nell'assieme con un'occorrenza maggiore di 1 vengono presi in considerazione una sola volta in quanto ciascuna occorrenza presenta il medesimo valore dell'indice C_h , C_r e I_{com} indipendentemente dalla scala in esame.

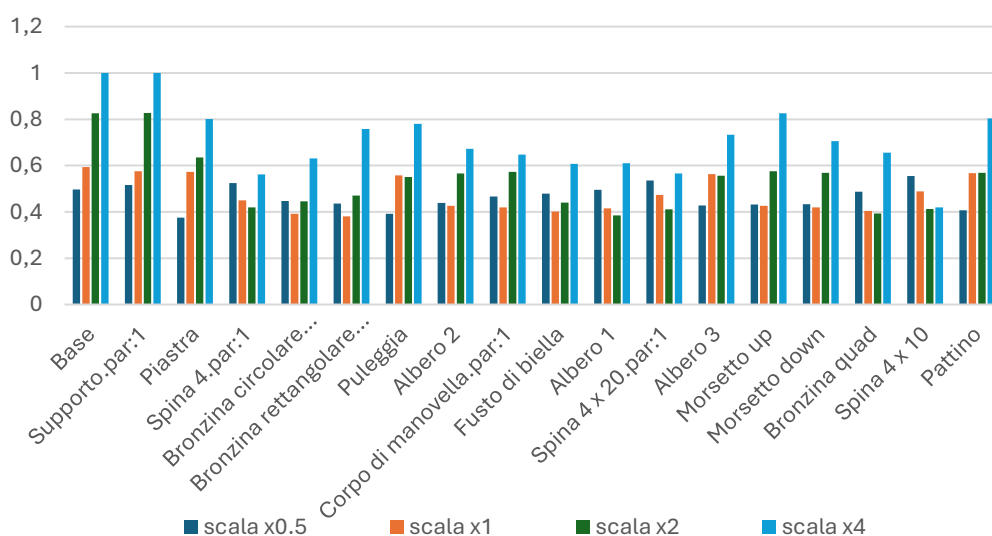


Figura 4.9: Confronto indice Ch dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

In modo del tutto analogo a quanto fatto sopra si riporta una tabella in cui si specifica il valore dell'indice di rimozione C_r per ciascun componente al variare della scala presa in considerazione.

	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Cr	Cr	Cr	Cr
Base	2,1967	2,3967	2,3967	2,6633
Supporto.par:1	2,1967	2,3967	2,3967	2,6633
Supporto.par:2	2,1967	2,3967	2,3967	2,6633
Piastra	1,2667	1,3667	1,3667	1,3667
Spina 4.par:1	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Spina 4.par:2	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Spina 4.par:3	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Spina 4.par:4	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Bronzina circolare supporto.par:2	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Bronzina circolare supporto.par:1	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Bronzina rettangolare supporto.par:1	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Bronzina rettangolare supporto.par:2	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Puleggia	0,3750	0,4000	0,4000	0,4000
Albero 2	0,9825	0,9825	1,0575	1,0575
Corpo di manovella.par:1	0,7500	0,7500	0,8000	0,8000
Corpo di manovella.par:2	0,7500	0,7500	0,8000	0,8000
Fusto di biella	0,9825	0,9825	0,9825	1,0575
Albero 1	0,6075	0,6075	0,6075	0,6575
Spina 4 x 20.par:1	0,7500	0,7500	0,7500	0,8000
Spina 4 x 20.par:2	0,7500	0,7500	0,7500	0,8000
Spina 4 x 20.par:3	0,7500	0,7500	0,7500	0,8000
Spina 4 x 20.par:4	0,7500	0,7500	0,7500	0,8000
Spina 4 x 20.par:5	0,7500	0,7500	0,7500	0,8000
Albero 3	0,6075	0,6575	0,6575	0,6575
Morsetto up	1,2408	1,2408	1,3408	1,3408
Morsetto down	0,8658	0,8658	0,9408	0,9408
Bronzina quad	0,6975	0,6975	0,6975	0,7725
Spina 4 x 10	0,7500	0,7500	0,7500	0,7500
Pattino	0,6975	0,7725	0,7725	0,7725

Tabella 4.20: Confronto indice Cr dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

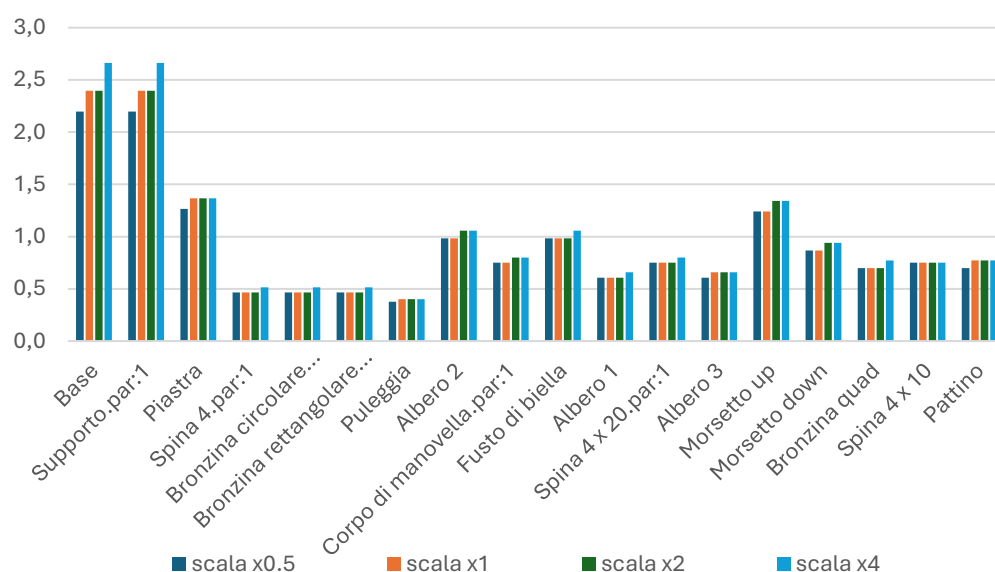


Figura 4.10: Confronto indice C_r dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

Infine, si analizza l'indice medio di complessità di disassemblaggio I_{com} che nasce dalla media dell'indice di manovrabilità C_h e l'indice di rimozione C_r :

	Scala x 0,5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Icom	Icom	Icom	Icom
Base	1,3466	1,4947	1,6114	1,8317
Supporto.par:1	1,3562	1,4864	1,6121	1,8317
Supporto.par:2	1,3562	1,4864	1,6121	1,8317
Piastra	0,8210	0,9697	1,0009	1,0838
Spina 4.par:1	0,4948	0,4574	0,4420	0,5384
Spina 4.par:2	0,4948	0,4574	0,4420	0,5384
Spina 4.par:3	0,4948	0,4574	0,4420	0,5384
Spina 4.par:4	0,4948	0,4574	0,4420	0,5384
Bronzina circolare supporto.par:2	0,4559	0,4280	0,4550	0,5730
Bronzina circolare supporto.par:1	0,4559	0,4280	0,4550	0,5730
Bronzina rettangolare supporto.par:1	0,4507	0,4227	0,4674	0,6367
Bronzina rettangolare supporto.par:2	0,4507	0,4227	0,4674	0,6367
Puleggia	0,3830	0,4789	0,4751	0,5903
Albero 2	0,7106	0,7041	0,8117	0,8652
Corpo di manovella.par:1	0,6084	0,5843	0,6860	0,7237
Corpo di manovella.par:2	0,6084	0,5843	0,6860	0,7237
Fusto di biella	0,7307	0,6919	0,7115	0,8323
Albero 1	0,5517	0,5112	0,4964	0,6340
Spina 4 x 20.par:1	0,6430	0,6116	0,5807	0,6831

Spina 4 x 20.par:2	0,6430	0,6116	0,5807	0,6831
Spina 4 x 20.par:3	0,6430	0,6116	0,5807	0,6831
Spina 4 x 20.par:4	0,6430	0,6116	0,5807	0,6831
Spina 4 x 20.par:5	0,6430	0,6116	0,5807	0,6831
Albero 3	0,5172	0,6099	0,6067	0,6953
Morsetto up	0,8361	0,8335	0,9580	1,0834
Morsetto down	0,6495	0,6425	0,7547	0,8232
Bronzina quad	0,5925	0,5510	0,5451	0,7141
Spina 4 x 10	0,6521	0,6190	0,5811	0,5849
Pattino	0,5524	0,6698	0,6708	0,7880
Media	0,6648	0,6726	0,7012	0,8147

Tabella 4.21: Confronto indice Icom dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

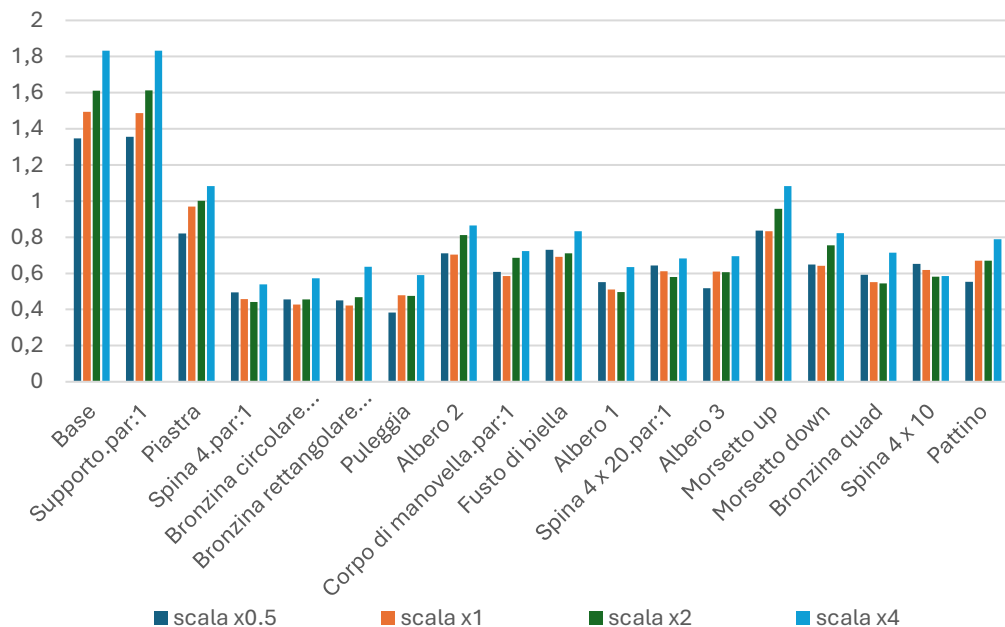


Figura 4.11: Confronto indice Icom dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

In base a quanto riportato nelle precedenti tabelle e figure, tendenzialmente l'indice di manovrabilità C_h aumenta nel passaggio dalla scala x1 alle scale superiori. Invece, nel passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1, l'indice di manovrabilità C_h può manifestare un duplice comportamento. Questo particolare andamento dell'indice C_h è dovuto al fatto che la variazione della taglia e quindi della massa del componente comportano una modifica numerica dei fattori di $Rating_{size}$, $Rating_{thickness}$ e $Rating_{mass}$. Nella seguente tabella si esplicitano quei componenti che mostrano una riduzione del valore dell'indice C_h , cioè una più facile maneggevolezza, nel passaggio dalla scala inferiore x0,5 alla scala x1.

	Scala x 0,5	Scala x 1	
Componente	Ch	Ch	Riduzione % dell'indice Ch all'aumentare della scala
Spina 4.par	0,52470	0,44979	-14,28
Bronzina circolare supporto.par	0,44672	0,39097	-12,48
Bronzina rettangolare supporto.par	0,43639	0,38037	-12,84
Albero 2	0,43880	0,42563	-3,00
Corpo di manovella.par	0,46684	0,41869	-10,31
Fusto di biella	0,47883	0,40139	-16,17
Albero 1	0,49591	0,41495	-16,33
Spina 4 x 20.par	0,53597	0,47325	-11,70
Morsetto up	0,43140	0,42615	-1,22
Morsetto down	0,43317	0,41918	-3,23
Bronzina quad	0,48752	0,40459	-17,01
Spina 4 x 10	0,55411	0,48790	-11,95

Tabella 4.22: Riduzione percentuale dell'indice C_h nel passaggio dalla scala x0.5 alla scala x1

In questi casi l'aumento dell'indice C_h al diminuire dell'ingombro e della massa del componente è dettato dalla loro maggiore difficoltà di maneggevolezza. Entrando più nello specifico per tali componenti l'aumento della loro massa causa sicuramente un aumento del $Rating_{Mass}$ (determinabile mediante la formula [3.8] riportata nel capitolo 3), il quale contribuisce all'aumento dell'indice C_h . Allo stesso tempo l'aumento dell'ingombro e della massa del componente può causare una riduzione o un aumento dei fattori $Rating_{size}$ e $Rating_{Thickness}$ (determinabili mediante le formule [3.6] e [3.7] riportate nel capitolo 3), che quindi possono contribuire in duplice maniera alla determinazione dell'indice C_h . Essendo l'indice di manovrabilità C_h la media dei tre fattori di Rating, per questi componenti nel passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1, l'incremento del Rating relativo alla massa contribuisce in misura minore rispetto al decremento determinato dalla sommatoria dei Rating relativi al Size e al Thickness.

Quindi, l'aumento della taglia del componente non è detto che sia accompagnato inevitabilmente da un incremento dell'indice C_h , infatti componenti estremamente piccoli possono presentare un'elevata difficoltà di maneggevolezza, come accade anche per componenti estremamente grandi.

Per quanto riguarda invece l'indice di rimozione C_r i componenti mostrano tutti la medesima tendenza, cioè un possibile incremento dell'indice all'aumentare dell'ingombro del componente. Questo comportamento singolare è dovuto dalla dipendenza dell'indice $C_{r,i}$ dalla massa, infatti, l'unico fattore presente nella sua formula dipendente da essa è il Rating Operation Type. L'aumento dell'ingombro (size) della parte e della sua massa causa una variazione dell'Operation Type e di conseguenza un incremento del suo Rating (definibile mediante la logica riportata nella tabella 3.4 presente nel capitolo 3). Ad esempio, nel caso del componente Base il passaggio dalla scala x1 alla scala x4 causa una variazione dell'Operation Type da 'two hand' ad 'automation' con un aumento del corrispondente Rating da 0,6 a 1. Invece, i restanti fattori che compaiono nella formula del $C_{r,i}$, ossia U_{effort} , R_{NumT} , R_{TR} sono indipendenti dalle caratteristiche del componente in quanto correlati esclusivamente alla natura del collegamento in esame, ossia alla tipologia e al numero di tool necessari al suo smontaggio piuttosto che al numero di componenti coinvolti nel collegamento.

Infine, si analizza l'indice medio di complessità di disassemblaggio I_{com} che nasce dalla media degli indici C_r e C_h . Prendendo in considerazione il valore medio di tale indice il passaggio dalla scala x0,5 alle scale superiori x1, x2 e x4 ne causa un aumento. Questo comportamento dimostra che dimensioni e masse crescenti dei componenti possono causare un incremento rilevante della loro complessità di disassemblaggio.

5. Secondo caso studio: meccanismo glifo

Il secondo caso studio, in maniera analoga a quanto fatto in precedenza per il meccanismo biella-manovella, consiste nella valutazione dell'impatto ambientale e della complessità di disassemblaggio di un sistema glifo. Lo studio di più casistiche permette di valutare quanto la presenza di diversi materiali nel prodotto e la diversità dei collegamenti possano determinare una variazione degli indici di riciclabilità e di disassemblaggio.

Di seguito si riporta una figura rappresentante l'insieme soggetto ad analisi.

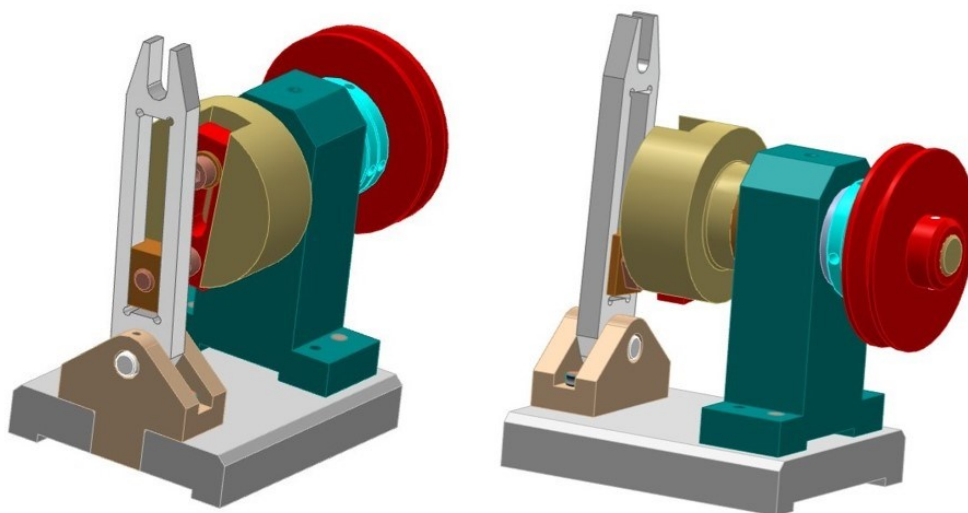


Figura 5.1: Immagine raffigurante il sistema glifo

Anche in questo secondo caso studio l'elaborazione dell'insieme ha inizio con il software SolidEdge, all'interno del quale a ciascun componente del prodotto viene attribuito un determinato materiale. Nella tabella riportata di seguito si elencano i componenti costituenti il prodotto e per ognuno di essi viene specificato il materiale, la densità del materiale, la massa e il numero di occorrenze.

Componente	Materiale	Densità [Kg/mm3]	Massa [Kg]	Occorrenze nell'insieme
Albero	Steel - Alloyed:1.6566 , 17NiCrMo6-4	7,80E-06	0,6543	1
Base	Iron:0.6025 , EN-GJL-250	7,25E-06	1,0179	1
Boccola	Bronzo, 90%	8,80E-06	0,0789	1
Colonna	Iron:0.6025 , EN-GJL-250	7,25E-06	0,8066	1
Corsoio	Alluminio, 5050	2,68E-06	0,0066	1
Cursore	Alluminio, 5050	2,68E-06	0,0167	1
Distanziale	Alluminio, 5050	2,68E-06	0,0064	1

Ghiera	Steel - Alloyed:1.6566 , 17NiCrMo6-4	7,80E-06	0,0462	2
Glifo	Alluminio, 5050	2,68E-06	0,0346	1
Perno biella	Alluminio, 5050	2,68E-06	0,0065	1
Puleggia	Alluminio, 5050	2,68E-06	0,0985	1
Rosetta	Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	7,90E-06	0,0011	1
Spina 4 x 20	Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	7,90E-06	0,0023	3
Spina 8 x 25	Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	7,90E-06	0,0097	1
Supporto	Iron:0.6025 , EN-GJL-250	7,25E-06	0,2102	1
Vite M6 x 16	Acciaio inossidabile, 316	8,03E-06	0,0075	5
			3,0848	23

Tabella 5.1: Tabella riportante i componenti presenti nell'assieme con relativa massa, densità del materiale e numero di occorrenze

Il meccanismo presenta un numero di componenti pari a 23 per una massa totale di 3,0848 Kg. Gli elementi di collegamento fastener presenti sono:

- Vite M6 x 16 a brugola esagonale presente in 5 unità e definibile nel software ElectroSpindleTool come Screw speciality head (vite a testa speciale).

5.1 Environmental Impacts

Sulla base dei materiali assegnati ai singoli componenti all'interno di SolidEdge il software ElectroSpindleTool permette di visualizzare mediante un grafico a torta le categorie e sottocategorie di materiali presenti nel prodotto in esame specificandone le relative masse.

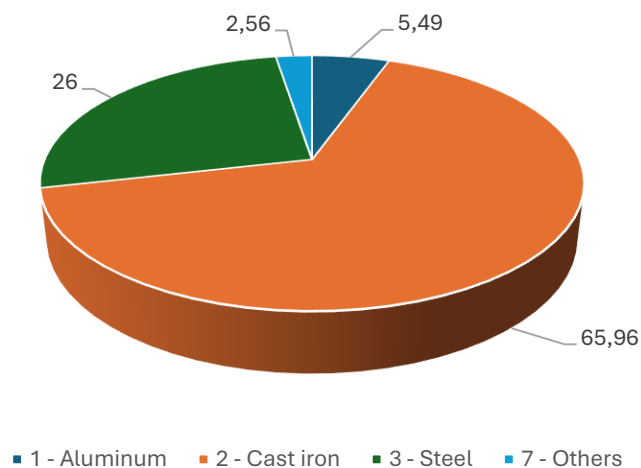


Figura 5.2: Grafico a torta riportante i materiali costituenti il prodotto con le relative masse in percentuale

Sub Category	Mass [kg]	Category [%]	Assembly [%]
1.1	0,1	58,13	3,19
1.5	0,07	41,87	2,3
2.1	2,03	100	65,96
3.3	0,8	100	26
7.12	0,08	100	2,56

Tabella 5.2: Sottocategorie di materiali presenti nel prodotto con relative masse

Il software attraverso la mappatura dei materiali che costituiscono il prodotto è in grado di fornire l'impatto ambientale relativo alle tre fasi già esaminate in precedenza, ossia Material Phase, Use Phase e EoL Phase. Anche in questo caso il prodotto in esame, durante il proprio utilizzo, necessita di energia elettrica, quindi affinché il software sia in grado di valutare l'impatto relativo alla fase di utilizzo è indispensabile definire mediante gli opportuni comandi i seguenti parametri:

- Power Average: 1 KW;
- Use Rate: 1000 h/years;
- Useful Lifetime: 5 years;
- Country: Italy;
- Voltage Type: Low.

Di seguito si riporta una tabella che evidenzia i materiali che costituiscono l'assieme specificandone la propria sottocategoria di appartenenza. Nelle ultime due colonne di tale tabella sono riportate sia la massa del singolo materiale che quella totale della sottocategoria alla quale appartiene.

Material Sub Category	Material	Material mass [Kg]	Sub Category mass [Kg]
1.1 - Aluminum 1 series	Alluminio, 1060	0,0985	0,0985
1.5 Aluminum 5 series	Alluminio, 5050	0,0708	0,0708
2.1 Cast iron	Iron:0.6025 , EN-GJL-250	2,0347	2,0347
3.3 - Chromium steel	Acciaio inossidabile, 316	0,0375	0,8019
	Steel - Alloyed:1.6566 , 17NiCrMo6-4	0,7467	
	Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,0177	

7.12 - Others - Bronze	Bronzo, 90%	0,0789	0,0789
		3,0848	3,0848

Tabella 5.3: Sottocategorie di materiali presenti nel prodotto con relative masse

Selezionando come indicatore ambientale “Climate change [Kg CO₂ eq]” e alternando le varie strategie di gestione di fine vita (Landfill, Incineration o Recycling) il software restituisce i seguenti risultati:

Material Sub Category	Material Phase [Kg CO ₂ eq]	EoL Phase Landfill [Kg CO ₂ eq]	EoL Phase Incineration [Kg CO ₂ eq]	EoL Phase Recycling [Kg CO ₂ eq]
1.1 - Aluminum 1 series	1,35	0,0749	0,0214	-1,9627
1.5 Aluminum 5 series	0,66	0,054	0,0154	-1,4134
2.1 Cast iron	4,01	1,5484	0,1076	-3,9667
3.3 - Chromium steel	3,7	0,6103	0,0424	-1,5635
7.12 - Others - Bronze	0,67	0,06	0,0042	-0,1538
Totale	10,39	2,3476	0,191	-9,0601

Tabella 5.4: Impatto ambientale della Material Phase ed EoL Phase restituiti dal software ElectroSpindleTool

Per quanto riguarda la fase di utilizzo il software restituisce, in base ai parametri definiti in precedenza, un impatto ambientale di 2162,99 Kg CO₂ eq.

5.3 Validazione impatto ambientale

Anche in questo caso i risultati forniti dal software necessitano di una valutazione attraverso l’ausilio di SimaPro. Di seguito si riportano gli impatti ambientali unitari [Kg CO₂ eq/Kg] e complessivi [Kg CO₂ eq] relativi alla fase di estrazione dei materiali:

Material	Mass [Kg]	Description	Material Phase [Kg CO ₂ eq/Kg]	Material Phase [Kg CO ₂ eq]
Alluminio, 1060	0,0985	Aluminium, wrought alloy {GLO} market for APOS, S	13,7	1,3495
Alluminio, 5050	0,0708	Aluminium alloy, AlMg3 {GLO} market for APOS, S	9,28	0,6570

Iron:0.6025 , EN-GJL-250	2,0347	Cast iron {GLO} market for APOS, S	1,97	4,008
Acciaio inossidabile, 316	0,0375	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S	4,61	0,1729
Steel - Alloyed:1.6566 , 17NiCrMo6-4	0,7467	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S	4,61	3,4423
Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,0177	Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, S	1,81	0,0320
Bronzo, 90%	0,0789	Bronze {GLO} market for APOS, S	8,54	0,6738
	3,0848			10,3358

Tabella 5.5: Impatto ambientale Material Phase ottenuto sfruttando il software SimaPro

Sulla base dei parametri precedentemente definiti, relativi all'utilizzo di energia elettrica durante la fase d'uso del prodotto, si riporta di seguito una tabella contenente l'impatto ambientale unitario e complessivo specifico all'utilizzo di elettricità a basso voltaggio in Italia.

Country	Voltage Type	Description	Use Phase [Kg CO2 eq/Kg]	Use Phase [Kg CO2 eq]
Italy	Low	Electricity, low voltage {IT} market for APOS, S	0,433	2165

Tabella 5.6: Impatto ambientale relativo all'utilizzo di elettricità in Italia ottenuto sfruttando il software SimaPro

Anche in questo secondo caso studio l'impatto ambientale della fase di utilizzo, pari a 2165 Kg CO2 eq, è ottenuto moltiplicando l'impatto unitario relativo al consumo di energia elettrica a basso voltaggio in Italia [CO2 eq/KW] per il numero di KW utilizzati in un anno dal prodotto e per il numero di anni di utilizzo dello stesso.

Di seguito si riportano inoltre gli impatti ambientali unitari [Kg CO2 eq/Kg] e complessivi [Kg CO2 eq] relativi alle diverse strategie di gestione del fine vita: smaltimento in discarica, incenerimento con recupero di energia e riciclo dei materiali

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase Landfill [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase Landfill [Kg CO2 eq]
Alluminio, 1060	0,0985	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0750
Alluminio, 5050	0,0708	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0539

Iron:0.6025 , EN-GJL-250	2,0347	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	1,5484
Acciaio inossidabile, 316	0,0375	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0285
Steel - Alloyed:1.6566 , 17NiCrMo6-4	0,7467	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,5682
Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,0177	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0135
Bronzo, 90%	0,0789	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0600
	3,0848			2,3475

Tabella 5.7: Impatto ambientale della fase di smaltimento in discarica dei materiali ottenuto sfruttando il software SimaPro

Material	Mass [Kg]	Description	EOI Phase Incineration [Kg CO2 eq/Kg]	EOI Phase Incineration [Kg CO2 eq]
Alluminio, 1060	0,0985	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration APOS, S	0,218	0,0215
Alluminio, 5050	0,0708	Scrap aluminium {Europe without Switzerland} treatment of scrap aluminium, municipal incineration APOS, S	0,218	0,0154
Iron:0.6025 , EN-GJL-250	2,0347	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,1076
Acciaio inossidabile, 316	0,0375	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,0020
Steel - Alloyed:1.6566 , 17NiCrMo6-4	0,7467	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,0395

Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,0177	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,0009
Bronzo, 90%	0,0789	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,0042
	3,0848			0,1911

Tabella 5.8: Impatto ambientale della fase di incenerimento dei materiali con recupero di energia ottenuto sfruttando il software SimaPro

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase Recycling [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase Recycling [Kg CO2 eq]
Alluminio, 1060	0,0985	Aluminium (waste treatment) {GLO} recycling of aluminium APOS, S	-19,9	-1,9602
Alluminio, 5050	0,0708	Aluminium (waste treatment) {GLO} recycling of aluminium APOS, S	-19,9	-1,4089
Iron:0.6025 , EN- GJL-250	2,0347	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-3,9677
Acciaio inossidabile, 316	0,0375	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-0,0731
Steel - Alloyed:1.6566 , 17NiCrMo6-4	0,7467	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-1,4561
Steel - Stainless:1.4310 , X10CrNi18-8	0,0177	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-0,0345
Bronzo, 90%	0,0789	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-0,1539
	3.0848			-9,0543

Tabella 5.9: Impatto ambientale della fase di riciclo dei materiali ottenuto sfruttando il software SimaPro

I risultati riportati nella quinta colonna delle precedenti tabelle sono ottenuti moltiplicando l'impatto unitario [Kg CO₂ eq/Kg] relativo allo specifico materiale per il valore della massa con il quale esso è presente nel prodotto in esame (seconda colonna).

Avendo a disposizione i risultati di entrambi i software è possibile effettuare un confronto per valutare l'attendibilità dei valori resi disponibili da ElectroSpindleTool.

Phase	ElectroSpindleTool	SimaPro	Errore [%]
Material Phase	10,3090	10,3358	+0,52
Use Phase	2162,99	2165	-0,09
EoL Phase Landfill	2,3476	2,3475	0
EoL Phase Incineration	0,1910	0,1911	-0,05
EoL Phase recycling	-9,0601	-9,0543	+0,06

Tabella 5.10: Confronto risultati ottenuti dal software ElectroSpindleTool con quelli ottenuti in SimaPro

I valori forniti dal software ElectroSpindleTool sono quasi perfettamente sovrapponibili con quanto ottenuto in SimaPro, infatti, l'errore assoluto tra i due valori confrontati è sempre ben al di sotto dell'1 %. Questo testimonia, nuovamente, l'elevata affidabilità del software nella valutazione dell'impatto ambientale del prodotto, anche quando esso comprende numerose sottocategorie di materiali.

Infine, è possibile osservare che il ciclo di vita del prodotto che permette di minimizzare il suo impatto ambientale complessivo è quello che presuppone un'attività di riciclo dei materiali al termine della sua vita utile.

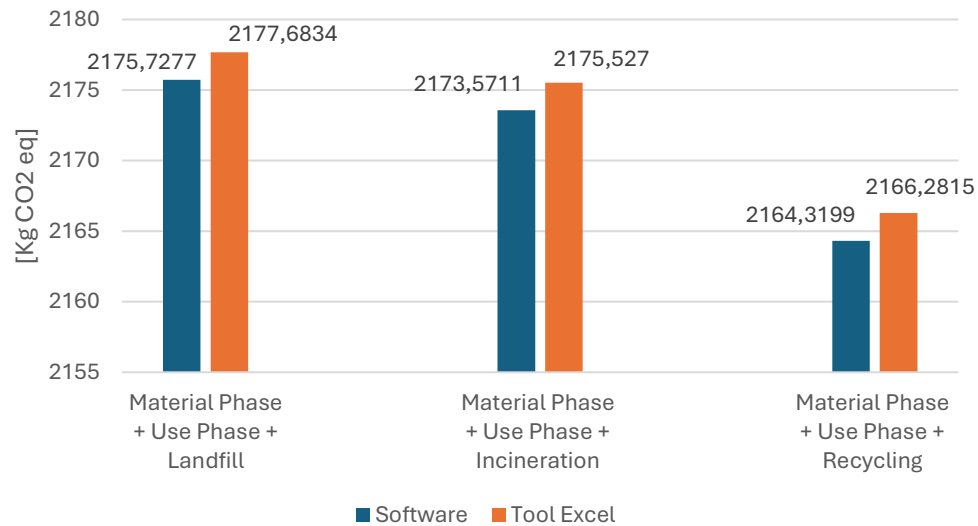


Figura 5.3: Confronto dei risultati ottenuti con i due diversi strumenti relativi all'intero impatto ambientale del prodotto

5.3 Recyclability Index

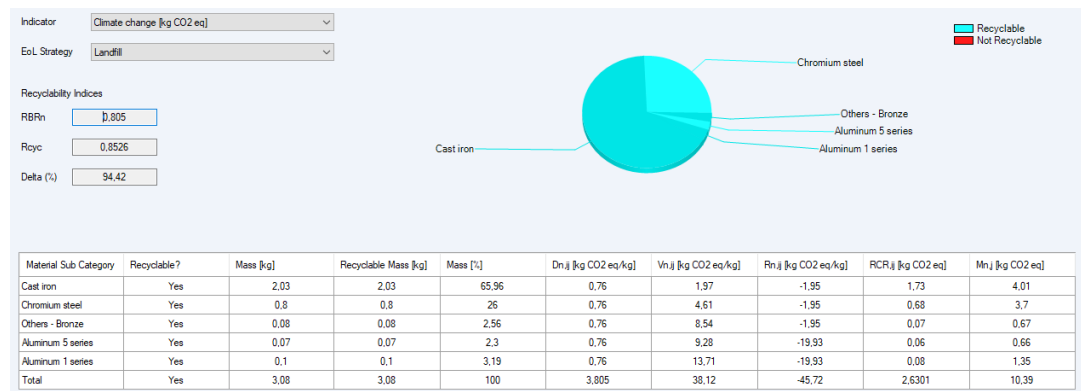


Figura 5.4: Modulo "Recyclability Index" in ElectrSpindleTool per la valutazione degli indici di riciclabilità

Il modulo “Recyclability Index” restituisce un valore dell’indice RBR_n pari a 0,805 ed un valore dell’indice R_{cyc} pari a 0,8526 (85,26 %).

Anche per il meccanismo glifo i materiali utilizzati per la sua costruzione sono tutti riciclabili, questo permette di ottenere un indice di riciclabilità piuttosto elevato in quanto la massa riciclabile totale m_{recyc} coincide con la massa dell’intero prodotto m_{ij} .

5.4 Validazione indici di riciclabilità

Material Sub Category	1.1 Aluminum 1 series	1.5 Aluminum 5 series	2.1 Cast iron	3.3 Chromium steel			7.12 Others - Bronze
Material	Alluminio, 1060	Alluminio, 5050	Iron:0.6025, EN-GJL-250	Acciaio inossidabile, 316	Steel - Alloyed:1.6566, 17NiCrMo6-4	Steel - Stainless:1.4310, X10CrNi18-8	Bronzo, 90%
Recyclability	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
m_{ij} [Kg]	0,0985	0,0708	2,0347	0,0375	0,7467	0,0177	0,0789
$m_{recyc,i}$ [Kg]	0,0985	0,0708	2,0347	0,0375	0,7467	0,0177	0,0789
$D_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	0,761	0,761	0,761	0,761	0,761	0,761	0,761
$V_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	13,7	9,28	1,97	4,61	4,61	1,81	8,54
$R_{n,ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	-19,9	-19,9	-1,95	-1,95	-1,95	-1,95	-1,95
RCR_{ij}	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$M_{n,j}$ [Kg CO2 eq]	1,3495	0,6570	4,0084	0,1729	3,4423	0,0320	0,6738

Tabella 5.11: Tool Excel per la validazione degli indici di riciclabilità

Sfruttando le formule [3.1] e [3.2] riportate nel capitolo 3 e facendo la sommatoria su tutti i materiali presenti nel prodotto si ottiene:

$$RBR_n = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{recyc,i} \times RCR_{ij} \times (V_{n,ij} + D_{n,ij} - R_{n,ij})}{\left(\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times V_{n,ij} + M_n + U_n + \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times D_{m,ij} \right)} = 0,8065$$

$$R_{cyc} = \frac{\sum_{k=1}^n (m_k \times R_{cyc,k})}{m_{tot}} \times 100 = 85,26 \%$$

Nel calcolo dell'indice di riciclabilità RBR_n il fattore U_n è stato impostato ad un valore pari a zero.

	ElectroSpindleTool	Tool Excel	Errore [%]
RBR_n	0,8050	0,8065	-0,19
R_{cyc}	85,26	85,26	0

Tabella 5.12: Confronto indici di riciclabilità tra ElectroSpindleTool e Tool Excel

La precedente tabella 5.14 mostra che i risultati forniti dal software ElectroSpindleTool in termini di indici di riciclabilità sono perfettamente coincidenti con quanto ottenuto manualmente con il Tool Excel a conferma dell'ottima affidabilità del software in studio.

5.5 Disassembly Index

Anche in questo secondo caso studio la valutazione da parte del software della complessità di disassemblaggio del prodotto necessita della definizione mediante il modulo “Liaison View” dei collegamenti presenti nell’assieme. La tabella seguente riporta la totalità dei collegamenti definiti all’interno del software specificandone il numero di componenti interessati dal collegamento in esame, l’eventuale elemento fastener di collegamento, il numero di elementi fastener e la tipologia di collegamento.

Components	Number of components	Fasteners	Number of Fasteners	Liasion Type
Base.par:1 + Colonna.par:1	2	Vite M6 x 16.par:1 + Vite M6 x 16.par:2	2	Screw speciality head
Base.par:1 + Spina 4 x 20.par:1	2		0	Weak fit interference
Base.par:1 + Spina 4 x 20.par:2	2		0	Weak fit interference
Colonna.par:1 + Spina 4 x 20.par:1	2		0	Weak fit interference
Colonna.par:1 + Spina 4 x 20.par:2	2		0	Weak fit interference
Base.par:1 + Supporto.par:1	2	Vite M6 x 16.par:3 + Vite M6 x 16.par:4	2	Screw speciality head
Boccola.par:1 + Colonna.par:1	2		0	Weak fit interference
Albero.par:1 + Boccola.par:1	2		0	Weak fit interference
Distanziale.par:1 + Albero.par:1	2		0	Weak fit interference
Ghiera.par:1 + Albero.par:1	2		0	Weak fit interference
Ghiera.par:2 + Albero.par:1	2		0	Weak fit interference
Puleggia.par:1 + Albero.par:1	2		0	Weak fit interference
Puleggia.par:1 + Spina 4 x 20.par:3	2		0	Weak fit interference
Albero.par:1 + Spina 4 x 20.par:3	2		0	Weak fit interference
Rosetta.par:1 + cursore.par:1 + Albero.par:1	3	Vite M6 x 16.par:5	1	Screw speciality head
Cursore.par:1 + Albero.par:1	2		0	Weak fit interference
Perno biella.par:1 + Cursore.par:1	2		0	Weak fit interference
Corsoio.par:1 + Perno biella.par:1	2		0	Weak fit interference

Corsoio.par:1 + Glifo.par:1			0	Weak fit interference
Glifo.par:1 + Supporto.par:1	2		0	Weak fit interference
Glifo.par:1 + Spina 8 x 25.par:1	2		0	Weak fit interference
Base.par:1 + Supporto.par:1	2		0	Weak fit interference

Tabella 5.13: Elenco dei collegamenti presenti nel prodotto definiti mediante il modulo "Liaisons View" presente nel software ElectroSpindleTool

Sulla base dei collegamenti precedentemente definiti il software permette di valutare gli indici C_h , C_r e I_{com} di ciascun elemento presente nell'assieme e di valutare visivamente i valori ottenuti mediante appositi grafici a colonne.

Component	C_h	C_r	I_{com}
Albero.par:1	0,56	2,13	1,35
Base.par:1	0,6	1,82	1,21
Boccola.par:1	0,37	0,46	0,42
Colonna.par:1	0,59	1,3	0,94
Corsoio.par:1	0,41	0,46	0,44
Cursore.par:1	0,44	0,68	0,56
Distanziale.par:1	0,47	0,23	0,35
Ghiera.par:1	0,5	0,28	0,39
Ghiera.par:2	0,5	0,28	0,39
Glifo.par:1	0,55	0,77	0,66
Perno biella.par:1	0,38	0,46	0,42
Puleggia.par:1	0,55	0,52	0,53
Rosetta.par:1	0,48	0,21	0,35
Spina 4 x 20.par:1	0,45	0,46	0,46
Spina 4 x 20.par:2	0,45	0,46	0,46
Spina 4 x 20.par:3	0,45	0,46	0,46
Spina 8 x 25.par	0,42	0,23	0,33
Supporto.par:1	0,45	0,96	0,71

Tabella 5.14: Indici C_h , C_r e I_{com} dei componenti appartenenti all'assieme

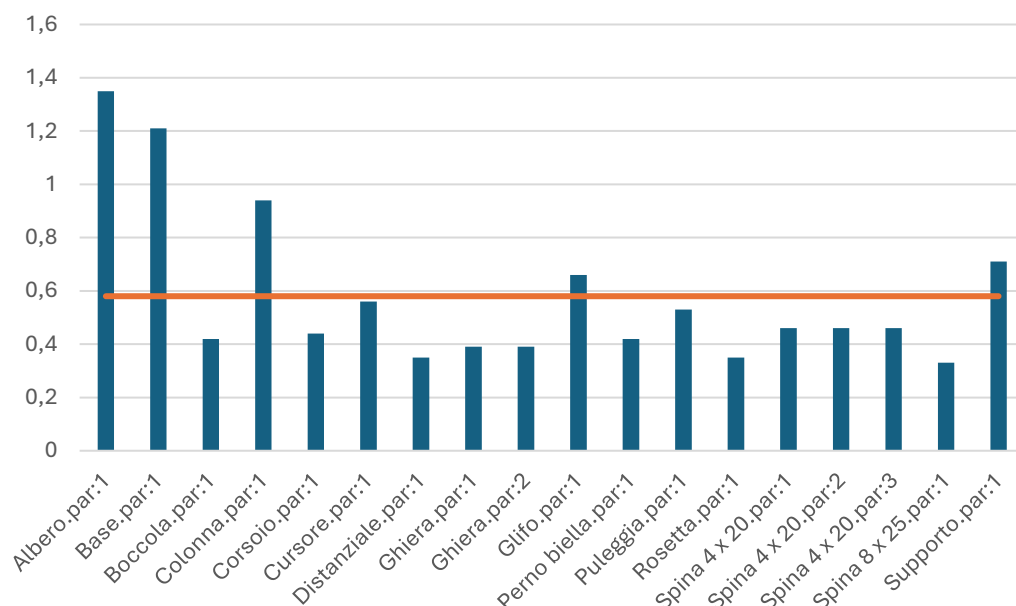


Figura 5.5: Indice I_{com} dei componenti appartenenti all'assieme

I risultati resi disponibili dal software mostrano che il componente caratterizzato dal valore maggiore dell'indice I_{com} , ossia da una maggiore complessità di disassemblaggio, è l'Albero con un valore pari a 1.35. Il componente invece caratterizzato dal valore minimo dell'indice I_{com} è la Spina 8 x 25 con un valore di 0,33. Infine, il valore medio dell'indice I_{com} si assesta attorno a 0,58.

5.6 Validazione degli indici C_h e C_r

I risultati ottenuti mediante il software ElectroSpindleTool relativi agli indici di disassemblaggio devono essere opportunamente validati attraverso l'utilizzo del tool excel. Sfruttando la procedura spiegata in precedenza nel paragrafo 4.6 del capitolo 4 si riportano di seguito gli indici di manovrabilità C_h e di rimozione C_r di ciascun componente del prodotto ottenuti mediante il tool. Nella tabella si riporta anche l'indice medio di disassemblaggio I_{com} che rappresenta la media dei due indici precedentemente citati.

Component	C_h	C_r	I_{com}
Albero.par:1	0,5617	2,1319	1,3468
Base.par:1	0,5990	1,8225	1,2108
Boccola.par:1	0,3650	0,4650	0,4150
Colonna.par:1	0,5875	1,2975	0,9425
Corsoio.par:1	0,4135	0,4650	0,4392
Cursore.par:1	0,4381	0,6761	0,5571

Distanziale.par:1	0,4749	0,2325	0,3537
Ghiera.par:1	0,4975	0,2833	0,3904
Ghiera.par:2	0,4975	0,2833	0,3904
Glifo.par:1	0,5488	0,7725	0,6607
Perno biella.par:1	0,3755	0,4650	0,4202
Puleggia.par:1	0,5544	0,5150	0,5347
Rosetta.par:1	0,4828	0,2111	0,3469
Spina 4 x 20.par:1	0,4506	0,4650	0,4578
Spina 4 x 20.par:2	0,4506	0,4650	0,4578
Spina 4 x 20.par:3	0,4506	0,4650	0,4578
Spina 8 x 25.par	0,4190	0,2325	0,3258
Supporto.par:1	0,4472	0,9650	0,7061
Media			0,5786

Tabella 5.15: Indici Ch , Cr e I_{com} dei componenti del prodotto ricavati dal Tool Excel

Confrontando le tabelle 5.14 e 5.15 si comprende come i risultati presentati dal software ElectroSpindleTool siano perfettamente coincidenti con quanto ottenuto con il tool excel. Il confronto, inoltre, può essere condotto anche nei confronti della media dell'indice I_{com} ottenuta con ciascuno degli strumenti, infatti, entrambi restituiscono un valore medio pari a 0.58. Questa sovrapposizione dei risultati testimonia l'elevata affidabilità del software nella determinazione della complessità di manovrabilità e di smontaggio dei componenti e del prodotto nel suo complesso.

5.7 Dipendenza degli indici di disassemblaggio dalla massa

Riprendendo quanto riportato in precedenza nel paragrafo 4.7 del capitolo 4 si apportano delle modifiche ai componenti dell'assieme in esame con l'obiettivo di analizzare quanto tali modifiche possano comportare una variazione numerica degli indici di manovrabilità e rimozione. Più precisamente, ciascun componente del prodotto in esame è stato scalato x 0.5, x 2 e x 4 rispetto alle sue dimensioni originarie facendo rimanere invariato il suo materiale costituente.

Componente	Densità [Kg/mm3]	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
		Volume [mm3]	Volume [mm3]	Volume [mm3]	Volume [mm3]
Albero.par:1	7,80E-06	10486,286	83890,285	671122,281	5368978,251
Base.par:1	7,25E-06	16106,4030	128851,2220	1030809,7730	8246478,1820
Boccola.par:1	8,80E-06	1120,66	8965,278	71722,227	573777,82
Colonna.par:1	7,25E-06	12762,664	102101,308	816810,465	6534482,124
Corsoio.par:1	2,68E-06	305,885	2447,08	19576,638	156613,1
Cursore.par:1	2,68E-06	773,433	6187,46	49499,683	395997,461
Distanziale.par:1	2,68E-06	296,881	2375,044	19000,352	152002,819

Ghiera.par:1	7,80E-06	740,59	5924,718	47396,979	379175,832
Ghiera.par:2	7,80E-06	740,59	5924,718	47396,979	379175,832
Glifo.par:1	2,68E-06	1603,328	12826,623	102612,987	820903,894
Perno biella.par:1	2,68E-06	303,118	2424,943	19399,547	155196,374
Puleggia.par:1	2,71E-06	4558,377	36467,012	291736,098	2333888,782
Rosetta.par:1	7,90E-06	18,11	144,878	1159,021	9272,172
Spina 4 x 20.par:1	7,90E-06	37,339	298,713	2389,705	19117,638
Spina 4 x 20.par:2	7,90E-06	37,339	298,713	2389,705	19117,638
Spina 4 x 20.par:3	7,90E-06	37,339	298,713	2389,705	19117,638
Spina 8 x 25.par	7,90E-06	156,207	1249,653	9997,228	79977,821
Supporto.par:1	7,25E-06	3325,246	26601,968	212815,747	1702525,975

Tabella 5.16: Tabella riportante i volumi dei singoli componenti nelle quattro diverse scale dell'assieme

Nelle seguenti tabelle e figure si effettua un confronto degli indici C_h , C_r e I_{com} per ciascun componente dell'assieme prendendo in considerazioni le quattro diverse scale realizzate. Nel confronto degli indici di disassemblaggio sono stati trascurati gli elementi fasteners.

	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Ch	Ch	Ch	Ch
Albero.par:1	0,4082	0,5617	0,7949	1,0000
Base.par:1	0,4937	0,5990	0,8243	1,0000
Boccola.par:1	0,4013	0,3650	0,5554	0,8074
Colonna.par:1	0,4267	0,5875	0,8237	1,0000
Corsoio.par:1	0,4972	0,4135	0,3962	0,5627
Cursore.par:1	0,4452	0,4381	0,5530	0,5658
Distanziale.par:1	0,4731	0,4749	0,5559	0,5453
Ghiera.par:1	0,4557	0,4975	0,5641	0,6829
Ghiera.par:2	0,4557	0,4975	0,5641	0,6829
Glifo.par:1	0,4799	0,5488	0,521	0,5849
Perno biella.par:1	0,4654	0,375	0,5587	0,5436
Puleggia.par:1	0,4077	0,5544	0,5527	0,7792
Rosetta.par:1	0,5518	0,4828	0,4429	0,5714
Spina 4 x 20.par:1	0,5247	0,4506	0,4089	0,5618
Spina 4 x 20.par:2	0,5247	0,4506	0,4080	0,5618
Spina 4 x 20.par:3	0,5247	0,4506	0,4089	0,5618
Spina 8 x 25.par	0,5075	0,4190	0,3972	0,5805
Supporto.par:1	0,4012	0,4472	0,6262	0,8012

Tabella 5.17: Confronto indice Ch dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

Per semplicità di esposizione nella seguente figura i componenti presenti nell'assieme con un'occorrenza maggiore di 1 vengono presi in considerazione una sola volta in quanto ciascuna occorrenza presenta il medesimo valore dell'indice C_h , C_r e I_{com} indipendentemente dalla scala in esame.

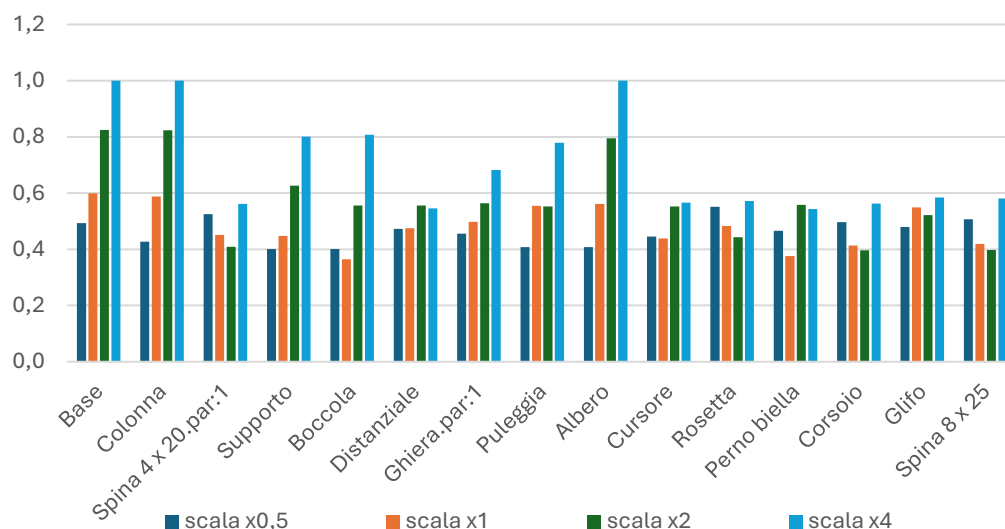


Figura 5.6: Confronto indice Ch dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

In modo del tutto analogo a quanto fatto sopra si riporta una tabella in cui si specifica il valore dell'indice di rimozione C_r per ciascun componente al variare della scala presa in considerazione.

	Scala x 0,5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Cr	Cr	Cr	Cr
Albero.par:1	1,9403	2,1319	2,1319	2,3875
Base.par:1	1,6975	1,8225	1,8225	1,9892
Boccola.par:1	0,4650	0,4650	0,5150	0,5150
Colonna.par:1	1,1975	1,2975	1,2975	1,4308
Corsoio.par:1	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Cursore.par:1	0,6761	0,6761	0,7428	0,7428
Distanziale.par:1	0,2325	0,2325	0,2575	0,2575
Ghiera.par:1	0,2833	0,2833	0,3083	0,3083
Ghiera.par:2	0,2833	0,2833	0,3083	0,3083
Glifo.par:1	0,6975	0,7725	0,7725	0,7725
Perno biella.par:1	0,4650	0,4650	0,5150	0,5150
Puleggia.par:1	0,4650	0,5150	0,5150	0,5150
Rosetta.par:1	0,2111	0,2111	0,2111	0,2278
Spina 4 x 20.par:1	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Spina 4 x 20.par:2	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Spina 4 x 20.par:3	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Spina 8 x 25.par	0,2325	0,2325	0,2325	0,2575
Supporto.par:1	0,9650	0,9650	1,0400	1,0400

Tabella 5.18: Confronto indice Cr dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

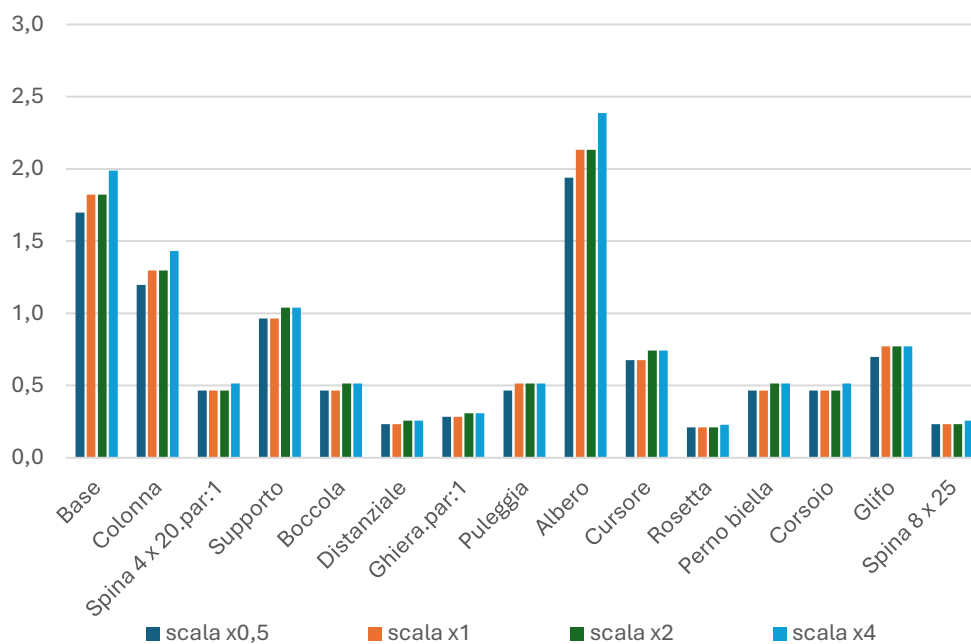


Figura 5.7: Confronto indice Cr dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

Infine, si analizza l'indice medio di complessità I_{com} per ciascun componente dell'assieme in corrispondenza delle diverse scale analizzate:

	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Icom	Icom	Icom	Icom
Albero.par:1	1,1742	1,3468	1,4634	1,6938
Base.par:1	1,0956	1,2108	1,3234	1,4945
Boccia.par:1	0,4331	0,4150	0,5352	0,6612
Colonna.par:1	0,8121	0,9425	1,0606	1,2154
Corsoio.par:1	0,4811	0,4392	0,4306	0,5388
Cursore.par:1	0,5607	0,5571	0,6479	0,6543
Distanziale.par:1	0,3528	0,3537	0,4067	0,4014
Ghiera.par:1	0,3695	0,3904	0,4362	0,4956
Ghiera.par:2	0,3695	0,3904	0,4362	0,4956
Glifo.par:1	0,5887	0,6607	0,6469	0,6787
Perno biella.par:1	0,4652	0,4202	0,5368	0,5293
Puleggia.par:1	0,4363	0,5347	0,5338	0,6471
Rosetta.par:1	0,3815	0,3469	0,3270	0,3996
Spina 4 x 20.par:1	0,4948	0,4578	0,4369	0,5384
Spina 4 x 20.par:2	0,4948	0,4578	0,4369	0,5384
Spina 4 x 20.par:3	0,4948	0,4578	0,4369	0,5384
Spina 8 x 25.par	0,3700	0,3258	0,3149	0,4190
Supporto.par:1	0,6831	0,7061	0,8331	0,9206
Media	0,5588	0,5785	0,6246	0,7145

Tabella 5.19: Confronto indice Icom dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

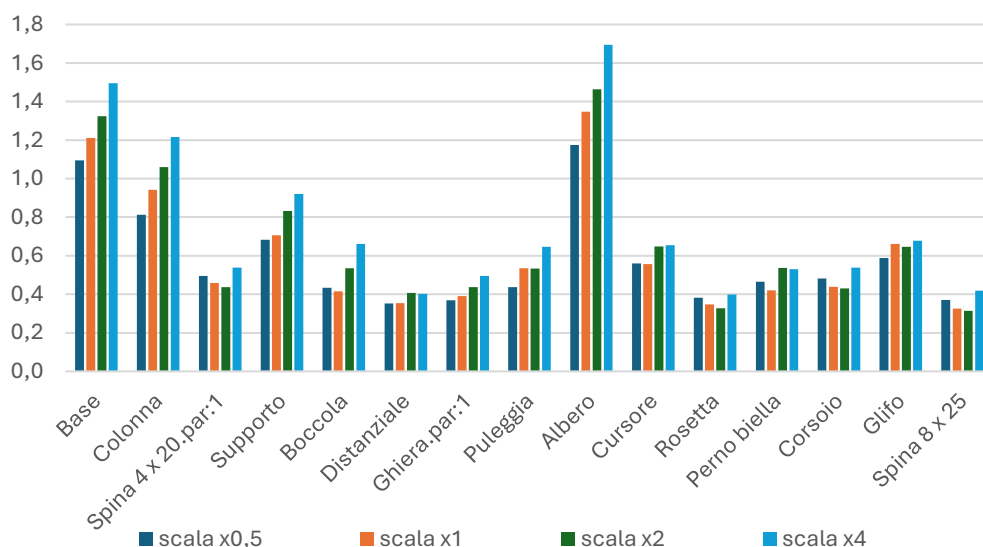


Figura 5.8: Confronto indice Icom dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

Dalla tabella 5.17 e dalla figura 5.6 si nota che l'indice di manovrabilità aumenta all'aumentare della scala ad eccezione di alcuni componenti. Prendendo in considerazione esclusivamente le scale x0,5 e x1 si verifica la seguente situazione:

	Scala x0,5	Scala x1
Componente	Ch	Ch
Boccola	0,4013	0,3650
Corsoio	0,4972	0,4135
Cursore	0,4452	0,4381
Perno biella	0,4654	0,375
Rosetta	0,5518	0,4828
Spina 4 x 20	0,5247	0,4506
Spina 8 x 25	0,5075	0,4190

Tabella 5.20: Confronto indice Ch per i componenti che mostrano una riduzione di tale indice nel passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1

I componenti riportati nella tabella precedente 5.20 sono caratterizzati da una riduzione dell'indice C_h nel passaggio tra la scala x0,5 alla scala x1. Questo particolare andamento è determinato dal valore dei tre Rating che caratterizzano l'indice C_h . Infatti, all'aumentare dell'ingombro e quindi della massa del componente sicuramente si noterà un incremento del $Rating_{Mass}$ ma ciò non è accompagnato da un altrettanto aumento del $Rating_{Size}$ e $Rating_{Thickness}$ (determinabili mediante le formule [3.6] e [3.7] riportate nel capitolo 3). Nel passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1 il $Rating_{Size}$ e $Rating_{Thickness}$ possono avere un duplice comportamento, ossia, possono essere caratterizzati da un aumento o riduzione del proprio valore.

Nelle seguenti tabelle si analizza l'incremento o la riduzione dei fattori di Rating per quei componenti che nel passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1 sono caratterizzati da una riduzione dell'indice di manovrabilità C_h .

Nella tabella 5.21 si riporta la variazione percentuale del fattore $Rating_{Size}$ correlato principalmente alle dimensioni della parte in esame.

	Scala x0.5	Scala x1	
Componente	$Rating_{Size}$	$Rating_{Size}$	Aumento o riduzione % del Rating
Boccola	0,5810	0,5407	-6,94
Corsoio	0,7215	0,5516	-23,55
Cursore	0,5570	0,6103	+9,57
Perno biella	0,6343	0,5131	-19,11
Rosetta	0,8009	0,6091	-23,95
Spina 4 x 20	0,7423	0,5820	-21,60
Spina 8 x 25	0,7267	0,5611	-22,79

Tabella 5.21: Variazione percentuale del Rating Size all'aumentare della scala per quei componenti che mostrano una riduzione dell'indice C_h all'aumentare delle dimensioni

In maniera analogo a quanto fatto in precedenza, nella tabella 5.22 si riporta la variazione percentuale del fattore $Rating_{Thickness}$ correlato allo spessore del componente.

	Scala x0.5	Scala x1	
Componente	$Rating_{Thickness}$	$Rating_{Thickness}$	Aumento o riduzione % del Rating
Boccola	0,6211	0,5403	-13,01
Corsoio	0,7215	0,6877	-4,69
Cursore	0,7783	0,7017	-9,84
Perno biella	0,7617	0,6121	-19,64
Rosetta	0,8546	0,8390	-1,83
Spina 4 x 20	0,8317	0,7694	-7,49
Spina 8 x 25	0,7955	0,6942	-12,73

Tabella 5.22: Variazione percentuale del Rating Thickness all'aumentare della scala per quei componenti che mostrano una riduzione dell'indice C_h all'aumentare delle dimensioni

Infine, nella seguente tabella 5.23 si riporta la variazione percentuale, sempre positiva, del fattore $Rating_{Mass}$. Si nota che la variazione del fattore di Rating relativo alla massa risulta essere estremamente elevato in termini percentuali ma piuttosto limitato in termini assoluti.

	Scala x0.5	Scala x1	
Componente	RatingMass	RatingMass	Aumento o riduzione % del Rating
Boccola	0,0018	0,0140	+677,78
Corsoio	0,0001	0,0012	+1100
Cursore	0,0004	0,0030	+650
Perno biella	0,0001	0,0012	+1100
Rosetta	0,0000	0,0002	Indefinito
Spina 4 x 20	0,0001	0,0004	+300
Spina 8 x 25	0,0002	0,0017	+750

Tabella 5.23: Variazione del Rating Mass all'aumentare della scala per quei componenti che mostrano una riduzione dell'indice Ch all'aumentare delle dimensioni

Per tali componenti la somma dei tre contributi, in tal caso, sarà nel complessivo negativo determinando un aumento della maneggevolezza del componente nel passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1. Questo dimostra come elementi estremamente piccoli possano mostrare una difficoltà di maneggevolezza molto elevata, come accade in maniera opposta per componenti estremamente grandi.

Per quanto riguarda invece l'indice di rimozione C_r i componenti sono caratterizzati dalla medesima tendenza, cioè un possibile incremento dell'indice all'aumentare dell'ingombro del componente. Questo comportamento singolare è dovuto dalla dipendenza dell'indice $C_{r,i}$ dalla massa, infatti, l'unico fattore presente nella sua formula dipendente da essa è il Rating Operation Type. L'aumento dell'ingombro (size) della parte e della sua massa causa una variazione dell'Operation Type e di conseguenza un incremento del suo Rating. Ad esempio, il componente denominato Albero nel passaggio dalla scala x1 alla scala x4, a causa dell'aumento delle sue dimensioni, vede variare l'Operation Type passando da 'one hand' ad 'automation', ciò accompagnato da un aumento del corrispondente Rating da 0,3 a 1. L'aumento del Rating Operation Type comporta inevitabilmente un incremento dell'indice C_r .

Infine, si analizza l'indice medio di complessità di disassemblaggio I_{com} che nasce dalla media degli indici C_r e C_h . Prendendo in considerazione il valore medio di tale indice in corrispondenza delle diverse scale si nota un continuo aumento, ma osservando più nello specifico notiamo che ci sono componenti che nel passaggio dalla scala minore a quelle superiori mostrano una riduzione dell'indice I_{com} . Ciò dimostra l'impossibilità di generalizzare il comportamento dell'intero prodotto, infatti ciascun componente merita un apposito studio in quanto l'andamento dei suoi

indici di manovrabilità e rimozione, dipendenti dalle sue dimensioni e massa, possono discostarsi dall'andamento medio dell'intero assieme.

6. Terzo caso studio: valvola di regolazione

Il terzo caso studio consiste nella valutazione dell'impatto ambientale e della complessità di disassemblaggio di una piccola valvola di regolazione. L'introduzione di questa ulteriore casistica permette di ampliare i risultati precedentemente ottenuti in quanto si prendono in considerazione categorie di materiali non ancora esaminati in precedenza.

La seguente figura mostra l'assieme in esame:

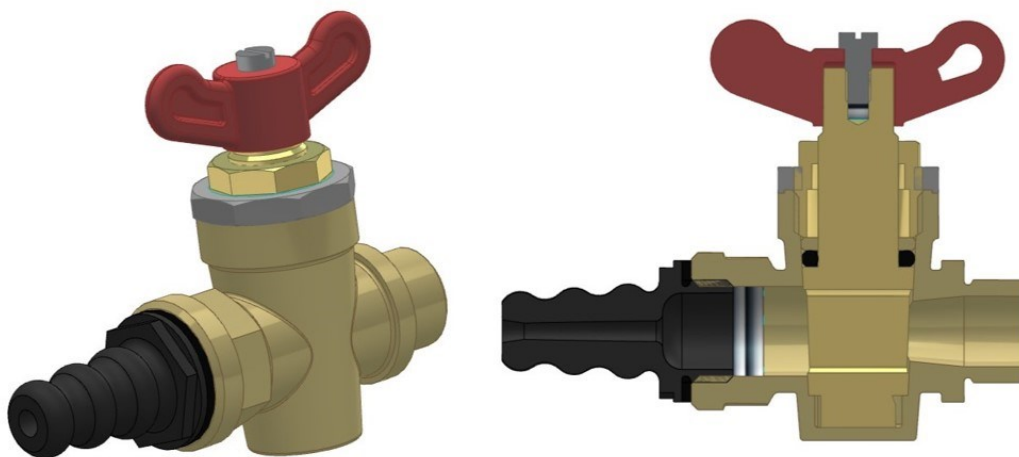


Figura 6.1: Immagine valvola di regolazione con vista in sezione

In maniera analoga a quanto fatto nei precedenti casi studio all'interno del software SolidEdge si attribuisce un opportuno materiale a ciascun componente dell'assieme. Di seguito si mostra una tabella riportante l'elenco dei componenti del prodotto e per ognuno di essi viene indicato il materiale, la densità del materiale, la massa ed il numero di occorrenze.

Componente	Materiale	Densità [Kg/mm3]	Massa [Kg]	Occorrenze nell'assieme
Anello di tenuta	Ottone, ottone giallo	8,4700E-06	0,0021	1
Cassa	Ottone, ottone giallo	8,4700E-06	0,1066	1
Controdado	Acciaio inossidabile, 316	8,0270E-06	0,008	1
Dado	Ottone, ottone giallo	8,4700E-06	0,0165	1
Guarnizione piatta	Polietilene, bassa densità	8,8600E-07	0,0002	1
Guarnizione toroidale	Polietilene, bassa densità	8,8600E-07	0,0002	1
Maschio	Ottone, ottone giallo	8,4700E-06	0,0578	1
Riduzione	Ottone, ottone giallo	8,4700E-06	0,0366	1

Vite	Acciaio inossidabile, 316	8,0270E-06	0,0013	1
Volantino	Pastica ABS, forte impatto	1,0240E-06	0,0019	1
			0,2312	0.2312

Tabella 6.1: Tabella riportante i componenti presenti nell'assieme con relativa massa, densità del materiale e numero di occorrenze

L'assieme conta un totale di dieci componenti per una massa di 0,2312 Kg. Gli elementi di collegamento fasteners presenti sono tre:

- Vite che permette il collegamento tra il componente Maschio e il Volantino, essenziale per la regolazione manuale della valvola; esso viene rilevato in ElectroSpindleTool come Screw standard head (vite a testa standard);
- Dado e Controdado entrambi rilevabili come Nut, essenziali per il collegamento tra il componente Maschio con la Cassa della valvola.

6.1 Environmental Impacts

Il software ElectroSpindleTool permette di visualizzare mediante un grafico a torta le categorie e sottocategorie di materiali presenti nel prodotto in esame specificandone le relative masse

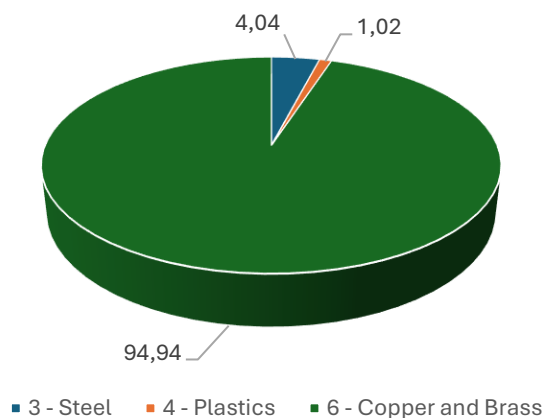


Figura 6.2: Grafico a torta riportante i materiali costituenti il prodotto con le relative masse in percentuale

Sub Category	Mass [kg]	Category [%]	Assembly [%]
3.3	0,01	100	4,04
4.3	~ 0,00	20,05	0,2
4.7	~ 0,00	79.95	0,81
6.2	0,22	100	94,94

Tabella 6.2: Sottocategorie di materiali presenti nel prodotto con relative masse

Dapprima si riporta la tabella che evidenzia i materiali che costituiscono l'assieme specificandone la propria sottocategoria di appartenenza e la massa con quale essi sono presenti all'interno del prodotto in esame.

Material Sub Category	Material	Material mass [Kg]
3.3 – Chromium steel	Acciaio inossidabile, 316	0,0093
4.3 – Plastics – LDPE	Polietilene, bassa densità	0,0004
4.7 – ABS	Pastica ABS, forte impatto	0,0019
6.2 - Brass	Ottone, ottone giallo	0,2196
		0,2312

Tabella 6.3: Sottocategorie di materiali presenti nel prodotto con relative masse

Sulla base dei materiali costituenti il prodotto e dipendentemente dalla massa con la quale essi sono presenti nello stesso, il software ElectroSpindleTool fornisce i valori relativi all'impatto ambientale del prodotto prendendo in considerazione le fasi di Material Phase e EoL Phase. In questo terzo caso studio l'analisi dell'impatto ambientale del prodotto non prende in considerazione la fase di utilizzo in quanto il suo uso è prettamente manuale e quindi senza l'ausilio di corrente elettrica. Nelle prossime tabelle si riportano i risultati forniti dal software relativi all'impatto ambientale del prodotto.

Material Sub Category	Material Phase [Kg CO2 eq]	EoL Phase Landfill [Kg CO2 eq]	EoL Phase Incineration [Kg CO2 eq]	EoL Phase Recycling [Kg CO2 eq]
3.3 – Chromium steel	0,04	0,0071	0,0005	-0,0182
4.3 – Plastics – LDPE	0	0,0004	0,0014	-0,0007
4.7 – ABS	0,01	0,0014	0,0045	-0,0034
6.2 - Brass	1,51	0,1671	0,0116	-0,428
Totale	1,56	0,176	0,018	-0,4503

Tabella 6.4: Impatto ambientale della Material Phase ed EoL Phase restituiti dal software ElectroSpindleTool

6.2 Validazione impatto ambientale

I risultati forniti dal software ElectroSpindleTool relativi all'impatto ambientale del prodotto devono essere opportunatamente validati attraverso l'utilizzo del software SimaPro. Di seguito si riportano gli impatti ambientali unitari [Kg CO2 eq/Kg] e complessivi [Kg CO2 eq] relativi alla fase di estrazione dei materiali:

Material	Mass [Kg]	Description	Material Phase [Kg CO2 eq/Kg]	Material Phase [Kg CO2 eq]
Acciaio inossidabile, 316	0,0093	Steel, chromium steel 18/8 {GLO} market for APOS, S	4,61	0,0429
Polietilene, bassa densità	0,0004	Polyethylene, low density, granulate {GLO} market for APOS, S	2,58	0,0010
Pastica ABS, forte impatto	0,0019	Acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer {GLO} market for APOS, S	4,91	0,0093
Ottone, ottone giallo	0,2196	Brass {RoW} market for brass APOS, S	6,88	1,5108
	0,2312			1,5641

Tabella 6.5: Risultati relativi all'impatto ambientale della fase di estrazione dei materiali ottenuti con il software SimaPro

Si riportano inoltre gli impatti ambientali unitari [Kg CO2 eq/Kg] e complessivi [Kg CO2 eq] relativi alle diverse strategie di gestione del fine vita: smaltimento in discarica, incenerimento con recupero di energia e riciclo dei materiali:

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase - Landfill [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase - Landfill [Kg CO2 eq]
Acciaio inossidabile, 316	0,0093	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0071
Polietilene, bassa densità	0,0004	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0003
Pastica ABS, forte impatto	0,0019	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,0014
Ottone, ottone giallo	0,2196	Municipal solid waste {RoW} treatment of, sanitary landfill APOS, S	0,761	0,1671
	0,2312			0,1759

Tabella 6.6: Risultati relativi all'impatto ambientale della fase di smaltimento in discarica dei materiali ottenuti con il software SimaPro

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase - Incineration [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase - Incineration [Kg CO2 eq]
Acciaio inossidabile, 316	0,0093	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel,	0,0529	0,0005

		municipal incineration APOS, S		
Polietilene, bassa densità	0,0004	Waste polyethylene {RoW} treatment of waste polyethylene, municipal incineration APOS, S	3,02	0,0012
Pastica ABS, forte impatto	0,0019	Waste plastic, mixture {RoW} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration APOS, S	2,38	0,0045
Ottone, ottone giallo	0,2196	Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, municipal incineration APOS, S	0,0529	0,0116
	0,2312			0,0178

Tabella 6.7: Risultati relativi all'impatto ambientale della fase di incenerimento dei materiali ottenuti con il software SimaPro

Material	Mass [Kg]	Description	EoL Phase - Recycling [Kg CO2 eq/Kg]	EoL Phase - Recycling [Kg CO2 eq]
Acciaio inossidabile, 316	0,0093	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-0,0181
Polietilene, bassa densità	0,0004	PE (waste treatment) {GLO} recycling of PE APOS, S	-1,57	-0,0006
Pastica ABS, forte impatto	0,0019	Mixed plastics (waste treatment) {GLO} recycling of mixed plastics APOS, S	-1,81	-0,0034
Ottone, ottone giallo	0,2196	Steel and iron (waste treatment) {GLO} recycling of steel and iron APOS, S	-1,95	-0,4282
	0,2312			-0,4504

Tabella 6.8: Risultati relativi all'impatto ambientale della fase di riciclo dei materiali ottenuti con il software SimaPro

Avendo a disposizione i risultati di entrambi i software è possibile effettuare un confronto per valutare l'attendibilità dei valori resi disponibili da ElectroSpindleTool.

Phase	ElectroSpindleTool	SimaPro	Errore [%]
Material Phase	1,56	1,5641	-0,26
EoL Phase Landfill	0,176	0,1759	+0,06

EoL Phase Incineration	0,018	0,0178	1,12
EoL Phase recycling	-0,4503	-0,4504	-0,02

Tabella 6.9: Confronto risultati ottenuti dal software ElectroSpindleTool con quelli ottenuti in SimaPro

Anche in quest'ultimo caso studio il software ElectroSpindleTool mostra un'elevatissima attendibilità nei confronti della valutazione dell'impatto ambientale del prodotto in quanto i valori forniti sono quasi sovrapponibili a quanto ricavato in SimaPro.

Infine, attraverso la figura 6.3, si nota che il ciclo di vita del prodotto che permette di minimizzare il suo impatto ambientale complessivo è quello caratterizzato da una fase di riciclo dei materiali al termine della sua vita utile.

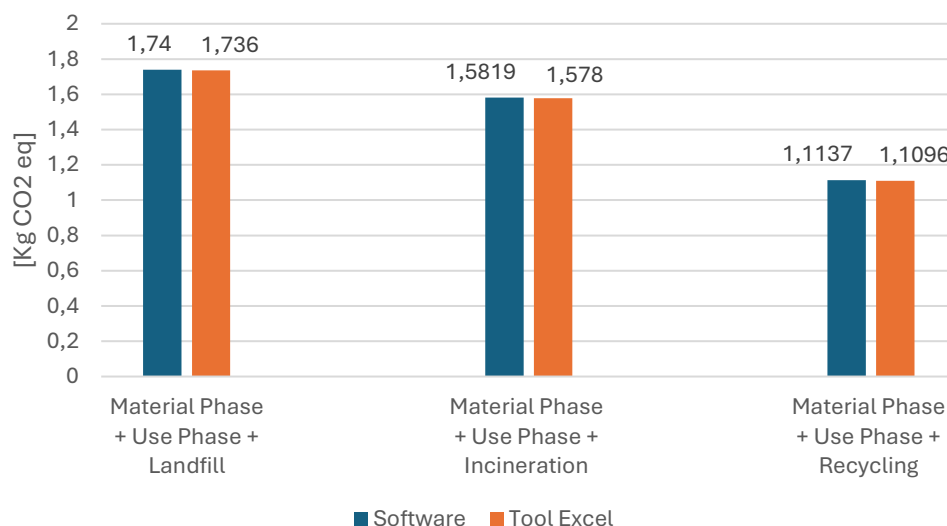


Figura 6.3: Confronto dei risultati ottenuti con i due diversi strumenti relativi all'intero impatto ambientale del prodotto

6.3 Recyclability Index

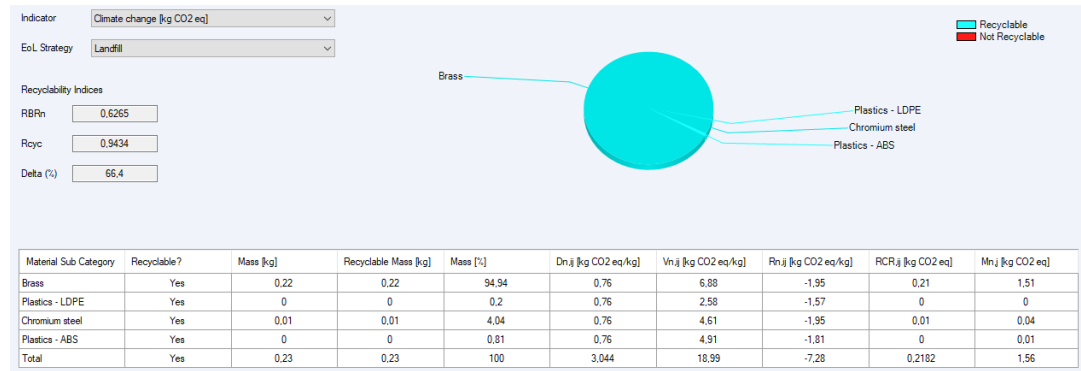


Figura 6.4: Modulo "Recyclability Index" in ElectrSpindleTool per la valutazione degli indici di riciclabilità

Il modulo "Recyclability Index" restituisce un valore dell'indice RBR_n pari a 0,6265 ed un valore dell'indice R_{cyc} pari a 0,9434 (94,34 %). Anche in questa terza casistica tutti i materiali che costituiscono il prodotto in esame sono riciclabili, infatti ciò contribuisce ad ottenere un indice R_{cyc} molto elevato.

6.4 Validazione indice di riciclabilità

In maniera analoga a quanto fatto in precedenza i valori degli indici di riciclabilità RBR_n e R_{cyc} restituiti dal software ElectroSpindleTool devono essere validati attraverso l'utilizzo del tool excel.

Material Sub Category	3.3 – Chromium steel	4.3 – Plastics - LDPE	4.7 – Plastics - ABS	6.2 - Brass	
Material	Acciaio inossidabile, 316	Polietilene, bassa densità	Pastica ABS, forte impatto	Ottone, ottone giallo	
Recyclability	Yes	Yes	Yes	Yes	
m_{ij} [Kg]	0,0093	0,0004	0,0019	0,2196	0,2312
$m_{recyc,i}$ [Kg]	0,0093	0,0004	0,0019	0,2196	0,2312
$D_{n.ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	0,761	0,761	0,761	0,761	
$V_{n.ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	4,61	2,58	4,91	6,88	
$R_{n.ij}$ [Kg CO2 eq/Kg]	-1,95	-1,57	-1,81	-1,95	

RCR_{ij}	0,85	0,7	0,7	0,95
$M_{n,j}$ [Kg CO2 eq]	0,0429	0,0010	0,0093	0,5108

Tabella 6.10: Tool Excel per la validazione degli indici di riciclabilità

Sfruttando le formule [3.1] e [3.2] riportate nel capitolo 3 e facendo la sommatoria su tutti i materiali presenti nel prodotto si ottiene:

$$RBR_n = \frac{\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{recyc,i} \times RCR_{ij} \times (V_{n,ij} + D_{n,ij} - R_{n,ij})}{\left(\sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times V_{n,ij} + M_n + U_n + \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^N m_{ij} \times D_{n,ij} \right)} = 0,6265$$

$$R_{cyc} = \frac{\sum_{k=1}^n (m_k \times R_{cyc,k})}{m_{tot}} \times 100 = 94,35 \%$$

Nel calcolo dell'indice di riciclabilità RBR_n il fattore U_n è stato impostato ad un valore pari a zero.

	ElectroSpindleTool	Tool Excel	Errore [%]
RBR_n	0,6265	0,6265	0
R_{cyc}	94,34	94,35	-0,01

Tabella 6.11: Confronto indici di riciclabilità tra ElectroSpindleTool e Tool Excel

La tabella 6.11 mostra che i valori degli indici di riciclabilità resi disponibili dal software ElectroSpindleTool sono perfettamente coincidenti con quanto ottenuto manualmente mediante il tool excel. Quest'ennesima sovrapposizione dei risultati non fa altro che enfatizzare l'affidabilità del software in studio.

6.5 Disassembly Index

Per la valutazione degli indici di disassemblaggio è necessario definire all'interno dell'apposito modulo "Liaisons View" i collegamenti presenti all'interno del prodotto in esame.

Components	Number of components	Fasteners	Number of Fasteners	Liasion Type
cassa.par:1 + riduzione.par:1	2		0	Integrally threaded part
guarnizione_piatta.par:1 + cassa.par:1	2		0	Weak fit interference
riduzione.par:1 + guarnizione_piatta.par:1	2		0	Weak fit interference

maschio.par:1 + volantino.par:1	2	vite.par:1	1	Screw standard head
cassa.par:1 + maschio.par:1	2	dado.par:1 + controdado.par:1	2	Nut
anello_di_tenuta.par:1 + cassa.par:1	2		0	Weak fit interference
anello_di_tenuta.par:1 + maschio.par:1	2		0	Weak fit interference
guarnizione_toroidale.par:1 + cassa.par:1	2		0	Weak fit interference
guarnizione_toroidale.par:1 + maschio.par:1	2		0	Weak fit interference

Tabella 6.12: Elenco dei collegamenti presenti nel prodotto definiti mediante il modulo "Liaisons View" presente nel software

Sulla base dei collegamenti precedentemente definiti il software restituisce il valore degli indici C_h , C_r e I_{com} dei componenti del prodotto in esame.

Component	C_h	C_r	I_{com}
anello_di_tenuta.par:1	0,45	0,46	0,46
cassa.par:1	0,43	1,14	0,79
guarnizione_piatta.par:1	0,45	0,46	0,46
guarnizione_toroidale.par:1	0,45	0,46	0,46
maschio.par:1	0,41	0,85	0,63
riduzione.par:1	0,36	0,51	0,44
volantino.par:1	0,40	0,22	0,31

Tabella 6.13: Indici C_h , C_r e I_{com} dei componenti appartenenti all'assieme

I risultati forniti dal software mostrano che il componente caratterizzato dal valore più elevato dell'indice medio di disassemblaggio I_{com} è la Cassa con un valore pari a 0,79. Il componente, invece, con il valore minimo dell'indice I_{com} è il Volantino con un $I_{com} = 0,31$, mentre il valore medio dell'indice I_{com} per l'intero assieme si assesta attorno a 0,5.

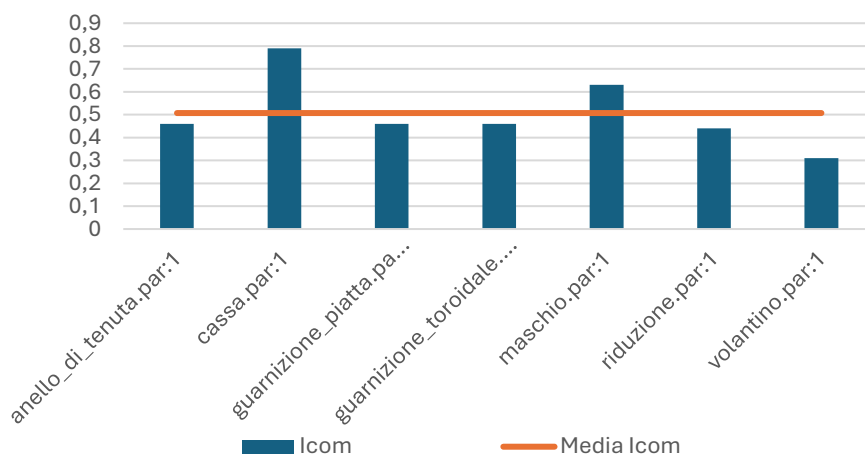


Figura 6.5: Indice I_{com} dei componenti appartenenti all'assieme

6.6 Validazione degli indici C_h e C_r

Sfruttando la procedura spiegata nel paragrafo 4.6 del capitolo 4 si riportano di seguito gli indici C_h , C_r e I_{com} dei componenti del prodotto ottenuti mediante il tool excel.

Component	C_h	C_r	I_{com}
Anello di tenuta.par:1	0,4507	0,4650	0,4600
Cassa.par:1	0,4294	1,1458	0,7876
Guarnizione piatta.par:1	0,4514	0,4650	0,4582
Guarnizione toroidale.par:1	0,4468	0,4650	0,4560
Maschio.par:1	0,4144	0,8467	0,6306
Riduzione.par:1	0,3594	0,5158	0,4346
Volantino.par:1	0,3960	0,2167	0,3063
Media			0,5049

Tabella 6.14: Indici C_h , C_r e I_{com} dei componenti del prodotto ricavati dal Tool Excel

Confrontando le tabelle 6.13 e 6.14 si comprende come i risultati presentati dal software ElectroSpindleTool siano perfettamente coincidenti con quanto ottenuto con il tool excel. La sovrapposizione dei risultati è confermata inoltre dal valore medio dell'indice I_{com} restituito dai due strumenti, entrambi pari ad un valore di 0,50 circa.

6.7 Dipendenza degli indici di disassemblaggio dalla massa

Riprendendo quanto riportato in precedenza nel paragrafo 4.7 del capitolo 4 si apportano delle modifiche ai componenti dell'assieme in esame, più precisamente, ciascun componente del prodotto è stato scalato x0.5, x2 e x4 rispetto alle sue dimensioni originarie facendo rimanere invariato il suo materiale costituente. Ciò con l'obiettivo di analizzare quanto tali modifiche possano apportare una variazione numerica degli indici di disassemblaggio

Componente	Densità [Kg/mm3]	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
		Volume [mm3]	Volume [mm3]	Volume [mm3]	Volume [mm3]
Anello di tenuta	8,4700E-06	30,199	241,591	1932,731	15461,851
Cassa	8,4700E-06	1525,771	12205,776	97648,442	781193,613
Guarnizione piatta	8,8600E-07	33,576	268,606	2148,849	17190,795
Guarnizione toroidale	8,8600E-07	30,504	244,034	1952,271	15618,171
Maschio	8,4700E-06	827,735	6621,884	52975,069	423800,513
Riduzione	8,4700E-06	523,649	4189,193	33513,544	268108,354

Volantino	1,0240E-06	235,008	1880,066	15040,528	120324,223
-----------	------------	---------	----------	-----------	------------

Tabella 6.15: Tabella riportante i volumi dei singoli componenti nelle quattro diverse scale dell'assieme

Nelle seguenti tabelle e figure si effettua un confronto degli indici C_h , C_r e I_{com} per ciascun componente dell'assieme prendendo in considerazione le quattro diverse scale realizzate. Ancora una volta, nel confronto vengono trascurati gli elementi fasteners.

	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Ch	Ch	Ch	Ch
Anello di tenuta	0,5283	0,4507	0,5017	0,5630
Cassa	0,3996	0,429	0,5776	0,8017
Guarnizione piatta	0,5150	0,4514	0,5622	0,5484
Guarnizione toroidale	0,5276	0,4468	0,5679	0,5554
Maschio	0,4221	0,4144	0,5576	0,7061
Riduzione	0,4355	0,3594	0,5524	0,638
Volantino	0,4432	0,3960	0,5387	0,5108

Tabella 6.16: Confronto indice Ch dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

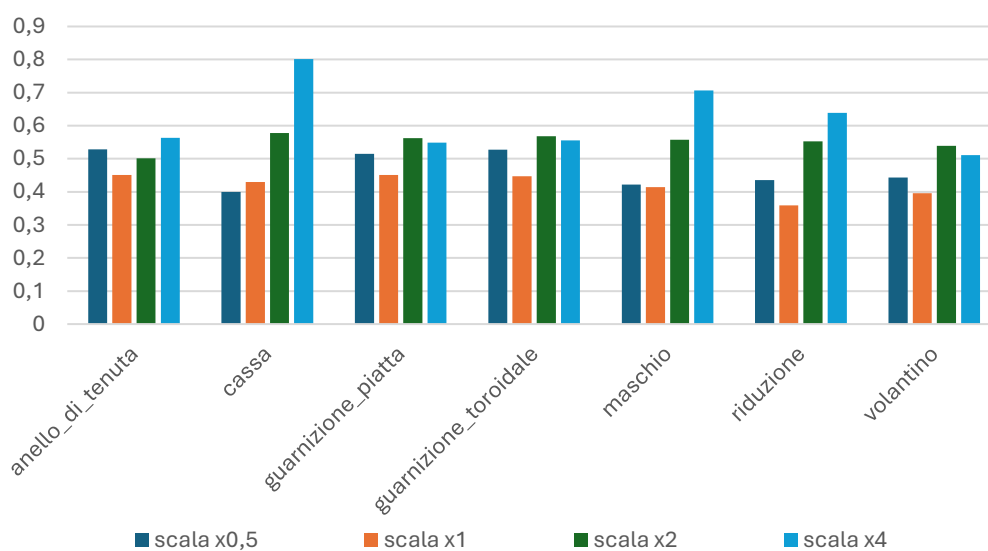


Figura 6.6: Confronto indice Ch dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

In modo del tutto analogo a quanto fatto sopra si riporta una tabella in cui si specifica il valore dell'indice di rimozione C_r per ciascun componente al variare della scala presa in considerazione.

	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Cr	Cr	Cr	Cr
Anello di tenuta	0,4650	0,4650	0,4650	0,5150
Cassa	1,1458	1,1458	1,2708	1,2708
Guarnizione piatta	0,4650	0,4650	0,5150	0,5150
Guarnizione toroidale	0,4650	0,4650	0,5150	0,5150
Maschio	0,8467	0,8467	0,946	0,9467
Riduzione	0,5158	0,5158	0,5658	0,5658
Volantino	0,2167	0,2167	0,2417	0,2417

Tabella 6.17: Confronto indice Cr dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

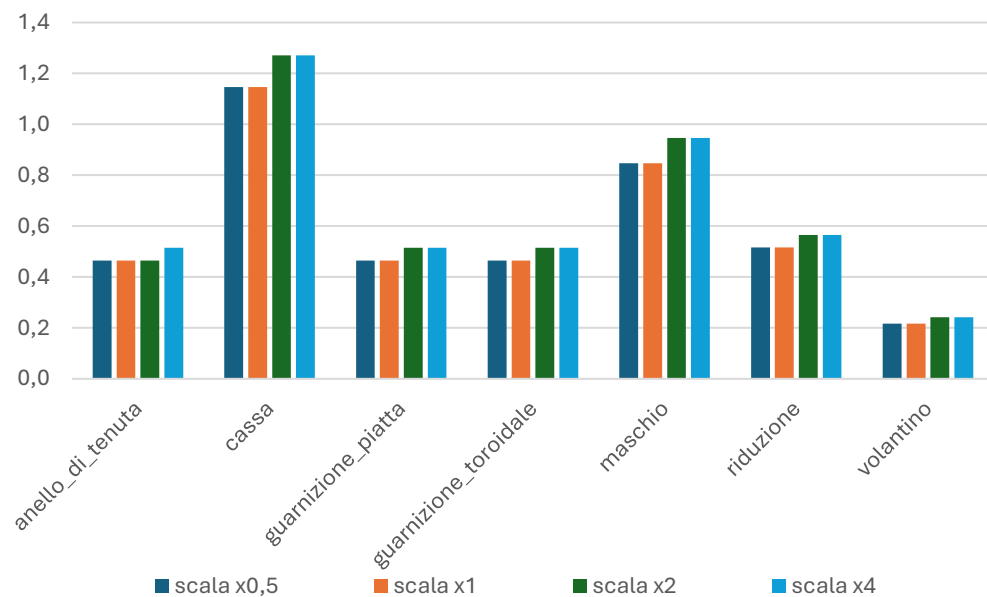


Figura 6.7: Confronto indice Cr dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

Infine, si analizza l'indice medio di complessità I_{com} per ciascun componente dell'assieme in corrispondenza delle diverse scale analizzate:

	Scala x 0.5	Scala x 1	Scala x 2	Scala x 4
Componente	Icom	Icom	Icom	Icom
Anello di tenuta	0,4967	0,4579	0,4834	0,5390
Cassa	0,7727	0,7876	0,9242	1,036
Guarnizione piatta	0,4900	0,4582	0,5386	0,5317
Guarnizione toroidale	0,4963	0,4559	0,5414	0,5352
Maschio	0,6344	0,6306	0,7521	0,8264
Riduzione	0,4757	0,4376	0,5591	0,6021
Volantino	0,3299	0,3063	0,3902	0,3762
Media	0,5279	0,5049	0,5984	0,6352

Tabella 6.18: Confronto indice Icom dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

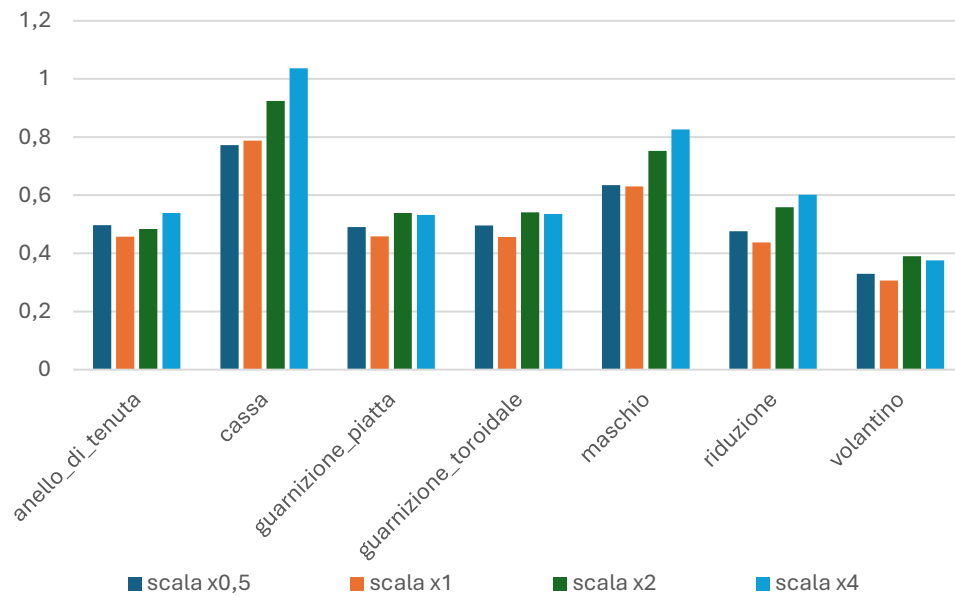


Figura 6.8: Confronto indice Icom dei componenti relativi alle diverse scale dell'assieme

Osservando la tabella 6.16 e la figura 6.6 si nota che il passaggio dalla scala x1 a quelle superiori comporta un incremento dell'indice di manovrabilità C_h per tutti i componenti esaminati, invece il passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1 ne causa, per la maggior parte di essi, una riduzione. Come esaminato in precedenza, tale riduzione dell'indice di manovrabilità, all'aumentare dell'ingombro e della massa del componente, è determinata dalla variazione del $Rating_{Size}$ e $Rating_{Thickness}$.

	Scala x0.5	Scala x1	
Componente	$Rating_{Size}$	$Rating_{Size}$	Aumento o riduzione % del Rating
Anello di tenuta	0,7343	0,5202	-29,16
Guarnizione piatta	0,6895	0,5129	-25,61
Guarnizione toroidale	0,7375	0,5191	-29,61
Maschio	0,5458	0,6191	+13,43
Riduzione	0,6180	0,5217	-15,58
Volantino	0,5838	0,5372	-7,98

Tabella 6.19: Variazione del Rating Size all'aumentare della scala per quei componenti che mostrano una riduzione dell'indice C_h all'aumentare delle dimensioni

In maniera analoga a quanto fatto in precedenza, nella tabella 6.20 si riporta la variazione percentuale del fattore $Rating_{Thickness}$ correlato allo spessore del componente.

	Scala x0.5	Scala x1	
Componente	<i>Rating Thickness</i>	<i>Rating Thickness</i>	Aumento o riduzione % del Rating
Anello di tenuta	0,8507	0,8317	-2,23
Guarnizione piatta	0,8555	0,8411	-1,68
Guarnizione toroidale	0,8483	0,8213	-3,18
Maschio	0,7191	0,6139	-14,63
Riduzione	0,6877	0,5498	-20,05
Volantino	0,7457	0,6505	-12,77

Tabella 6.20: Variazione del *Rating Thickness* all'aumentare della scala per quei componenti che mostrano una riduzione dell'indice *Ch* all'aumentare delle dimensioni

Infine, nella seguente tabella 6.21 si riporta la variazione percentuale, in tal caso positiva, del fattore *Rating_{Mass}*:

	Scala x0.5	Scala x1	
Componente	<i>Rating Mass</i>	<i>Rating Mass</i>	Aumento o riduzione % del Rating
Anello di tenuta	0,0001	0,0004	+300
Guarnizione piatta	0,0000	0,0000	Indefinito
Guarnizione toroidale	0,0000	0,0000	Indefinito
Maschio	0,0013	0,0103	+602,31
Riduzione	0,0008	0,0065	+712,5
Volantino	0,0000	0,0003	indefinito

Tabella 6.21: Variazione del *Rating Mass* all'aumentare della scala per quei componenti che mostrano una riduzione dell'indice *Ch* all'aumentare delle dimensioni

Contrariamente a quanto avviene per *Rating_{Size}* e *Rating_{Thickness}*, il *Rating_{Mass}* è caratterizzato, per ciascun componente da un incremento del proprio valore. L'incremento del *Rating_{Mass}* potrebbe risultare essere indefinito, ciò è dovuto alla massa estremamente bassa del componente in corrispondenza delle scale prese in considerazione. Infatti, con un valore di massa molto piccolo, la formula del *Rating_{Mass}* [3.8] riportata nel paragrafo 3.1.6 darebbe alla luce un fattore di Rating estremamente basso.

Anche in questo terzo caso studio, l'indice di rimozione *C_r*, dei componenti è caratterizzato da una sola tendenza, cioè un possibile incremento dell'indice all'aumentare dell'ingombro del componente. Questo comportamento singolare è dovuto dalla dipendenza dell'indice *C_{r,i}* dalla massa, infatti, l'unico fattore presente nella sua formula dipendente da essa è il Rating Operation Type. Ad esempio, il componente Cassa nelle dimensioni corrispondenti alla scala x1 mostra un Operation

Type pari a 'one hand', il passaggio alla scala x4 ne causa una variazione in 'two hand' e di conseguenza il Rating Operation Type passa da un valore di 0,3 ad un valore pari a 0,6. Ciò determina inevitabilmente un incremento complessivo dell'indice C_r .

Infine, l'indice medio di complessità di smontaggio I_{com} nasce dalla media degli indici C_h e C_r . Analizzando il valore medio dell'indice I_{com} in corrispondenza delle quattro diverse scale esaminate si nota che esso subisce un aumento nel passaggio dalla scala x1 a quelle superiore ed una riduzione nel passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1. Tale comportamento mostra, nuovamente, un comprensibile aumento della complessità di disassemblaggio del prodotto e dei singoli componenti all'aumentare delle dimensioni di quest'ultimi.

7. Conclusioni

Nel corso di questa tesi si è analizzata l'efficacia e l'affidabilità del software ElectroSpindleTool nell'ambito della sostenibilità ambientale e dell'ecodesign, utilizzando diversi casi studio. L'obiettivo principale era dimostrare la precisione e l'affidabilità dei risultati forniti dal software, validandoli con l'ausilio di SimaPro e di un tool Excel.

Dall'analisi condotta è emerso che ElectroSpindleTool ha dimostrato una notevole affidabilità e precisione nei risultati ottenuti:

1. Validazione dei risultati: i risultati generati dal software sono stati validati con grande successo utilizzando SimaPro e un apposito tool Excel, confermando a pieno la loro coerenza e accuratezza.
2. Prestazioni del software: il software ha dimostrato elevate performance in tutti e tre i casi studio esaminati, indipendentemente dalla complessità dell'assieme e dalle variabili in gioco (materiali, tipologie di collegamento).
3. Applicabilità nell'ecodesign: ElectroSpindleTool si è quindi rilevato un ottimo strumento nell'ambito dell'ecodesign, in quanto riesce a supportare e contribuire a soluzioni progettuali mirate alla sostenibilità ambientale.

Il software, inoltre, si è rivelato molto facile da usare, senza risultare macchinoso. La suddivisione dell'interfaccia del software in sei diversi moduli, facilmente comprensibili, facilita enormemente il lavoro degli utenti migliorandone in maniera rilevante l'esperienza d'uso. Inoltre, l'elaborazione dei risultati e la loro rappresentazione grafica avvengono in maniera celere, senza obbligare l'utente a tempi di attesa eccessivi. Nonostante l'esperienza d'uso si sia dimostrata molto gratificante è comunque possibile apportare delle migliorie con lo scopo di innalzare ulteriormente l'usabilità del software:

- Possibilità di esportare mediante appositi comandi tabelle e grafici elaborati dal software senza obbligare l'utente ad effettuare un semplice screenshot della pagina in questione;
- Ampliare le modalità di rappresentazione grafica dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo di ulteriori tipologie di grafici rispetto a quelli già presenti;

- Permettere una comunicazione continua tra il software ElectroSpindleTool e SolidEdge in modo tale che qualsiasi modifica effettuata su quest'ultimo possa essere trasmessa in tempo reale a ElectroSpindleTool

Si precisa, però, che le proposte riportate in precedenza rappresentano esclusivamente una possibilità di perfezionare, attraverso future release, uno strumento software che già si presenta in maniera estremamente affidabile.

Entrando più nello specifico dei casi studio esaminati si nota che le modifiche apportate ai file CAD degli assiemi, in termini di ingombro, comportano variazioni sensibili sia nei confronti dell'impatto ambientale che della complessità di disassemblaggio. Per quanto riguarda l'impatto ambientale è facilmente comprensibile che l'aumento delle dimensioni e quindi della massa di un componente o di un intero assieme comporti un maggiore impatto ambientale, sia nella fase di estrazione delle materie prime che nella fase di gestione del fine vita. Per quanto riguarda invece la complessità di disassemblaggio si è notato che la modifica delle dimensioni dei componenti può causare delle variazioni degli indici di manovrabilità e rimozione:

- L'indice di manovrabilità C_h si è dimostrato estremamente sensibile alla variazione della dimensione e della massa dei singoli componenti, la tendenza comune ai casi studi esaminati è un aumento di tale indice al passaggio dalla scala x1 a quelle superiore e nel passaggio dalla scala x1 a quella inferiore x0,5. Ciò a dimostrazione che la difficoltà di manovrabilità cresce in maniera rilevante quando si è in presenza di componenti o estremamente piccoli o estremamente grandi.
- L'indice di rimozione C_r , invece, tende ad avere un comportamento singolare, cioè un possibile aumento del suo valore nel passaggio dalle scale inferiori a quelle superiori e ciò è dovuto, come dimostrato in precedenza, alla presenza nella formula dell'indice $C_{r,i}$ del fattore di Rating Operation Type il cui valore aumenta all'incrementare della dimensione e della massa del componente.
- Infine, si analizza l'indice medio di disassemblaggio I_{com} , il quale risulta essere la media degli indici di manovrabilità C_h e di rimozione C_r .

	Incremento o riduzione % dell'indice I_{com} nel passaggio tra le diverse scale		
	da x0,5 a x1	da x1 a x2	da x2 a x4
Biella-manovella	+1,173	+4,252	+16,187
Glifo	+3,525	+7,969	+14,393
Valvola di regolazione	-4,357	+18,519	+6,15
Media	+0,114	+10,25	+12,24

Tabella 7.1: Tabella riassuntiva variazione % dell'indice I_{com} nel passaggio tra le diverse scale esaminate

Dalla precedente tabella 7.1 si nota che in media il passaggio dalla scala inferiore x0,5 a quelle superiori comporta un incremento dell'indice I_{com} , mostrando l'incremento maggiore in corrispondenza del passaggio dalla scala x2 alla scala x4. Però, analizzando i singoli casi studio esaminati si nota che non sempre il passaggio dalla scala x0,5 alla scala x1 causa un aumento dell'indice in esame, infatti, nel caso studio della valvola di regolazione si nota una riduzione di circa 4,36 % dell'indice I_{com} . Ciò dimostra che non è possibile eseguire un'analisi sommaria comprensiva di tutti i casi studio, bensì ciascuno di loro merita di essere trattato individualmente in quanto il proprio comportamento può discostarsi dalla media. Inoltre, questo progetto di tesi ha dimostrato che non è possibile normalizzare il valore dell'indice I_{com} , cioè individuare valori soglia al di sotto o al di sopra dei quali si è in grado di dire che un componente sia facile o difficile da smontare. Questo è dovuto al fatto che un componente, seppur facile da maneggiare e quindi con un indice di manovrabilità C_h molto basso può presentare diversi collegamenti con altre parti, quindi, può essere caratterizzato da tanti indici $C_{r,i}$. La sommatoria di questi indici $C_{r,i}$, ognuno specifico di un dato collegamento della parte in esame, può comportare un incremento rilevante dell'indice I_{com} fino a valori ben superiori all'unità. Quindi a tal proposito ciascun componente dell'assieme merita un apposito studio nel quale si esaminano sia le caratteristiche dello stesso (dimensioni, massa, ingombro) che il numero e la tipologia di collegamenti presenti con altre parti.

In conclusione, le caratteristiche di precisione, usabilità e facilità d'uso del software lo rendono uno strumento prezioso per professionisti impegnati nell'ecodesign e nella sostenibilità ambientale, contribuendo a sviluppi progettuali sempre più in linea con la filosofia dell'economia circolare, verso il quale il mondo intero si sta dirigendo. Infatti, il software dà la possibilità ai progettisti di analizzare quanto le dimensioni dei componenti e la tipologia di collegamenti che essi presentano possano influire sulle prestazioni ambientali

dell'intero prodotto, favorendo attività di correzione e miglioramento in fase di progettazione.

Sitografia

Capitolo 1

- <https://agente0011.it/la-sostenibilita-e-storia-passata-presente-futura/>
- <https://asvis.it/1-agenda-2030-dell-onu-per-lo-sviluppo-sostenibile/>
- <https://www.corriere.it/native-adv/eni-longform-04-dall-economia-dell-astronauta-a-quella-circolare-evoluzione-di-un-idea-rivoluzionaria.shtml>
- <https://www.are.admin.ch/are/it/home/sviluppo-sostenibile/politica-sostenibilita/agenda2030/onu--le-pietre-miliari-dello-sviluppo-sostenibile/1992--conferenza-delle-nazioni-unite-su-ambiente-e-sviluppo--ver.html>
- <https://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/registro-italiano-emission-trading/aspetti-general/protocollo-di-kyoto>
- <https://unric.org/it/agenda-2030/>
- <https://www.focus.it/scienza/scienze/focus-next-30-il-buco-dell-ozono>

Capitolo 2

- <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20151201STO05603/economia-circolare-definizione-importanza-e-vantaggi>
- https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/ip_20_420
- <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/#what>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917301763>
- https://www.insic.it/tutela-ambientale/inquinamento/raee-rifiuti-da-apparecchiature-elettriche-ed-elettroniche-cosa-sono-come-si-smaltiscono-e-normativa-di-riferimento/#RAEE_cose
- <https://www.rackone.it/glossario/dfx-design-for-x/>

Capitolo 3

- <https://simapro.com/>
- <https://solidedge.siemens.com/it/>

Capitolo 4

- <https://cad.grabcad.com/library/slider-crank-mechanism-15>

Capitolo 5

- <https://grabcad.com/library/glyph-animation>

Capitolo 6

- <https://grabcad.com/library/stopcock-1>

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia gratitudine a tutti coloro che mi hanno supportato durante il mio percorso accademico e la stesura di questa tesi. In primo luogo, vorrei ringraziare il mio relatore, il Prof. Michele Germani, per la sua guida e i suoi preziosi consigli, fondamentali per il successo di questo lavoro. Un ringraziamento speciale va anche alla mia correlatrice, Prof.ssa Marta Rossi, per il suo contributo e le sue intuizioni che hanno arricchito questo progetto. Un sincero ringraziamento alla Dott.ssa Federica Cappelletti e al Dott. Giacomo Menchi che mi hanno aiutato e sostenuto in questo progetto di tesi e per essere stati sempre disponibili per qualsiasi aiuto e consiglio.

Un enorme ringraziamento alla mia famiglia, a mio padre Germano, a mia madre Linda e mia sorella Roberta. Un grazie di cuore per aver sempre creduto in me e sostenuto in ogni passo di questo lungo percorso, grazie dei vostri sacrifici.

A te Nonna Gina, questo mio traguardo lo dedico a te. Avrei voluto che tu potessi essere con me in questo giorno così importante, per festeggiare e ridere insieme. Da quando non sei più qui con noi non è passato un giorno in cui non ti abbia dedicato un pensiero, la tua mancanza è assoluta e ancora oggi si fa fatica ad accettarla. Sono sicuro che da lassù, da qualsiasi parte, insieme al Nonno Dante, stiate festeggiando per me. Grazie di tutto quello che hai fatto per me, sarai sempre al mio fianco nei giorni più importanti della mia vita. Un bacio!

Un ringraziamento a tutti i miei amici, al gruppo ZAS, ai ragazzi della palestra FitStop di Pianella, grazie a tutti coloro che con un semplice sorriso o battuta hanno alleviato le mie giornate dalle preoccupazioni incontrate lungo questo percorso. Grazie di cuore!