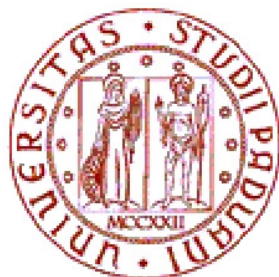


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI



Scuola di Dottorato di Ricerca
Territorio Ambiente Risorse e Salute

Indirizzo in
Tecnologie Meccaniche dei Processi Agricoli e Forestali

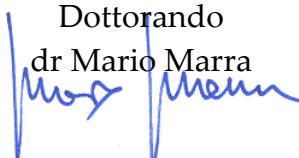
Ciclo XXV

**Impiego di componenti in legno per edifici in ambito rurale.
Valutazione prestazionale e sostenibilità ambientale
mediante Life Cycle Assessment.**

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Aristide Lenzi

Coordinatore d'Indirizzo: Ch.mo Prof. Luigi Sartori

Supervisore: Ch.mo Prof. Stefano Guercini

Dottorando
dr Mario Marra


Anno Accademico 2012 – 2013
DCCXCI

INDICE

RIASSUNTO	vii
ABSTRACT.....	ix
PREFAZIONE.....	xi
RINGRAZIAMENTI.....	xiii
1. Introduzione e obiettivi della ricerca	1
2. Edifici con struttura di legno.....	5
2.1. Edifici a blocchi o a tronchi	6
2.2. Edifici a pannelli di tavole a strati incrociati.....	7
2.3. Edifici a travi e pilastri	10
2.4. Edifici a telaio	12
2.4.1. Il pacchetto costruttivo	15
3. Legno strutturale.....	19
3.1. Requisiti.....	20
3.2. Risultati.....	27
4. Qualità dell'isolamento	30
4.1. Prestazioni termiche	31
4.1.1. Materiali isolanti.....	33
4.2. Pannelli di lana di legno e cemento.....	35
4.2.1. Fabbricazione dei pannelli di lana di legno.....	36
4.2.2. Prodotti ottenuti e loro caratteristiche.....	40
5. Metodo applicato alla valutazione ambientale.....	44
5.1. Life Cycle Assessment (LCA).....	45
5.1.1. Unità e flussi di processo.....	48
5.1.2. Unità funzionale	50
5.2. Obiettivo e campo di applicazione.....	52
5.2.1. Raccolta dei dati in ingresso	53
5.3. Analisi dell'inventario (LCI)	55
5.3.1. Il problema dell'allocazione.....	57
5.3.2. Allocazione a ciclo chiuso e a ciclo aperto	59
5.3.3. Analisi di sensibilità	62
5.4. Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA).....	63

5.4.1.	Fasi della valutazione dell'impatto del ciclo di vita	64
5.4.2.	Classificazione e caratterizzazione	66
5.4.3.	Normalizzazione e ponderazione.....	68
5.5.	Interpretazione del ciclo di vita.....	69
6.	LCA del pannello di lana di legno e cemento	73
6.1.	Obiettivo e campo di applicazione	75
6.1.1.	Diagramma di flusso del processo produttivo	77
6.1.2.	Raccolta dei dati del processo produttivo	85
6.1.3.	Analisi di sensibilità	92
6.2.	Analisi dell'inventario del ciclo di vita	94
6.2.1.	Analisi dell'incertezza	97
6.3.	Valutazione dell'impatto del ciclo di vita.....	101
6.3.1.	Metodo Ecoindicator99	102
6.3.2.	Risultati.....	104
6.3.3.	Metodo Edip 2003	113
6.3.4.	Risultati con metodo Edip 2003	115
7.	Analisi di sensibilità	121
7.1.	Approvvigionamento del legname.....	123
7.1.1.	Analisi dei dati	124
7.1.2.	Valutazione degli impatti	135
7.2.	Produzione di energia elettrica	141
7.1.	Smaltimento degli scarti di produzione.....	144
8.	Conclusioni	148
	BIBLIOGRAFIA	152
	APPENDICE.....	159

Indice delle Figure

Figura 1 - Sistema a telaio	13
Figura 2 - Pacchetto costruttivo del sistema a telaio	18
Figura 3 - Fasi di una LCA [34]	47
Figura 4 - Esempio di sistema di prodotto ai fini dell'analisi di inventario del ciclo di vita [34]	49
Figura 5 - Esempio di determinate unità di processo all'interno di un sistema di prodotti [34].....	49
Figura 6 - Esempio di una unità di processo [43]	50
Figura 7 - Procedimento semplificato per un'analisi di inventario [35].....	55
Figura 8 - Esempio del riciclaggio di materia e del recupero di energia [43]	58
Figura 9 - Diagramma di flusso per l'esempio di riciclaggio a ciclo chiuso [43]	61
Figura 10 - Processo di allocazione a ciclo chiuso per un sistema a ciclo aperto [43].....	62
Figura 11 - Elementi della fase di LCIA [34]	64
Figura 12 - Concetto degli indicatori di categoria [35].....	65
Figura 13 - Esempio di processo in parallelo [44].....	67
Figura 14 - Esempio di processo in serie [44]	67
Figura 15 - Categorie dei pannelli a base di legno	73
Figura 16 - Pannello di lana di legno e cemento WWCB.....	75
Figura 17 - Diagramma di flusso del processo produttivo Celenit.....	77
Figura 18 - Impianto produttivo	78
Figura 19 - Cataste di abete.....	78
Figura 20 - Piaalla a disco rotante	79
Figura 21 - Disco della piaalla	79
Figura 22 - Utensile	80
Figura 23 - Macchina per l'immersione in continuo nella soluzione salina	81
Figura 24 - Miscelatore lana di legno e cemento	81
Figura 25 - Spalmatrice	82
Figura 26 - Sezionatrice	82
Figura 27 - Impilatrice	83
Figura 28 - Immagazzinamento	84
Figura 29 - Rappresentazione del ciclo produttivo WWCB.....	85
Figura 30 - Pannelli legno-cemento accoppiati	90

Figura 31 - WWCB, Diagramma a network Ecoindicator99.....	97
Figura 32 - WWCB, Diagramma a network Edip 2003	116
Figura 33 - Schema dei processi analizzati nello studio della filiera forestale.....	123

Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Distribuzione delle tavole in classi di resistenza secondo i due sistemi di classificazione.....	28
Tabella 2 - Classificazione dei materiali isolanti	34
Tabella 3 - Caratteristiche termofisiche dei materiali isolanti.....	34
Tabella 4 – Caratteristiche dei pannelli WWCB in funzione dello spessore	76
Tabella 5 - Quantitativi di tronchi impiegati nel biennio 2010-2011	86
Tabella 6 - Provenienza legname.....	86
Tabella 7 - Quantitativi di segatura prodotta nel biennio 2010-2011	87
Tabella 8 - Quantitativi di soluzione impiegata nel biennio 2010-2011	87
Tabella 9 - Quantitativi di leganti impiegati nel biennio 2010-2011.....	87
Tabella 10 - Quantitativi di gas impiegato nel biennio 2010-2011	88
Tabella 11 - Emissioni in atmosfera nel biennio 2010-2011	88
Tabella 12 - Quantitativi di sfridi e scarti di pannello nel biennio 2010-2011	89
Tabella 13- Quantitativi di imballaggio utilizzati nel biennio 2010-2011 ...	89
Tabella 14 - Quantitativi dei rifiuti d’imballaggio prodotti nel biennio 2010-2011.....	89
Tabella 15 - Quantitativi di alchilato impiegato nel biennio 2010-2011.....	90
Tabella 16 - Quantitativi di gasolio per movimentazione interna impiegata nel biennio 2010-2011	91
Tabella 17 - Quantitativi di energia elettrica impiegata nel biennio 2010-2011	91
Tabella 18 - Dati d’inventario inseriti in Simapro 7.3.....	95
Tabella 19 - WWCB, Analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categorie di danno.....	98
Tabella 20 - WWCB, Valutazione dei danni Ecoindicator99, Categorie d’impatto.....	105
Tabella 21 - WWCB, Valutazione dei danni Edip 2003, Categorie d’impatto	116

Tabella 22 - Massa volumica, fattore di rigonfiamento e ritiro volumetrico dell'Abete rosso	127
Tabella 23 - Dati di inventario riassuntivi inseriti per i processi relativi alla meccanizzazione tradizionale, in ore per tonnellata di legname ottenuta	128
Tabella 24 - Dati di inventario inseriti per i processi relativi alla meccanizzazione tradizionale, in kg per ora di lavoro.....	128
Tabella 25 - Dati di inventario riassuntivi per i processi relativi alla meccanizzazione spinta, in ore per tonnellata di legname ottenuta.....	133
Tabella 26 - Dati di inventario inseriti per i processi relativi alla meccanizzazione spinta, in ore per tonnellata di legname ottenuta.....	134
Tabella 27 - Categorie di impatto considerate, descrizione e unità di misura	135
Tabella 28 - Caratterizzazione dei risultati per il confronto delle diverse modalità operativi per le categorie di impatto considerate	138
Tabella 29 - Quantitativi di energia elettrica considerata per il biennio 2010-2011	141
Tabella 30 - Dati d'inventario con differenti produzioni di energia.....	142

Indice dei Grafici

Grafico 1 - Distribuzione percentuale delle tavole secondo i due sistemi di classificazione	29
Grafico 2 - WWCB, Analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categoria di danno Ecosistem Quality	99
Grafico 3 - WWCB, Analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categoria di danno Human Health.....	100
Grafico 4 - WWCB, analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categoria di danno Resources.....	101
Grafico 5 - WWCB, Caratterizzazione Ecoindicator99, Categorie d'impatto	106
Grafico 6 - WWCB, Valutazione dei danni Ecoindicator99, Categorie di danno	108
Grafico 7 - WWCB, Normalizzazione Ecoindicator99, Categorie di danno	109
Grafico 8 - WWCB, Normalizzazione Ecoindicator99, Categorie d'impatto	110

Grafico 9 - WWCB, Punteggio singolo Ecoindicator99, Categorie di danno	111
Grafico 10 - WWCB, Punteggio singolo Ecoindicator99, Categorie d'impatto.....	112
Grafico 11 - WWCB, Caratterizzazione Edip 2003, Categorie d'impatto..	117
Grafico 12 - WWCB, Normalizzazione Edip 2003, Categorie d'impatto..	119
Grafico 13 - WWCB, Punteggio singolo Edip 2003, Categorie d'impatto	120
Grafico 14 - Confronto tra le diverse modalità operative di estrazione del legname, caratterizzazione degli impatti Recipe 2008	139
Grafico 15 - Confronto tra le diverse modalità operative di estrazione del legname, normalizzazione degli impatti Recipe 2008.....	140
Grafico 16 - Confronto fra diverse produzioni di energia elettrica, per categorie di danno, Normalizzazione Ecoindicator99	143
Grafico 17 - Confronto fra diverse produzioni di energia elettrica, per categorie d'impatto, Normalizzazione Ecoindicator99.....	144
Grafico 18 - Confronto fra diversi scenari di smaltimento, per categorie di danno, Normalizzazione Ecoindicator99.....	147
Grafico 19 - Confronto fra diversi scenari di smaltimento, per categorie d'impatto, Normalizzazione Ecoindicator99.....	147

RIASSUNTO

Le esigenze di risparmio e di efficienza energetica nell'ambito delle costruzioni, da una parte, hanno contribuito a migliorare alcuni aspetti ambientali, dall'altro, soprattutto a causa dei materiali isolanti impiegati, hanno posto una nuova questione: la sostenibilità ambientale dei materiali e dei prodotti utilizzati negli edifici.

La valutazione degli impatti indotti sull'ambiente di una qualsiasi attività umana è, in generale, un argomento molto complesso e ad oggi molto dibattuto, in quanto coinvolge un ambito locale quanto globale e investe la biosfera in cui l'uomo non è l'unico protagonista ma dal quale nessun metodo di valutazione può prescindere.

Nello specifico, al settore edilizio si attribuisce il consumo di una notevole quantità di risorse per la fabbricazione delle sue componenti e per la sua costruzione, l'utilizzo di ingenti quantità di energia per il condizionamento degli ambienti e le relative emissioni inquinanti, la formazione di massicci volumi di rifiuti non differenziati dopo la sua demolizione.

L'uso del legno in edilizia soddisfa i maggiori obiettivi per il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile attraverso la gestione ecologica delle foreste unita ai bassi impatti ambientali dei prodotti a base di legno, unica risorsa rinnovabile fra i materiali da costruzione, che posseggono la capacità di essere riparati, riutilizzati e riciclati con efficienza e recuperati come fonte di energia al termine del loro ciclo di vita.

Il contributo di questo studio consiste nel computo quantitativo e nell'esame qualitativo degli impatti, positivi e negativi, indotti sull'ambiente dall'impiego delle componenti a base di legno nelle costruzioni, specificatamente dei pannelli isolanti di lana di legno e cemento. La valutazione della sostenibilità ambientale è stata unita ad un'analisi tecnologica al fine di verificare le prestazioni termiche dei pannelli isolanti e l'idoneità strutturale del legno ritraibile dai boschi presenti nell'arco alpino.

La valutazione ambientale è stata condotta attraverso un'analisi del ciclo di vita sviluppata in accordo alla serie delle norme ISO 14040, con un approccio orientato alle dichiarazioni ambientali di prodotto. Per il calcolo

degli impatti è stato utilizzato il software dedicato SimaPro 7.3 includendo la misura dell'incertezza, mentre per la classificazione e la caratterizzazione sono stati impiegati due metodi di valutazione dell'impatto del ciclo di vita. L'analisi dell'inventario ha richiesto una dettagliata raccolta di dati ed è stata eseguita sul processo di produzione dei pannelli di lana di legno e cemento.

I risultati evidenziano che l'approvvigionamento del legno da una filiera corta unita e differenti scenari di produzione delle fonti energetiche, determinano un miglioramento delle prestazioni ambientali.

Questo studio ha permesso di quantificare i benefici derivanti da soluzioni di filiera corta e di *eco-design* individuando possibilità di miglioramento nel processo produttivo del pannello di lana di legno e cemento e nella scelta dei materiali isolanti da inserire nella progettazione degli edifici.

ABSTRACT

Requests of energy reduction and efficiency has contributed to improve environmental aspects in construction. It has also —mainly for the insulating materials used—raised a new issue: the environmental sustainability of building materials and products.

Assessment of the environmental impact produced by any human activity is, in general, very complex and nowadays very debated. It involves a local and global scale, the biosphere — in which humans are not the only protagonists — and all valuation methods must be considered. The building sector in particular consumes a significant amount of resources, both when producing components and in construction. Construction uses large amount of energy for heating, releases as much pollutant emissions and form massive volumes of mixed waste after demolition.

The use of wood in construction meets the main objectives for achieving sustainable development. This is possible through ecological forest management combined with the low environmental impact of products made from wood. Wood is the only renewable resource in building materials. It possesses the capacity to be repaired, reused, efficiently recycled and recovered as fuel at the end of its life cycle.

The contribution of this study is to quantitatively calculate and qualitatively exam the environmental impacts —positive and negative— produced by the use of wood based components in structures. The focus is specifically insulating wood wool cement boards. The environmental sustainability assessment was combined with a technological analysis in order to verify the thermal performance of the insulation boards and the suitability of structural wood harvested from the Alps forests.

The environmental assessment was performed through a life cycle analysis and developed according to ISO 14040 standard series, with an environmental product declaration oriented approach. The impact analysis was done in the specific software SimaPro 7.3, including the uncertainty analyses. For the classification and characterization two different life cycle impact assessment methods were used. The inventory analysis required a detailed data collection, in this case performed on the production process of a wood wool cement board.

The results show that short wood chain supply and different energy production scenarios lead to a better environmental performance.

This study allowed a quantification of the benefits of a short supply chain and eco-design by identifying opportunities for improvement of the wood wool cement board production process and the choice of insulating materials to be included in the building design.

PREFAZIONE

Durante il corso di Dottorato ci si è accorti che la valutazione del ciclo di vita delle componenti in legno per edifici in ambito rurale presentava sia caratteri di interdisciplinarietà che approfondimenti dei confini del sistema, assumendo una dimensione di filiera.

Una filiera virtuosa richiede l'impiego di risorse materiali, l'uso di fonti energetiche e innovazioni tecnologiche che concorrano alla trasformazione dei prodotti di legno riducendo al minimo gli impatti sull'ambiente.

L'analisi della qualità tecnologica e della sostenibilità ambientale, mediante l'impiego di una metodologia scientifica, permette di valorizzare i passaggi della filiera che iniziano in bosco, procedono attraverso i sistemi di utilizzazione, di trasporto, di produzione e termina nella costruzione dell'edificio. Essa è stata condotta nei seguenti capitoli:

- studio dei sistemi costruttivi con struttura di legno e analisi del sistema a telaio,
- verifica sperimentale della qualità del legno strutturale,
- studio delle qualità prestazionali degli isolanti termici,
- descrizione della metodologia della *Life Cycle Assessment*,
- analisi e interpretazione dei risultati della valutazione del ciclo di vita della produzione dei pannelli isolanti in lana di legno e cemento della ditta Celenit,
- analisi della sensibilità degli scenari inerenti l'approvvigionamento della materia prima, delle risorse energetiche e dello smaltimento degli scarti di produzione.

Parte dei risultati di questo lavoro sono stati pubblicati negli atti delle seguenti conferenze:

presentazioni orali

Marra M., Castellani V., Guercini S. (2011) *Technological Characteristics and Sustainability Assessment of Short Forestry-Wood Chain*. In *Proceeding of*

International Scientific Conference on Hardwood Processing ISCHP2011. Blacksburg, Virginia USA 16-18 October 2011. ISBN 978-0-9837700-0-8.

Marra M., Negri M, Guercini S, Ceccotti A (2012). *Assessment process of a new structural PUR adhesive*. In: World Conference on Timber Engineering. Timber Engineering Challenges and Solutions. Auckland, New Zealand, 16-19 July 2012, Auckland: Pierre Quenneville, p. 482-486, ISBN 9781622763054

Negri M, Gavric I, Marra M., Ceccotti A (2012). *Using low quality timber for x-lam: raw material characterisation and structural performance of walls under semi-dynamic testing*. In: World Conference on Timber Engineering. Timber Engineering Challenges and Solutions. Auckland, New Zealand, 16-19 July 2012, Auckland: Pierre Quenneville, p. 511-518, ISBN 9781622763054

M Marra, S Guercini, A Bordin (2012). *Sostenibilità ambientale e valutazione tecnologica della filiera corta bosco legno edilizia*. In: Atti del Convegno AIIA 2012 L'Edilizia Rurale tra Sviluppo Tecnologico e Tutela del Territorio. Firenze, 20-22 settembre 2012.

sezione poster

M Marra, X Wang, S Guercini (in stampa). *Structural Behaviour of Low Quality CLT Panels Joint with Mechanical Fasteners*. In: International Journal of Advances in Civil Infrastructure Engineering. Changsha, China, 14-16 September 2012.

RINGRAZIAMENTI

Quando sostenni la valutazione per l'ammissione alla Scuola di dottorato, in diversi mi chiesero "ma perché un corso di dottorato?" In effetti frequentare lezioni, sostenere esami e relazionare regolarmente sulla ricerca svolta non si ritiene conveniente ad una persona come me uscita dal mondo dell'Università da tanti anni, impegnata dal lavoro e occupata dalla famiglia. Ma il desiderio di intraprendere un nuovo tema di ricerca, completare il mio curriculum formativo e la presunzione di tornare un po' studente hanno prevalso su quanto non fosse conveniente.

Allora a conclusione di questa impegnativa ma tutto sommato breve esperienza, mi riservo di ringraziare le persone che con la loro competenza, esempio e vicinanza mi hanno arricchito non solo professionalmente ma soprattutto umanamente.

Ringrazio il relatore a questo lavoro Prof. Stefano Guercini che sin dal momento della mia proposta di ricerca ha dimostrato una generosa disponibilità e nel proseguo dello studio è stato foriero di consigli e risoluto con la sua scrupolosità. Il correlatore dr Alessandro Bordin una voce amica e sincera all'interno del Dipartimento TESAF. La direzione e il personale della ditta Celenit che si sono prodigati nel rispondere a tutte le mie incessanti richieste. Il mio collega di lavoro all'Istituto del CNR IVALSÀ dr Martino Negri con il quale non trascorre giorno senza un confronto approfondito e costruttivo. Il direttore dell'Istituto Prof. Ario Ceccotti che con la sua pragmaticità e determinazione mi rinforza nel procedere in un periodo di incertezza.

Mia moglie sempre al mio fianco ad ogni avventura che, anzi, con la sua lungimiranza spesso mi precede e i miei figli, che con il loro impegno quotidiano a crescere mi sono di stimolo. A loro sia corrisposta la lealtà, il progresso e il successo nella vita.

a
Lisa Tommaso Guglielmo

Dubium sapientæ initium
(Cartesio)

1. Introduzione e obiettivi della ricerca

I temi di ecologia possono appassionare più o meno a seconda la propria sensibilità, ma se si vuole rimanere obiettivi bisogna fare riferimento ad un approccio scientifico. La metodologia che si ritiene ad oggi la più rigorosa è la Life Cycle Assessment. Questa metodologia, essendo universalistica, è utilizzabile per diversi settori produttivi e dei servizi. In questo studio è stata applicata al settore degli edifici di legno, nello specifico a quello dei prodotti isolanti termici.

Gli edifici, durante il loro esercizio, causano il 40% del consumo di energia dell'intera Unione europea e i combustibili fossili sono la principale risorsa utilizzata per il loro funzionamento. Questi combustibili sono una fonte energetica esauribile e non rinnovabile, e il loro utilizzo genera emissioni di CO₂ in atmosfera responsabile dell'effetto serra [1].

L'efficienza energetica nell'ambito delle costruzioni è una esigenza primaria per raggiungere la riduzione dei consumi di energia. Questo obiettivo è promosso da diversi anni sia a livello internazionale che nazionale attraverso la enunciazione di normative specifiche. La direttiva 2002/91/CE [2] sul rendimento energetico nell'edilizia imponeva la determinazione di prestazioni minime del consumo di energia tanto per le nuove costruzioni quanto per quelle in ristrutturazione. Anche l'Italia dal d.lgs. 192/05 [3] al più recente d.P.R. 158/09 [4] ha stabilito le soglie limite di trasmittanza termica e di fabbisogno di energia primaria nonché la certificazione energetica [5]. Su questa scia il Regolamento 2010/31/UE [6] sulla prestazione energetica nell'edilizia, che sostituisce la precedente Direttiva, prevede "edifici a energia quasi zero, ad altissima prestazione energetica in cui il fabbisogno di energia dovrebbe essere coperto da fonti rinnovabili prodotte in loco".

Questa tendenza a massimizzare il risparmio energetico durante la fase d'uso dell'edificio attraverso l'impiego di materiali isolanti ad alte prestazioni, l'adozione d'impianti tecnologici innovativi e l'utilizzo di sistemi architettonici orientati alla captazione dell'energia solare; lascia presupporre qualche carenza dal punto di vista degli impatti ambientali dell'intero ciclo di vita [7]. Ignorare le fasi di produzione dei materiali e dei prodotti, di costruzione, di manutenzione e di demolizione [8] e non

prevedere una verifica della salubrità e del comfort abitativo, impedisce di definire la sostenibilità ambientale di un edificio nella sua interezza [9].

Il computo quantitativo e l'esame qualitativo degli impatti, positivi e negativi, indotti sull'ambiente dall'impiego delle componenti di un edificio permette la valutazione della sostenibilità ambientale di una scelta progettuale. La *Life Cycle Assessment* è un metodo di valutazione che riassume tutti gli impatti ambientali prodotti attraverso il calcolo dei flussi di energia e di materia in entrata e in uscita [10].

La metodologia LCA, seppur lentamente, si è consolidata e ha favorito il diffondersi del concreto recepimento del *Life Cycle Thinking*. Attualmente, la maturità e l'unificazione della metodologia sono testimoniate dall'emissione da parte dell'*International Standard Organization* della normativa tecnica serie ISO 14040 - Valutazione del Ciclo di Vita, la quale copre numerosi aspetti della gestione ambientale d'impresa incontrando le esigenze espresse dalle aziende, dai governi, dalle organizzazioni non governative e dai consumatori.

Il legno è l'unico materiale da costruzione che rientra a pieno titolo nella categoria delle risorse rinnovabili. I boschi, da cui è tratto, se gestiti opportunamente, hanno la capacità di riprodursi e di rigenerarsi perpetuamente fungendo da volano al ciclo del carbonio, garantendo un habitat idoneo alla conservazione della biodiversità e assicurando la salvaguardia dei servizi ecosistemici. L'utilizzo del legno in edilizia soddisfa i maggiori obiettivi per il raggiungimento di uno sviluppo sostenibile attraverso la gestione ecologica delle foreste unita ai bassi impatti ambientali dei prodotti a base di legno che impiegano esigue quantità di energia per la loro lavorazione e che posseggono la capacità di essere riparati, riutilizzati e riciclati con efficienza e recuperati come fonte di energia al termine del loro ciclo di vita.

La salvaguardia del territorio rurale si raggiunge attraverso la sostenibilità delle realtà produttive agricole. Il legno è una risorsa che può contribuire allo sviluppo di questi territori attraverso la valorizzazione della filiera corta bosco legno. La qualificazione funzionale e prestazionale dei prodotti legnosi, ma anche la definizione di alcuni aspetti non misurabili direttamente, quali la provenienza e l'impatto che questi hanno sull'ambiente, sono gli strumenti per ottenere il miglioramento.

Malgrado lo scetticismo e il conseguente ritardo che ancora si registra in Italia rispetto ai Paesi del Nord Europa, oltre a quelli del Nord America, sull'utilizzo del legno in edilizia con funzione portante, si va diffondendo un crescente interesse sull'impiego di questo materiale soprattutto in ambito rurale.

In Italia, negli ultimi anni, il comparto del legno registra un costante incremento del consumo di materia prima per effetto di due fenomeni: il maggior uso di biomasse legnose per la produzione di energia termica e il crescente impiego del legno in edilizia, specialmente con funzione strutturale. In particolare, negli ultimi 15 anni l'impiego di legno lamellare in Italia è cresciuto, su base annua, da 100.000 m³ ad 1 milione di m³. Per comprendere l'entità di queste cifre si consideri che l'Italia, dal 2007, è il primo paese in Europa per l'utilizzo di questo prodotto da costruzione. Il mercato interno dei prodotti in lamellare è caratterizzato solo per il 15% dalla produzione italiana, mentre oltre il 70% proviene dall'Austria e dalla Germania [11].

A fronte della crescita del consumo di legno, si riscontra una scarsa utilizzazione delle foreste del territorio nazionale. Le cause principali sono dovute alla difficoltà di approvvigionamento, dalla frammentazione e dalla conseguente discontinuità nelle forniture, dai costi di produzione relativamente alti, dalla qualità del prodotto che non è assicurata da un'adeguata classificazione. Questi elementi hanno contribuito nel tempo a orientare la domanda di legname dall'estero. Tutto ciò ha comportato la sottoutilizzazione dei boschi italiani. A questo si aggiunga la considerazione che il valore degli assortimenti prodotti internamente sono generalmente bassi, in quanto destinati a scopi energetici o all'imballaggio [12].

La valorizzazione della filiera bosco legno passa attraverso la qualificazione funzionale e prestazionale dei prodotti legnosi, ma anche attraverso la definizione di alcuni aspetti non misurabili direttamente, quali la provenienza e l'impatto che questi hanno sull'ambiente.

In edilizia, la LCA spesso è stata applicata per paragonare materiali diversi o soluzioni tecniche differenti, ma lo scopo di una valutazione dovrebbe essere la ricerca del miglioramento ambientale all'interno di un comparto produttivo o di una specifica soluzione costruttiva.

L'obiettivo del lavoro di Tesi è quello di eseguire uno studio approfondito, secondo la metodologia LCA, per individuare i margini di miglioramento della sostenibilità ambientale del processo produttivo del materiale isolante del pannello di lana di legno e cemento della ditta Celenit e la valorizzazione tecnologica degli assortimenti legnosi ritraibili dai boschi alpini tramite la verifica dell'idoneità per l'impiego strutturale.

Questo studio ha permesso di quantificare i benefici derivanti da soluzioni di filiera corta e di *eco-design* individuando ulteriori possibilità di miglioramento. Le caratteristiche tecnologiche del legno e il profilo ambientale della filiera corta indicano che l'uso del legno in edilizia possiede ampi spazi di sviluppo in armonia con l'ambiente rurale.

I sistemi costruttivi maggiormente utilizzati possono ricondursi a due tipologie: una in cui gli elementi in legno svolgono solo una funzione strutturale e un'altra in cui a essa si aggiunge una funzione di compartimentazione. Quest'ultima tipologia impiega una quantità di prodotti in legno molto rilevante. Si ricordano a tale proposito le tradizionali *log house* - in cui le pareti sono erette dalla sovrapposizione trasversale di travi sagomate (oppure di tronchi, nella versione più antica) collegate fra di loro tramite incastri - e le più recenti pareti a pannello a tavole incrociate incollate, *cross laminated timber*, che uniscono al criterio di prefabbricabilità quello di robustezza e solidità. Il sistema costruttivo a telaio, invece, prevede due varietà principali: il *post and beam*, in cui i giunti fra travi e pilastri vengono realizzati tramite incastri o collegamenti metallici, e il *platform frame*, in cui le pareti, formate da un telaio con un ordito di morali e da tamponature in pannelli, sostengono i travetti dei solai che sono inchiodati alla trave del telaio.

Nello studio presente si è scelto quest'ultimo sistema costruttivo, a minore impatto ambientale, nonché idoneo ad una filiera corta in quanto non necessita di tecnologie e impianti di produzione di difficile reperimento.

2. Edifici con struttura di legno

Gli edifici con struttura di legno hanno avuto origine in territori in cui questa risorsa era largamente disponibile e in cui le popolazioni locali hanno ideato dei sistemi realizzativi che si sono affermati in diversi metodi costruttivi. Ogni sistema ha le proprie caratteristiche fondate principalmente dall'impalcatura strutturale, dal tipo di prodotto impiegato e dai dettagli costruttivi così da differenziare il comportamento strutturale e architettonico tali da renderlo idoneo a specifici ambienti climatici [13]. Per tutti i sistemi costruttivi si riscontrano i seguenti benefici:

- semplicità e velocità di costruzione, dovuta alla leggerezza del materiale, che necessita di energie limitate per il trasporto e l'installazione,
- semplicità e velocità di montaggio degli elementi tecnologici a secco. Questo oltre a determinare dei tempi ristretti permette una disassemblabilità a fine vita da consentire una differenziazione dei rifiuti riciclabili,
- buon isolamento termico, o meglio, una intrinseca proprietà del materiale nell'evitare la creazione di ponti termici tipici per tutti gli elementi strutturali realizzati con altri materiali,
- ottima risposta alle sollecitazioni sismiche. Infatti l'accelerazione dell'onda sismica esercita una forza proporzionale alla massa che investe e nel caso del legno, molto leggero, questa sarà molto ridotta. Inoltre la duttilità delle connessioni a secco con chiodi e viti unita al buon rifollamento del legno, partecipano fortemente alla dissipazione dell'energia sismica,
- un buon comportamento al fuoco. Il legno quando brucia produce uno strato carbonioso che ne rallenta l'avanzamento e la propagazione del calore conservando l'integrità dell'elemento. Tutti gli altri materiali metallici, invece, raggiunta la temperatura di plasticizzazione collassano repentinamente,

- un costo competitivo in virtù dei tempi di costruzione ridotti e certi e di un sottodimensionamento delle fondazioni per merito del minor peso.

I sistemi costruttivi con struttura in legno si possono ricondurre a due tipologie in cui gli elementi di legno svolgono:

- funzione strutturale (edifici a blocchi o a tronchi ed edifici a pannelli di tavole a strati incrociati),
- funzione strutturale e di compartimentazione (edifici a travi e pilastri ed edifici a telaio).

2.1. *Edifici a blocchi o a tronchi*

Il sistema conosciuto con il nome di *blockhaus* o *log house* è molto diffuso in Europa Centro-Settentrionale e in Nordamerica. È un sistema costruttivo tipico dei paesi nordici per la realizzazione di edifici per abitazione mono familiari di 1-2 piani. Il sistema, molto semplice, si contraddistingue per le modalità di realizzazione delle pareti, formate dalla sovrapposizione di tronchi di legno massiccio tondi o squadrati, generalmente sagomati nella parte superiore e inferiore al fine di aumentare la superficie di contatto; il materiale è utilizzato con una funzione non dissimile dalla muratura. Per le sue caratteristiche architettoniche il sistema è sicuramente più adatto alla realizzazione di abitazioni isolate immerse nel verde o comunque di edifici per abitazione in piccoli centri montani.

Le fondazioni, come per tutti i sistemi costruttivi, vengono realizzate solitamente con una platea in cemento armato. I tronchi di legno che costituiscono le pareti sono generalmente realizzati con una scanalatura semplice, doppia o tripla nella parte inferiore e superiore, per facilitarne la sovrapposizione in modo da conferire maggiore solidità e rigidità alla parete stessa, e creando una protezione naturale all'eventuale penetrazione dell'acqua meteorica. In alternativa, o in aggiunta, il sistema di collegamento tra i tronchi è completato mediante l'inserimento di biette o tasselli di legno di latifoglia, e in ogni caso mediante l'inserimento di tiranti a vite in acciaio all'interno di appositi fori realizzati ad intervalli di circa 1,5-2,0 m, con la funzione di tenere insieme la pila di elementi che compongono la parete. In corrispondenza di ogni estremità delle pareti e delle

aperture è sempre opportuno inserirne un tirante in modo che esso contrasti le forze di ribaltamento. L'incrocio ad incastro degli elementi facenti parte delle pareti ortogonali, che si ripete per ogni compartimentazione, oltre a rappresentare un elemento architettonico fortemente caratterizzante, conferisce stabilità all'intero edificio e capacità di resistere alle spinte orizzontali. L'incastro è realizzato mediante la sagomatura dei tronchi che costituiscono le pareti, oggi esse sono realizzate da macchine a controllo numerico che consentono la modellatura di apposite maschiature per l'intersezione degli elementi. L'ancoraggio alle fondazioni è realizzato mediante dei tirafondi cementati nel basamento ed assicurati alla parete da un dado e rondella. Queste connessioni assicurano l'edificio contro le spinte di scorrimento.

L'impianto planimetrico è piuttosto semplice, generalmente a pianta rettangolare; i solai intermedi sono costituiti da travi o travetti in legno massiccio o lamellare che poggiano su due pareti ortogonali o, talvolta, su dei pilastri in legno massiccio o lamellare. L'orditura della copertura è anch'essa semplice, solitamente costituita da un tetto a due falde con la trave di colmo parallela al lato più lungo dell'edificio e travetti che poggiano su quest'ultima e sulle pareti longitudinali parallelamente alla linea di falda.

Il pacchetto costruttivo della parete può essere completato in due modi: o lasciando il legno a vista all'esterno dell'edificio e quindi inserendo l'isolante dal lato interno e rifinendo internamente con lastre di cartongesso, oppure lasciando il legno a vista internamente ed inserendo un cappotto isolante esterno completato dall'intonaco o altro rivestimento. Come materiale isolante vengono utilizzati solitamente materiali naturali a base di legno quali: la fibra di legno, di canapa o il sughero [13-15].

2.2. *Edifici a pannelli di tavole a strati incrociati*

Il sistema a pannelli di tavole a strati incrociati è una evoluzione recente del sistema descritto precedentemente che sfrutta i progressi tecnologici di incollaggio nel settore del legno. Il nome deriva dal componente strutturale principale che lo caratterizza, ossia un pannello di tavole incollate a strati incrociati con il quale vengono realizzate le pareti e i solai. Malgrado sia il più recente tra i sistemi costruttivi per la realizzazione di edifici a

struttura di legno, in pochi anni è diventato il sistema più diffuso in Europa. Infatti, questi edifici sono, per robustezza e solidità, i più simili alla tradizione costruttiva europea della costruzione in muratura.

Il pannello a strati incrociati, o *cross laminated timber*, è un prodotto formato dalla sovrapposizione di strati di tavole di legno massiccio disposti ortogonalmente fra loro uniti mediante incollaggio o chiodatura. La parete chiodata, in cui le tavole sono fissate attraverso chiodi di alluminio, se da un lato ha dei vantaggi riguardo la sostenibilità ambientale rispetto ad una parete incollata, dall'altro, essendo meno rigida e resistente, necessita del doppio di materia prima aggravando il profilo ambientale. Inoltre con le pareti chiodate non si possono realizzare solai, a causa di valori di resistenza e rigidità insufficienti.

Rispetto ad altri sistemi costruttivi esso comporta indubbiamente un maggior utilizzo di materia prima, anche se consente l'utilizzo di legno strutturale classificato di qualità inferiore, difficilmente utilizzabile in altri sistemi costruttivi.

Un edificio a pannelli a tavole incrociate è sostanzialmente una struttura scatolare in cui le pareti e i solai sono formati da divisori costituiti da pannelli di legno massiccio molto rigidi e resistenti, collegati fra loro mediante collegamenti meccanici. I pannelli sono prefabbricati e tagliati in stabilimento e arrivano in cantiere pronti per il montaggio già dotati di aperture per porte e finestre. La grande versatilità del sistema consente di realizzare sia edifici residenziali mono o bi-piano di piccole dimensioni, che edifici condominiali multipiano anche di grandi dimensioni.

Anche in questo caso le fondazioni vengono realizzate in cemento armato. Il collegamento delle pareti alle fondazioni deve svolgere una duplice funzione: impedire sia il ribaltamento che lo scorrimento a causa delle azioni orizzontali, vento o sisma, agenti nel piano stesso della parete e in generale su tutto l'edificio. Il ribaltamento viene solitamente contrastato con delle piastre angolari allungate, dette tirafondi. Questi elementi metallici sono collegati alle pareti di legno con chiodi o viti e alle fondazioni con delle barre filettate in acciaio. Essi sono posizionati in corrispondenza degli estremi delle pareti e in prossimità delle aperture. Lo scorrimento è contrastato con una serie di squadrette. Le pareti possono essere costituite da pannelli interi fino a una lunghezza massima di 10-12 metri e con una

altezza pari all'altezza di interpiano. Una volta arrivate in cantiere vengono issate con mezzi meccanici di sollevamento e collegate fra loro e alle fondazioni. Più frequentemente però, soprattutto per esigenze di trasporto e facilità di maneggevolezza e montaggio in cantiere, vengono suddivise in pannelli di larghezze inferiori e collegate fra loro con la realizzazione di giunti verticali. Questi ultimi vengono solitamente eseguiti con l'interposizione di una striscia di multistrato, LVL o tramite una mezza fresatura realizzata lungo tutta l'altezza della parete.

Una volta montate le pareti del piano terra è possibile posare il primo solaio. Quest'ultimo è formato da pannelli a strati incrociati di spessore solitamente maggiore di quello delle pareti, in funzione delle luci e dei carichi previsti. Anche per il solaio i pannelli sono collegati fra di loro con le stesse tecniche utilizzate per le pareti. La copertura può essere realizzata sempre con pannelli oppure con metodi tradizionali.

Una volta terminata la struttura, l'edificio viene completato con dei pacchetti costruttivi. Dal lato esterno della parete viene posto un cappotto isolante solitamente formato da pannelli di fibra di legno, rete porta intonaco e intonaco. In alternativa si utilizzano pannelli di lana di legno e cemento, di fibra di canapa, di sughero o doghe di legno per il rivestimento esposto alle intemperie. Internamente, invece, si prevede una intercapedine di 2-4 cm nella quale far passare l'impianto elettrico, riempita generalmente con lana minerale o anche con lana di legno e rivestita internamente con pannelli di cartongesso. La parete così composta, partendo da un pannello strutturale che può avere spessori variabili dagli 8 ai 20 cm in media, arriva ad uno spessore complessivo di 20-35 cm con un aspetto è una solidità molto simile a quella di una parete di muratura.

Il solaio viene rifinito dal lato inferiore con cartongesso, mentre dal lato superiore viene posto uno strato di sabbia, un disaccoppiante acustico, un massetto porta impianti in calcestruzzo e la pavimentazione.

Il pacchetto costruttivo della copertura varia in funzione della struttura portante. Con una copertura a pannelli il pacchetto viene solitamente completato con pannelli di isolante con spessori variabili tra gli 8 e i 16 cm, un tavolato o un pannello di compensato o di OSB, una guaina traspirante, listelli porta-tegole e la copertura. Sul lato interno viene solitamente posto il cartongesso. Nel caso di copertura a travi, se vengono lasciate a vista,

viene fissato un tavolato, ripetendo poi lo stesso pacchetto costruttivo descritto precedentemente. Se le travi non vengono lasciate a vista, l'isolante viene posto nell'intercapedine di altezza pari all'altezza delle travi e il pacchetto viene completato superiormente con tavolato, guaina traspirante, listelli, controlistelli e manto [13-15].

2.3. *Edifici a travi e pilastri*

Il sistema a travi e pilastri in legno, in inglese noto come *post and beam*, necessita, per motivi di carattere strutturale, dell'uso di elementi di irrigidimento della maglia costruttiva sia nel piano verticale che in quello orizzontale. La presenza di elementi di controvento, che possono essere realizzati con aste di legno, con pannelli strutturali a base di legno, o con croci in acciaio che non devono necessariamente coprire tutti i campi della maglia strutturale, diventa nello stesso tempo, un elemento insieme architettonico e strutturale, che caratterizza e differenzia i sistemi intelaiati in legno dalle analoghe realizzazioni con altri materiali.

Il sistema ha origini antichissime, ed è forse il primo ad essere stato utilizzato per la realizzazione di edifici a struttura di legno. Travi e pilastri sono giuntati tra loro tramite elementi meccanici di collegamento quali viti, bulloni, spinotti, scarpe metalliche e piastre. Questi elementi originariamente erano in legno di latifolia. L'architettura tradizionale è stata rivisitata grazie alle nuove tecnologie. La moderna versione di questo sistema prevede la realizzazione di una gabbia strutturale con elementi trave e pilastro giuntati attraverso incastri di carpenteria molto precisi, realizzanti mediante macchine a controllo numerico. La differenza dal punto di vista statico rispetto ad edifici di tipologia analoga realizzati in cemento armato o in acciaio è che con il legno è praticamente impossibile realizzare dei collegamenti rigidi fra i vari elementi strutturali che funzionino come veri e propri incastri. Questo comporta la necessità di irrigidire la maglia strutturale sia in orizzontale che in verticale, per rendere capace l'intero sistema di assorbire le spinte orizzontali e trasmetterle alle fondazioni.

L'irrigidimento delle pareti può essere realizzato o mediante controventi in legno o in acciaio oppure mediante il posizionamento di pannelli di rivestimento in compensato o di OSB chiodati agli elementi portanti delle

pareti. In ogni caso anche riuscendo a realizzare un sistema con nodi perfettamente rigidi, il problema della limitazione della deformabilità orizzontale del sistema comporterebbe l'utilizzo di sezioni eccessive per i pilastri, tali quindi da rendere comunque preferibile la soluzione con i controventi.

Per quanto riguarda i solai, un buon livello di irrigidimento nel piano si raggiunge mediante l'utilizzo di controventi tra i travetti realizzati con elementi di legno o di acciaio oppure tramite l'utilizzo di travi posti ad interasse ravvicinato e il posizionamento, sopra di essi, di un foglio di compensato strutturale. Sopra il compensato viene realizzata una soletta di calcestruzzo alleggerito che, oltre ad avere la funzione di irrigidimento, migliora l'isolamento acustico aumentando la massa del solaio.

Con questo sistema costruttivo è possibile realizzare edifici fino a tre o quattro piani; sovente viene utilizzato per la realizzazione di edifici commerciali o pubblici, vista l'ampia libertà che il sistema offre nella possibilità di distribuzione degli spazi interni.

I particolari costruttivi in questo sistema sono fondamentali, soprattutto riguardo il problema della resistenza al fuoco. È buona pratica proteggere tutti gli elementi di collegamento, quali le piastre, le squadrette e le scarpe d'acciaio dall'azione diretta del fuoco. Per far ciò è sufficiente proteggere queste piastre in metallo con il legno inserendole all'interno degli elementi di legno stesso mediante fresature e intagli, in modo che queste non rimangano a vista. Occorre inoltre proteggere tutte le unioni dalla possibilità di ristagno d'acqua, soprattutto nel caso del collegamento dei pilastri alle fondazioni. A tale scopo bisogna evitare l'utilizzo di scatole in metallo che racchiudano il piede del pilastro al loro interno. Sono da preferire dispositivi che prevedano l'inserimento di piastre in apposite fresature realizzate alla base del pilastro.

I pacchetti costruttivi per pareti, solai e copertura sono gli stessi visti per i sistemi costruttivi precedenti. La struttura portante verticale e orizzontale viene lasciata a vista all'interno dell'edificio. La parte esterna dell'edificio è rivestita con pareti di tamponamento con isolante inserito nell'intercapedine e rivestimento con pannelli di semplice rivestimento. I controventi possono essere lasciati a vista oppure rimanere nascosti all'interno del pacchetto costruttivo della parete [13-15].

2.4. Edifici a telaio

Questo sistema noto come *platform frame* è forse il sistema costruttivo più diffuso al mondo per la realizzazione di edifici a uno o più piani a struttura di legno. La quasi totalità degli edifici mono e bi-familiari ma anche dei condomini residenziali in Nordamerica sono costruiti con questo sistema, che ha una grande diffusione anche in altre regioni del globo, dall'estremo Oriente al Nord Europa. L'enorme diffusione ha fatto sì che questo sia anche il sistema più presente, per indicazioni progettuali e costruttive, nelle normative per le costruzioni di svariati paesi.

Un edificio realizzato con il sistema a telaio è formato da pareti e solai costituiti da intelaiature di elementi di legno di piccola sezione (generalmente 4x9 o 5x10 cm) posti ad interasse costante di 40-60 cm alle quali da un lato o da entrambi i lati vengono collegati, con tanti chiodi o viti di piccolo diametro, dei pannelli di legno strutturale, generalmente compensato o OSB. Le pareti e i solai così realizzati vengono collegati fra loro e alle fondazioni con piastre metalliche angolari, tirafondi, viti e chiodi in maniera molto simile a quanto viene fatto per i sistemi visti in precedenza. Il sistema deve il suo nome al metodo costruttivo che come vedremo è per certi versi molto simile al sistema a pannelli portanti a strati incrociati. Infatti il termine *platform frame* che può essere tradotto dall'inglese in "sistema intelaiato a piattaforma", indica che una volta realizzate le strutture del primo solaio, queste fungono da piattaforma per la realizzazione dei piani successivi.

L'origine del sistema costruttivo, risale all'epoca della colonizzazione dell'America settentrionale avvenuta nella prima metà dell'ottocento; il metodo costruttivo, con la struttura portante formata da telai costituiti da elementi di piccola sezione e leggeri, rispondeva infatti alla necessità di costruire velocemente nuovi insediamenti nei territori del *West*.

In Nordamerica il sistema è più conosciuto come *wood-frame* o *light wood-frame* o ancora *2by4*, che indica la sezione tipica degli elementi che costituiscono l'intelaiatura di 2x4 pollici. Si tratta di un sistema costruttivo che generalmente viene realizzato interamente a piè d'opera secondo regole costruttive ben note e codificate, benché possa essere quasi totalmente prefabbricato.

La costruzione di un edificio fatto con il sistema a telaio parte dalle fondazioni che, come per gli altri edifici, è in cemento armato. In considerazione del fatto che il sistema costruttivo è molto leggero il dimensionamento delle strutture di fondazione risulta molto contenuto, con un minore aggravio dei costi e degli impatti ambientali. Sopra la fondazione vengono sollevate le pareti che costituiscono l'ossatura della costruzione. Una volta realizzate le pareti viene costruito il solaio con travetti equidistanti, dello stesso interasse dei montanti delle pareti. Se le luci e i carichi lo richiedono, si adoperano travi reticolari realizzate con elementi della sezione unificata o con travi di legno lamellare. Il solaio viene poi irrigidito nel proprio piano ancora con il posizionamento di pannelli di legno strutturale, compensato o OSB generalmente di 12 mm di spessore, collegato all'intelaiatura del solaio con chiodi di 3 mm di diametro posti ad interasse di 15 cm sui bordi esterni dei pannelli e a 30 cm di interasse sui supporti interni.

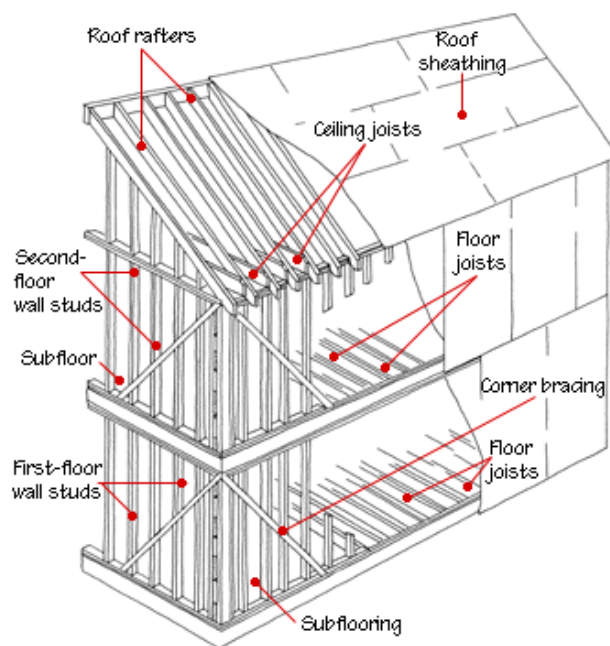


Figura 1 - Sistema a telaio

Le spinte orizzontali del vento o dei sismi agenti nel piano dell'edificio devono essere contrastate da un sistema di connessione delle pareti alle fondazioni in modo da impedire il ribaltamento e lo scorrimento. Il ribaltamento viene solitamente contrastato con delle piastre angolari allungate,

dette comunemente tirafondi in inglese *hold-down*. Gli *hold-down* vengono collegati alle pareti di legno con chiodi o viti e alle fondazioni in calcestruzzo con delle barre filettate in acciaio inserite in fori sigillati con malta cementizia o epossidica. Essi devono essere posizionati in corrispondenza dei limiti estremi delle pareti e in prossimità delle aperture. I chiodi ad aderenza migliorata e le viti di collegamento alla parete hanno diametri variabili dai 3 ai 6 mm e le barre filettate dai 12 ai 18 mm a seconda del tipo di *hold-down* e dei carichi in gioco. Lo scorrimento invece può essere contrastato in vari modi, a seconda del metodo di collegamento delle pareti alle fondazioni. Nel caso di presenza di un cordolo di legno durevole di interposizione fra le pareti e la fondazione, bisogna realizzare un doppio collegamento. Fra cordolo e fondazioni, va realizzato con barre filettate, mentre fra parete e cordolo, sono sufficienti delle viti autoforanti del diametro di 8-10 mm, inserite inclinate sui due lati della parete. Per pareti di grosso spessore il cordolo ha una larghezza inferiore rispetto allo spessore della parete che poggia parzialmente sulle fondazioni, le viti di collegamento sono inserite orizzontalmente. Nel caso invece di parete collegata direttamente alla fondazione si prevedono delle staffe angolari di acciaio collegate con chiodi o viti alle pareti e con barre filettate in acciaio alle fondazioni.

Lungo tutto il perimetro del solaio è previsto un cordolo di collegamento in grado di assorbire gli sforzi di trazione che nascono quando lo stesso solaio è caricato nel proprio piano. Occorre per questo motivo dimensionare opportunamente il collegamento dei pannelli di rivestimento al cordolo. Il collegamento del solaio alle pareti sottostanti e quello verticale delle pareti è realizzato in maniera tale da essere molto rigido in modo da non rappresentare un punto di debolezza della struttura.

Una volta realizzate le strutture del primo solaio, queste costituiscono da piattaforma per la realizzazione dei piani successivi. Il collegamento delle pareti dei piani successivi al solaio di interpiano avviene tramite *hold-down* interni o bande metalliche forate esterne contro il ribaltamento e viti di collegamento del corrente inferiore delle pareti superiori al solaio inferiore per evitare lo scorrimento. I solai vengono completati nella parte superiore con un pannello di rivestimento strutturale, un massetto porta-impianti, uno strato di isolamento acustico in gomma o con pannelli anticalpestio ed infine con la pavimentazione che può essere posata su una ulteriore cal-

dana di calcestruzzo. In questo sistema costruttivo, in particolar modo nella realizzazione di edifici multipiano, diventa particolarmente importante il problema dell'isolamento acustico, a causa della leggerezza del pacchetto strutturale.

La copertura viene solitamente realizzata con travi e travetti posti allo stesso interasse dei montanti delle pareti. Nella tradizione costruttiva nordamericana vengono solitamente utilizzate travi reticolari formate da elementi della stessa sezione unificata collegati fra loro con piastre chiodate. In Europa si preferisce realizzare una copertura tradizionale con travi lamellari, oppure con poche capriate, a schema palladiano, poste ad interasse maggiore. Esse sono realizzate con sezioni di dimensione maggiore, per cui si ha l'accortezza di raddoppiare o triplicare i montanti delle pareti in corrispondenza degli appoggi delle travi e capriate. Il pacchetto della copertura, viene completato da un pannello di rivestimento strutturale inchiodato all'orditura [13-15].

2.4.1. Il pacchetto costruttivo

Le pareti sono costituite da un'intelaiatura di montanti di legno massiccio di sezione generalmente di 5x10 cm, posti ad un interasse variabile fra 40 e 60 cm e completati da un corrente inferiore e un corrente superiore, di uguale sezione, inchiodati ai montanti. L'interasse dei montanti delle pareti è sempre un sottomultiplo della larghezza del pannello di rivestimento strutturale che generalmente ha delle dimensioni commerciali di 1200x2400 mm o 1220x2440 mm. La sezione può essere ovviamente anche maggiore in funzione dei carichi o del maggiore spessore di isolante previsto, che viene posizionato all'interno dell'intercapedine delle pareti.

Sul lato esterno dell'intelaiatura, in alcuni casi, per esigenze strutturali, su entrambi i lati, viene inchiodato un pannello di controventatura, formato generalmente da compensato strutturale, avente spessore di 12 mm al piano terra e 9,5 mm ai piani superiori, oppure con altri pannelli strutturali a base di legno quali ad esempio l'OSB.

I chiodi utilizzati sono ad aderenza migliorata generalmente con gambo da 3 mm di diametro, posti a un interasse solitamente di 15 cm sui bordi dei pannelli e di 30 cm sui montanti interni, quando non diversamente indicato dai calcoli di progetto. Occorre fare attenzione alle prescrizioni

contenute nelle norme relativamente alle distanze dai bordi del pannello e all'interasse degli elementi di collegamento. È generalmente buona norma, soprattutto nel caso di utilizzo di pannelli di OSB, distanziare i pannelli l'uno dall'altro lungo i bordi di qualche millimetro, in modo da lasciare uno spazio per le variazioni dimensionali causate dai fenomeni di ritiro e rigonfiamento. Le pareti vengono poi collegate fra loro da un'ulteriore corrente superiore, sempre della medesima sezione unificata, che svolge la funzione di cordolo di collegamento. Il rivestimento interno della parete, quando non si preveda per esigenze strutturali la presenza di un secondo foglio di compensato, è realizzato generalmente con pannelli di cartongesso.

Il collegamento delle pareti alle fondazioni, come per gli edifici a pannelli portanti, deve svolgere la duplice funzione di contrastare il ribaltamento e lo scorrimento delle pareti per effetto delle azioni orizzontali. Per il ribaltamento vengono utilizzati sempre gli *hold-down* collegati alle fondazioni con barre filettate inserite in fori sigillati con malta cementizia o epossidica e ai montanti delle pareti con chiodi o viti. Lo scorrimento viene contrastato sempre con tirafondi che collegano il corrente inferiore della parete alla fondazione.

Il pacchetto costruttivo delle pareti viene completato mediante il posizionamento dell'isolante all'interno dell'intercapedine dell'intelaiatura. L'isolante è generalmente costituito da fibra di vetro o lana di roccia; dalla parte calda di quest'ultimo viene posizionata la barriera al vapore. In alternativa si utilizzano isolanti rigidi quali il polistirene estruso o il sughero. Lo strato isolante posto nell'intercapedine può occupare tutto lo spessore, nel qual caso il posizionamento degli impianti avviene in fresature ricavate nell'isolante, oppure solo una parte lasciando un'intercapedine vuota. Nel caso in cui sia necessario per esigenze strutturali collegare il pannello di legno strutturale ad entrambi i lati dell'intelaiatura, il rivestimento interno viene realizzato lasciando una intercapedine interna per il passaggio degli impianti chiusa con pannelli di cartongesso. Sul lato freddo viene solitamente realizzata una coibentazione a cappotto sempre con lana di legno o sughero e/o con pannelli di lana di legno mineralizzata mentre il rivestimento esterno può essere intonacato o ricoperto con doghe di legno.

Una volta terminata la struttura, l'edificio viene completato con dei pacchetti costruttivi. Dal lato esterno della parete viene posto un cappotto isolante solitamente formato da pannelli di fibra di legno, rete porta intonaco e intonaco. In alternativa si utilizzano pannelli di lana di legno e cemento, di fibra di canapa, di sughero o doghe di legno per il rivestimento esterno. Dal lato interno invece si prevede una intercapedine di 2-4 cm all'interno della quale far passare l'impianto elettrico, riempita generalmente con lana minerale o anche con lana di legno e rivestita internamente con pannelli di cartongesso singoli o doppi. La parete così composta, partendo da un pannello strutturale che può avere spessori variabili dagli 8 ai 20 cm in media, arriva ad uno spessore complessivo di 20-35 cm con un aspetto è una solidità molto simile a quella di una parete di muratura.

Il solaio viene rifinito dal lato inferiore con cartongesso che può essere direttamente collegato al pannello di legno oppure lasciando, come per il lato interno delle pareti, un'intercapedine, mentre dal lato superiore viene posto uno strato di sabbia o altro materiale inerte per aumentare la massa, un massetto porta impianti in calcestruzzo e la pavimentazione. Talvolta fra lo strato di sabbia e il massetto di calcestruzzo può essere inserito uno strato di composto elastomerico, ossia gomma, come disaccoppiante acustico oppure uno strato di isolante come isolamento termo-acustico.

Il pacchetto costruttivo della copertura varia in funzione della struttura portante, delle condizioni climatiche e delle tradizioni costruttive. Se si parte da una copertura a pannelli il pacchetto viene solitamente completato con pannelli di isolante (fibra di legno generalmente) con spessori variabili tra gli 8 e i 16 cm, sovrastante tavolato o pannello di compensato o OSB, guaina traspirante, doppia orditura di listelli (per ventilazione e porta-tegole) e manto di copertura. Sul lato interno viene solitamente posto il cartongesso, o direttamente fissato sul pannello di copertura o con intercapedine di 2-3 cm per passaggio impianti fissato su listelli. Nel caso di copertura a travi, se le stesse vengono lasciate a vista, sopra di esse viene fissato un tavolato semplice o doppio (con il secondo strato disposto a 45° rispetto al primo preferibilmente) ripetendo poi lo stesso pacchetto costruttivo precedentemente descritto. Se le travi non vengono lasciate a vista, l'isolante viene posto nell'intercapedine di altezza pari all'altezza delle travi e il pacchetto viene completato superiormente con tavolato, guaina traspirante, listelli, controlistelli e manto [14-15].

La Figura 2 mostra il pacchetto costruttivo in cui si riconoscono (partendo dall'interno):

- 1 - Pannello di finitura (cartongesso o in fibra di legno e cemento),
- 2a - Isolante termo acustico in lana di legno e cemento,
- 2b - Listelli in abete 40x40 mm @ 625 mm,
- 3 - Barriera vapore,
- 4 - Pannello di controventatura (OSB, multistrato o legno cemento rinforzato),
- 5a - Isolante (lana di legno, minerale, petrolchimici, sughero, cellulosa, legno cemento),
- 5b - Morali in abete 50x100 mm @ 625 mm,
- 6 - Pannello di controventatura (OSB, multistrato o legno cemento rinforzato),
- 7 - Isolante termo acustico in lana di legno e cemento,
- 8 - Intonaco.

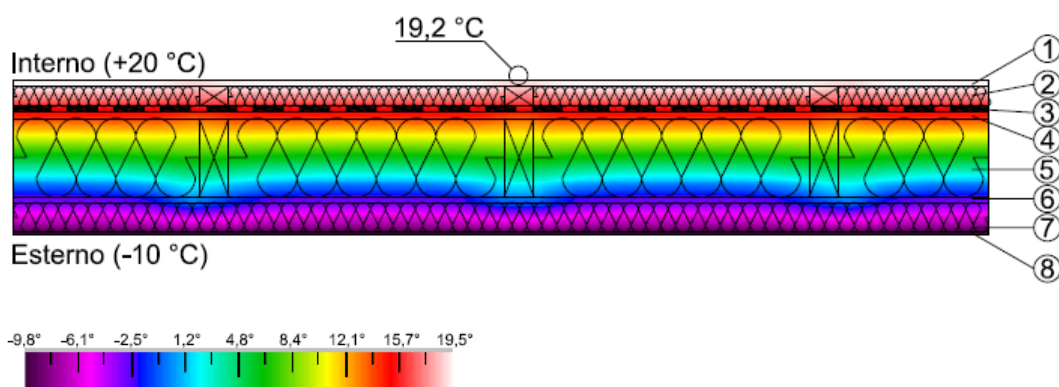


Figura 2 - Pacchetto costruttivo del sistema a telaio

3. Legno strutturale

La variabilità naturale delle caratteristiche del legno porta alla necessità di suddividerlo in gruppi omogenei, secondo un sistema di classificazione, al fine di renderlo idoneo per gli impieghi strutturali. Questo procedimento permette di attribuire, ad ogni classe, valori di resistenza e di rigidezza affidabili. Le norme di classificazione sono state sviluppate a fronte di migliaia di prove distruttive, mediante procedure codificate da norme tecniche e decenni di esperienza applicativa. Le norme relative alla classificazione indicano quali sono le caratteristiche ed i difetti ammissibili nelle diverse classi di resistenza, per una data specie legnosa o gruppo di specie, e per una provenienza geografica. La classificazione può essere eseguita "a vista" o "a macchina", in entrambi i casi, lo scopo è l'assegnazione del singolo elemento ad una categoria o a una classe di resistenza, in genere armonizzate con quelle definite dalla norma EN 338 [16]. Per le esigenze di progettazione, la classificazione secondo la resistenza è espressa da una serie di profili prestazionali per le specie legnose e le classi di qualità più frequentemente usate. Con la pubblicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14-09-2005 [17] e con la loro entrata in vigore del D.M. 14/01/2008 [18] in Italia è fatto l'obbligo di classificare secondo la resistenza il legname utilizzato per scopi strutturali. Secondo quanto riportato nel testo infatti "il legno massiccio per uso strutturale è un prodotto naturale selezionato, in dimensioni d'uso nelle strutture, classificato, elemento per elemento, secondo la resistenza, sulla base di specifiche normative". Inoltre, con l'entrata in vigore dell'obbligo della marcatura CE per il legname massiccio, la classificazione secondo la resistenza diviene un passaggio imprescindibile per l'impiego di questo materiale.

Le regole di classificazione sono diverse nei vari paesi, in funzione delle specie legnose e delle tradizioni nella lavorazione, ma seguono necessariamente gli stessi principi elencati nella norma EN 14081 [19] per

giungere a risultati molto simili. Per il legname strutturale provenienti da alberi cresciuti in Italia, la norma UNI 11035 [20] fissa le regole da adottare per effettuare la classificazione a vista e assegna gli elementi a categorie associate a specifici profili di resistenza.

3.1. *Requisiti*

La classificazione a vista in base alla resistenza è il processo mediante il quale si assegna un segato ad una categoria, a cui sono associati determinati valori caratteristici che ne descrivono le prestazioni meccaniche da considerare nella progettazione. I segati classificati a vista sono assegnabili a una determinata categoria solo se soddisfano tutti i requisiti previsti per quella categoria. È pertanto il difetto peggiore, ovunque esso sia situato, a determinare la categoria di appartenenza. Se il segato non può essere assegnato ad alcuna delle categorie previste, deve essere scartato in quanto non classificabile per uso strutturale.

I limiti di ammissibilità delle caratteristiche per i diversi tipi di legname per uso strutturale sono riportati nella UNI 11035-2 [21]. I criteri di classificazione sono riferiti ad un'umidità del 20%.

Di seguito sono elencate le caratteristiche che riducono la resistenza meccanica e la regola per la classificazione a vista dell'abete rosso e bianco. Si riportano i requisiti minimi della classe inferiore C18/S3 e C24/S2 rispettivamente della norma UNI 11035-2 [21].

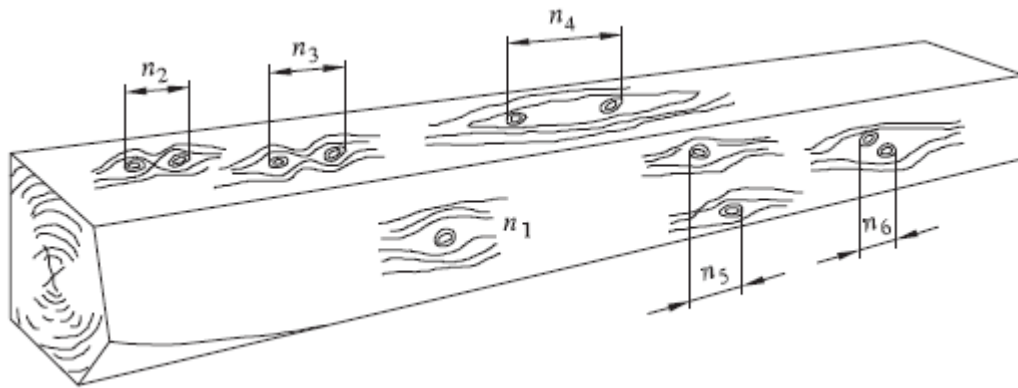
Nodi

Nodi aventi diametro non maggiore di 5 mm non vengono presi in considerazione. Sono ammissibili tutti i tipi di nodi (aderenti, cadenti, sani, neri, ecc.). Nodi isolati e gruppi di nodi sono ammissibili nella misura in cui soddisfino tutti i requisiti specificati per la categoria.

La norma UNI 11035 [21] prescrive:

- nodi isolati, considerare il nodo più grande del segato, il rapporto A fra il suo diametro minimo d e la larghezza della faccia su cui tale diametro viene misurato;
- nodi a gruppi, considerare il rapporto A_g fra la somma dei diametri minimi dei nodi compresi in un tratto di 150 mm e la larghezza della faccia su cui compaiono. Per l'abete non si considera il criterio dei nodi raggruppati.

Le regole pratiche per distinguere i nodi secondo la UNI 11035 [20] sono illustrate di seguito.



- n_1 Nodo isolato
- n_2 Gruppo di nodi, in quanto nodi allineati a meno di 150 mm di distanza
- n_3 Nodi isolati, in quanto allineati a più di 150 mm di distanza
- n_4 Gruppo di nodi, in quanto anche se a più di 150 mm di distanza la fibratura non recupera la direzione originale fra i nodi
- n_5 Nodi isolati, in quanto anche se insistenti su un tratto minore di 150 mm di lunghezza non sono allineati e la fibratura fra di essi recupera la direzione originale

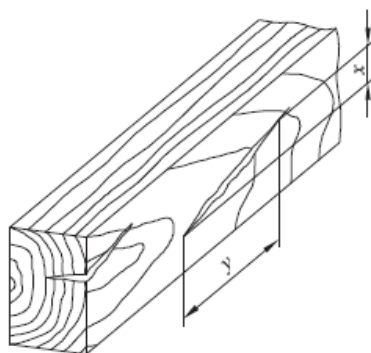
n6 Gruppo di nodi, in quanto presentano la fibratura che non recupera la direzione originale.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Nodo singolo	$A \leq 3/5$	$A \leq 2/5$ (< 70 mm)
Nodi raggruppati	-	-

Inclinazione della fibratura

La direzione generale della fibratura viene determinata su una lunghezza minima pari a 1000 mm. L'inclinazione della fibratura si calcola come altezza x riferita alla lunghezza orizzontale y . Tale rapporto si esprime in percentuale secondo la seguente relazione: $F = (x/y) \times 100$

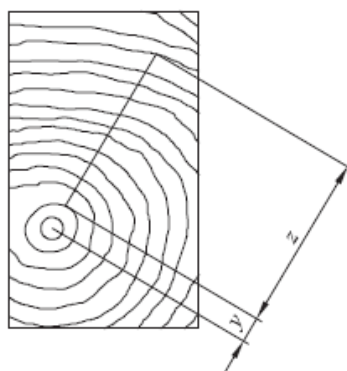
L'inclinazione della fibratura deve essere determinata su almeno due facce contigue dell'elemento, ed è decisivo il valore peggiore.



Criterio	C18/S3	C24/S2
Inclinazione della fibratura	$\leq 16,5 \%$	$\leq 12,5 \%$

Ampiezza anelli

L'ampiezza degli anelli è misurata su una testata del segato; essa è uguale alla larghezza media, espressa in millimetri, degli anelli di accrescimento. La misurazione si effettua sulla linea più lunga e perpendicolare agli anelli di accrescimento e trascurando i primi 25 mm dal midollo (y) quando questo è presente. L'ampiezza degli anelli è data da: $R = z/N$ mm.



Criterio	C18/S3	C24/S2
Ampiezza degli anelli	≤ 15 mm	≤ 15 mm

Fessurazioni longitudinali da ritiro

La lunghezza e la profondità delle fessurazioni da ritiro sono legate all'umidità, pertanto i limiti assegnati per i diversi tipi di legname nelle regole di classificazione sono applicabili solo per legno equilibrato a umidità del legno 20% o minore. La norma UNI 11035 [21] distingue fra passanti e non.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Fessurazioni da ritiro	ammesse	ammesse

Cipollatura

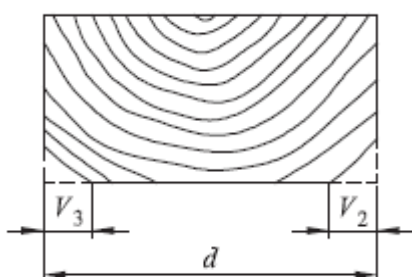
La norma UNI 11035 [21] ammette singole cipollature non affioranti nei segati di castagno, abete bianco e larice solo se non continue per tutta la lunghezza del segato e se rispondono ai requisiti di raggio massimo ($< \text{lato maggiore}/3$) e di eccentricità ($< \text{lato maggiore}/6$). Questo requisito è determinante per quanto riguarda le travi, mentre per le tavole si considera che la cipollatura sia affiorante ma non passante. Altre fessurazioni non sono ammesse.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Cipollatura	r.max $<$ lato/3 ecc. $<$ lato/6	r.max $<$ lato/3 ecc. $<$ lato/6
Fulmine, gelo, lesioni	non ammesse	non ammesse

Smusso

L'entità dello smusso è espressa dal rapporto tra la proiezione dello stesso su un lato e la sua dimensione.

Essa è data da: $(V_2+V_3)/d$



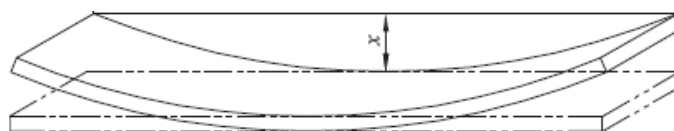
Si determina l'entità dello smusso sulla faccia ove tale rapporto è massimo.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Smusso	$\leq 1/3$	$\leq 1/3$

Deformazioni

Le deformazioni si calcolano misurando la freccia h nel punto di massima deformazione.

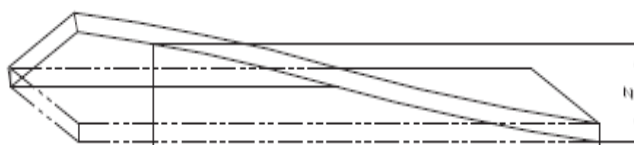
Arcuatura



Falcatura



Svergolamento



Imbarcamento



Critério	C18/S3	C24/S2
Arcuatura	20 mm/2 m di lunghezza	10 mm/2 m di lunghezza
Falcatura	12 mm/2 m di lunghezza	8 mm/2 m di lunghezza
Svergolamento	2 mm/25 mm di larghezza	1 mm/25 mm di largh.
Imbarcamento	nessun limite	nessun limite

Attacchi di insetti

Solo su legno umido, altrimenti attacchi da insetti su legno essiccato o stagionato non sono ammessi.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Attacco di insetti	ammessi fori con alone nero oppure $1.5 \text{ mm} \leq \text{diametro dei fori} \leq 2.5 \text{ mm}$ e ≤ 10 fori/1 m di lunghezza	non ammessi

Degrado da funghi

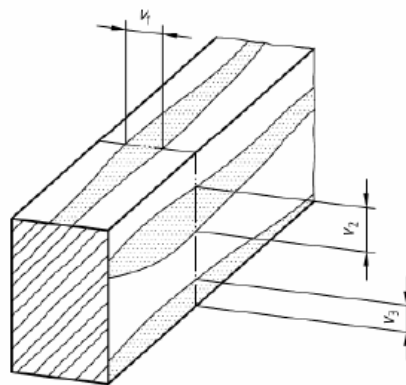
Deve essere valutata la presenza di carie e azzurramento.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Azzurramento	ammesso	ammesso
Carie (bruna e bianca)	non ammessa	non ammessa
Rosatura	non ammessa	non ammessa

Legno di compressione

La norma UNI 11035 [21] distingue due modalità:

- sulle facce, si misura sulla superficie dei segati, nella posizione di massima estensione, perpendicolarmente all'asse longitudinale. La somma delle larghezze v di tutte le striature viene espressa come frazione V del perimetro della sezione.



- sulle teste, calcolata come rapporto tra l'area affetta da legno di compressione e l'area della superficie della sezione trasversale all'estremità del segato su cui compare, considerando sempre il valore peggiore.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Legno di compressione	≤ 3/5	≤ 2/5

Lesioni e danni meccanici

Per lesioni e danni meccanici si intendono le lesioni del tessuto legnoso causate nell'albero in piedi da gelo, fulmine, vento, fratture e traumi di varia origine. Rientrano all'interno della medesima casistica sia i danni meccanici dovuti alle operazioni in bosco e in segheria, i cui effetti possano pregiudicare la resistenza meccanica del legname in opera, sia la presenza di lesioni derivanti dalla azione del vischio desumibili dalle tracce degli austori.

Criterio	C18/S3	C24/S2
Vischio	non ammesso	non ammesso

3.2. Risultati

Sono state classificate 1254 tavole essiccate di Abete rosso di dimensione 120x60 mm provenienti da assortimenti destinati alla produzione di imballaggi industriali. La segheria era ubicata in provincia di Trento e il materiale proveniva da boschi distanti 70 km. La classificazione è stata effettuata mediante il metodo visuale e a macchina. Per la classificazione visuale del legno è stata utilizzata la norma UNI 11035 [20-21], mentre la classificazione a macchina è stata effettuata utilizzando un sistema palmare a onda d'urto Brookhuis MTG AB in grado di classificare il legno per

classi di resistenza, in accordo alla EN 338 [16]. È stato verificato il contenuto di umidità in modo casuale. Esso è risultato contenuto fra il 10,6 e il 13,8%, mentre la densità del legno è stata misurata sistematicamente e suddivisa per classi di 20 kg/m³. La densità media è stata di 412 kg/m³ in un intervallo compreso fra i 380 e i 480 kg/m³.

La norma EN 338 [16] suddivide le tavole in classi di resistenza a flessione di 2 MPa, identificate dalla lettera C seguita dal valore di resistenza. In genere la qualità delle tavole impiegate nel sistema costruttivo a telaio varia tra C16 e C24. Le categorie visuali della norma di classificazione UNI 11035 [21] corrispondenti sono la S3, che ha un profilo pari alla C18, e la S2, pari alla C24. Entrambe le norme prevedono la presenza di tavole non classificabili, con requisiti insufficienti, di norma indicate con la lettera R, *rejected*.

La Tabella 1 elenca la distribuzione delle tavole destinate alla produzione di imballaggi secondo i due sistemi di classificazione. Più dell'80% delle tavole, per entrambi i sistemi di classificazione, sono idonee all'impiego strutturale. Le classi più rappresentate sono la C16 e C20, pari al 74%, confermato dalla categoria visuale S3 del 60%. Questi dati dimostrano che attraverso la sola classificazione delle tavole per l'imballaggio si possono ottenere elementi strutturali in elevata quantità.

Tabella 1 - Distribuzione delle tavole in classi di resistenza secondo i due sistemi di classificazione

Metodo a macchina secondo EN 338				
R	C16	C20	C24	totale
173	526	408	147	1254

Metodo a vista secondo UNI 11035			
R	C18/S3	C24/S2	totale
223	758	273	1254

Il Grafico 1 indica che una esigua quantità di tavole, il 18% secondo la UNI 11035 [21] e il 14% per la EN 338 [16], non sono adatte all'impiego strutturale. I parametri fisici utilizzati dal dispositivo di classificazione ha permesso una migliore discriminazione delle proprietà meccaniche di alcune caratteristiche visive (alterazioni cromatiche, presenza del midollo e inclusioni della corteccia), che sono penalizzati dalle rigide regole visuali.

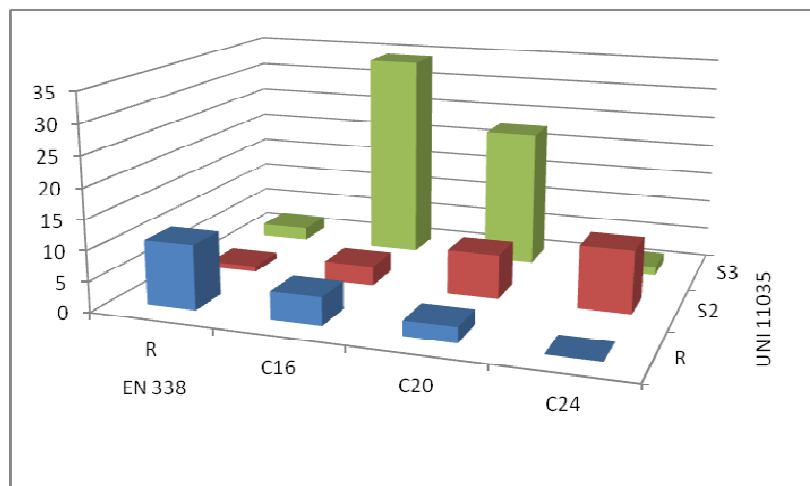


Grafico 1 - Distribuzione percentuale delle tavole secondo i due sistemi di classificazione

4. Qualità dell'isolamento

La qualità dell'isolamento dell'involucro deve essere tale da garantire sia il comfort termico e igrometrico all'interno dell'edificio che il contenimento dei consumi energetici. In particolare, le strutture edilizie ed i componenti dell'involucro di edifici realizzati in legno permettono il raggiungimento di ragguardevoli prestazioni di isolamento e significativi contenimenti degli spessori. I principali requisiti prestazionali richiesti all'involucro sono espressi nella norma ISO 13788 [22]:

- elevata resistenza termica per il contenimento del consumo energetico;
- sufficiente capacità termica per il mantenimento di adeguate condizioni di comfort ambientale interno;
- idonea permeabilità al vapore in modo da evitare la formazione di condensa superficiale e interstiziale.

La resistenza termica R , [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$], indica la resistenza che il flusso di calore perpendicolare alla superficie dell'involucro, incontra nell'attraversare lo spessore dello stesso, dall'ambiente più caldo a quello più freddo. Essa è direttamente proporzionale allo spessore (s) dell'involucro ed inversamente proporzionale alla conducibilità termica (λ) dei materiali che lo compone. La resistenza totale di una parete composta da materiali diversi è pari alla somma delle resistenze dei singoli strati.

La capacità termica [J/K], di un sistema, come una parete, è pari al rapporto fra il calore scambiato e la variazione di temperatura che ne consegue. Essa è proporzionale al calore specifico (c) [kJ/kgK] e alla massa della parete [kg].

Gli edifici con struttura di legno a telaio normalmente sono dotati di una massa volumica (ρ) molto bassa, e i materiali isolanti generalmente impie-

gati posseggono un'ottima resistenza termica ma una bassa capacità termica.

La realizzazione di edifici ad elevate prestazioni termiche e ad efficienza energetica può essere conseguita in maniera concentrata o diffusa. Nel primo caso si impiegheranno materiali e prodotti che posseggano specifiche prestazioni nei confronti della resistenza e della capacità termica. Nel secondo caso, invece, si utilizzerà un unico prodotto che abbia entrambe le proprietà [23]. Come nel caso dei pannelli in lana di legno e cemento.

Inoltre gli isolanti sintetici (eps, xps, pur) hanno una permeabilità al vapore molto bassa, per cui necessitano di un'attenta progettazione ed esecuzione nell'uso di barriere al vapore.

L'impiego di diversi materiali per la costruzione di un edificio comporta un carico ambientale maggiore a causa della produzione, del trasporto, dell'installazione, della manutenzione, del disaccoppiamento e del conseguente smaltimento di più prodotti.

4.1. *Prestazioni termiche*

L'isolamento corretto di un edificio non può prescindere dalla eliminazione dei ponti termici, ovvero di quelle parti della struttura di un edificio che presentano caratteristiche termiche significativamente diverse da quelle circostanti tali da costituire una discontinuità nell'isolamento. I ponti termici si presentano solitamente in corrispondenza degli elementi strutturali non in legno [24].

Il comportamento termico dell'edificio non può essere parametrizzato con il solo parametro della resistenza termica. Il rilievo attribuito a questa grandezza è proporzionale all'esigenza di contenere le dispersioni termiche invernali per limitare il consumo energetico per riscaldamento.

In fase di progettazione deve essere posta attenzione anche alle prestazioni termiche dell'involucro edilizio in regime variabile, sia nei mesi invernali che nei mesi estivi.

Un fattore determinante è quello dell'inerzia termica. L'inerzia termica non è altro che l'effetto combinato della capacità termica e della resistenza termica dell'involucro, strettamente correlata alla capacità del materiale di accumulare calore. Maggiore è la massa, maggiore sarà la capacità termica, più tempo impiega l'onda termica ad attraversarlo. La variazione della temperatura nell'arco di una giornata può essere generalmente approssimata ad una sinusoidale e quindi è possibile definirla in termini di ampiezza e sfasamento. L'effetto dell'inerzia termica è così quantificabile in base all'attenuazione dell'ampiezza dell'onda termica [$^{\circ}\text{C}$] e al ritardo di fase (f), cioè all'intervallo di tempo [h] con cui le variazioni di temperatura si trasmettono da una parte all'altra dell'elemento.

La massa risulta quindi un'ottima strategia per ridurre i consumi energetici, in particolare per la climatizzazione estiva, attenuando i valori massimi di temperatura negli ambienti e ritardando l'immissione di energia termica negli stessi, spostandola verso le ore notturne quando la temperatura dell'aria esterna è ai valori minimi e il fenomeno dell'irraggiamento raffredda rapidamente le superfici esterne.

Gli edifici in legno sono generalmente "leggeri": sono cioè caratterizzati da valori bassi di massa superficiale [25]. Al fine di controllare e limitare le fluttuazioni dell'onda termica estiva, è fondamentale scegliere dei pacchetti costruttivi caratterizzati da valori abbastanza elevati di:

- R , resistenza termica [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$],
- ρ , densità [kg/m^3],
- c , calore specifico [kJ/kgK].

Oltre all'utilizzo di materiali con determinati requisiti prestazionali, è importante anche la scelta della loro posizione nel pacchetto costruttivo. La variazione della posizione dello strato con proprietà di densità, come i pannelli di lana di legno e cemento, o di resistenza termica elevata all'interno della sezione del componente edilizio, può influire notevolmente sulle sue proprietà di accumulo e di rilascio del calore, determinandone un comportamento diverso in estate ed in inverno.

4.1.1. Materiali isolanti

I materiali isolanti sono quei materiali che si oppongono al passaggio del calore e sono quindi caratterizzati da una bassa conducibilità termica, generalmente inferiore ai 0,05 W/m K. Tali materiali sono principalmente di natura porosa (alveolari o cellulari) e fibrosa, e racchiudono aria, notoriamente cattivo conduttore di calore. I migliori materiali termoisolanti sono quelli che possiedono una struttura alveolare a pori chiusi. La conducibilità termica può differire notevolmente da quella di riferimento soprattutto in presenza di forte umidità, e ciò dipende dalle sue caratteristiche igroscopiche.

I materiali isolanti possono essere classificati in base alla loro struttura fisica (fibrosa, cellulare o porosa) e alla loro origine: naturale o sintetica. La Tabella 2 riporta una classificazione completa delle categorie di materiali isolanti.

La Tabella 3 elenca le principali caratteristiche termofisiche dei materiali isolanti. Come risulta evidente i valori di conducibilità termica di molti dei materiali di origine naturale sono confrontabili con quelli di sintesi. Inoltre, i pannelli di lana di legno e cemento presentano elevati valori di capacità termica e densità che li rendono preferibili in realizzazione di componenti edilizi con elevata inerzia termica [24-25].

Tabella 2 - Classificazione dei materiali isolanti

Struttura	Processo di trasformazione	Materia prima	Tipologia
fibrosi	naturali	organici	fibre vegetali fibre di legno
	sintetici	inorganici	fibra d'amianto
	naturali	organici	fibra di poliestere
	sintetici	inorganici	fibra di vetro fibra di roccia
cellulari	naturali	organici	sughero
	sintetici	organici inorganici	eps, xps, pur vetro cellulare
porosi	naturali	inorganici	pomice argilla espansa
	sintetici	inorganici	calcio silicato cemento cellulare

Tabella 3 - Caratteristiche termofisiche dei materiali isolanti

Tipologia	λ W/m ² K	c kJ/kgK	ρ kg/m ³	μ
canapa	0,040	0,6	22	2
fibra di legno	0,040	2,1	80	8
legno cemento	0,070	1,8	400	5
lana di pecora	0,040	1,7	28	2
sughero	0,040	1,8	100	10
lana di roccia	0,040	0,8	45	2
lana di vetro	0,040	0,8	45	2
polistirene espanso	0,035	1,2	25	70
polistirene estruso	0,035	1,2	35	150
poliuretano espanso	0,030	1,2	25	80

4.2. *Pannelli di lana di legno e cemento*

Con questa denominazione sono considerati i pannelli costituiti da legno frazionato in elementi di qualsiasi forma e dimensione, conglomerati con leganti di natura minerale e generalmente cementizia, ai quali sono propriamente miscelati [26]. Appartengono a questo gruppo:

- *pannelli di chips conglomerati con cemento tipo Portland*, destinati esclusivamente all'edilizia, sono prodotti solamente in spessori medi e grossi, in dimensioni relativamente modeste (non superano in genere i 2 m²) e sono utilizzati come materiali per pareti interne ed esterne, per sottopavimentazioni e soffittature, o per cassaforme da lasciare in opera come coibentazione dei getti in calcestruzzo;
- *pannelli di lana di legno e cemento*, nei quali gli elementi di legno sono costituiti da strisce molto lunghe, sottili e strette ottenute mediante macchine ad azione piallante. Anche questi materiali, che hanno una struttura alveolare e sono conglomerati con cementi tipo Portland o magnesiaci sono destinati soltanto all'edilizia;
- *pannelli di particelle truciolari*, conglomerati con cemento di tipo Portland;
- *pannelli di fibra di legno conglomerate con leganti minerali*, che possono essere di natura diversa, hanno in genere una massa volumica bassa e sono utilizzati come materiali fonoassorbenti e coibenti per soffittature e rivestimenti.

Poiché alla base della maggior parte di questi pannelli vi è la lana di legno, è da precisarsi che con tale dimensione si intende un insieme di strisce di legno sottili e strette tagliate nella direzione della fibratura da tronchetti di specie facilmente lavorabili. Questo materiale è prodotto da lungo tempo ed è usato per l'imballaggio di oggetti o di materiali fragili (vetreria, lastre di marmo).

I primi pannelli composti di lana di legno agglomerati con magnesite sono stati fabbricati su scala industriale in Austria nel 1914; nel 1928 entravano in competizione anche i pannelli di lana di legno con legante a base di cemento Portland. In Italia la prima fabbrica secondo il brevetto Eraclit si è

aperta a Porto Marghera nel 1923 mentre nel 1934 ha avuto inizio con un altro brevetto la fabbricazione a base di cemento. Pannelli fabbricati con i consueti trucioli di falegnameria e segatura legati da cemento, che nel passato non avevano mai dato buoni risultati, cominciano nel dopo guerra ad avere un buon sviluppo [27].

4.2.1. Fabbricazione dei pannelli di lana di legno

Le dimensioni delle singole strisce che compongono la lana di legno possono variare entro i seguenti limiti:

- larghezza da 0,5 a 5 mm,
- spessore da 0,03 a 0,5 mm.

È da ricordare che la lana di legno è stata usata largamente per l'imballo della frutta con una misura della larghezza di 1,5 mm con spessore di 0,07 mm, mentre per l'imballo di oggetti vari la larghezza era di 2 mm con spessore di 0,10 mm. La lunghezza delle strisce dipende dal tipo di macchina, ma è per lo più di 50 cm. Il materiale tondo (per lo più tronchetti di modesto diametro, o spacconi) destinato alla produzione della lana di legno viene dapprima scortecciato andatamente e poi depezzato a 50 cm di lunghezza. I pezzi così ottenuti vengono privati della corteccia ed eventualmente privati dei nodi: il materiale è così pronto per la lavorazione definitiva, a meno che si tratti di legno fresco, nel qual caso conviene effettuare ancora una conveniente stagionatura [28].

Uno dei primi tipi di macchina per la lana di legno era costituito da una slitta scorrente con moto alternativo, comandato da una manovella, su guide montate in un apposito basamento. In senso normale allo spostamento della slitta avveniva l'alimentazione spingendo i tronchetti con le fibre orientate nella direzione del moto alternativo. Ad un estremo delle slitte è montato un coltello con lama a pettine, capace cioè di sollevare dalla superficie del legno dei trucioli di modestissimo spessore i quali venivano a trovarsi intercalati da strisce rimaste in rilievo sulla superficie del legno. Nella corsa di ritorno agiva il coltello continuo montato all'altro estremo della slitta; detto coltello ripristinava la superficie piana tagliando alla base le sporgenze lasciate dal primo. Il tipo più diffuso consta di una robusta incastellatura in ghisa fusa, posata sopra due basamenti in calce-

struzzo tra i quali si ricava una cavità dove può accumularsi il prodotto. L'incastellatura corre su apposite guide e con modo alternativo trasmesso da una manovella (sino a 250 giri/min') una slitta portante una serie di coltelli divisorii e una lama piellante per ognuna delle due direzioni tra le quali avviene lo spostamento. Più precisamente: la serie di coltelli divisorii (a due successivi dei quali spetta di delimitare lateralmente il truciolo) deve nel moto, precedere la lama della pialla a cui è perpendicolare e penetrare leggermente al disotto del livello di questa, dato che a tale lama spetta successivamente di separare, col taglio della base, il truciolo dal legno.

I tronchetti sono inseriti con le fibre nella direzione del moto quindi la lama agisce secondo una superficie tangenziale o per lo meno longitudinale rispetto al tronchetto, e la loro alimentazione, cioè l'avanzamento in direzione radiale per sottoporli all'azione dei coltelli e della lama, è ottenuta con dispositivi a vite comandati con trasmissione a ruote dentate dal meccanismo principale. Il legno è fissato tra cilindri scanalati dei quali i due interni hanno asse fisso, mentre quelli esterni hanno asse montato elasticamente per mezzo di leve a contrappeso. La potenza necessaria, la quale varia in dipendenza di molteplici fattori tra cui prevale la specie legnosa (si dà la preferenza alle conifere stagionate o al Pioppo che può anche essere fresco) e le dimensioni dei pezzi, è tra i 7,5 e i 20 kW. La produzione può ritenersi si aggiri in media tra i 400 e i 500 kg di lana all'ora.

Una variante del predetto tipo di macchina a doppio effetto comporta un sistema idraulico per l'alimentazione, consistente in un pressore sovrastante i tronchetti i quali essendo ottenuti da tre lati sono meno soggetti alle vibrazioni e possono essere meglio utilizzati, con minori sfridi. Come dato di larga massima può dirsi che la durata media dell'affilatura dei coltelli piellanti è di 4 ore mentre quella dei coltelli incisori è di un ordine di grandezza assai più grande (10-14 giorni). Una macchina moderna di concezione alquanto diversa è la Elromatic, utilizzata presso la Celenit, la quale è essenzialmente costituita da un cassone magazzino nel quale i tronchetti, depositi di piatto, sono compressi contro un disco orizzontale munito di diverse lame a pettine radiali le quali, con la rotazione del disco, tranciano delle strisce sottili. Queste cadono sopra un nastro trasportatore che le avvia alle fasi successive. La produzione di questa macchina è notevolmente superiore a quella delle macchine dianzi descritte. Per il

trasporto della lana ci si serve di condotti pneumatici o deve essere pressata in balle. A tal fine ci si serve di presse ordinarie che danno il risultato voluto con due compressioni successive: da 1 m³ di legname di Abete in tronchetti si ricavano in media da 380 a 390 kg di lana in balle; da 1 m³ di sciaveri da 260 a 270 kg. Per balle correnti di 60x70x100 cm il peso, se si tratta di legno di Abete, si aggira sui 40 kg, il che da un peso di circa 100 kg a m³: nella massa di lana compressa si hanno perciò circa 3/4 occupati dai vuoti e 1/4 dal legno [29].

Nel caso di malta cementizia basta immergere la lana nella vasca contenente la malta piuttosto liquida. Nel caso in cui invece si ricorra alla magnesite l'operazione consta di due fasi: nella prima la lana viene immersa in una soluzione concentrata di solfato di magnesio e successivamente ricoperta, mediante altra immersione, con ossido di magnesio [30].

Nelle prime lavorazioni artigiane ci si accontentava di comprimere la lana di legno trattata in adatte forme ripetenti la forma dei pannelli, per un tempo bastante ad ottenere la presa. Una produzione realizzata in questo modo, piastra per piastra, non è certo economicamente conveniente e pertanto a scopo industriale si ricorre a sistemazione in serie di piastre, contenute in adatte forme, le quali vengono compresse dopo averle disposte in pile alte sino a 25 - 30 pezzi. Alcuni procedimenti prevedono la presa accelerata mediante cottura in forno a circa 400 °C. La lana trattata passa nella zona di riscaldamento sostenuta da un nastro di acciaio e all'uscita si presenta come un grosso blocco di lunghezza e altezza variabile, ma con larghezza fissa di 50 cm. Mediante segatrici alternative il blocco è poi sezionato in pannelli delle spessore desiderato. Per conferire ai pannelli una maggior resistenza a flessione con una lavorazione di tipo artigianale, all'atto della preparazione del materasso di lana si può far penetrare nello stesso un certo numero di tondini di ferro o listelli di legno per armatura, ripetendo in certo qual modo la disposizione del cemento armato. Usando delle forme per ogni pannello conviene esse vengano spruzzate d'olio per favorire il distacco a presa avvenuta.

La lana di legno non si ottiene con la stessa facilità da tutte le specie legnose e da tutti i tronchi: è ovvio infatti che i sottili nastri, o trucioli, presenteranno le migliori caratteristiche se ricavati da legni teneri, a fibra-

tura diritta. Quest'ultimo requisito esige quindi che si ricorra a tronchetti diritti e quanto più possibile privi di nodi o di altri difetti: particolarmente nociva è la presenza di legno di reazione perché sia il canastro delle conifere che il legno di tensione delle latifoglie rendono pressoché impossibile l'ottenimento del truciolo [31]. Per quanto concerne le dimensioni, normalmente non si scende al disotto dei 9 cm sotto corteccia: non si accenna ai limiti superiori perché sotto questo riguardo il fattore determinante è quello economico e cioè il prezzo concorrenziale delle varie industrie (imballaggio, pasta meccanica o chimica per la carta, altri tipi di pannelli). Le specie legnose più correntemente adoperate in Europa sono l'Abete e il Pino silvestre tra le conifere; il Pioppo e il Salice tra le latifoglie [32]. Dal punto di vista pratico si possono considerare questi legni del tutto equivalenti anche se in linea scientifica possono riscontrarsi delle leggere differenze da caratteristica a caratteristica, e cioè:

- massa volumica, alquanto superiore nell'Abete e nel Pino in confronto al Pioppo e al Salice: ciò può sino ad un certo punto interferire con la resistenza meccanica a trazione dei singoli trucioli;
- struttura anatomica, nelle conifere vi è sempre una marcata eterogeneità tra le zone primaticcia e tardiva degli anelli mentre nel Pioppo e nel Salice tale differenza è molto poco evidente essendo poi ancora accompagnata da una regolare e costante distribuzione dei vasi in tutta l'ampiezza degli anelli, cosa che consente un assorbimento o meglio una adesione più omogenea delle malte agglomeranti;
- colorazione, è normalmente più omogenea nel Pioppo e nel Salice che non nelle conifere;
- resistenza alle alterazioni da funghi, leggermente minore nel Pioppo e nel Salice.

La resina del legno delle conifere che apparentemente potrebbe da qualcuno essere ritenuta svantaggiosa, non comporta in realtà alcun serio inconveniente mentre invece la presenza di determinati estrattivi (quali zuccheri, tannini, amido, fenoli, certi chinoni, ecc.) può determinare un forte rallentamento nella presa del cemento, o addirittura inibirla del tutto. Per impedire l'azione ritardante di tali estrattivi la lana di legno viene

“mineralizzata” preventivamente con latte di calce, cloruro di calcio, silicato di sodio, ecc., oppure lavata con acqua fredda o calda. Ovviamente il procedimento migliore rimane pur sempre quello di non ricorrere all’impiego di legni contenenti gli estrattivi inibenti: tra quelli dei Paesi Europei son quindi da scartare il Larice, il Faggio e le Querce. Mentre negli altri Paesi Europei la lana di legno è prevalentemente ottenuta dalle conifere precitate, in Italia si ricorre pressoché esclusivamente all’Abete, al Pioppo e al Salice, sia di produzione nazionale che di importazione.

Nei riguardi delle materie prime usate per le malte leganti esse naturalmente devono rispondere alle esigenze di fabbricazione secondo i vari brevetti adoperati (cemento Portland, cemento Sorel a base di solfato di magnesio e di ossido di magnesio, ecc.). Usando il cemento Portland può essere opportuno aggiungere all’acqua il 2% di cloruro di calcio. In linea generale le malte nelle quali compaiono aliquote sensibili di carbonati idrati di sodio e di potassio hanno una certa influenza sfavorevole provocando degradazioni a carico delle emicellulose del legno, alterazioni di colore, nessun impedimento agli attacchi dei funghi e maggiore fragilità. Le malte a base di magnesite non darebbero invece luogo a tali inconvenienti e in definitiva consentirebbero di avere dei pannelli di maggiore durata. Per i pannelli di lana di legno più che non indicare il rendimento rispetto al volume della materia prima conviene fare riferimento al peso di lana di legno necessaria per allestire 1 m³ di pannelli: esso può aggirarsi su 140-200 kg allo stato di umidità normale: il peso del cemento è circa doppio.

4.2.2. Prodotti ottenuti e loro caratteristiche

I pannelli di lana di legno e cemento utilizzati in Italia hanno le seguenti caratteristiche dimensionali:

dimensioni [cm]	200-120-60 x 50-60 cm				
spessori [cm]	1,5	2	3	5	8
peso [kg/m ²]	7	9	13	20	30
peso [kg/m ³]	450	450	430	400	375

A tale peso corrisponde una aliquota percentuale di vuoti nel volume complessivo di circa il 40 %. Nel valore del peso interviene in modo assai sensibile la presenza del legante minerale e l’ammontare dei vuoti nella

struttura. Le altre caratteristiche fisiche di maggiore interesse sono le seguenti:

- coefficiente di conducibilità termica: allo stato secco e a 10 °C: da 0,054 a 0,058 kcal/m²h°C,
- assorbimento del suono: per frequenze comprese tra 500 e 2000 Herz: attorno al 50 %.

Oltre ai pannelli piani normali si hanno anche i cosiddetti “pannelli onda” nei quali la compressione e la presa avvengono in sagome ondulate: le superfici possono poi essere variamente trattate, e cioè tinteggiate così da ottenere un piacevole aspetto estetico o ricoperte, sulla faccia opposta all’incidenza delle onde sonore con materiale fibroplastico atto a migliorare le doti di assorbimento acustico.

I pannelli di lana di legno sono particolarmente adatti per pareti di separazione leggere, intercapedini, strati isolanti sia verticali che orizzontali, rivestimenti, soffittature. Le tecniche costruttive odierne offrono una svariatissima serie di soluzioni nelle quali, da soli od in unione ad altri pannelli derivati dal legno o addirittura a materiali di diverso tipo, i pannelli in questione consentono di ottenere eccellenti risultati di isolamento termico ed acustico. Essi possono essere altresì usati per casseforme smontabili o da lasciare in opera: nel secondo caso entreranno a far parte della struttura di calcestruzzo o cemento armato.

Un prodotto in un certo qual senso intermedio tra i pannelli di lana di legno e quelli di particelle è quello fabbricato negli Stati Uniti sotto il nome di Embedded Fiber Board: esso consiste di stretti trucioli lunghi da 25 a 50 mm legati con cemento Portland a formare un pannello a strato unico oppure a tre strati nei quali i due esterni hanno le particelle legnose orientate approssimativamente secondo i lati lunghi del pannello. Il materiale si presenta non poroso, con elevata massa volumica (1050-1200 kg/m³) e con ottime caratteristiche di resistenza meccanica, particolarmente a flessione. Può essere usato a scopi costruttivi, anche all’esterno; è resistente al fuoco e alle termiti: può essere chiodato, segato e tinteggiato.

I pannelli di legno e cemento sono inquadrati all’interno della norma EN 13168 [33] che considera gli isolanti termici per l’edilizia prodotti con lana

di legno. Questa norma è specifica per i prodotti con una resistenza termica dichiarata minore di $0,15 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ o una conduttività termica dichiarata maggiore di $0,1 \text{ W/m K}$ a $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Il termine inglese wood wool cement board (WWCB) viene tradotto come pannello di lana di legno e cemento con densità fra 350 e 500 kg/m^3 , per differenziarlo dai pannelli di particelle e cemento con densità che supera i 1000 kg/m^3 .

Il termine lana di legno può risultare fuorviante in quanto largamente utilizzato in altri prodotti isolanti a base di legno in cui il legante è una resina ma soprattutto in cui il legno è ridotto in gruppi di fibre.

I pannelli di lana di legno cemento sono caratterizzati da strisce di legno con lunghezza compresa tra 60 mm e 150 mm , una larghezza tra 1 mm e 3 mm e uno spessore tra 1 mm e 2 mm . Il groviglio di trucioli è prevalentemente disordinato con un pseudo orientamento in direzione longitudinale. Il pannello si presenta nello spessore con una massa volumica maggiore verso le superfici esterne e una inferiore al centro, soprattutto per i pannelli con spessore maggiore di 4 cm . I pannelli possono avere dimensioni fino a $1,2 \text{ m}$ di lunghezza e una larghezza fissa di $0,6 \text{ m}$, e uno spessore compreso tra 15 mm e 75 mm [27, 29].

La produzione dei pannelli di lana di legno e cemento viene realizzata prevalentemente con tondame di piccolo diametro a basso costo, esclusivamente legno di conifera, principalmente abete rosso proveniente per lo più da sfollamenti e diradamenti delle foreste, che viene sfruttato al 100%. Il tondame viene piattato con utensili simili a pettini, ottenendo trucioli simili a filetti, vengono quindi immersi in una soluzione salina che preserva il legno e aumenta l'adesione con il cemento e successivamente miscelati con cemento, formati in casseformi in legno e pressati ad ottenere i pannelli. Infine sono squadri ed eventualmente calibrati, profilati e colorati prima dell'imballaggio.

In virtù della struttura dei pannelli di lana di legno e cemento le proprietà meccaniche e fisiche si riferiscono, in genere, ad un determinato intervallo di spessori. Tendenzialmente, ad esempio, la resistenza e la rigidità a flessione diminuiscono all'aumentare dello spessore del pannello. I valori di resistenza e di rigidità sono inversamente proporzionali allo spessore passando da 1650 kPa per lo spessore da 15 mm a 650 kPa per lo spessore da 75 mm . Per aumentare la rigidità, durante la fase di produzione,

possono essere introdotte in direzione longitudinale, dei listelli in legno. I parametri caratteristici a taglio sono grossomodo uguali nelle due direzioni portanti, con un valore di 0,28 MPa. La resistenza a compressione al 10% di deformazione è intorno ai 200 kPa. Questo valore è da considerarsi alto per i materiali isolanti, tanto che è possibile utilizzarlo in aree calpestabili.

Grazie alla struttura si ottiene un grado elevato di stabilità della forma nel piano del pannello connesso con una maggiore resistenza e rigidità a taglio in caso di sollecitazione a lastra del pannello stesso. In tal modo si riducono drasticamente (o si eliminano) possibili rigonfiamenti e fenomeni di ritiro dovuti a variazioni di umidità. L'assorbimento d'acqua a breve termine è di 4,40 kg/m². Anche la dilatazione termica è eccellente, tanto che si può ritenere nulla.

La versatilità dei pannelli in legno cemento risiede nell'ottimo comportamento alla reazione a fuoco, con una euroclasse B-s1, d0; un buon valore di diffusione del vapore, con μ pari a 5.

Rispetto agli isolanti di origine naturale risulta imputrescibile con una resistenza totale al rischio fungino. Anche le prove alternate di gelo e disgelo non mostrano alcuna alterazione.

Inoltre a differenza di altri isolanti, i pannelli in legno cemento presentano un valore di calore specifico soddisfacente di 1,81 kJ/kg K e una capacità di accumulo termico fra 627 e 965 kJ/m³ K. Va ricordato che queste caratteristiche hanno un riscontro nei valori di resistenza termica non eccellenti per un materiale isolante, infatti la conducibilità termica λ è di 0,07 W/mK.

Un'applicazione dei pannelli legno cemento nell'edilizia residenziale di legno, oltre che per l'isolamento termoacustico, è rappresentata dal rivestimento di costruzioni leggere di sistemi intelaiati. In questo ambito i pannelli vengono utilizzati principalmente per la resistenza ai carichi orizzontali dovuti a vento, sisma, ecc., ma anche per garantire la distribuzione di carichi concentrati e superficiali distribuiti (es. su nervature oppure nella costruzione di pavimenti).

5. Metodo applicato alla valutazione ambientale

Sempre, nella vita di tutti i giorni, l'uomo deve compiere delle scelte, dalle più importanti alle meno importanti, i cui effetti si ripercuotono sull'individuo stesso e sull'ambiente che lo circonda e in cui egli vive. Negli ultimi anni ha assunto notevole importanza la necessità di guidare tali scelte, relativamente alle problematiche inerenti l'ambiente ed i possibili effetti che l'attività dell'uomo può esplicare sui diversi comparti ambientali.

Molto spesso, infatti, l'uomo è chiamato a prendere delle decisioni, in merito, ad esempio, alle tecnologie da impiegare per la produzione di beni di servizio, alle materie prime da sfruttare, alle possibili riutilizzazioni dei prodotti, fino alle modalità di smaltimento finale dei rifiuti; si tratta, in ogni caso, di scelte le cui conseguenze possono manifestarsi in maniera più o meno significativa sull'ambiente, determinando effetti più o meno gravi sul livello di qualità dello stesso e, quindi, sulla salute dell'uomo.

In questo contesto, negli ultimi anni, si è sviluppata una specifica procedura, attraverso la quale è possibile supportare il processo decisionale e pervenire, quindi, a delle considerazioni significative sui possibili impatti ambientali associati a ciascuna delle attività sopra descritte; tale procedura prende il nome di Valutazione del Ciclo di Vita o Life Cycle Assessment (LCA) e si pone come obiettivo l'identificazione e la valutazione quantitativa degli impatti ambientali associati alle diverse attività dell'uomo.

Il fine ultimo della procedura di Valutazione del Ciclo di Vita è, infatti, quello di fornire delle indicazioni ai soggetti decisori in merito alle azioni da intraprendere, confrontando eventualmente le diverse alternative di intervento a disposizione e, successivamente, pervenire all'identificazione della migliore soluzione possibile, sulla base dei dati forniti in input e delle assunzioni adottate nello sviluppo dello studio.

La procedura di Valutazione del Ciclo di Vita è dettata dalla normativa di settore, in particolare dalle norme ISO 14040 [34] e ISO 14044 [35], ed è a queste che è necessario riferirsi per chiarire le modalità di sviluppo dello studio e le diverse fasi attraverso le quali deve articolarsi.

5.1. *Life Cycle Assessment (LCA)*

La Valutazione del Ciclo di Vita (LCA) si configura oggi come uno degli strumenti sicuramente più importanti e più utilizzati dal mondo tecnico economico, nell'ambito della caratterizzazione dei possibili impatti indotti sull'ambiente dai "prodotti" fabbricati e consumati dalla società. In particolare, il crescente degrado ecologico, la ridotta considerazione delle problematiche ambientali e la scarsa capacità dei criteri di valutazione tecnico-economici di portare in conto l'accettabilità e gli effetti ambientali di determinate scelte compiute dall'uomo, ha accresciuto l'interesse verso lo sviluppo di metodi atti a comprendere meglio e ridurre tali impatti [36].

La valutazione del ciclo di vita è, quindi, una tecnica, in corso di sviluppo, per l'individuazione e la quantificazione degli impatti ambientali associati ad un prodotto, con l'obiettivo di ottenere delle informazioni, impiegate poi in un processo decisionale molto più complesso, e pervenire, quindi, a scelte definitive e compatibili con le esigenze economico-sociali e di tutela dell'ambiente. In particolare l'LCA può dare supporto a [34]:

- Identificare le opportunità di migliorare gli aspetti ambientali dei prodotti nei diversi stadi del loro ciclo di vita;
- Prendere delle decisioni nelle industrie e nelle organizzazioni governative e non governative;
- Scegliere indicatori rilevanti di prestazione ambientale con le relative tecniche di misurazione;
- Commercializzare, per esempio, una dichiarazione ecologica, un sistema di etichetta ecologica o un'asserzione di prodotto ecologico.

Ogni prodotto o servizio porta con sé una "storia", sia a monte sia a valle della fase del proprio utilizzo. Tale percorso inizia con l'estrazione e la lavorazione delle materie prime. Mediante successive trasformazioni si ottengono semilavorati, sino ad arrivare alla fase vera e propria di produzione e di assemblaggio del prodotto nell'azienda, che lo immette "dalla culla al cancello". Una volta uscito dalla fabbrica, il prodotto è distribuito sul mercato e pronto per l'uso. Tale fase del ciclo di vita dura per il tempo utile del prodotto, che è ovviamente estremamente variabile a seconda del

prodotto medesimo; si pensi, per esempio, alla durata di vita di un foglio di carta – *prodotto di immediato consumo*, rispetto a quella di un frigorifero – *prodotto durevole*. Per alcuni prodotti, il tempo di vita utile può essere esteso mediante opportuna manutenzione [37].

Giunto al proprio fine vita, il prodotto può [38]:

- essere riutilizzato nei processi produttivi (totalmente o in parte);
- essere riciclato per la produzione dello stesso tipo o di altri prodotti;
- essere utilizzato ai fini del recupero energetico (termovalorizzazione);
- essere smaltito in discarica.

Comunemente si fa riferimento all'insieme del ciclo di vita, ovvero al processo che va dall'acquisizione delle materie prime dall'ecosfera, sino al ritorno all'ambiente sotto forma di rifiuti o rilasci con il termine "dalla culla alla tomba" ("from cradle to gate"). Più recentemente si sta diffondendo anche il termine "dalla culla alla culla", con il quale si vuole enfatizzare la rivalorizzazione del prodotto a fine vita, attraverso il rientro in circolo dei materiali riciclati [39].

Semplicemente la Valutazione del Ciclo di Vita va a studiare quelli che sono i potenziali impatti di un prodotto o di un processo durante tutta la sua vita, dalla culla alla tomba, mediante [40]:

- La compilazione di un inventario di ciò che di rilevante entra ed esce da un sistema di prodotto;
- La valutazione dei potenziali impatti ambientali associati a ciò che entra e a ciò che esce;
- L'interpretazione dei risultati riguardanti le fasi di analisi di inventario e di stima degli impatti, in relazione agli obiettivi dello studio.

La rappresentazione grafica delle fasi della Life Cycle Assessment è mostrata in Figura 3.

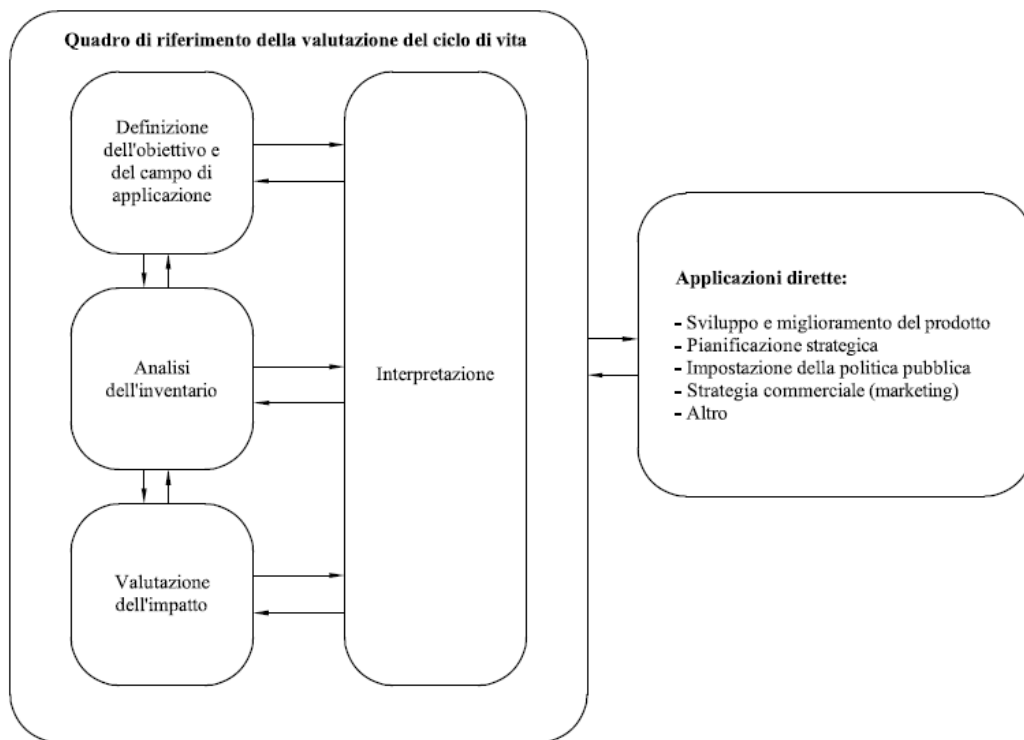


Figura 3 - Fasi di una LCA [34]

L'LCA è, quindi, una tecnica per identificare tutti gli input e gli output di un prodotto, di un processo e di un servizio, valutare i rifiuti associati, gli effetti sulla salute dell'uomo e le problematiche ecologiche ed, infine, interpretare e comunicare i risultati della valutazione.

In definitiva, la Valutazione del Ciclo di Vita si configura come uno strumento di supporto al processo decisionale per ciò che riguarda i più svariati aspetti della vita dell'uomo e della sua attività, in riferimento, in particolar modo, a quelli che possono costituire potenziale causa di impatto ambientale. Tale valutazione viene, quindi, condotta individuando nel "ciclo di vita" del prodotto tutte le attività significative svolte, dall'acquisizione delle materie prime per la produzione allo smaltimento finale, e quantificandone le potenziali conseguenze sui diversi comparti ambientali e sulla salute dell'uomo, in termini di consumo di risorse, produzione di inquinanti e, naturalmente, in termini economici [41].

5.1.1. Unità e flussi di processo

Attesa la complessità delle operazioni da svolgere e l'impossibilità di individuare un unico metodo per condurre gli studi di LCA, l'unico riferimento possibile è quello normativo, cui le organizzazioni dovrebbero conformarsi, per poi caratterizzare il sistema sulla base della specifica applicazione e dei requisiti dell'utilizzatore.

La valutazione del ciclo di vita deve, necessariamente, articolarsi nelle quattro fasi successive:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio;
- Analisi dell'inventario;
- Valutazione dell'impatto;
- Interpretazione dei risultati.

Elemento di base per l'applicazione di tale procedura è la caratterizzazione delle componenti fondamentali oggetto della valutazione: le unità di processo e il sistema di prodotto.

Il primo passo per l'applicazione del procedimento di Valutazione del Ciclo di Vita è, infatti, la rappresentazione del processo da analizzare, attraverso un diagramma di flusso che, in maniera sequenziale ed interconnessa, colleghi tra loro i successivi step del ciclo di vita di un prodotto, tramite flussi di materia e di energia in ingresso e in uscita e ci consenta di definire ed identificare, attraverso ciascun blocco, la natura e la tipologia dei processi che hanno significatività ai fini dello studio [42].

Un sistema di prodotto è un insieme di unità di processo interconnesse da flussi di prodotti intermedi, che rappresentano una o più funzioni definite. La descrizione di un sistema di prodotto, rappresentata in Figura 4, comprende le unità di processo, i flussi elementari e i flussi di prodotti che oltrepassano i confini del sistema, sia in ingresso che in uscita, nonché i flussi dei prodotti intermedi dentro il sistema.

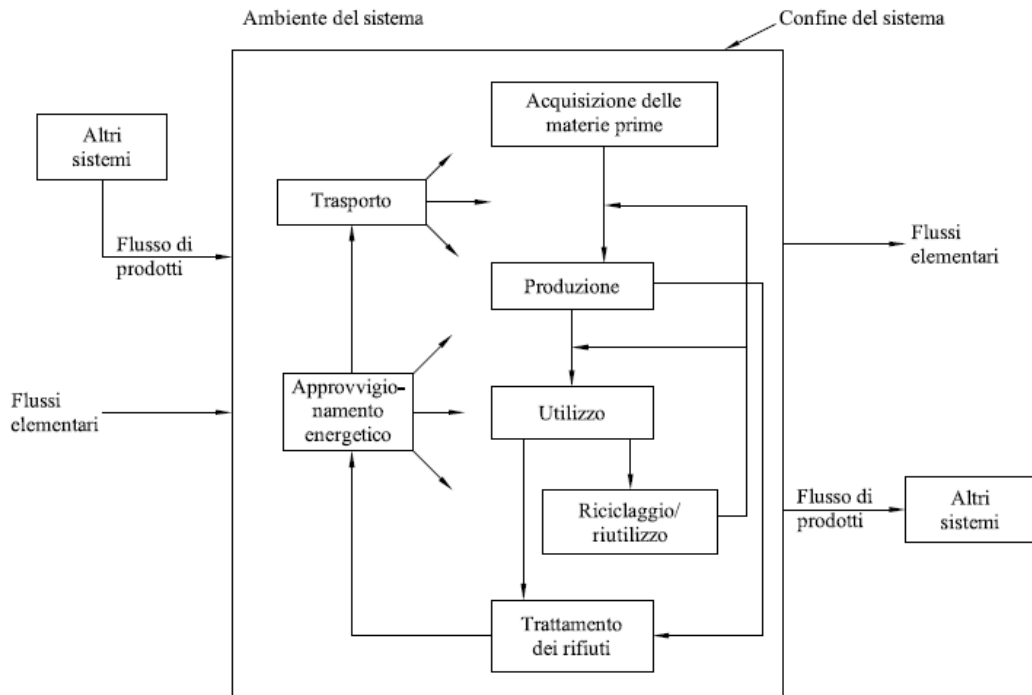


Figura 4 - Esempio di sistema di prodotto ai fini dell'analisi di inventario del ciclo di vita [34]

I sistemi di prodotti si suddividono in una serie di unità di processo. Le unità di processo sono collegate fra loro da flussi di prodotti intermedi e da rifiuti da trattare e sono collegate con altri sistemi di prodotti e con l'ambiente da flussi elementari [34]. Quanto detto è mostrato in Figura 5.

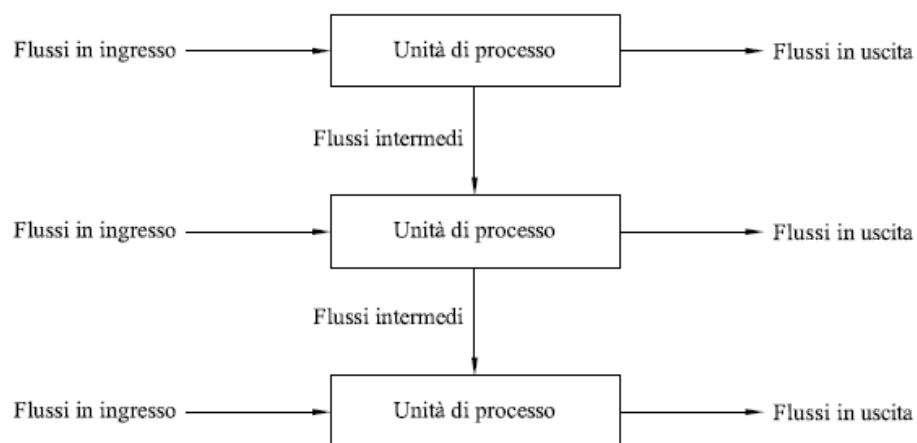


Figura 5 - Esempio di determinate unità di processo all'interno di un sistema di prodotti [34]

Un esempio di un'unità di processo può essere la fusione dell'alluminio, nell'ambito di un sistema più complesso per la produzione di utensili, presentato in Figura 6.

L'unità di processo trasforma le materie prime o i materiali intermedi in input in un prodotto semilavorato in output, attraverso il consumo di materiali ausiliari ed energia, contribuendo al rilascio di eventuali inquinanti nell'ambiente [43].

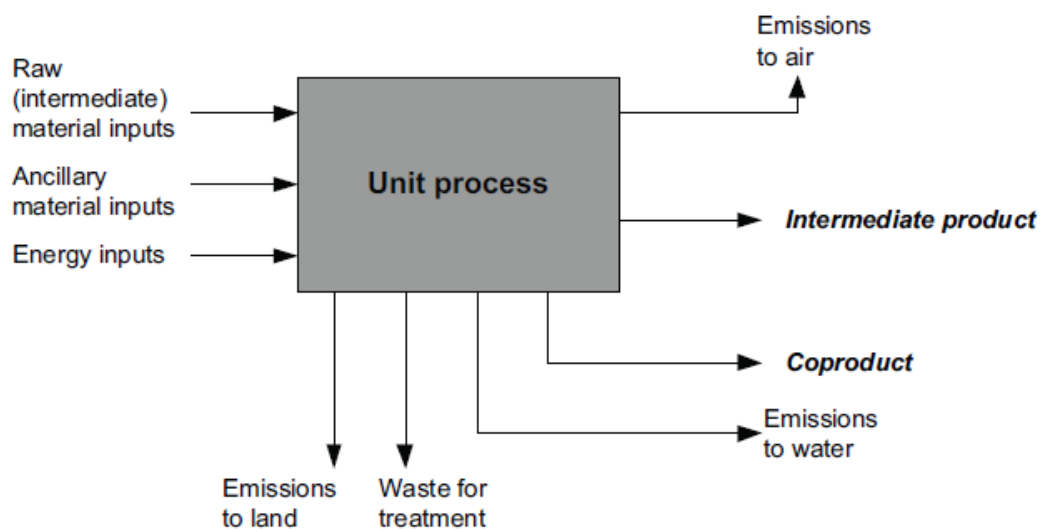


Figura 6 - Esempio di una unità di processo [43]

E' evidente, quindi, la necessità di caratterizzare il momento in cui le singole unità di processo hanno inizio, per ciò che riguarda il ricevimento di materie prime o dei prodotti intermedi, le tipologie di trasformazioni che avvengono all'interno e, infine, il momento in cui le unità di processo terminano, ovvero la destinazione dei prodotti intermedi e finali [41].

5.1.2. Unità funzionale

Ai fini della caratterizzazione del sistema di prodotto, oggetto di analisi fondamentale è la definizione della funzione, dell'unità funzionale e del relativo flusso di riferimento.

Le funzioni individuano le caratteristiche prestazionali del sistema, ovvero le finalità del sistema, scelte in relazione agli obiettivi dello studio, mentre l'unità funzionale definisce la quantificazione delle funzioni identificate e, quindi, una misura delle prestazioni del flusso in uscita dal sistema di prodotto; l'obiettivo è quello di fornire un riferimento chiaro e misurabile rispetto al quale i dati in ingresso e in uscita vengono normalizzati. Il flusso di riferimento, infine, non è altro che il prodotto necessario per soddisfare la funzione [34].

Un esempio può aiutare a chiarire meglio questi concetti di fondamentale importanza. Una volta caratterizzata la funzione rilevante del sistema di processo, ovvero le finalità per le quali vengono compiute, in maniera sequenziale, tutte le attività oggetto di analisi, si pone il problema di definire l'unità funzionale, il cui obiettivo è quello di quantificare in termini numerici il servizio offerto dal sistema di prodotto.

Se si prende in considerazione, per esempio, quale prodotto la pittura per pareti ai fini del tinteggiatura delle stesse, l'unità funzionale può essere espressa come i metri quadri di parete da colorare con determinate condizioni di opacità, di resistenza e durata nel tempo.

Una volta definita l'unità funzionale, il passo successivo è quello di determinare la quantità di prodotto necessaria a soddisfare la funzione quantificata tramite l'unità funzionale. Questa quantità viene definita flusso di riferimento ed evidentemente è relativa alle caratteristiche di performance del prodotto, tipicamente determinate come risultato di metodi di misura standardizzati. Ritornando all'esempio della pittura per pareti, il flusso di riferimento può essere espresso in termini di litri necessari per coprire la superficie fissata dall'unità funzionale [43].

Le operazioni descritte, per quanto riguarda la scelta della funzione, dell'unità funzionale e del flusso di riferimento, assumono notevole importanza nell'ambito di studi di valutazione del ciclo di vita volti al confronto tra due o più sistemi di processo. È evidente, infatti, come il confronto tra due sistemi deve essere fatto sulla base delle stesse funzioni, unità funzionali e flussi di riferimento. In caso contrario per eliminare le differenze è possibile modificare i confini del sistema oppure adottare procedimenti di allocazione [34].

5.2. *Obiettivo e campo di applicazione*

Il primo fondamentale passo per l'applicazione della Valutazione del Ciclo di Vita è quello di definire l'obiettivo dello studio e il relativo campo di applicazione. Evidentemente, definire l'obiettivo dello studio significa identificare, senza alcuna ambiguità, le ragioni per cui tale studio viene realizzato, i dati di output che si vogliono ottenere e i soggetti a cui lo studio deve essere rivolto, ovvero a cui devono essere comunicati i relativi risultati.

Più complessa è la definizione del campo di applicazione; si tratta, in particolare, di un processo di tipo iterativo che, tramite l'acquisizione di un numero di dati e di informazioni sempre crescenti sul sistema allo studio, consente di identificare l'ambito da analizzare in funzione degli obiettivi da perseguire [41-42].

Definire il campo di applicazione significa, quindi, tracciare i confini entro i quali effettuare l'analisi e caratterizzare le unità di processo da includere nel sistema. Tale operazione deve essere condotta in modo tale che i flussi in ingresso e in uscita dal sistema siano flussi elementari, ovvero flussi di materia e di energia prelevati o scaricati nell'ambiente circostante senza alcuna trasformazione operata dall'uomo [34].

La caratterizzazione del campo di applicazione è, quindi, funzione dell'obiettivo dell'analisi, che definisce in particolare la tipologia di dati da inserire e il livello di dettaglio della trattazione. E' evidente, quindi, l'importanza fondamentale che tale fase assume nel contesto della valutazione, in quanto ci consente di definire i confini del sistema oggetto di analisi, le ipotesi e le limitazioni alla base della trattazione, la tipologia dei dati di input e le relative procedure di attribuzione.

Rappresentando il processo come diagramma di flusso, è evidente la necessità di caratterizzarne ogni passaggio fondamentale, secondo gli obiettivi dello studio, focalizzando l'attenzione sugli aspetti che, più degli altri, concorrono in maniera significativa alla definizione degli impatti.

In definitiva, quindi, la determinazione dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio rappresenta l'elemento di base per il successivo sviluppo dell'analisi, in quanto consente, da un lato, di individuare le

linee guida e i “paletti” rispetto ai quali sviluppare la valutazione, e dall’altro di definire le categorie di dati da prendere in considerazione e che saranno oggetto della successiva fase di calcolo e di valutazione [41-42].

5.2.1. Raccolta dei dati in ingresso

I dati di input sono elementi fondamentali dello studio, e la determinazione dei criteri di scelta e del loro livello di qualità è alla base di una corretta valutazione. In particolare, i dati si suddividono in diverse categorie:

- Energia, materie prime, materiali ausiliari o altre entità fisiche in ingresso
- Prodotti;
- Emissioni nell’aria, nelle acque, nel suolo, altri aspetti ambientali.

La raccolta dei dati è una procedura di tipo iterativa che, a partire da una prima indagine sulla disponibilità iniziale, conduce ad acquisire sempre più informazioni, man mano che si approfondisce la conoscenza del sistema allo studio [35].

Una soluzione per tale procedimento potrebbe essere quella di raccogliere le informazioni necessarie iniziali tramite la somministrazione di un dettagliato questionario alle amministrazioni, alle imprese, alle industrie, a cui aggiungere contatti telefonici e visite, presso le compagnie, per l’acquisizione dei dati più importanti [43]. Questi dati possono essere misurati, calcolati e stimati, ma in ogni caso fondamentale è la definizione del loro livello di qualità, che, evidentemente, va a condizionare in maniera significativa l’attendibilità dei risultati finali e, quindi, il soddisfacimento degli obiettivi dello studio.

I dati utilizzati, infatti, possono avere diverse origini, sia spaziali che temporali, e la loro corretta definizione è importante per individuare l’affidabilità dei risultati e la relativa corrispondenza alla situazione reale.

In particolare, i requisiti di qualità dei dati dovrebbero includere i parametri [34]:

- Fattori temporali: l'anzianità desiderata dei dati, per esempio entro gli ultimi cinque anni, e la minima estensione di tempo, per esempio un anno, rispetto alla quale i dati dovrebbero essere raccolti;
- Geografia: la zona geografica nella quale dovrebbero essere raccolti i dati relativi alle unità di processo, per soddisfare l'obiettivo dello studio, per esempio locale, regionale, nazionale, continentale, globale;
- Tecnologia: combinazione di tecnologie, per esempio media ponderata delle combinazioni di processi operanti, miglior tecnologia disponibile, oppure unità operativa più sfavorevole.

A tali requisiti devono essere aggiunte altre informazioni significative, ovvero le modalità e i tempi di misura, i soggetti responsabili ed, infine, i risultati delle procedure di validazione condotte [43].

Nella pratica applicazione, l'operazione da compiere è la definizione dei flussi in ingresso da studiare, che devono essere scelti sulla base di tre criteri fondamentali:

- Massa: si includono nello studio tutti i flussi in ingresso che, cumulativamente, contribuiscono secondo una determinata percentuale al flusso complessivo di massa in ingresso nel sistema;
- Energia: si includono nello studio tutti i flussi in ingresso che, cumulativamente, contribuiscono secondo una determinata percentuale al flusso complessivo di energia in ingresso nel sistema;
- Rilevanza ambientale: si includono nello studio tutti i flussi in ingresso che contribuiscono, secondo una determinata percentuale, alla quantità stimata di ciascuna categoria di dati del sistema di prodotto.

È evidente, infatti, che individuare i flussi in ingresso considerando solo ed esclusivamente il criterio della massa, potrebbe portare a trascurare dati che, invece, assumono notevole importanza sul risultato finale e, quindi, hanno notevoli impatti sull'ambiente. In ogni caso, indipendentemente dai criteri di scelta adottati, i dati devono necessariamente soddisfare alcuni requisiti di qualità, il cui grado di approfondimento, naturalmente, dipende dagli obiettivi e dal campo di applicazione dello studio. Notevole importanza assume, infatti, la precisione e la completezza.

za, nonché la rappresentatività e la riproducibilità dei dati a disposizione, chiaramente certificati [35].

5.3. *Analisi dell'inventario (LCI)*

La fase di analisi dell'inventario, nell'ambito della Valutazione del Ciclo di Vita, si caratterizza come il procedimento di calcolo di tutti i dati precedentemente identificati, per la quantificazione dei flussi in ingresso e in uscita dal sistema di prodotto, nonché dei flussi intermedi tra le unità di processo, attraverso un procedimento iterativo che, tramite l'acquisizione di un numero sempre crescente di dati, determina cambiamenti nelle procedure di calcolo e nella stessa definizione dei confini del sistema allo studio. Questa fase costituisce, a sua volta, la spunto per la successiva determinazione degli impatti indotti sui comparti ambientali e sulla salute dell'uomo [35].

Il procedimento iterativo può essere rappresentato come in Figura 7.

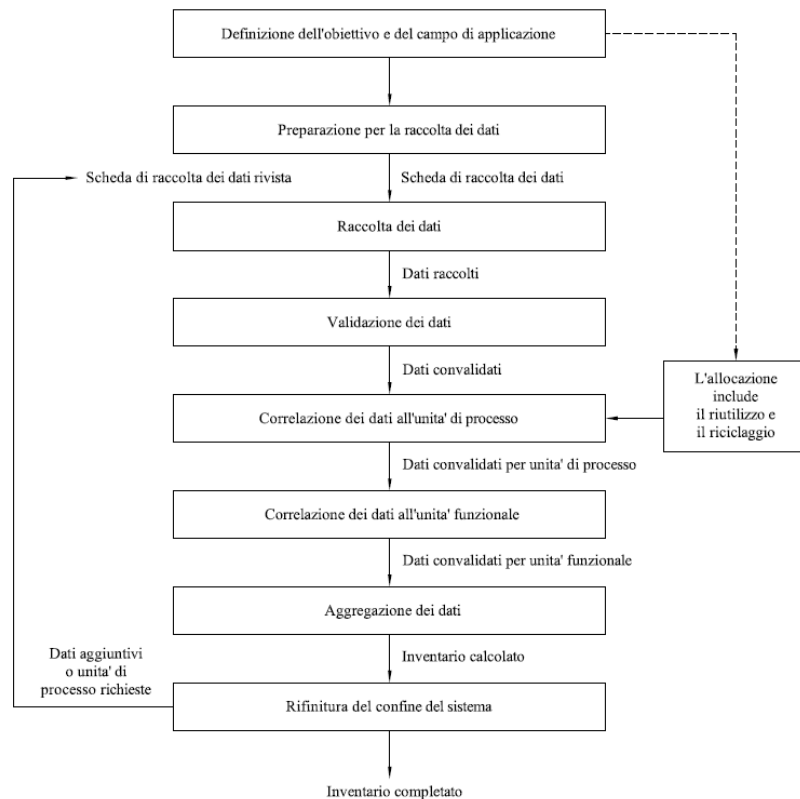


Figura 7 - Procedimento semplificato per un'analisi di inventario [35]

Le prime due fasi della procedura di analisi d'inventario si riferiscono, ancora una volta, alla raccolta dei dati necessari, rivelando, quindi, l'importanza fondamentale che questa fase assume nell'ambito della trattazione; in particolare, ai fini della corretta raccolta di tutte le informazioni necessarie per la comprensione del sistema di prodotto, la normativa impone la necessità di provvedere ad una rappresentazione del processo, attraverso un appropriato diagramma di flusso, con una dettagliata descrizione delle funzioni svolte da ciascuna unità di processo e delle categorie di dati ad essa associate.

In particolare, per quanto riguarda i dati raccolti e le relative unità di misura, notevole importanza assume la chiara descrizione delle tecniche di raccolta e di misura, nonché la definizione delle fonti da cui eventualmente questi dati sono stati recuperati, al fine di garantire la ripetitività dell'operazione di valutazione e la corrispondenza dei risultati finali al contesto di applicazione dello studio.

Successivamente ha inizio il procedimento di calcolo vero e proprio. La prima operazione consiste in una verifica dei dati, attraverso bilanci di massa e di energia relativi a ciascuna unità di processo, al fine della individuazione di eventuali anomalie.

Tutti i dati a disposizione devono essere calcolati, in relazione ad un predefinito flusso di riferimento, e normalizzati rispetto all'unità funzionale, in modo tale da avere grandezze comparabili tra loro.

Come conseguenza della natura iterativa del processo, infine, i dati così ottenuti vengono usati in un'analisi di sensibilità, per valutarne l'importanza e il relativo peso sul risultato finale, ma anche, eventualmente, per modificare i confini del sistema, escludendo unità di processo o flussi in ingresso e in uscita che si siano rivelati poco significativi, ovvero includendo quelle unità e quei flussi che, invece, hanno mostrato di avere elevata incidenza sul risultato finale.

In definitiva, quindi, l'analisi di inventario ha come obiettivo la connessione nelle unità di processo dei flussi elementari di materia e di energia con i relativi prodotti, sottoprodotti e rifiuti, al fine di costruire un diagramma di flusso rappresentativo del reale ciclo di vita del prodotto [35].

5.3.1. Il problema dell'allocazione

In generale pochi processi industriali hanno un singolo prodotto in uscita, ma ciascun processo si compone di diversi sottoprodotti e ricicla i prodotti intermedi o di scarto per utilizzarli come materie prime; si pone, a questo punto, la necessità di associare ai diversi prodotti in uscita i flussi in ingresso, attraverso il processo dell'allocazione [35].

L'allocazione è un procedimento attraverso il quale i flussi di materia e di energia in ingresso in un'unità di processo vengono ripartiti tra i diversi prodotti in uscita, in maniera tale da attribuire a ciascuno di loro le rispettive aliquote di risorse impiegate e di inquinanti emessi, ovvero caratterizzare il contributo fornito da ciascuna sottoattività agli impatti ambientali complessivi.

In generale, fin quando possibile, il processo di allocazione deve essere evitato, andando a scomporre la singola unità di processo in sottounità e determinando per ciascuna di esse i flussi in ingresso e in uscita, ovvero estendendo i confini del sistema di prodotto, per includere funzioni aggiuntive relative ai sottoprodotti.

In particolare, il procedimento di espansione dei confini del sistema, per confrontare processi con output differenti, consiste nell'includere altre attività o sottoattività in aggiunta a quelle già considerate [41-42].

Un esempio può essere dato dai processi di trattamento e smaltimento dei materiali in plastica. Una soluzione potrebbe essere quella di provvedere al riciclaggio con conseguente produzione di un film plastico, mentre una seconda alternativa potrebbe essere rappresentata dal recupero di energia tramite termovalorizzazione del rifiuto. La Figura 8 mostra i diagrammi di flusso dei due procedimenti.

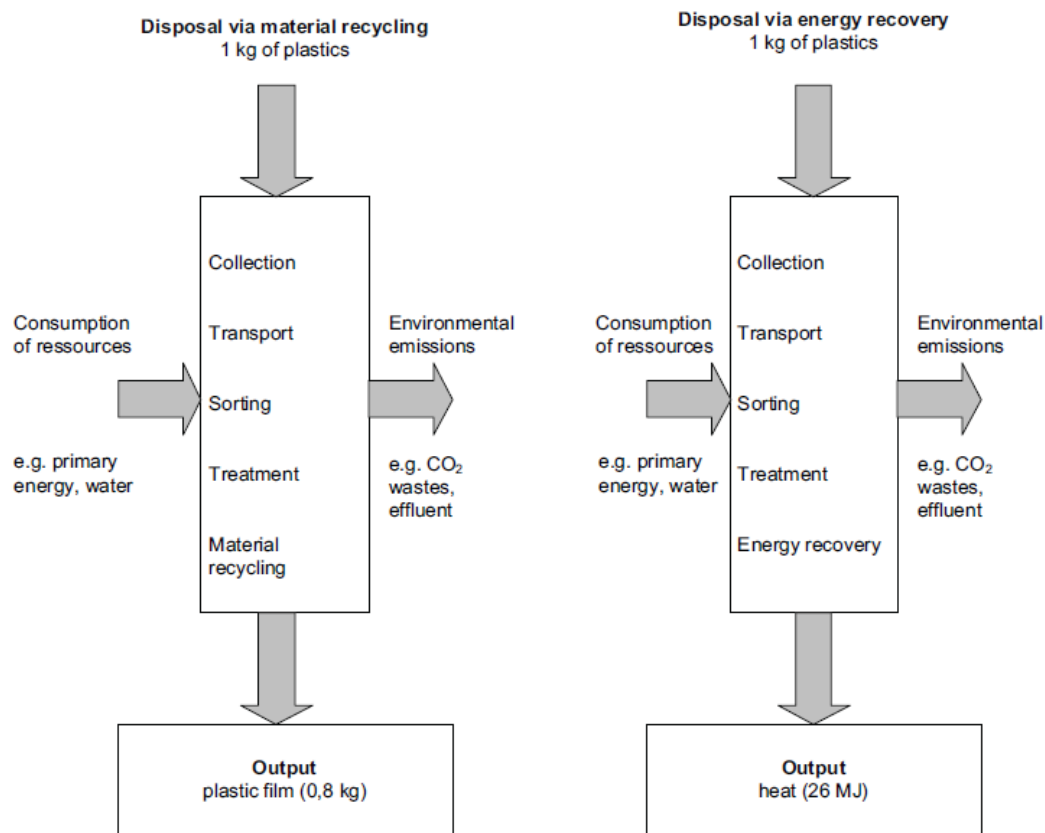


Figura 8 - Esempio del riciclaggio di materia e del recupero di energia [43]

È evidente come in questo caso l'output dei due sistemi è completamente diverso, quindi, si pone la necessità di allargare i confini dei due sistemi, in maniera tale da includere nel primo un processo equivalente per la generazione di 26 MJ di energia e nel secondo un processo per la produzione di 0.8 kg di film plastico.

In questo modo le due opzioni generano lo stesso ammontare di prodotto finale e, quindi, il consumo di risorse e le emissioni nell'ambiente possono essere confrontate [43].

Allorquando tale operazione risulta impossibile è necessario sviluppare il processo di allocazione, attribuendo i flussi in ingresso a ciascun sottoprodotto, tenendo conto delle relazioni fisiche e del modo in cui i flussi in ingresso si trasformano, in maniera quantitativa, nei flussi in uscita.

Quando tali relazioni non sono in grado di risolvere il problema se ne prendono in considerazione anche altre, come ad esempio relazioni di carattere economico.

In questo ambito è possibile considerare il caso relativo al consumo di risorse per il trasporto di un generico prodotto imballato. Si può immaginare che il consumo di carburante sia legato al carico presente nel mezzo di trasporto attraverso una relazione lineare. Una parte di carburante, tuttavia, viene consumata per il trasporto del prodotto, mentre la rimanente per il trasporto degli imballaggi, che rappresentano una determinata percentuale in peso o in volume del carico complessivo.

In questo caso l'allocazione può essere condotta tenendo conto delle caratteristiche fisiche del prodotto e, quindi, attribuendo il consumo di carburante per una fissata percentuale al prodotto in sé e per la rimanente al trasporto degli imballaggi.

L'approccio di tipo economico può essere utilizzato, invece, quando non è possibile determinare dei parametri fisici per calcolare il fattore di allocazione, ovvero quando il rapporto tra la massa del prodotto principale e quella dei diversi co-prodotti varia in un range limitato a seguito di variazioni significative dei parametri del processo. In questo caso, il fattore di allocazione viene determinato tenendo conto del rapporto tra i prezzi di mercato e, quindi, attribuendo le emissioni e gli impatti al prodotto e ai co-prodotti in funzione del loro valore di mercato [43].

5.3.2. Allocazione a ciclo chiuso e a ciclo aperto

Particolari considerazioni devono, inoltre, essere fatte per ciò che riguarda i procedimenti di allocazione per il riutilizzo e il riciclaggio.

Tali attività, infatti, possono portare a situazioni particolari, perché cambiano le proprietà fisiche dei materiali, in vista di un utilizzo successivo ed inoltre, i flussi in uscita possono essere condivisi da più sistemi di prodotti.

In generale due sono i procedimenti che, in questi casi, possono essere presi in considerazione: procedimenti di allocazione a ciclo chiuso e procedimenti di allocazione a ciclo aperto.

Il procedimento di allocazione a ciclo chiuso si applica ai sistemi di prodotti a ciclo chiuso o a quelli a ciclo aperto nei quali non si abbiano cambiamenti significativi nelle proprietà del materiale riciclato; in questo caso l'allocazione per i materiali riciclati è evitata perché il materiale secondario sostituisce le materie prime.

Il procedimento di allocazione a ciclo aperto si applica nei sistemi di prodotti a ciclo aperto, ovvero quando i prodotti subiscono cambiamenti nelle loro proprietà; in questo caso i criteri di allocazione presi in considerazione sono nell'ordine [35]:

- Le proprietà fisiche;
- Il valore economico;
- Il numero dei successivi utilizzi del materiale riciclato.

Un tipico esempio di sistema di prodotto a ciclo chiuso è quello relativo alla produzione di HFC-134a, a partire dall'etilene, utilizzato come materiale refrigerante. Nell'ambito del processo, infatti, una porzione di etilene, pari a 0.05 unità, non reagisce e conseguentemente può essere riciclata a monte.

In questo caso viene applicato il sistema di allocazione a ciclo chiuso, eventualmente allargando i confini del sistema ed includendovi un processo di lavaggio dell'etilene, per garantire un livello di qualità pari a quello del materiale vergine.

La quantità di etilene in output, infatti, va a sostituire parte dell'etilene in input, determinandone un consumo netto di 0.95 unità, così come mostrato nella Figura 9.

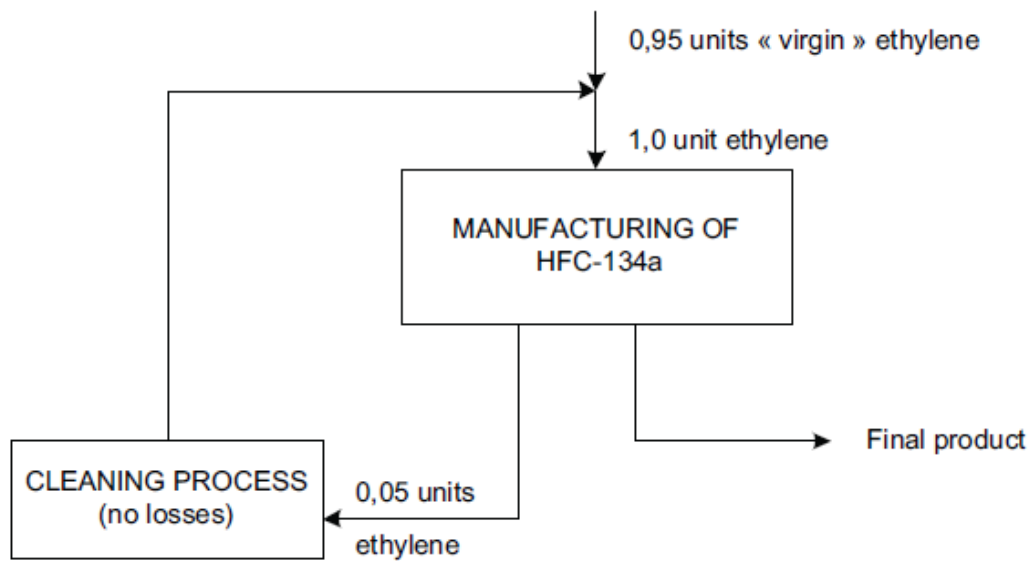


Figura 9 - Diagramma di flusso per l'esempio di riciclaggio a ciclo chiuso [43]

Lo stesso procedimento di allocazione a ciclo chiuso può essere applicato anche al caso di sistemi di prodotto a ciclo aperto, nei quali i materiali riciclati non subiscono modifiche o alterazioni delle loro caratteristiche fisiche.

L'esempio è, in questo caso, dato dal ciclo di vita di un imballaggio in alluminio che, a sua volta, genera in output una determinata quantità di alluminio, che può essere riciclata.

Per risolvere il problema dell'allocazione si può optare per un allargamento dei confini del sistema e, quindi, valutare le conseguenze indotte dall'uso dell'alluminio riciclato per altri scopi.

Il trattamento dell'alluminio riciclato genera impatti ambientali addizionali, ma, al tempo stesso, il suo riutilizzo consente di ridurre il consumo del materiale vergine, con i conseguenti benefici. La differenza tra gli effetti rappresenta il beneficio ottenuto dal sottoprodotto [43]. Quanto detto viene presentato in Figura 10.

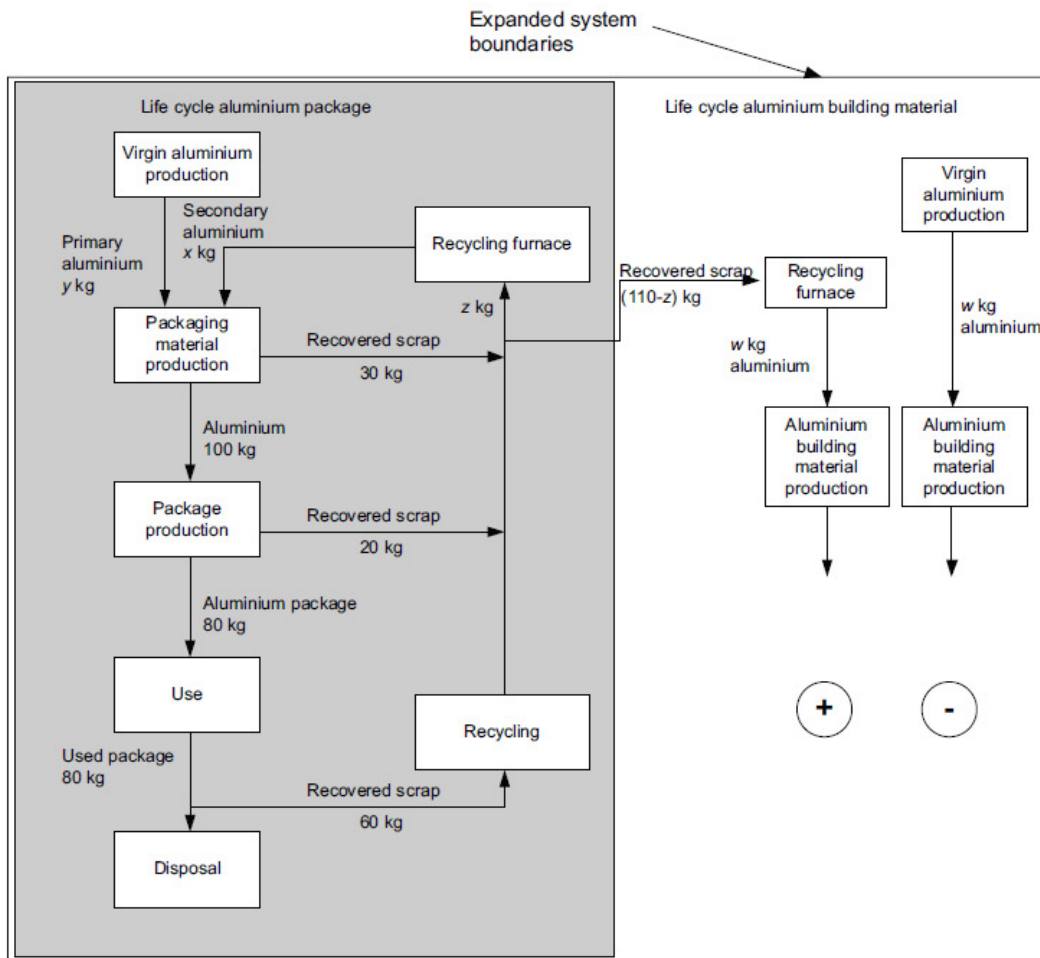


Figura 10 - Processo di allocazione a ciclo chiuso per un sistema a ciclo aperto [43]

5.3.3. Analisi di sensibilità

I risultati ottenuti attraverso l'analisi di inventario devono, successivamente, essere oggetto di una fase di interpretazione. Questa operazione dà l'opportunità di verificare la validità delle attività condotte, in relazione all'obiettivo dello studio e al campo di applicazione.

In particolare, l'interpretazione dei risultati deve comprendere una valutazione della qualità dei dati, delle scelte metodologiche e delle analisi di sensibilità dei flussi in ingresso e in uscita, in maniera tale da valutare l'incertezza dei risultati [35].

A tal fine, un valido aiuto potrebbe arrivare dall'uso di metodologie e procedimenti statistici, che consentirebbero di spiegare meglio le conclusioni della valutazione. In particolare, la procedura più utilizzata è quella dell'analisi di sensibilità, che consente di valutare l'influenza, sul risultato finale, dovuta al cambiamento dei parametri di input o a variazioni di decisioni prese durante lo sviluppo dello studio.

È evidente, infatti, come nell'ambito delle fasi precedenti, devono essere prese delle decisioni in condizioni di incertezza, quali la scelta dell'unità funzionale, del valore dei dati, delle metodologie da seguire per ciò che riguarda, ad esempio, l'allocazione; si pone, quindi, la necessità di valutare la misura con la quale le scelte compiute hanno influenza sui risultati finali.

La procedura è, quindi, quella di variare, secondo una certa percentuale, tipicamente del 10%, i valori dei dati in ingresso ed analizzare come varia a sua volta il risultato finale dello studio [43].

5.4. *Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (LCIA)*

La fase di analisi dell'inventario del ciclo di vita ci consegna i flussi che attraversano i confini del sistema e che forniscono il punto di partenza per la valutazione dell'impatto del ciclo di vita.

La fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita consente una visione "ambientale" del sistema oggetto di studio, ossia consente di identificare e quantificare gli impatti sull'ambiente e sulla salute dell'uomo indotti dai flussi in uscita dai confini del sistema.

Tale operazione viene condotta individuando le categorie d'impatto, ovvero i fattori ambientali interessati, ed assegnando ad essi i risultati dell'LCI; tramite i modelli di caratterizzazione si definiscono gli indicatori di categoria, associati a ciascuna categoria di impatto che, a loro volta, hanno una determinata rilevanza ambientale sui punti finali di categoria, ossia sull'aspetto ambientale naturale, della salute umana o delle risorse, che rappresentano i fattori ambientali interessati [35].

5.4.1. Fasi della valutazione dell'impatto del ciclo di vita

In generale, la valutazione dell'impatto del ciclo di vita si compone di elementi obbligatori e facoltativi secondo quanto mostrato in Figura 11.

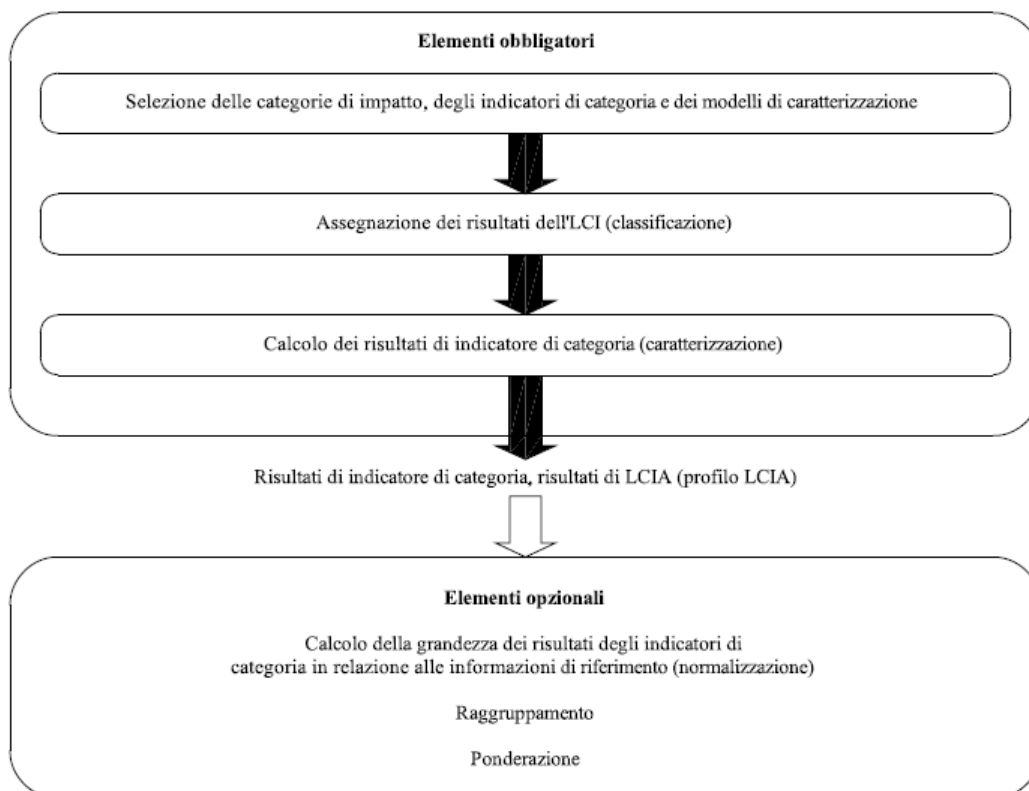


Figura 11 - Elementi della fase di LCIA [34]

Nella maggior parte degli studi di Valutazione del Ciclo di Vita si prendono in considerazione categorie di impatto, indicatori di categoria e modelli di caratterizzazione già esistenti in letteratura, ma allorquando questi non riescono a soddisfare gli obiettivi e il campo di applicazione dello studio è necessario definirne degli altri [34].

Indipendentemente dai criteri che devono essere seguiti per tale operazione, è importante andare a caratterizzare il concetto degli indicatori di categoria. Come esempio è possibile fare riferimento allo schema in Figura 12:

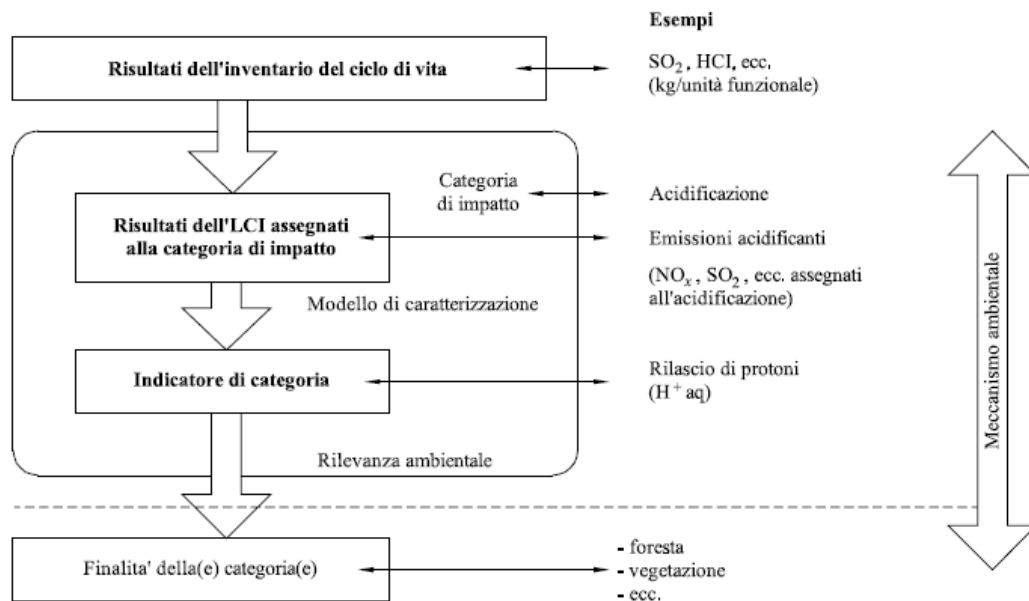


Figura 12 - Concetto degli indicatori di categoria [35]

I risultati dell'analisi d'inventario vengono assegnati a ciascuna categoria di impatto e, tramite un modello di caratterizzazione, questi risultati si trasformano in indicatori di categoria.

Il modello di caratterizzazione è utilizzato, infatti, per calcolare i fattori di caratterizzazione e, quindi, il risultato di indicatore, che fornisce la quantificazione dei flussi in uscita che hanno impatti sui diversi comparti ambientali, rappresentati dal punto finale di categoria.

Tra gli elementi obbligatori della LCIA vi è la classificazione e la caratterizzazione. In particolare, la fase di classificazione ci consente di assegnare i risultati dell'LCI alle categorie di impatto secondo i criteri definiti dalla normativa:

- L'assegnazione dei risultati dell'LCI che sono esclusivi per una sola categoria di impatto;
- L'identificazione dei risultati dell'LCI che si riferiscono a più di una categoria di impatto, comprendendo:
 - la distinzione tra meccanismi in serie;

- l'allocazione tra meccanismi in parallelo.

Negli studi che generalmente vengono condotti, le categorie di impatto più frequentemente utilizzate sono:

- Cambiamento climatico;
- Esaurimento dell'ozono atmosferico;
- Formazione di foto-ossidanti;
- Acidificazione;
- Nitrificazione;
- Tossicità umana;
- Ecotossicità;
- Esaurimento delle risorse abiotiche;
- Esaurimento delle risorse biotiche.

A queste categorie possono essere aggiunte quelle delle radiazioni, del rumore e degli odori, anche se attualmente non esistono opportuni modelli di caratterizzazione ad essi associati [44].

5.4.2. Classificazione e caratterizzazione

La classificazione provvede, quindi, ad assegnare i risultati dell'analisi di inventario alle diverse categorie di impatto, in maniera tale da individuare quali risultati ottenuti hanno effetto sulla diverse categorie.

A tal fine, notevole importanza assume la differenza tra i processi di assegnazione in serie ed i processi di assegnazione in parallelo. In particolare, nei processi in parallelo una sola sostanza determina impatto su due o più categorie e, quindi, una parte di questa ha effetti su una categoria, la restante sull'altra categoria. Un esempio potrebbe essere dato dall'emissione di SO₂ che esplica i suoi effetti su tre categorie di impatto: l'acidificazione, il cambiamento climatico e la tossicità umana. La Figura 13 presenta un esempio di processo in parallelo.

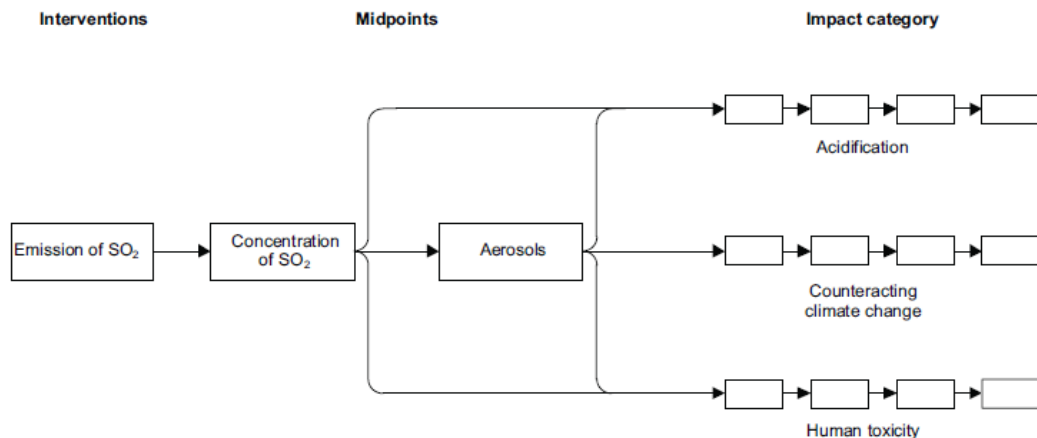


Figura 13 - Esempio di processo in parallelo [44]

Il processo di assegnazione in serie, invece, può essere illustrato considerando l'emissione di clorofluorocarburi.

Nei processi in serie la sostanza contribuisce all'impatto indotto su diverse categorie ma non contemporaneamente e, quindi, non vi è alcuna necessità di un processo di allocazione.

Nel caso in esame, i CFC determinano effetti sul cambiamento climatico e sulla concentrazione di ozono stratosferico, come mostrato nella Figura 14 [44].

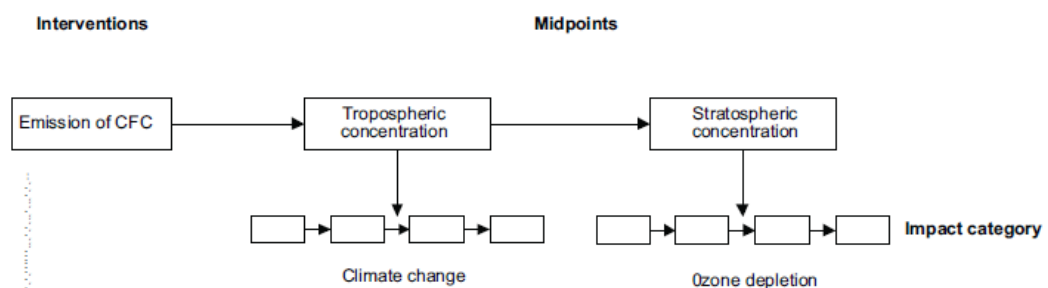


Figura 14 - Esempio di processo in serie [44]

La fase di caratterizzazione, invece, consente di trasformare i risultati dell'analisi d'inventario del ciclo di vita in unità di misura comuni e di aggregarli a ciascuna categoria di impatto, attraverso i fattori di caratterizzazione.

Ad esempio, un risultato dell'LCI potrebbe essere il volume di gas ad effetto serra emesso da un impianto industriale; il relativo indicatore di categoria associato potrebbe essere la potenza di radiazione infrarossa.

Attraverso un modello matematico si definisce il fattore di caratterizzazione, ovvero il potenziale di riscaldamento globale per ciascun gas ad effetto serra (kg di CO₂ equivalenti/kg di gas) e quindi i risultati dell'analisi di inventario vengono tutti riconvertiti in un risultato di indicatore, ovvero in kg di CO₂ equivalenti [44].

Sulla base di quanto detto è evidente come il calcolo dei risultati di indicatore comprende due fasi:

- Scelta ed utilizzo dei fattori di caratterizzazione per convertire in unità di misura comuni i risultati dell'LCI;
- Aggregazione dei risultati dell'LCI nel risultato di indicatore.

5.4.3. Normalizzazione e ponderazione

In aggiunta alle fasi obbligatorie, la Valutazione dell'Impatto del Ciclo di Vita si compone anche di tre elementi facoltativi, quali la normalizzazione, il raggruppamento e la ponderazione.

In particolare, la normalizzazione è un procedimento che consente una migliore comprensione dell'entità relativa dei risultati di indicatore, perché consiste nel dividere il risultato di indicatore per un valore di riferimento prescelto, quale le emissioni totali o l'utilizzo di risorse in una data area, ovvero le emissioni totali o l'utilizzo di risorse in una data area per abitante.

Il raggruppamento è una procedura di riordino e classificazione delle categorie di impatto sulla base dell'obiettivo e del campo di applicazione dello studio.

Più in particolare, le categorie di impatto possono essere riordinate su base nominale, in relazione alle emissioni, alle risorse o su scala spaziale, oppure sulla base di una gerarchia, per esempio di priorità. È evidente come tale operazione, della quale deve essere garantita la trasparenza, può esse-

re condotta in maniera diversa da individui e società differenti e, quindi, differenti possono essere i risultati a parità di indicatori normalizzati.

Si procede, infine, alla fase di ponderazione, ovvero la trasformazione dei risultati di indicatore attraverso dei fattori numerici o di ponderazione, scelti tramite un procedimento di assegnazione di valori. Anche in questo caso l'operazione, che deve essere totalmente trasparente, può condurre a risultati differenti, in relazione alle diverse preferenze di individui e organizzazioni; in ogni caso i criteri di valutazione seguiti e le procedure di calcolo utilizzate devono essere chiaramente documentate, al fine di rendere chiara la procedura ai soggetti decisori e consentire agli utilizzatori di apprezzarne i risultati [45].

Sulla base di quanto detto, è evidente come la fase di Valutazione dell'Impatto del Ciclo di Vita dà la possibilità di caratterizzare e quantificare gli impatti ambientali di un sistema di prodotto e, quindi, soddisfare l'obiettivo principale per il quale viene sviluppata la procedura di LCA; in ogni caso, molto spesso, si pone la necessità di comprendere meglio il significato dei risultati ottenuti, al fine di eliminare le informazioni trascurabili e valutare le differenze significate tra approcci diversi; in questo caso risultano di aiuto procedimenti specifici come [35]:

- **Analisi di gravità:** metodo statistico che consente di identificare i dati che contribuiscono in maniera significativa al risultato finale, in modo tale che questi possano essere oggetto di una precisa valutazione ed assicurare che siano prese le decisioni migliori;
- **Analisi di incertezza:** metodo statistico che descrive la variabilità statistica delle serie di dati, al fine di determinare se i risultati di indicatore provenienti da una stessa categoria di impatto sono significativamente differenti gli uni dagli altri;
- **Analisi di sensibilità:** metodo statistico che misura quanto le variazioni dei valori forniti influenzino i risultati di indicatore.

5.5. *Interpretazione del ciclo di vita*

L'interpretazione del Ciclo di Vita è l'ultima fase della procedura di LCA qui descritta, nella quale i risultati dei precedenti procedimenti di LCI e

LCIA vengono riepilogati e discussi, al fine di giungere a conclusioni e raccomandazioni sulle iniziative da intraprendere, in relazione agli obiettivi dello studio e al relativo campo di applicazione [45].

L'obiettivo è, inoltre, quello di presentare in maniera chiara e trasparente i risultati dello studio effettuato, in modo tale da fornire un valido strumento di consultazione ai soggetti decisori e al pubblico cui eventualmente tali informazioni sono destinate. A tal fine la fase di Interpretazione del Ciclo di Vita comprende tre stadi successivi:

- Identificazione dei fattori significativi sulla base dei risultati delle fasi LCI o LCIA dell'LCA;
- Valutazione, comprensiva dei controlli di completezza, sensibilità e coerenza;
- Conclusioni, raccomandazioni e redazione di un rapporto.

La fase di identificazione dei fattori significativi si pone come obiettivo la caratterizzazione dei metodi utilizzati, delle assunzioni, delle ipotesi sulla base delle quali è stato sviluppato lo studio, quali ad esempio le regole di allocazione, le decisioni di esclusione, la scelta delle categorie di impatto, degli indicatori di categoria e dei modelli.

In particolare, le informazioni da acquisire devono riguardare innanzitutto i risultati delle fasi precedenti, rappresentati attraverso grafici, tabelle, prospetti, in maniera tale da avere un quadro complessivo dei dati a disposizione.

Tale fase di descrizione deve interessare anche le scelte metodologiche compiute che, in qualche modo, possono condizionare in maniera determinante l'esito dello studio, così come le scelte dei valori adottati, come determinato dalla definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione ed, infine, le informazioni sul ruolo e le responsabilità delle diverse parti interessate [35].

Una volta raccolti i risultati a disposizione, se questi soddisfano le esigenze dello studio, si pone la necessità di determinarne la significatività; in particolare la normativa non fornisce specifiche indicazioni a tal riguardo, ma sono disponibili diversi approcci o metodi che consentono, comunque,

di evidenziare come la significatività di un risultato non possa essere espressa in termini assoluti, ma relativi al contesto specifico del sistema di prodotto allo studio.

La fase di valutazione, invece, si pone come obiettivo la definizione e il miglioramento dell'affidabilità e dell'attendibilità dei risultati; tale operazione viene condotta attraverso tre fasi successive:

- Controllo di completezza;
- Controllo di sensibilità;
- Controllo di coerenza.

Il controllo di completezza è volto ad assicurare che tutte le informazioni e i dati necessari all'interpretazione siano disponibili e completi. Nel caso in cui il dato eventualmente mancante non è indispensabile per soddisfare l'obiettivo dello studio è possibile procedere alla valutazione, in caso contrario le fasi di LCI e LCIA devono essere riesaminate o si deve variare l'obiettivo dell'analisi.

Il controllo di sensibilità, invece, si pone come obiettivo quello di valutare l'attendibilità dei risultati finali, determinando se sono influenzati dalle incertezze nei dati, dai metodi di allocazione o dal calcolo dei risultati degli indicatori di categoria.

Il controllo di coerenza, infine, va a valutare se le ipotesi, i metodi e i dati sono coerenti con l'obiettivo e il campo di applicazione dello studio. A tal fine la normativa specifica le informazioni da fornire e le domande a cui è lecito dare una risposta, ossia in generale la coerenza con la quale devono essere condotte tutte le operazioni di analisi.

La fase di interpretazione del ciclo di vita si chiude con le conclusioni e le raccomandazioni.

In generale, l'obiettivo in questa fase è quello di analizzare i risultati dello studio e trarre delle conclusioni.

Dove appropriato, in base all'obiettivo e al campo di applicazione, è possibile fornire anche delle raccomandazioni, al fine di agevolare il processo

decisionale e condurre i soggetti interessati a compiere le migliori scelte possibili [35].

6. LCA del pannello di lana di legno e cemento

Il legno è fra i più importanti materiali rinnovabili, il maggiore in ambito edilizio e possiede un potere calorifico superiore tale da considerarlo una risorsa energetica che si rigenera [46]. Come materiale, il legno è una delle risorse più utilizzate per le sue notevoli proprietà, cioè elevata resistenza, basso peso specifico, buone proprietà di isolamento diffusione e disponibilità [47]. A causa di una vasta gamma di applicazioni potenziali, il legno è spesso in concorrenza con altri materiali come il cemento, acciaio o plastica [48-49]. Tuttavia, questo materiale viene utilizzato non solo come materia prima per la produzione di diversi prodotti, ma anche come combustibile. La biomassa da legno rappresenta il 14% di energia in tutto il mondo e il suo consumo è in continua crescita. La domanda di biomassa per energia aumenta, in parte, anche per adempiere agli obiettivi degli impegni nazionali nel quadro del protocollo di Kyoto [50-51].

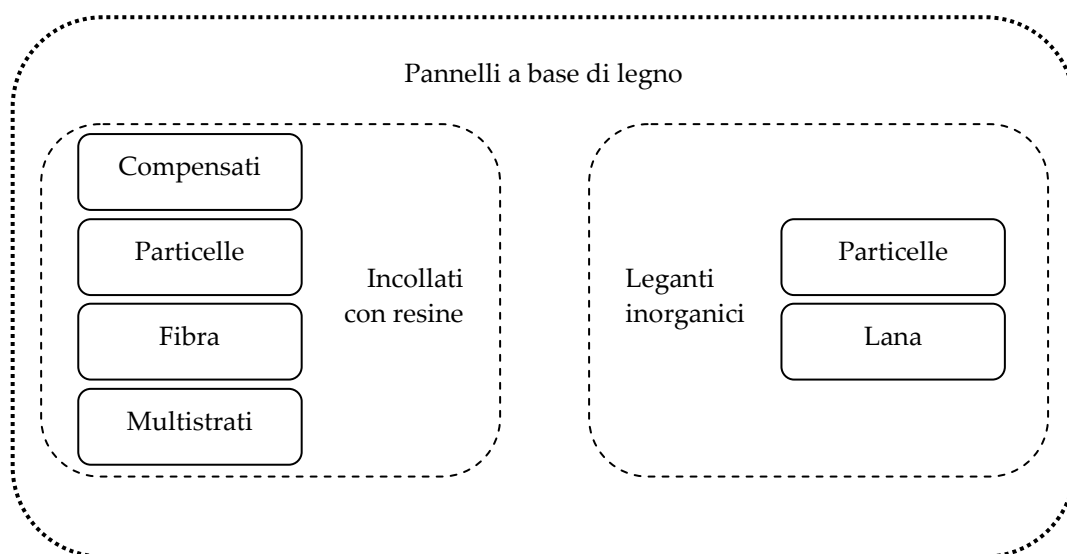


Figura 15 - Categorie dei pannelli a base di legno

Il mercato dei pannelli a base di legno in seno all'Unione europea, malgrado il ristagno economico, è rimasto sostenuto ed è risultato migliore rispetto ad altri settori primari, questo è confermato dal maggiore incremento nel consumo e dall'aumento dei prezzi [50]. La ripartizione principale dei pannelli a base di legno è presentato in Figura 15. Si distinguono pannelli a base di legno che fanno uso di adesivi e quelli con leganti

inorganici. Il consumo dei pannelli a base di legno è destinato principalmente all'impiego nel settore dell'arredamento, oltre a quello dell'edilizia e dell'imballaggio. Solo una piccola parte di questi consumi è coperto dai pannelli con leganti inorganici, che coprono quasi esclusivamente il settore dell'edilizia. In Europa il consumo è superiore agli 11 milioni di m³, di questi i pannelli di particelle ne coprono più della metà.

La gestione corretta delle risorse a base di legno è un'azione chiave per ottimizzare l'uso delle risorse e per ridurre l'impatto ambientale associato alle attività antropiche. In questo senso il metodo della Life Cycle Assessment ha dimostrato di essere uno strumento valido per porre in evidenza ed analizzare gli impatti ambientali del sistema dei prodotti e dei servizi che necessitano di un processo decisionale rivolto alla sostenibilità ambientale [52]. Tuttavia, non è possibile determinare le cause specifiche dei maggiori carichi ambientali in un ciclo di vita, fin quando non sono state valutate tutte le fasi e finché la qualità dei dati utilizzati è stata completamente verificata. Tutti i prodotti a base di legno devono essere analizzati tenendo conto della duplice natura del legno, che è usato comunemente come materiale o come energia rinnovabile. In linea di principio, l'allocazione dovrebbe essere evitata per non espandere oltre i confini del sistema e per non aggiungere altri oneri all'unità funzionale [53-54].

L'applicazione della metodologia LCA ha cominciato ad assumere una significatività di rilievo in letteratura a partire dagli ultimi venti anni, in questo periodo sono stati compiuti molti studi anche nel settore delle lavorazioni forestali e dei prodotti a base di legno [55-57]. Fino a pochi anni fa erano disponibili, però, degli studi di LCA riguardanti i pannelli a base di legno, con inventari dei cicli di vita (LCI) parziali. Solo di recente sono comparsi in letteratura degli inventari riguardanti il processo produttivo dei pannelli di particelle e di MDF, completi e molto esaustivi [58,34]. Manca invece uno studio di LCA sui pannelli a base di legno con leganti inorganici. Un solo riferimento è disponibile per la produzione di pannelli di particelle di legno e cemento, fornito dal database Ecoinvent [59]. Anche per questo studio non è disponibile l'inventario. Infine vi è una dichiarazione ambientale di prodotto dei pannelli in lana di legno denominato Heraklith [60].

6.1. *Obiettivo e campo di applicazione*

Questo lavoro mira ad esplicitare un inventario del ciclo di vita completo (LCI) per la fabbricazione dei pannelli di lana di legno e cemento, Figura 16. Inoltre è stata analizzata l'influenza di alcuni fattori con una forte dipendenza dell'approvvigionamento del materiale legnoso, della produzione dell'energia elettrica, e degli scenari di smaltimento.

L'azienda Celenit in cui è stato studiato il processo in dettaglio è sita in provincia di Padova. I dati di inventario globali si riferiscono a una produzione di poco più di 73 milioni di kg all'anno che corrispondono all'incirca a 90.000 m³ e sono stati raccolti per un periodo di due anni solari: 2010-2011. È stato scelto un periodo di tempo maggiore di un anno al fine di considerare nei calcoli anche quelle situazione che potrebbero comportare importanti implicazioni ambientali, ma che si manifestano con frequenze inferiori di una volta all'anno.



Figura 16 - Pannello di lana di legno e cemento WWCB

L'unità funzionale scelta è quella di 1 kg di pannello di lana di legno e cemento finito. Questa unità di misura consente una migliore comparazione con altri materiali isolanti. L'unità funzionale [34] fornisce il riferimento al quale tutti i flussi di materia ed energia in entrata e in uscita

vengono rapportati. Essa definisce la quantificazione delle funzioni identificate e l'obiettivo della sua caratterizzazione è quello di fornire un riferimento matematico al quale i dati in ingresso e in uscita devono essere normalizzati.

Nel caso oggetto di studio si producono pannelli con diversi spessori a cui corrispondono diversi valori di massa volumica. Infatti la densità del materiale varia in funzione dello spessore. I pannelli più sottili presentano una massa volumica maggiore di 500 kg/m³ mentre i più spessi sono intorno a 350 kg/m³ a causa di una maggiore quantità di spazi vuoti nella parte centrale, come illustrato nella Tabella 4.

Tabella 4 – Caratteristiche dei pannelli WWCB in funzione dello spessore

Spessore mm	Resistenza termica m ² K/W	Conducibilità Termica W/mK	Massa superficiale kg/m ²	Massa volumica kg/m ³
15	0,20	0,075	8	533
20	0,30	0,067	10	500
25	0,35	0,071	11,5	460
30	0,45	0,067	13	433
35	0,50	0,070	14	400
40	0,60	0,067	16	400
50	0,75	0,067	18	360
75	1,15	0,065	26	347

L'unità funzionale scelta corrisponde a quella di un pannello di 40 mm di spessore, in quanto rappresenta lo spessore maggiormente prodotto e venduto e che possiede caratteristiche intermedie e in linea con i valori di calcolo della resistenza termica. La massa volumica è di 400 kg/m³ mentre la massa superficiale è di 16 kg/m². Il valore di resistenza termica è di 0,60 m²K/W. Il contenuto di acqua residuo nei pannelli è intorno al 10%.

6.1.1. Diagramma di flusso del processo produttivo

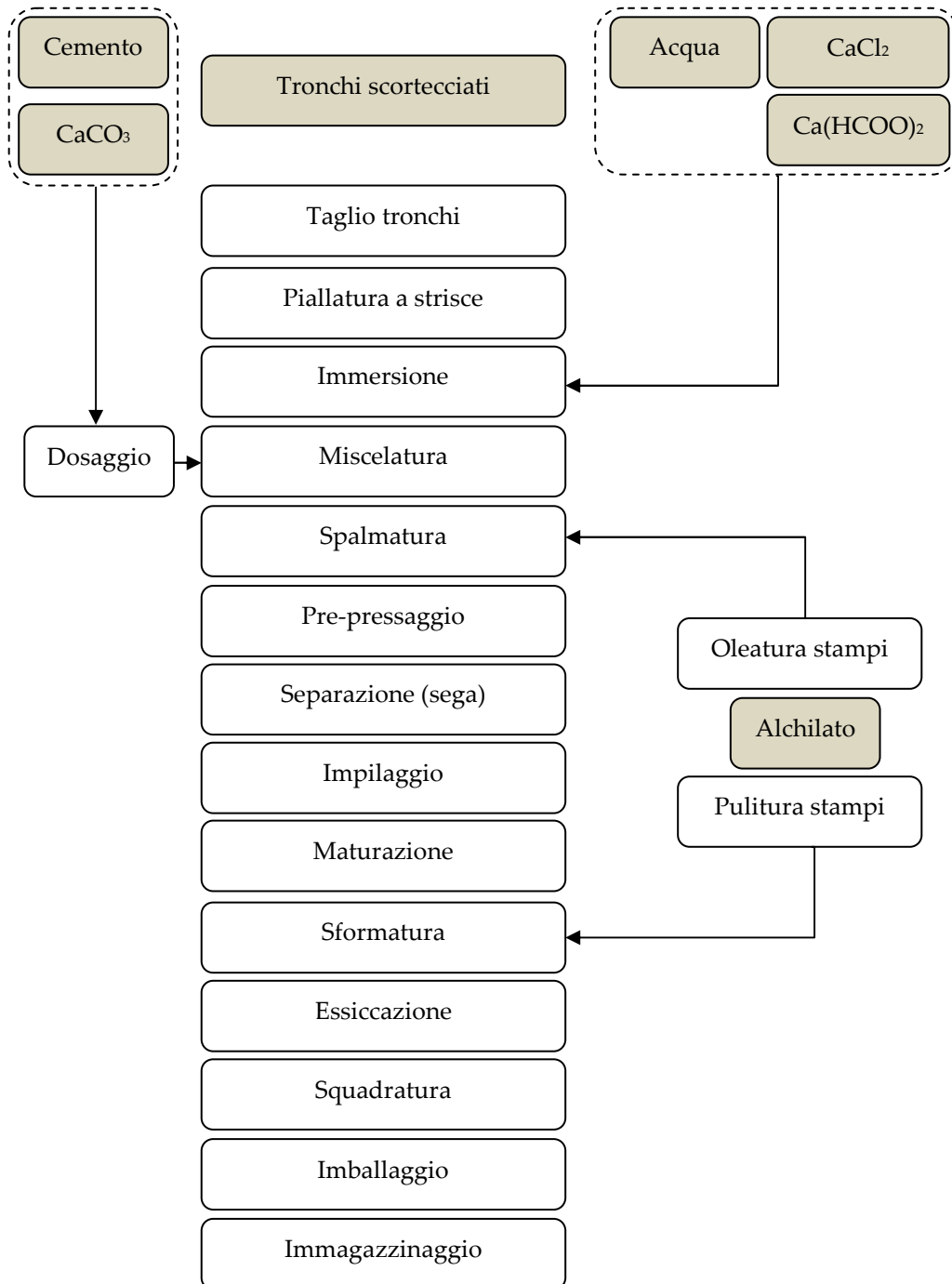


Figura 17 - Diagramma di flusso del processo produttivo Celenit

Il diagramma di flusso, Figura 17, riporta il processo produttivo della ditta Celenit per la produzione di pannelli di lana di legno e cemento. L'impianto è fortemente automatizzato e presenta una elevata sicurezza e salubrità per gli operatori. La Figura 18 offre una panoramica dell'impianto di produzione di 500 m³ al giorno in cui si percepisce l'elevato grado di automatizzazione. Il legname esclusivamente di Abete rosso giunge in azienda come tronchi scortecciati e qui viene depositato in cataste suddivise per provenienze, Figura 19. Successivamente viene tagliato in topi di piccola dimensione fino alla lunghezza di 25 cm. Questi piccoli topi sono sezionati in due semicilindri.



Figura 18 - Impianto produttivo



Figura 19 - Cataste di abete

Attraverso un sistema automatizzato giunge a due pialle, Figura 20, a disco rotante, Figura 21, con 16 utensili a foglia di pettine, Figura 22.



Figura 20 - Pialla a disco rotante



Figura 21 - Disco della pialla

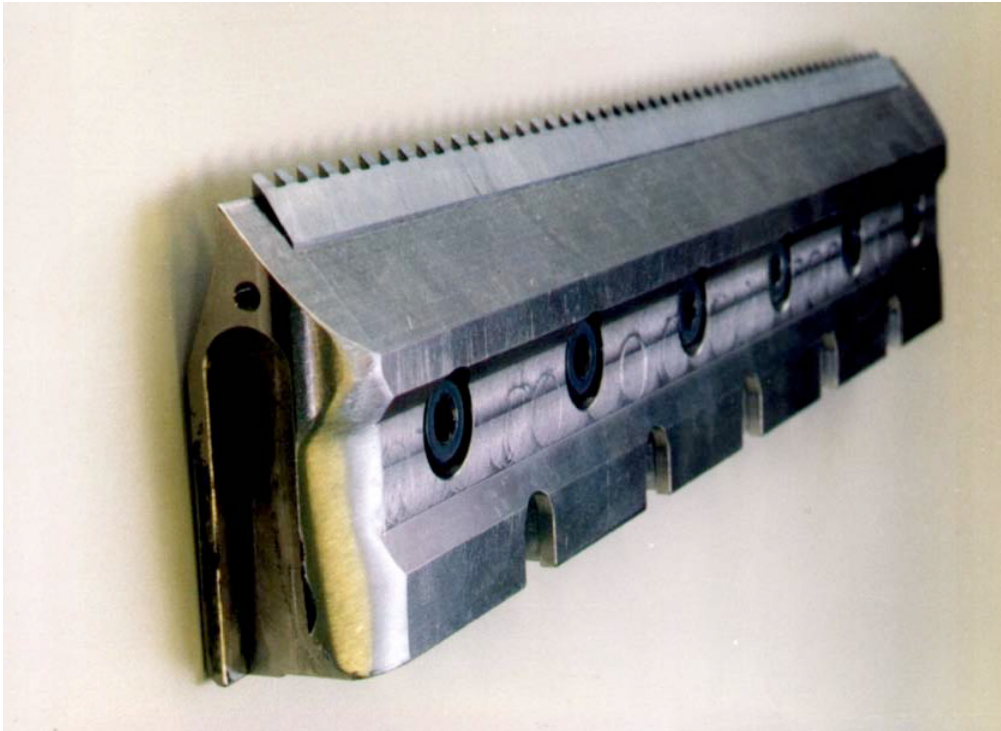


Figura 22 - Utensile

La lana di legno viene soffiata in un silo che immagazzina le quantità per l'immersione in una soluzione di acqua, cloruro di calcio, e formiato di calcio. La Figura 23 rappresenta l'unità d'immersione in continuo, attraverso la quale il flusso di lana di legno secco è immerso brevemente nella soluzione salina. Il cloruro di calcio è utilizzato come accelerante per la presa con il cemento mentre il formiato di calcio conferisce proprietà antifungine. La lana di legno mineralizzata e il legante idraulico, il cemento, vengono miscelati e successivamente dosati su stampi di legno.

La Figura 24 mostra il miscelatore continuo in cui viene alimentato il flusso continuo di lana di legno umida. Il cemento proveniente dal silo posto all'esterno dell'edificio viene dosato nel mixer mediante un dosatore. L'uscita del miscelatore è a sinistra. Il flusso irregolare della lana di legno umida viene misurato da un dispositivo elettronico che consente un flusso continuo e controllato rispetto alle dosi di cemento. Il rapporto fra lana di legno, acqua e cemento per la miscela fresca è di circa 1:1:2 in peso.



Figura 23 - Macchina per l'immersione in continuo nella soluzione salina



Figura 24 - Miscelatore lana di legno e cemento

La Figura 25 mostra la macchina spalmatrice a doppia distribuzione per poter produrre il materasso di lana di legno e cemento su casseformi di legno.



Figura 25 - Spalmatrice

La Figura 26 mostra la sega che taglia il materassino nella misura dei pannelli. Questa macchina taglia il pre-pessato fresco esattamente alle estremità degli stampi mobili senza toccare il compensato dello stampo.



Figura 26 - Sezionatrice

Gli stampi contenenti la miscela vengono sovrapposti in un impilatore, Figura 27. Le pile di stampi sono successivamente trasferite per mezzo di un carrello elevatore in una zona dove sono sottoposte ad uno schiacciamento mediante un peso, per tutto il tempo di maturazione (24-48 h).

In seguito le lastre vengono tolte dagli stampi, questa operazione è agevolata dall'uso di un disarmante l'alchilato, e inviate alla zona di squadratura dove tutti i lati vengono rifilati secondo le dimensioni volute. La Figura 28 mostra la macchina di sformatura, gli stampi svuotati vengono spostati nuovamente nella linea di produzione. I pannelli subiscono un processo di condizionamento per adeguare il loro contenuto di umidità a quello definitivo. Infine le lastre squadrate vengono pallettizzate, reggettate e immagazzinate.



Figura 27 - Impilatrice



Figura 28 - Immagazzinamento

6.1.2. Raccolta dei dati del processo produttivo

Il processo produttivo, in sintesi, può essere suddiviso in tre fasi principali:

- preparazione del legno e immersione in soluzione,
- preparazione della miscela con il cemento e formatura del “materasso”,
- essiccazione e finitura.

La Figura 29 rappresenta il ciclo di produzione dei pannelli in lana di legno e cemento per l’impianto della Celenit.

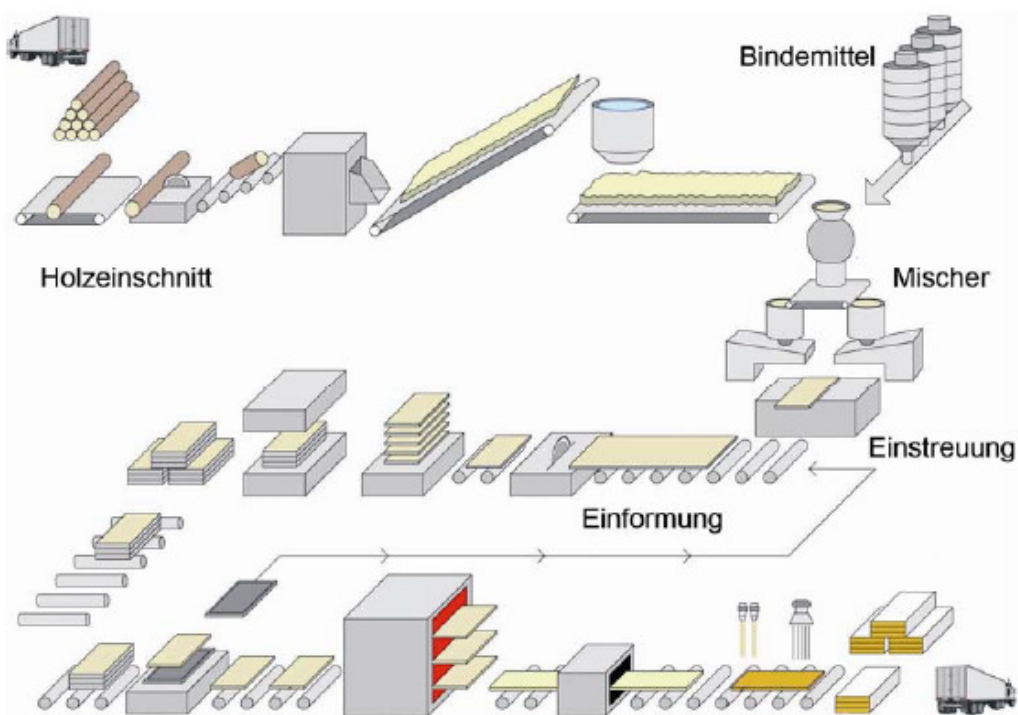


Figura 29 - Rappresentazione del ciclo produttivo WWCB

Fase di preparazione del legno. I dati primari di seguito elencati si riferiscono al periodo di rilevamento del biennio 2010-2011. Le quantità di tronchi utilizzati nella produzione del periodo suddetto sono riportati in Tabella 5. Le principali provenienze dei tronchi sono descritti in Tabella 6. In essa sono riportate anche le distanze chilometriche e le euroclassi dei

camion utilizzati per il trasporto. Ad ogni euroclasse corrisponde un determinato livello di emissioni in atmosfera.

Tabella 5 - Quantitativi di tronchi impiegati nel biennio 2010-2011

Materia prima	Quantità
Tronchi	30.694.800 kg

Tabella 6 - Provenienza legname

Provenienza	Quantità	Distanza	Euroclasse Camion
Bussolaro	34%	60 km	5
Wertholz	24%	292 km	5
Altopiano	14%	41 km	5
Vender	14%	202 km	?
Maino	9%	42 km	?
Altre	4%	150 km	?
Kohlweg	2%	342 km	?

I tronchi sono in genere consegnati in camion da postazioni fuori sede, come da segherie e da imposti in foresta. La portata di ogni camion è di 32 tonnellate e nella prassi il trasporto di ritorno è sempre a vuoto.

I tronchi utilizzati sono di qualità andante sia in termini dimensionali che di aspetto. I tronchi scartati dalle segherie sono quelli attaccati da insetti o da funghi, mentre sono largamente utilizzati quelli storti o con forte ellitticità e rastremazione. Il diametro medio dei tronchi forniti è molto piccolo, di 17 cm, e proviene soprattutto da sfollamenti, diradamenti e scarti di tagli di utilizzazione. I tronchi, prima di entrare in produzione, sono suddivisi per classe diametrica e passati al metal detector. I tronchi ridotti nelle lunghezze appropriate sono ridotti in lunghe strisce. Questa fase produce uno scarto: la segatura. La Tabella 7 esprime i quantitativi di segatura prodotti nel biennio di rilevazione. Questo scarto è destinato come ammendante da lettiera per bestiame ad una azienda agricola.

I trucioli sono trasportati in un silo tampone pronti per essere immersi in una soluzione acquosa di cloruro di calcio e il formiato di calcio con tempi prestabiliti.

Tabella 7 - Quantitativi di segatura prodotta nel biennio 2010-2011

Scarto	Quantità
Segatura	1152 kg

La Tabella 8 riporta i quantitativi di cloruro di calcio e il formiato di calcio utilizzati nel periodo di osservazione e le distanze percorse da un camion con 32 tonnellate di portata.

Tabella 8 - Quantitativi di soluzione impiegata nel biennio 2010-2011

Materia prima	Quantità	Distanza
Acqua di falda	21.079 litri	-
Cloruro di calcio	221.590 kg	34 km
Formiato di calcio	234.490 kg	34 km

Fase di preparazione della miscela cementizia. Il cemento utilizzato nel biennio di riferimento è riportato in Tabella 9 insieme alle quantità impiegate di carbonato di calcio. Sono riportate anche le distanze percorse con camion da 32 tonnellate.

Tabella 9 - Quantitativi di leganti impiegati nel biennio 2010-2011

Materia prima	Quantità	Distanza
Cemento	29.897.100 kg	53 km
Carbonato di calcio	11.030.690 kg	89 km

La miscela legno e cemento viene stesa in continuo come un materassino a seconda dello spessore voluto. Una volta formato in casseformi e trascorso il periodo di presa e maturazione viene inviato alla fase successiva.

Fase di essiccazione e finitura. Il contenuto in eccesso di acqua viene allontanato per mezzo di una essiccazione in una corrente di fumi di combustione. La Tabella 10 riporta i m³ standard di gas impiegato nel periodo. Mentre la Tabella 11 riporta le emissioni in atmosfera dei camini di espulsione dei vapori. La metodologia adottata rileva la quantità di polveri totali, la presenza di 38 composti organici volatili specifici ed esprime come Eptano le altre sostanze organiche non presenti nell'elenco. I valori sono espressi in g/h e sono la media di tre rilevazioni effettuate di circa 1 ora ciascuna. In ciascuna ora erano prodotti 500 pannelli per un totale di 9.600 kg per ora.

Tabella 10 - Quantitativi di gas impiegato nel biennio 2010-2011

Materia prima	Quantità
Metano	685.402 sm ³

Tabella 11 - Emissioni in atmosfera nel biennio 2010-2011

Sostanza	n. CAS	Formula	Quantità
Polveri totali			105,0 g/h
Alcool metilico	67-56-1	CH ₃ OH	60,2 g/h
Etilbenzene	100-41-4	C ₆ H ₅ CH ₂ CH ₃	1,4 g/h
N,N-Dimetilformammide	68-12-2	HCON(CH ₃) ₂	20,0 g/h
2-Butossietilacetato	102-07-2	C ₈ -H ₁₆ -O ₃	16,3 g/h
Acetato di isopropile	108-21-4	C ₅ H ₁₀ O ₂	5,3 g/h
Acetone	67-64-1	C ₃ H ₆ O	4,8 g/h
Alcool etilico	64-17-5	C ₂ H ₆ O	2,8 g/h
Organiche come Eptano	142-82-5	CH ₃ (CH ₂) ₅ CH ₃	303 g/h

Infine il pannello è sottoposto alle operazioni di finitura: taglio a misura finale e profilatura. Queste operazioni generano degli sfridi e degli scarti che in parte vengono utilizzati come supporti dei bancali che conservano il prodotto finito, dall'altra vengono inviati a discarica, Tabella 12.

Tabella 12 - Quantitativi di sfridi e scarti di pannello nel biennio 2010-2011

Sfridi e scarti	Quantità
pannelli	1.066.830 kg

Infine il prodotto è confezionato pronto per la spedizione. Per l'imballaggio sono utilizzati cartone e reggette in plastica nelle quantità indicate in Tabella 13. I rifiuti degli imballaggi prodotti durante tutte le fasi del processo son inseriti in Tabella 14.

Tabella 13- Quantitativi di imballaggio utilizzati nel biennio 2010-2011

Imballaggio	Quantità
cartone	39.349 kg
reggette plastica	10.300 kg

Tabella 14 - Quantitativi dei rifiuti d'imballaggio prodotti nel biennio 2010-2011

Rifiuti	Quantità
Imballaggi	1.870 kg

Alcuni prodotti possono anche essere calibrati, accoppiati con altri materiali e verniciati, ma essi non fanno parte dell'oggetto della ricerca, Figura 30.

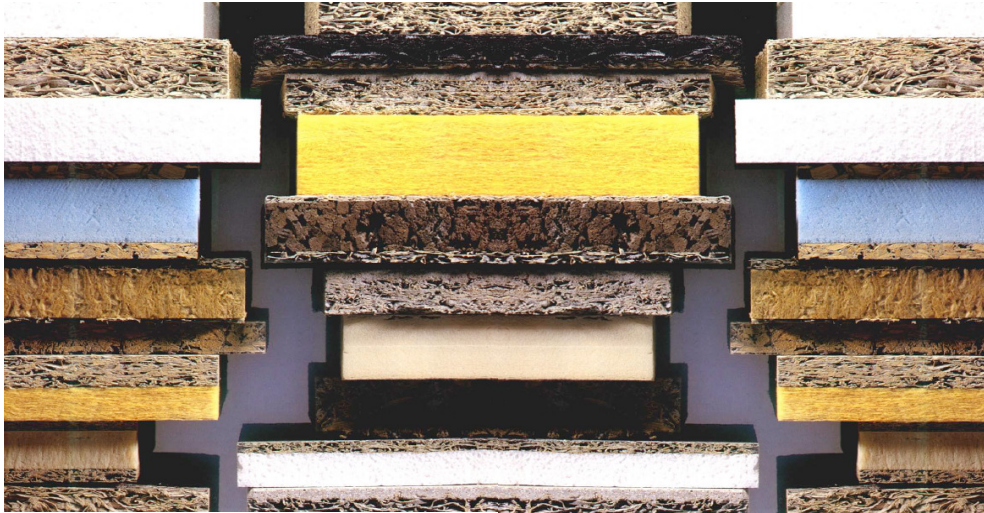


Figura 30 - Pannelli legno-cemento accoppiati

Attività ausiliarie

- **Sostanze chimiche.** Per ottenere una facile rimozione del pannello indurito all'interno delle casseformi, viene utilizzato un disarmante: l'alchilato Plus form-synt2. Le quantità utilizzate sono riportate in Tabella 15. Esso viene trasportato con autobotte da 5.000 litri.

Tabella 15 - Quantitativi di alchilato impiegato nel biennio 2010-2011

Materiale sussidiario	Quantità	Distanza
Plus form-synt2	69.521 litri	294 km

- **Trasporti.** I trasporti considerati sono di due tipi:
 - i trasporti delle materie prime e ausiliarie. Sono stati riportati gli spostamenti dal luogo di acquisto alla fabbrica per ognuna di esse,
 - la movimentazione interna operata con carrelli elevatori. Nella Tabella 16 è riportata la quantità di gasolio consumata per lo

spostamento delle materie prime e dei pannelli durante il processo produttivo e il carico su camion per la spedizione,

Tabella 16 - Quantitativi di gasolio per movimentazione interna impiegata nel biennio 2010-2011

Materiale sussidiario	Quantità
Gasolio autotrazione	27.381 litri

• **Energia.** Non è stato possibile suddividere il consumo di energia nelle varie fasi del processo produttivo. Per cui si riportano nella Tabella 17 i consumi registrati nel periodo considerato. Il distributore di energia elettrica assicura una fonte di produzione di energia del 28,7% da fonti rinnovabili. Inoltre in fabbrica si auto produce energia elettrica per mezzo di un impianto fotovoltaico. Questo impianto è entrato in servizio solo negli ultimi 6 mesi del periodo considerato. Per cui sarà analizzato in seguito uno scenario con autoproduzione a regime.

Tabella 17 - Quantitativi di energia elettrica impiegata nel biennio 2010-2011

Energia elettrica	Quantità
Totale	4.262.246 kWh
di cui da rinnovabili	1.286.772 kWh
di cui autoprodotta	209.703 kWh

Dati primari di alta qualità sono essenziali per ottenere una valutazione attendibile. Tutti i dati relativi agli ingressi e alle uscite del processo sono stati ottenuti da misurazioni sul posto durante un periodo di due anni. È stato scelto un periodo biennale in quanto si sono registrate delle differenze, seppur minime (meno del 7%) fra il 2010 e il 2011, a causa di un decremento delle ore lavorate, dovuto ad una contrazione delle vendite, che a motivi legati al processo produttivo. Pertanto si è scelto di operare su un periodo maggiore che contenesse una produttività media.

L'assegnazione dei carichi ambientali associati alle diverse fonti di energia elettrica è stata effettuata con il database Ecoinvent v2.1 [61]. Per il trasporto, l'assegnazione dei carichi ambientali è stata effettuata con il database Buwal 250 [62].

Di solito negli studi di LCA per i prodotti a base legno, le infrastrutture, direttamente collegate al processo produttivo, non sono prese in considerazione in quanto apportano degli impatti ambientali molto trascurabili rispetto alla globalità degli impatti del ciclo di vita del prodotto [53-54,59].

6.1.3. Analisi di sensibilità

Possono essere diversi i fattori che influiscono sul miglioramento e sul raggiungimento di determinati obiettivi di sostenibilità ambientale. Sono stati identificati tre fattori e di seguito valutati:

- l'approvvigionamento di legname da fornitori specifici, certificati dal punto di vista della gestione forestale sostenibile e della distanza,
- la produzione di energia elettrica, in quanto l'azienda è orientata ad una produzione sostenibile, infatti acquista energia elettrica certificata proveniente da fonti rinnovabili e nel luglio 2011 ha installato un impianto fotovoltaico di autoproduzione,
- lo smaltimento degli scarti di produzione e del prodotto a fine vita.

L'azienda si approvvigiona solo da fornitori certificati PEFC in riferimento alla gestione forestale sostenibile. La distanza dalla fabbrica dal luogo di esbosco o di raccolta del legname influisce sugli impatti legati ai trasporti. Inoltre si ritiene che il sistema di esbosco potrebbe influenzare gli impatti sull'ambiente. Anche in questo caso, è stata condotta una analisi di sensibilità per stimare la correlazione tra un sistema diffuso in centro Europa, riportato ne database Ecoinvent, denominato "meccanizzato" e uno "tradizionale" in uso nel versante Sud delle Alpi che ha il beneficio di essere adottato in luoghi geografici vicini alla fabbrica. Attraverso l'analisi di sensibilità si vuole misurare la "bontà" di una soluzione di filiera corta che in linea di principio è sempre auspicabile ma che il più delle volte non è suffragata da un'analisi scientifica. Sono stati considerati due scenari:

- Scenario A, corrispondente ad un mix di distanze proposto in Tabella 6 e con un sistema di esbosco “meccanizzato”,
- Scenario B, corrispondente ad una distanza di 50 km e con un sistema di esbosco “tradizionale”.

La produzione di energia elettrica è di grande importanza, poiché si ripercuote sugli impatti ambientali in generale assegnati al consumo di energia. È stata condotta una analisi di sensibilità per valutare la dipendenza dalla produzione di energia elettrica. Sono stati considerati due scenari:

- Scenario A, corrispondente a quello in essere, riportato in Tabella 17,
- Scenario B, corrispondente ad una autoproduzione a regime.

Lo smaltimento degli scarti di produzione è un tema molto sentito dall’azienda che negli anni ha visto cambiare gli scenari di smaltimento a seguito di autorizzazioni e revoche alla destinazione dei propri scarti. È stata condotta una analisi di sensibilità per analizzare i profili ambientali tra il sistema ora in uso, ma non discriminante, come quello dell’invio in discarica, il riuso come componente di un fertilizzante e la termovalorizzazione. Sono stati considerati tre scenari:

- Scenario A, discarica,
- Scenario B, in cui il materiale di scarto viene riciclato nella formulazione di fertilizzanti organo minerali con lo scopo di incrementare il contenuto in carbonio organico e controllare l’umidità media della miscela da avviare al processo di pellettatura,
- Scenario C, termovalorizzazione.

6.2. *Analisi dell'inventario del ciclo di vita*

I tronchi di piccolo diametro provenienti da sfollamenti, diradamenti, tagli di utilizzazione come prodotti intercalari e da scarti delle segherie possono essere considerati come materie prime, sottoprodotti, combustibile o scarti di altre attività. Ai fini di questo lavoro, sono stati considerati come prodotti principali di altre attività. Inoltre, quando si confrontano le attività collegate precedenti con la produzione dei pannelli di lana di legno e cemento, sembra che un'allocazione dei carichi ambientali degli scarti del legname proveniente dalle attività antecedenti non apporterebbero un contributo significativo [55].

Tutti i dati relativi ai consumi di materia prima ed energia, dell'impiego di sostanze sussidiarie, delle emissioni in atmosfera, degli imballaggi utilizzati e dei rifiuti prodotti durante le fasi di preparazione del legno e immersione in soluzione, preparazione della miscela con il cemento e formatura del "materasso", essiccazione e finitura elencate dalla Tabella 5 alla Tabella 17 sono state rapportate all'unità funzionale scelta di 1 kg di pannello finito. La Tabella 18 è tratta dal *report* dell'analisi di inventario restituito dal software Simapro 7.3.

Products				
wwcb	1 kg	100 non definito	Wood	
Avoided products				
Electricity, medium voltage, at grid/IT U	0,00285	kWh	Non definito	
Resources				
Water, groundwater consumption	0,28658	kg	Non definito	
Materials/fuels				
Industrial wood, softwood, under bark, u	0,41731	dm3	Non definito	
Portland cement, strength class Z 42,5, z	0,40647	kg	Non definito	
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	0,14997	kg	Non definito	
Sodium formate, reaction of formaldehyd	0,00301	kg	Non definito	
Calcium chloride, CaCl ₂ , at plant/RER U	0,00319	kg	Non definito	
Alkylbenzene, linear, at plant/RER U	0,00095	kg	Non definito	
Packaging, corrugated board, mixed fibre	0,00053	kg	Non definito	
Packaging film, LDPE, at plant/RER U	0,00014	kg	Non definito	
Electricity/heat				
Electricity, medium voltage, at grid/IT U	0,05505	kWh	Non definito	
Heat, natural gas, at boiler modulating >	0,35113	MJ	Non definito	
Transport, lorry >32t, EURO3/RER U	120,4	kgkm	Non definito	
Emissions to air				
Methanol	0,00627	g	Non definito	
Dimethyl formamide	0,00208	g	Non definito	
2-Butoxyethanol acetate	0,00170	g	Non definito	
Benzene, ethyl-	0,00015	g	Non definito	
Isopropyl acetate	0,00055	g	Non definito	
Acetone	0,00050	g	Non definito	
Ethanol	0,00029	g	Non definito	
Heptane	0,03156	g	Non definito	
Particulates, unspecified	0,01094	g	Non definito	
Emissions to water				
Emissions to soil				
Final waste flows				
Wood, sawdust	0,01566	kg	Non definito	
Rejects	0,01450	kg	Non definito	
Packaging waste, unspecified	0,00003	kg	Non definito	

Tabella 18 - Dati d'inventario inseriti in Simapro 7.3

Le principali fonti di emissioni per la produzione di pannelli di lana di legno e cemento sono gli essiccatoi e le stazioni di filtraggio delle polveri di legno e cemento. I valori di emissione riportati in Tabella 11 sono stati misurati ai camini secondo la norma UNI 10169 [64] per la determinazione dei gas di combustione, EN 13649 [65] per la determinazione della concentrazione in massa di singoli composti organici in forma gassosa ed EN 13284-1 [66] per la determinazione della concentrazione in massa di polveri in basse concentrazioni.

La Figura 31 rappresenta il diagramma a network restituito dal software Simapro 7.3 utile per controllare se tutte le fasi sono state considerate, se le masse e le quantità di energia sono corrette, la denominazione dei processi utilizzati e in via preliminare il contributo delle singole fasi alla definizione del punteggio totale dell'impatto, ottenuto con il metodo degli *Eco-indicator 99* considerando tutti i fattori d'impatto. I contributi sono visibili attraverso:

- la percentuale posta in basso a sinistra di ogni riquadro,
- l'istogramma più o meno colorato di rosso posto in basso a destra di ogni riquadro,
- lo spessore delle linee rosse (da notare quella verde relativa al beneficio indotto dall'autoproduzione di energia elettrica tramite l'impianto fotovoltaico).

Nel diagramma viene evidenziato che la fase a maggior impatto ambientale risulta il cemento con il relativo processo di produzione, seguito dalle fonte energetiche elettriche e di calore.

Il diagramma, per facilità di lettura, rappresenta 34 intersezioni di un totale di 2004, scendendo nel dettaglio di tale diagramma vengono rappresentate tutte le altre fasi che appaiono in ordine di impatto ambientale. Tanto più si scende nel dettaglio tanto più compaiono tutti gli input che concorrono in ogni fase. Le fasi che risultano da tale network sono le più impattanti dal punto di vista globale, considerando cioè tutti i fattori d'impatto e non singolarmente uno ad uno.

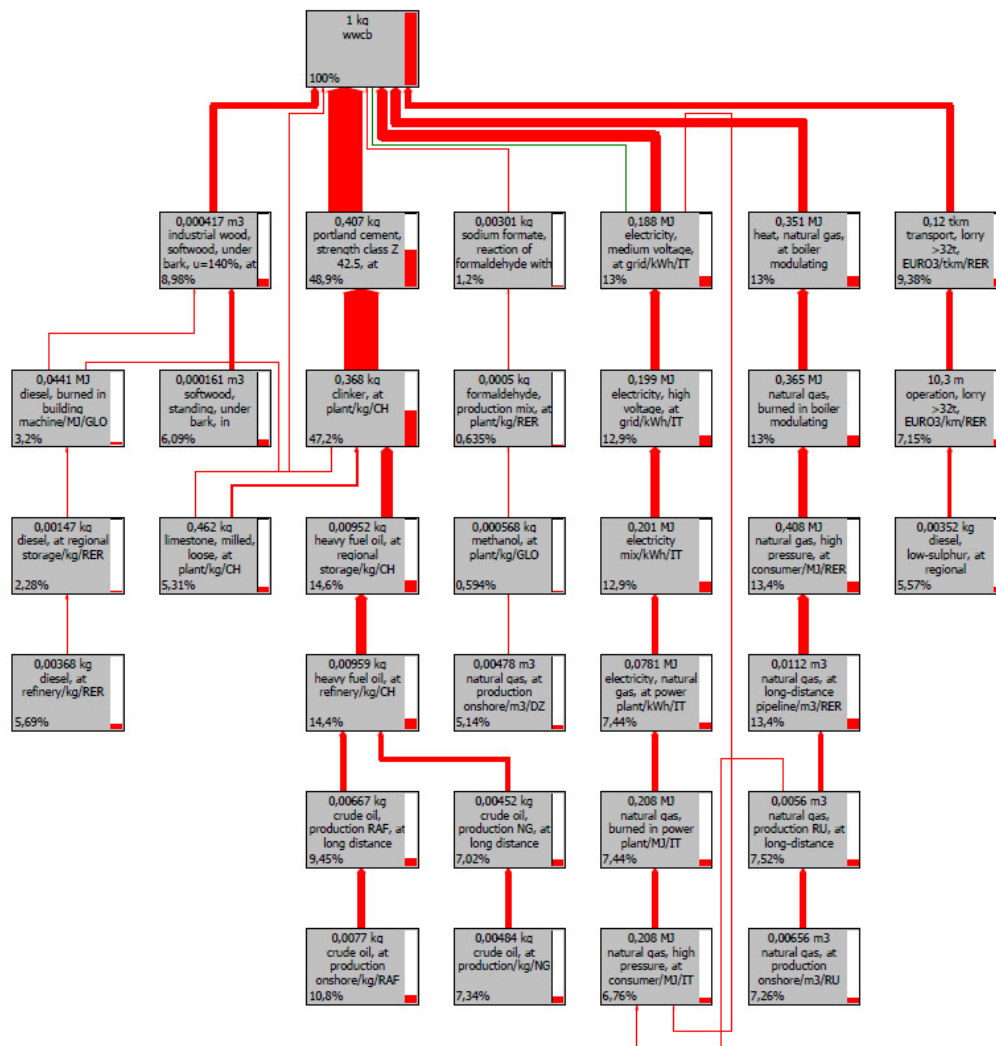


Figura 31 - WWCB, Diagramma a network Ecoindicator99

6.2.1. Analisi dell'incertezza

Come ulteriore verifica della robustezza dell'inventario relativo alla fase di raccolta dati, è stata eseguita un'analisi dell'incertezza dei dati basata sul metodo Monte Carlo. Il metodo può essere così sintetizzato:

1. assegnazione di specifiche distribuzioni di probabilità ai dati in ingresso;
2. ricampionamento casuale dei dati dalle rispettive distribuzioni di probabilità;
3. sulla base dei dati estratti viene svolta un'analisi LCA completa e confrontata.

Iterando i passi da 1 a 3 per un numero di volte sufficiente, si ottiene una distribuzione di probabilità a posteriori per le stime degli impatti. Il software campiona in maniera casuale una serie di valori sulla base della distribuzione e ricalcola la LCA per ogni parametro, immagazzina ogni analisi e raffigura la distribuzione dei risultati.

In questo studio sono state eseguite 1000 iterazioni, assegnando ai dati in ingresso una distribuzione di probabilità lognormale, con un intervallo di confidenza del 95%. I risultati dell'analisi di incertezza sono riportati in Tabella 19 e mostrano come l'incertezza dei dati non venga amplificata durante l'analisi.

Tabella 19 - WWCB, Analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categorie di danno

Titolo: Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb', metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confidenza: 95 %							
Indicatore: Valutazione dei danni							
Categoria di danno	Unità	Media	Mediana	SD	CV (Coeff. di var.)	97,5%	Err. std. di media
Ecosystem Quality	PDF*m2yr	0,028	0,0274	0,00506	18,1%	0,019	0,00572
Human Health	DALY	2,31E-7	2,27E-7	3,04E-8	13,2%	1,89E-7	0,00416
Resources	MJ surplus	0,267	0,264	0,0244	9,13%	0,224	0,00289

Se si considerano le singole categorie di danno si riscontra che *Ecosystem Quality* è la categoria più influenzata dall'incertezza dei dati in ingresso, con un coefficiente di variazione del 18,1%, seguita da *Human Health* (CV 13,2%) ed infine da *Resources* (CV 9,1%). I grafici sotto riportati rappresentano la distribuzione delle probabilità di incertezza in funzione della relativa unità di misura per ogni categoria di danno.

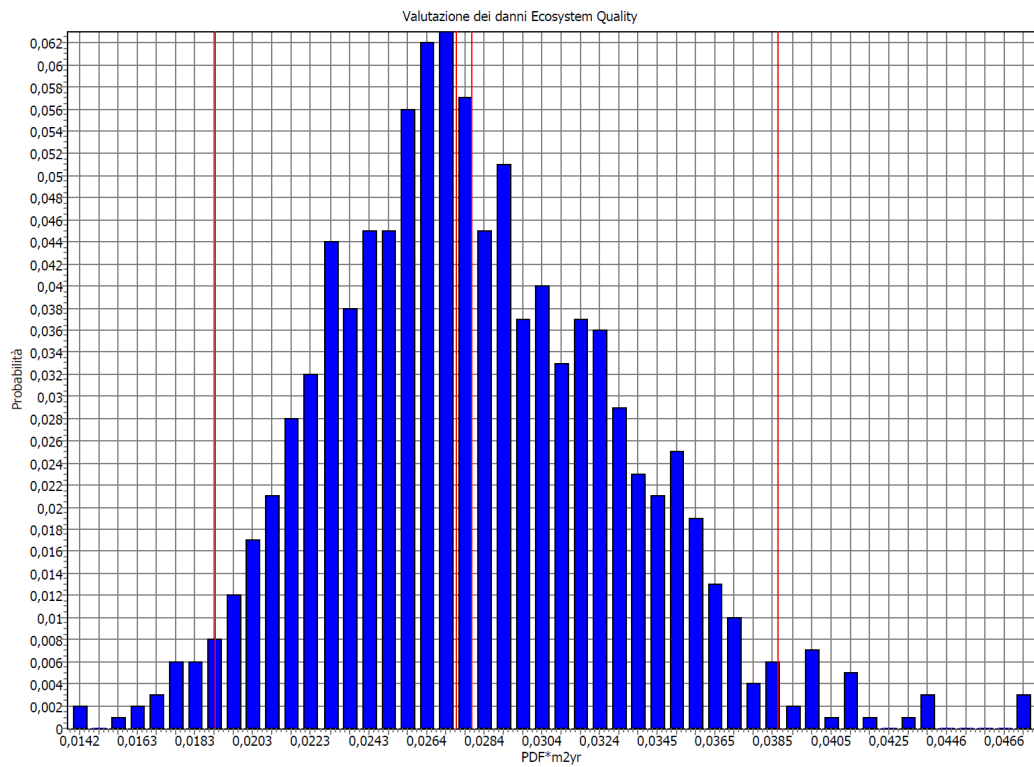


Grafico 2 - WWCB, Analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categoria di danno Ecosystem Quality

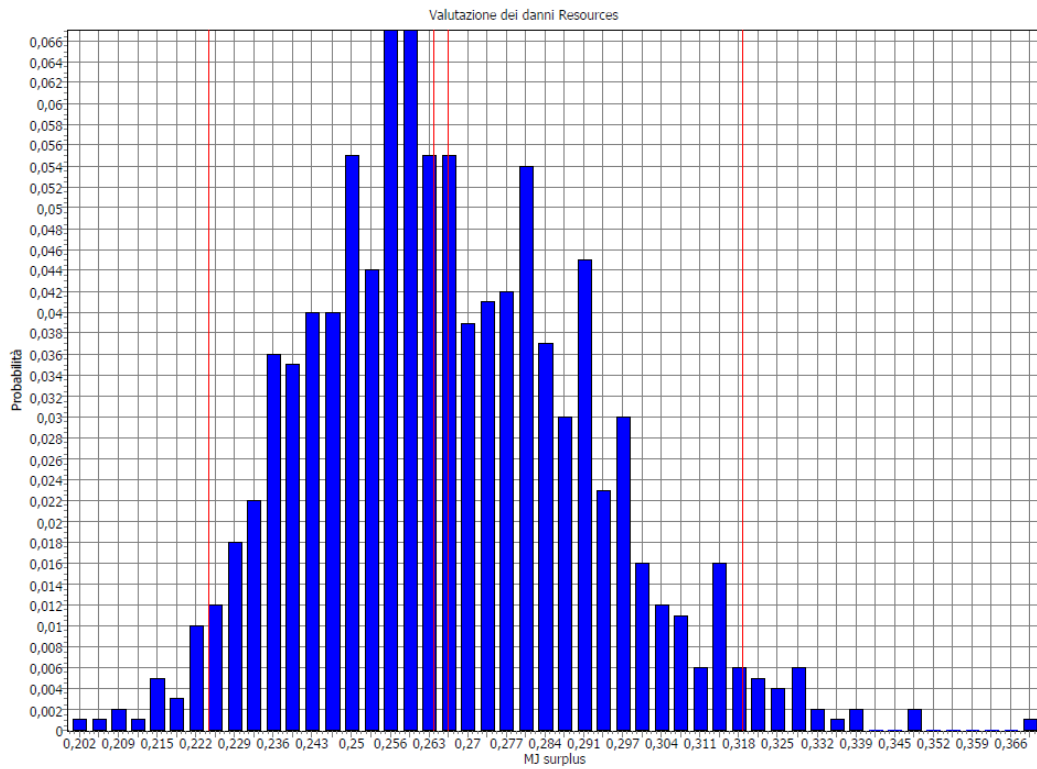


Grafico 3 - WWCB, Analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categoria di danno Human Health

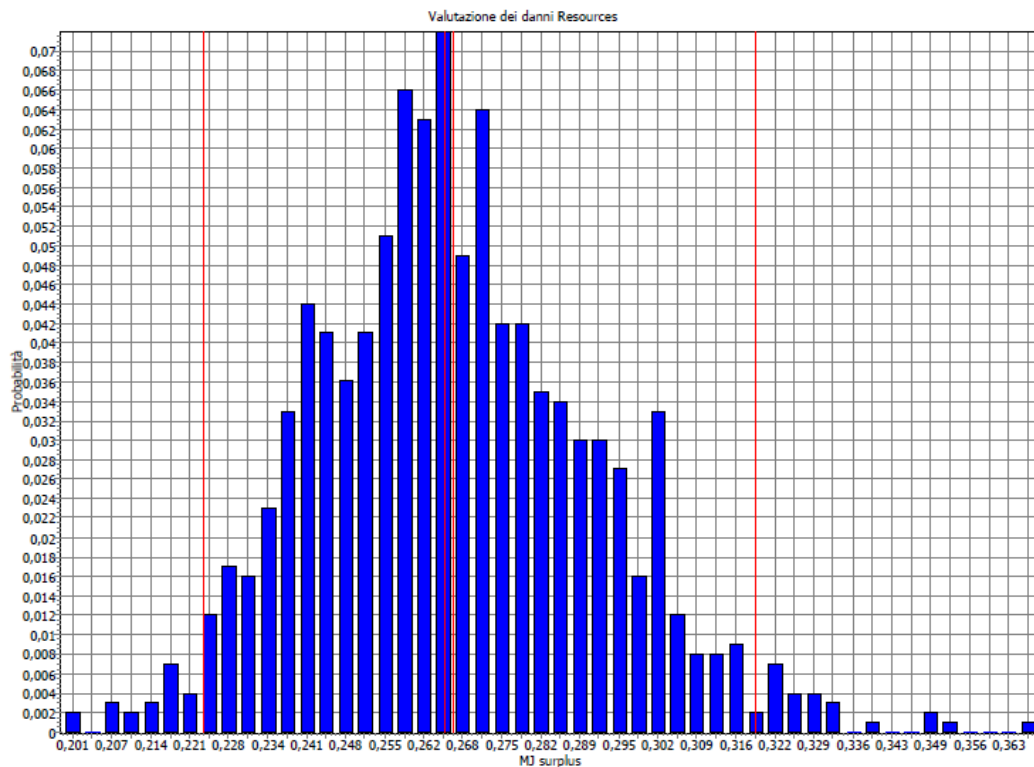


Grafico 4 - WWCB, analisi di Monte Carlo Ecoindicator99, Categoria di danno Resources

6.3. Valutazione dell'impatto del ciclo di vita

In questo lavoro, la valutazione d'impatto è stata effettuata con l'ausilio di due metodi: *Ecoindicator99* e *Edip 2003*. Il primo, è disponibile in tre versioni in ragione del periodo considerato : ugualitaria (prospettiva di medio termine), individualista (prospettiva di breve termine) e gerarchica (prospettiva di lungo termine). La fase di normalizzazione e di ponderazione vengono eseguite a livello della categoria di danno, *endpoint*, secondo la norma ISO 14040 [34]. Il metodo *Edip 2003* valuta esclusivamente le categorie d'impatto, *midpoint*, includendo le fasi di caratterizzazione, normalizzazione e pesatura.

6.3.1. Metodo Ecoindicator99

La valutazione d'impatto è stata effettuata con il metodo *Ecoindicator99 H* (gerarchica), riflette lo stato dell'arte in LCA [22]. Ecoindicator [67] è una metodologia sviluppata dalla *Product Ecology Consultants*, per conto del Ministero dell'Ambiente olandese. EcoIndicator costituisce un potente strumento per i progettisti, poiché consente di aggregare i risultati di un LCA in grandezze o parametri facilmente comprensibili ed utilizzabili, chiamati appunto ecoindicatori. I risultati dei danni vengono distribuiti in tre sole categorie principali, calcolando valori standard per i materiali ed i processi più frequentemente considerati. La versione della metodologia che è stata applicata al caso studio prescelto è la più recente in ordine di tempo e risale al 1999.

Lo schema principale del metodo valuta esclusivamente tre tipi di danno ambientale:

- *Human Health* (Salute Umana), comprende l'idea che tutti gli esseri umani, nel presente o nel futuro, saranno esenti da malattie, invalidità o morti premature causate dall'ambiente circostante. L'unità di misura dei fattori di caratterizzazione è il DALY (*Disability-Adjusted Life Years*), un indicatore che si distingue in YLD il quale esprime il numero degli anni che un certo numero di individui trascorre ammalato a causa dell'insorgere di una malattia prodotta dall'impatto generato; mentre il DALY YLL (*Years of Life Lost*) indica il numero di anni persi per morte prematura causata da un danno indotto sulla salute dell'uomo. Viene pertanto definita la vita media degli individui. Questa categoria di danno comprende le seguenti categorie di impatto:

- Sostanze cancerogene,
- Malattie respiratorie,
- Cambiamenti climatici,
- Radiazioni ionizzanti,
- Assottigliamento dello strato di ozono.

Non ci si propone di approfondire la tipologia di tutti gli impatti citati. Tuttavia, a titolo di completezza, si riporta una breve spiegazione su una di essi, anche al fine di esplicitare meglio come la metodologia LCA ricorra a studi di carattere multidisciplinari.

In riferimento ad esempio, alla categoria “sostanze cancerogene”, il metodo degli ecoindicatori, richiama studi che indagano il rapporto di causa ed effetto esistente tra l'esposizione di un individuo ad una determinata sostanza e l'incidenza dell'insorgere di tumori sulla salute umana.

- *Ecosystem Quality* (Qualità dell'Ecosistema), implica che le specie animali e vegetali interessate non soffrano di cambiamenti indotti che alterino la loro popolazione e distribuzione geografica. Questa categoria invece verifica se gli impatti generati da un prodotto hanno implicazioni sulle specie animali e vegetali. Gli indicatori specifici sono il *Potentially Affected Fraction* (PAF), cioè la frazione percentuale che potenzialmente è esposta a sostanze tossiche. L'altro indicatore è il *Potentially Disappeared Fraction* (PDF), ossia la frazione percentuale di territorio che potenzialmente non è più vitale per piante vascolari non più in grado di sopravvivere a causa degli effetti di acidificazione, eutrofizzazione e uso del territorio. Conoscendo i PAF è possibile risalire ai PDF. La qualità dell'ecosistema è pertanto espressa in termini di PDF x area x tempo, e cioè in PDF m² yr. La categoria di danno comprende le seguenti categorie di impatto:

- Ecotossicità,
- Acidificazione/Eutrofizzazione,
- Uso del suolo.

Anche in questo caso, un breve approfondimento viene riservato al concetto di Acidificazione e di Eutrofizzazione. L'acidificazione degli ecosistemi, quali laghi, foreste e suoli agricoli, viene determinata con l'abbassamento del pH. Vengono pertanto impiegati dei fattori che convertono kg di SO_x in potenziale acidificazione, legando le emissioni di SO_x e NO_x in base alla loro tendenza a formare ioni H⁺.

- *Resources* (Esaurimento delle Risorse), racchiude il concetto che la scorta di sostanze essenziali per lo sviluppo della nostra società possa essere o

meno disponibile anche per le generazioni future. Questa categoria prende in considerazione il consumo delle risorse minerarie e i combustibili fossili. Il metodo degli econdicatori valuta il decremento della concentrazione delle risorse disponibili collegandolo al concetto di “surplus” di energia richiesta per l'estrazione delle risorse rimanenti, partendo dal dato di fatto che aumenta l'energia necessaria con la diminuzione delle risorse disponibili. L'unità di misura è il MJ surplus. La categoria di danno comprende le seguenti categorie di impatto:

- Minerali,
- Combustibili fossili.

La fase finale dell'analisi presenta un elevato livello di criticità, in quanto prevede l'attribuzione di differenti pesi alle diverse categorie di danno. In particolare, l'applicazione del metodo *Ecoindicator99* ad un LCA prevede che tutte le emissioni e tutte le forme di sfruttamento del territorio siano valutate con riferimento all'Europa, con le seguenti eccezioni e restrizioni:

- il danno della riduzione dello strato di ozono e l'effetto serra vengono valutati su scala globale;
- il danno dovuto ad alcune sostanze radioattive viene valutato su scala globale;
- il danno dovuto all'esaurimento delle risorse viene valutato su scala globale;
- il danno dovuto ad alcune persistenti sostanze cancerogene è definito considerando anche le regioni geografiche contigue all'Europa.

6.3.2. Risultati

Completato l'inventario delle emissioni e dei consumi di risorse imputabili all'impianto di produzione è possibile attraverso modelli predisposti all'interno del software SimaPro 7.3, giungere alla valutazione dell'entità con cui ogni singola fase contribuisce al punteggio relativo alle varie categorie di danno considerate : *Carcinogens, Respiration organics, Respiration inorganics, Climate change, Radiation, Ozone layer, Ecotoxicity, Acidification/Eutrophication, Land Use, Minerals e Fossil fuels.*

Dall'analisi dei valori riportati in Tabella 20 è possibile risalire all'entità del danno con cui ciascuna fase contribuisce alla definizione del punteggio totale, relativo alle diverse categorie di impatto considerate nel metodo degli *Eco-indicator99*.

Categ; Unità	Totale	wwcb	Industrial wood, softw	Portland cement, stre	Limestone, milled, loc	Sodium formate, reac	Calcium chloride, CaC
Carci DALY	1,98E-8	0	1,1E-9	1,15E-8	3,56E-10	4,69E-10	1,34E-9
Resp DALY	2,21E-10	3,76E-11	3,81E-11	8,68E-11	2,56E-12	2,57E-12	8,86E-13
Resp DALY	1,23E-7	1,2E-9	4,57E-9	7,76E-8	5,18E-9	6,94E-10	2,38E-9
Clima DALY	8,72E-8	0	7,88E-10	6,99E-8	4,14E-10	3,39E-10	5,67E-10
Radio DALY	8,34E-10	0	2,07E-11	6,04E-10	3,72E-11	1,03E-11	9,66E-12
Ozon DALY	1,91E-11	0	3,82E-13	9,84E-12	2,79E-13	1,64E-13	6,71E-14
Ecotox PAF ⁺ m2yr	0,0261	0	0,00176	0,0121	0,000848	0,000478	0,00117
Acidit PDF ⁺ m2yr	0,00464	0	0,00012	0,0031	6,66E-5	2,12E-5	0,000115
Land PDF ⁺ m2yr	0,0206	0	0,0189	0,000933	3,01E-5	1,42E-5	4,85E-5
Miner MD surplus	0,00317	0	0,000581	0,00164	9,61E-5	7,66E-5	0,000223
Fossi MD surplus	0,264	0	0,00553	0,105	0,00333	0,00483	0,00111
Alkylbenzene, linear, , Packaging, corrugate; Packaging film, LDPE, Electricity, medium vs				Heat, natural gas, at l	Transport, lorry >32t; Electricity, medium vs		
3,34E-10	1,07E-10	2,5E-11	3,22E-9	1,93E-10	1,32E-9	-1,67E-10	
4,26E-12	4,39E-13	9,53E-13	1,37E-11	1,01E-11	2,36E-11	-7,08E-13	
9,78E-10	3,41E-10	1,59E-10	1,47E-8	2,12E-9	1,37E-8	-7,63E-10	
3,87E-10	1,26E-10	7,73E-11	6,7E-9	5,19E-9	3,04E-9	-3,47E-10	
2,42E-12	2,35E-12	8,8E-13	1,22E-10	5,27E-12	2,54E-11	-6,34E-12	
9,72E-14	5,86E-14	4,48E-15	2,66E-12	3,2E-12	2,48E-12	-1,38E-13	
0,000721	0,000194	2,64E-5	0,00455	0,000272	0,00416	-0,000236	
2,77E-5	1,15E-5	4,87E-6	0,000484	9,3E-5	0,000613	-2,5E-5	
1,13E-5	0,000209	3,55E-6	0,00019	7,3E-5	0,000206	-9,83E-6	
7,08E-5	2,19E-5	1,94E-6	0,000183	3,21E-5	0,000253	-9,5E-6	
0,00897	0,000945	0,0014	0,0475	0,0581	0,0297	-0,00246	

Tabella 20 - WWCB, Valutazione dei danni Ecoindicator99, Categorie d'impatto

Per una migliore comprensione si fa riferimento al Grafico 5. Esso esprime in percentuale il contributo che i vari materiali e processi portano alla definizione del punteggio complessivo, relativo alle differenti categorie di impatto. In pratica visualizza graficamente e quindi in maniera immediata quanto elencato nelle tabelle che si ottengono dal processo di caratterizzazione.

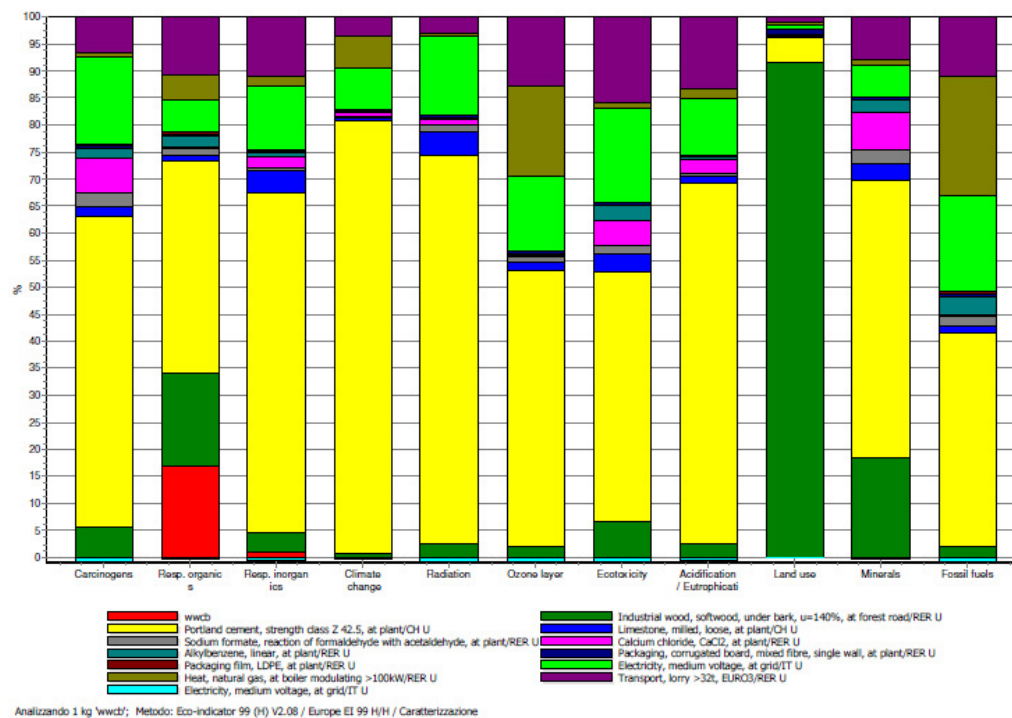


Grafico 5 - WWCB, Caratterizzazione Ecoindicator99, Categorie d'impatto

Si vede infatti che la fase maggiormente impattante per ciascuna categoria di danno risulta dall'impiego del legante cementizio (giallo). Mentre l'impatto dovuto all'impiego del legno (verde scuro) è predominante nella categoria *Land use* e significativa in *Respiartion organics* e *Minerals*. Si ricorda che in massa, il cemento rappresenta il 40% mentre il legno quasi il 50%. Riguardo l'elettricità (verde chiaro) gli impatti ambientali risultano anch'essi significativi, ma vi è da considerare l'impatto negativo (celeste) dato dalla quantità di elettricità autoprodotta con l'impianto fotovoltaico che rappresenta l'equivalente produzione evitata di energia. Due altri fattori d'impatto sono i trasporti e la produzione di calore. Infine si evince l'impatto che le emissioni del processo di produzione del pannello hanno sulla categoria *Respiartion organics* e in piccola quota in *Respiartion inorganics*.

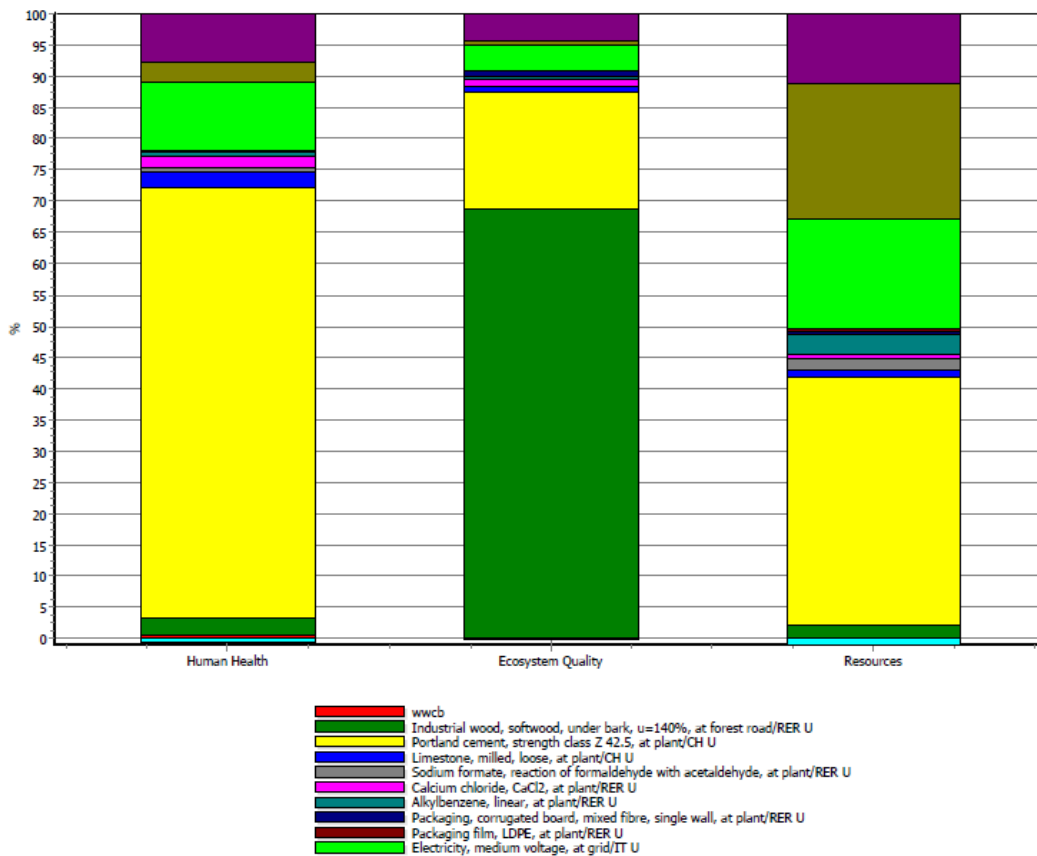
La procedura generale di un'analisi del ciclo di vita di un prodotto, condotta mediante il metodo degli *Ecoindicator*, prevede che le diverse categorie d'impatto siano raggruppate per categorie di danno e, successivamente, venga calcolato un punteggio globale: in tal modo è possibile

riferirsi a macrocategorie di danno, piuttosto che alle singole tipologie d'impatto riscontrate.

Le tre macrocategorie di danno sono:

1. *Human Health* (Salute umana); ad essa contribuiscono: *Carcinogens, Respiration organics, Respiration inorganics, Climate change, Radiation e Ozone layer*.
2. *Ecosystem Quality* (Qualità dell'ecosistema); ad essa contribuiscono: *Ecotoxicity, Acidification/Eutrophication e Land Use*.
3. *Resources* (Sfruttamento delle risorse); ad essa contribuiscono: *Minerals e Fossil fuels*.

Si riporta il Grafico 6 relativo alle sole tre macro categorie elencate, per avere un'idea ancora più chiara ed immediata dell'impatto dei diversi materiali e processi hanno sulla salute dell'uomo, sull'ecosistema e sul consumo di risorse. Si può notare come il legante cementizio è la più impattante nelle macro categoria *Salute Umana* e *Risorse* mentre la materia prima legnosa lo è per l'*Ecosistema*. Per la categoria *Risorse* risultano importanti i contributi dati dal consumo di energia elettrica e per produrre calore. Infine si nota come la fase di trasporto impatta per ogni categoria ma soprattutto per *Risorse*.



Analizzando 1 kg 'wwcB'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Valutazione dei danni

Grafico 6 - WWCB, Valutazione dei danni Ecoindicator99, Categorie di danno

La normalizzazione, processo facoltativo in una valutazione del ciclo di vita [34], serve a quantificare il contributo di ciascuna categoria d'impatto al problema ambientale a livello regionale o globale. Questa operazione si realizza normalizzando l'indicatore della categoria d'impatto rispetto ad un valore nominale di riferimento. Ci sono diversi modi per determinare il valore "Normale" di riferimento: molto spesso si adotta il carico medio annuo, in una nazione o regione, diviso per il numero di abitanti, in modo da stimare il carico di inquinamento "pro-capite". La normalizzazione ha due scopi principali:

- capire quali categorie d'impatto hanno un peso maggiore in modo da concentrare i miglioramenti su di queste;

- i risultati normalizzati mostrano un ordine di grandezza dei problemi ambientali generati nell'intero ciclo di vita, rispetto ai carichi ambientali a livello regionale come l'Europa.

Il Grafico 7, relativo alle sole tre macro categorie, indica che i danni provocati dai materiali utilizzati nel processo produttivo sono principalmente sul consumo delle *Risorse*, sulla *Salute Umana* e infine sull'*Ecosistema*. Risulta coerente che i materiali o le fonti energetiche maggiormente impattanti siano quelle riscontrate durante la fase di caratterizzazione.

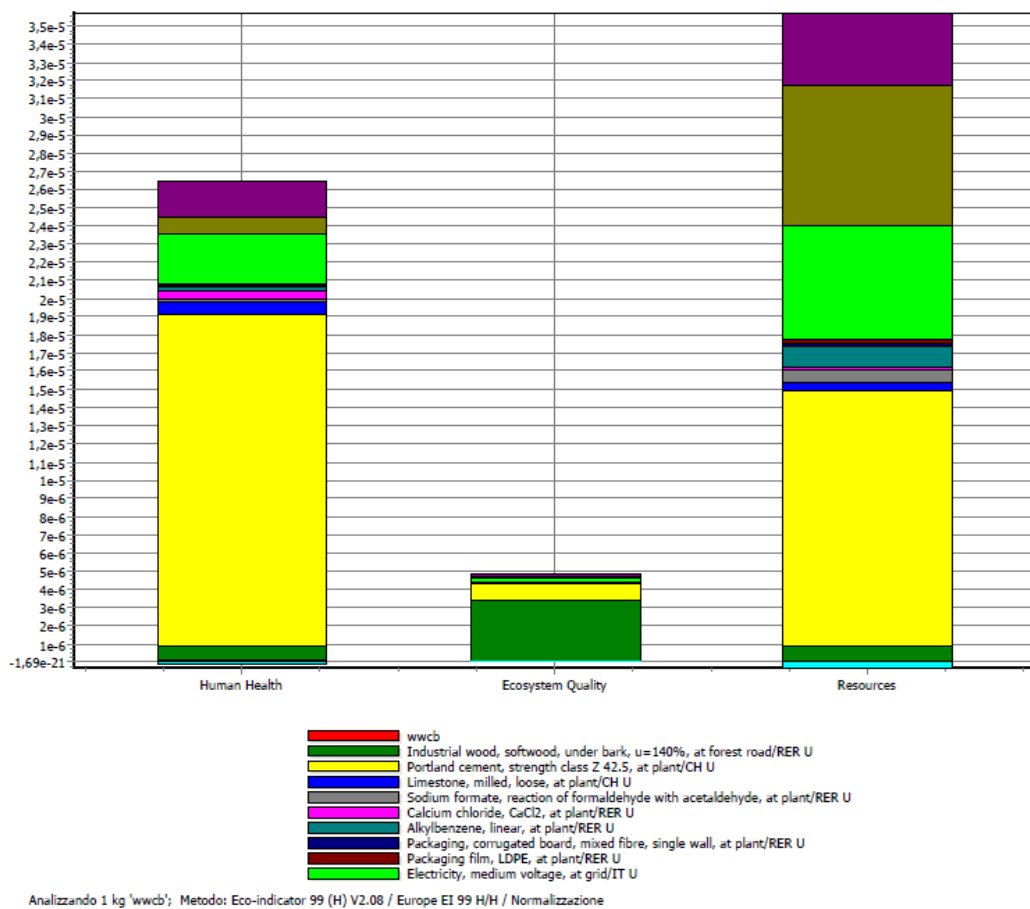


Grafico 7 - WWCB, Normalizzazione Ecoindicator99, Categorie di danno

Nel dettaglio si può notare nel Grafico 8 che le categorie d'impatto maggiormente coinvolte sono: *Fossil fuel*, *Respiration inorganics* e *Climate change*. Tutte e tre sono fortemente correlate in quanto un maggior consumo di combustibili fossili genera delle emissioni in atmosfera che alterano il clima e danneggiano la salute umana a causa della respirazione di sostanze inorganiche. Risulta, collegato all'uso di combustibili fossili, anche un impatto a causa della presenza di sostanze cancerogene. Infine l'uso del territorio è legato prevalentemente all'utilizzazione dei boschi per l'approvvigionamento del legname.

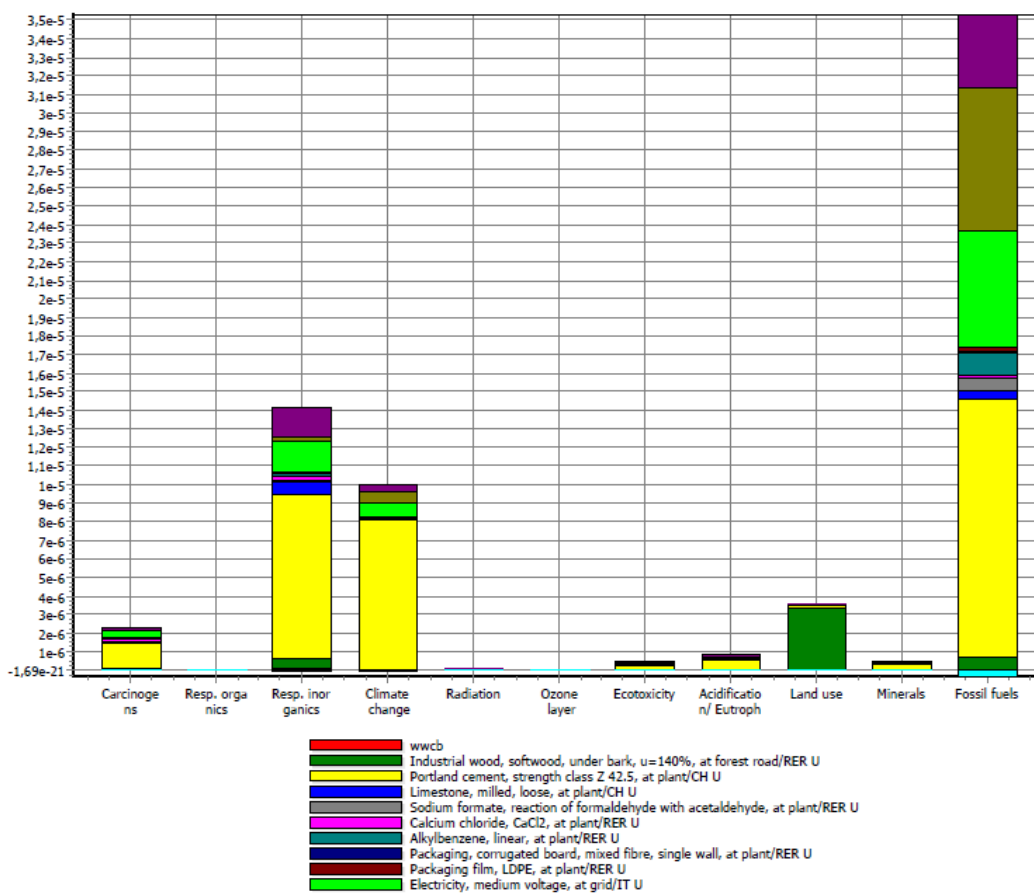


Grafico 8 - WWCB, Normalizzazione Ecoindicator99, Categorie d'impatto

Il software Simapro 7.3 restituisce un report per punteggio singolo, molto utile per poter individuare quale materiale, fonte energetica o processo impatti maggiormente sull'ambiente. Il grafico fornisce sia l'impatto sulle categorie di danno che quello sulle categorie d'impatto.

Il Grafico 9 indica che in una scala da 0 a 10, il cemento ha l'impatto massimo. Di questo impatto oltre il 50% è a carico della *Salute umana* e il resto sulle *Risorse*. L'uso dell'energia elettrica, del calore e del trasporto hanno un impatto fra 1,8 e 2,8 quasi esclusivamente a carico delle *Risorse*. Mentre la materia prima legnosa ha un impatto 1,7 a carico della *Qualità dell'ecosistema*.

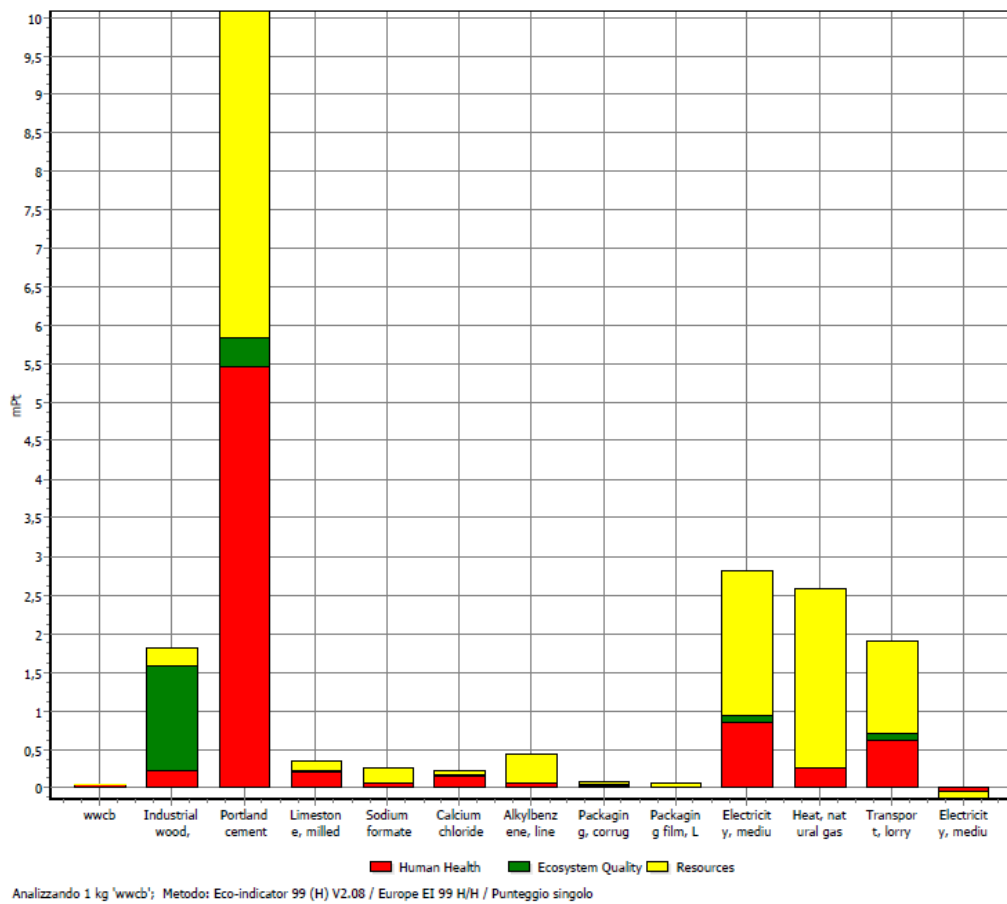


Grafico 9 - WWCB, Punteggio singolo Ecoindicator99, Categorie di danno

Il Grafico 10 ribadisce che le categorie d'impatto maggiormente coinvolte sono per:

- *Human health:* *Respirations inorganics e Climate change*
- *Ecosystem quality:* *Land use*
- *Resources:* *Fossil fuels*

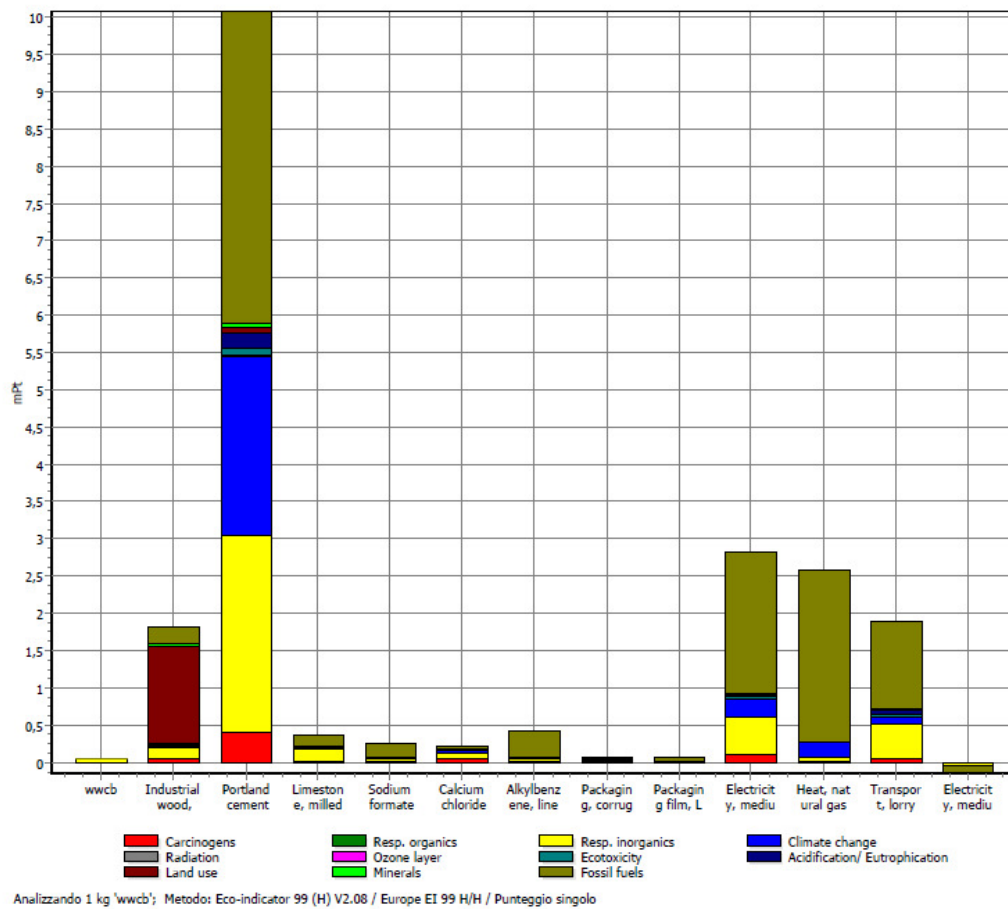


Grafico 10 - WWCB, Punteggio singolo Ecoindicator99, Categorie d'impatto

6.3.3. Metodo Edip 2003

Il metodo EDIP [68] è stato sviluppato in Danimarca con l'obiettivo di considerare gli aspetti ambientali nello sviluppo dei prodotti industriali.

Ciò che distingue EDIP dagli altri metodi di valutazione sono: le 19 categorie di impatto le cui unità di misura non riguardano mai gli effetti ma solo le cause (emissioni equivalenti, m³ di fluido inquinati e kg di rifiuti prodotti), un sistema diverso di misura del fattore di normalizzazione (inverso del danno subito da una singola persona nel 1990), e di valutazione del danno (rapporto tra il danno subito da una singola persona nel 1990 e quello che si ammette possa essere subito da una persona in un anno futuro).

- *Global warming*
- *Ozone depletion*
- *Acidification*
- *Terrestrial*
- *Aquatic eutrophication (N-eq)*
- *Aquatic eutrophication (P-eq)*
- *Ozone formation (human)*
- *Ozone formation (vegetation)*
- *Human toxicity (exposure route via air)*
- *Human toxicity (exposure route via water)*
- *Human toxicity (exposure route via soil)*
- *Ecotoxicity (water acute)*
- *Ecotoxicity (water chronic)*
- *Ecotoxicity (soil chronic)*

- *Hazardous waste*
- *Slags/ashes*
- *Bulk waste*
- *Radioactive*
- *Resources*

Come fattori di caratterizzazione si utilizzano degli indici come ad esempio il Potenziale per il Riscaldamento Globale (*Global Warming Potential, GWP*) per valutare la modificazione dell'effetto serra e il Potenziale di Riduzione dell'Ozono stratosferico (*Ozone Depletion Potential, ODP*) per l'impovertimento dell'ozono. Nella fase di caratterizzazione, per ogni categoria di impatto c'è una sostanza di riferimento alla quale le altre sostanze vengono rapportate. Il fattore di caratterizzazione, in questo caso, è un semplice fattore di equivalenza, ovvero esprime la forza di una certa sostanza calcolata rispetto a una sostanza di riferimento. Per esempio nel *Global Warming* la sostanza di riferimento è il biossido di carbonio, CO₂, e i vari fattori esprimono in questo modo gli impatti potenziali delle sostanze come grammi di CO₂ equivalenti per un grammo di sostanza. Scrivere che il metano ha un fattore di impatto pari a 25 g CO₂, significa scrivere che 1 g di metano contribuisce al surriscaldamento del globo quanto 25 g di anidride carbonica.

Come riferimenti di normalizzazione, il metodo EDIP utilizza il consumo di risorse e gli impatti totali dell'anno 1990. Per gli scambi ambientali che avvengono su scala globale (cioè esaurimento risorse, riscaldamento globale e esaurimento dell'ozono), viene usato l'impatto totale globale quale riferimento di normalizzazione. Per gli altri impatti dovuti ad effetti regionali o locali (tutti gli altri), il metodo considera come riferimento il danno totale riferito alla Danimarca.

I fattori di normalizzazione rappresentano l'inverso dell'impatto potenziale per persona subito a causa delle attività umane relative alla categoria di danno considerata. La normalizzazione, dunque, permette di valutare quali tra i potenziali impatti sono grandi e quali piccoli, mettendoli in relazione agli impatti cui era soggetta una persona media nel 1990.

Ma anche se i potenziali impatti per due differenti categorie d'impatto sono ugualmente grandi nella normalizzazione, questo non significa che siano ugualmente importanti. La comparazione dei potenziali per i vari impatti comporta che si valuti inizialmente la gravità di ciascuna categoria d'impatto rispetto alle altre. La gravità delle categorie d'impatto è espressa da un insieme di fattori peso per categoria d'impatto riferiti alle principali aree: quella ambientale, delle risorse e dell'ambiente di lavoro. La ponderazione o valutazione è ottenuta moltiplicando il potenziale impatto normalizzato o il valore normalizzato del consumo di risorse, per il fattore peso associato alla categoria d'impatto o al consumo di risorse in questione.

Per tutte le categorie di danno, escluso l'esaurimento delle risorse, il fattore di valutazione rappresenta il rapporto tra il danno per persona nel 1990 e il danno che si è stabilito di ammettere in un anno futuro. Per l'esaurimento delle risorse, la valutazione, che viene riportata come caratterizzazione, considera un fattore di valutazione che è dato dal rapporto tra il consumo per persona nel 1990 (che costituisce anche il fattore di normalizzazione) e la disponibilità attuale per persona della singola risorsa.

6.3.4. Risultati con metodo Edip 2003

Si riporta il diagramma nella Figura 32 in cui il network restituito dal software fornisce il contributo delle singole fasi alla definizione del punteggio totale dell'impatto, ottenuto con il metodo degli *Edip 2003*.

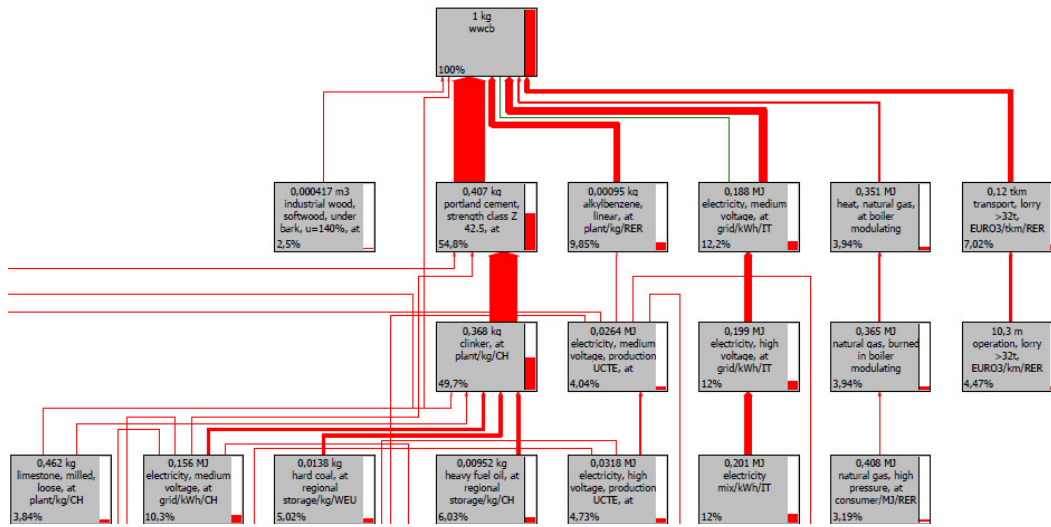


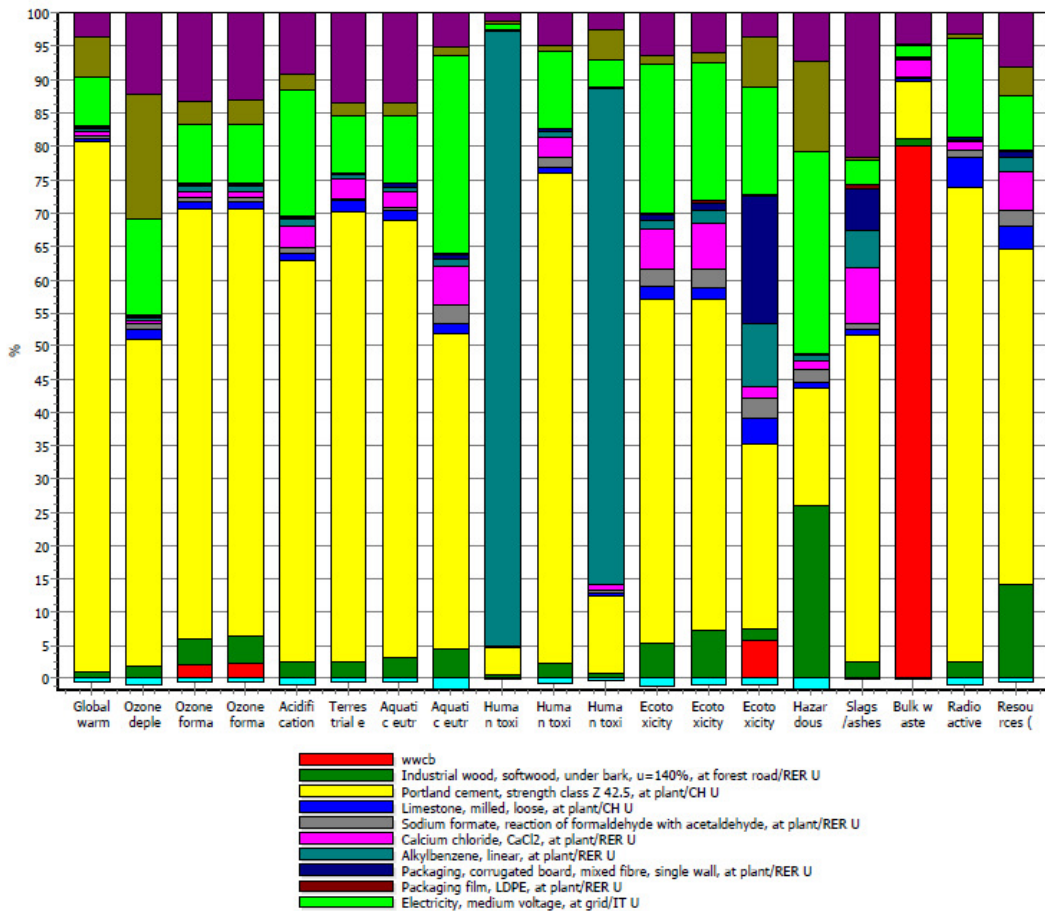
Figura 32 - WWCB, Diagramma a network Edip 2003

Dall'analisi dei valori in Tabella 21 è possibile risalire all'entità del danno con cui ciascuna fase contribuisce alla definizione del punteggio totale, relativo alle diverse categorie d'impatto considerate nel metodo degli Edip 2003.

Cateq	Unità	Totale	wwcb	Industrial wood, softw	Portland cement, stre	Limestone, milled, loc	Sodium formate, reac	Calcium chloride, CaC
Globa	kg CO2 eq	0,417	0,000109	0,00387	0,334	0,00198	0,00163	0,00272
Ozon	kg CFC11 eq	1,91E-8	0	3,71E-10	9,46E-9	2,7E-10	1,73E-10	6,67E-11
Ozon	m2.ppm.h	1,57	0,0321	0,0627	1,02	0,0188	0,00934	0,0146
Ozon	person.ppm.h	0,000109	2,59E-6	4,58E-6	7,02E-5	1,29E-6	6,79E-7	1,01E-6
Acidif	m2	0,0127	0	0,000322	0,00776	0,000158	9,36E-5	0,000423
Terre	m2	0,0196	0	0,0005	0,0133	0,000303	7,91E-5	0,000587
Aqua	kg N	7,52E-5	0	2,36E-6	4,97E-5	1,06E-6	3,86E-7	1,91E-6
Aqua	kg P	2,27E-5	0	1,01E-6	1,09E-5	3,53E-7	6,34E-7	1,35E-6
Hum.	person	21,12E4	2,06	124	860	49	11,5	36,8
Hum.	m3	2,93	1,87E-6	0,0658	2,17	0,0282	0,0361	0,0926
Hum.	m3	0,0503	4,08E-6	0,000388	0,00583	0,000242	0,000193	0,000506
Ecotox	m3	23,3	0,00087	1,29	12,2	0,47	0,61	1,44
Ecotox	m3	4,43	0	0,325	2,22	0,0823	0,127	0,314
Ecotox	m3	0,0356	0,0021	0,000653	0,00988	0,00147	0,00102	0,000702
Haaza	kg	3,14E-6	0	8,32E-7	5,61E-7	3,12E-8	6,27E-8	4,25E-8
Slags	kg	2,52E-5	0	6,11E-7	1,24E-5	1,81E-7	2,21E-7	2,15E-6
Bulk	kg	0,0377	0,0302	0,000358	0,00327	0,000122	0,000152	0,000965
Radici	kg	5,34E-6	0	1,35E-7	3,83E-6	2,36E-7	7,06E-8	6,6E-8
Reso	PR2004	1,13E-5	0	1,6E-6	5,69E-6	3,94E-7	2,71E-7	6,52E-7
Alkylbenzene, linear, i	Packaging, corrugate	0,00187	0,000605	0,000375	0,032	0,0249	0,0146	-0,00166
9,83E-11	6,17E-11	4,69E-12	2,82E-9	3,58E-9	2,37E-9	-1,46E-10		
0,0114	0,00364	0,00266	0,142	0,0537	0,21	-0,00736		
8,22E-7	2,53E-7	1,97E-7	9,84E-6	3,96E-6	1,43E-5	-5,09E-7		
0,000137	3,34E-5	2,32E-5	0,00245	0,000299	0,00118	-0,000127		
9,76E-5	4,98E-5	1,75E-5	0,00169	0,000371	0,00266	-8,76E-5		
3,91E-7	4,63E-7	7,34E-8	7,6E-6	1,45E-6	1,02E-5	-3,93E-7		
2,28E-7	1,94E-7	5,08E-8	6,8E-6	3,26E-7	1,16E-6	-3,52E-7		
1,96E4	10,1	13	194	97,2	254	-10		
0,0252	0,0102	0,00402	0,341	0,0298	0,138	-0,0177		
0,0375	0,000104	3,45E-5	0,00208	0,0023	0,00121	-0,000107		
0,3	0,178	0,0542	5,31	0,293	1,5	-0,275		
0,0824	0,0469	0,0126	0,927	0,0649	0,271	-0,048		
0,00331	0,00694	4E-5	0,00577	0,00277	0,00126	-0,000299		
1,82E-8	1,32E-8	1,54E-9	9,68E-7	4,28E-7	2,34E-7	-5,01E-8		
1,41E-6	1,59E-6	1,24E-7	9,38E-7	1,17E-7	5,45E-6	-4,86E-8		
0,000105	5,19E-5	8,73E-6	0,000596	0,000129	0,00173	-3,09E-5		
1,66E-8	1,61E-8	6,05E-9	7,98E-7	3,63E-8	1,66E-7	-4,13E-8		
2,6E-7	9,04E-8	2,24E-8	9,16E-7	5,03E-7	9,01E-7	-4,74E-8		

Tabella 21 - WWCB, Valutazione dei danni Edip 2003, Categorie d'impatto

Per una migliore comprensione si fa riferimento al Grafico 11. Esso esprime in percentuale il contributo che i vari materiali e processi portano alla definizione del punteggio complessivo, relativo alle differenti categorie di impatto. In pratica visualizza graficamente e quindi in maniera immediata quanto elencato nelle tabelle che si ottengono dal processo di caratterizzazione.



Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: EDIP 2003 V1.03 / Default / Caratterizzazione

Grafico 11 - WWCB, Caratterizzazione Edip 2003, Categorie d'impatto

© Il *Global warming* (GWP 100) rappresenta il contributo di ciascuna fase della filiera all'incremento della temperatura media terrestre conseguente all'effetto serra ed è espresso in grammi di anidride carbonica emessa. Esso risulta a carico dell'impiego del cemento per un valore dell'80%.

- © *L'Ozone depletion* indica il contributo di ciascuna fase del processo al deperimento dello strato di ozono stratosferico, ed è valutato in riferimento ai grammi di CFC11 emessi. Per il 50% è ha carico del cemento mentre il restante è da computarsi all'uso energetico.
- © *L'Ozone formation vegetation e human* indica il contributo di ciascun materiale alla formazione di ozono, ed è valutato in riferimento a parti per milione. Per più del 60% è ha carico del cemento.
- © *L'Acidification*, espressa in grammi di SO₂, definisce il contributo di ciascuna fase della filiera all'emissione di solfati, responsabili, tra l'altro, delle piogge acide. Essa risulta influenzata ancora una volta dal cemento.
- © *L'Eutrophication da Azoto e Fosforo* esprime il contributo di ogni processo all'incremento di nutrienti nelle acque, e viene calcolata in riferimento ai grammi di NO₃ e PO₄. Il cemento e il consumo di risorse energetiche sono le principali cause di questo danno.
- © *All'Human toxicity air, water e soil*, calcolata in m³, contribuisce per la prima e l'ultima soprattutto l'uso di un composto chimico come l'alchilato e il cemento per quella attraverso l'acqua.
- © *L'Ecotoxicity water chronic e acute* è espressa in m³, ed è influenzata ancora dal cemento e dalle fonti energetiche.
- © *L'Ecotoxicity soil chronic* è espresso in m³, ha una componente moltiplice a carico di tutti i fattori di produzione.
- © *L'Hazardous waste*, i rifiuti pericolosi sono espressi in kg, ed hanno una componente principale nelle fonti energetiche, anche se in questo caso sulla significativa quella dell'uso di legname.
- © *Lo Slags and ashes*, scorie e ceneri espresse in kg, hanno una componente a carico del cemento.
- © *Il Bulk waste* espresso in kg, esprime la quantità di rifiuti che nel processo preso in considerazione è legato ai rifiuti ed agli scarti di produzione.
- © *Il Radioactive waste* espresso in kg, esprime la quantità di rifiuti radioattivi che in questo caso è legato all'uso di cemento.

© *Resources (all)*, espresso in kg, è influenzato principalmente dal cemento, dalle fonti energetiche e del materiale legnoso.

A differenza del metodo precedente il metodo Edip 2003 non prevede l'aggregazione in categorie di danno, i così detti *endpoint*, in quanto il metodo è fortemente orientato alla determinazione dei singoli impatti locali. Il processo di normalizzazione contribuisce ad identificare il contributo d'impatto di ciascuna categoria al problema ambientale in modo da confrontarli.

Nel dettaglio si può notare nel Grafico 12Grafico 8 che le categorie d'impatto maggiormente coinvolte sono *Eutrofizzazione dell'acqua per il fosforo*, *Tossicità umana per via d'acqua*, *Riscaldamento globale*, *Rifiuti radioattivi*, *Formazione di ozono* e *Acidificazione* a causa dell'impiego di leganti cementizi. *Tossicità umana per via aerea* a per l'uso dell'alchilato e *Massa di rifiuti* per i quantitativi di sfridi e scarti prodotti durante il processo.

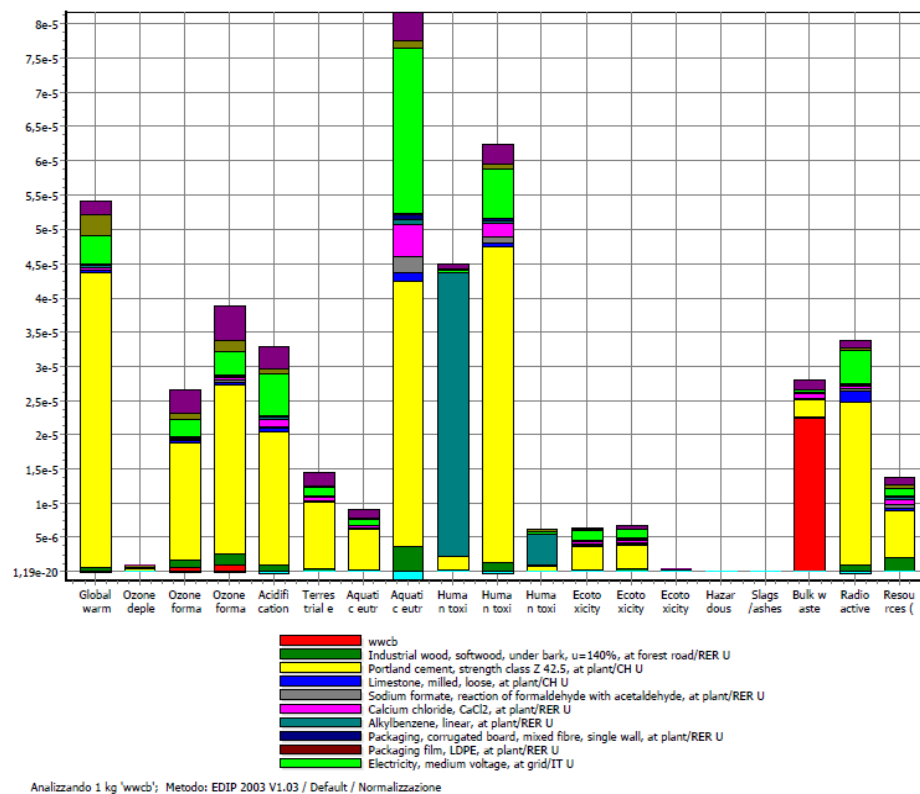


Grafico 12 - WWCB, Normalizzazione Edip 2003, Categorie d'impatto

Il punteggio per singolo, materiale, fonte energetica o processo permette di individuare quelli maggiormente impattanti sull'ambiente. Come per il metodo *Ecoindicator* anche il Grafico 13 indica che il cemento ha l'impatto massimo. Conferma circa la stessa entità di impatto per l'uso dell'energia elettrica, del trasporto e del calore. Mentre l'impiego dell'alchilato e la produzione di sfridi e scarti hanno un peso maggiore rispetto al metodo analizzato precedentemente. Infine la materia prima legnosa ha un impatto ritenuto trascurabile.

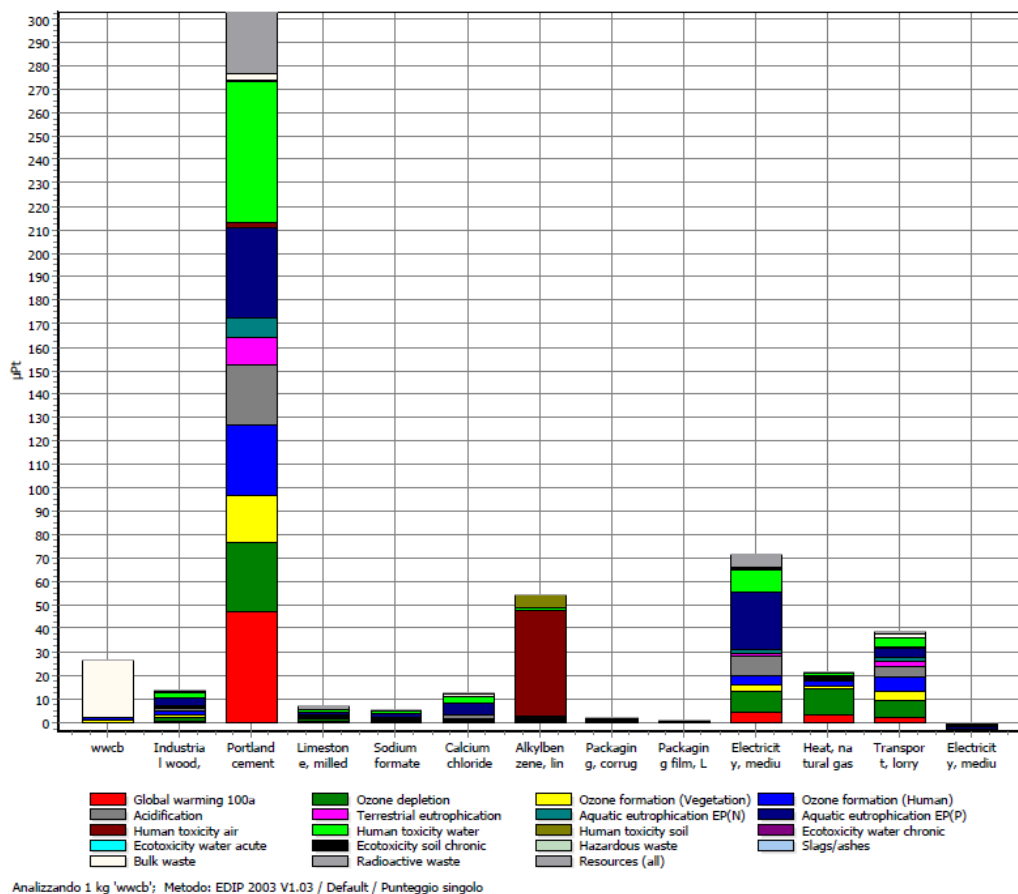


Grafico 13 - WWCB, Punteggio singolo Edip 2003, Categorie d'impatto

7. Analisi di sensibilità

La valutazione del ciclo di vita di un prodotto, come si è detto, può avere diversi scopi, fra i quali l'*ecodesign*. Con questo termine si indica il processo di progettazione e di scelte orientate verso una produzione sostenibile dal punto di vista ambientale.

La progettazione è l'elemento fondamentale dal quale partire per minimizzare gli impatti di ogni fase del ciclo di vita del prodotto: la scelta delle materie prime, dei processi di realizzazione e finitura necessari durante la fase di produzione, della tipologia e della quantità degli imballaggi, le soluzioni per ottimizzare la logistica e ridurre gli impatti dovuti al trasporto, la possibilità di riutilizzare il prodotto tal quale, di disassemblarlo con facilità separando i diversi tipi di materiale e infine di riciclare i materiali recuperati. La valutazione degli impatti e la ricerca di soluzioni che rendano più sostenibili tutte le fasi del ciclo di vita di un prodotto o servizio possono coinvolgere tutto il sistema delle aziende che contribuiscono alle singole fasi della realizzazione, moltiplicando i benefici lungo tutto il processo produttivo.

La grande sfida della progettazione e del design consiste nell'evitare e nel ridurre al minimo l'impatto di tutti i prodotti sull'ambiente. L'attuale scenario produttivo richiede di intervenire progettando in maniera sostenibile non solo il prodotto in relazione a materiali, forme e funzioni ma tutto il suo ciclo di vita.

Le basi dell'eco-efficienza, secondo la politica integrata di prodotto, prevedono:

- ottimizzazione del servizio offerto dal prodotto;
- conservazione delle risorse;
- riduzione dei rifiuti relativi al prodotto e agli imballaggi;
- riduzione dell'inquinamento;
- riduzione dei pericoli e dei rischi.

Il concetto di *ecodesign*, abbraccia ed influenza la progettazione di tutti gli aspetti del prodotto: dalla provenienza dei materiali, alle modalità di produzione, all'imballaggio, alla logistica, alla distribuzione, alla comunicazione al cliente intermedio o finale, alle modalità di utilizzo, allo smaltimento, al recupero di materia etc. Esso si configura, quindi, come un articolato processo di ottimizzazione ed innovazione di ciascuna fase del ciclo di vita.

Come definito dalla norma ISO 14040 [34] l'analisi di sensibilità serve "per determinare in che modo le modifiche delle scelte metodologiche e dei dati incidono sui risultati dell'LCIA". Nonostante l'analisi di sensibilità sia inserita nella norma all'interno della fase di valutazione dell'impatto del ciclo di vita si è preferito trattare questa parte in un capitolo a sé stante per la quantità di dati trattati e per la varietà di risultati ottenuti. Si riporta un resoconto dei dati di inventario modificati che differiscono dal caso dello studio di base, la valutazione dei danni e l'interpretazione dove sono riportati i risultati dell'analisi e i confronti tra i vari casi di seguito esposti.

L'analisi di sensibilità permette di valutare che peso ha la variazione di alcuni parametri che vengono ritenuti significativi sui risultati finali dello studio. Per eseguire una significativa analisi di sensibilità è necessario innanzitutto individuare quali sono i parametri che maggiormente possono influenzare i dati di inventario connessi al sistema oggetto di studio.

In considerazione del solo processo produttivo del pannello in lana di legno e cemento, possono essere diversi i fattori che influiscono sul miglioramento e sul raggiungimento di determinati obiettivi di sostenibilità ambientale. Sono stati valutati tre fattori:

- l'approvvigionamento di legname da fornitori specifici, certificati dal punto di vista della gestione forestale sostenibile e della distanza,
- l'autoproduzione di energia elettrica, in quanto l'azienda è orientata ad una produzione sostenibile, infatti acquista energia elettrica certificata proveniente da fonti rinnovabili e nel luglio 2011 ha installato un impianto fotovoltaico di autoproduzione,
- lo smaltimento degli scarti di produzione e del prodotto a fine vita.

7.1. *Approvvigionamento del legname*

Il sistema oggetto di studio è costituito dalle attività forestali di taglio, allestimento ed esbosco effettuate con diversi livelli di meccanizzazione dalle imprese boschive operanti nel territorio provinciale di Trento. L'obiettivo dello studio è la valutazione e l'analisi dei carichi ambientali ed energetici associati all'utilizzazione del legno, il confronto tra due diversi metodi di esbosco e la valutazione degli eventuali benefici ottenibili dall'introduzione in loco di mezzi pesanti quali harvester e forwarder.

La Figura 33 rappresenta schematicamente l'organizzazione dei cantieri forestali e le fasi analizzate nello studio.

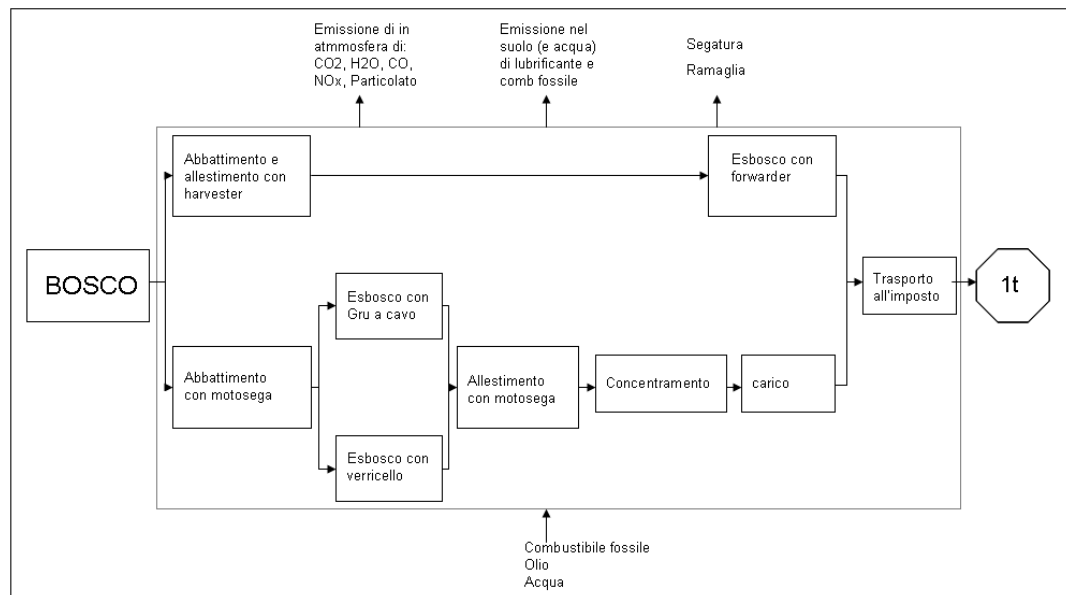


Figura 33 - Schema dei processi analizzati nello studio della filiera forestale.

Per quanto riguarda il processo di meccanizzazione tradizionale le fasi considerate sono sei:

1. abbattimento;
2. esbosco (con verricello o gru a cavo);
3. allestimento;

4. concentramento;
5. carico;
6. trasporto all'imposto.

Il secondo processo prevede l'utilizzo di mezzi pesanti, quali l'harvester e il forwarder. Questo tipo di meccanizzazione consente l'accorpamento di più operazioni, riducendo il numero di processi considerati in tre fasi:

1. abbattimento e allestimento;
2. esbosco;
3. trasporto all'imposto.

Ne consegue che i confini del sistema sono limitati alle fasi, citate in precedenza, di utilizzazione della materia prima e di trasporto fino all'imposto. Questa scelta, aderente alla realtà, è dovuta al fatto che il legno prevede diversi impieghi per la biomassa estratta, di conseguenza il modello così organizzato può essere ampliato e adattato alle esigenze del momento.

L'uso dei macchinari è stato incluso calcolando il consumo di carburante necessario per l'espletamento delle relative funzioni e le emissioni generate, mentre è stata esclusa la produzione degli stessi. Questa scelta è dovuta al fatto che l'inclusione dei macchinari nel sistema si presuppone abbia un'incidenza poco significativa, dato il tempo di vita piuttosto lungo e il numero elevato di operazioni eseguite durante gli anni di utilizzo. L'unità funzionale prescelta per questo studio è una tonnellata di legna e rappresenta l'unità di riferimento a cui tutti i flussi di dati afferenti al sistema verranno normalizzati.

7.1.1. Analisi dei dati

L'analisi d'inventario comprende la raccolta dei dati e i procedimenti di calcolo che consentono di quantificare i flussi in entrata e in uscita dal sistema oggetto di studio.

I dati raccolti possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- dati primari: provenienti da rilevamenti diretti;
- dati secondari: ricavati da letteratura e da database specifici, Ecoinvent [61], Buwal 250 [62], Manuale pratico, legno e cippato [69] e l'Ufficio Federale per l'Ambiente svizzero [70].
- da altri studi o manuali tecnici;
- dati terziari provenienti da stime, da dati relativi a simulazioni di laboratorio o derivati dall'applicazione di modelli.

In questo studio la raccolta dati si è realizzata attraverso indagini dirette, interviste ad operatori locali, analisi delle schede tecniche delle aziende produttrici dei macchinari. I dati si riferiscono alla quantità di legna utilizzata, ai macchinari coinvolti e al consumo del combustibile.

L'approssimazione data dalla scelta di un database svizzero per la valutazione delle emissioni è giustificata dall'assenza di database che raccolgono dati nazionali; inoltre risultano comunque compatibili con il caso in esame, vista la vicinanza geografica e la similitudine delle aree.

Nell'inventario vengono inclusi tutti i processi relativi all'estrazione e al trasporto della materia prima legna. Per ciascun processo vengono considerati il consumo di carburante, compreso il carico ambientale conseguente alla sua estrazione e lavorazione, l'utilizzo di olio lubrificante e le emissioni in atmosfera e nel suolo conseguenti al funzionamento delle macchine operatrici.

Le emissioni dei veicoli e delle attrezzature forestali sono state calcolate sulla base dei dati contenuti nel database svizzero [69], il quale fornisce i dati necessari per il calcolo delle emissioni inquinanti dei mezzi *off-road*. Questo rapporto quantifica le emissioni inquinanti e il consumo di carburante del settore non stradale in Svizzera. Detto settore comprende le macchine mobili e gli apparecchi di lavoro equipaggiati con un motore a combustione interna e non destinati al trasporto di persone e di merci sulla strada. I calcoli, che riguardano otto categorie di macchine e apparecchi, sono stati effettuati per il periodo dal 1980 al 2020, con particolare accento sul 2005 (anno di riferimento per la definizione degli obiettivi del pacchetto Energia-clima "20-20-20"). Il rapporto offre una panoramica del

settore non-stradale e, al contempo, funge da base tecnica per valutare possibili misure di riduzione dell'inquinamento atmosferico.

Il database fornisce i dati specifici relativi alle ore di esercizio (ore/macchina e anno di costruzione) e ai fattori di emissione (kg/ora) di macchine non stradali ed elettrodomestici. In particolare è possibile ricavare i dati, per mezzi dotati o meno di filtro antiparticolato, di idrocarburi (HC), monossido di carbonio (CO), ossidi di azoto (NO_x), particolato (PM), consumo di carburante (FC), anidride carbonica (CO₂). Dato che mezzi ed attrezzature utilizzate erano in media relativamente antiche, sono stati utilizzati i fattori di emissione relativi all'anno 2000, ad eccezione di quelli di harvester e forwarder per i quali si è optato per l'utilizzo di dati dell'anno 2005.

Il processo utilizzato nel codice di calcolo SimaPro per rappresentare la materia prima legno in ingresso, richiede che il valore dei dati di input sia in peso. Essendo in possesso del dato riguardante il volume del legname, è stato necessario calcolare la sua massa volumica, ovvero il rapporto tra il peso e il volume del corpo legnoso, secondo l'equazione:

$$Q_w = Q_0 [1 + (u/100)] / [1 + (\alpha_v/100)]$$

dove:

Q_w = massa volumica riferita allo stato idrico u [kg/m³]

Q_0 = massa volumica riferita allo stato anidro [kg/m³]

u = umidità del legno [%]

α_v = coefficiente di rigonfiamento volumetrico totale [%]

I valori di Q_0 e di α_v dipendono dalla specie legnosa considerata. L'umidità del legno è stata assunta pari all' 80%.

Tabella 22 - Massa volumica, fattore di rigonfiamento e ritiro volumetrico dell'Abete rosso

Specie	q_w [kg/m ³]	q_0 [kg/m ³]	α_v [%]
Abete rosso	810	450	20,4

La massa volumica media dell'Abete rosso con contenuto di umidità dell'80% è di 810 kg/m³. Per quanto riguarda il calcolo del volume dendrometrico e corno metrico si è fatto riferimento alle specifiche tavole stereometriche e alsometriche [71]. Il diametro medio degli alberi presenti nell'area di interesse era di 80 cm. Ne consegue che il volume dendrometrico (ossia quello che comprende fusto, corteccia, cimale e rami) era di circa 0,795 m³ (pari a 0,644 tonnellate) mentre quello cormometrico (fusto e corteccia) era di circa 0,572 m³ (pari a 0,463 tonnellate), che equivale a una diminuzione del 28% circa. Tramite una proporzione, si calcola che è necessario abbattere una quantità pari a 1,39 tonnellate per ottenere 1 tonnellata di legname utilizzabile.

Meccanizzazione tradizionale

Il seguente paragrafo è volto a illustrare i dati di inventario considerati per la modellazione dello schema di utilizzazione. Sono state considerate 4 diverse operazioni di esbosco:

- con gru a cavo dopo l'allestimento
- con gru a cavo prima l'allestimento
- con verricello dopo l'allestimento
- con verricello prima l'allestimento

Le diverse opzioni di intervento, sono state valutate e confrontate al fine da determinare quali avessero un minore impatto sull'ambiente.

I dati di inventario relativi alle diverse situazioni operative e ai diversi metodi utilizzati, sono riassunte nella Tabella 23. Questi rappresentano i

dati di input al codice di calcolo Simapro 7.3 per il processo meccanizzazione tradizionale.

Tabella 23 - Dati di inventario riassuntivi inseriti per i processi relativi alla meccanizzazione tradizionale, in ore per tonnellata di legname ottenuta

Modalità operativa di esbosco (ore di lavoro per ton di legname)				
Fasi	Gru a cavo, pre- allestimento	Gru a cavo, post- allestimento	Verricello, pre- allestimento	Verricello, post- allestimento
Abbattimento	0,107	0,107	0,107	0,107
Esbosco	0,035	0,009	0,059	0,0188
Allestimento	0,083	0,083	0,083	0,083
Accatastamento	0,078	0,078	0,078	0,078
Carico	0,019	0,019	0,019	0,019
Trasporto all'imposto	0,098	0,098	0,098	0,098

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le operazioni svolte, sia in termini di consumi di combustibile, che di emissioni, dei macchinari utilizzati. I dati di input all'inventario di ciascun processo, vengono illustrati nella Tabella 24.

Tabella 24 - Dati di inventario inseriti per i processi relativi alla meccanizzazione tradizionale, in kg per ora di lavoro

Dati di input al processo in kg per 1 h di lavoro								
Fasi	Gasolio	Benzina	Olio	HC	CO	NOx	CO ₂	PM
Abbattimento	-	2.35	1.35	0.9110	2.0864	0.0063	7.1262	-
Esbosco (Gru a cavo)	4,95 ¹			0.0214 ¹	0.1217 ¹	0.2169 ¹	17.3507 ¹	0.0131 ¹
(Verricello)	5,36 ²	-	-	0.0184 ²	0.0922 ²	0.1295 ²	11.1713 ²	0.0139 ²
Allestimento	-	2.35	1.35	0.9110	2.0864	0.0063	7.1262	-
Accatastamento	13,2	-	-	0.0502	0.2880	0.5185	32.0325	0.0310
Carico	6,6	-	-	0.0227	0.1137	0.1606	12.7339	0.0171
Trasporto a imposto	6,6	-	-	0.0227	0.1137	0.1606	12.7339	0.0171

¹ Gru a cavo

² Verricello

Abbattimento

Per le operazioni di abbattimento dei tronchi viene utilizzata una motosega da 50 cm³. I dati rilevati sul campo riguardano:

- produttività media giornaliera: 30 t/operaio/giorno
- consumo giornaliero e orario di benzina: 7 l/giorno e 2,35 kg/h
- consumo giornaliero di olio combustibile: 3,5 l/giorno
- densità della benzina: 0,78 kg/l
- densità olio: 0,9 kg/l

L'unità funzionale per questo processo è un'ora di lavoro, quindi tutti i dati di input relativi all'abbattimento (emissioni e consumo di combustibile), vengono normalizzati a un'ora ed espresse in kg, come richiesto dal codice di calcolo Simapro.

Il consumo orario di benzina è noto, così come le emissioni, che nel database sono tutte espresse come kg di sostanza emessa in un'ora. Rimane incognito solo il consumo orario di olio in kg. Si procede quindi calcolando la quantità oraria di benzina consumata in litri e successivamente dividendola per il totale utilizzato in un giorno. Questo risultato rappresenta le ore di funzionamento giornaliero della motosega per l'abbattimento. In cifre si ottiene: h funzionamento giornaliero = $7/3,01=2,32$ h/d

Conoscendo le ore di funzionamento giornaliero, è possibile calcolare il consumo orario di olio pari a: consumo orario olio = $3,5*0,9/2,32=1,35$ kg/h.

Per quanto riguarda le emissioni, queste sono inserite così come riportate nel database. Si considera inoltre che tutto l'olio utilizzato per la lubrificazione della catena finisca nel suolo.

Per conoscere il numero di ore dell'operazione necessarie per ottenere una tonnellata di legna, è necessario dividere le ore di funzionamento giornaliero per la produttività, considerando i tronchi senza la cima e i rami.

h di funzionamento per 1 ton = $2,32/(30*0,72)=0,107$ h

Esbosco

Questa operazione costituisce la prima fase di confronto dello studio. In particolare il confronto è stato effettuato tra l'esbosco mediante una gru a cavo della ditta Valentini modello V 400 e l'esbosco con un verricello della ditta Tajfun modello EGV 35 A. Per conoscere il consumo orario dei due macchinari è stato consultato il manuale [69] da cui si ricava che la gru a cavo ha un consumo orario di 6 l di gasolio, mentre per il verricello è stato assunto di 6,5 l. Per quanto riguarda le emissioni, il database [70] distingue a seconda della potenza delle macchine, quindi bisogna tenere presente che mentre la gru a cavo richiede l'ausilio di un trattore con motore da 77 kW mentre per il verricello ne è richiesto uno da 22 kW. I dati orari di consumo ed emissione sono riportati in Tabella 24.

Dato che le condizioni di esbosco sono fortemente influenzate dalla morfologia del territorio, e quindi variano notevolmente da cantiere a cantiere, sono stati analizzati due scenari distinti in modo da poter calcolare il tempo necessario all'esbosco di 1 t. In entrambe le valutazioni è stata eseguita sulla base dei dati tecnici delle attrezzature sopra citate e considerando una distanza di esbosco pari a 200 m.

Nel primo scenario si è considerato l'esbosco di un'unica pianta per volta, ricadendo quindi nel caso in cui l'esbosco venga seguito dalla fase di allestimento. Questa ipotesi si verifica in tutte quelle situazioni in cui la morfologia dell'area non permette di effettuare l'allestimento direttamente sul letto di caduta. Risulta quindi necessario esboscare una pianta per volta in quanto in caso contrario, i rami si intreccerebbero tra loro rendendo difficile la gestione delle fasi successive. L'operazione di esbosco di un tronco (0,795 t) con gru a cavo (velocità 4 m/s), viene realizzata in 0,028 h, considerando il viaggio di andata e ritorno. Ne consegue che per 1 t, è necessario un tempo di 0,035 h. Se l'esbosco viene effettuato con il verricello (velocità 1,2 m/s), il tempo necessario per compiere la stessa operazione sarà di 0,046h per un tronco e 0,059 h per 1 t.

Il secondo scenario considera invece il caso in cui l'allestimento precede la fase di esbosco. In queste condizioni è quindi possibile sfruttare la maggior forza di tiro della strumentazione (circa 3,1 t con la gru a cavo e circa 2,5 t con il verricello). L'operazione di esbosco avviene sfruttando la forza di tiro delle due macchine, quindi, si avrà un tempo di esbosco con gru a

cavo di 0,028 h per 3,1 t e di 0,009 h per 1 t, mentre con il verricello il tempo necessario è di 0,046 h per 2,5 t e di 0,0188 h per 1 t.

Allestimento

Questo processo è stato creato in modo analogo a quello dell'abbattimento.

Per le operazioni di allestimento dei tronchi viene utilizzata una motosega da 50 cm³. I dati rilevati sul campo riguardano:

- produttività media giornaliera: 20 t/operaio/giorno
- consumo giornaliero e orario di benzina: 5 l/giorno e 2,35 kg/h
- consumo giornaliero di olio combustibile: 2,5 l/giorno
- densità della benzina: 0,78 kg/l
- densità olio: 0,9 kg/l

L'unità funzionale per questo processo è un'ora di lavoro, quindi tutti i dati di input relativi all'allestimento (emissioni e consumo di combustibile), vengono normalizzati a un'ora ed espresse in kg, come richiesto dal codice di calcolo Simapro.

Il consumo orario di benzina è noto, così come le emissioni, per il consumo orario di olio si è proceduto tramite le ore di funzionamento giornaliero della motosega per l'abbattimento: h funzionamento giornaliero = $5/3,01=1,66$ h/d. Conoscendo le ore di funzionamento giornaliero, è possibile calcolare il consumo orario di olio pari a: consumo orario olio = $2,5*0,9/1,66=1,35$ kg/h.

Per quanto riguarda le emissioni, queste sono inserite così come riportate nel database. Anche in questo caso si considera che tutto l'olio utilizzato per la lubrificazione della catena finisca nel suolo. Tutti i dati del processo sono riportati nella Tabella 24.

Per conoscere il numero di ore dell'operazione necessarie per ottenere una tonnellata di legna, è necessario dividere le ore di funzionamento giornaliero per la produttività. h di funzionamento per 1 ton = $1,66/20=0,083$ h

Questo processo è stato creato in modo analogo a quello di abbattimento. Dato che qui la produttività giornaliera per operatore è di 20 t, il consumo giornaliero di benzina è di 5 l e quello di olio è di 2,5 l (dati forniti da impresa boschiva), si ricava che una tonnellata di legname viene prodotta in 0,083 h.

Accatastamento

Per questa fase si è considerato un escavatore Komatsu modello PC 75 UU-2.

I dati rilevati sul campo riguardano:

- produttività media giornaliera: 20 t/operaio/giorno
- consumo giornaliero di gasolio: 25 l/giorno
- densità del gasolio: 0,85 kg/l

L'unità funzionale per questo processo è un'ora di lavoro, quindi tutti i dati di input relativi all'allestimento (emissioni e consumo di combustibile), vengono normalizzati a un'ora ed espresse in kg, come richiesto dal codice di calcolo Simapro.

Dal manuale [69] si assume un consumo di orario per l'escavatore di 16 l, mentre per le emissioni si fa sempre riferimento alla Tabella 24. Per il calcolo del tempo impiegato all'accatastamento di 1 t, si ha:

$h \text{ funzionamento giornaliero} = 25/16 = 1,56 \text{ h/d}$

$h \text{ funzionamento per } 1 \text{ t} = 1,56/20 = 0,078 \text{ h}$.

Carico

Per le operazioni di carico si considera un trattore Agropius 80 con rimorchio dotato di gru di carico Icar Bazzoli modello IB 6500. L'unità funzionale per questo processo è un'ora di lavoro, quindi tutti i dati di input relativi (emissioni e consumo di combustibile), vengono normalizzati a un'ora ed espresse in kg, come richiesto dal codice di calcolo Simapro.

Dal manuale [69] si assume un consumo di orario per l'escavatore di 8 l (equivalente a 6,6 kg di gasolio), per le emissioni si fa riferimento ai fattori emissivi orari della Tabella 24. È stato osservato che il tempo medio necessario per caricare un tronco (0,795 t) è di 0,011 h, da cui ne consegue un tempo per tonnellata pari a 0,019h.

Trasporto all'imposto

Il trasporto viene effettuato col medesimo trattore dotato di rimorchio della fase precedente, quindi i dati di input relativi a consumo orario di diesel ed emissioni sono i medesimi. La capacità di questi rimorchi varia da 3 a 8 t. Visto che il trattore deve percorrere una parte di strada carrabile e che il trasporto massimo consentito per i trattori su queste strade è di 3,5 t, nello studio si ipotizza che vengano trasportate 3,5 t di legname.

Sapendo che la velocità massima di questo mezzo è 40 km/h si assume una velocità media di crociera pari a 30 km/h. Il tempo necessario a coprire i 5 km che intercorrono tra il cantiere e l'imposto sarà quindi 0,17 h per trasportare 3,5 t, i quali equivalgono a un tempo di 0,098h per tonnellata.

Meccanizzazione spinta

In questo paragrafo verranno descritte le varie fasi della filiera a meccanizzazione spinta e le ipotesi fatte. Gli interventi sono stati realizzati da un harvester e un forwarder acquistati nell'anno 2005. Nella Tabella 25, vengono riassunti i dati relativi alle ore operative necessarie per ottenere una tonnellata di legname, distinti per fase. Questi rappresentano i dati di input al codice di calcolo Simapro 7.3 per il processo di meccanizzazione spinta.

Tabella 25 - Dati di inventario riassuntivi per i processi relativi alla meccanizzazione spinta, in ore per tonnellata di legname ottenuta

Fasi	Quantità	u.m.
Harvester (A+A)	0,072	h
Forwarder	0,071	h
Trasporto all'imposto con forwarder	0,098	h

Di seguito vengono descritte nel dettaglio le operazioni svolte, sia in termini di consumi di combustibile, che di emissioni, dei macchinari utilizzati. I dati di input all'inventario di ciascun processo, vengono illustrati nella Tabella 26.

Tabella 26 - Dati di inventario inseriti per i processi relativi alla meccanizzazione spinta, in ore per tonnellata di legname ottenuta

Dati di input al processo in kg per 1h di lavoro

Fasi	Gasolio	HC	CO	NOx	CO ₂	PM
Abbattimento e Allestimento	10.2	0.0545	0.3157	0.6353	50.7378	0.0346
Esbosco e Carico	9.35	0.0410	0.2195	0.3950	32.0325	0.0262
Trasporto all'imposto	9.35	0.0410	0.2195	0.3950	32.0325	0.0262

Abbattimento e allestimento

Le operazioni di abbattimento e allestimento vengono a coincidere quando si utilizza un harvester. Nel caso considerato è stato utilizzato un harvester pesante John Deere 1270 D. Il consumo orario di gasolio per questo tipo di macchinario è di 10 kg, mentre per i fattori emissivi ci si riferisce ancora a una volta alla Tabella 26. Anche il dato relativo al tempo impiegato per processare una tonnellata è facilmente ricavabile dai dati in possesso: la produttività media registrata durante questo studio è di 13,9 m³/h (pari a 13,9 t), da cui è ricavato un tempo impiegato per 1 t, pari a 0,072 h.

Esbosco e carico

Queste operazioni sono state eseguite con un forwarder medio John Deere 1110 D. Il consumo orario di gasolio per questo tipo di macchinario è di 9,35 kg, mentre per i fattori emissivi ci si riferisce ancora a una volta alla Tabella 26. Conoscendo la produttività (14 m³/h), analogamente a quanto illustrato precedentemente si ricava il tempo necessario a raccogliere 1 tonnellata di legname (0,071 h).

Trasporto all'imposto

Le considerazioni fatte per questa fase sono le stesse già discusse per il trasporto nel caso 1, ma in questo caso si considera che esso avvenga per mezzo del forwarder utilizzato nel punto precedente.

7.1.2. Valutazione degli impatti

I risultati della valutazione d'impatto si riferiscono agli impatti potenziali su diversi ambiti ambientali e vengono calcolati attraverso specifici indicatori. In questo studio si sono considerati solo impatti potenziali al livello del cosiddetto midpoint. In altre parole, tali indicatori si riferiscono all'incremento marginale dei principali fattori di impatto, ma non considerano né i superamenti di soglia, né i margini di sicurezza o rischio (tipici delle valutazioni a livello di endpoint). Tale scelta è giustificata dalla ancora relativa immaturità dei metodi di endpoint e dalla maggiore confrontabilità degli indicatori di midpoint tra diversi studi.

Il metodo di valutazione prescelto per questo studio è ReCiPe 2008, che considera le categorie di impatto esplicitate in Tabella 27.

Tabella 27 - Categorie di impatto considerate, descrizione e unità di misura

<u>Categoria d'impatto</u>	<u>Unità</u>	<u>Descrizione</u>
<i>Climate change</i>	kg CO ₂ eq	Cambiamenti climatici - misura l'effetto marginale dovuto all'emissione aggiuntiva di una piccola quantità di CO ₂ in atmosfera
<i>Ozone depletion</i>	kg CFC-11 eq	Esaurimento ozono - misura relativa della capacità di una sostanza nociva di impoverire lo strato di ozono
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq	Tossicità umana - effetti carcinogeni e non carcinogeni delle sostanze sull'uomo
<i>Photochemical oxidant formation</i>	kg NMVOC	Formazione smog fotochimico - misura degli effetti sulla salute umana dovuti alla formazione di ozono a partire da NO _x e Non Methan Volatile Organic Compounds

<i>Particulate matter formation</i>	kg PM ₁₀ eq	Formazione particolato - misura degli effetti sulla salute umana dovuti alla formazione di PM ₁₀
<i>Ionising radiation</i>	kg U ₂₃₅ eq	Radiazioni ionizzanti - misura dei danni sulla salute umana dovuti al rilascio di materiale radioattivo nell'ambiente
<i>Terrestrial acidification</i>	kg SO ₂ eq	Acidificazione dei suoli - variazione dal valore ottimale di acidità del terreno
<i>Freshwater eutrophication</i>	kg P _{eq}	Eutrofizzazione delle acque dolci - eccessivo arricchimento di nutrienti
<i>Marine eutrophication</i>	kg N _{eq}	Eutrofizzazione delle acque marine - eccessivo arricchimento di nutrienti
<i>Terrestrial ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB _{eq}	Ecotossicità dei suoli - misura degli effetti tossici dovute all'apporto di sostanze chimiche (tossiche) nei suoli
<i>Freshwater ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB _{eq}	Ecotossicità delle acque dolci - misura degli effetti tossici dovute all'apporto di sostanze chimiche (tossiche) nei suoli
<i>Marine ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB _{eq}	Ecotossicità delle acque marine - misura degli impatti legati all'apporto di metalli negli oceani
<i>Agricultural land occupation</i>	m ² a	Occupazione dei suoli agricoli - misura dei danni agli ecosistemi dovuti agli effetti dell'occupazione di suolo
<i>Urban land occupation</i>	m ² a	Occupazione dei suoli urbani - misura dei danni agli ecosistemi dovuti agli effetti dell'occupazione del suolo
<i>Natural land transformation</i>	m ²	Trasformazione delle aree naturali - misura dei danni agli ecosistemi dovuti agli effetti di trasformazione del suolo
<i>Water depletion</i>	m ³	Esaurimento di acqua - Quantità di acqua utilizzata

<i>Metal depletion</i>	kg Fe _{eq}	Esaurimento delle risorse minerali - quantità di risorse minerali estratte
<i>Fossil depletion</i>	kg oil _{eq}	Esaurimento delle risorse fossili - quantità di risorse fossili estratte

I risultati sono stati elaborati sia per la fase di caratterizzazione che di normalizzazione.

La caratterizzazione permette di quantificare gli impatti, per ciascuna categoria, imputabili ai diversi processi che costituiscono il sistema. Dal momento che ciascuna categoria di impatto utilizza indicatori specifici, non è possibile un confronto diretto tra le categorie. Il confronto si realizza a seguito di una normalizzazione, attraverso la quale si analizza il peso relativo di ogni categoria e si individuano quelle che hanno effettivamente potenziali impatti maggiori.

La Tabella 28 e il Grafico 14 mostrano i risultati ottenuti dal confronto delle diverse modalità operative. In questa analisi non sono state considerate tutte le categorie elencate nel paragrafo precedente, bensì solo quelle per cui sono stati riscontrati valori degli indicatori diversi da 0. Rimangono escluse pertanto le categorie: *ionising radiation, agricultural land occupation, urban land occupation, natural land transformation e metal depletion*.

Valutando l'incidenza sulle singole categorie, le opzioni maggiormente impattanti appaiono la meccanizzazione tradizionale con esbosco tramite verricello pre-allestimento (cioè l'esbosco tramite verricello che precede la fase di allestimento) e la meccanizzazione spinta. La prima risulta avere il carico ambientale maggiore per: *ozone depletion, human toxicity, freshwater eutrophication, terrestrial ecotoxicity, freshwater ecotoxicity, marine ecotoxicity e fossil depletion*. La meccanizzazione spinta appare maggiormente incidente nelle categorie *climate change, photochemical oxidant formation, particulate matter formation, terrestrial acidification e marine eutrophication*, mentre nelle altre risulta sempre essere l'opzione preferibile.

I risultati appaiono coerenti: difatti l'utilizzo del verricello prima dell'allestimento, non consente di utilizzare al pieno le potenzialità del mezzo, dato che non viene sfruttata a pieno la forza di tiro, e allunga notevolmente i tempi, in quanto il verricello è il mezzo più lento. Ne consegue

un numero maggiore di ore per svolgere le operazioni e, quindi, un maggiore consumo di carburante, che rende assolutamente preferibile l'ipotesi di precedere la fase di allestimento.

La modalità operativa migliore appare quella in cui viene utilizzata la gru a cavo dopo l'allestimento.

La meccanizzazione spinta appare una modalità attraente per alcune categorie di impatto, in ragione dei limitati consumi di carburante e dell'alta produttività, ma particolarmente critica per altre, a causa dell'importante contributo emissivo.

Nelle condizioni attuali, la meccanizzazione tradizionale appare meno impattante, ma con un opportuno controllo delle emissioni del motore e con l'entrata in vigore di normative sempre più stringenti, l'utilizzo della meccanizzazione spinta potrebbe diventare l'alternativa preferibile.

Tabella 28 - Caratterizzazione dei risultati per il confronto delle diverse modalità operative per le categorie di impatto considerate

Categoria d'impatto	Unità	Meccanizzazione spinta	Gru a cavo postallestimento	Gru a cavo preallestimento	Verricello postallestimento	Verricello preallestimento
<i>Climate change</i>	kg CO ₂ eq	8,35E+00	7,09E+00	7,61E+00	7,17E+00	7,73E+00
<i>Ozone depletion</i>	kg CFC-11 eq	7,26E-06	8,45E-06	8,85E-06	8,62E-06	9,30E-06
<i>Human toxicity</i>	kg 1,4-DB eq	1,50E-01	1,81E-01	1,89E-01	1,84E-01	1,98E-01
<i>Photochemical oxidant form.</i>	kg NMVOC	1,39E-01	9,62E-02	1,03E-01	9,73E-02	1,05E-01
<i>Particulate matter form.</i>	kg PM ₁₀ eq	2,74E-02	1,72E-02	1,86E-02	1,73E-02	1,87E-02

<i>Terrestrial</i>							
<i>acidification</i>	kg SO ₂ eq	7,30E-02	4,82E-02	5,19E-02	4,87E-02	5,25E-02	
<i>Freshwater</i>							
<i>eutrophication</i>	kg P eq	1,09E-06	1,41E-06	1,47E-06	1,44E-06	1,54E-06	
<i>Marine</i>							
<i>eutrophication</i>	kg N eq	4,67E-02	2,77E-02	3,01E-02	2,80E-02	3,03E-02	
<i>Terrestrial</i>							
<i>ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB eq	3,09E-05	4,10E-05	4,27E-05	4,18E-05	4,47E-05	
<i>Freshwater</i>							
<i>ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB eq	2,15E-03	2,50E-03	2,62E-03	2,56E-03	2,76E-03	
<i>Marine</i>							
<i>ecotoxicity</i>	kg 1,4-DB eq	1,37E-03	1,68E-03	1,75E-03	1,71E-03	1,84E-03	
<i>Fossil</i>							
<i>depletion</i>	kg oil eq	2,68E+00	3,13E+00	3,28E+00	3,19E+00	3,44E+00	

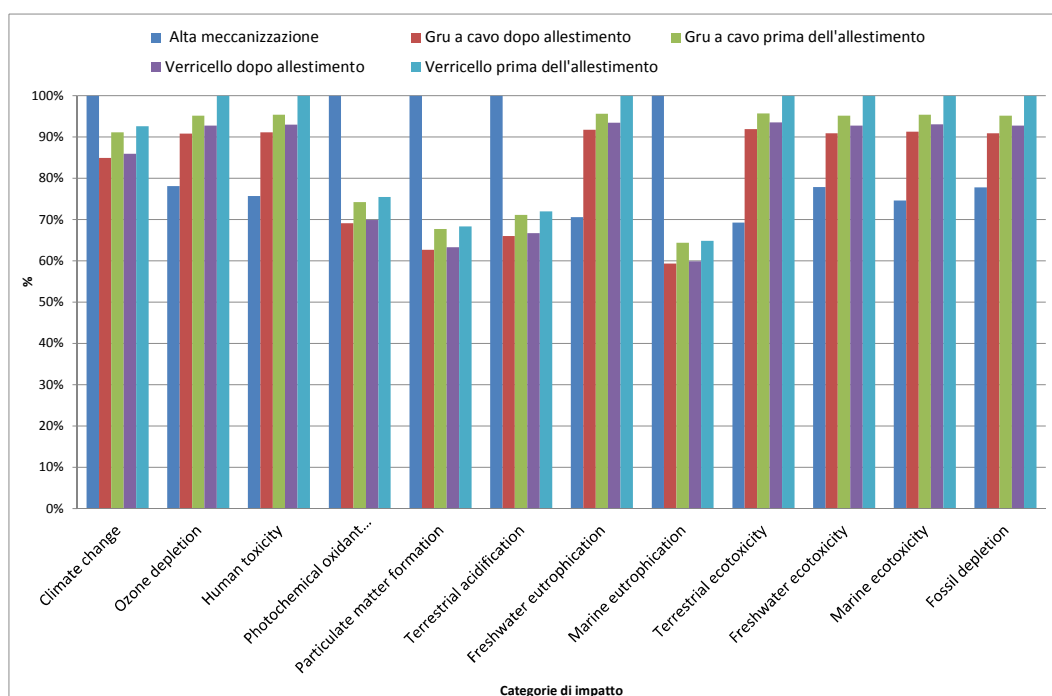


Grafico 14 - Confronto tra le diverse modalità operative di estrazione del legname, caratterizzazione degli impatti Recipe 2008

Il Grafico 15 mostra i risultati ottenuti dopo la fase di normalizzazione e permette di evidenziare le categorie di impatto con un peso relativo maggiore. Come è possibile notare, le categorie con peso relativo maggiore sono quattro: *photochemical oxidant formation*, *particulate matter formation*, *terrestrial acidification*, *marine eutrophication* e *fossil depletion*, per tutte l'incidenza della meccanizzazione spinta è particolarmente significativa.

L'ipotesi di eseguire le operazioni tramite meccanizzazione tradizionale, specialmente con gru a cavo dopo allestimento, appare pertanto la via preferibile.

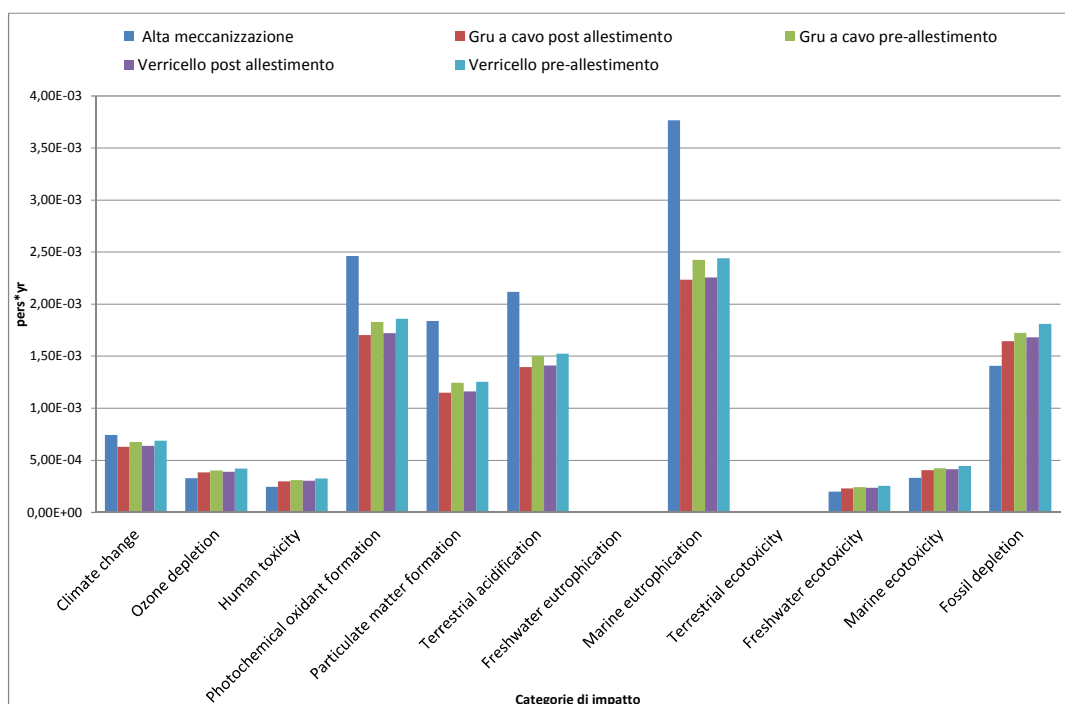


Grafico 15 - Confronto tra le diverse modalità operative di estrazione del legname, normalizzazione degli impatti Recipe 2008

7.2. *Produzione di energia elettrica*

La produzione di energia elettrica è di grande importanza, poiché si ripercuote sugli impatti ambientali in generale assegnati al consumo di energia. È stata condotta una analisi di sensibilità per valutare la dipendenza dalla produzione di energia elettrica. Sono stati considerati due scenari:

- Scenario A, corrispondente a quello in essere, riportato in Tabella 17,
- Scenario B, corrispondente ad una autoproduzione a regime.

Nella Tabella 29 si riportano i consumi registrati nel periodo considerato 2010-2011 e la relativa fonte di approvvigionamento, e a parità di consumi quella autoprodotta dall'impianto fotovoltaico se fosse stato a regime. I dati di autoproduzione sono confortati dalle quantità di kWh registrate nel secondo semestre 2011 e per tutto l'anno 2012. Il distributore di energia elettrica assicura una fonte di produzione di energia del 28,7% da fonti rinnovabili (principalmente idroelettrico).

Tabella 29 - Quantitativi di energia elettrica considerata per il biennio 2010-2011

Energia elettrica	Quantità reali	Quantità ipotetiche
Totale	4.262.246 kWh	4.262.246 kWh
di cui non rinnovabili	2.765.771 kWh	2.440.910 kWh
di cui rinnovabili	1.286.772 kWh	982.526 kWh
di cui autoprodotta	209.703 kWh	838.810 kWh

La Tabella 30 riporta i dati d'inventario inseriti nel software con le quantità di kWh unitarie considerando le differenti fonti di produzione di energia.

Products			
wwcb con fotovoltaico e idroelettrico	1 kg	100 non definito	Wood
Avoided products			
Electricity, medium voltage, at grid/IT U	0,01140	kWh	Non definito
Resources			
Water, groundwater consumption	0,28658	kg	Non definito
Materials/fuels			
Industrial wood, softwood, under bark, u	0,41731	dm3	Non definito
Portland cement, strength class Z 42.5, α	0,40647	kg	Non definito
Limestone, milled, loose, at plant/CH U	0,14997	kg	Non definito
Sodium formate, reaction of formaldehyd	0,00301	kg	Non definito
Calcium chloride, CaCl ₂ , at plant/RER U	0,00319	kg	Non definito
Alkylbenzene, linear, at plant/RER U	0,00095	kg	Non definito
Packaging, corrugated board, mixed fibre	0,00053	kg	Non definito
Packaging film, LDPE, at plant/RER U	0,00014	kg	Non definito
Electricity/heat			
Electricity, medium voltage, at grid/IT U	0,02584	kWh	Non definito
Heat, natural gas, at boiler modulating >	0,35113	MJ	Non definito
Transport, lorry >32t, EURO3/RER U	120,4	kgkm	Non definito
Electricity, hydropower, at power plant/I	0,02071	kWh	Non definito
Emissions to air			
Methanol	0,00627	g	Non definito
Dimethyl formamide	0,00208	g	Non definito
2-Butoxyethanol acetate	0,00170	g	Non definito
Benzene, ethyl-	0,00015	g	Non definito
Isopropyl acetate	0,00055	g	Non definito
Acetone	0,00050	g	Non definito
Ethanol	0,00029	g	Non definito
Heptane	0,03156	g	Non definito
Particulates, unspecified	0,01094	g	Non definito
Emissions to water			
Emissions to soil			
Final waste flows			
Wood, sawdust	0,01566	kg	Non definito
Rejects	0,01450	kg	Non definito
Packaging waste, unspecified	0,00003	kg	Non definito

Tabella 30 - Dati d'inventario con differenti produzioni di energia

I grafici seguenti rappresentano il confronto fra il processo produttivo del pannello di lana di legno e cemento considerato nel capitolo precedente rispetto ad un processo che utilizza energia elettrica prodotta con un impianto fotovoltaico. Essi sono stati realizzati mediante il processo di normalizzazione, attraverso il quale si analizza il peso relativo di ogni categoria e si individuano quelle che hanno beneficiato un impatto potenziale minore.

Il Grafico 16 considera le tre macrocategorie di danno, si evince che la categoria *Resources* ha usufruito di un minor depauperamento delle risorse petrolifere largamente utilizzate per la produzione di energia elettrica. Questo vantaggio si ripercuote anche per la Salute umana a causa delle emissioni in atmosfera che arrecano effetti inquinanti. Mentre per la Qualità dell'ecosistema il confronto risulta quasi irrilevante.

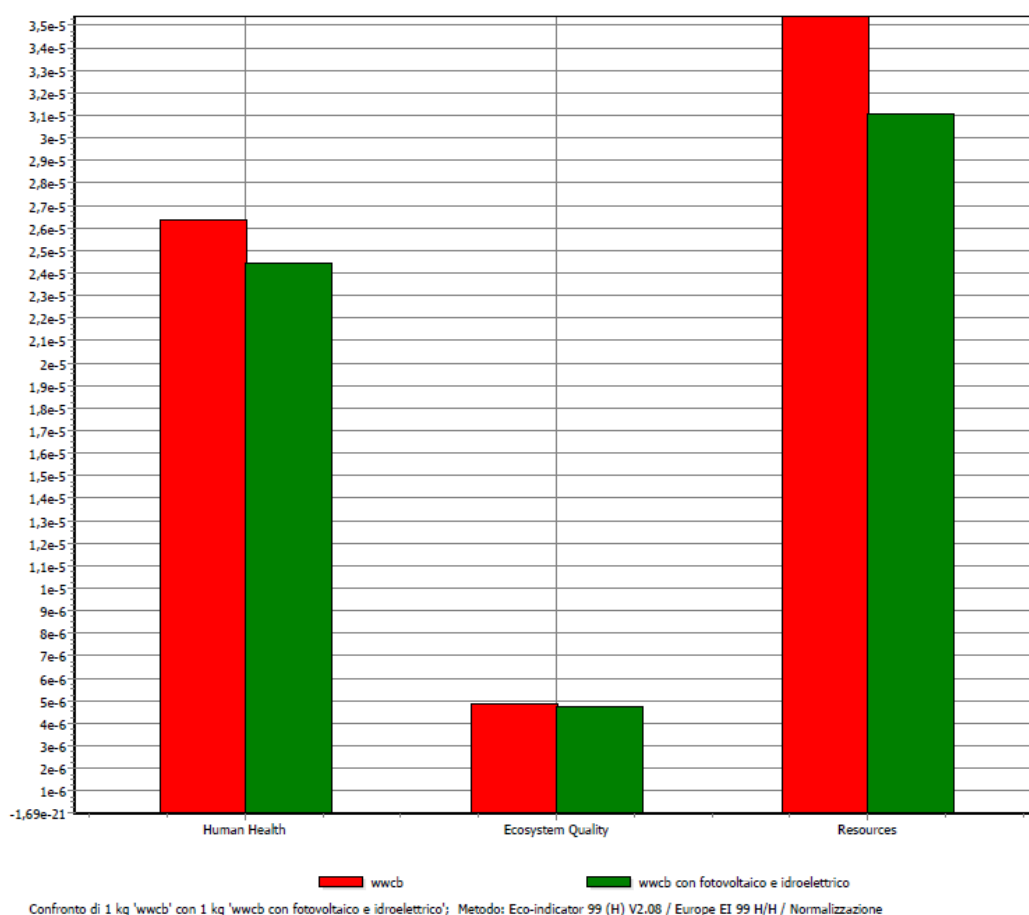


Grafico 16 - Confronto fra diverse produzioni di energia elettrica, per categorie di danno, Normalizzazione Ecoindicator99

Nel dettaglio si può notare con il Grafico 17 che le categorie d'impatto maggiormente coinvolte sono: *Fossil fuel*, *Respiration inorganics* e *Climate change*. Tutte e tre sono fortemente correlate in quanto un maggior consumo di combustibili fossili genera delle emissioni in atmosfera che alterano il clima e danneggiano la salute umana a causa della respirazione di so-

stanze inorganiche. Ovviamente il profilo ambientale migliore è a beneficio del processo che utilizza produzioni di energia elettrica diversificate. Risulta, anche se in piccola proporzione, un minor impatto a causa delle sostanze cancerogene.

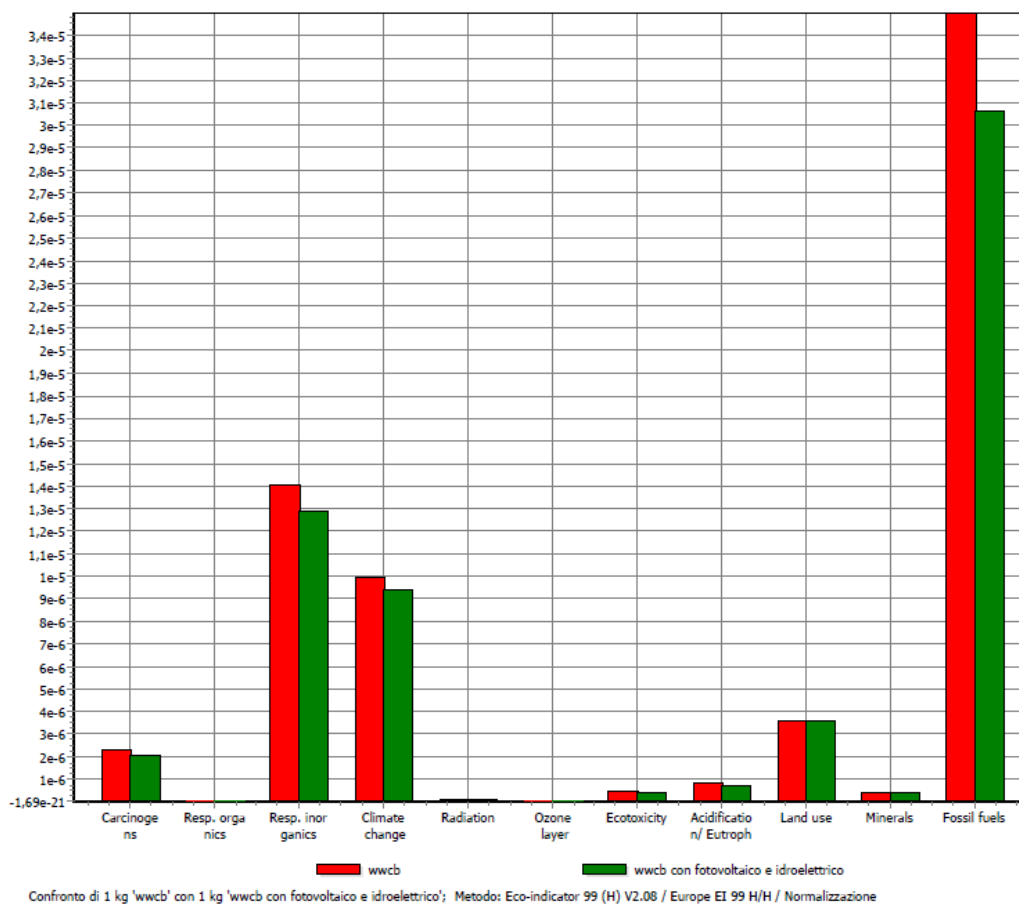


Grafico 17 - Confronto fra diverse produzioni di energia elettrica, per categorie d'impatto, Normalizzazione Ecoindicator99

7.1. Smaltimento degli scarti di produzione

Lo smaltimento degli scarti di produzione è un tema molto sentito dall'azienda che negli anni ha visto cambiare gli scenari di smaltimento a seguito di autorizzazioni e revoche alla destinazione dei propri scarti. È stata condotta una analisi di sensibilità per analizzare i profili ambientali tra il sistema ora in uso, ma non discriminante, come quello dell'invio in

discarica, il riciclo come componente di un fertilizzante e la termovalorizzazione. Sono stati considerati tre scenari:

- Scenario A, discarica,
- Scenario B, in cui il materiale di scarto viene riciclato nella formulazione di fertilizzanti organo minerali con lo scopo di incrementare il contenuto in carbonio organico e controllare l'umidità media della miscela da avviare al processo di pellettatura,
- Scenario C, termovalorizzazione.

I tre scenari si differenziano per la destinazione in discarica, riciclo e termovalorizzazione degli scarti e rifiuti prodotti durante il processo di produzione, essi sono elencati nella:

Tabella 7 - Quantitativi di segatura prodotta nel biennio 2010-2011

Tabella 12 - Quantitativi di sfridi e scarti di pannello nel biennio 2010-2011

Tabella 14 - Quantitativi dei rifiuti d'imballaggio prodotti nel biennio 2010-2011

I grafici seguenti rappresentano il confronto fra i tre scenari di smaltimento. Anch'essi sono stati realizzati mediante il processo di normalizzazione, attraverso il quale si analizza il peso relativo di ogni categoria e si individuano quelle che hanno beneficiato un impatto potenziale minore.

Il Grafico 18 che considera le tre macrocategorie di danno, propone un confronto senza differenze. Questa indifferenza dei tre scenari di smaltimento è confermata dal Grafico 19. La spiegazione risiede in tre considerazioni:

- le quantità di sfridi, scarti e rifiuti sono contenute rispetto a quelle complessive del processo produttivo;
- la qualità degli sfridi, degli scarti e dei rifiuti è molto poco impattante sia che vengano inviati in discarica piuttosto che alla termovalorizzazione o al riciclo. Si tratta infatti di materiali inerti come il cemento, il legno o gli imballaggi;

- il software, o meglio la norma ISO [34], prevede che i benefici dell'utilizzo dei materiali riciclati sia allocata al prodotto che impiega materiali riciclati e non a chi li produce. Si pensi, infatti, che le risorse e l'energia impiegate sono proporzionali alla quantità di sfridi o scarti prodotti per cui sarebbe un contro senso produrre più scarti riciclabili.

Quanto attiene agli oneri ambientali non attiene a quelli economici, infatti il costo di uno smaltimento in discarica è ben diverso da una vendita come sottoprodotto.

Si registra un lieve beneficio a favore del riciclo per la categoria *Human health*, in quanto, a differenza dello smaltimento in discarica e alla termovalorizzazione, non sono previste emissioni inquinanti.

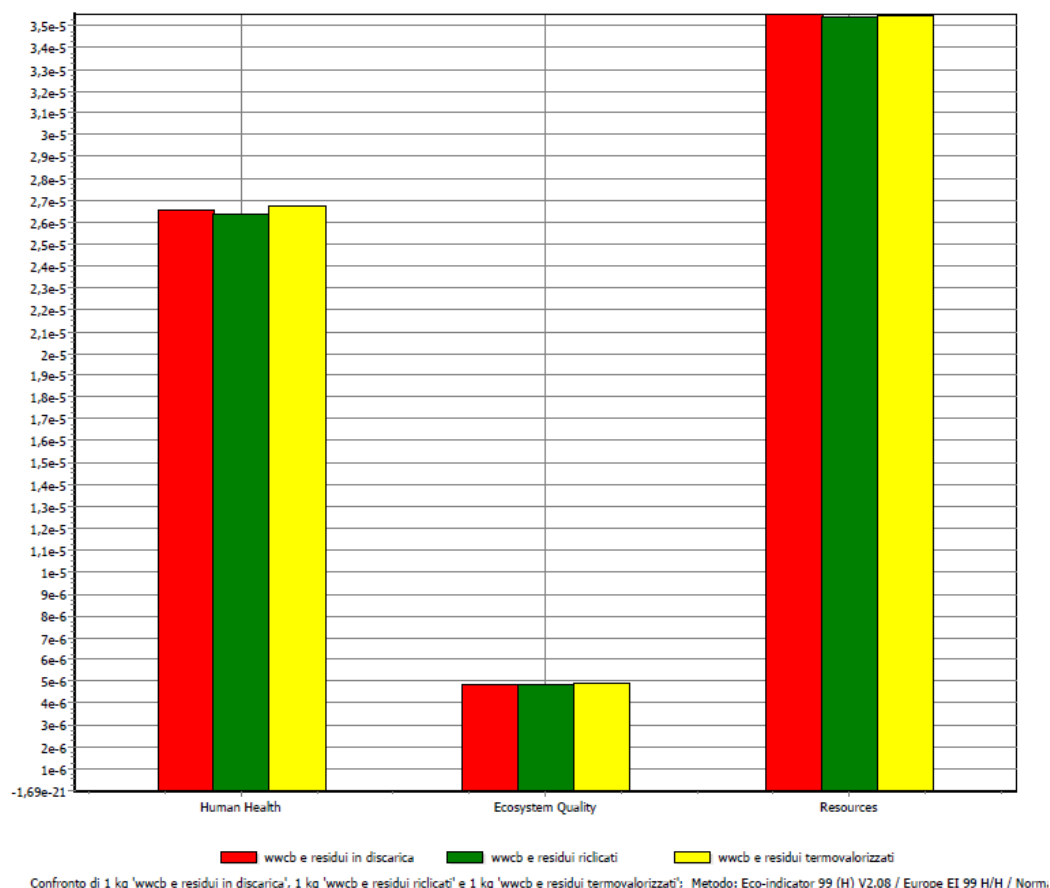


Grafico 18 - Confronto fra diversi scenari di smaltimento, per categorie di danno, Normalizzazione Ecoindicator99

La termovalorizzazione registra degli impatti superiori, anche se piccolissimi, nelle categorie *Carcinogens* e *Respiration inorganic*ste a causa delle emissioni inquinanti in atmosfera.

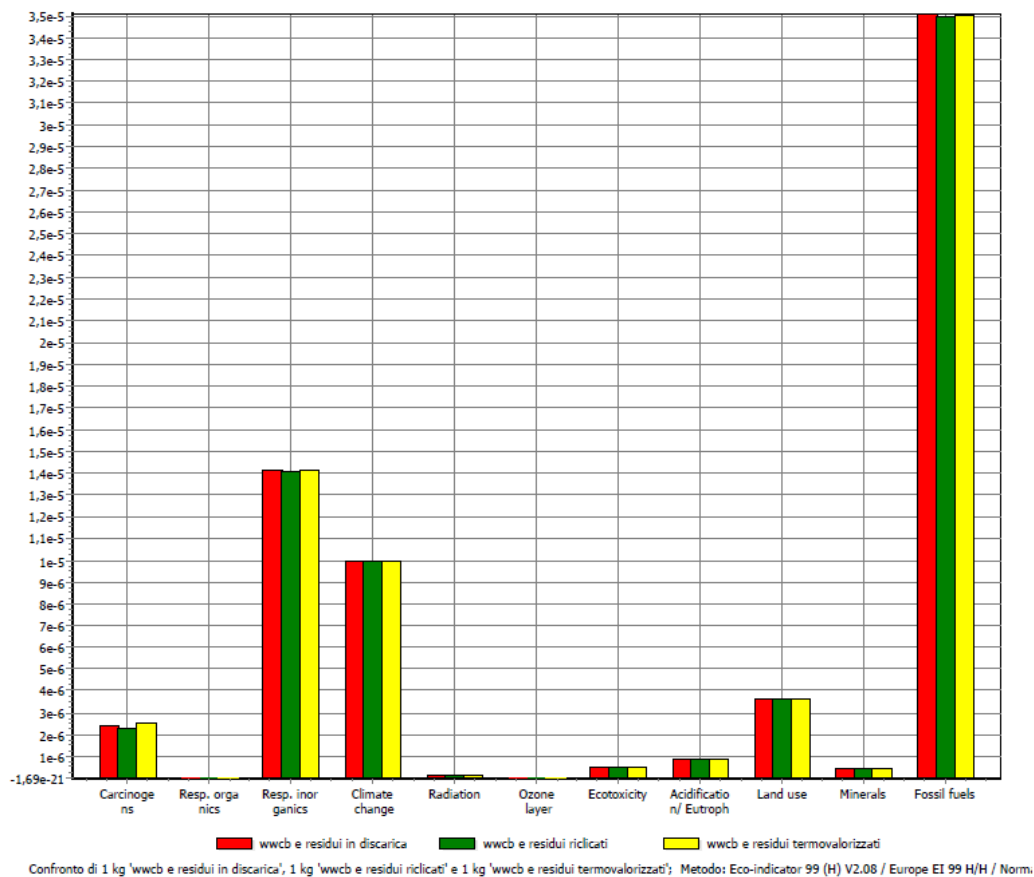


Grafico 19 - Confronto fra diversi scenari di smaltimento, per categorie d'impatto, Normalizzazione Ecoindicator99

8. Conclusioni

La metodologia della *Life Cycle Assessment* è una procedura riconosciuta a livello internazionale per individuare e quantificare gli impatti sull'ambiente dovuti ad una attività antropica necessaria per la produzione di beni o di servizi. Questa metodologia molto rigorosa risponde all'organizzazione di un'analisi secondo la sequenza e le fasi stabilite dalla serie delle norme ISO 14040, e ha come risultato la determinazione di un profilo ambientale tramite il quale è possibile effettuare una valutazione degli impatti potenziali con l'ausilio di metodi riconosciuti.

Il fine di questo strumento valutativo è quello di definire un percorso condiviso attraverso il quale determinare, nella maniera più oggettiva possibile, gli effetti sull'ambiente legati ad un processo in cui vi è l'intervento dell'uomo. Le conseguenze, positive o negative, che il processo produttivo dell'attività considerata ha sulle diverse categorie di impatto ambientale sono l'obiettivo della valutazione.

La LCA può applicarsi all'attività di produzione di un bene materiale a partire dallo sfruttamento delle materie prime e dell'energia necessarie alla fabbricazione fino alla sua completa realizzazione. Inoltre si possono considerare i materiali di scarto e di rifiuto ed il loro relativo smaltimento. La procedura di calcolo si dimostra utile per la determinazione degli impatti dovuti alla produzione dei beni materiali e per il confronto, in termini ambientali, tra differenti possibili soluzioni.

Lo studio ha avuto come obiettivo la determinazione degli impatti ambientali indotti dal processo produttivo del pannello isolante a base di lana di legno e cemento. L'analisi dell'inventario ha richiesto un continuo lavoro di approfondimento data la quantità di *input* considerati e il periodo di osservazione biennale. A questo riguardo è stata effettuata una analisi dell'incertezza che ha evidenziato una distribuzione normale della probabilità dei risultati in funzione dei dati inseriti.

Sono stati confrontati due metodi di valutazione *Ecoindicator99*, che calcola i potenziali di impatto su scala globale a livello di *midpoint* e di categoria di danno, *endpoint*, ed *Edip 2003* orientato verso una valutazione più locale e allo sviluppo e miglioramento dei prodotti industriali.

Il metodo *Ecoindicator99* ha valutato nell'impiego del cemento, utilizzato come legante, il materiale che causa il maggior impatto ambientale, legato essenzialmente alla sua produzione. Le fonti energetiche di elettricità e calore unito al trasporto sono gli altri fattori critici per la sostenibilità ambientale del processo produttivo.

Il metodo *Edip 2003*, conferma queste categorie d'impatto e, data la sua peculiarità, rileva due criticità nell'uso di sostanze chimiche, come l'alchilato, e nella produzione di scarti e rifiuti.

La valutazione per categoria di danno, tramite il metodo *Ecoindicator99*, indica nel consumo delle Risorse il maggior impatto seguito dalla Salute umana. Entrambi questi danni sono associati dall'impiego massiccio di energia elettrica e calore. La categoria Qualità dell'ecosistema non evidenzia criticità, segno che il processo produttivo non ha emissioni di rilievo. Al riguardo è stata effettuata una campagna d'analisi chimiche per determinare le sostanze emesse in atmosfera.

Come si è detto la LCA è uno strumento per individuare i margini di miglioramento nei riguardi della sostenibilità ambientale. A tale riguardo sono stati confrontati tre scenari diversi riguardanti l'approvvigionamento del materiale legnoso, l'autoproduzione di energia elettrica e lo smaltimento degli scarti e rifiuti di produzione.

Sono stati confrontati due sistemi di utilizzazione: tradizionale e meccanizzato tramite il metodo *Recipe 2008*. Le categorie maggiormente interessate dagli impatti ambientali sono: formazione di ossidanti fotochimici, formazione di particolato, acidificazione terrestre, eutrofizzazione

marina e diminuzione delle risorse fossili. Il metodo che impiega la gru a cavo dopo l'allestimento in bosco è quello con minori impatti. Questo metodo, che utilizza macchinari abbastanza innovativi per le imprese boschive, è in uso nell'arco alpino. La distanza contenuta che separa la fabbrica situata in provincia di Padova e le Alpi orientali può, inoltre, giovare dei minori impatti dovuti ai trasporti.

L'azienda autoproduce energia elettrica tramite un impianto fotovoltaico, dal Luglio 2011. È stata effettuata un'analisi di sensibilità comparando il profilo ambientale del periodo 2010-2011 con una in cui l'autoproduzione fosse a regime. I risultati, ottenuti tramite il metodo *Ecoindicator99*, dimostrano un miglioramento degli impatti per la categoria Risorse del 15%, per la Salute umana del 8% e per la Qualità dell'ecosistema del 3%.

Lo smaltimento degli scarti e dei rifiuti della produzione sono stati comparati in tre scenari diversi: discarica, termovalorizzazione e riciclo. I risultati della LCA non hanno dimostrato una differenziazione degli impatti nei tre scenari. Questo risiede nella metodologia regolamentata dalla norma ISO 14040 che non prevede che i benefici della produzione dei materiali riciclati sia allocata al processo che li produce, bensì a quello che lo impiega. In questo caso appare evidente un parallelismo fra gli oneri ambientali e quelli economici, infatti i costi sono entrambi a carico di chi produce ciò che è considerato rifiuto. Si registra un lieve beneficio a favore del riciclo per la categoria Salute umana, in quanto, a differenza dello smaltimento in discarica e alla termovalorizzazione, non sono previste emissioni inquinanti.

Dallo studio delle prestazioni dei materiali isolanti emerge che non esiste un materiale o prodotto che soddisfi contemporaneamente la resistenza termica, il calore specifico, la densità, la resistenza meccanica, la durabilità, l'isolamento acustico, la permeabilità al vapore e che abbia anche un basso impatto ambientale. Il pannello di lana di legno e cemento riassume alcu-

ne di queste caratteristiche e si ritiene possa essere impiegato negli edifici di legno con struttura a telaio.

Questo sistema costruttivo risulta a minore impatto ambientale, fra quelli che impiegano legno strutturale, utilizza legno strutturale largamente disponibile nell'arco alpino ed è idoneo ad una filiera corta foresta legno, in quanto impiega tecnologie semplici e disponibili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Neri P. (2008). *Verso la valutazione ambientale degli edifici*, ALINEA Editrice, Firenze.
- [2] Direttiva 2002/91/CE. *Rendimento energetico nell'edilizia*. GUCE L 001 del 4.1.2003.
- [3] d.lgs. 192/05. *Attuazione della direttiva 2002/91/CE relative al rendimento energetica nell'edilizia*. GURI 222 del 23.9.2005. Supp. 158.
- [4] d.P.R. 158/09. *Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*. GURI 158 del 10.7.2009.
- [5] Campioli A., Ferrari S., Lavagna M. (2009). *Il d.P.R. 158/09 e I nuovi limiti sulle prestazioni energetiche degli edifici*. *Costruire in laterizio*, 131:56-59.
- [6] Regolamento 2010/31/UE. *Prestazione energetica nell'edilizia*. GUUE L 153/13 del 18.6.2010.
- [7] Lavagna M. (2008). *Dall'efficienza energetica all'eco-efficienza*. *Costruire in laterizio*, 125:XIII-XVI.
- [8] UNI 11277 (2008). *Sostenibilità in edilizia - Esigenze e requisiti di eco-compatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione*. Milano.
- [9] Paleari M., Campioli A., Lavagna M. (2010). *Criticità nella valutazione Life Cycle Sustainability Assessment di Zero Energy Buildings*. In atti del seminario di Ecomondo, Rimini. Maggioli, pp. 1177-1183.
- [10] Lavagna M. (2008). *Life Cycle Assessment in edilizia. Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*. Milano. Hoepli.
- [11] Federlegno. (2010). *Statistiche importazione legno e semilavorati di legno, Analisi settoriale*, Milano.
- [12] Berti S., Brun F., Corona P., Pettenella D. (2008). *Prodotti forestali: considerazioni generali in una prospettiva di sostenibilità e di organizzazione del*

mercato. Atti del III Congresso Nazionale di Selvicoltura. Ottobre, 16-19, 2008. Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze. pp. 711-716.

[13] Benedetti C., Bacigalupi V. (1991). *Legno Architettura- Il futuro della tradizione*, Edizioni Kappa, Roma.

[14] Berti S., Piazza M., Zanuttini R. (2002). *Strutture di legno per un'edilizia sostenibile*, Il Sole 24Ore, Milano.

[15] AA. VV. (2003). *Il legno massiccio in edilizia*, Federlegno-Arredo s.r.l., Milano.

[16] EN 338 (2009). *Structural timber - Strength classes*. Brussels, Belgium.

[17] d.min. 14.9.2005. *Norme Tecniche per le Costruzioni*. GURI 222 del 23.9.2005. Supp. 158.

[18] d.min. 14.1.2008. *Approvazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*. GURI 29 del 4.2.2008.

[19] EN 14081-1 (2005). *Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements*. Brussels, Belgium.

[20] UNI 11035-1 (2010). *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 1: Terminologia e misurazione delle caratteristiche*. Milano.

[21] UNI 11035-2 (2010). *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale*. Milano.

[22] ISO 13788 (2012). *Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods*. Geneva, Switzerland.

[23] Carletti C., Sciorpi F. (2008). *Edifici a basso consumo energetico*, Atti del Convegno "Riduzione dei fabbisogni, recupero di efficienza e fonti rino-

vabili per il risparmio energetico nel settore residenziale”, AICARR, Padova – Bari – Catania.

[24] Lavisci P. (2006). *La progettazione delle strutture di legno*, IISole24Ore, Milano.

[25] Piazza M., Tomasi R., Modena R. (2005). *Strutture di legno*, Hoepli, Milano.

[26] Moslemi A.A. (1989). *Wood cement panel products: coming of age*. Fibre and particleboards bonded with inorganic binders. Wisconsin: Forest Product Research Society, pp 12-18.

[27] Giordano G. (1983). *Tecnologia del legno. Volume 2, Parte II*. UTET, Torino, II ed.

[28] Tu P. (1995). *Discussion on production of wood shaving-cement board*. Global Building Materials of Modern Times and Future. China. pp. 126-130.

[29] Van Elten G.J. (2006). *Production of wood wool cement board and wood strand cement board on one plant and applications of the products*. IIBCC 10th Inorganic Bonded Fiber Composites Conference. 15-18 November, Sao Paulo, Brazil.

[30] Miller D.P., Moslemi A.A. (1991). *Wood cement composites: effect of model compounds on hydration characteristics and tensile strength*. Wood and fiber Science 23(4):472-489.

[31] Wei Y.M., Tomita B. (2001). *Effects of five additive materials on mechanical and dimensional properties of wood cement-bonded boards*. Journal of Wood Science 47(6), 437-444.

[32] Lange H., Simatupang M.H. (1985). *Interaction of five parameters on the manufacture of cement bonded boards from spruce and poplar particles and their effects on board strength*. Holz als Roh- und Werkstoff 43(6), 229-236.

[33] EN 13168 (2008). *Thermal insulation products for buildings - Factory made wood wool (WW) products - Specification*. Brussels, Belgium.

- [34] ISO 14040 (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. Geneva, Switzerland.
- [35] ISO 14044 (2006). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guideline*. Geneva, Switzerland.
- [36] Barton J.R., Dalley D., Patel S. (1996). *Life Cycle Assessment for waste management*. Waste Management, 16:35-50.
- [37] Azapagic A. (1999). *Life Cycle Assessment and its application to process selection, design and optimisation*. Chemical Engineering Journal, 73:1-21.
- [38] Bengt Steen (1999). *A systematic approach to environmental priority strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics*. Center for Environmental Assessment of Products and Material System. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- [39] Berlin J., Sonesson U. (2006). *Minimising environmental impacts by sequencing culture dairy products: two case studies*. Journal of Cleaner Production, 1-16.
- [40] Finnveden G., Johansson J., Lind P., Moberg A. (2005). *Life Cycle Assessment of energy from solid waste – part 1: general methodology and results*. Journal of Cleaner Production, 13:213-229.
- [41] Curran M.A. *Life cycle assessment - Principles and practice*. Scientific Applications International Corporation. http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/pdfs/chapter1_frontmatter_lca101.pdf
- [42] Rebitzera G., Ekvallb T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norris G., Rydberg T., Schmidt W.P., Suh S., Weidema B.P., Pennington D.W. (2003). *Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications*. Environment International, 30:701-720.
- [43] ISO/TR 14049 (2012). *Environmental management – Life cycle assessment – Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to goal and scope definition and inventory analysis*. Geneva, Switzerland.

- [44] ISO/TR 14047 (2012). *Environmental management — Life cycle assessment — Illustrative examples on how to apply ISO 14044 to impact assessment situations*. Geneva, Switzerland.
- [45] SETAC (1993). *Guidelines for Life Cycle Assessment: a code of practice*, Bruxell.
- [46] Bowyer J. (1995). *Wood and other raw materials for the 21st century*. *Forest Prod J* 45 (2) 17–24
- [47] Skodras G., Grammelies P., Kakaras E., Sakellaropoulos G.P. (2004): *Evaluation of the environmental impact of waste wood co-utilisation for energy production*. *Energy* 29, 2181–2193
- [48] Petersen A.K., Solberg B. (2005): *Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden*. *Forest Policy Econ* 7 (3) 249–259
- [49] Stael G.C., Tavares M.I.B., d'Almeida J.R.M. (2001): *Impact behaviour of sugarcane bagasse waste-EVA composites*. *Polymer Testing* 20, 869–872
- [50] UNECE/FAO (2004). *Forest Products. Annual Market Review 2003–2004*. Timber Bulletin Volume LVII, No. 3.
- [51] Kozinski J., Saade R. (1998). *Effect of biomass burning on the formation of soot particles and heavy hydrocarbons. An experimental study*. *Fuel* 77 (4) 225–237
- [52] Baumann H., Tillman A.M. (2004): *The Hitch Hiker's Guide to LCA. An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. ISBN 9144023642, Studentlitteratur, Lund, Sweden, 543 pp.
- [53] Jungmeier G., Werner F., Jarnehammar A., Hohenthal C., Richter K. (2002). *Allocation in LCA of Wood-based Products*. Experiences of Cost Action E9. Part I. Methodology. *Int J LCA* 7 (5) 290–294.
- [54] Jungmeier G., Werner F., Jarnehammar A., Hohenthal C., Richter K. (2002). *Allocation in LCA of Wood-based Products*. Experiences of Cost Action E9. Part II. Examples. *Int J LCA* 7 (6) 369–375

- [55] Berg S., Lindholm E.L. (2005). *Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden*. J Cleaner Prod 13, 33–42.
- [56] Berg S. (1997). *Some aspects of LCA in the analysis of forestry operations*. J Cleaner Prod 5, 211–217.
- [57] Aldentun Y. (2002). *Life cycle inventory of forest seedling production – From seed to regeneration site*. J Cleaner Prod 10, 47–55.
- [58] Rivela B., Hospido A., Moreira M.T., Feijoo G. (2006). *Life Cycle Inventory of Particleboard: A Case Study in the Wood Sector*. Int J LCA 11 (2) 106–223.
- [59] Kellenberger D., Althaus H.J., Künniger T. (2004). *Life Cycle Inventories of Building Products*. EMPA, Ecoinvent report No. 7.
- [60] Knauf Insulation. (2012). *Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 Holzwoleplatten Heraklith. EPD-KNI-2012511-D*. Institut Bauen und Umwelt e. V. Königswinter, Deutschland.
- [61] Ecoinvent Centre (2009). *Ecoinvent data v2.1*. St. Gallen, Switzerland.
- [62] Buwal 250 (2004). *Ökoinventare für Verpackungen. Schriftenreihe Umwelt 250*. Bern, Switzerland.
- [63] Werner F., Richter K., Bosshart S., Frischknecht R. (1997). *Comparison of frames made by solid wood, fibre wood and steel*. EMPA/ETH-Forschungsbericht, Dübendorf, Zurich, Switzerland.
- [64] UNI 10169. (2001) *Misure alle emissioni - Determinazione della velocità e della portata di flussi gassosi convogliati per mezzo del tubo di Pitot*. Milano.
- [65] EN 13649. (2001). *Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of individual gaseous organic compounds - Activated carbon and solvent desorption method*. Geneva, Switzerland.
- [66] EN 13284-1. (2001). *Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method*. Geneva, Switzerland.

[67] Goedkoop M., Spriensma R. (2000). *The Ecoindicator99 – A damage oriented method for life cycle impact assessment*. Methodology report, Pré Consultants BV. The Netherlands.

[68] DK LCA Center. (2007). *EDIP factors*. Download of an electronic version (XLS format) of the most recent and updated version of precalculated characterisation factors for the EDIP LCA methodology, retrieved from: <http://www.lca-center.dk/cms/site.asp?p=1378>

[69] AIEL. (2009). *Manuale pratico. Legno e cippato*. Associazione Italiana Energie Agroforestali. Legnaro, Padova.

[70] Schäffeler U., Keller M. (2008). *Non-road fuel consumption and pollutant emissions. Federal Office for the Environment. Study for the period from 1980 to 2020. Environmental studies no. 0828*. Federal Office for the Environment, Bern, Switzerland, 171 pp.

[71] Castellani C. (1984). *Tavole stereometriche e alsometriche*. Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura. Trento.

APPENDICE

Di seguito sono riportati i calcoli e i risultati in forma di tabelle e di grafici ottenuti con il software SimaPro 7.3.

Process

Category type material
 Process identifier TESAF00318554800031
 Type
 Process name
 Status
 Time period Unspecified
 Geography Unspecified
 Technology Unspecified
 Representativeness Unspecified
 Multiple output allocation Unspecified
 Substitution allocation Unspecified
 Cut off rules Unspecified
 Capital goods Unspecified
 Boundary with nature Unspecified
 Infrastructure No
 Date 29/10/2012
 Record
 Generator
 Literature references
 Collection method
 Data treatment
 Verification
 Comment
 Allocation rules
 System description

Products

wwcb 1 kg 100 non definito Wood

Avoided products

Electricity, medium voltage, at grid/IT U 0,00285 kWh Non definito

Resources

Water, groundwater consumption 0,28658 kg Non definito

Materials/fuels

Industrial wood, softwood, under bark, u 0,41731 dm3 Non definito
 Portland cement, strength class Z 42.5, a 0,40647 kg Non definito
 Limestone, milled, loose, at plant/CH U 0,14997 kg Non definito
 Sodium formate, reaction of formaldehyd 0,00301 kg Non definito
 Calcium chloride, CaCl₂, at plant/RER U 0,00319 kg Non definito
 Alkylbenzene, linear, at plant/RER U 0,00095 kg Non definito
 Packaging, corrugated board, mixed fibre 0,00053 kg Non definito
 Packaging film, LDPE, at plant/RER U 0,00014 kg Non definito

Electricity/heat

Electricity, medium voltage, at grid/IT U 0,05505 kWh Non definito
 Heat, natural gas, at boiler modulating > 0,35113 MJ Non definito
 Transport, lorry >32t, EURO3/RER U 120,4 kgkm Non definito

Emissions to air

Methanol 0,00627 g Non definito
 Dimethyl formamide 0,00208 g Non definito
 2-Butoxyethanol acetate 0,00170 g Non definito
 Benzene, ethyl- 0,00015 g Non definito
 Isopropyl acetate 0,00055 g Non definito
 Acetone 0,00050 g Non definito
 Ethanol 0,00029 g Non definito
 Heptane 0,03156 g Non definito
 Particulates, unspecified 0,01094 g Non definito

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Wood, sawdust 0,01566 kg Non definito
 Rejects 0,01450 kg Non definito
 Packaging waste, unspecified 0,00003 kg Non definito

Non material emissions

Social issues

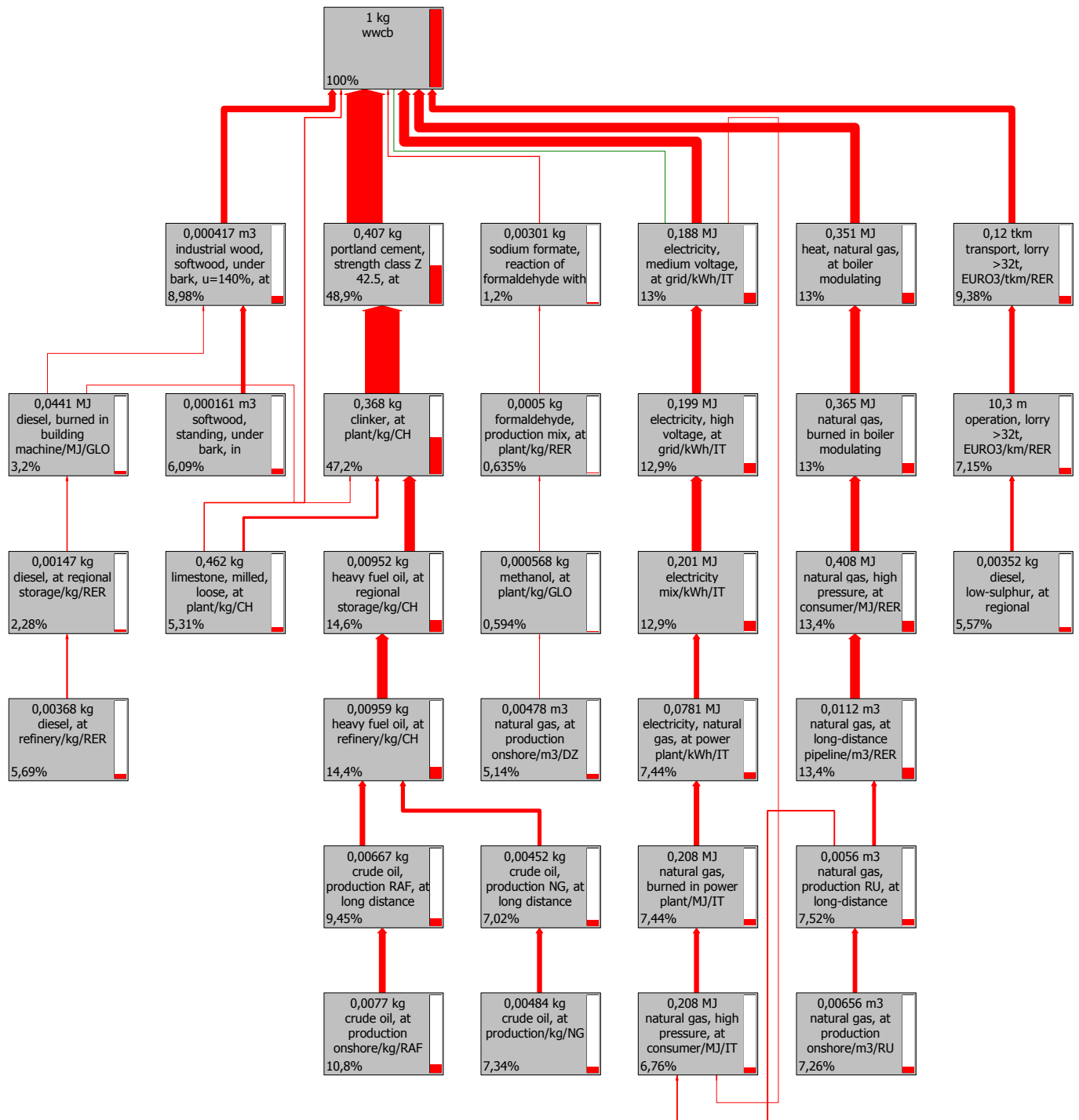
Economic issues

Waste to treatment

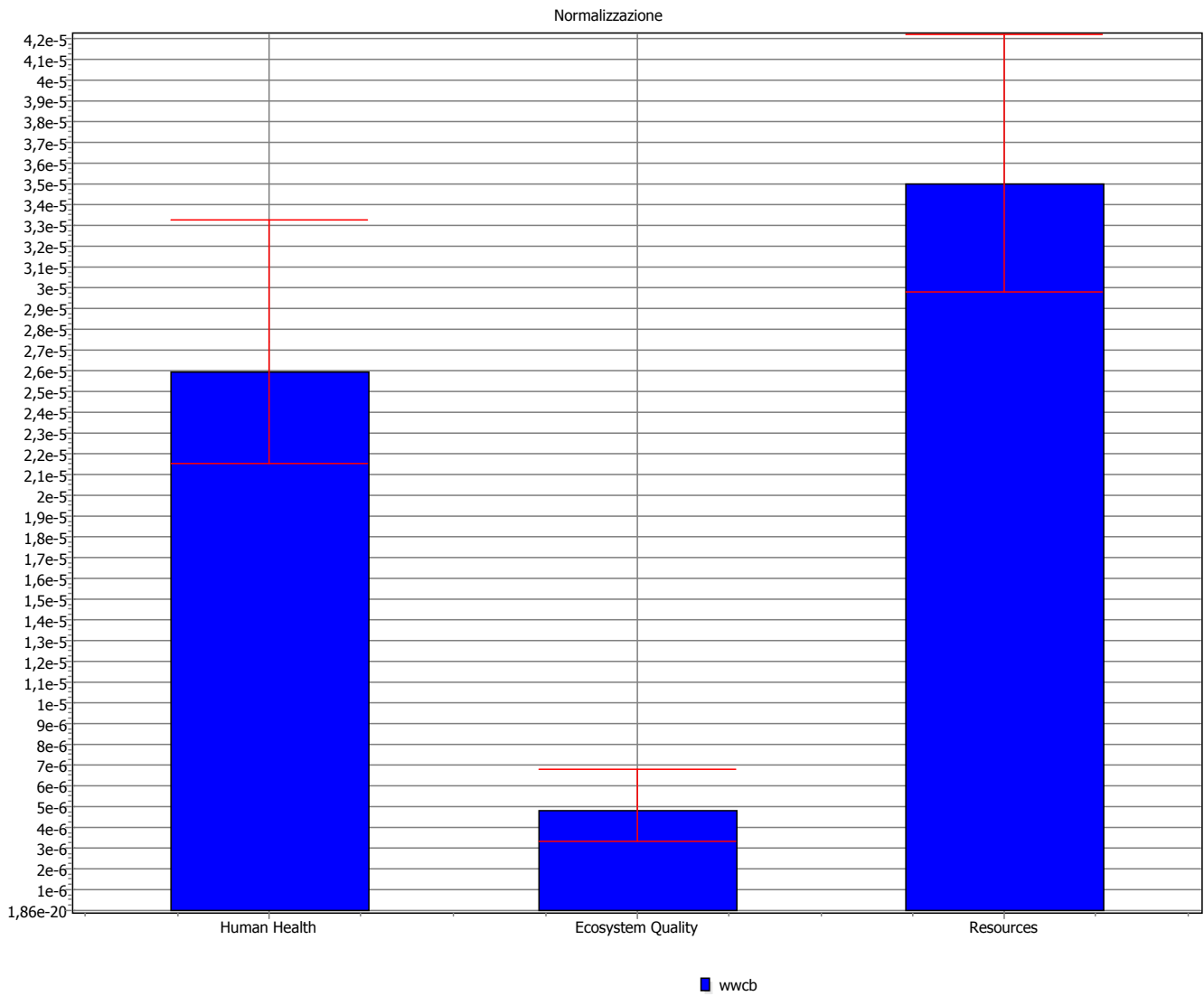
Input parameters

Calculated parameters

Prodotto: wwcb
 Progetto: Tutorial with wood example wwcb
 Categoria: Materiali\Wood
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Peso selezionato: Punteggio singolo, (Pt)
 Peso dell'intersezione: Inclusione degli input
 Esclude le emissioni di lungo te Si
 Valore di esclusione dell'interse 5%



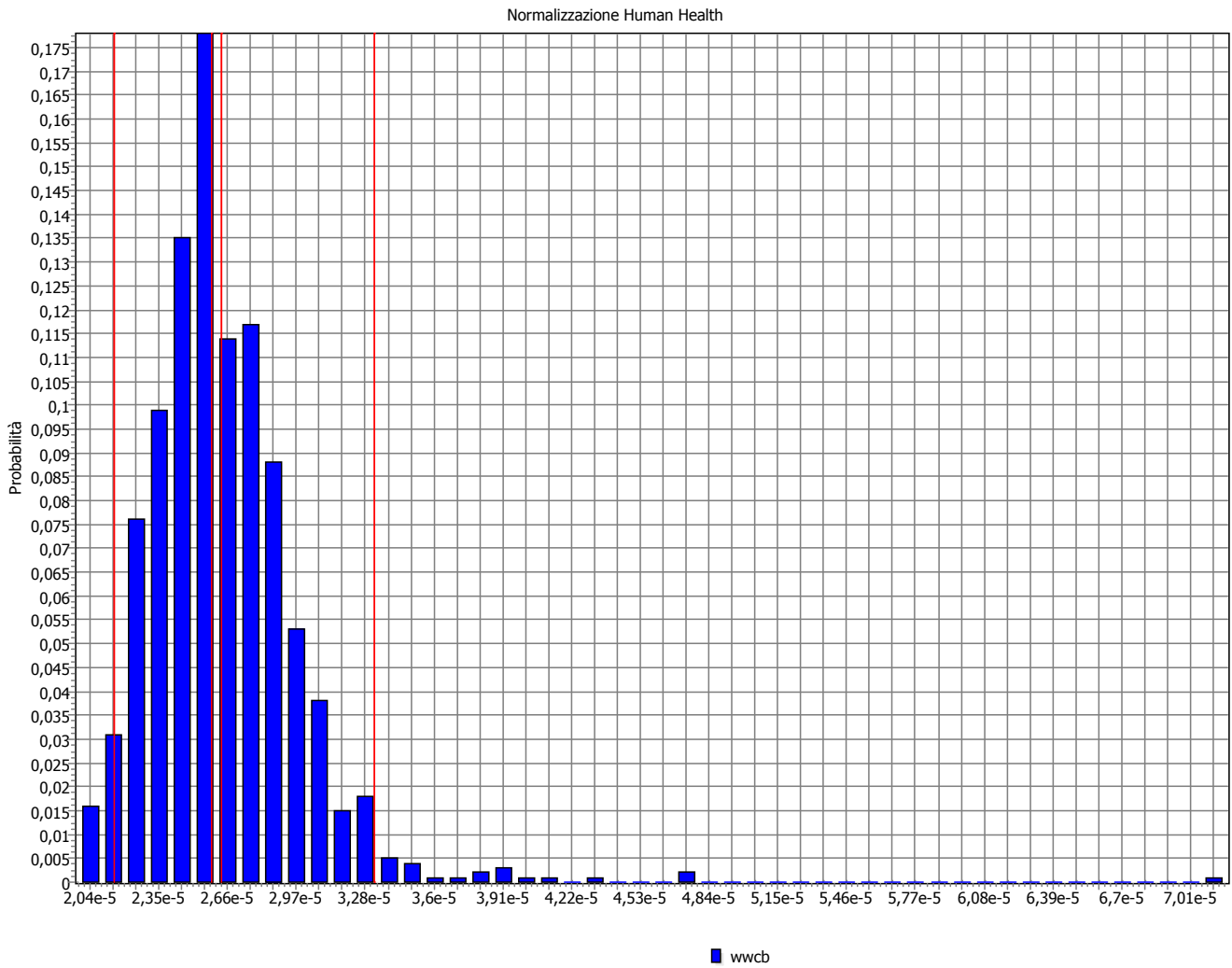
Titolo: Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb', metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confic
Indicatore: Normalizzazione



Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb',
metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confidenza: 95 %

Intervallo di Confidenza: 95

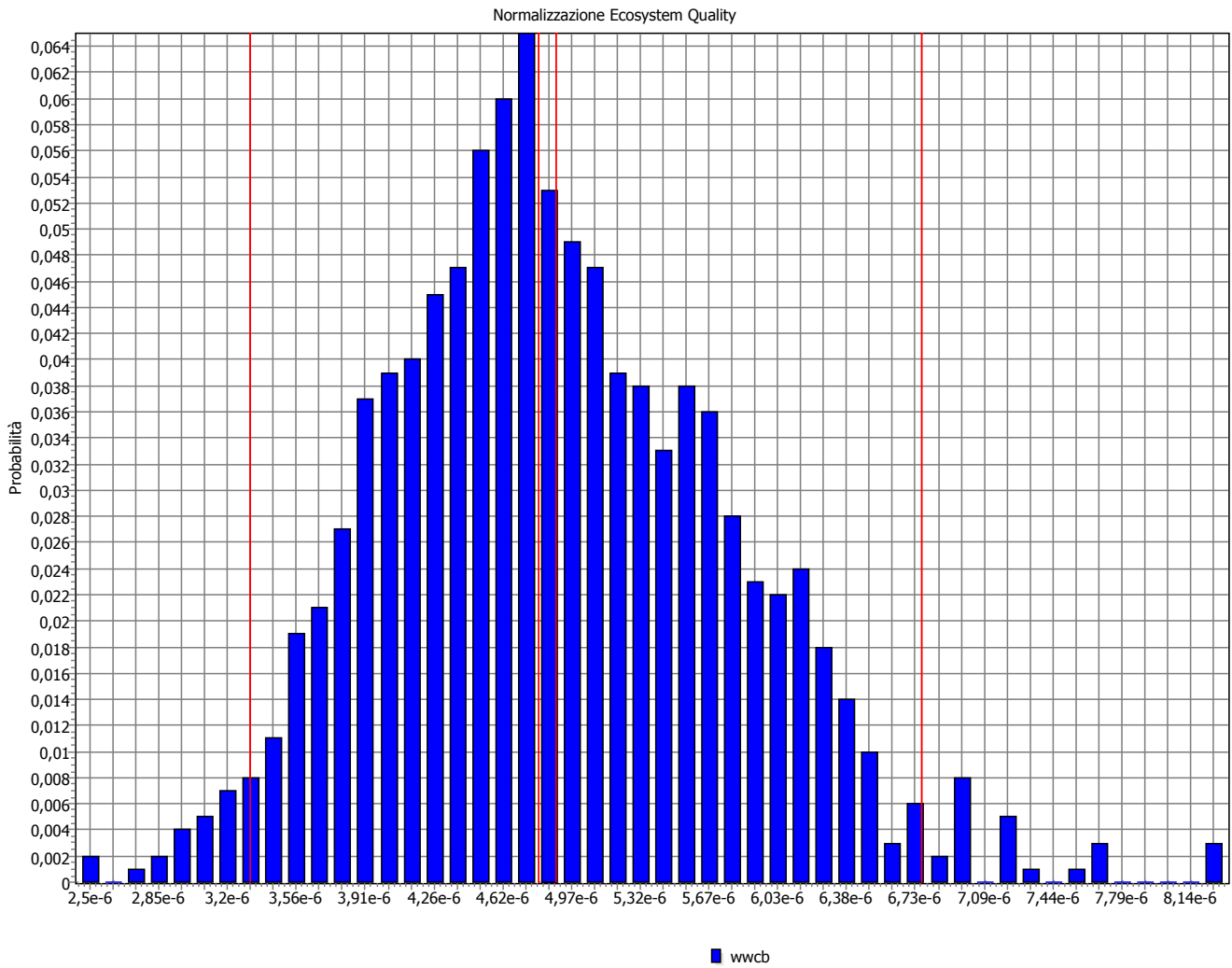
Titolo: Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb', metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confic
Indicatore: Normalizzazione



Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb',
metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confidenza: 95 %

Numero di Contenitori: 50
Intervallo Visibile: 99,9
Intervallo di Confidenza: 95

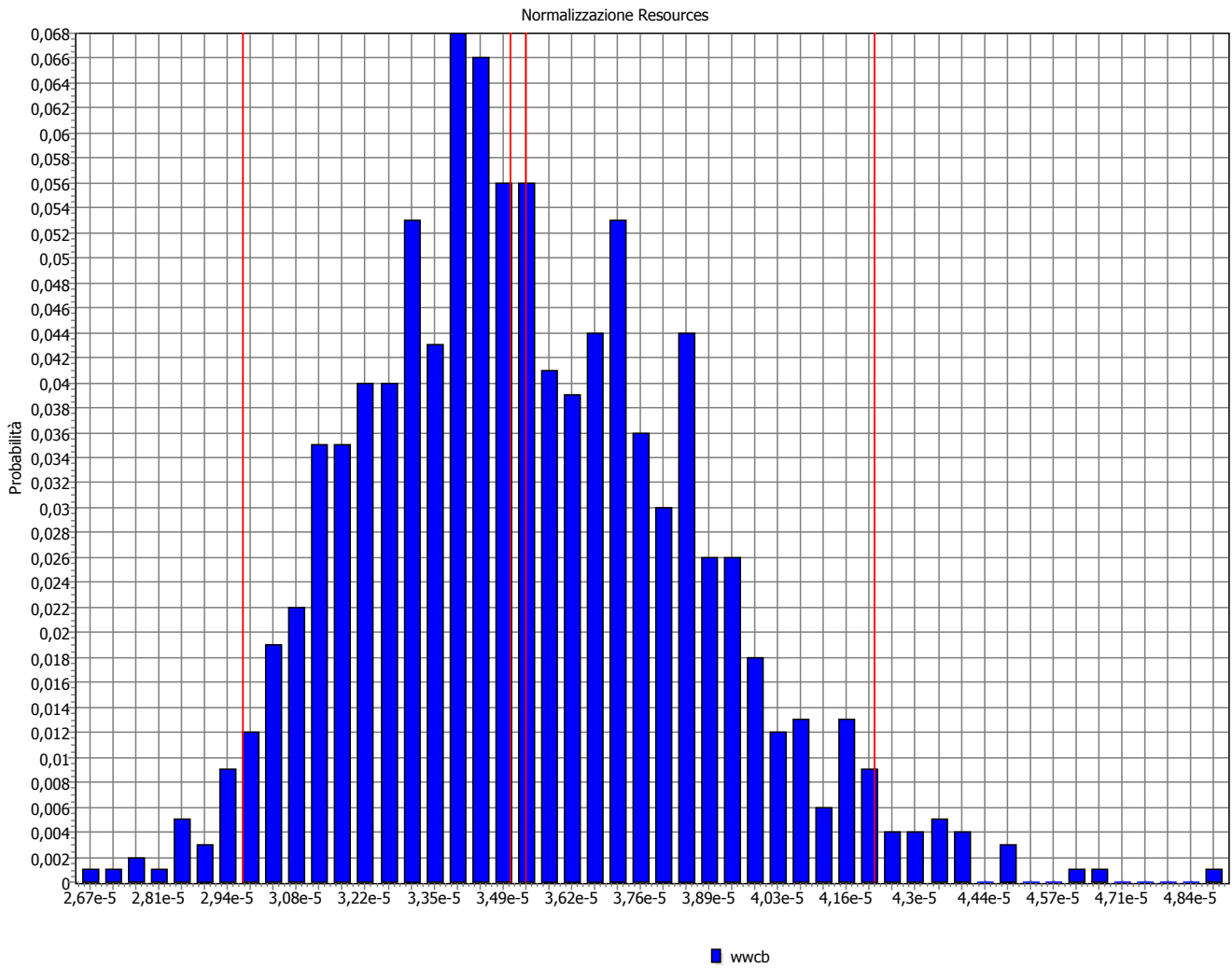
Titolo: Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb', metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confic
Indicatore: Normalizzazione



Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb',
metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confidenza: 95 %

Numero di Contenitori: 50
Intervallo Visibile: 99,9
Intervallo di Confidenza: 95

Titolo: Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb', metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confic
Indicatore: Normalizzazione



Analisi di incertezza di 1 kg 'wwcb',
metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H, intervallo di confidenza: 95 %

Numero di Contenitori: 50
Intervallo Visibile: 99,9
Intervallo di Confidenza: 95

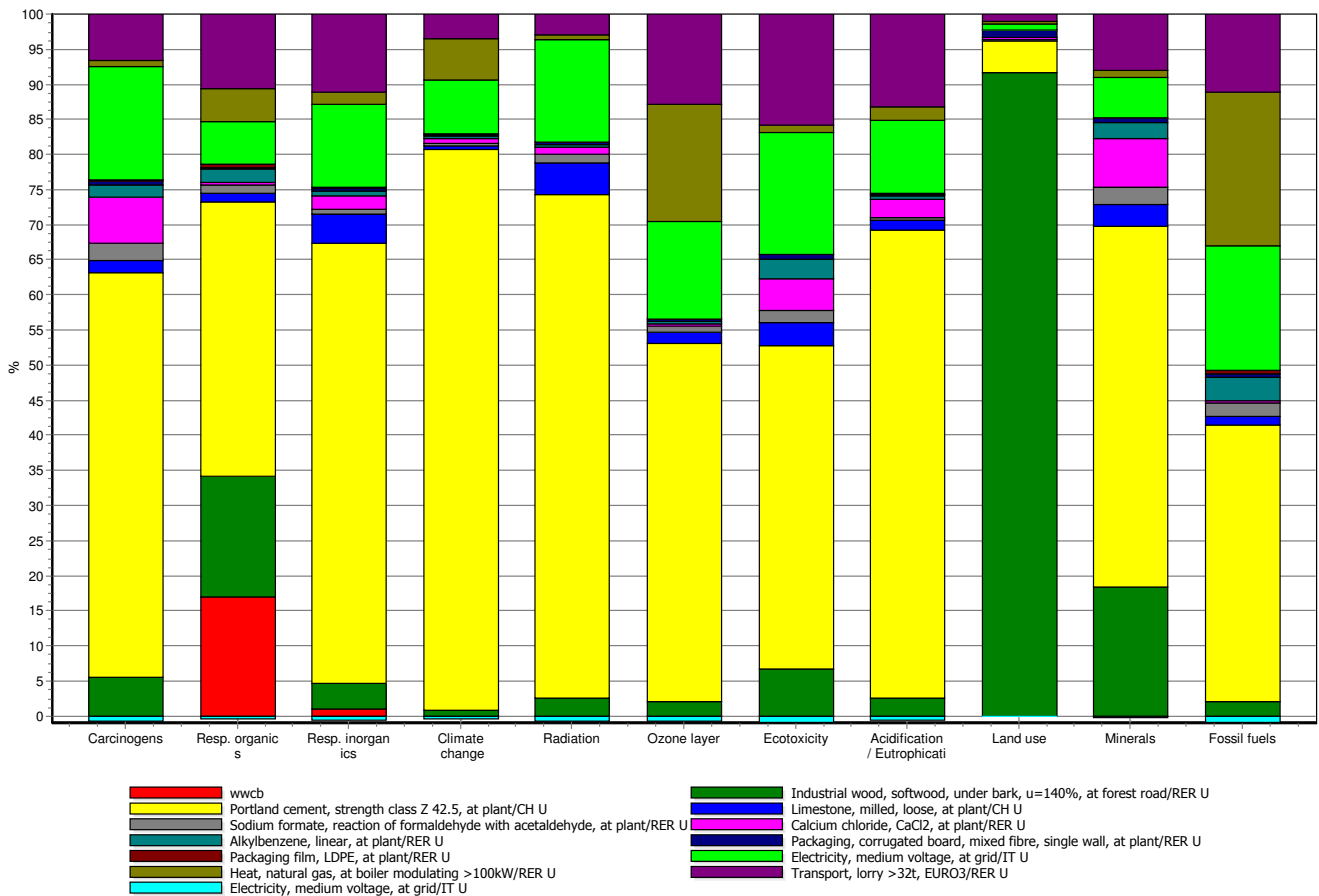
Progetto: Tutorial with wood example wwcb

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Caratterizzazione
 Unità: %
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente

Categ	Unità	Totale	wwcb	Industrial wood, softw	Portland cement, stre	Limestone, milled, loc	Sodium formate, reac	Calcium chloride, CaC
Carcii DALY		1,98E-8	0	1,1E-9	1,15E-8	3,56E-10	4,69E-10	1,34E-9
Resp DALY		2,21E-10	3,76E-11	3,81E-11	8,68E-11	2,56E-12	2,57E-12	8,86E-13
Resp DALY		1,23E-7	1,2E-9	4,57E-9	7,76E-8	5,18E-9	6,94E-10	2,38E-9
Clima DALY		8,72E-8	0	7,88E-10	6,99E-8	4,14E-10	3,39E-10	5,67E-10
Radia DALY		8,34E-10	0	2,07E-11	6,04E-10	3,72E-11	1,03E-11	9,66E-12
Ozon DALY		1,91E-11	0	3,82E-13	9,84E-12	2,79E-13	1,64E-13	6,71E-14
Ecotc PAF*m2yr		0,0261	0	0,00176	0,0121	0,000848	0,000478	0,00117
Acidif PDF*m2yr		0,00464	0	0,00012	0,0031	6,66E-5	2,12E-5	0,000115
Land PDF*m2yr		0,0206	0	0,0189	0,000933	3,01E-5	1,42E-5	4,85E-5
Miner MJ surplus		0,00317	0	0,000581	0,00164	9,61E-5	7,66E-5	0,000223
Fossil MJ surplus		0,264	0	0,00553	0,105	0,00333	0,00483	0,00111

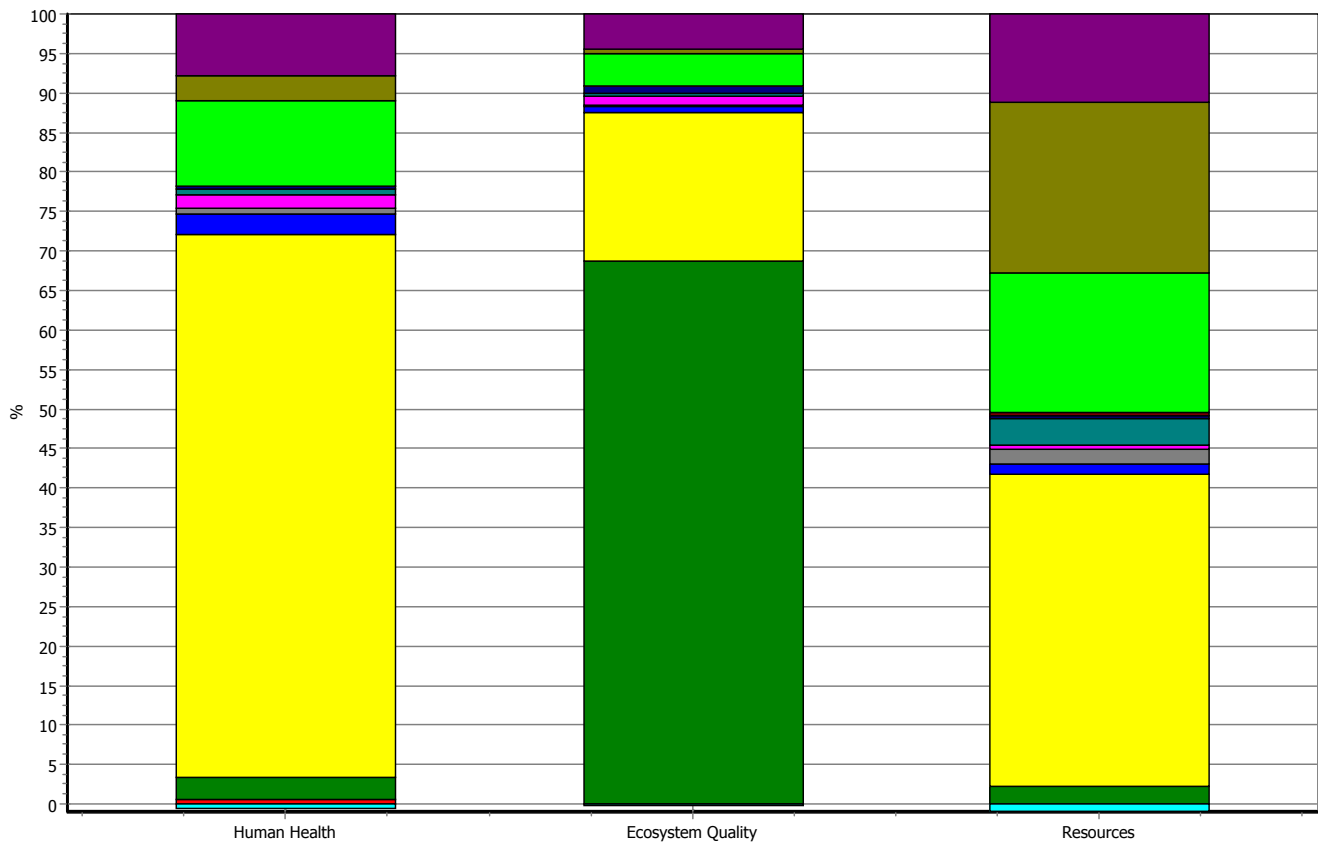
Alkylbenzene, linear,	Packaging, corrugate	Packaging film, LDPE,	Electricity, medium vc	Heat, natural gas, at	Transport, lorry >32t,	Electricity, medium vc
3,34E-10	1,07E-10	2,5E-11	3,22E-9	1,93E-10	1,32E-9	-1,67E-10
4,26E-12	4,39E-13	9,53E-13	1,37E-11	1,01E-11	2,36E-11	-7,08E-13
9,78E-10	3,41E-10	1,59E-10	1,47E-8	2,12E-9	1,37E-8	-7,63E-10
3,87E-10	1,26E-10	7,73E-11	6,7E-9	5,19E-9	3,04E-9	-3,47E-10
2,42E-12	2,35E-12	8,8E-13	1,22E-10	5,27E-12	2,54E-11	-6,34E-12
9,72E-14	5,86E-14	4,48E-15	2,66E-12	3,2E-12	2,48E-12	-1,38E-13
0,000721	0,000194	2,64E-5	0,00455	0,000272	0,00416	-0,000236
2,77E-5	1,15E-5	4,87E-6	0,000484	9,3E-5	0,000613	-2,5E-5
1,13E-5	0,000209	3,55E-6	0,00019	7,3E-5	0,000206	-9,83E-6
7,08E-5	2,19E-5	1,94E-6	0,000183	3,21E-5	0,000253	-9,5E-6
0,00897	0,000945	0,0014	0,0475	0,0581	0,0297	-0,00246

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Caratterizzazione
 Unità: %
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Modo relativo: Orizzontale
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente



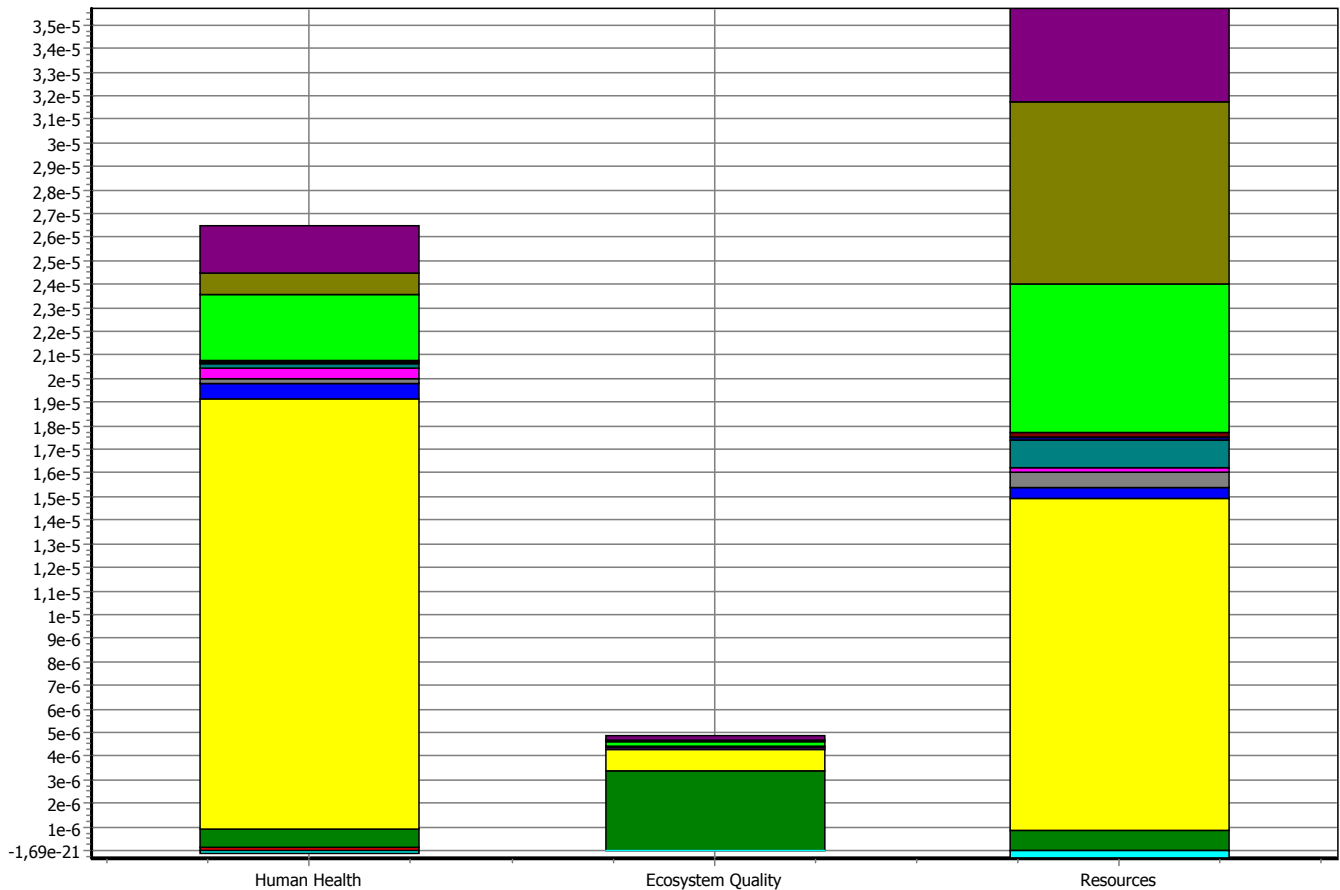
Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Caratterizzazione

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Valutazione dei danni
 Unità: %
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: No
 Modo relativo: Orizzontale
 Sorted on item: Categoria di danno
 Sort order: Ascendente



Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Valutazione dei danni

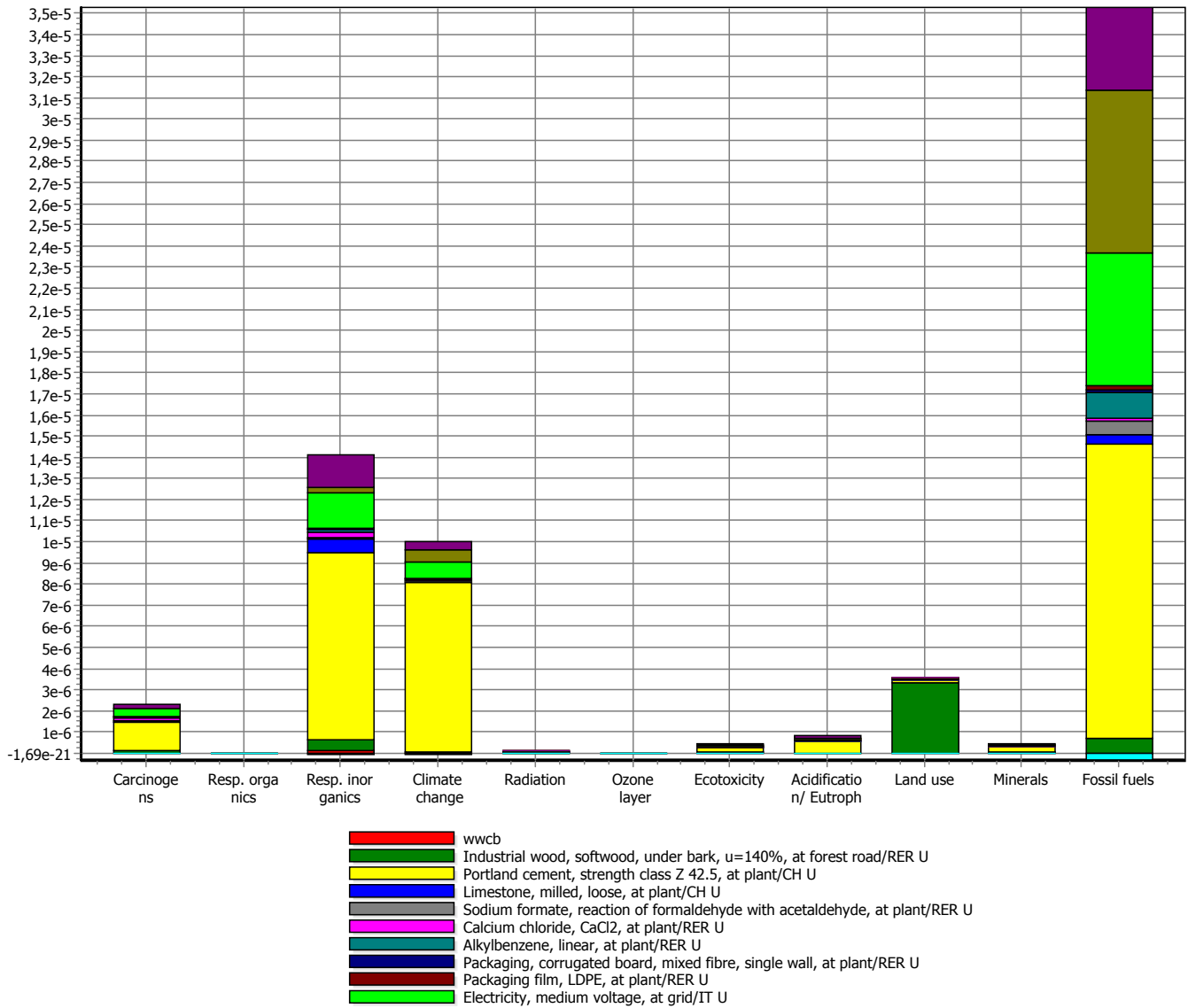
Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Normalizzazione
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: No
 Sorted on item: Categoria di danno
 Sort order: Ascendente



- wwcb
- Industrial wood, softwood, under bark, u=140%, at forest road/RER U
- Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH U
- Limestone, milled, loose, at plant/CH U
- Sodium formate, reaction of formaldehyde with acetaldehyde, at plant/RER U
- Calcium chloride, CaCl₂, at plant/RER U
- Alkylbenzene, linear, at plant/RER U
- Packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant/RER U
- Packaging film, LDPE, at plant/RER U
- Electricity, medium voltage, at grid/IT U

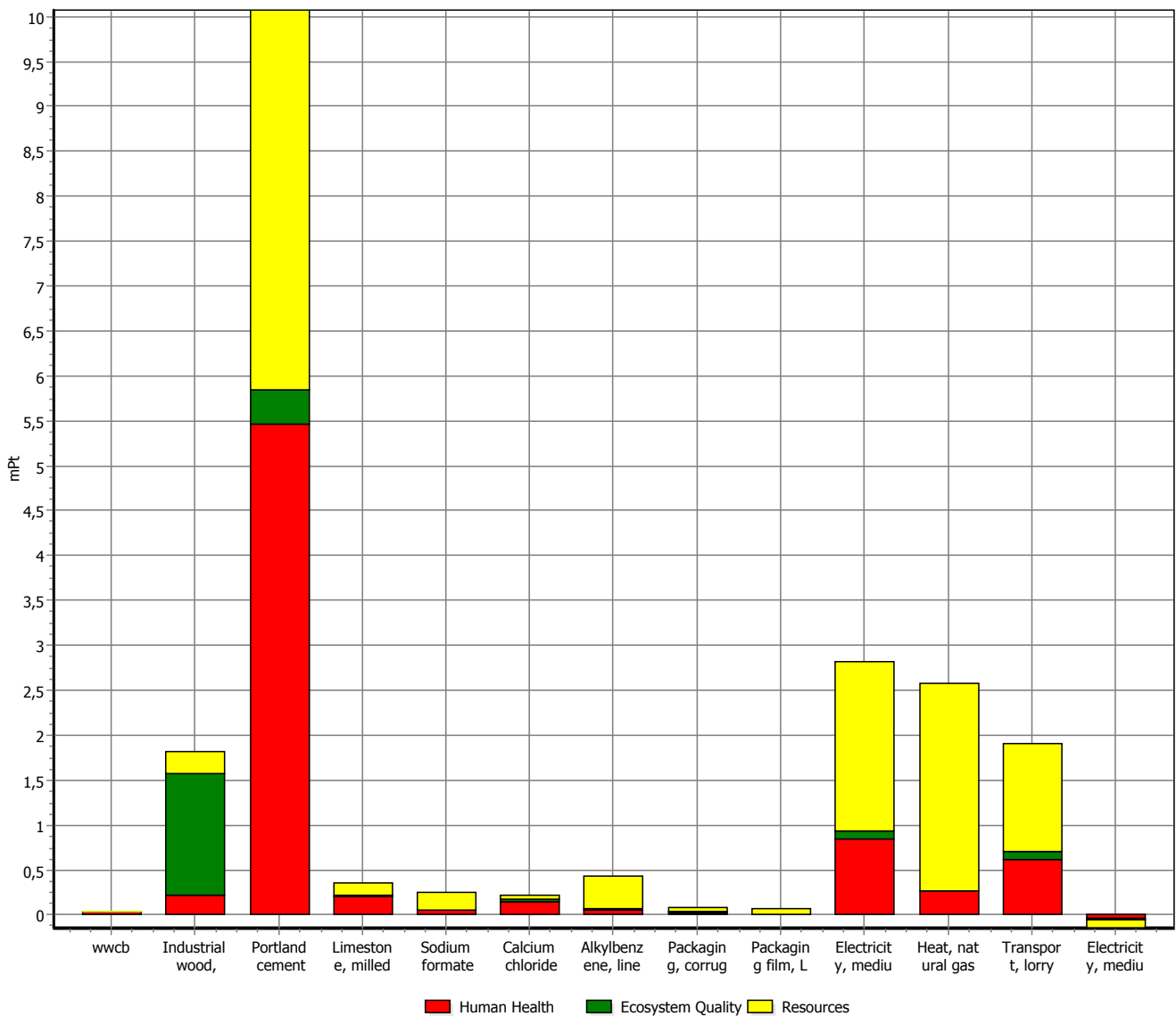
Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Normalizzazione

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Normalizzazione
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: Si
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente



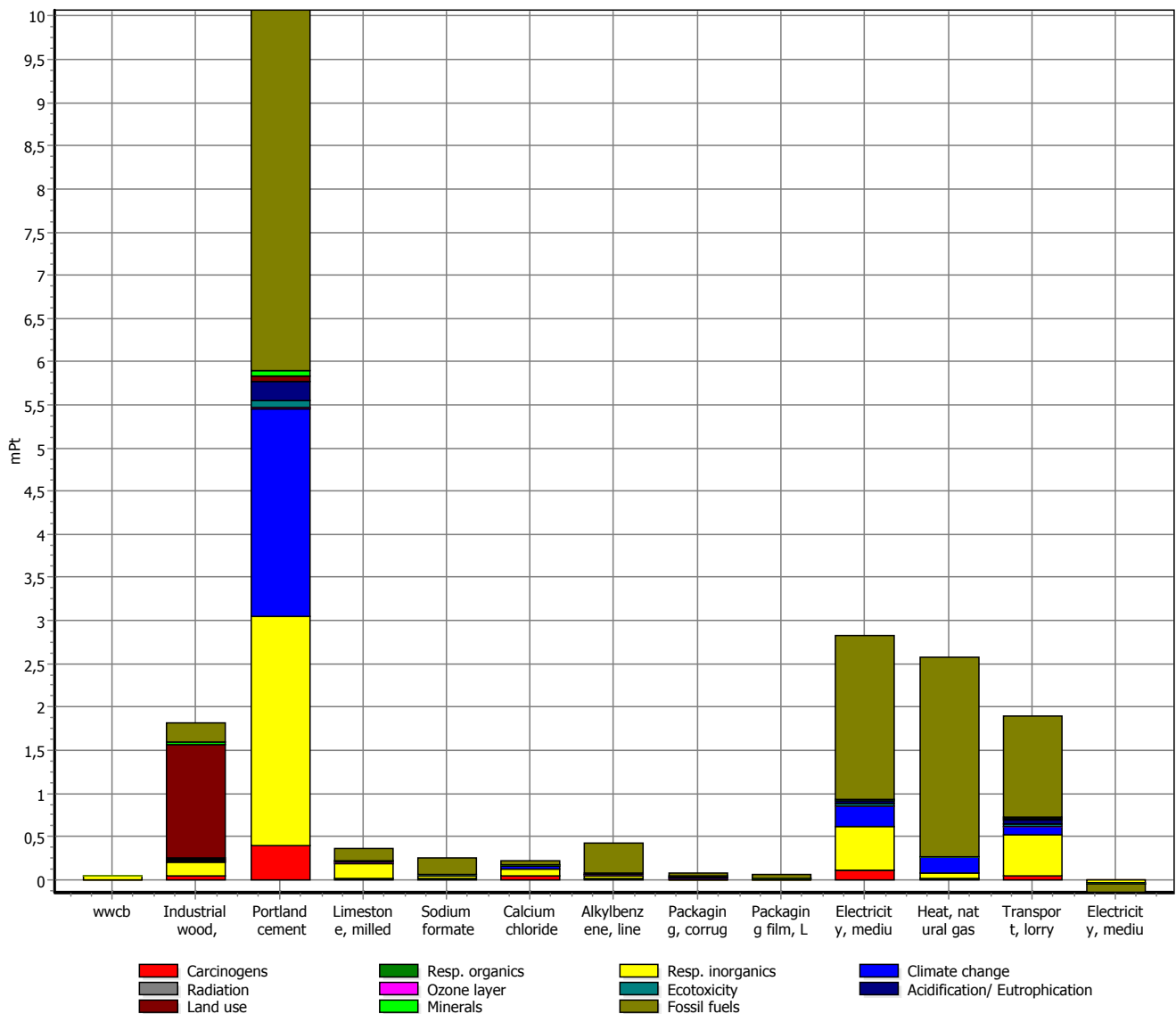
Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Normalizzazione

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Punteggio singolo
 Unità: mPt
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: No
 Sorted on item: Categoria di danno
 Sort order: Ascendente



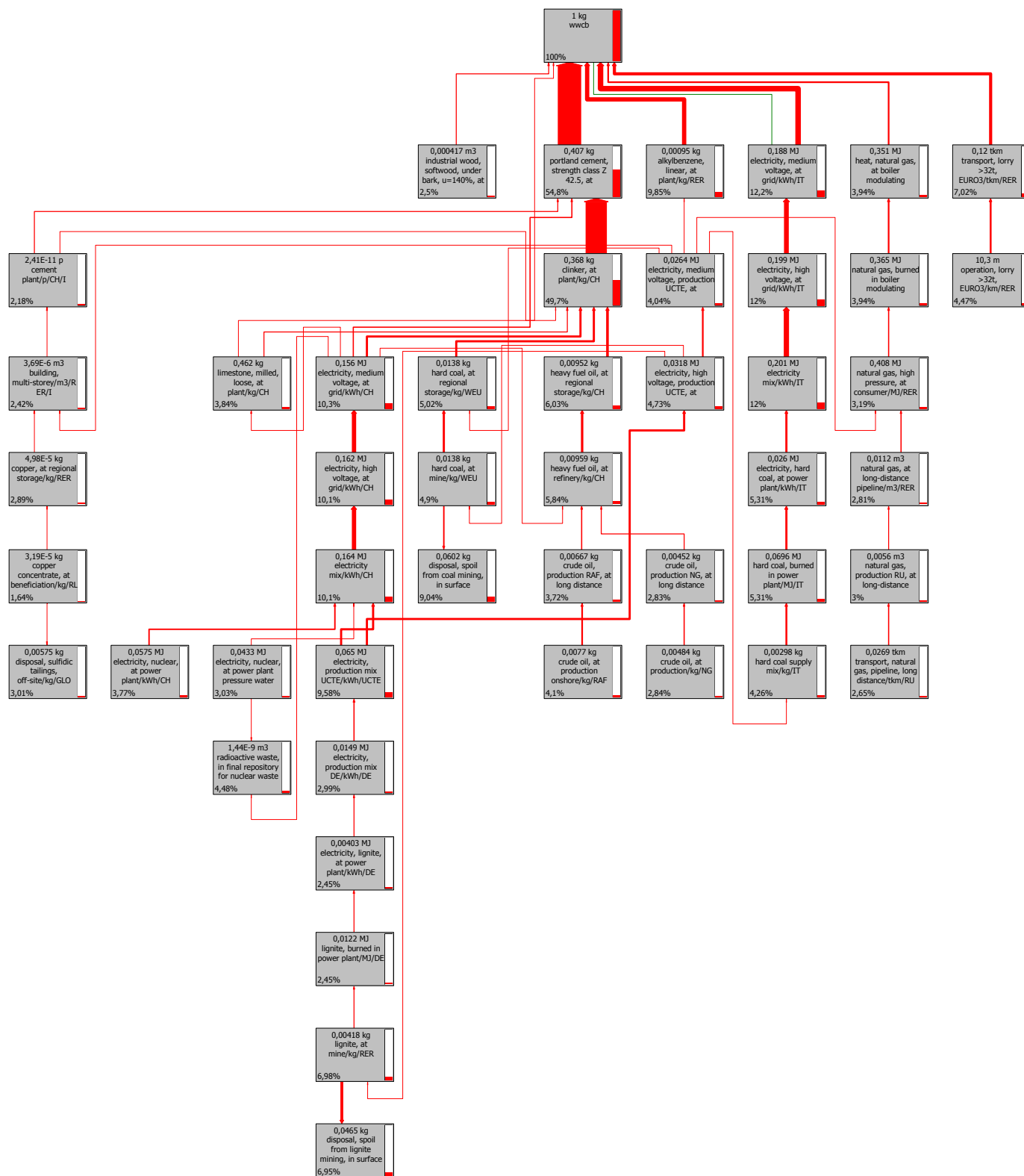
Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Punteggio singolo

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Punteggio singolo
 Unità: mPt
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: Sì
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente



Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Punteggio singolo

Prodotto: wwcb
 Progetto: Tutorial with wood example wwcb
 Categoria: Materiali\Wood
 Metodo: EDIP 2003 V1.03 / Default
 Peso selezionato: Punteggio singolo, (Pt)
 Peso dell'intersezione: Inclusione degli input
 Esclude le emissioni di lungo t No
 Valore di esclusione dell'interse 2,4%



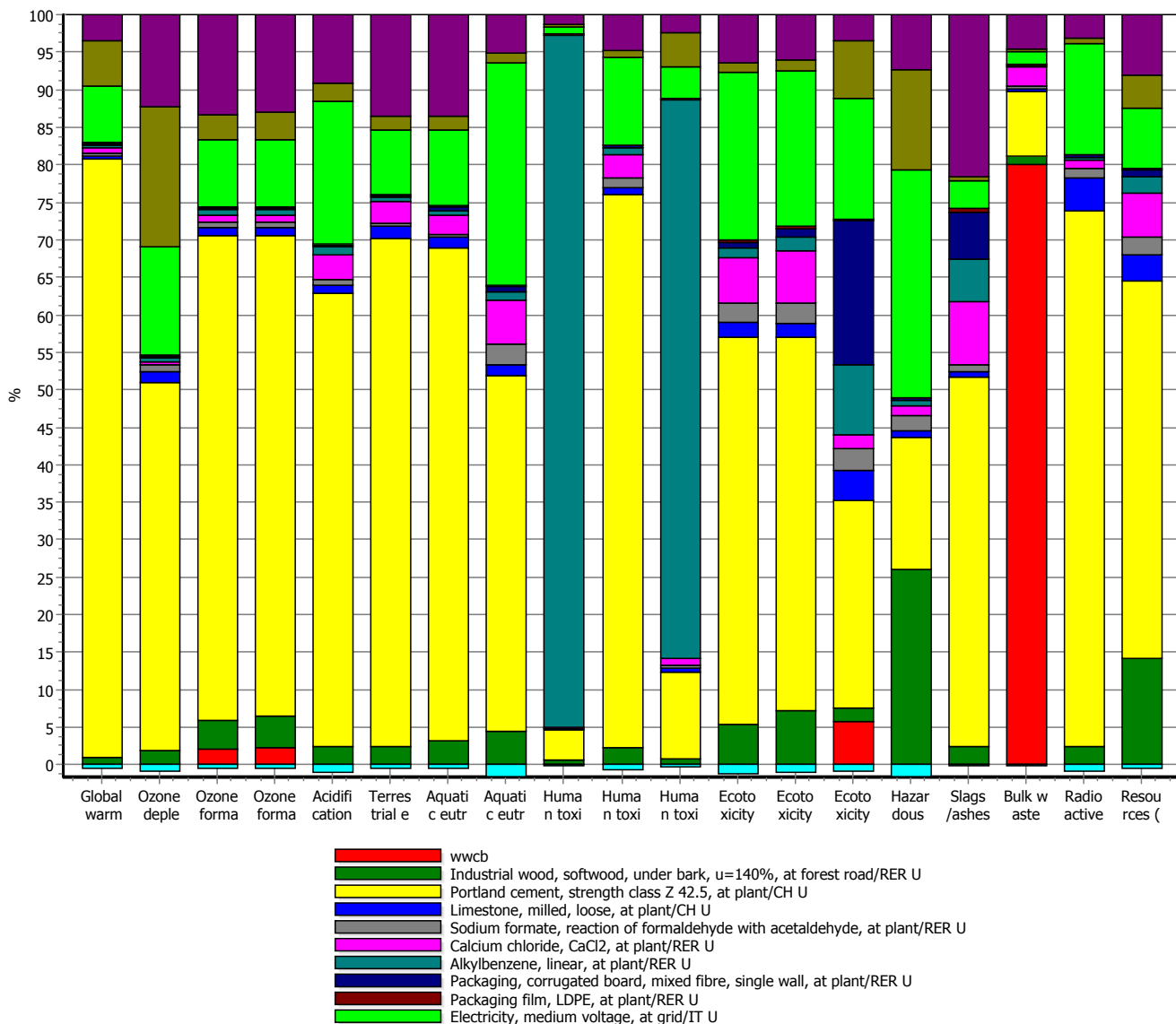
Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: EDIP 2003 V1.03 / Default
 Indicatore: Caratterizzazione
 Unità: %
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termino: No
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente

Categoria	Unità	Totale	wwcb	Industrial wood, softw	Portland cement, stre
Globale	kg CO2 eq	0,417	0,000109	0,00387	0,334
Ozon	kg CFC11 eq	1,91E-8	0	3,71E-10	9,46E-9
Ozon	m2.ppm.h	1,57	0,0321	0,0627	1,02
Ozon	person.ppm.h	0,000109	2,59E-6	4,58E-6	7,02E-5
Acidif	m2	0,0127	0	0,000322	0,00776
Terre	m2	0,0196	0	0,0005	0,0133
Aqua	kg N	7,52E-5	0	2,36E-6	4,97E-5
Aqua	kg P	2,27E-5	0	1,01E-6	1,09E-5
Hum:	person	2,12E4	2,06	124	860
Hum:	m3	2,93	1,87E-6	0,0658	2,17
Hum:	m3	0,0503	4,08E-6	0,000388	0,00583
Ecotc	m3	23,3	0,00087	1,29	12,2
Ecotc	m3	4,43	0	0,325	2,22
Ecotc	m3	0,0356	0,0021	0,000653	0,00988
Hazal	kg	3,14E-6	0	8,32E-7	5,61E-7
Slags	kg	2,52E-5	0	6,11E-7	1,24E-5
Bulk	kg	0,0377	0,0302	0,000358	0,00327
Radic	kg	5,34E-6	0	1,35E-7	3,83E-6
Resol	PR2004	1,13E-5	0	1,6E-6	5,69E-6

Limestone, milled, loc	Sodium formate, reac	Calcium chloride, CaC	Alkylbenzene, linear, i	Packaging, corrugated	Packaging film, LDPE,
0,00198	0,00163	0,00272	0,00187	0,000605	0,000375
2,7E-10	1,73E-10	6,67E-11	9,83E-11	6,17E-11	4,69E-12
0,0188	0,00934	0,0146	0,0114	0,00364	0,00266
1,29E-6	6,79E-7	1,01E-6	8,22E-7	2,53E-7	1,97E-7
0,000158	9,36E-5	0,000423	0,000137	3,34E-5	2,32E-5
0,000303	7,91E-5	0,000587	9,76E-5	4,98E-5	1,75E-5
1,06E-6	3,86E-7	1,91E-6	3,91E-7	4,63E-7	7,34E-8
3,53E-7	6,34E-7	1,35E-6	2,28E-7	1,94E-7	5,08E-8
49	11,5	36,8	1,96E4	10,1	13
0,0282	0,0361	0,0926	0,0252	0,0102	0,00402
0,000242	0,000193	0,000506	0,0375	0,000104	3,45E-5
0,47	0,61	1,44	0,3	0,178	0,0542
0,0823	0,127	0,314	0,0824	0,0469	0,0126
0,00147	0,00102	0,000702	0,00331	0,00694	4E-5
3,12E-8	6,27E-8	4,25E-8	1,82E-8	1,32E-8	1,54E-9
1,81E-7	2,21E-7	2,15E-6	1,41E-6	1,59E-6	1,24E-7
0,000122	0,000152	0,000965	0,000105	5,19E-5	8,73E-6
2,36E-7	7,06E-8	6,6E-8	1,66E-8	1,61E-8	6,05E-9
3,94E-7	2,71E-7	6,52E-7	2,6E-7	9,04E-8	2,24E-8

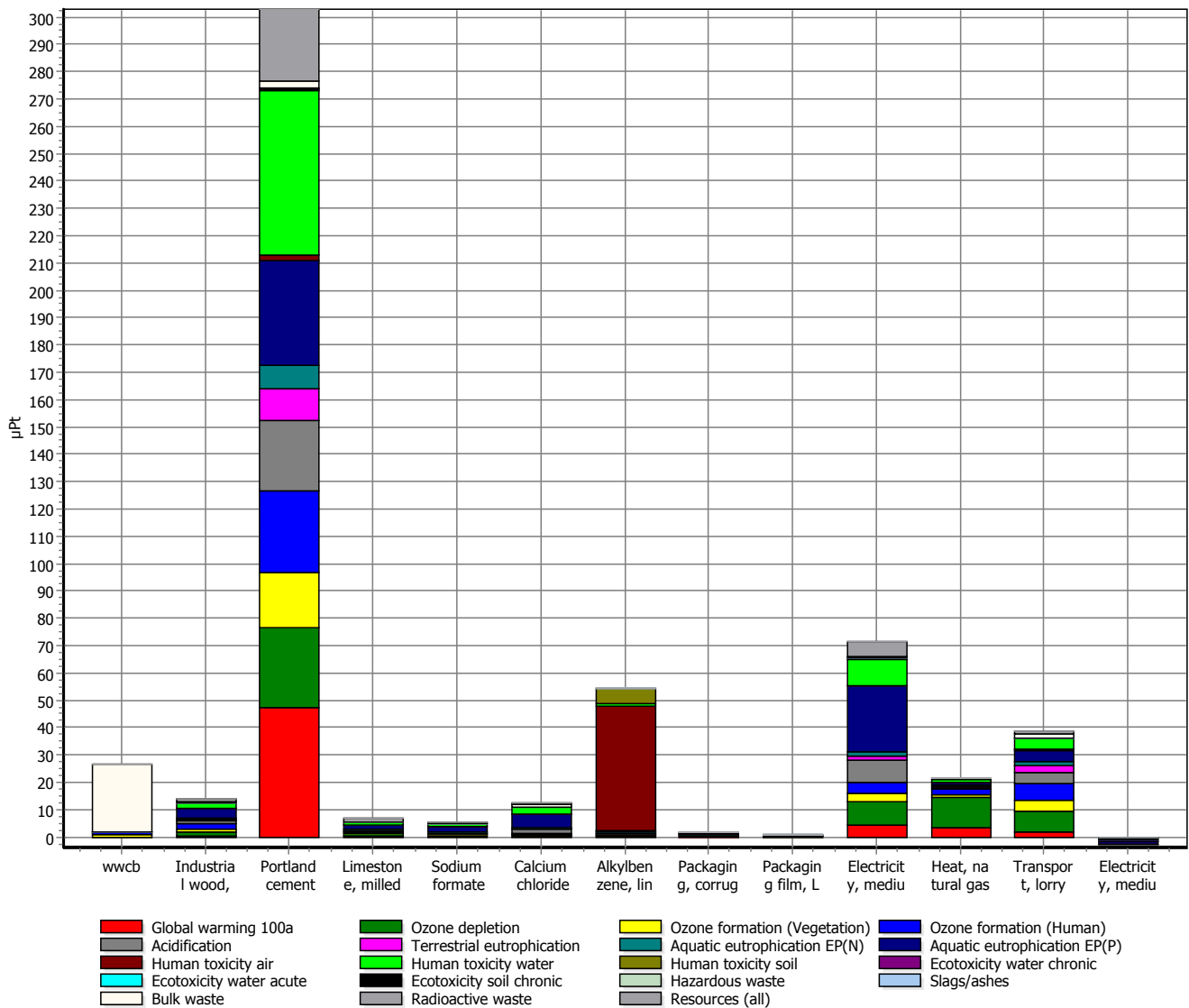
Electricity, medium vc	Heat, natural gas, at	Transport, lorry >32t	Electricity, medium vc
0,032	0,0249	0,0146	-0,00166
2,82E-9	3,58E-9	2,37E-9	-1,46E-10
0,142	0,0537	0,21	-0,00736
9,84E-6	3,96E-6	1,43E-5	-5,09E-7
0,00245	0,000299	0,00118	-0,000127
0,00169	0,000371	0,00266	-8,76E-5
7,6E-6	1,45E-6	1,02E-5	-3,93E-7
6,8E-6	3,26E-7	1,16E-6	-3,52E-7
194	97,2	254	-10
0,341	0,0298	0,138	-0,0177
0,00208	0,0023	0,00121	-0,000107
5,31	0,293	1,5	-0,275
0,927	0,0649	0,271	-0,048
0,00577	0,00277	0,00126	-0,000299
9,68E-7	4,28E-7	2,34E-7	-5,01E-8
9,38E-7	1,17E-7	5,45E-6	-4,86E-8
0,000596	0,000129	0,00173	-3,09E-5
7,98E-7	3,63E-8	1,66E-7	-4,13E-8
9,16E-7	5,03E-7	9,01E-7	-4,74E-8

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: EDIP 2003 V1.03 / Default
 Indicatore: Caratterizzazione
 Unità: %
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termine: No
 Modo relativo: Orizzontale
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente



Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: EDIP 2003 V1.03 / Default / Caratterizzazione

Calculation: Analizza
 Results: Valutazione impatto
 Product: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: EDIP 2003 V1.03 / Default
 Indicatore: Punteggio singolo
 Unità: µPt
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termino: No
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente



Analizzando 1 kg 'wwcb'; Metodo: EDIP 2003 V1.03 / Default / Punteggio singolo

Process

Category type material
 Process identifier TESAF00318554800050
 Type
 Process name
 Status
 Time period Unspecified
 Geography Unspecified
 Technology Unspecified
 Representativeness Unspecified
 Multiple output allocation Unspecified
 Substitution allocation Unspecified
 Cut off rules Unspecified
 Capital goods Unspecified
 Boundary with nature Unspecified
 Infrastructure No
 Date 29/10/2012
 Record
 Generator
 Literature references
 Collection method
 Data treatment
 Verification
 Comment
 Allocation rules
 System description

Products

wwcb con fotovoltaico e idroelettrico 1 kg 100 non definito Wood

Avoided products

Electricity, medium voltage, at grid/IT U 0,01140 kWh Non definito

Resources

Water, groundwater consumption 0,28658 kg Non definito

Materials/fuels

Industrial wood, softwood, under bark, u 0,41731 dm3 Non definito
 Portland cement, strength class Z 42.5, a 0,40647 kg Non definito
 Limestone, milled, loose, at plant/CH U 0,14997 kg Non definito
 Sodium formate, reaction of formaldehyd 0,00301 kg Non definito
 Calcium chloride, CaCl₂, at plant/RER U 0,00319 kg Non definito
 Alkylbenzene, linear, at plant/RER U 0,00095 kg Non definito
 Packaging, corrugated board, mixed fibre 0,00053 kg Non definito
 Packaging film, LDPE, at plant/RER U 0,00014 kg Non definito

Electricity/heat

Electricity, medium voltage, at grid/IT U 0,02584 kWh Non definito
 Heat, natural gas, at boiler modulating > 0,35113 MJ Non definito
 Transport, lorry >32t, EURO3/RER U 120,4 kgkm Non definito
 Electricity, hydropower, at power plant/I 0,02071 kWh Non definito

Emissions to air

Methanol 0,00627 g Non definito
 Dimethyl formamide 0,00208 g Non definito
 2-Butoxyethanol acetate 0,00170 g Non definito
 Benzene, ethyl- 0,00015 g Non definito
 Isopropyl acetate 0,00055 g Non definito
 Acetone 0,00050 g Non definito
 Ethanol 0,00029 g Non definito
 Heptane 0,03156 g Non definito
 Particulates, unspecified 0,01094 g Non definito

Emissions to water

Emissions to soil

Final waste flows

Wood, sawdust 0,01566 kg Non definito
 Rejects 0,01450 kg Non definito
 Packaging waste, unspecified 0,00003 kg Non definito

Non material emissions

Social issues

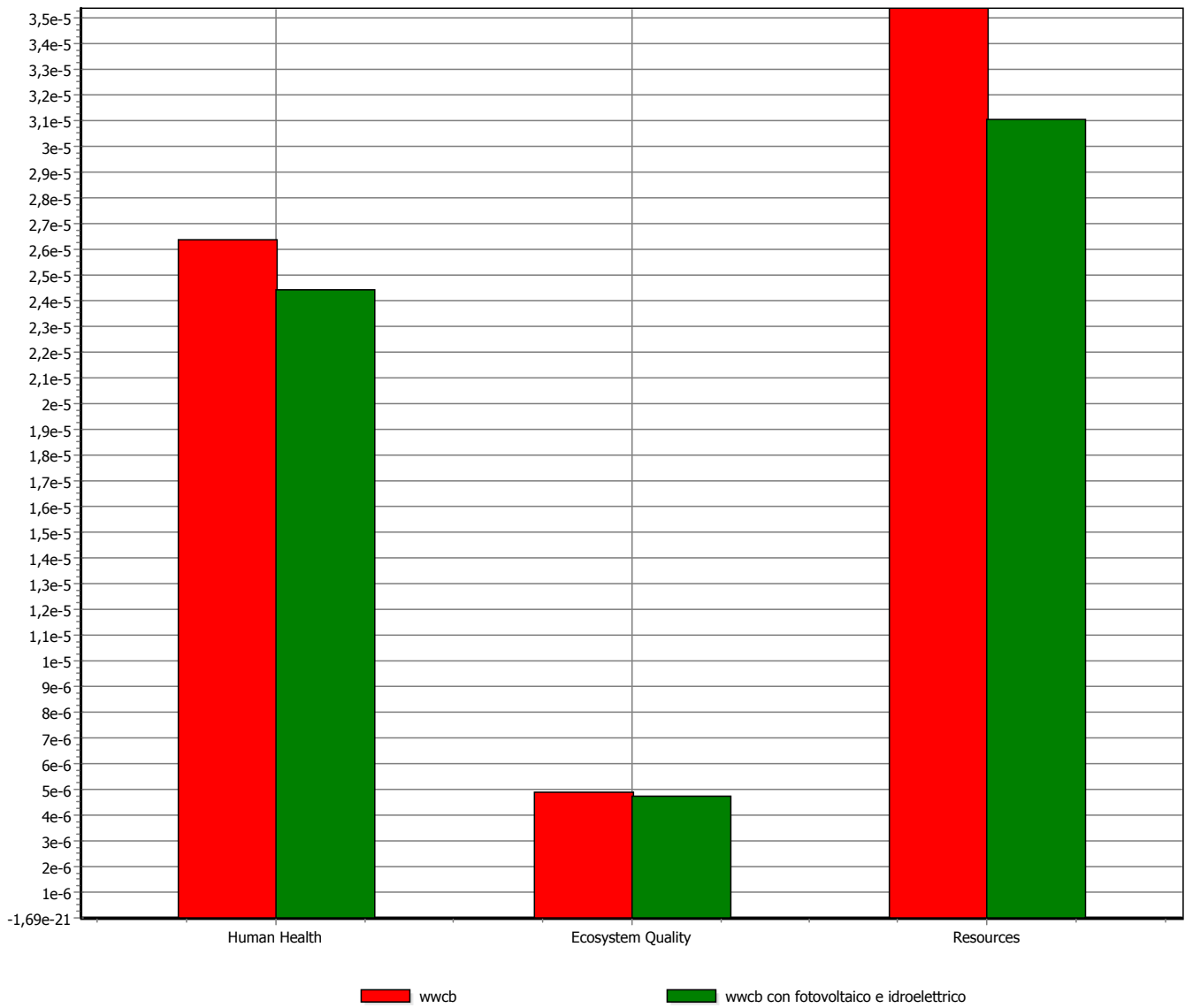
Economic issues

Waste to treatment

Input parameters

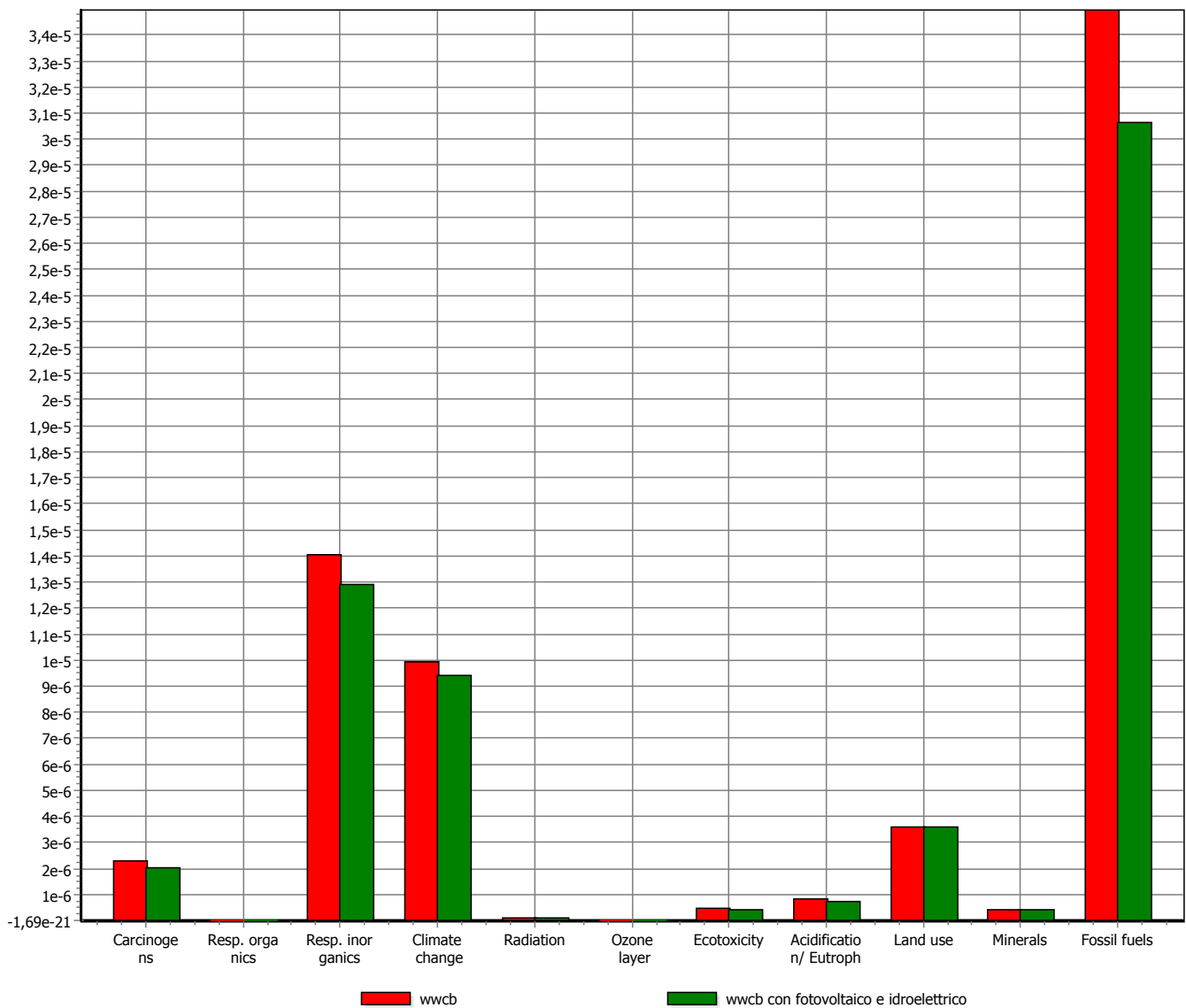
Calculated parameters

Calculation: Confronta
Results: Valutazione impatto
Product 1: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
Product 2: 1 kg wwcb con fotovoltaico e idroelettrico (of project Tutorial with wood example wwcb)
Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
Indicatore: Normalizzazione
Skip categories: Mai
Esclude processi di infrastrutture: No
Esclude le emissioni di lungo termin: No
Per impact category: No
Sorted on item: Categoria di danno
Sort order: Ascendente



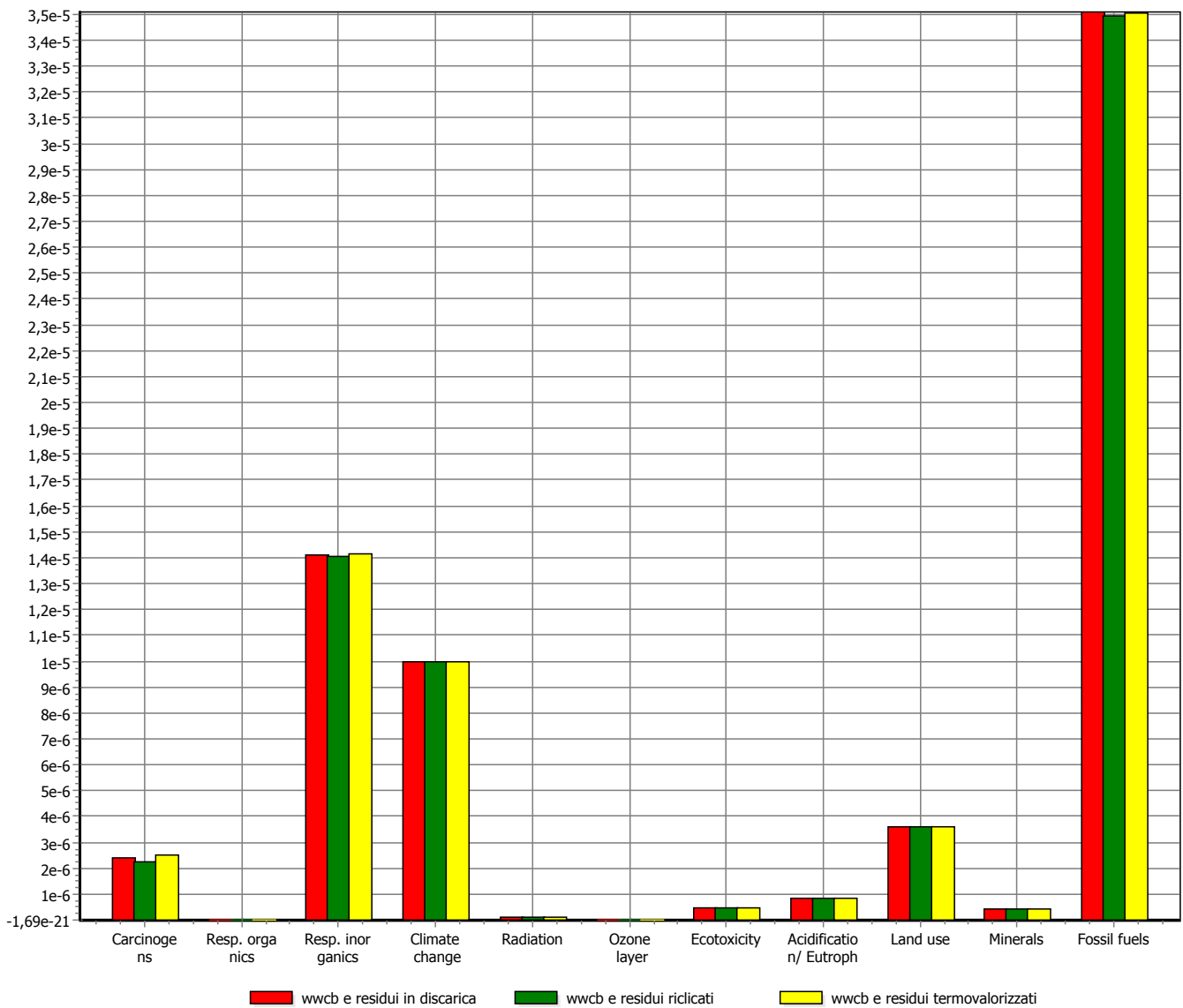
Confronto di 1 kg 'wwcb' con 1 kg 'wwcb con fotovoltaico e idroelettrico'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Normalizzazione

Calculation: Confronta
 Results: Valutazione impatto
 Product 1: 1 kg wwcb (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Product 2: 1 kg wwcb con fotovoltaico e idroelettrico (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Normalizzazione
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: Sì
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente



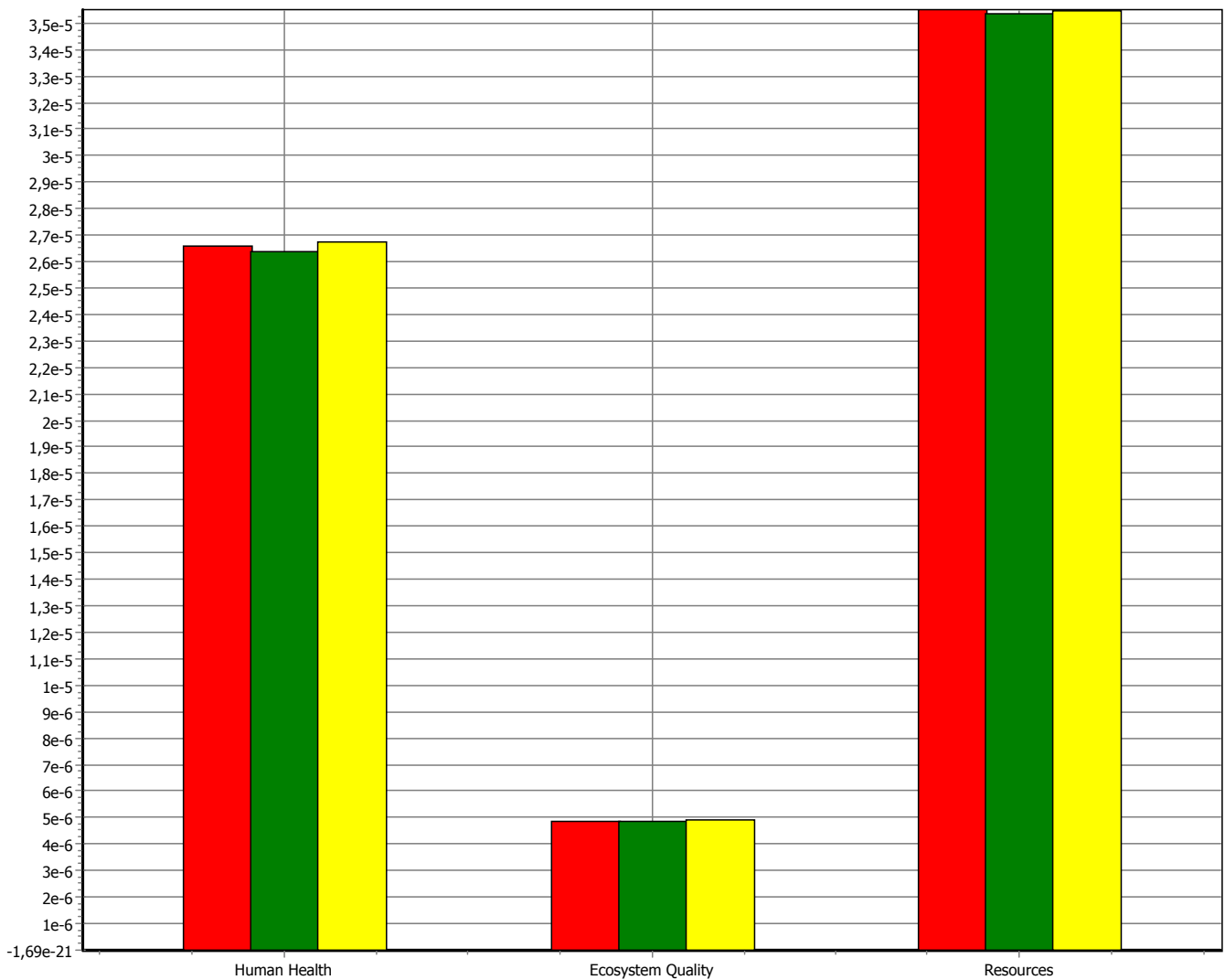
Confronto di 1 kg 'wwcb' con 1 kg 'wwcb con fotovoltaico e idroelettrico'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Normalizzazione

Calculation: Confronta
 Results: Valutazione impatto
 Product 1: 1 kg wwcb e residui in discarica (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Product 2: 1 kg wwcb e residui riciclati (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Product 3: 1 kg wwcb e residui termovalorizzati (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Normalizzazione
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: Si
 Sorted on item: Categoria d'impatto
 Sort order: Ascendente



Confronto di 1 kg 'wwcb e residui in discarica', 1 kg 'wwcb e residui riciclati' e 1 kg 'wwcb e residui termovalorizzati'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Norm

Calculation: Confronta
 Results: Valutazione impatto
 Product 1: 1 kg wwcb e residui in discarica (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Product 2: 1 kg wwcb e residui riciclati (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Product 3: 1 kg wwcb e residui termovalorizzati (of project Tutorial with wood example wwcb)
 Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H
 Indicatore: Normalizzazione
 Skip categories: Mai
 Esclude processi di infrastrutture: No
 Esclude le emissioni di lungo termin: No
 Per impact category: No
 Sorted on item: Categoria di danno
 Sort order: Ascendente



■ wwcb e residui in discarica
 ■ wwcb e residui riciclati
 ■ wwcb e residui termovalorizzati

Confronto di 1 kg 'wwcb e residui in discarica', 1 kg 'wwcb e residui riciclati' e 1 kg 'wwcb e residui termovalorizzati'; Metodo: Eco-indicator 99 (H) V2.08 / Europe EI 99 H/H / Norme