



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Analisi LCA di materiali ultraleggeri per il trasporto: Aluminum foam sandwich

Simona Scalbi, Paolo Masoni

Report RdS/2012/094

ANALISI LCA DI MATERIALI ULTRALEGGERI PER IL TRASPORTO: ALUMINUM FOAM SANDWICH

Simona Scalbi, Paolo Masoni (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

Indice

Sommario	4
Introduzione	5
Rassegna di studi di LCA relativi ai materiali leggeri e ultraleggeri nel settore dei trasporti	7
Life Cycle Assessment	12
<i>Obiettivo e campo di applicazione</i>	12
Definizione del prodotto.....	12
Obiettivo dello studio	12
Destinatari dello studio.....	12
Funzione del sistema	12
Unità funzionale.....	12
Confini del sistema.....	12
Assunzioni	13
Metodologia LCIA.....	13
Metodologie di interpretazione.....	13
Qualità dei Dati	13
Revisione critica	14
<i>Analisi di Inventario</i>	14
Produzione AFS di laboratorio dimensioni 40*30*3cm ³	14
Estruso di Alluminio	15
Produzione precursore schiuma: polvere atomizzata di AlSi12.....	15
Idruro di Titanio	17
Il calcolo dell'energia consumata per la preparazione AFS.....	18
Processo completo.....	19
<i>Analisi degli impatti</i>	19
<i>Analisi di sensitività: confronto campione ideale 40*30*3cm³ con campione reale 40*3*3cm³</i>	22
Il calcolo dell'energia consumata.....	22
Valutazione impatti confronto campione ideale AFS 40x30x3cm ² e reale 40x3x3cm ³	23
Proposta di Ecodesign per la produzione del pannello di AFS	25
<i>Utilizzo di alluminio riciclato</i>	25
<i>Logistica trasporti</i>	28
<i>Variatione spessore del sandwich</i>	29
Conclusioni	31
Ringraziamenti	31
Allegato: Tabella fattori di caratterizzazione per le categorie di Global Warming 100 e 500 anni	32
Abbreviazioni ed acronimi	34
Riferimenti bibliografici	35

Sommario

Il lavoro è inquadrato nell'ambito delle attività sul Progetto 3.5 "Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" dell' AdP ENEA-MSE. In particolare questo è il report di progetto "RdS/2012/094" previsto per l'obiettivo C " Life-Cycle Assessment energetico ambientale e Risk Assessment delle tecnologie suddette" ed è condotto in accordo con norma ISO 14044:2006 e ILCD Handbook¹.

Questo lavoro presenta un'analisi ambientale relativa alla produzione dell'Aluminum Foam Sandwich (AFS) per future applicazioni nei mezzi di trasporto. Allo stato attuale di sviluppo della tecnologia AFS, non sono ancora completamente disponibili dati primari sui processi a scala industriale, pertanto si è reso necessario utilizzare in gran parte dati di letteratura. Lo studio di LCA riguarda la fase di produzione dei materiali in AFS, utilizzabili per vettori di trasporto pubblico a basso impatto ambientale e maggiore sicurezza passiva. Lo studio prevede un'analisi della produzione del materiale AFS dal punto di vista ambientale per proposte di miglioramento ambientale alla progettazione del materiale stesso e per suggerimenti su la scelta di parametri di progettazione più sostenibili per un pavimento flottante in AFS dei vagoni passeggeri per treni di media e lunga percorrenza.

Lo studio di LCA è stato fatto su un pannello in AFS 40*30*3 cm³ composto da un involucro in alluminio con pelli di spessore di 2 mm per lato e un "core" di schiuma di alluminio dello spessore di 2,6 cm, che può essere prodotto nel laboratorio ENEA UTMAT MONIT. Questa scelta è stata fatta poiché è la massima geometria producibile nel laboratorio ENEA UTMAT MONIT che meglio approssima la forma del materiale da usare per progettazione del pavimento flottante in AFS, come si desume dai dati preliminari presentati da CALEF "Consorzio per la ricerca e lo sviluppo delle applicazioni industriali laser e del fascio elettrico e dell'ingegneria di processo, materiali, metodi e tecnologie di produzione". CALEF che si occuperà della progettazione di tale pavimento, componente su cui incentrare l'analisi di progettazione per l'applicazione di questo materiale innovativo al settore del trasporto pubblico. La scelta di questo tipo di componente è legata a una serie di considerazioni:

- è un componente facilmente modulabile;
- essendo collegato al telaio della cassa mediante giunti anti-vibranti, non ha una funzione strutturale e quindi la sostituzione di questo componente minimizza i tempi di re-ingegnerizzazione dei carri;
- durante la vita operativa è soggetto prevalentemente a condizioni di carico flessionali – dovute sia alle condizioni di vincolo (appoggi alle estremità) sia di carico (carichi concentrati e distribuiti su una sola delle facce – ovvero quelle ottimali per l'utilizzo di strutture sandwich.

La prima fase della ricerca ha riguardato una rassegna bibliografica degli studi d'impatto ambientale con approccio di ciclo di vita relativi all'uso di materiale leggeri ed ultraleggeri nei mezzi di trasporto. Questa analisi è stata propedeutica all'esecuzione di uno studio di LCA del componente in fase di sviluppo da parte del progetto. Lo studio di LCA ha consentito, anche con i limiti derivanti dalla qualità dei dati disponibili dato l'attuale sviluppo della tecnologia AFS, di valutare l'esistenza di trade-off tra i diversi elementi che compongono l'AFS e tra i diversi impatti, nonché di identificare i processi più critici dal punto di vista ambientale. Lo studio di LCA ha permesso anche di svolgere analisi di eco design, proponendo l'utilizzo di materie prime alternative come l'uso di alluminio riciclato, e valutando gli effetti di una riduzione della distanza di approvvigionamento della materia prima. Inoltre è stata effettuata un'analisi parametrica variando la geometria del pannello per fornire al progettista dati per ottimizzare dal punto di vista ambientale il rapporto tra spessore della pelle in alluminio del sandwich e del suo interno in schiuma (core).

¹ <http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/projects>

Introduzione

I trasporti rappresentano un settore in continua crescita in Europa e nel mondo. Questo ha comportato un continuo aumento dei consumi energetici e dell'emissione soprattutto di gas serra. In Figura 1 viene

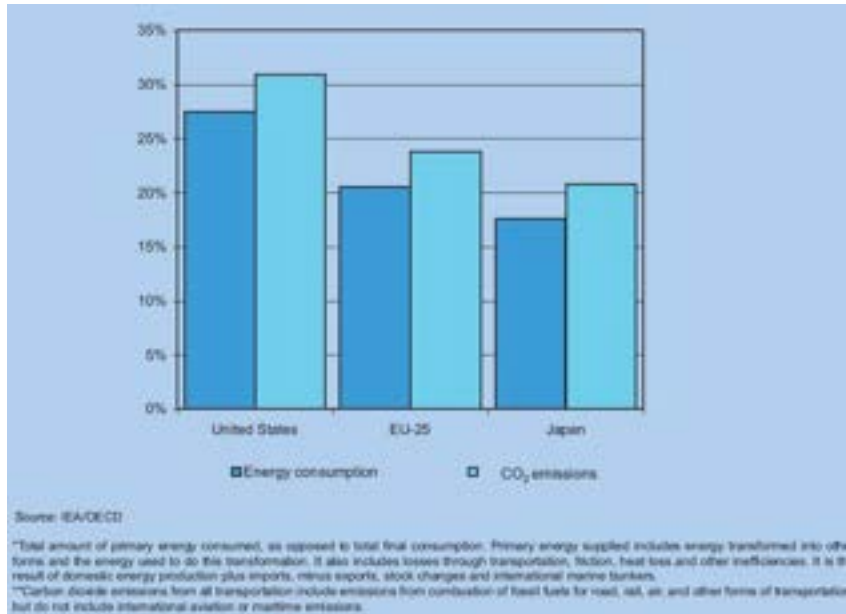


Figura 1 importanza dei trasporti sul consumo totale di energie e di emissione di CO₂ in Eu25- Stati Uniti e Giappone ¹

indicata l'incidenza dei trasporti nel 2004 sul consumo totale di energia e sulle emissioni e si vede come questo settore incida quasi per il 27% dei consumi energetici negli Stati Uniti e diminuisce a un 21% e 18% rispettivamente per EU-25 (Europa 25 paesi) e il Giappone. Tali valori a causa della continua crescita della mobilità sono andati aumentando infatti già nel 2009 i consumi finali di energia in Europa per i trasporti sono cresciuti fino al 33% rispetto il 26,5% per l'Edilizia, il 24% nell'industria, il 12,6% nei servizi². Questi valori sono anche rispecchiati dal quadro nazionale dove i trasporti contribuiscono per il 32% sui i consumi finali italiani rispetto a un 28% per l'industria, 21% per il residenziale e 11% per il terziario [1]. Tra i vari sistemi di trasporto quello che incide maggiormente sulle emissioni di gas serra è il trasporto su gomma, mentre il sistema ferroviario incide sul sistema totale dei trasporti come emissioni di gas clima alteranti solo per il 2-4% [2].

Inoltre il settore dei trasporti ha ancora una notevole rilevanza economica e sull'occupazione, infatti contribuisce al 3,1% del PIL e impegna circa 5,1% della forza lavoro in Europa³

Si conferma quindi come i trasporti siano un settore strategico per le politiche europee di produzione e consumo sostenibile. Nel Dicembre 2008, il Parlamento Europeo ha approvato il Pacchetto Clima - Energia, volto a conseguire gli obiettivi che l'UE si è fissata per il 2020: ridurre del 20% le emissioni di gas a effetto serra, aumentare al 20% il consumo di fonti rinnovabili e portare al 20% il risparmio energetico. Recentemente la UE (Unione Europea) ha verificato l'attualità di tale piano e mentre risulta che abbia la possibilità seguendo il trend attuale di raggiungere i primi due obiettivi, maggiori sforzi devono essere fatti per la riduzione dei consumi energetici, così come ribadito anche sul piano di efficienza energetica [3]. Inoltre il Consiglio Europeo nel febbraio 2011, per contenere entro i 2°C il riscaldamento globale prodotto dal cambiamento climatico, ha riconfermato la necessità di ridurre le emissioni di gas serra dell'80-95% entro il 2050 rispetto al 1990 [4]. Queste scelte hanno portato alla stesura di un LIBRO BIANCO: "Tabella di marcia verso uno spazio unico europeo dei trasporti - Per una politica dei trasporti competitiva e sostenibile" [5], dove si conferma l'obiettivo di ridurre le emissioni di CO₂ del 60% rispetto al 1990,

²http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Transport_energy_consumption_and_emissions aggiornamento 25-7-2012

³ <http://ec.europa.eu/competition/sectors/transport/overview.html> last update 26-7-2012

mantenendo un sistema di trasporto competitivo capace di aumentare la mobilità e l'occupazione riducendo il consumo di combustibili. Gli obiettivi principali entro il 2050 per il settore sono:

- eliminare l'uso di auto con combustibili tradizionale;
- utilizzare in aviazione il 40% dei carburanti a basso contenuto di carbonio e ridurre nei trasporti marittimi almeno del 40% l'uso di oli combustibili;
- ottimizzare le rete di trasporto incrementando tra l'altro l'uso di modi di trasporto più efficienti sotto il profilo energetico:
 - trasferire il 50% dei trasporti su strada per percorrenze oltre i 300km verso altri modi quali ferrovia e navigazione;
 - completare la rete ferroviaria ad alta velocità;
 - collegare tutti gli aeroporti alla rete ferroviaria;
- Migliorare l'efficienza dei trasporti e dell'uso delle infrastrutture mediante sistemi di informazione e incentivi di mercato.

Queste scelte sono in linea con i temi sviluppati nell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA. Infatti, il risparmio energetico e le soluzioni di trasporto collettivo sostenibile risultano alcune delle linee strategiche dell'UE. Lo sviluppo di nuove tecnologie e materiali capaci di contribuire a tali obiettivi deve necessariamente tenere conto degli impatti ambientali che possono generare durante tutto il loro ciclo di vita.

Uno strumento riconosciuto a livello internazionale per le analisi di impatto ambientale è la Valutazione del Ciclo di Vita (in inglese Life Cycle Assessment - LCA). LCA è una metodologia standardizzata (ISO 14040 - 14044) che a livello europeo viene considerata strategica e adottata in numerose direttive e comunicazioni di politica ambientale. La Commissione Europea, ed in particolare il Joint Research Center, incoraggia ormai da anni le imprese e le pubbliche amministrazioni ad un approccio di "life cycle thinking". Al fine di promuovere una maggiore coerenza e armonizzazione degli studi di LCA ha inoltre promosso l'International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook⁴ che consta di una serie di manuali per garantire una maggiore comparabilità e la qualità degli studi di LCA, proponendo anche un database di LCI⁵ (Life Cycle Inventory) di processi e prodotti più comuni relativi a materiali, energia, trasporti e gestione dei rifiuti con riferimento europeo [6]. Già nel 2003, la Comunicazione sull'IPP (Integrated Product Policy - politiche integrate di prodotto)[7] riportava espressamente che "LCA attualmente fornisce il miglior framework per valutare i potenziali impatti ambientali dei prodotti". Inoltre lo strumento di LCA è presente nel Piano per la Produzione e il Consumo Sostenibile [8], nella Direttiva sui rifiuti [9], nell'ETAP (Environmental Technologies Action Plan) [10] e anche nel regolamento REACH [11], [12]. Infine è centrale nella Direttiva Ecodesign [13], che richiede alle aziende di "prodotti rilevanti per il consumo di energia" di svolgere attività di ecodesign, sviluppando prodotti che considerino la riduzione degli impatti ambientali lungo tutte le fasi del loro ciclo di vita. E' infatti ormai riconosciuto che l'80% degli impatti di un prodotto sono determinati durante la fase di progettazione.

Per questi motivi l'LCA è adottata nel presente studio per valutare il profilo ambientale dei nuovi materiali (pannelli Aluminium Foam Sandwich - AFS) proposti per il risparmio energetico dei mezzi di trasporto.

I pannelli AFS sono costituiti da un "core" in schiuma e da due sottili pelli esterne in alluminio (Al bulk), il cui assemblaggio permette la realizzazione di componenti dall'elevata rigidità flessionale ed alta capacità di assorbimento di urti. Tali caratteristiche meccaniche, associate alle doti di estrema leggerezza (densità dal 20 al 40% del bulk) e alla capacità di schermatura elettromagnetica, rendono questi materiali particolarmente interessanti nell'ambito dei trasporti, sia come assorbitori di energia (resistenza passiva) sia nello sviluppo di "space frame" ad elevata rigidità e peso ridotto che possono contribuire alla realizzazione di vettori leggeri e, potenzialmente, a basso impatto ambientale. I pannelli AFS utilizzati sono pannelli sandwich realizzati in continuo con due pelli esterne in alluminio, ed un core centrale in schiuma di alluminio. Il legame fra pelli e core è realizzato mediante legame metallurgico [14].

⁴ <http://lct.jrc.ec.europa.eu/assessment/projects>

⁵ <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/datasetArea.vm>

Rassegna di studi di LCA relativi ai materiali leggeri e ultraleggeri nel settore dei trasporti

Per migliorare le prestazioni energetiche e la riduzione dei consumi dei veicoli di trasporto molti sono i parametri di progettazione su cui è possibile intervenire, come l'utilizzo di combustibili alternativi, lo sviluppo di veicoli ibridi (a fuel cell o a batteria), l'aerodinamica dei veicoli, la resistenza di rotolamento, il sistema di guida e il peso del veicolo. Numerose iniziative sono in corso, ad esempio il Dipartimento per l'Energia (DOE) degli Stati Uniti sta sviluppando un programma per la diminuzione dell'uso di combustibili nelle macchine e nei mezzi pesanti chiamato "Vehicle Technologies Program". Il programma interviene in diverse aree come: sistemi e veicoli ibridi; sistemi di stoccaggio energia; motori a combustione avanzata; combustibili e lubrificanti: analisi e strumenti; tecnologie e materiali. Per quanto riguarda l'Europa diversi studi e progetti (TRIAS⁶, EE-VERT⁷, ECOMOVE⁸, ecc.) sono stati promossi per migliorare le performance energetiche. L'approccio scelto è di ciclo di vita, denominato "well to wheels" (dal pozzo alla ruota). Si considera l'impatto del veicolo partendo dall'estrazione delle materie prime e dal consumo di energia primaria durante la produzione del veicolo fino ad arrivare all'uso, includendo le prestazioni del veicolo.

I nuovi materiali e le nuove tecnologie capaci di garantire le stesse prestazioni di sicurezza e durabilità riducendo il peso del mezzo di trasporto risultano uno dei campi più promettenti. In particolare il mercato globale ha visto crescere gli investimenti, il consumo globale di materiali leggeri nel sistema dei trasporti era nel 2010 di circa 46,7 milioni di tonnellate con un valore di 125.3 miliardi di dollari e come si vede in Figura 2 è un settore in crescita con un trend del 7,7%⁹.

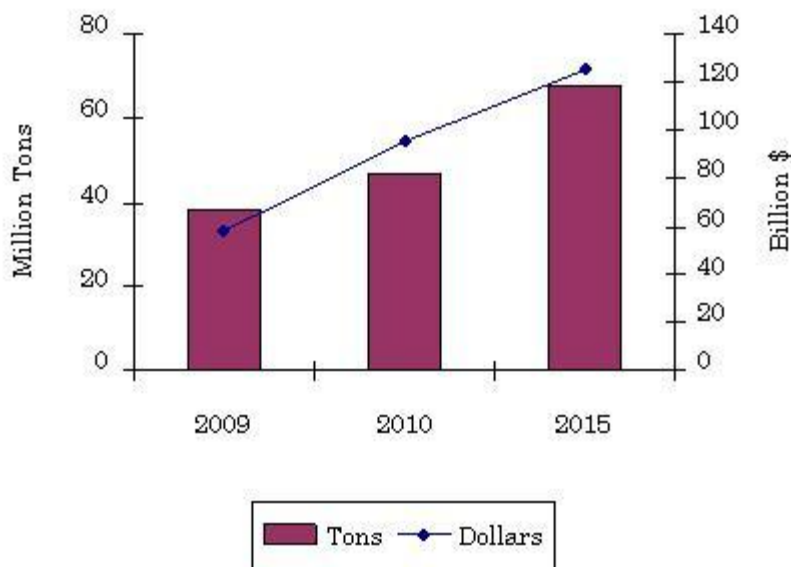


Figura 2 trend del mercato globale di materiali leggeri usati nel settore dei trasporti 2009-2015
(fonte: www.bccresearch.com)

Questa problematica si è sviluppata molto sia nel campo degli autoveicoli che dei trasporti pubblici su gomma fino al trasporto ferroviario. Nell'applicazione di nuovi materiali leggeri bisogna tener conto di diversi parametri di progettazione come la tipologia del veicolo in cui viene applicato: auto, mezzo pesante o treno e quale parte del subsistema si va a modificare come corpo del veicolo, telaio, interni. Queste considerazioni fanno emergere la complessità di queste applicazioni che per essere sostenibili devono

⁶ Sustainability Impact Assessment of Strategies Integrating Transport, Technology and Energy Scenarios

⁷ Energy efficient vehicles for road transport

⁸ Cooperative Mobility Systems and Services for Energy Efficiency

⁹ www.bccresearch.com, accesso Agosto 2012

applicare criteri di ecoinnovazione (ecodesign) e quindi includere nella parte di progettazione delle innovazioni anche gli impatti ambientali delle stesse.

LCA è una delle metodologie più diffuse nell'applicazione dell'ecoinnovazione proprio per considerare gli impatti ambientali potenziali del prodotto lungo tutto il ciclo di vita.

Nel seguito si riportano i risultati di una rassegna bibliografica di studi di LCA relativi alle valutazioni ambientali di utilizzo di materiali leggeri nel settore dei trasporti. Questa rassegna, consentendo di individuare le principali scelte metodologiche adottate e di valutare risultati ottenuti, è stata propedeutica allo studio di LCA descritto nel successivo capitolo.

Già negli anni 90 l'analisi LCA è stata considerata uno strumento per una progettazione sostenibile nel settore automotive [15]. Inoltre è stata usata da Stodolsky et al [16] per valutare i miglioramenti ambientali che si avevano utilizzando l'alluminio nel telaio delle autovetture. Questi dichiaravano che l'uso dell'alluminio nel telaio comportava una riduzione di peso del 19-31% (circa 270-460 kg) per autoveicolo e proponevano una riduzione dei consumi di carburante del 15-20%. I miglioramenti nei consumi dei carburanti erano calcolati considerando che le performance di accelerazione (esprese come il rapporto tra potenza del motore e la massa del veicolo) rimangano costanti nel tempo e che per ogni kg in meno di peso si ha un miglioramento nel consumo di carburante dello 0.66%.

Das Sujit [17] fa un'analisi LCA per comparare tre diversi materiali per la produzione di telaio di automobili, l'acciaio, materiale tradizionale, con due materiali innovativi acciai ultraleggeri (ultralight steel autobodies - ULSAB) che includono, come l'acciaio normale, un 25-30% di acciaio recuperato (scraps) e alluminio primario. Nello studio considera la fase di produzione del telaio, l'uso dell'autoveicolo e il riciclaggio finale. Egli assume una riduzione nel peso del telaio del 50% se si utilizza l'alluminio e del 25% per ULSAB, inoltre considera un aumento del 5% dell'efficienza del veicolo per un 10% di riduzione del peso complessivo dell'autoveicolo. Come risultati, considerando una vita media pari a 14 anni per tutti e tre i materiali e 181,195 miglia percorse per ciascun veicolo, dichiara che usando l'alluminio si ha un risparmio di energia di 52 GJ/veicolo, mentre con il ULSAB di 22GJ/veicolo rispetto al veicolo tradizionale in acciaio. Le emissioni e i consumi energetici sono influenzati non solo dal peso dei materiali ma dipendono anche dal tipo di produzione di ciascun materiale e dall'efficienza del veicolo usata nelle assunzioni. Lo studio prevede anche un'analisi di sensibilità su questi parametri e include una visione prospettica di quali sono gli effetti e i tempi di ritorno nella diffusione di questi nuovi materiali, facendo diverse ipotesi di penetrazione del mercato. L'analisi di scenario secondo l'autore fornisce una migliore indicazione dei meriti ambientali e dei tempi entro i quali i benefici ambientali si realizzano.

Mcauley [18] indica l'importanza delle analisi di ciclo di vita per una progettazione sostenibile degli autoveicoli. Segnala, infatti, che l'uso e il mantenimento dell'autoveicolo consuma circa 87.1% di energia, mentre la produzione si attesta intorno al 7,1% e il fine vita attraverso il recupero dei materiali incide solo per il 4,8 % e suggerisce che la riduzione di peso del veicolo gioca un ruolo importante nella riduzione dei consumi di energia e delle emissioni degli autoveicoli a causa della resistenza al rotolamento e delle forze di accelerazione che sono proprio caratteristiche della fase d'uso del veicolo. Riporta inoltre che la riduzione del peso del 10% può portare a una diminuzione del consumo di carburante intorno al 3-7%. Nell'articolo valuta che nel futuro la nuova classe di veicoli leggeri adotterà materiali come nuove tipologie di plastiche e compositi, ma propone anche la sperimentazione di metalli leggeri come leghe di alluminio e di magnesio e acciai ultraleggeri. Il Center for Transportation Analysis, Oak Ridge National Laboratory¹⁰, ha fatto una valutazione dei materiali leggeri applicati al settore automotive, lo studio include un'analisi dei costi di questi nuovi materiali e una analisi di impatto ambientale attraverso la metodologia LCA in cui emerge che la maggior parte dei metalli leggeri da loro considerati come alluminio, magnesio e compositi polimerici hanno un costo molto alto sia in termini economici che di consumi energetici nella parte di produzione. Questi svantaggi però vengono compensati se si considera la fase di uso di questi materiali che permette una riduzione di circa il 6,6 % del consumo di combustibile con una riduzione in peso del veicolo del 10% .

¹⁰http://www.google.it/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CFcQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.ornl.gov%2Fsci%2Fees%2Fetsd%2Fcta%2FAuto%2520Lightweight%2520Materials.pdf&ei=C6MSUJ_SctDQ4QSwroDoDA&usq=AFQjCNF-sLxPskHKmXnzESLu7UfYr5xuQ

Inoltre riportano che, sebbene l'alluminio ha un elevato consumo energetico nella fase di produzione, se si considera anche la fase di uso di 14 anni del veicolo c'è un risparmio di 1,8GJ/veicolo rispetto all'uso dell'acciaio [19].

Il progetto DutchEVO¹¹, svoltosi nel periodo tra 1998 e 2004, ha sviluppato una macchina ultraleggera, applicando criteri di eco-innovazione riprogettando alcune parti dell'autoveicolo utilizzando materiali leggeri. Il progetto ha analizzato diversi materiali in particolare per il pianale dell'auto ha fatto un'analisi di ecodesign dove attraverso una formula di minimizzazione di diversi fattori, come il costo del materiale, le prestazioni strutturali, è stato inserito anche il parametro ambientale attraverso uno studio di LCA svolto da Emelaeva et al. [20] nel 2004. Lo studio prendeva in considerazione il pianale della nuova auto e confrontava 7 diverse tipologie di materiale, per ciascuno di questi materiali era anche stata studiata la migliore forma possibile che rispettasse i criteri di resistenza strutturale necessari per sicurezza e guidabilità dell'autoveicolo. Come materiali alleggeriti hanno considerato diverse schiume in comparazione con l'alluminio. Le schiume analizzate sono state la "Foam aluminium sandwich" AFS ad alta densità, la schiuma di poliuretano a media densità (PUR), schiume di polymethacrylimide (PMI) ad alta, media e bassa densità. Lo studio fa un'analisi dalla culla alla tomba, considerando la fase di manifattura, la fase di uso assumendo che il veicolo consumi 2,5l per 100km e il fine vita dove viene considerato il recupero del materiale, poiché c'era una mancanza di dati anno fatto alcune assunzioni sul tasso di recupero dei diversi materiali, e per evidenziare gli effetti positivi del riciclo usano il concetto di prodotto evitato, quindi danno un valore negativo agli impatti dovuti al riciclo. Come dati d'inventario usa il database CES di Granta Design Ltd. Nulla si dice sulla durata del veicolo, inoltre i possibili vantaggi che si avrebbero a livelli di consumo ad usare dei materiali leggeri non sono stati considerati nello studio. Come metodo viene usato ecoindicator 99. I risultati dell'analisi portano ad evidenziare che le schiume di alluminio sono il materiale con i maggiori impatti ambientali potenziali, questo viene spiegato col fatto questi materiali hanno un impatto considerevole durante la fase di produzione e una performance di riciclaggio inferiore a quella dell'alluminio. Il materiale con i più bassi impatti ambientali è il PMI a bassa densità che però ha valori equiparabili alle altre schiume composite.

Bertram et al. [21] analizzano la riduzione di CO₂ derivante dall'uso dell'alluminio negli autoveicoli al posto dei materiali tradizionale, ferro e acciaio. Nello studio considerano la produzione dei metalli, l'uso della macchina e il riciclo dei metalli. Inoltre indicano quattro fattori di resistenza al moto dei veicoli sia su strada che su ferrovia, l'attrito di rotolamento, il gradiente di resistenza, la resistenza dovuta all'accelerazione e la resistenza aereaodinamica. Le prime tre resistenze considerate sono legate al peso mentre la quarta è legata alla forma e dimensione del veicolo di trasporto. Gli autori rifacendosi anche a dati di letteratura assumono che l'energia risparmiata dall'autoveicolo dipenda dalla massa secondo la seguente formula

$$S = E * 100 / (M * (1 - W))$$

S = Energia finale risparmiata (litri di combustibile o kWh di elettricità)

M = massa dell'autoveicolo in kg (in differenza di massa)

E = l'energia consumata dall'autoveicolo per 100km (l/100km o kWh/100km)

W = parte della resistenza aereaodinamica sul totale delle resistenze dell'veicolo per un ciclo di guida medio. (%)

Lo studio considera di sostituire quattro diverse parti di un autoveicolo: il paraurti di una macchina diesel compatta, il cofano anteriore di una macchina familiare grande, il blocco motore di una macchina compatta, l'intelaiatura in una macchina di lusso. I dati che utilizzano per lo studio sono riepilogati in Tabella 1 dove viene riportata anche la CO₂ risparmiata considerando nel calcolo il risparmio di energia calcolato con la formula vista precedentemente. Per il blocco motore e l'intelaiatura nel peso risparmiato sono inclusi anche le riduzioni indirette pari circa al 23% della differenza di peso del pezzo considerato.,

¹¹<http://www.io.tudelft.nl/en/organisation/departments/industrial-design/advanced-automotive-design-specialisation/education/projects/dutchevo/>

Tipologia modificata	Peso Al kg	Peso Acciaio kg	Differenza kg	Distanza km	Consumi l/100km	CO ₂ risparmiata Kg equivalenti
Paraurti	3,2	5,8	2,6	200.000	6	48
Portello anteriore	10,1	17,5	7,4	200.000	7,5	130
Blocco motore	16,4	31	18	200.000	11,2	340
Intelaiatura	295	475		200.000	10,2	4.300

Tabella 1 dati dello studio

Questi dati sono poi stati sottoposti ad una analisi di sensibilità variando il numero di km percorsi, da cui si evince che i vantaggi ambientali aumentano con l'aumentare dei km percorsi. Inoltre i risultati cambiano anche al variare del fattore di resistenza W che è considerato pari al 40% della resistenza totale per una guida mista tra città, strade provinciali e autostrade, oppure pari al 60% se si considera una guida solo su autostrade e gli autori riportano che se la macchina è usata in città i risparmi aumentano tra 17 ai 28 kg CO₂/km. Se invece è usata prevalentemente su autostrada ovviamente i risparmi sono minori e oscillano tra gli 8 e i 13 kg CO₂/km. Lo studio conclude che l'uso dell'alluminio ha comunque dei vantaggi da punto di vista del risparmio di emissione di CO₂, nell'articolo sono anche riportati i dati di letteratura usati per l'inventario.

Kim [22] utilizza LCA per valutare la riduzione di emissione di CO₂ utilizzando due differenti metalli alleggeriti: acciaio ad alta resistenza (HSS - high-strength steel) e alluminio rispetto ai materiali standard usati in un autoveicolo compatto (Ford Focus) e vengono proposte cinque diverse opzioni di alleggerimento: 6% con HSS; 6% con alluminio; 11% con alluminio; 19% con HSS e 23% con alluminio. Per ciascuna di queste scelte vengono considerati due diversi periodi di vita degli autoveicoli: il primo di 11 anni considerando di percorrere 120.000 miglia; il secondo di 16 anni considerando di percorrere 181.195 miglia. Per ciascuna delle due fasi d'uso si considera il medesimo fine vita. I risultati mostrano che per tutte le opzioni la fase d'uso è quella che incide di più con un intervallo che va dal 87 al 95%. I risultati inoltre mostrano come la soluzione che ottiene le minori emissioni di CO₂ è quella con 23% di alluminio che però risulta essere anche la più costosa e più difficile da applicare. È fatta anche un'analisi dei tempi di ritorno (Payback times) delle emissioni e un'analisi dell'uso dei materiali riciclati che risultano avere tempi di payback inferiori e i migliori risultati si ottengono con HSS riciclato poiché considera ancora non efficienti le tecniche di recupero dell'alluminio.

L'utilizzo di materiali leggeri è stato anche sviluppato nel settore del trasporto pubblico su ferro: ferrovie e metropolitane. In Italia l'uso di nuove tecnologie di motorizzazione e l'uso di materiali compositi hanno portato il treno Italo a ridurre il suo peso di 70 tonnellate rispetto ai treni concorrenti, comportando una riduzione dei consumi energetici del 15 % con una rapporto potenza/peso di 7500kW/374 tonnellate¹².

In questo settore, la valutazione d'impatto ambientale viene considerata strategica da molte imprese, al punto che nel 2009 sono uscite le Product Category Rules (PCR) dei veicoli del treno. In questo momento sono certificati con una dichiarazione ambientale di prodotto¹³ EPD il "CIVITY FOR FRIULI VENEZIA GIULIA REGION" treno regionale, MLA Metrobus Brescia, Metro Roma (Italia), INNOVIA ART 200 metro (Canada), Zaragoza tram (Spagna), BOMBARDIER treno regionale (Francia), treno merci Botnia (Svezia), REGINA Intercity X55 treno veloce (Svezia)¹⁴. In particolare, Innovia art 200 è un veicolo passeggeri per il trasporto metropolitano in Svezia, nell'EPD viene sottolineata l'importanza nei risparmi energetici dovuta all'alleggerimento della cassa esterna fatta in alluminio e al minor peso dei carrelli (Bogies).

Inoltre Struck e Wimmer [23] già nel 2004 hanno fatto uno studio di LCA su un treno metropolitano la cui unità funzionale era riferita a tre vagoni completamente occupati (con una tara di circa 100 t) operante a Oslo in Norvegia per un periodo di tempo di 30 anni, con una percorrenza di 120.000 km l'anno. Lo studio

¹² www.ntvspa.it

¹³ La dichiarazione ambientale di prodotto (environmental product declaration EPD) è la certificazione di parte terza secondo ISO 14025 delle prestazioni ambientali di un prodotto, misurate utilizzando l'LCA applicata in accordo con le regole specifiche per quel prodotto (Product Category Rules).

¹⁴ Tutte le dichiarazioni ambientali sono disponibili pubblicamente sul sito www.environdec.com/Epd-Search/?Category=6198

aveva lo scopo di individuare le parti del treno che dovevano essere migliorate dal punto di vista ambientale. I risultati hanno mostrato che le fasi del ciclo più impattanti sono state le materie prime nelle quali risulta che il riscaldamento globale è dovuto per il 40% alla intelaiatura dei vagoni e per il 23% dai carrelli. Questo è dovuto alla produzione di alluminio e acciaio che è altamente energivora; la fase d'uso del treno, dove le perdite meccaniche sono superiori alle perdite elettriche di circa il 20%; viene riportato un contributo del 40% sulla categorie di riscaldamento globale dovuto ai sistemi di riscaldamento del treno; nella fase di manutenzione la sostituzione dei carrelli fornisce il maggior contributo al riscaldamento globale. Lo studio propone anche alcune strategie di ecodesign e tra queste la prima è l'alleggerimento delle strutture.

Dalla rassegna complessivamente emerge come il tema dell'uso di materiali leggeri nel settore dei trasporti è molto attuale, sia per i veicoli su strada, dove sono stati presentati molti casi studio, sia per il trasporto ferroviari dove è ampiamente utilizzato lo strumento della dichiarazione ambientale di prodotto.

Tutti gli articoli evidenziano come il minor peso porta ovviamente ad una riduzione dei consumi. L'alluminio risulta uno dei materiali più usati per l'alleggerimento dei veicoli. Negli ultimi decenni sono stati testati e sviluppati anche diversi compositi, poche invece sono state le informazioni trovate circa l'utilizzo di AFS. Dall'analisi degli studi di LCA emerge come la fase d'uso sia determinate in termini d'impatto ambientale, sia per il trasporto su strada che su ferro. Per il trasporto su strada nell'articolo di Das Sujit [19] la fase d'uso incide nell'emissione di gas serra per circa il 75 % sul totale del ciclo di vita, in Kim et al. [22] per valori che oscillano tra 87 e il 95%, in Bertram et al. [21] addirittura per circa il 90%. McAuley [18] indica invece che la fase d'uso incide per circa 87% nei consumi energetici mentre Ermelaeva et al. [20] indica che la fase d'uso in ecopunti (una forma di aggregazione e pesatura tra i diversi indicatori di impatto) incide per un intervallo che va dal 60% fino a un 80% a secondo dei diversi materiali, il più basso è per AFS che ha una fase di produzione che incide per il 40%. Nei trasporti su ferro sia Cheul et al. [2] che Struck e Wimmer [23] indicano che nel ciclo dei vita della metro la fase d'uso incide per il 75%. Questa fase è influenzata dalla scelta dell'unità funzionale in termini di tempo di vita e km percorsi dal veicolo. Un altro parametro molto importante è la tipologia di veicolo considerato e i suoi consumi, spesso gli studi avevano dei modelli ben definiti di auto o di parti di auto o treno da sostituire.

In generale l'uso dell'alluminio, se considerati dei tempi di vita superiori a 14 anni e a 100.000 km, risulta avere meno impatti ambientali rispetto a materiali tradizionali come l'acciaio e il ferro. Solo in due articoli le prestazioni dell'alluminio non sono state le migliori: Kim et al. [22] indica che i tempi di ritorno dell'alluminio sono molto lunghi e indica invece gli acciai ultra leggeri come i materiali migliori in una strategia di alleggerimento dell'autoveicolo; Ermelaeva et al. [20] invece evidenzia le migliori prestazioni delle schiume con compositi rispetto all'alluminio e soprattutto AFS.

Life Cycle Assessment

Obiettivo e campo di applicazione

Definizione del prodotto

Questo studio presenta un'analisi LCA relativa alla produzione dell'Aluminum Foam Sandwich (AFS) per future applicazioni nei mezzi di trasporto pubblico a basso impatto ambientale e maggiore sicurezza passiva. I pannelli AFS sono costituiti da un "core" in schiuma e da due sottili pelli esterne in alluminio (Al bulk), il cui assemblaggio permette la realizzazione di componenti dall'elevata rigidità flessionale ed alta capacità di assorbimento di urti. Tali caratteristiche meccaniche, associate alle doti di estrema leggerezza (densità dal 20 al 40% del bulk) e alla capacità di schermatura elettromagnetica, rendono questi materiali particolarmente interessanti nell'ambito dei trasporti, sia come assorbitori di energia (resistenza passiva) sia nello sviluppo di "space frame" ad elevata rigidità e peso ridotto che possono contribuire alla realizzazione di vettori leggeri e, potenzialmente, a basso impatto ambientale. I pannelli AFS di questo studio sono pannelli sandwich realizzati in continuo con due pelli esterne in alluminio, ed un "core" centrale in schiuma di alluminio. Il legame fra pelli e core è realizzato mediante legame metallurgico [14].

Obiettivo dello studio

Lo studio prevede un'analisi degli impatti ambientali potenziali della produzione del materiale AFS con lo scopo di suggerire proposte di miglioramento ambientale alla progettazione del materiale stesso e per l'eventuale progettazione di un pavimento flottante in AFS dei vagoni passeggeri per treni di media e lunga percorrenza che è stato definito come il componente su cui incentrare l'analisi di progettazione per l'applicazione di questo materiale innovativo al settore del trasporto pubblico. La scelta di questo tipo di componente è legata a una serie di considerazioni:

- è un componente facilmente modulabile;
- essendo collegato al telaio della cassa mediante giunti anti-vibranti, non ha una funzione strutturale e quindi la sostituzione di questo componente minimizza i tempi di re-ingegnerizzazione dei carri;
- durante la vita operativa è soggetto prevalentemente a condizioni di carico flessionali – dovute sia alle condizioni di vincolo (appoggi alle estremità) sia di carico (carichi concentrati e distribuiti su una sola delle facce – ovvero quelle ottimali per l'utilizzo di strutture sandwich¹⁵).

Lo studio di LCA è stato fatto su un pannello in AFS 40*30*3 cm³ composto da un involucro in alluminio con pelli di spessore di 2 mm per lato e un "core" di schiuma di alluminio dello spessore di 2,6 cm, che può essere prodotto nel laboratorio ENEA UTMAT MONIT. Questa scelta è stata fatta poiché è la massima geometria producibile nel laboratorio ENEA UTMAT MONIT che meglio approssima la forma del materiale da usare per progettazione del pavimento in AFS.

Destinatari dello studio

Lo studio di LCA è inquadrato nell'ambito delle attività sul Progetto 3.5 "Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto" dell' AdP ENEA-MSE. In particolare è parte integrante del report di progetto "RdS/2012/094" previsto per l'obiettivo C " Life-Cycle Assessment energetico ambientale e Risk Assessment delle tecnologie suddette" ed è condotto in accordo con norma ISO 14044:2006 e ILCD Handbook.

Lo studio è destinato ad un pubblico tecnico.

Funzione del sistema

Produzione di un pannello di AFS in laboratorio

Unità funzionale

Pannello di AFS di dimensioni 40x30x3cm³ composto da un involucro in alluminio con pelli di spessore di 2 mm per lato e un "core" di schiuma di alluminio dello spessore di 2,6 cm,

Confini del sistema

L'analisi è dalla culla al cancello, infatti si analizzano tutti i processi dalla produzione delle materie prime fino alla produzione del pannello senza considerarne l'uso e il fine vita poiché il pavimento flottante è

¹⁵ Considerazioni preliminari fatte da CALEF

ancora in fase di progettazione. Sono compresi all'interno dei confini del sistema tutti i processi relativi alla produzione del pannello in AFS 40*30*3 cm³.

Assunzioni

Si è assunto di studiare la produzione del pannello in AFS 40*30*3cm³ in laboratorio.

Questa scelta è stata fatta poiché è la massima geometria producibile nel laboratorio ENEA UTMAT MONIT che meglio approssima la forma del materiale da usare per progettazione del pavimento in AFS come si può vedere dai dati preliminari presentati da CALEF¹⁶ che si occuperà della progettazione di tale pavimento.

Per quanto riguarda i criteri di cut off (esclusione di materiali e processi non significativi) sono stati esclusi dalla modellazione tutti i materiali e componenti che incidevano per meno dello 0,1% in peso.

Inoltre non è stata considerata la produzione di tutti i macchinari di fabbricazione perchè danno un contributo irrilevante in termini di impatto, sulla base dell'esperienza acquisita ed in accordo con le pratiche comuni di LCA.

Metodologia LCIA

Tra i software disponibili per l'analisi LCA è stato utilizzato il Gabi4.4. Come database sono stati utilizzati il database di Gabi, il database di SimaPro7 e di Ecoinvent.

Per il metodo di valutazione degli impatti è stato scelto IMPACT 2002+ [24] a disposizione sul Gabi. Nello studio viene valutata la fase di caratterizzazione degli impatti dove in base all'analisi d'inventario si analizzano tutte le emissioni nei vari comparti ambientali che sono moltiplicati per un valore (chiamato fattore di caratterizzazione) che ne determina il danno in ciascuna comparto. E' stata anche effettuata una normalizzazione degli impatti con lo scopo di evidenziare qual è la categoria d'impatto più significativa per il nostro sistema, in riferimento a un valore normalizzato (il fattore di normalizzazione è calcolato per ciascuna categoria di impatto dal numero di persone affette nell'anno dalla specifica emissione). Il numero di persone di riferimento è dato dalla popolazione dei paesi del nord-ovest europeo.

Metodologie di interpretazione

Viene analizzato l'impatto ambientale potenziale del pannello in AFS prodotto in laboratorio per individuare i componenti più critici nella produzione e con un'analisi di sensitività tra la produzione del campione ideale producibile in laboratorio il pannello AFS 40*30*3cm³ e il campione realmente prodotto di dimensioni 40*3*3 cm³ al fine di verificare la validità dei dati usati nello studio e verificare l'influenza dovuta a potenziali miglioramenti di processo, con l'ottimizzazione dei consumi energetici.

Qualità dei Dati

La qualità dei dati è importante per comprendere l'affidabilità degli studi e la validità della fase di interpretazione dei risultati, sia per l'aspetto qualitativo che quantitativo, nonché i metodi usati per la raccolta e l'integrazione dei dati. Uno strumento efficace per controllare e verificare la qualità dei dati è rappresentato da una buona documentazione che permetta di evitare abusi ed erronee interpretazioni.

Per la definizione della qualità dei dati ci si è basati sulla ISO 14044 del 2006

Nello studio si è quindi considerato:

- *per l'aspetto temporale*, di raccogliere dati per ciascun processo per un medesimo intervallo temporale e per un arco temporale di almeno un anno, viene infine indicato l'intervallo di tempo o l'anno a cui si riferiscono i dati in oggetto per;
- *gli aspetti geografici*, sono stati adottati i dati relativi all'Europa, mentre i dati dei processi sono quelli del database Ecoinvent.
- *la completezza* si è scelto di considerare tutti i flussi previsti dai processi nel limite della disponibilità di dati primari e secondari a disposizione;
- *la rappresentatività*, dove i dati non fossero primari, si è scelto di utilizzare dati che rispecchino il più possibile il processo considerato, secondo una valutazione qualitativa, in coerenza con gli obiettivi dello studio e con la disponibilità effettiva dei dati
- *la riproducibilità* si è scelto di utilizzare, laddove possibile, dati primari e sono stati riportati tutti i modelli di calcolo utilizzati, le assunzioni fatte e le omissioni dei dati primari prevedendo

¹⁶ "Consorzio per la ricerca e lo sviluppo delle applicazioni industriali laser e del fascio elettrico e dell'ingegneria di processo, materiali, metodi e tecnologie di produzione"

un'opportuna documentazione e schede di completezza, in modo da permettere la riproducibilità dello stesso a parità di informazioni.

Revisione critica

Questo studio non prevede una revisione critica.

Analisi di Inventario

L'analisi d'inventario è stata eseguita raccogliendo i dati primari, dati secondari e dati terziari.

I dati primari sono quelli raccolti presso il centro ENEA di Casaccia Unità Tecnica Tecnologie dei Materiali UTMAT MONIT per quanto riguarda la produzione delle schiume di alluminio e per la produzione di un campione di AFS di dimensioni 40*3*3cm³, da questi dati primari in collaborazione con i tecnici del laboratorio sono stati stimati i dati per la produzione del pannello in AFS 40*30*3cm³, che è l'oggetto dell'analisi.

Per la raccolta dati sulla produzione di polveri di AlSi12 sono state contattate attraverso mail con questionari e contatti telefonici diverse aziende produttrici: Alfa AASER, Italchimici SpA, Atomising System Ltd e Dentallin Metalli dalle quali si sono ottenute informazioni utili ma scarsi dati quantitativi.

Per la produzione di polveri atomizzate di alluminio sono stati utilizzati dati di letteratura, così come per la produzione d'idruro di titanio.

I dati sulla produzione del profilato di alluminio, la produzione del SiC e dei trasporti sono dal database diecoinvent.

Infine i dati per tutti i processi produttivi dei materiali ad accezione dell'AFS sono relativi ai database Gabi4, SimaPro 7 ed Ecoinvent.

Produzione AFS di laboratorio dimensioni 40*30*3cm³

Il pannello è composto da un profilato estruso cavo di dimensioni di 40 cm di lunghezza, 30 cm di profondità 3 cm di altezza con spessore delle pelli di 2 mm in cui viene inserito il precursore per produrre la schiuma.

Questa è la massima dimensione di AFS che può essere prodotta nel forno del laboratorio.

L'estruso ha un peso 1296 g considerando il peso specifico dell'alluminio pari a 2,7 g/cm³.

L'estruso viene poi riempito con il precursore compattato di alluminio di peso pari a 1620g che si trasforma in schiuma riempiendo completamente l'estruso.

Il volume della polvere compattata è di 30cm*40cm*0,5cm infatti il volume della schiuma è 5,5 volte maggiore di quello del precursore.

Per produrre il campione, il precursore (polvere atomizzata, SiC e idruro di titanio) viene pressato e inserito nell'estruso e poi infornato. La pressatura dura circa 15min e compatta al massimo 540g di polvere di alluminio. Nel forno può entrare un campione alla volta con un tempo di cottura compreso lo scarico e il carico di 20 min.

I dati sulla produzione di schiuma sono di derivanti dall'estrapolazione di dati primari raccolti presso UTMAT MONIT per campioni più piccoli di AFS.

I dati considerati in questa parte dello studio sono per processi di laboratorio e quindi molto penalizzanti rispetto ad un possibile scale up industriale. In

Figura 3 è riportato uno schema del processo di produzione in laboratorio con l'inserimento delle materie prime utilizzate per lo studio.

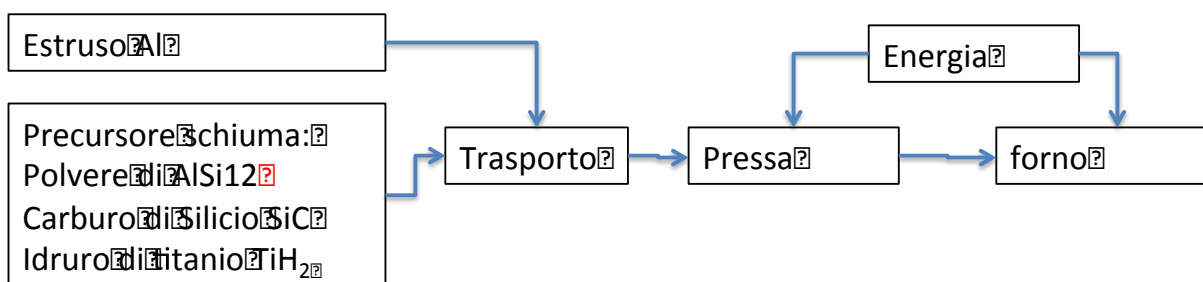


Figura 3 schema produzione schiuma di alluminio in laboratorio

Estruso di Alluminio

Per la produzione dell'estruso è stata considerata la materia prima (l'alluminio primario) e l'energia per il processo di estrusione del profilato. I dati sulla quantità di alluminio necessario per produrre 1kg di alluminio estruso e il processo di produzione sono dal database ecoinvent [25]. In Figura 4 sono riportati i dati del processo costruito in gabi per la produzione dell'estruso di alluminio; sono necessari 1,013 kg di Alluminio primario per produrre 1 kg di estruso, inoltre il processo "RER: section bar extrusion, aluminium" rappresenta il processo di database che descrive la produzione dell'estruso includendo, trasporti, rifiuti, emissioni ed energia del processo.

Profilato in Al

GaBi 4 process plan: Reference quantities
The names of the basic processes are shown.

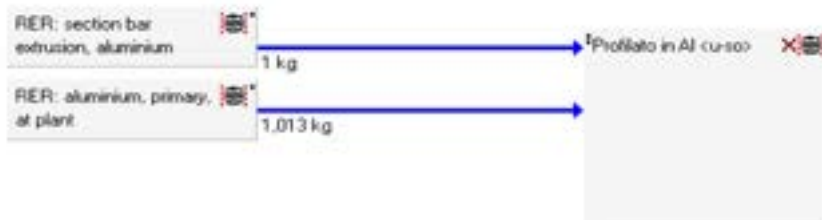


Figura 4 processo estruso di Al costruito in gabi

Produzione precursore schiuma: polvere atomizzata di AlSi12.

Nelle banche dati consultate non era presente né la produzione di polvere atomizzata di AlSi12 né di nessuna altra polvere metallica. E' stato quindi necessario costruire il processo di atomizzazione delle polveri nel DB. Come visto nel paragrafo precedente non è stato possibile raccogliere dati primari su questo processo ma ci si è basati su dati di letteratura.

Le polveri di alluminio rientrano nell'ambito della Metallurgia delle polveri. Il processo di atomizzazione prevede diversi tipi di atomizzatori a gas, a fluido (generalmente acqua) e meccanici o a centrifuga. Le dimensioni che si possono raggiungere di queste polveri variano dai 50 micron ai 400 micron [26]. Il processo di atomizzazione consiste in un processo di disintegrazione meccanica di un metallo fuso in piccole particelle mediante lo scontro con un getto di aria compressa o liquido. Il principio base per l'atomizzazione del fluido è quello di aumentare l'area superficiale del flusso liquido fino a che questo non si disintegri [26].

In particolare il processo di atomizzazione a centrifuga permette di avere particelle sferiche, con poche impurità, una resa elevata e una distribuzione dimensionale molto stretta. Questo tipo di atomizzatori usano un disco di grafite che gira con una velocità tra i 10.000 e i 30.000 giri al minuto e ha un'alimentazione di metallo fuso tra i 550°C e i 300 °C [27]. Questo processo risulta anche avere più bassi consumi energetici per kg di prodotto. Infatti, Dunkley e Aderhold[28] dicono che sia possibile stimare i consumi energetici dell'atomizzatore a centrifuga conoscendo l'accelerazione del liquido e la velocità periferica utilizzando la seguente formula:

$$P = M \times 1/2v^2$$

P= Potenza assorbita

M= velocità del flusso di massa

v= velocità del flusso

propongono nel caso di un metallo fuso atomizzato con atomizzatore a centrifuga ad alta velocità i seguenti parametri

$v =$ velocità atomizzatore a gas = 100m/s

$M =$ velocità del flusso del metallo fuso di 1 kg/s (60kg/min)

$P = 1 * 0,5 * 10^4 W = 5kW$ potenza atomizzatore a centrifuga

Gli autori inoltre sostengono che gli atomizzatori a centrifuga hanno i consumi più bassi rispetto a quelli a gas intorno a 500kW e quelli ad acqua che hanno dei consumi intorno tra i 50-100 kW. Lo studio indica per gli atomizzatori a centrifuga una resa tra l'85-90%, mentre per quelli a gas e ad acqua intorno al 50-55%.

Per lo studio si è scelto di considerare l'uso di un atomizzatore a centrifuga, sia per le caratteristiche di polvere prodotta che sono le medesime della polveri utilizzate nel progetto e anche perché viene proposto nel sito della Atomising Systems Ltd. per l'atomizzazione di polveri non metalliche¹⁷.

In conclusione per costruire il processo di atomizzazione delle polveri di AlSi12 vengono considerati i seguenti parametri:

Una resa del processo dell'85% [28]. Di conseguenza per produrre 1 kg di polvere di AlSi12 avrò bisogno di 1,176 kg di AlSi12 = 1kg/0,85

Alla velocità di flusso prevista occorrono 1,176 secondi per produrre 1,176 kg. Pertanto, l'energia di atomizzazione per la centrifuga sarà pari a:

$$E_{\text{centrifuga}} = 5kW / (1,17 * 3600) = 0,0012kWh$$

Per calcolare il processo completo bisogna aggiungere l'energia necessaria a fondere l'alluminio. Per quanto riguarda l'energia di fusione calcolata in seguito è riferita all'alluminio puro al 99.9% tenuto conto che questa lega che fondiamo non è alluminio puro e quindi avrà un'energia più bassa, ma considerato anche il fatto che i processi industriali hanno delle perdite rispetto ai valori ideali si è deciso di usare questo valore, anche in un'ottica conservativa dello studio.

Dal manuale del chimico [29] si è preso il calore di transizione di dell'alluminio pari a 60,72kcal/g mol considerando la temperatura iniziale pari a 298 °K e la temperatura di fusione dell'alluminio 933°K fusione del metallo. Sapendo che una caloria è pari a 4,18J e che il peso molecolare dell'alluminio è pari a 26,98 ottengo come energia di fusione:

$$E_{\text{fusione}} = 60,72Kcal/g \text{ mol} * 4,18J/26,98 = 9,407kJ/g = 9407kJ/kg = 2,6131 kWh/kg$$

Un Wh corrisponde a 3600 J (1 Wh = 1 W × 3 600 s = 3 600 Ws = 3 600 J).

Devo fondere 1,176kg quindi l'energia necessaria per la fusione del mio metallo è pari a

$$E_{\text{fusione}} = 2,6131 kWh/kg * 1,176kg = 3,067kWh$$

In totale per produrre 1 kg di polvere di AlSi12 si avrà

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{centrifuga}} + E_{\text{fusione}} = 3,068kWh$$

Per la produzione di AlSi12 si è utilizzato il database IDEAMAT 2000, che riporta la composizione delle materie prime per la produzione di 1kg di lega come riportato di seguito:

Alluminio primario 0,7165 kg

Alluminio riciclato 0,15 kg

Silicio 0,12 kg

Acciaio 0,005 kg

Manganese 0,002

Zinco 0,001 kg

Magnesio 0,0005 kg

Rame 0,005 kg

In Figura 5 viene riportata un'immagine di come il processo è stato costruito nel database di Gabi con un dettaglio dei materiali e l'inserimento dell'energia.

¹⁷ <http://www.atomising.com/equipment.html>

materie prime AlSiC12
 GaBi 4 process plan:Reference quantities
 The names of the basic processes are shown.

Produzione di polvere di AlSi12

GaBi 4 process plan:Reference quantities
 The names of the basic processes are shown.

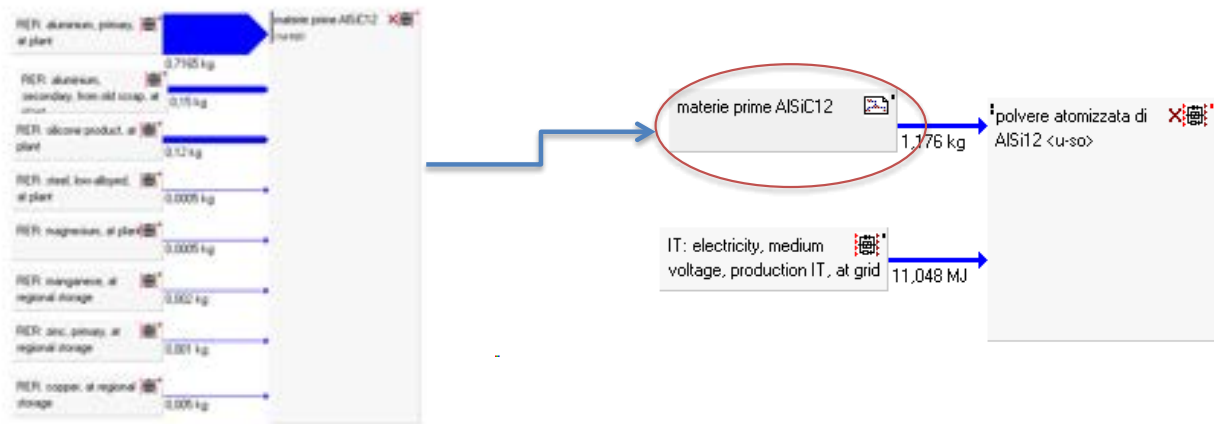


Figura 5 processo produzione polvere atomizzata di AlSiC12 costruito in gabi

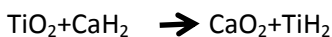
Idruro di Titanio

L'idruro di titanio non è presente nel database, anche in questo caso è stato quindi necessario ricostruire il processo da dati di letteratura.

Per la produzione d'idruro di titanio è stato utilizzato il brevetto 2.427.338 del 16 settembre 1946 Stati Uniti, in cui si proponevano come reagenti per la produzione idruro di titanio il diossido di titanio e idruro di calce che venivano fatti reagire sotto vuoto in eccesso di idrogeno.

Nel brevetto si dichiara che la reazione ha una resa del 90% .

Nessuna considerazione viene fatta sui consumi energetici, è quindi stato costruito il processo considerando solo le materie prime diossido di titanio e idruro di carbonato

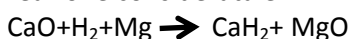


La reazione stechiometrica comporta che per produrre 49,92g di idruro di titanio sono necessari 79,9 g di diossido di titanio e 42,1g di idrossido di calcio. Essendo la resa del 90% sono stati considerati per produrre 49,92g di idruro di titanio 88,78 g di diossido di titanio e 46,77 g di idruro di calcio.

Il processo di produzione del diossido di titanio è stato preso dal database.

Il processo per la produzione dell'idruro di calcio non era presente nel database quindi sono stati usati dati di letteratura in particolare è stato usato il brevetto 2.082.134 del 1 giugno 1937 Stati Uniti.

In questo caso il processo viene descritto in maniera più dettagliata. L'autore del brevetto dichiara che la reazione considerata è



Sono inoltre indicate le calorie necessarie per la reazione stechiometrica pari a 37880 cal .

Nel brevetto si riporta anche che per produrre 1 oncia di CaH₂ (453,59g) sono necessari 0,57 oncie (258,55g) di Mg (manganese) e 9,3 piedi cubi (263,35dm³) di idrogeno. È indicato che la perdita in peso è bassissima, infatti la resa della reazione è circa il 99%.

Da queste informazioni sono stati ricostruiti i dati del processo mancante, in particolare il contenuto di ossido di calcio.

Nella reazione il rapporto molare tra CaO₂ e CaH₂ è 1, noto che per produrre P_{CaH₂}= 453,95g di CaH₂ sono necessarie moli_{CaH₂}=10,775 mol

$$\text{moli}_{\text{CaH}_2} = P_{\text{CaH}_2} / \text{PM}_{\text{CaH}_2} = 453,95\text{g} / 42,1\text{g/mol} = 10,775\text{mol}$$

in valore stechiometrico avrò bisogno di P_{CaO} di 604,27g di ossido di calcio.

$$\text{moli}_{\text{CaH}_2} = \text{moli}_{\text{CaO}} = 10,775$$

$$P_{\text{CaO}} = \text{moli}_{\text{CaO}} * \text{PM}_{\text{CaO}} = 10,775\text{mol} * 56,08\text{g/mol} = 604,27\text{g}$$

Considerata una resa di processo di del 99% mi serviranno 610,27g di CaO.

Inoltre nei dati del database era richiesto il valore dell'idrogeno H₂ in peso.

In condizioni di standard a temperatura 273,15 K (0 °C, 32 °F) e pressione assoluta 100 kPa (14.504 psi, 0.986 atm, 1 bar) il comportamento dei gas è approssimato a quello dei gas perfetti così il volume di 1 mole di gas è V_{stp}= 22,4 l/mol calcolo quindi le moli di H₂

$$\text{mol}_{\text{H}_2} = V_{\text{H}_2} / V_{\text{stp}} = 263,35 / 22,4 \text{ l/mol} = 11,76 \text{ mol}$$

$$P_{\text{H}_2} = \text{mol}_{\text{H}_2} * P_{\text{m}_{\text{H}_2}} = 11,76 \text{ g} * 2,02 \text{ g/mol} = 23,699 \text{ g}$$

Per quanto riguarda l'energia utilizzata conoscendo che le calorie per la reazione stechiometrica sono E_{st} 37880cal, e che la reazione non necessita di altra energia è stata considerato che l'energia sia proporzionale al peso di idruro di calcio prodotto

$$E = E_{\text{st}} * P_{\text{CaH}_2} / P_{\text{CaH}_2} = 37880 \text{ cal} * 453,59 / 42,1 = 4082501,8 \text{ cal}$$

Inoltre il processo non dava nessuna indicazione sull'ossido di magnesio prodotto durante la reazione e quindi ponendosi in una situazione conservativa si è deciso di allocare tutta l'energia della reazione alla produzione di CaH₂.

In Tabella 2 sono riportati i dati riepilogativi per il processo di produzione di 453,59 g di CH₂ inseriti in Gabi.

Elemento	Elemento DB	Unità	quantità
Carboanto di calcio	CH: limestone, crushed, for mill [others]	g	610,27
Produzione idrogeno	RER: hydrogen, liquid, at plant [inorganics]	g	23,699
Produzione magnesio	RER: magnesium, at plant [Benefication]	g	258,55
Elettricità	UCTE: electricity, low voltage, production UCTE, at grid [production mix]	cal	4082501,8

Tabella 2 dati utilizzati per produrre 453,59 g di CH₂.

Il calcolo dell'energia consumata per la preparazione AFS

L'energia si considera suddivisa in due parti: l'energia per la pressa e quella per il forno.

La pressa ha una potenza di 3 kW, ogni campione di 540 g rimane nella pressa per 15min; considerando la potenza massima in tutto questo intervallo di tempo l'energia di pressatura E_p per ciascun campione è E_p= 15min * 3Kw= 45kWmin= 0,75kWh

Considerato però che devono essere compattati circa 1620g di polvere di alluminio servono quindi 3 cicli di pressatura e quindi l'energia complessiva di pressatura E_{p-tot} è pari a 2,25kWh

$$E_{p-tot} = 0,75 \text{ kWh} * (1620 / 540) = 2,25 \text{ kWh}$$

I dati del forno sono i seguenti: temperatura 620-630° raggiunta in 40 minuti con una potenza dei forno di 20 kW; Potenza di mantenimento fra il 6.5 ed il 7% sempre di 20 kW;

Il forno ha un'inerzia molto alta: spento dopo più di 48 ore mantiene una temperatura di 270°C per cui in un ciclo continuo anche di sole 8 ore avremmo circa 30 minuti a 20 kW e le rimanenti 7,5 ore all' 8% ipotizzando una maggiori perdite durante l'apertura delle porte.

In 7,5 ore considerando un tempo di cottura compreso carico e scarico del campione di 20 minuti si possono considerare 20 infornate si avrà quindi la produzione 20 pannelli 40*30*3cm³.

L'energia di forno E_f per un campione viene quindi così calcolata dividendo l'energia consumata in un ciclo di 8 ore diviso il numero di campioni prodotti.

L'energia consumata dal forno per 8 ore è 30 min a 40kW e 7,5 ore a 3,2kW (8% della potenza forno) il totale dell'energia consumata per un ciclo di 8 ore è 25,5kWh per un pannello si consuma

$$E_f = 25,5 \text{ kWh} / 20 = 1,275 \text{ kWh}$$

In totale per ogni pannello l'energia consumata E_{tot} è

$$E_{tot} = E_p + E_f = 3,525 \text{ kWh}$$

Trasporti

Sono stati inclusi i trasporti delle polveri atomizzate di alluminio e dei profilati.

Le polveri atomizzate vengono acquistate alla Alfa Aaser in Germania a Karlsruhe e trasportate tramite camion così come il profilato di alluminio che viene invece prodotto in un azienda vicino Roma.

In Tabella 3 è riportato il dettaglio della provenienza dei materiali e i km di distanza tra il centro di Casaccia dove si trova il laboratorio UTMAT MONIT e i kg trasportati. Per il mezzo di trasporto si considera un camion di 3,5-7 tonnellate preso dal database ecoinvent.

Trasporto su gomma	Provenienza	km	kg	kg*km	t*km
trasporto polveri	Germania, Karlsruhe	1100	1620	1782	1,782
profilati alluminio	Roma	30	1296	38,88	0,03888
				tot	1,82088

Tabella 3: riepilogo del calcolo dei trasporti

Processo completo

In Tabella 4 sono riportati i dati riepilogativi inseriti nel software gabi e i dati di processo considerati

Elemento	Elemento DB	Unità	quantità
Carburo di silicio	RER: silicon carbide, at plant [inorganics] [processing]	g	19
Produzione polvere di alluminio	polvere atomizzata AlSi12 [AFS]	g	1588
Profilato estruso di alluminio	RER: section bar extrusion, aluminium	g	1296
Elettricità	IT: electricity, medium voltage, production IT, at grid [production mix]	kWh	3,525
Trasporto materie prime	RER: transport, lorry 3.5-7.5t, EURO5	tkm	1,82088
Idruro di titanio	Idruro di titanio	g	13

Tabella 4 dati riepilogativi inseriti in gabi per la produzione del pannello 40*30*3cm³.

Analisi degli impatti

In questo paragrafo si analizza nel dettaglio la produzione del campione di AFS di dimensioni 40*30*3cm³ per analizzare quelli che sono gli elementi che nella produzione del pannello danno un maggior contributo agli impatti potenziali. L'analisi di caratterizzazione degli impatti potenziali del pannello di AFS di dimensioni 40*30*3cm³, dove in base all'analisi di inventario si analizzano tutte le emissioni nei vari comparti ambientali che vengono moltiplicate per il fattore di caratterizzazione che ne determina il danno in ciascuna comparto, è presentata in Tabella 5 in cui si vede anche il contributo di ciascun elemento rispetto all'impatto totale all'impatto totale.

Categoria di impatto	Unità di misura	Impatti tot Pannello AFS40*30*3cm ³ .	Prod. polvere AlSiC12	Prod. profilato estruso Al	Energia prod. pannello	Prod Idruro di titanio	Prod.SiC	Trasp. materie prime
Aquatic acidification	kg SO2-Eq. to air	1,3E-01	6,7E-02	5,6E-02	7,0E-03	9,6E-04	5,3E-04	1,3E-01
Aquatic ecotoxicity	kg TEG-Eq. to water	4,2E+05	2,0E+05	2,1E+05	4,7E+02	7,7E+02	4,2E+02	4,2E+05
Aquatic eutrophication	kg PO4-Eq. to water	4,2E-03	2,1E-03	2,1E-03	8,8E-06	1,8E-05	2,5E-06	4,2E-03
Carcinogens	kg C2H3Cl-Eq. to air	4,0E-01	2,0E-01	2,0E-01	1,3E-03	6,7E-04	1,8E-04	4,0E-01
Global warming	kg CO2-Eq. to air	4,3E+01	2,1E+01	1,8E+01	2,2E+00	8,8E-01	1,3E-01	4,3E+01

500yr								
Ionizing radiation	Bq C-14-Eq. to air	1,9E+03	9,8E+02	8,4E+02	1,8E+01	1,7E+01	8,0E+00	1,9E+03
Land occupation	m2*yr-Eq.	2,0E-05	9,0E-06	8,6E-06	4,5E-07	2,3E-07	5,4E-08	2,0E-05
Mineral extraction	MJ surplus	9,3E+00	4,8E+00	4,4E+00	2,7E-02	1,8E-02	2,7E-03	9,3E+00
Non-carcinogens	kg C2H3Cl-Eq. to air	1,7E+00	8,7E-01	8,3E-01	5,7E-03	5,4E-03	1,8E-03	1,7E+00
Non-renewable energy	MJ	5,5E+02	2,7E+02	2,3E+02	2,9E+01	4,4E+00	3,0E+00	5,5E+02
Ozone layer depletion	kg CFC-11-Eq. to air	3,4E-06	1,9E-06	1,1E-06	2,0E-07	2,6E-08	1,5E-08	3,4E-06
Photochemical oxidation	kg C2H4-Eq. to air	7,3E-03	3,5E-03	2,7E-03	4,4E-04	5,4E-05	2,9E-05	7,3E-03
Respiratory effects	kg PM2.5-Eq. to air	4,6E-02	2,3E-02	2,0E-02	1,5E-03	2,4E-04	9,6E-05	4,6E-02
Terrestrial acid./nutr.	kg SO2-Eq. to air	5,4E-01	2,7E-01	2,1E-01	3,3E-02	3,7E-03	1,8E-03	5,4E-01
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG-Eq. to soil	4,8E+02	2,5E+02	1,8E+02	6,3E+00	2,3E+00	4,3E-01	4,8E+02

Tabella 5 impatti di caratterizzazione della produzione del campione 40*30*3cm³.

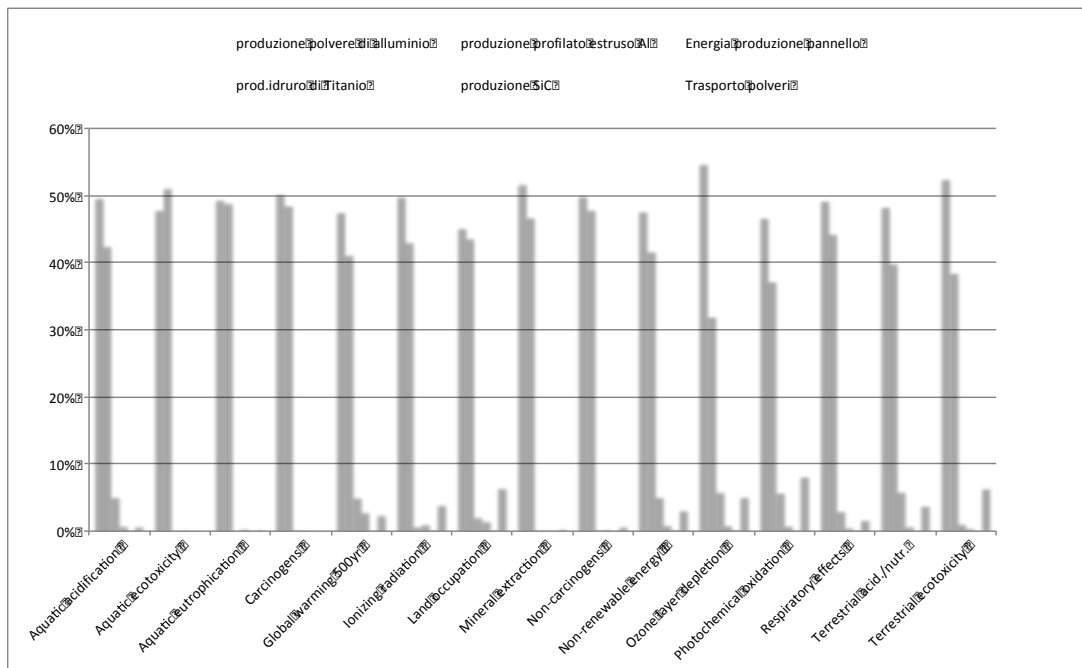


Figura 6 impatto percentuale dei vari elementi del pannello rispetto al totale di ciascun impatto.

In Figura 6 sono riportati gli impatti di ciascuna categoria in percentuale per i diversi elementi che compongono il pannello. Qui si vede chiaramente l'elevato impatto ambientale potenziale della produzione di polveri di alluminio e del profilato di Al in tutte le categorie, a seguire c'è l'impatto dei trasporti delle materie prime, dei consumi di energia per la produzione del pannello e la produzione dell'idruro di titanio, praticamente trascurabile è l'impatto della produzione di SiC.

Quindi dall'analisi si evince che in tutte le categorie d'impatto le componenti che mostrano un impatto potenziale maggiore sono quelle di produzione della polvere di alluminio e del profilato di alluminio. Questo è dovuto al fatto che in entrambi i processi viene usato l'alluminio primario che ha degli impatti

potenziali di produzione molto elevati che sono dovuti all'elevato consumo energetico per la produzioni di alluminio dalla bauxite, ma anche per l'elevato contenuto di emissioni di metalli pesanti in aria e acqua. Per quanto riguarda l'impatto dei trasporti questo è dovuto principalmente al fatto che le polveri di alluminio sono acquistate in Germania e vengono trasportate via camion per circa 1100km. Si è poi passati a svolgere la normalizzazione che permette di individuare quelli che sono gli impatti potenziali più significativi, il metodo prende i riferimento le emissioni annue totali e la popolazione complessiva dei paesi del nord ovest europeo.

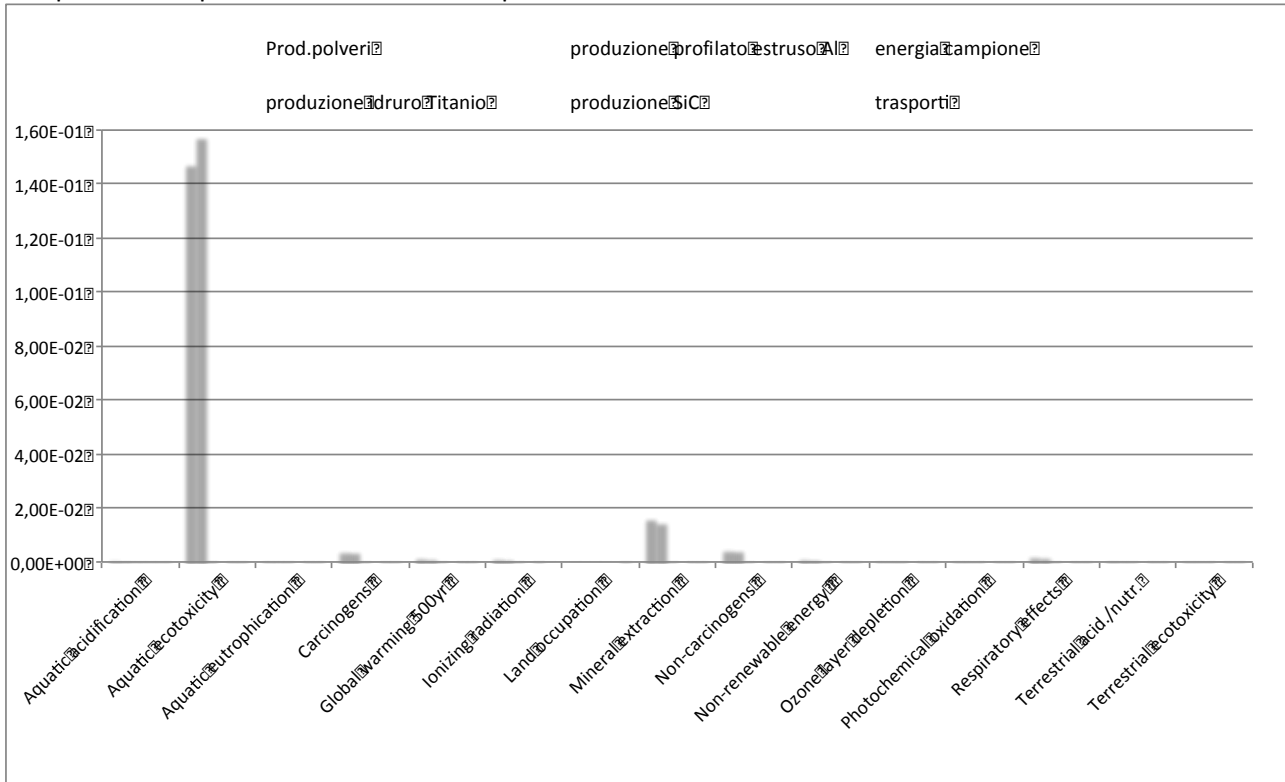


Figura 7: grafico della normalizzazione degli impatti potenziali riferita alle diversi componenti del pannello

Dal grafico si vede come la categoria d'impatto più significativa sia l'acquatic ecotoxicity, che incide sul totale degli impatti per 81%, a seguire con un valore molto inferiore ci sono la categorie della mineral extraction con l'8% e la non-carcinogens con il 3%.

Se si analizza in particolare la categoria aquatic ecotoxicity si vede sempre da Figura 7 che la produzione di polveri di alluminio atomizzato e del profilato in alluminio danno il maggior contributo, questo è dovuto in particolare alle emissioni di metalli pesanti in acqua nel lungo periodo, in particolare il rame. Il metodo, infatti, considera anche le emissioni di alcuni inquinanti nel tempo, per evitare uno spostamento temporale oltre che fisico della problematica delle emissioni d'inquinanti in ambiente. Questa problematica riguarda in modo particolare i metalli pesanti giacché è noto che questi rimangono nell'ambiente per secoli non essendo in alcun modo degradabile se non in tempi infinitamente lunghi.

Nella categoria mineral extraction l'impatto è dovuto al consumo dell'alluminio essendo questo un elemento non rinnovabile in natura.

Per quanto riguarda la categoria non-carginogens invece l'elemento che produce il maggior impatto potenziale è l'emissione di arsenico in acqua, utilizzato per la produzione dell'alluminio primario.

Infine il metodo impact2002+ usa per la categoria del cambiamento climatico la Global Warming 500yr, mentre Handbook "Recommendations for Life Cycle Assessment in European context" propone come metodo raccomandato IPCC 100 anni si è riportato in Figura 8 i risultati di caratterizzazione con i due metodi di impatto diversi l'Impact2002+ che utilizza i fattori IPCC a 500 anni ed CML2001 aggiornata al 2007 che usa sempre IPCC a 100 anni. I risultati sono lievemente diversi perché i fattori di caratterizzazione usati nei due metodi sono diversi come riportato Tabella 14 in allegato. In particolare la global warming a

500 anni risulta più impattante a causa dell'elevato quantitativo di alogenuri emessi nella produzione delle polveri e nel profilato di alluminio, queste sostanze risultano essere molto persistenti nel tempo ed hanno quindi dei fattori di caratterizzazione ai 500 anni mediamente più alti rispetto ai fattori a 100 anni.

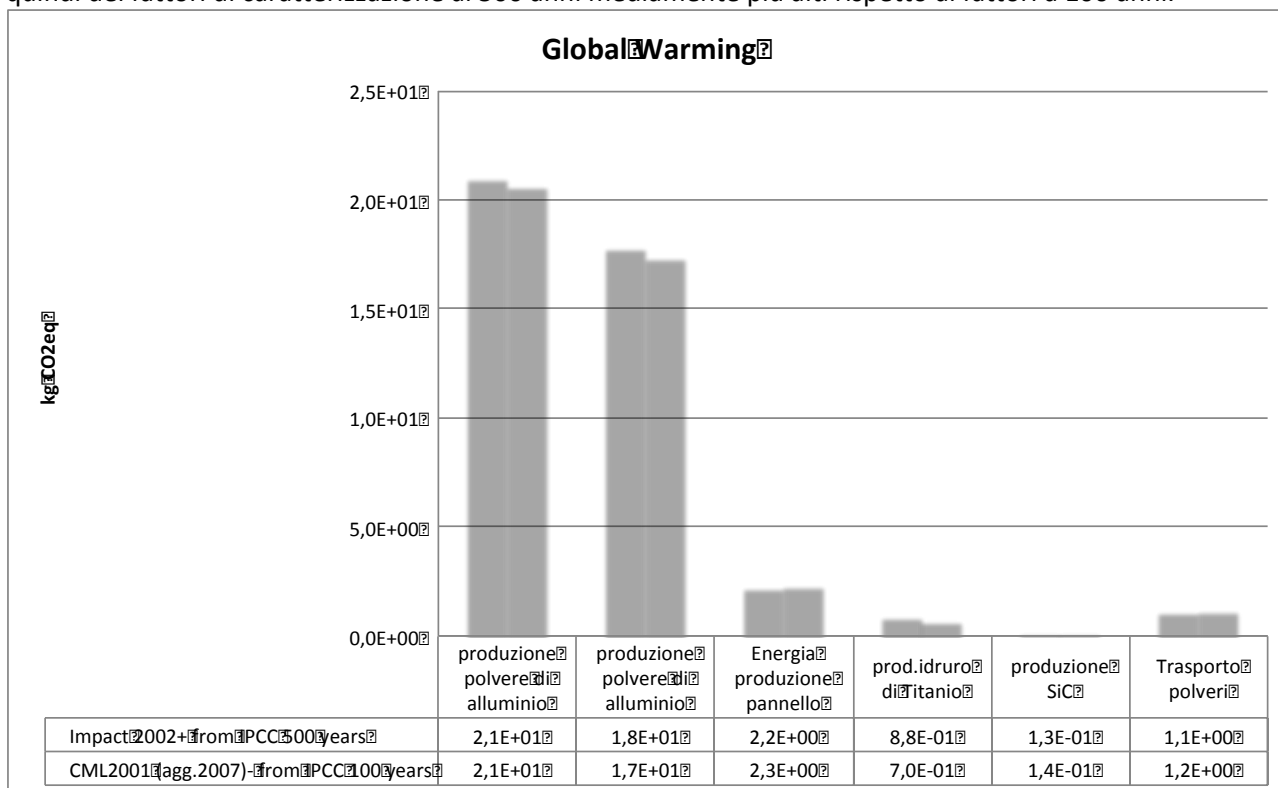


Figura 8 confronto tra il metodo IPCC 500 anni e IPCC 100 anni

Analisi di sensitività: confronto campione ideale 40*30*3cm³ con campione reale 40*3*3cm³

Si è analizzato qual è la variazioni degli impatti tra il campione realmente prodotto in laboratorio 40*3*3cm³ e il campione idealmente producibile in laboratorio 40*30*3cm³, per valutare la correttezza dei dati utilizzati e per valutare i margini di miglioramento possibili con un eventuale ulteriore scale up industriale.

Considero come dati quelli della produzione di AFS di laboratorio dimensioni 40*3*3cm³.

Produzione AFS di laboratorio dimensioni 40*3*3cm³

Il campione è composto da un profilato estruso cavo di dimensioni di 40 cm lunghezza, 3cm di profondità, 3 cm di altezza con spessore delle pareti di 2 mm in cui viene inserito il precursore per produrre la schiuma. L'estruso viene poi riempito con la schiuma di alluminio prodotta in laboratorio, il peso del precursore della schiuma è 100g ed è composto da 98g di polvere di AlSi12, 0,8 g di TiH2 (idruro di alluminio) e 1,2 g di SiC. Per produrre il campione, il precursore viene pressato nell'estruso e poi infornato.

La pressatura di 100g di precursore dura circa 15 min e viene fatta per ogni campione. Nel forno possono entrare entrare fino a 6 campioni contemporaneamente con un tempo di cottura compreso lo scarico e il carico di 20 min. I 20 min. I dati sulla produzione di schiuma sono dati primari raccolti presso UTMAT MONIT. I dati considerati in in questa parte dello studio sono dati di laboratorio. Il processo di produzione è lo stesso riportato in

Figura 3 cambiano invece i consumi energetici che vengono riportati di seguito.

Il calcolo dell'energia consumata

L'energia si considera suddivisa in due parti l'energia per la pressa e quella per il forno.

La pressa ha una potenza di 3 kW ogni campione rimane nella pressa per 15 min considerando la potenza massima in tutto questo intervallo di tempo l'energia di pressatura Ep per ciascun campione e'

$E_p = 15\text{min} * 3\text{Kw} = 45\text{kWmin} = 0,75\text{kWh}$.

I dati del forno sono i seguenti: temperatura 620-630° raggiunta in 40 minuti con una potenza dei forno di 20 kW; Potenza di mantenimento fra il 6.5 ed il 7% sempre di 20 kW;

In 7,5 ore considerando un tempo di cottura compreso carico e scarico dei campioni di 20 minuti si possono considerare 20 infornata con 6 campioni per ogni infornata in un ciclo di 8 ore si avrà la produzione 120 pezzi.

L'energia di forno E_f per un campione viene quindi così calcolata dividendo l'energia consumata in un ciclo di 8 ore diviso il numero di campioni prodotti.

L'energia consumata dal forno per 8 ore è 30 min a 40kW e 7,5 ore a 3,2kW (8% della potenza forno) il totale dell'energia consumata per un ciclo di 8 ore è 25,5kWh

$$E_f = 25,5\text{kWh}/120 = 0,21\text{kWh}$$

In totale per ogni campione l'energia consumata E_{tot} è

$$E_{tot} = E_p + E_f = 0,96 \text{ kWh.}$$

In Tabella 6 sono riportati i dati riepilogativi che caratterizzano i due campioni ideale e reale, come si vede la dimensione del campione reale è maggiore.

Elemento	Elemento DB	Unità	Quantità Campione ideale 40*30*3cm ³	Quantità Campione reale 40*3*3cm ³
Carburo di silicio	RER: silicon carbide, at plant [inorganics]	g	13	1,2
Idruro di Titanio	Idruro di titanio			0,08
Produzione polvere di alluminio	polvere atomizzata AlSi12 [AFS]	g	1588	98
Profilato estruso di alluminio	RER: section bar extrusion, aluminium	g	1296	180
Elettricità	IT: electricity, medium voltage, production IT, at grid [production mix]	kWh	3,525	0,96
Trasporto materie prime	RER: transport, lorry 3.5-7.5t, EURO5	tkm	1,82088	0,1154
Volume		cm ³	3600	360
Peso		g	2916	280
Densità		g/cm ³	0,81	0,77

Tabella 6 dati riepilogativi campione ideale 40*30*3cm³ e Campione reale 40*3*3cm³.

L'analisi degli impatti dei due campioni viene fatta sulla medesima funzione che è la produzione di un kg di AFS.

Valutazione impatti confronto campione ideale AFS 40x30x3cm² e reale 40x3x3cm³

Il confronto mostra che per tutte le categorie di impatto 1kg di campione ideale 40*30*3cm³ ha impatti potenziali comparabili anche se leggermente più bassi rispetto ad 1 kg di campione reale 40*3*3cm³ questo perché l'energia di produzione per unità di massa del campione ideale è risultata circa il 35% più bassa.

Questo è dovuto al fatto che nel campione ideale viene ottimizzata la fase di pressatura che pressa contemporaneamente 540g invece di dover pressare 100g alla volta.

Categoria di impatto	Campione ideale AFS 40x3x3cm ³	Campione reale AFS 40x30x3cm ³
Aquatic acidification	4,98E-02	4,50E-02
Aquatic ecotoxicity	1,51E+05	1,43E+05
Aquatic eutrophication	1,50E-03	1,44E-03
Carcinogens	1,44E-01	1,38E-01

Global warming 500yr	1,58E+01	1,43E+01
Ionizing radiation	6,69E+02	6,57E+02
Land occupation	6,96E-06	6,60E-06
Mineral extraction	3,27E+00	3,18E+00
Non-carcinogens	6,11E-01	5,88E-01
Non-renewable energy	2,05E+02	1,85E+02
Ozone layer depletion	1,17E-06	1,12E-06
Photochemical oxidation	2,66E-03	2,46E-03

Tabella 7 confronto degli impatti potenziali tra 1kg di campione 40*3*3cm³ e 1kg campione ideale 40*30*3cm³

Questo risultato mostra la necessità di ottimizzazione dei consumi nella progettazione dell'impianto industriale.

Questa ottimizzazione si può ottenere sia utilizzando forni in continuo, in questo modo la fase di riscaldamento del forno diventa insignificante, mentre nel caso dei laboratori dovendo accendere e spegnere il forno in ogni ciclo si ha che la fase di riscaldamento del forno consuma il 6% di energia rispetto all'energia totale consumata dal forno in ciascun ciclo.

Inoltre può essere ottimizzata anche la fase di pressatura che dovrebbe avere dei consumi energetici proporzionali alla quantità di materiale compattato.

Proposta di Ecodesign per la produzione del pannello di AFS

L'ecodesign è un approccio che propone l'integrazione dei temi ambientali nella progettazione e riprogettazione di prodotti ed è standardizzato dalla ISO 14062. Nell'ecodesign è importante valutare tutte le fasi di un prodotto con un approccio di ciclo di vita, che deve includere oltre i fattori ambientali anche altri aspetti come quelli economici, sociali, tecnici estetici ecc. [30]. Diverse sono le strategie che possono essere adottate per includere gli elementi ambientali nella progettazione tra queste si segnalano:

- minimizzare l'uso di materiali ed utility (per es. acqua, gas, elettricità, trasporti)
 - eliminare l'uso dei materiali pericolosi, per facilitare il riutilizzo, per riciclare come raccomandato dalla Direttiva RoHS
 - scegliere materiali a minor impatto ambientale
 - massimizzare la funzionalità e la durata
 - minimizzare l'uso delle risorse, residui e contaminanti nel periodo in cui è usato
 - facilitare le procedure di disassemblaggio
 - massimizzare il riutilizzo dei componenti e degli assemblati ed il riciclo dei materiali a fine vita.¹⁸
- [31]

Per una completa applicazione della procedure di ecodesign alcune volte viene identificata una funzione di minimizzazione di tutti gli aspetti in gioco (economici, strutturale, ambientali, ecc.) che permette lo sviluppo di un prodotto ambientalmente sostenibile [20] o applicata analisi multicriteria che si focalizza su alcuni criteri chiave [30]

Nel caso della nostra analisi ci focalizzeremo sugli aspetti ambientali della progettazione di questo pannello. I risultati ottenuti dovranno poi essere integrati con gli aspetti economici e strutturali per la produzione dell'eventuale pavimento flottante per treni a lunga percorrenza, considerando gli impatti anche dell'uso e del fine vita di tale prodotto. In particolare le proposte di miglioramento ambientale sono state indirizzate sulla scelta di materiali con un minor impatto ambientale, sulla possibilità di migliorare la logistica dei trasporti e sulla minimizzazione dell'uso dei materiali.

Dall'analisi d'impatto ambientale potenziale svolta per il pannello in AFS 40*30*3cm³ emerge che in tutte le categorie d'impatto la produzione delle polveri e del profilato di alluminio sono gli elementi che danno maggiore impatto e a seguire vengono i trasporti.

Si è quindi deciso di fare tre proposte di miglioramento ambientale:

1. nella prima viene valutato l'uso di un materiale alternativo per la produzione delle polveri di alluminio e del profilato di alluminio, proponendo l'uso di alluminio riciclato in diverse proporzioni, avendo questo materiale un profilo ambientale migliore;
2. nella seconda viene proposta una ottimizzazione della logistica dei trasporti proponendo l'internalizzazione delle polveri di alluminio dentro il futuro impianto industriale .
3. nella terza si analizzano la geometria del sandwich variando gli spessori del core in alluminio e/o delle pelli.

Utilizzo di alluminio riciclato

L'alluminio ha la caratteristica di essere riciclabile al 100% senza perdere le sue caratteristiche, chimico, fisiche e meccaniche e ha un risparmio energetico del 95% rispetto alla produzione dell'alluminio primario. Tutto questo lo rende quindi un ottimo sostituto dell'alluminio primario per la produzione del nostro pannello di AFS.

L'Italia è la terza nazione al mondo dopo Giappone e Stati Uniti e a pari merito con la Germania per la quantità di alluminio riciclato. Nel 2010 sono state recuperate 46.500 t di alluminio pari al 72% dell'alluminio immesso sul mercato. Inoltre l'Italia è al primo posto in Europa per la produzione di Alluminio riciclato, con una lavorazione di rottami di 806 mila tonnellate nel 2010¹⁹. La produzione nazionale di alluminio è per l'80% riciclata e solo il 20% da prodotto primario[32]. Questo rende quindi più facile l'approvvigionamento di alluminio riciclato.

¹⁸ <http://www.ecosmes.net/cm/navContents?l=IT&navID=eee&subNavID=1&pagID=6&flag=1>

¹⁹ http://www.cial.it/scenario_nazionale.shtm

Nello studio si è scelto di fare un'analisi ambientale di comparazione tra il pannello AFS 40*30*3cm³ denominato "standard" con altri due pannelli dove si propone nel primo caso di raggiungere un 50% di alluminio riciclato "pannello 50% Al riciclato" sia nelle polvere atomizzata sia nel profilato in Al e un altro pannello "pannello 100% Al riciclato" dove viene inserito il 100% di Al riciclato sia nella polvere atomizzata che nel profilato. Questa comparazione vuole verificare la possibilità di miglioramento ambientale che emerge utilizzando queste soluzioni progettuali alternative.

Nella Tabella 8 sono riportati la composizione di 1kg di polvere atomizzata che viene utilizzata nei tre pannelli, mentre in Tabella 9 viene riportata la composizione per 1 kg di profilato di alluminio da utilizzare sempre nei tre pannelli.

Materiali	Standard kg	pannello 50% Al riciclato kg	pannello 100% Al riciclato kg
Alluminio primario	0,7165	0,433	0
Alluminio riciclato	0,15	0,433	0,866
Silicio	0,12	0,12	0,12
Acciaio	0,005	0,005	0,005
Manganese	0,002	0,002	0,002
Zinco	0,001	0,001	0,001
Magnesio	0,0005	0,0005	0,0005
Rame	0,005	0,005	0,005

Tabella 8 composizione di 1kg di polvere atomizzata nei tre pannelli

Materiali	Standard kg	pannello 50% Al riciclato kg	pannello 100% Al riciclato kg
Alluminio primario	1	0,5	0
Alluminio riciclato	0	0,5	1

Tabella 9 composizione di 1kg di profilato in alluminio nei tre pannelli

I restanti parametri del pannello rimangono gli stessi.

In Tabella 10 e in Figura 9 si vede come la soluzione standard è quella a maggiori impatti potenziali mentre il "pannello 100% Al riciclato" risulta avere gli impatti potenziali minori con riduzioni molto significative.

Categoria di impatto	Unità di misura	Standard	pannello 100% Al riciclato	pannello 50% Al riciclato
Aquatic acidification	kg SO ₂ -Eq. to air	1,31E-01	3,07E-02	8,56E-02
Aquatic ecotoxicity	kg TEG-Eq. to water	4,16E+05	3,71E+04	2,45E+05
Aquatic eutrophication	kg PO ₄ -Eq. to water	4,19E-03	2,14E-04	2,40E-03
Carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. to air	4,02E-01	2,79E-02	2,33E-01
Global warming 500yr	kg CO ₂ -Eq. to air	4,18E+01	1,05E+01	2,76E+01
Ionizing radiation	Bq C-14-Eq. to air	1,92E+03	6,70E+02	1,35E+03
Land occupation	m ² *yr-Eq.	1,92E-05	9,07E-06	1,46E-05
Mineral extraction	MJ surplus	9,27E+00	1,10E+00	5,57E+00
Non-carcinogens	kg C ₂ H ₃ Cl-Eq. to air	1,71E+00	2,35E-01	1,04E+00
Non-renewable energy	MJ	5,41E+02	1,56E+02	3,66E+02

Ozone layer depletion	kg CFC-11-Eq. to air	3,28E-06	1,52E-06	2,48E-06
Photochemical oxidation	kg C2H4-Eq. to air	7,17E-03	2,60E-03	5,09E-03
Respiratory effects	kg PM2.5-Eq. to air	4,50E-02	7,81E-03	2,82E-02
Terrestrial acidification/nutrication	kg SO2-Eq. to air	5,28E-01	1,57E-01	3,59E-01
Terrestrial ecotoxicity	kg TEG-Eq. to soil	4,73E+02	3,22E+02	3,94E+02

Tabella 10 Confronto degli impatti potenziali dei tre pannelli

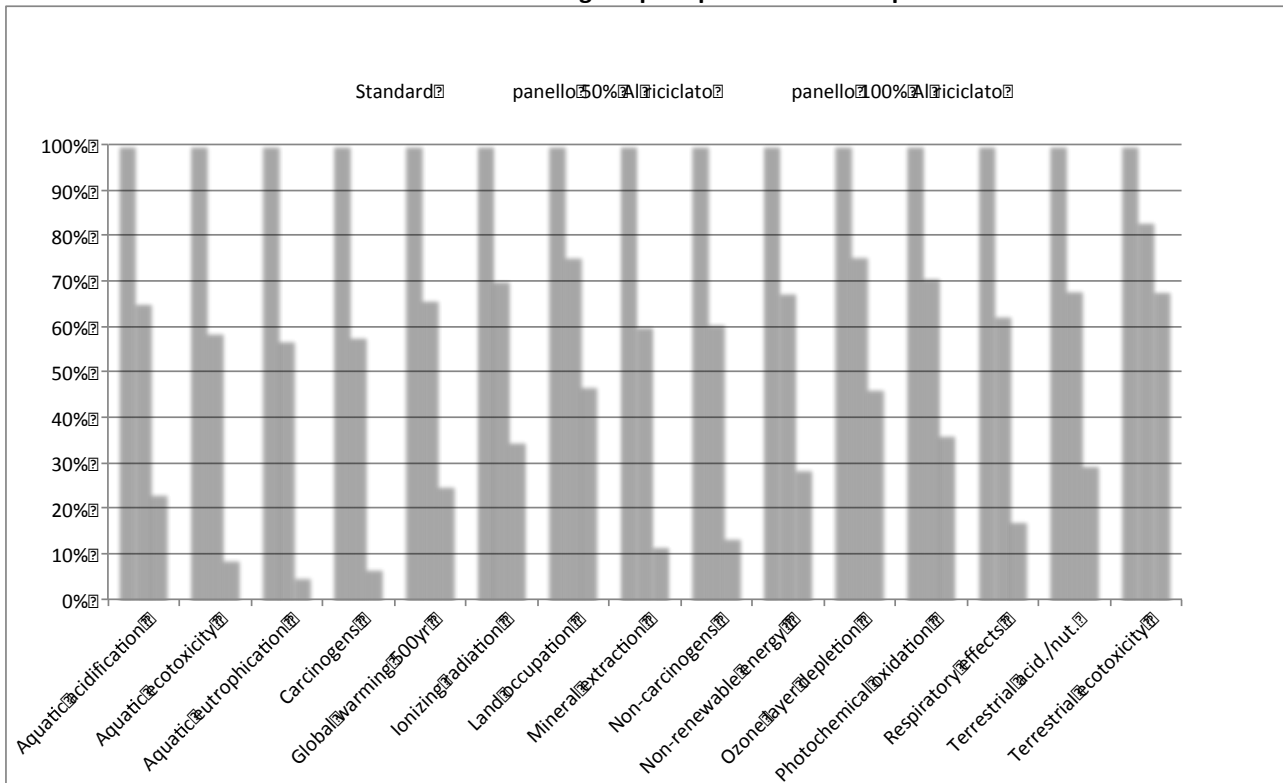


Figura 9 grafico degli impatti in percentuale dei tre pannelli rispetto al massimo impatto data dal pannello standard

I risultati mostrano quindi l'elevato vantaggio ambientale che si ha utilizzando alluminio riciclato. Tale vantaggio inoltre aumenta in maniera crescente con l'aumentare del riciclo. La diminuzione degli impatti è diversa a secondo della categoria considerata ad esempio per quanto riguarda la categorie Acquatic ecotoxicity, aquatic eutrophication e carcinaogens, si ha una riduzione degli impatti potenziali di oltre il 90% quella meno significativa è la terrestre ecotoxicity che ha una riduzione di circa il 31% che è comunque un risultato significativo.

Questi risultati confermano la necessità di cercare di utilizzare alluminio riciclato nella produzione di AFS questa scelta però in un'ottica di ecodesign dovranno essere anche valutata dal punto di vista tecnico strutturale per le applicazioni di questi pannelli in AFS. Inoltre è necessaria anche un'analisi di tipo economico per valutare la fattibilità di questa proposta.

Da una prima analisi risulta che l'utilizzo dell'alluminio riciclato è dal punto di vista economico moderatamente più vantaggiosa infatti le quotazioni della borsa di Londra a settembre 2012 valutavano i lingotti da 25 tonnellate di alluminio primario a 3250 dollari²⁰ mentre il costo dell'alluminio secondario per

²⁰ <http://www.wingspartners.com/tutorial/alluminio-primario.html> (al aggiornato al 07 Settembre 2012)

lingotti di 20 tonnellate è 2.200 dollari²¹, questo vuol dire 130 dollari a tonnellata di Al primario contro i 110 dollari di alluminio riciclato.

Logistica trasporti

Un altro elemento che dall'analisi degli impatti è risultato di un certo rilievo sono i trasporti, poiché le polveri atomizzate di alluminio sono prodotte in Germania e vengono trasportate su camion. Si è quindi valutato un'ipotesi di miglioramento ambientale in cui si porta la produzione di polveri di alluminio nello stesso impianto dove verranno prodotti i pannelli AFS quindi a km0. Si considera un caso in cui il pannello è prodotto con polveri di alluminio primario "AFS 40*30*3cm³ Km0, polvere Al primario" e un altro pannello in cui si suppone che le polveri usate sono fatte di alluminio riciclato al 100% "AFS 40*30*3cm³ Km0, polveri Al riciclato 100%". Questi due pannelli vengono confrontati con il pannello standard, in Tabella 11 sono riportati i dati utilizzati per i tre pannelli

elementi	AFS 40x30x2,4cm ³ standard	AFS 40*30*3cm ³ Km0, polvere Al primario	elementi	AFS 40*30*3cm ³ Km0 polveri Al riciclato 100%
Profilato Al	1296 g	1296 g	Profilato Al	1296 g
Polvere atomizzata AlSiC12	1588 g	1588 g	Polvere atomizzata AlSiC12 Al riciclata 100%	1588 g
SiC	19 g	19 g	SiC	19 g
Idruro di titanio	13 g	13 g	Idruro di titanio	13g
trasporti	1,82 tkm	0,039 tkm	trasporti	0,039 tkm
energia	3,525 kWh	3,525 kWh	energia	3,525 kWh

Tabella 11: dati utilizzati per i tre pannelli considerando km0 per il trasporto polveri

In Tabella 12 viene riportata il dettaglio del calcolo dei km percorsi per il trasporto delle polveri attuale, delle polveri considerato la produzione in azienda e del profilato in Al.

Trasporto su gomma	Provenienza	km	kg	kg*km	t*km
trasporto polveri attuale	Germania, Karlsruhe	1100	1620	1782	1,782
trasporto polveri con produzione in azienda	Ipotesi produzione in azienda	0	1620	0	0
profilati alluminio	Roma	30	1296	38,88	0,039

Tabella 12: riepilogo del calcolo dei trasporti

In Figura 10 è riportata l'analisi di caratterizzazione dei tre pannelli, i risultati sono riportati in percentuale rispetto al pannello standard che ha gli impatti maggiori per ciascuna categoria d'impatto.

²¹ <http://www.wingspartners.com/tutorial/alluminio-secondario.html> (al aggiornato al 07 Settembre 2012)

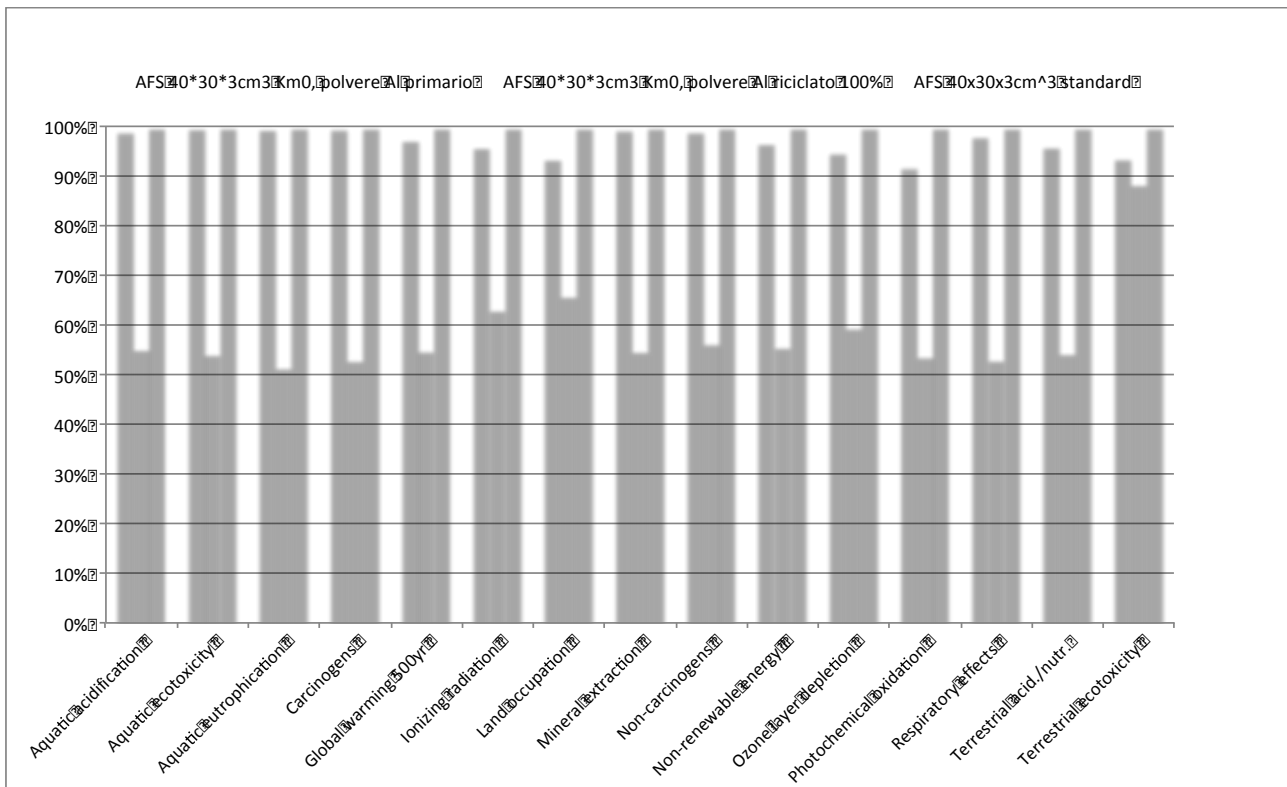


Figura 10 grafico degli impatti in percentuale dei tre pannelli rispetto al massimo impatto data dal pannello standard

Da Figura 10 si vede che se la produzione delle polveri verrà fatta solo con alluminio primario i vantaggi ambientali sono relativamente bassi oscillano dal 8% per la categoria terrestre acid./nutr. fino a nessun vantaggio come per le categorie Aquatic ecotoxicity, Aquatic eutrophication e Carcinogens. Mentre risulta essere molto più vantaggiosa la produzione interna se si sceglie di utilizzare alluminio riciclato per la produzione delle polveri atomizzate. In questo caso i miglioramenti ambientali potenziali vanno dal 22% per la categoria di impatto Terrestrial ecotoxicity fino a miglioramenti potenziali del 48% per la categoria Aquatic eutrophication.

Variatione spessore del sandwich

E' stata condotta anche un'analisi sulla variazione dello spessore del sandwich variando due parametri lo spessore della pelle e lo spessore del core. Questa analisi proporrà quali sono i parametri di progetto che portano a minori impatti ambientali potenziali, queste sono proposte del tutto teoriche che dovranno successivamente essere considerate dai progettisti per verificare che utilizzando tali parametri comunque il pannello flottante del pavimento del treno possa sopportare un carico di 80 kg per passeggero (compresi i bagagli) con il 100% di posti occupati, come da normativa vigente.

Sono state proposte cinque geometrie diverse le prime due si è supposto di mantenere costante lo spessore delle pelli pari a 2 mm per strato di pelle e variare invece lo spessore del core portandolo a 2,3 cm e a 2 cm, le altre due proposte invece modificano lo spessore delle pelli portandolo in un pannello a 1,5 mm per strato di pelle e nell'altra a 1mm per strato di pelle, 1 mm è lo spessore più piccolo proposto per AFS nel rapporto di Moncada et al. [14], infine è stata modificato lo spessore delle pelle ad 1mm e lo spessore del core a 2,8 cm.

In Tabella 13 sono riportati i dati del pannello standard e dei cinque pannelli con le modifiche delle dimensioni e delle quantità considerate dovute alla modifica della geometria. Per quanto riguarda l'energia c'è da considerare che l'energia del forno rimane la stessa poiché la superficie dei vari pannelli rimane sempre la stessa mentre quella che varia è l'energia della pressa che è proporzionale al precursore compattato.

elementi	AFS 40x30x2,4cm ³ spessori: pelle 2 mm, core 2 cm	AFS 40x30x2,7cm ³ spessori: pelle 2 mm, core 2,3 cm	AFS 40x30x2,8cm ³ spessori: pelle 1 mm, core 2,6 cm	AFS 40x30x2,9cm ³ spessori: pelle 1,5 mm, core 2,6cm	AFS 40x30x3cm ³ spessori: pelle 1 mm, core 2,8 cm	AFS standard 40x30x3cm ³ spessori: pelle 2 mm, core 2,6 cm
lunghezza	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm	40 cm
Profondità	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm	30 cm
Spessore pelle	4 mm	4 mm	2mm	3 mm	2 mm	4 mm
Spessore cuore	2 cm	2,3 cm	2,6 cm	2,6 cm	2,8 cm	2,6 cm
Profilato Al	1296 g	1296 g	648g	972 g	648 g	1296 g
Polvere atoizzata AlSiC12	1221 g	1404 g	1588g	1588g	1709 g	1588g
SiC	15 g	17 g	19 g	19 g	20 g	19 g
Idruo di titanio	10 g	11 g	13g	13g	14 g	13g
trasporti	1,4 tkm	1,61 tkm	1,72 tkm	1,81tkm	1,9tkm	1,82 tkm
energia	3,001 kWh	3,265 kWh	3,525 kWh	3,525kWh	3,698 kWh	3,525kWh

Tabella 13 dati dei 5 pannelli confrontati con il pannello standard

Infine è stata fatta un'analisi ambientale con il software gabi facendo un'analisi comparativa in termini di superficie dei vari pannelli pari a $40 \times 30 = 1200 \text{cm}^2$. E' stato scelto di comparare i pannelli in base alla superficie per verificare i vantaggi ambientali a livello di superficie di pavimentazione che possono essere prodotti quando si passerà alla produzione del pavimento flottante del treno. In Figura 11 viene mostrato il grafico dove per ciascuna categoria di impatto è riportato l'impatto in percentuale di ciascun pannello rispetto al pannello standard. Come si vede il pannello standard risulta avere sempre gli impatti maggiori. La soluzione che da le migliori performance ambientali potenziali è quella del pannello AFS 40*30*2,8 spessore pelle 1mm per lato e spessore core 2,6. Questo vantaggio è dovuto al fatto che riducendo lo spessore delle pelli del profilato di alluminio si ha una considerevole riduzione in peso del pannello. Si vede inoltre che il secondo risultato migliore è il pannello AFS 40*30*3cm³ spessore pelle 1mm per lato e spessore core 2,8, dove nonostante si aumenti un po' la dimensione del core del sandwich risulta avere ancora impatti minori rispetto alle altre ipotesi.

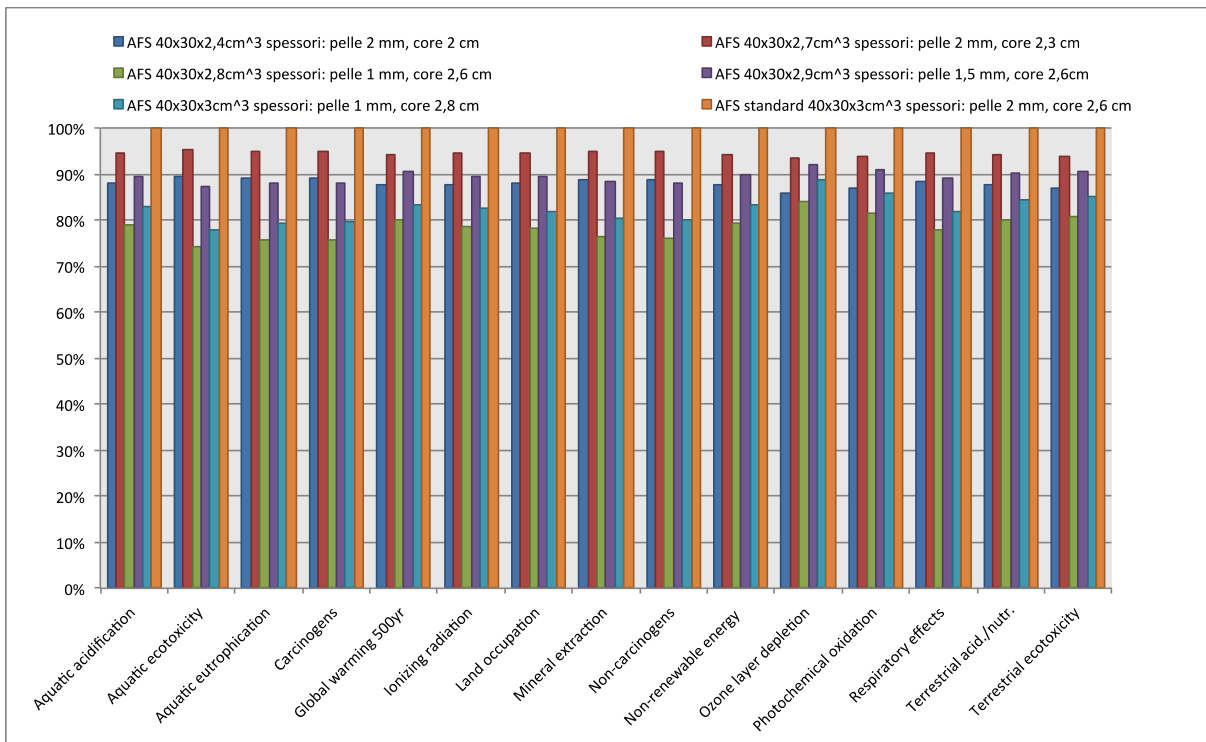


Figura 11 comparazione percentuale degli impatti potenziali dei diversi pannelli a parità di superficie rispetto al pannello standard

Questi risultati suggeriscono che le prove del pavimento dovrebbero in prima analisi a parità di resistenza andare a ridurre il più possibile lo spessore delle pelli del profilato in alluminio

Conclusioni

In generale questa ricerca ha dimostrato che, agendo precocemente con valutazioni ambientali nella progettazione di nuovi materiali, si possono ottenere utili risultati che permettono di indirizzare le successive scelte progettuali.

Lo studio di LCA evidenzia anche che nello scale-up industriale sarebbe opportuno prevedere di interiorizzare alcune fasi di lavorazione, come la produzione di polveri atomizzata, che, se prodotte con alluminio riciclato possono avere un impatto ambientale potenziale ridotto.

Ringraziamenti

Si ringraziano i colleghi di ENEA UTMAT MONIT per la disponibilità e la collaborazione.

Allegato: Tabella fattori di caratterizzazione per le categorie di Global Warming 100 e 500 anni

Qui di seguito sono riportati i fattori di caratterizzazione utilizzati per il calcolo della Global warming a 500 anni con il metodo impact2002+ e i fattori a 100 anni utilizzati con il metodo CML2001 aggiornati al 2007 così come inseriti sul gabi4.4.

Flow	Unit	GWP 100 1(Flow)=kg CO ₂ eq	GWP 500 1(Flow)=kg CO ₂ eq
1,1,1-Trichloroethane [Halogenated organic emissions to air]	kg	140	42
Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	kg	1	1
Carbon dioxide [Renewable resources]	kg	1	1
Carbon dioxide (biotic) [Inorganic emissions to air]	kg	1	1
Carbon dioxide (biotic) [Inorganic emissions to air]	kg	1	1
Carbon dioxide, land transformation [Inorganic emissions to air]	kg	1	1
Carbon monoxide [Inorganic emissions to air]	kg		1,57
Carbon monoxide (biotic) [Inorganic emissions to air]	kg		1,57
Carbon tetrachloride (tetrachloromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	1800	580
Chloromethane (methyl chloride) [Halogenated organic emissions to air]	kg	16	5
Dichloromethane (methylene chloride) [Halogenated organic emissions to air]	kg	10	3
Dichloromonofluoromethane [Halogenated organic emissions to air]			65
Halon (1211) [Halogenated organic emissions to air]	kg	1300	390
Halon (1301) [Halogenated organic emissions to air]	kg	6900	2700
HBFC-1201 (Halon-1201) [Halogenated organic emissions to air]			150
Hydrocarbons (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]	kg	16,1	
Methane [Organic emissions to air (group VOC)]	kg	23	7
Methane (biotic) [Organic emissions to air (group VOC)]	kg	23	7
Methyl bromide [Halogenated organic emissions to air]	kg	5	1
Nitrous oxide (laughing gas) [Inorganic emissions to air]	kg	296	156
Perfluorobutane [Halogenated organic emissions to air]	kg	8600	12400
Perfluorocyclobutane [Halogenated organic emissions to air]	kg	10000	
Perfluorohexane [Halogenated organic emissions to air]	kg	9000	13200
Perfluoropentane [Halogenated organic emissions to air]	kg	8900	12400
Perfluoropropane [Halogenated organic emissions to air]	kg	8600	
R 11 (trichlorofluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	4600	1600
R 113 (trichlorofluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	6000	2700
R 114 (dichlorotetrafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	9800	8700
R 115 (chloropentafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	7200	9900
R 116 (hexafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	11900	18000
R 12 (dichlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	10600	5200
R 123 (dichlorotrifluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	120	36
R 124 (chlorotetrafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	620	190
R 125 (pentafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	3400	1100
R 13 (chlorotrifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	14000	16300
R 134 [Halogenated organic emissions to air]	kg	1100	
R 134a (tetrafluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	1300	400
R 141b (dichloro-1-fluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	700	220
R 142b (chlorodifluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	2400	
R 143 (trifluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	330	
R 143a (trifluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	4300	1600
R 152a (difluoroethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	120	13
R 21 (Dichlorofluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg		65

R 22 (chlorodifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	1700	540
R 225ca (dichloropentafluoropropane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	180	55
R 225cb (dichloropentafluoropentane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	620	190
R 227ea (septifluoropropane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	3500	1100
R 23 (trifluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	12000	10000
R 236fa (hexafluoropropane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	9400	7100
R 245ca (pentafluoropropane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	640	200
R 41 [Halogenated organic emissions to air]	kg	97	
R 43-10 (decafluoropentane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	1500	470
R32 (difluoromethane) [Halogenated organic emissions to air]	kg	550	
Sulphur hexafluoride [Inorganic emissions to air]	kg	22200	32400
Tetrafluoromethane [Halogenated organic emissions to air]	kg	5700	8900
Trichloromethane (chloroform) [Halogenated organic emissions to air]	kg	30	9
VOC (unspecified) [Organic emissions to air (group VOC)]	kg	16,1	

Tabella 14 fattori di caratterizzazione per la global warming a 100 anni del metodo CML2001 aggiornato 2007 ea 500anni del metodo impact2002+

Abbreviazioni ed acronimi

Elenco abbreviazioni utilizzate nel report.

AFS: "Foam aluminium sandwich"

CALEF: "Consorzio per la ricerca e lo sviluppo delle applicazioni industriali laser e del fascio elettrico e dell'ingegneria di processo , materiali , metodi e tecnologie di produzione"

ETAP: Environmental Technologies Action Plan

EU-25: Europa 25 paesi

HHS: high-strength steel

ICT: Information Communication Tenchnology

ILCD: l'Interntional Life Cycle System reference

IPP: Integrate Product police- politiche integrate di prodotto

LCA: Life Cycle Assessment

PMI: polymethacrylimide

PUR: poliuretano a media densità

UE: Unione Europea

Riferimenti bibliografici

1. Confindustria "Proposte per il Piano Nazionale di EFFICIENZA ENERGETICA Task Force Efficienza Energetica di Confindustria" 2008;
2. Cheul-Kyu Lee, Dong-Hee Kim, Woo-Sung Jung, "Study on the energy saving running technology and its CO2 reduction effect of railway vehicle", Proceeding of 9 world congress railway research, Challenge A: A more and more energy efficient railway, maggio 22-26, 2011;
3. COM 109 "Piano di efficienza energetica", 2011;
4. COM 112, "Una tabella di marcia verso un'economia competitiva a basse emissioni di carbonio nel 2050", 2011;
5. COM 144, "final WHITE PAPER- Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system", 2011;
6. Scalbi Simona, Patrizia Buttol, Luciano Naldesi, Caterina Rinaldi, Alessandra Zamagni, "Valutazione ambientale di prodotto ed LCA: l'importanza di banche dati e criteri di qualità dei dati". Atti del convegno di Ecomondo 2010, pag 1055-1061, Maggioli Editore novembre 2010, ISBN: 8838759359;
7. COM 302, "Politica integrata dei prodotti: Sviluppare il concetto di "ciclo di vita ambientale"", 2003
8. COM 397, "Piano di azione per "Produzione e consumo sostenibili" e "Politica industriale sostenibile"" 2008
9. COM 38, "Incentivare le tecnologie per lo sviluppo sostenibile: piano d'azione per le tecnologie ambientali nell'Unione europea" ETAP (Environmental Technologies Action)" 2004;
10. COM 666, "Portare avanti l'utilizzo sostenibile delle risorse - Una strategia tematica sulla prevenzione e il riciclaggio dei rifiuti", 2005;
11. Regolamento REACH 1907, 2006;
12. Cappellaro Francesca, Simona Scalbi, 2011, dossier "La rete italiana LCA: prospettive e sviluppi del life cycle assessment in Italia", 8 giugno 2011, ENEA, ISBN 978-88-8286-240-4, pag 9-21
13. Direttiva quadro 2005/32/CE– (EuP) "Definizione di specifiche per l'eco-design e per la certificazione di prodotti con elevati consumi energetici", 2005;
14. Moncada Massimo, Angelo Tatì, Ugo De Angelis "Sviluppo di metodologie di controllo NDT su componenti saldati e correlazione con le caratteristiche meccaniche", RdS Par 2012
15. Kasai Junichi, "Life cycle assessment, evaluation method for sustainable development", JSAE (Society of Automotive Engineers of Japan,) Review 20 (1999) 387-393
16. Stodolsky F., A. Vyas, R. Cuenca, and L. Gaines "Life-Cycle Energy Savings Potential from Aluminum-Intensive Vehicles," SAE Paper no. 951837 (Warrendale, PA: SAE, 1995);
17. Das Sujit, "The Life-Cycle Impacts of Aluminum Body-in-White Automotive Material", JOM - Journal of Metals 52 (8) , pp. 41-44 Agosto 2000;
18. Mcauley J., "Global Sustainability and Key Needs in Future Automotive Design", Environmental Science Technology, n°37, pag. 5414-5416, 2003;
19. Das Sujit, "Life cycle energy impacts of automotive liftgate inner", Resources, Conservation and Recycling 43, pag 375–390, 2005;
20. Ermolaeva N.S., Maria B.G. Castro, Prabhu V. Kandachar, "Materials selection for an automotive structure by integrating structural optimization with environmental impact assessment", Materials and Design, vol 25, pag 689–698, 2004;
21. Bertram Marlen, Kurt Buxmann & Peter Furrer, "Analysis of greenhouse gas emissions related to aluminium transport applications" International Journal Life Cycle Assessment 14 (Suppl 1): pag. S62–S69, 2009;
22. Kim Hyung-Ju, Gregory A. Keoleian, and Steven J. Skerlos, "Economic Assessment of Greenhouse Gas Emissions Reduction by Vehicle Lightweighting Using Aluminum and High-Strength Steel", Journal of Industrial Ecology, vol15, n°1, pag64-80, 2010;
23. Struckl Walter, Wolfgang Wimmer "Green Line – strategies for environmentally improved railway vehicles" proceeding CIPR Conference on Life Cycle Engineering, pag 77-82, 2004;
24. Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. and Rosenbaum, R., 2003. IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. Int J. of LCA 8 (6) 324-330

25. Blaser Silvio, Hans-Jörg Althaus, Niels Jungbluth, "Part XV-Metal processing-Data v2.1 (2009)" final report of updated Swiss National Life Cycle Inventory Database "ecoinvent", version 2.1 , 2009.
26. Ghanim, A.N. "Atomization of Aluminum by Unique Air Nozzle", Journal of Babylon University, pure an Applied Science, n° 3, vol 19, 2011
27. Sungkhaphaitoon Phairote, T. Plookphol, S. Wisutmethangoon, "Centrifugal Atomization of Zinc Metal Powder for Friction Materials Application" Advanced Materials Research Vols. 488-489 (2012) pp 281-285 Online available since 2012/Mar/15
28. Dunkley J J & D Aderhold "Centrifugal atomisation of metal powders", Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials, 2007
29. Weast R.C. "CRC Handbook of Chemistry and Physics", 1979
30. Lewandowska A., Kurczewski P., " ISO 14062 in the theory and practice – ecodesign procedure Par 1: structure and theory", International Journal Life Cycle Assessment, 15, pag. 769-776, 2010.
31. Vezzoli C., Manzini E.; " Design per la sostenibilità ambientale" Zanichelli editore, 2007
32. Tagliacarne Anna, Alluminio: Italia terza al mondo per il riciclo, corriere 6 marzo 2012