

TOOL PER LA COMPARAZIONE AMBIENTALE DELLA FASE D'USO DI SOLUZIONI TRADIZIONALI E SOLUZIONI LIGHTWEIGHTING IN AMBITO AUTOMOBILISTICO

F. Del Pero, M. Delogu, M. Pierini

Università degli Studi di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Industriale,
Via di Santa Marta 3, 50139 Firenze
e-mail: francesco.delpero@unifi.it
e-mail: massimo.delogu@unifi.it
e-mail: marco.pierini@unifi.it

Sommario

Nello studio è presentato un tool per la comparazione ambientale della fase d'uso di soluzioni tradizionali e soluzioni lightweighting innovative in ambito automobilistico. Tale tool è incentrato sulla quantificazione del risparmio di carburante conseguibile tramite riduzione di massa per veicoli turbo-benzina appartenenti al segmento C. I risultati sono espressi tramite il coefficiente "Fuel Reduction Value" (FRV) in termini di carburante risparmiato a fronte di una riduzione di massa di 100kg (l/100km*100kg). L'obiettivo è l'individuazione di un appropriato valore per l'FRV che tenga conto delle caratteristiche tecniche (potenza, massa e rapporto potenza-massa) che caratterizzano lo specifico segmento indagato. L'FRV è determinato sulla base del consumo di carburante calcolato mediante modellazione analitica. Lo studio è completato dall'integrazione di un modello ambientale che, a partire dall'FRV ottenuto dalla simulazione, traduce il risparmio di carburante in riduzione di impatto sull'ambiente.

Abstract

A tailored tool for the environmental assessment of the use phase of lightweight solutions in the automotive field is presented. The tool focuses on the quantification of fuel saving achievable by mass reduction of gasoline turbocharged vehicles belonging to the C-class. The results are expressed by the coefficient "Fuel Reduction Value" (FRV) in terms of fuel saved through a mass reduction of 100kg (l/100km*100kg). The goal is to identify a range for the FRV taking into account technical characteristics (power, mass, power to mass ratio) that characterize the investigated class. The FRV is determined basing on fuel consumption calculated by simulation modelling. The study is completed by an environmental model which translates fuel saving to impact reduction starting from the FRV determined in the simulation.

Parole chiave: Automotive, consumo di carburante, Fuel Reduction Value (FRV), Life Cycle Assessment (LCA), lightweight.

1. INTRODUZIONE

La metodologia Life Cycle Assessment (LCA) è ampiamente diffusa nel settore dei trasporti ed in particolare in quello automobilistico. In letteratura sono ad oggi reperibili molti studi LCA sia di veicoli/componenti convenzionali ([12], [13], [14], [15], [39], [40]) che innovativi ([2], [7], [8], [17], [18], [19], [23], [24], [28], [42], [43], [45]) e l'interesse in questo campo è in continua crescita. Per i veicoli con motore a combustione interna circa l'85% delle emissioni di CO₂ è imputabile alla fase d'uso ([10], [11]); la rimanente quota percentuale è distribuita tra le altre fasi quali estrazione e trasformazione delle materie prime, produzione e fine-vita ([16], [20], [21], [26], [29], [35], [36], [38], [39]). L'impatto ambientale imputabile alla fase d'uso dipende direttamente dal quantitativo di

combustibile consumato dal veicolo durante il suo intero ciclo di vita e tale consumo è fortemente influenzato dalla massa ([22], [33], [34]). In questo contesto l'alleggerimento è stato unanimemente riconosciuto come una delle soluzioni chiave per ridurre il consumo di carburante, insieme al miglioramento dell'efficienza dei motori e dell'aerodinamica. Sebbene l'alleggerimento rappresenti una strategia molto interessante per la riduzione dei consumi e, di conseguenza, dell'impatto ambientale della fase d'uso, è altrettanto vero che spesso comporta un aumento degli impatti nelle fasi di produzione e fine-vita. Difatti molti dei materiali utilizzati nel lightweighting (compositi, alluminio, magnesio, etc.) sono ottenuti da processi di trasformazione energivori che causano elevati impatti sull'ambiente. Inoltre i compositi polimerici presentano problemi in fase di fine vita in quanto risultano difficilmente riciclabili rispetto ai metalli. Ciò rende necessario un bilancio sull'intero ciclo di vita degli effetti causati dall'introduzione di materiali innovativi leggeri. Pertanto quando si effettua la comparazione tra una soluzione alleggerita innovativa ed una tradizionale risulta fondamentale

- valutare le potenzialità di riduzione dell'impatto ambientale offerte dall'alleggerimento attraverso una stima del consumo di carburante risparmiabile;
- convertire la riduzione di consumo di carburante in riduzione dell'impatto per poter stabilire l'effettiva convenienza della soluzione innovativa.

Nel presente lavoro è mostrato un tool sviluppato al fine di stimare le potenzialità del lightweighting in specifiche applicazioni automobilistiche. I benefici offerti dalla riduzione di massa vengono quantificati in termini di impatti ambientali risparmiati tramite opportuni strumenti di modellazione ambientale il cui elemento base è il coefficiente *Fuel Reduction Value* (FRV). Quest'ultimo è ricavato mediante modellazione analitica con l'obiettivo di superare le criticità degli attuali approcci presenti in letteratura.

2. Fase d'uso di soluzioni lightweighting in LCA comparative

2.1 Analisi dello stato dell'arte

In letteratura esistono due tipologie di approccio che trattano la tematica del lightweighting in ambito LCA nel settore automobilistico ([32], [9]). Entrambi gli approcci quantificano il consumo di carburante risparmiabile tramite riduzione di massa: il primo si basa su rigide proporzioni tra massa e consumo mentre il secondo fa uso del coefficiente *FRV*. Di seguito si riporta una breve rassegna riassuntiva di quanto presente in letteratura relativamente agli approcci citati.

L'approccio basato su proporzioni è costituito dai metodi incrementale e proporzionale. La loro peculiarità è che necessitano di una costante di proporzionalità c fissata a priori tra riduzione di massa (Δm [kg]) e consumo di carburante risparmiato (ΔC [l/100km]) (Eq.1).

$$\frac{\Delta C}{\Delta m} = \frac{C_{veh}}{m_{veh}} \cdot c \quad (\text{Eq.1})$$

Dove:

C_{veh} = consumo del veicolo di riferimento [l/100km];

m_{veh} = massa del veicolo di riferimento [kg].

Passando al secondo approccio, l'*FRV* quantifica il quantitativo di carburante risparmiato a fronte di una riduzione di massa di 100kg. Il consumo risparmiato viene calcolato mediante la seguente equazione:

$$\Delta C = \Delta m * FRV * 0.01 \quad (\text{Eq.2})$$

In letteratura gli studi LCA comparativi nel settore automobilistico che si servono dell'*FRV* adottano per tale coefficiente un valore compreso nel range 0.15–1 [l/100km*100kg] ([1]).

Passando in rassegna le ricerche volte alla determinazione dell'*FRV*, Eberle ([9]) e Koffler ([21]) sono gli unici due autori che, nell'ambito di studi LCA comparativi, determinano tale coefficiente per via analitica. La procedura seguita prevede il calcolo del consumo di carburante per diverse configurazioni di massa del veicolo e l'individuazione dell'*FRV* come pendenza della retta di regressione del consumo in funzione della massa. I calcoli sono effettuati per diversi modelli di veicolo con riferimento a due casi distinti:

- semplice riduzione di massa: le varie configurazioni si differenziano soltanto per la massa;
- riduzione di massa con implementazione di effetti secondari: oltre che per la massa le configurazioni si differenziano per l'apporto di modifiche tecniche (re-sizing del motore, allungamento del rapporto finale di trasmissione, etc) tali che le prestazioni del veicolo restino inalterate a fronte della variazione di peso.

La Tabella 1 riporta i risultati in termini di *FRV* conseguiti da Eberle e Koffler.

Tabella 1. Valori di *FRV* ottenuti da Eberle (2000) e Koffler (2010) in base al ciclo di guida New European Driving Cycle (NEDC)

		<i>FRV</i> [l/100km*100kg]					
		Benzina aspirato			Turbodiesel		
		Min	Max	Media matematica	Min	Max	Media matematica
Eberle	Sola riduzione di massa	0.049	0.139	-	0.118	0.138	-
	Effetti secondari (allungamento rapporto finale)	0.343	0.481	-	0.290	0.330	-
Koffler	Sola riduzione di massa	0.15			0.12		
	Effetti secondari (allungamento rapporto finale)	0.290	0.390	0.320	0.270	0.300	0.290
	Effetti secondari (resizing motore)	0.360	0.450	0.390	0.240	0.290	0.260

Gli *FRV* ottenuti da Eberle e Koffler sono adottati da numerose LCA comparative come riferimento per il calcolo del consumo risparmiabile tramite riduzione di massa.

Altri studi in letteratura ricavano l'*FRV* come la pendenza della curva di regressione di dati provenienti da differenti modelli di veicolo ([1], [30], [37]). Infine esistono numerose ricerche che indagano l'effetto della riduzione di massa sul consumo in un contesto più ampio rispetto a quello dell'LCA, prendendo in considerazione svariate tecnologie propulsive ed abbinando l'alleggerimento ad ulteriori interventi ([3], [4], [5], [6], [17], [25], [27], [31], [16], [44]).

2.2. Analisi critica degli studi in letteratura

L'approccio basato su proporzioni necessita di una costante di proporzionalità *c* fissata a priori. Molte delle LCA comparative che si basano su tale approccio ([43], [29]) adottano per la costante *c* il valore 0,6, come suggerito dal progetto EUCAR LCA ([32]). Considerando che si tratta di studi su vetture appartenenti a segmenti diversi che differiscono fortemente in termini di massa, aerodinamica e caratteristiche propulsive (potenza, massa, rapporto massa-potenza, etc) l'adozione di uno stesso valore per la costante *c* porta a risultati affetti da un notevole livello di incertezza.

Passando all'approccio basato sull'*FRV*, l'analisi critica mette in luce che:

- gli studi in letteratura calcolano l'*FRV* per mezzo di simulazioni analitiche ed i calcoli prevedono l'individuazione di un valore che caratterizzi l'intero segmento indagato. Generalmente le simulazioni sono condotte facendo riferimento ad un singolo modello di auto

(o al limite ad un ristretto numero di modelli). Ciò comporta che i risultati dipendono dalle caratteristiche degli specifici veicoli indagati senza essere realmente rappresentativi dell'intero segmento;

- non esistono studi recenti aventi come obiettivo la determinazione del coefficiente *FRV* nel caso di implementazione di effetti secondari per veicoli turbo-benzina;
- gli studi esistenti sono datati. L'evoluzione tecnologica e lo sviluppo di nuovi modelli fanno sì che le caratteristiche tecniche che contraddistinguono ogni segmento varino nel corso degli anni. Pertanto *FRV* ottenuti 10-15 anni fa per uno specifico segmento oggi non sono più rappresentativi dello stesso;
- gli studi di letteratura determinano l'*FRV* in base a un ciclo di guida che di solito è quello usato per le prove di omologazione nell'area geografica in cui viene condotta la ricerca. Pertanto i cicli differiscono da uno studio all'altro evidenziando una rilevante limitazione in termini di comparabilità con altri lavori;
- gli studi europei calcolano il consumo del veicolo basandosi sul ciclo omologativo di riferimento per l'Europa (New European Driving Cycle, NEDC). Quest'ultimo si accinge a diventare obsoleto (entro il 2016 è prevista la sua sostituzione con il Worldwide harmonized Light Test Cycle, WLTC) ed è considerato non rappresentativo del reale stile di guida degli utenti [21].

3. Descrizione del tool

La costruzione del tool si articola in tre step principali: calcolo del consumo di carburante in fase d'uso, stima del consumo risparmiabile tramite riduzione di massa e modellazione ambientale.

3.1. Calcolo del consumo di carburante in fase d'uso

Il consumo di carburante del veicolo in fase d'uso viene calcolato tramite un modello di simulazione AMESim. Di seguito si riporta la gamma dei veicoli presi in esame, la descrizione del modello ed i cicli di guida adottati.

Estensione dell'analisi. La ricerca prende in considerazione le auto turbo-benzina appartenenti al segmento C. L'*FRV* relativo al suddetto segmento viene calcolato applicando la modellazione ad 11 casi studio. Ciò permette di stimare l'*FRV* tramite un range di valori che ne tenga in considerazione la variabilità in base alle caratteristiche tecniche dei veicoli (potenza, massa e rapporto potenza-massa) all'interno del segmento. Allo scopo di ottenere consumi di carburante realistici, i diversi casi studio sono caratterizzati da parametri di auto reali presenti nel mercato europeo in riferimento all'anno 2015. La Tabella 3 riporta le principali caratteristiche tecniche dei modelli scelti come rappresentativi del segmento; il numero di casi studio dipende esclusivamente dalla disponibilità in letteratura dei dati necessari per la caratterizzazione del modello di simulazione.

Tabella 3. Principali caratteristiche tecniche dei modelli scelti come rappresentativi dei casi studio

Caso studio	Marca e modello di veicolo	Massa simulazione [kg]	Cilindrata [cc]	Potenza max [kW]	Rapporto potenza-massa [kW/kg]
1	ALFA ROMEO Giulietta 1.4 TB 105cv	1420	1368	77	0.063
2	ALFA ROMEO Giulietta 1.4 TB 170cv	1430	1368	125	0.102
3	AUDI A3 1.2 TFSI 110cv	1290	1197	81	0.074
4	AUDI A3 1.4 TFSI 150cv	1345	1395	110	0.095
5	AUDI A3 1.8 TFSI 180cv	1370	1798	132	0.112
6	FIAT Bravo 1.4 T-jet 120cv	1400	1368	88	0.073
7	FIAT Bravo 1.4 T-jet 140cv	1415	1368	103	0.085
8	FORD Focus 1.0 EcoBoost 100cv	1355	999	73.5	0.063
9	FORD Focus 1.0 EcoBoost 125cv	1360	999	92	0.079

10	FORD Focus 1.5 EcoBoost 150cv	1387	1499	110	0.092
11	FORD Focus 1.5 EcoBoost 180cv	1387	1499	134	0.112

Descrizione del modello AMESim. Il modello stima la coppia alle ruote necessaria per raggiungere la desiderata velocità del veicolo inviando comandi (posizione dell'acceleratore, azionamento della frizione, marcia ingranata) a diversi componenti i quali reagiscono in tempo reale. E' così possibile modellare un ciclo di velocità predefinito tenendo in considerazione gli effetti transitori come regolazione del carico del motore, innesto/disinnesto della frizione, cambio marcia, etc. Il modello è composto da due sezioni: logica di controllo e trasmissione. Il setting viene effettuato tramite i seguenti 16 parametri di modello: *massa, dimensioni ruote e pneumatico, inerzia ruote, coefficiente di penetrazione aerodinamica, area frontale, rapporti del cambio, rapporto finale di trasmissione, cilindrata, numero di cilindri, corsa del pistone, alesaggio del cilindro, inerzia del motore, consumo al minimo, curva di coppia e mappa del consumo specifico.*

Cicli di guida. Un requisito fondamentale del tool è che il consumo di carburante e l'*FRV* siano calcolati rispetto a cicli di guida diversi. A questo scopo il modello esegue il calcolo non solo rispetto al nuovo ciclo di guida europeo (New European Driving Cycle, NEDC) ma anche in relazione ad altri 3 cicli standardizzati: Federal Test Procedure (FTP72), Japan 2008 (JC08) e World Light Test Cycle (WLTC, futuro ciclo di omologazione per l'Europa). La scelta di riferirsi a cicli di guida standardizzati è dettata da ragioni di trasparenza, coerenza e comparabilità con gli studi esistenti in letteratura.

3.2. Stima del consumo risparmiabile tramite riduzione di massa

Nel secondo step della costruzione del tool il coefficiente *FRV* viene ricavato a partire dai valori di consumo di carburante calcolati tramite il modello di simulazione. Di seguito viene descritta la procedura per il calcolo del consumo risparmiabile tramite riduzione di massa del veicolo: la trattazione è affrontata in maniera distinta tra i casi di sola riduzione di massa e riduzione di massa con implementazione di effetti secondari.

3.2.1. Sola riduzione di massa

Il consumo di carburante risparmiabile tramite sola Riduzione di Massa (ΔC_{RM}) è calcolato mediante la seguente relazione:

$$\Delta C_{RM} = FRV_{RM} * \Delta m \quad (\text{Eq.3})$$

Dove:

FRV_{RM} = Fuel Reduction Value nel caso di sola Riduzione di Massa [l/100km*100kg].

Il coefficiente *FRV* viene ricavato a partire dai valori di consumo ottenuti tramite il modello di simulazione. Per ognuno dei casi studio il consumo di carburante è calcolato per le seguenti 5 configurazioni di massa: massa di riferimento ed alleggerimenti del 5%, 10%, 15% e 20%. Una volta che è stato determinato il consumo per tutte le configurazioni di massa, si ottengono 5 punti sul diagramma "Consumo-Massa". Il coefficiente *FRV* è ricavato come la pendenza della retta di regressione del consumo in funzione della massa ed è espresso in [l/100km*100kg]. Il coefficiente *FRV* viene determinato per ognuno degli 11 casi studio. Va notato che:

- la percentuale di alleggerimento si riferisce alla massa a tara del veicolo;
- il consumo di carburante delle configurazioni alleggerite è calcolato mediante lo stesso modello di simulazione usato per la configurazione di riferimento in cui l'unica variazione è rappresentata dalla massa del veicolo. Difatti, dato che l'obiettivo è valutare l'effetto sul consumo della riduzione di massa, tutti gli altri parametri di modello rimangono inalterati;
- la riduzione della massa fa sì che le prestazioni del veicolo nelle configurazioni alleggerite crescano sia in termini di accelerazione che di velocità massima.

3.2.2. Riduzione di massa con implementazione di effetti secondari

Il consumo di carburante risparmiabile tramite riduzione di massa ed implementazione di effetti secondari viene calcolato mediante la stessa espressione analitica usata nel caso di sola riduzione di massa (vedi Eq. 3). In questo caso il coefficiente è identificato dall'acronimo FRV_{ES} (FRV Effetti Secondari). FRV_{ES} è determinato sulla base del consumo di carburante calcolato tramite il modello di simulazione per le seguenti 5 configurazioni di massa del veicolo:

- configurazione di riferimento;
- alleggerimento del 5% ed implementazione di effetti secondari al livello 1;
- alleggerimento del 10% ed implementazione di effetti secondari al livello 2;
- alleggerimento del 15% ed implementazione di effetti secondari al livello 3;
- alleggerimento del 20% ed implementazione di effetti secondari al livello 4.

Va notato che la percentuale di alleggerimento si riferisce alla massa a tara del veicolo e che gli effetti secondari per le quattro configurazioni alleggerite sono attuati a quattro diversi livelli.

Definizione degli effetti secondari. Come detto sopra, la riduzione di massa del veicolo comporta da un lato una riduzione del consumo di carburante e dall'altro un miglioramento delle prestazioni. Nella sola ottica di riduzione del consumo il miglioramento delle prestazioni rappresenta un effetto superfluo il quale altresì causa un inutile dispendio energetico. Detto questo, l'implementazione degli effetti secondari è volta a far sì che la riduzione di massa sia utilizzata solo ed esclusivamente per ridurre i consumi piuttosto che per migliorare le prestazioni. Il concetto di “prestazione” non può essere ricondotto ad un singolo fattore ma comprende una moltitudine di aspetti diversi. Di solito le riviste automobilistiche esprimono le prestazioni dei veicoli in termini di accelerazione 0 - 100 km/h. Piuttosto che l'accelerazione da fermo, la ripresa all'interno di un certo intervallo di velocità rappresenta una fattispecie abbastanza comune nella guida di tutti i giorni; in particolare la ripresa ad alta velocità, ad esempio per effettuare sorpassi in autostrada, costituisce un fattore di rischio che deve essere minimizzato. Alla luce di quanto detto, l'indice di prestazione adottato per la presente trattazione è l'elasticità da 80 a 120 km/h nel rapporto di trasmissione più alto. Oltre alle prestazioni si assume che le configurazioni alleggerite mantengano anche lo stesso livello tecnologico del motore rispetto alla configurazione di riferimento. I parametri scelti come rappresentativi del livello tecnologico sono riportati di seguito:

$$- \quad PME_{max} = \frac{10 * coppia_{max} * 4\pi}{cilindrata} \quad (Eq.4)$$

$$- \quad rapporto \text{ corsa-alesaggio} = \frac{corsa}{alesaggio} \quad (Eq.5)$$

$$- \quad VMP = \frac{corsa * rpm}{30} \quad (Eq.6)$$

Dove:

PME_{max} = massima Pressione Media Effettiva [bar];

$coppia_{max}$ = coppia massima del motore [Nm];

$cilindrata$ = cilindrata del motore [cm³];

$corsa$ = corsa del pistone [mm];

$alesaggio$ = alesaggio del cilindro [mm];

rpm = numero di giri del motore [1/min];

VMP = Velocità Media del Pistone [m/s].

Dalle equazioni riportate sopra si evince che nel passaggio dalla configurazione di riferimento a quelle alleggerite con implementazione di Effetti Secondari (configurazioni-ES), i seguenti parametri di modello variano: *curva di coppia*, *cilindrata*, *corsa del pistone*, *alesaggio del cilindro*, *mappa del consumo specifico* e *consumo al minimo*. Di seguito viene descritta per punti la procedura adottata per determinare i parametri di modello delle configurazioni-ES.

1. Equivalenza delle prestazioni. Al fine di mantenere inalterata l'elasticità 80-120 km/h nel rapporto più alto, il diagramma di coppia delle configurazioni-SE è ottenuto a partire dal diagramma della configurazione di riferimento tramite un'operazione di downscaling per un fattore fisso.

2. Equivalenza del livello tecnologico: parità della massima pressione media effettiva. Il primo requisito per l'equivalenza del livello tecnologico impone parità di PME_{max} (Eq. 4); tale requisito è rispettato ottenendo la cilindrata delle configurazioni-ES a partire da quella della configurazione di riferimento tramite un'operazione di scaling analoga a quella applicata al diagramma di coppia.

3. Equivalenza del livello tecnologico: parità del rapporto corsa-alesaggio. Il secondo requisito per l'equivalenza del livello tecnologico impone parità del *rapporto corsa-alesaggio* (Eq. 5). Supponendo costante il numero di cilindri (n°_{cil}), il seguente sistema di equazioni permette di determinare la corsa del pistone e l'alesaggio del cilindro delle configurazioni-ES.

$$\frac{corsa_{CF}}{alesaggio_{CF}} = \frac{corsa_{ES}}{alesaggio_{ES}} \quad (Eq.7)$$

$$cilindrata_{ES} = \frac{alesaggio_{ES}^2 * corsa_{ES} * n^{\circ}_{cil}}{4000} \quad (Eq.8)$$

Dove:

$corsa_{CR}$ = corsa del pistone della configurazione di riferimento [mm];

$alesaggio_{CR}$ = alesaggio del cilindro della configurazione di riferimento [mm];

$corsa_{ES}$ = corsa del pistone della configurazione-ES [mm];

$alesaggio_{ES}$ = alesaggio del cilindro della configurazione-ES [mm];

$cilindrata_{ES}$ = cilindrata della configurazione-ES [cm³].

4. Equivalenza del livello tecnologico: parità di velocità media del pistone. Il terzo requisito per l'equivalenza del livello tecnologico impone parità di VMP : dato che $corsa_{ES}$ è ottenuto tramite downsizing di $corsa_{CR}$ (Eq.7 ed Eq. 8), la velocità del motore delle configurazioni-ES (rpm_{ES}) è ottenuta tramite una speculare operazione di upsizing (Eq.6). La scalatura della velocità del motore comporta una scalatura dell'asse x (rpm) della curva di coppia: di conseguenza la potenza del motore cresce rispetto a quella ottenuta al punto 1 ed il requisito di equivalenza delle prestazioni non è più rispettato. Il problema viene risolto attraverso un processo iterativo il quale porta ad identificare il fattore di scalatura della coppia che garantisca l'equivalenza sia delle prestazioni che del livello tecnologico.

5. Effetti concatenati. L'implementazione degli effetti secondari di cui sopra fa sì che nel passaggio dalla configurazione di riferimento a quelle ES anche altri parametri del modello subiscano modifiche definite "effetti concatenati". Il primo effetto concatenato riguarda la *mappa del consumo specifico*: considerando che la velocità del motore viene scalata in modo da avere parità di VMP , la mappa del consumo delle configurazioni-ES si ottiene a partire da quella della configurazione di riferimento applicando la medesima operazione di scalatura all'asse delle ascisse. Il secondo effetto concatenato riguarda il consumo al minimo; per le configurazioni-ES esso viene determinato assumendo una dipendenza lineare rispetto alla cilindrata; tale relazione è stata ottenuta sulla base di rilievi sperimentali.

3.3. Modellazione ambientale

Il terzo step della costruzione del tool è costituito dalla modellazione ambientale. Essa consiste nella concezione di un nuovo "plan" GaBi6 [41] specifico per l'analisi della fase d'uso nel contesto dell'LCA comparativa. L'obiettivo del plan è tradurre la riduzione di massa in riduzione di impatto ambientale.

Da un punto di vista ambientale, la fase d'uso è composta da due sotto-fasi: Well To Tank, WTT (relativa ai processi di produzione del carburante) e Tank To Wheel, TTW (relativa alla fase di utilizzo del veicolo). Il plan che è stato concepito è composto da 2 processi, uno per ciascuna delle sotto-fasi

citare sopra: processo WTT e processo TTW. Di seguito si riporta una descrizione dei flussi di ingresso ed uscita che caratterizzano i due processi.

Processo TTW. Il flusso in ingresso è la quantità di Carburante risparmiata durante l'intero Ciclo di Vita del veicolo (C_{rispCV}) grazie all'alleggerimento. La quantità di carburante viene caratterizzata dalla seguente equazione:

$$C_{risp CV} = \frac{FRV * \Delta m * km_{CV}}{10000} \quad (\text{Eq. 9})$$

Dove:

km_{CV} = chilometraggio totale della fase d'uso [km].

I flussi in uscita sono i quantitativi di emissioni in atmosfera evitati durante l'intero ciclo di vita del veicolo grazie alla riduzione di massa. I flussi di uscita sono dati dalle seguenti equazioni:

$$emiss i_{evit CV} = emiss i_{veh} * km_{CV} * \frac{C_{risp CV}}{C_{veh CV}} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$C_{veh CV} = \frac{C_{veh 100km} * km_{CV}}{100} \quad (\text{Eq. 11})$$

Dove:

$emiss i_{evit CV}$ = quantitativo di emissione in atmosfera i evitato durante l'intero ciclo di vita grazie alla riduzione di massa [g];

$emiss i_{veh}$ = quantitativo di emissione in atmosfera i al chilometro del veicolo [g/km];

$C_{veh CV}$ = quantitativo di carburante consumato dal veicolo di riferimento nell'intero ciclo di vita [l];

$C_{veh 100km}$ = consumo di carburante del veicolo di riferimento per percorrere 100 km [l/100 km].

I parametri FRV , Δm , km_{CV} , $C_{veh 100km}$ ed $emiss i_{veh}$ vengono impostati in base alla specifica applicazione:

- FRV è l'output del secondo step della costruzione del tool;
- Δm , km_{CV} e $C_{veh 100km}$ dipendono dallo specifico veicolo in analisi;
- $emiss i_{veh}$ è tratto direttamente dal database dei processi del software GaBi6 (sezione "Transport-Road-Passenger car") in base alla cilindrata ed allo standard di emissione del veicolo in analisi (ad es. Euro 5).

Si noti che i quantitativi di emissioni in atmosfera evitate sono direttamente proporzionali al quantitativo di carburante risparmiato (Eq. 10). Poiché il quantitativo di carburante risparmiato è direttamente proporzionale alla riduzione di massa (Eq. 9), anche le emissioni evitate risultano direttamente proporzionali alla riduzione di massa. La Tabella 4 riassume gli input/output del processo TTW ed i flussi GaBi6 associati ad essi.

Tabella 4. Input ed output del processo TTW e relativi flussi GaBi6

TTW process	
Input (quantity of fuel)	GaBi6 input flow
Fuel consumption during LC attributable to the component	Gasoline (Diesel) [kg]
Output (emissions)	GaBi6 output flows
Biogenic carbon dioxide emission during LC saved	CO _{2 BIO} [g]
Fossil carbon dioxide emission during LC saved	CO _{2 FOSSIL} [g]
Sulphur dioxide emission during LC saved	SO ₂ [g]

Processo WTT. Il processo WTT è tratto direttamente dal database dei processi di GaBi (sezione “Energy conversion-Fuel production-Refinery products”) senza alcuna modifica.

4. Risultati

La Tabella 5 mostra gli FRV calcolati per ciascun caso studio rispetto ai quattro cicli di guida (FRV_{FTP72} , FRV_{JC08} , FRV_{NEDC} e FRV_{WLTC}) ed il valor medio su tutti i cicli ($FRV_{media\ cicli}$).

Tabella 5. Risultati della fase di modellazione in termini di FRV

Caso studio	Riduzione di massa					Implementazione effetti secondari				
	FRV_{FTP72}	FRV_{JC08}	FRV_{NEDC}	FRV_{WLTC}	$FRV_{media\ cicli}$	FRV_{FTP72}	FRV_{JC08}	FRV_{NEDC}	FRV_{WLTC}	$FRV_{media\ cicli}$
1	0.185	0.174	0.171	0.170	0.175	0.341	0.335	0.327	0.314	0.329
2	0.189	0.172	0.166	0.181	0.177	0.353	0.339	0.332	0.325	0.337
3	0.177	0.177	0.162	0.167	0.171	0.315	0.303	0.293	0.273	0.296
4	0.182	0.169	0.164	0.169	0.171	0.389	0.363	0.365	0.329	0.362
5	0.175	0.163	0.161	0.168	0.167	0.384	0.359	0.354	0.332	0.357
6	0.187	0.172	0.168	0.174	0.175	0.342	0.328	0.324	0.310	0.326
7	0.183	0.168	0.161	0.170	0.171	0.373	0.368	0.358	0.342	0.36
8	0.178	0.180	0.163	0.163	0.171	0.304	0.292	0.286	0.269	0.288
9	0.179	0.181	0.169	0.163	0.173	0.298	0.287	0.282	0.265	0.283
10	0.181	0.168	0.171	0.171	0.173	0.384	0.365	0.363	0.323	0.359
11	0.178	0.175	0.170	0.176	0.175	0.379	0.369	0.361	0.325	0.359

5. Discussione

5.1. Modellazione analitica

5.1.1. Fuel Reduction Value

La Tabella 6 caratterizza i valori di FRV ottenuti per gli 11 casi studio in termini di valore minimo e massimo, ampiezza del range max-min, media aritmetica e deviazione standard.

Tabella 6. Valore minimo e massimo, ampiezza del range (max-min), media aritmetica e deviazione standard di FRV_{FTP72} , FRV_{JC08} , FRV_{NEDC} , FRV_{WLTC} e $FRV_{media\ cicli}$ sugli 11 casi studio

		Fuel Reduction Value [l/100km*100kg]				
		Minimo	Massimo	Range (min-max)	Media aritmetica	Deviazione standard
Riduzione di massa	FRV_{FTP72}	0.175	0.189	0.014	0.181	0.004
	FRV_{JC08}	0.163	0.181	0.018	0.173	0.005
	FRV_{NEDC}	0.161	0.171	0.010	0.166	0.004
	FRV_{WLTC}	0.163	0.181	0.018	0.170	0.005
	$FRV_{media\ cicli}$	0.167	0.177	0.010	0.173	0.003
Riduzione di massa ed effetti secondari	FRV_{FTP72}	0.298	0.389	0.091	0.351	0.034
	FRV_{JC08}	0.287	0.369	0.082	0.337	0.031
	FRV_{NEDC}	0.282	0.365	0.083	0.331	0.032
	FRV_{WLTC}	0.265	0.342	0.077	0.310	0.028

	$FRV_{media\ cicli}$	0.283	0.362	0.079	0.332	0.031
--	----------------------	-------	-------	-------	-------	-------

La prima analisi critica dell' FRV è condotta sul valor medio. La Figura 1 riporta l' FRV medio per i quattro cicli di guida. Nel caso di sola riduzione di massa l' FRV è compreso tra un massimo di 0.181 [l/100km*100kg] per il ciclo FTP72 ed un minimo di 0.166 [l/100km*100kg] per il ciclo NEDC: la massima variabilità in base al ciclo si attesta su 0.015 [l/100km*100kg] e la deviazione standard non supera 0,005 [l/100km*100kg]. Passando al caso di implementazione di effetti secondari, gli FRV crescono nettamente; il valore più alto è fatto registrare ancora una volta dal ciclo FTP72 (0.351 [l/100km*100kg]) mentre il minimo afferisce al ciclo WLTC (0.310 [l/100km*100kg]); la massima variabilità in base al ciclo di guida è di 0.041 [l/100km*100kg] e la deviazione standard si attesta all'incirca su di un valore di 0,03 [l/100km*100kg] per tutti i cicli.

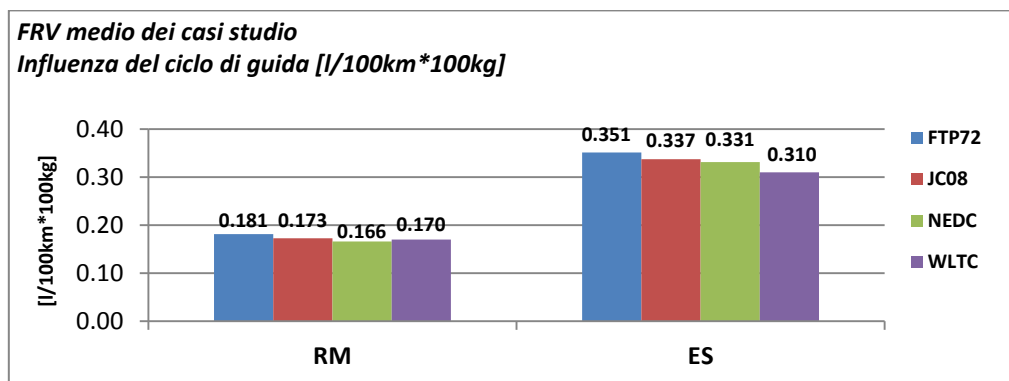


Figura 1. FRV medio per ciclo di guida

La Figura 2 evidenzia la differenza dell' FRV medio tra il caso di sola riduzione di massa e quello di implementazione di effetti secondari. La Figura 3 quantifica l'efficacia degli effetti secondari esprimendo in termini percentuali la variazione dell' FRV medio passando dal caso RM a quello ES. La massima variazione di FRV in termini assoluti è fatta registrare dal ciclo FTP72 (0.170 [l/100km*100kg]) mentre la minima dal ciclo WLTC (0.140 [l/100km*100kg]); in termini percentuali la variazione è compresa tra l'80% ed il 100%, con un massimo di 100% per il ciclo NEDC ed un minimo di 82% per il ciclo WLTC.

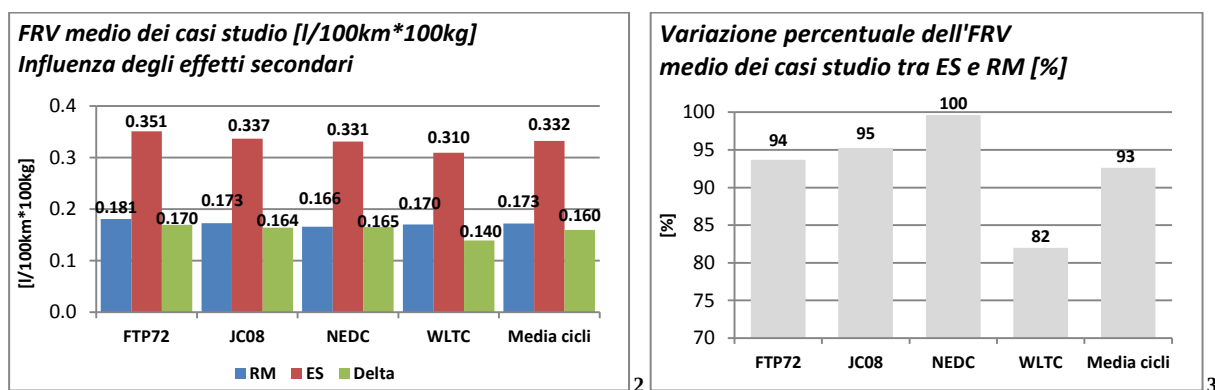


Figura 2. FRV_{RM} e FRV_{ES} medio dei casi studio e delta $FRV_{ES} - FRV_{RM}$ per ciclo di guida

Figura 3. Variazione percentuale tra il valor medio di FRV_{ES} e quello di FRV_{RM}

L'analisi del valor medio dell' FRV evidenzia che:

- l'elemento di maggior rilievo è rappresentato dalla notevole crescita dell' FRV nel passaggio dal caso di sola riduzione di massa a quello di implementazione di effetti secondari;
- nel caso di sola riduzione di massa la variabilità tra un ciclo e l'altro è modesta mentre nel caso di implementazione di effetti secondari la forbice si allarga in misura ragguardevole;

- nel caso di sola riduzione di massa il massimo FRV fatto registrare dal ciclo FTP72 è spiegabile da un lato con la notevole accelerazione media positiva (circa $0.43 \text{ [m/s}^2\text{]}$), dall'altro con la rilevante quota percentuale dei periodi di accelerazione (circa 37%) se paragonato agli altri cicli. Il valore più basso attribuito al ciclo NEDC è invece interpretabile con la più bassa quota percentuale dei periodi di accelerazione (23.5%) nonostante la maggior accelerazione media positiva ($0.528 \text{ [m/s}^2\text{]}$);
- il ciclo NEDC fa registrare la maggior efficacia degli effetti secondari mentre la minore spetta al ciclo WLTC.

La seconda analisi critica consiste nel parallelo dell' FRV medio ottenuto per i cicli FTP72, JC08 e WLTC con quello ottenuto per il NEDC, ciclo omologativo di riferimento in Europa. La figura 4 effettua il suddetto confronto sulla base delle variazioni percentuali dell' FRV medio sia nel caso RM che ES. Nel caso di sola riduzione di massa si registra un aumento dell' FRV medio per tutti i cicli di guida: la crescita maggiore si ha per il ciclo FTP72 (+9.2%) mentre valori più bassi afferiscono ai cicli JC08 e WLTC (rispettivamente +4.0% e +2.5%). Nel caso di riduzione di massa con implementazione di effetti secondari

- i cicli FTP72 e JC08 fanno registrare ancora una crescita, sebbene molto più moderata (rispettivamente +6.0% e +1.7%);
- il ciclo WLTC evidenzia una riduzione (-6.5%).

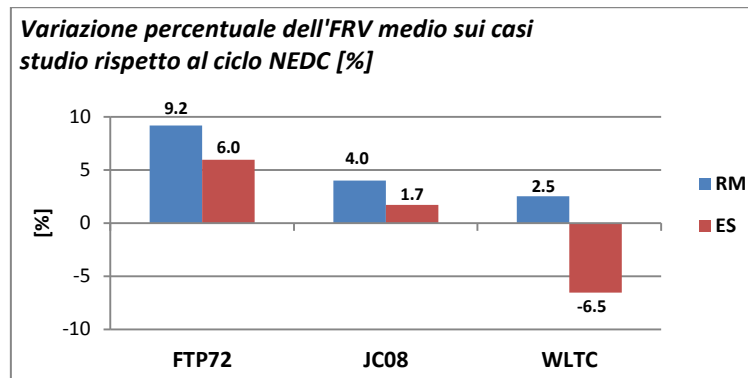


Figura 4. Variazione percentuale dell' FRV medio rispetto al ciclo NEDC

La terza analisi critica consiste nella ricerca di una correlazione tra l'andamento dell' FRV e le principali caratteristiche tecniche del veicolo. I parametri presi in esame sono i seguenti: potenza massima, massa e rapporto potenza-massa. La ricerca della correlazione viene effettuata tramite l'analisi delle curve di regressione di $FRV_{media\ cicli}$ in funzione dei parametri citati sopra. Le Figure 5, 6 e 7 riportano $FRV_{media\ cicli}$ di tutti i casi studio in funzione rispettivamente di *potenza massima*, *massa* e *rapporto potenza-massa* includendo le rette di regressione ed i relativi coefficienti di determinazione R^2 . La Tabella 7 mostra i valori di R^2 ottenuti per ciascun parametro.

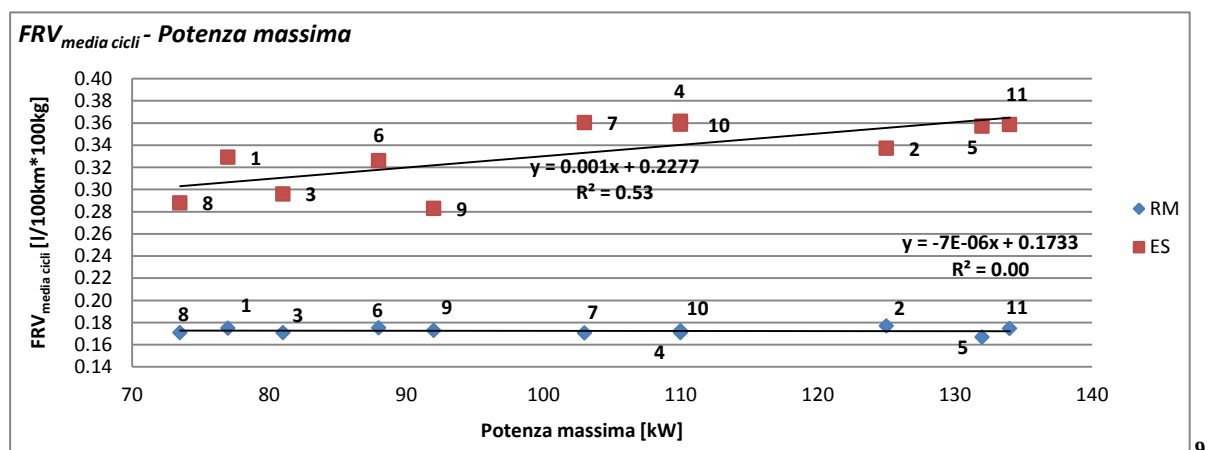
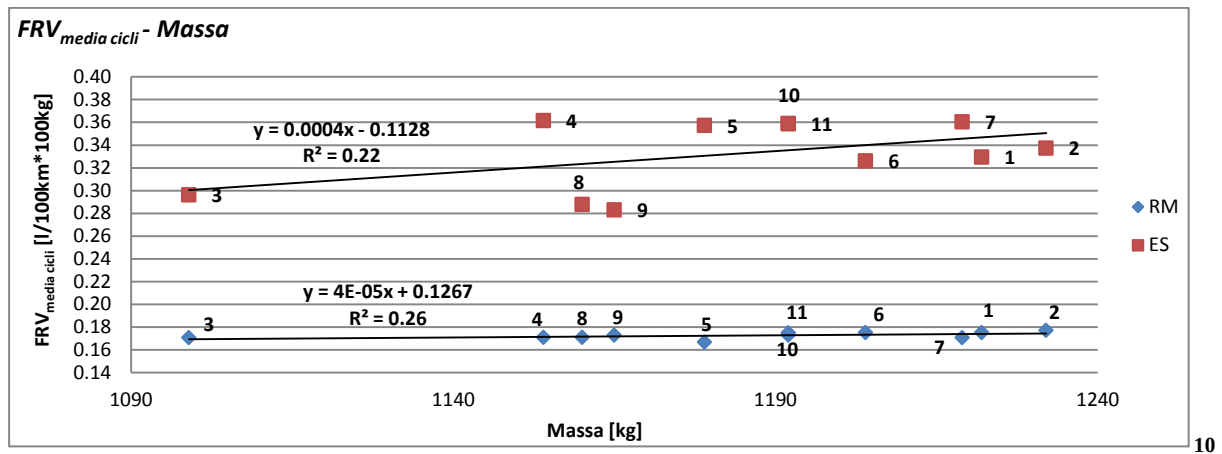
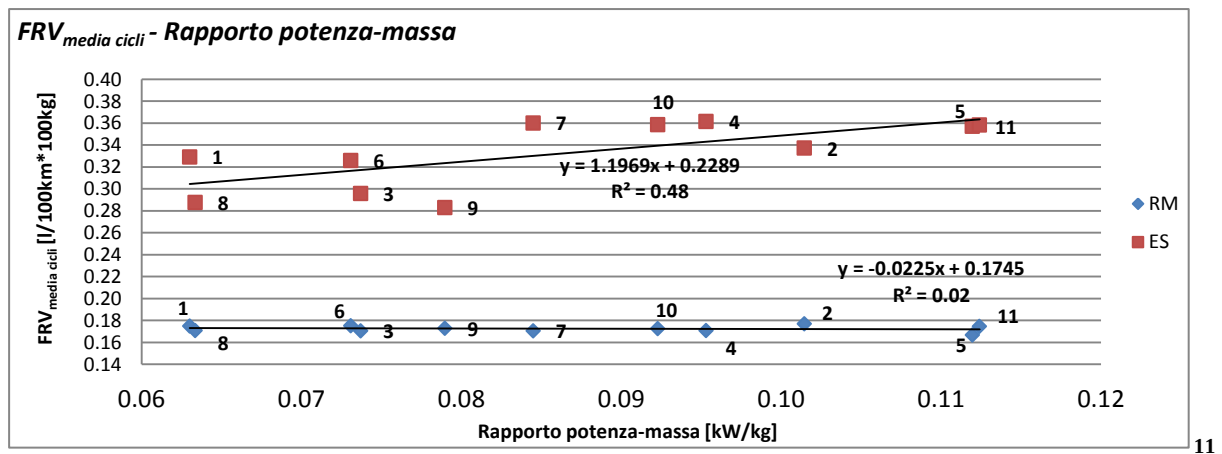


Figura 5. $FRV_{media\ cicli}$ in funzione della *potenza massima* per gli 11 casi studioFigura 6. $FRV_{media\ cicli}$ in funzione della *massa* per gli 11 casi studioFigura 7. $FRV_{media\ cicli}$ in funzione del *rapporto potenza-massa* per gli 11 casi studioTabella 7. Coefficiente di determinazione R^2 delle rette di regressione di $FRV_{media\ cicli}$ in funzione di *potenza massima*, *massa* e *rapporto potenza-massa*

	Coefficiente of determinazione R^2	
	Riduzione massa	Effetti secondari
<i>Potenza massima</i>	0.00	0.53
<i>Massa</i>	0.26	0.22
<i>Rapporto Potenza-massa</i>	0.02	0.48

Si conclude che nel caso di sola riduzione di massa si ha una sostanziale assenza di correlazione tra $FRV_{media\ cicli}$ ed i parametri presi in esame (i valori di R^2 non superano in nessun caso 0.26). Passando all'implementazione di effetti secondari, il valore maggiore del coefficiente di determinazione si registra per il parametro *potenza massima* (0.53).

5.1.2. Input per modellazione ambientale

Di seguito si riportano gli input per la modellazione ambientale a partire dall'analisi critica degli FRV ottenuti tramite le simulazioni. Le considerazioni vengono riportate separatamente tra i due casi RM ed ES.

Studio LCA comparativo tra una soluzione tradizionale ed una alleggerita in cui l'unica modifica al veicolo è la riduzione di massa:

- il valore numerico dell' FRV suggerito per l'implementazione all'interno del processo TTW è la media su tutti i casi studio di $FRV_{media\ cicli}$ ottenuta nel caso di sola riduzione di massa (0.173 [l/100km*100kg], Tabella 6). Il valor minimo e massimo (0.167 e 0.177 [l/100km*100kg], Tabella 6) possono essere usati per effettuare analisi di sensibilità sulla variazione dell' FRV all'interno del segmento;
- non è stata individuata alcuna correlazione tra l' FRV e le principali caratteristiche tecniche del veicolo; di conseguenza l'unico riferimento disponibile è il valor medio riportato al punto precedente.

Studio LCA comparativo tra una soluzione tradizionale ed una alleggerita in cui è prevista l'implementazione di effetti secondari a seguito della riduzione di massa:

- una prima proposta di valore numerico di FRV da implementare all'interno del processo TTW è la media su tutti i casi studio di $FRV_{media\ cicli}$ ottenuta nel caso di effetti secondari (0.332 [l/100km*100kg], Tabella 6). Il valor minimo e massimo (0.283 e 0.362 [l/100km*100kg], Tabella 6) possono essere usati per effettuare analisi di sensibilità sulla variazione dell' FRV all'interno del segmento;
- un'alternativa al semplice utilizzo del valor medio è rappresentata dalla determinazione dell' FRV tenendo in considerazione la sua variabilità rispetto ad un parametro del veicolo. Considerando che la massima correlazione è stata registrata per il parametro *potenza massima* (vedi paragrafo 5.1.1), l'equazione proposta per l'individuazione del valore numerico di FRV è la seguente:

$$FRV_{ES} = 0.001 * Potenza\ max + 0.2277 \quad (Eq. 13)$$

Dove:

FRV_{ES} = FRV con implementazione di Effetti Secondari [l/100km*100kg];

$Potenza\ max$ = potenza massima della generica applicazione [kW].

5.2. Modellazione ambientale

Il plan GaBi6 specifico per la fase d'uso fornisce gli impatti ambientali risparmiati a partire dalla riduzione di massa del veicolo ed è composto dai due processi WTT e TTW. L'ipotesi di considerare solo le emissioni di CO₂ ed SO₂ per la quantificazione del risparmio dell'impatto della sotto-fase TTW è dettata dai seguenti fattori:

- il quantitativo di carburante risparmiato in fase d'uso varia linearmente con la riduzione di massa del veicolo in base al coefficiente FRV ;
- la variazione del consumo del veicolo influisce solo sulle emissioni di CO₂ ed SO₂ mentre non ha alcun effetto sulle cosiddette "limited emissions" (HC, NO_x, etc).

Di conseguenza le emissioni di CO₂ ed SO₂ variano linearmente con il quantitativo di carburante in base al contenuto di C nel carburante stesso.

6. Conclusioni

Il tool messo a punto nel presente studio stima le potenzialità di riduzione dell'impatto ambientale offerte dal lightweighting in specifiche applicazioni automobilistiche (veicoli turbo-benzina appartenenti al segmento C). I benefici offerti dalla riduzione di massa vengono quantificati in termini di impatti ambientali risparmiati tramite opportuni strumenti di modellazione e simulazione che si riferiscono all'approccio *Life Cycle Assessment* (LCA) e che si basano sul coefficiente *Fuel Reduction Value* (FRV) calcolato mediante modellazione analitica.

L'FRV è calcolato per 11 casi studio (differenti per potenza, massa e cilindrata) considerando 4 diversi cicli di guida standardizzati. Il calcolo dell'FRV è realizzato sia per il caso di sola riduzione di massa che per quello di riduzione di massa con implementazione di effetti secondari. Relativamente alla modellazione ambientale la quantificazione dell'impatto risparmiato in fase d'uso tiene conto sia della fase di produzione del carburante (Well To Tank, WTT) che di quella operativa relativa all'utilizzo del veicolo (Tank To Wheel, TTW).

BIBLIOGRAFIA

- [1] H.M. Aichinger. Kraftstoffminderverbrauch durch Gewichtseinsparung an Personenfahrzeugen - Bedeutung des Stahles als Leichtbauwerkstoff“, Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDE), Düsseldorf (1995).
- [2] C. Alves, P.M.C. Ferrao, A.J. Silva, L.G. Reis, M. Freitas, L.B. Rodrigues. Ecodesign of automotive components making use of jute fiber composites. J. Cleaner Production 2010; 18:313-27 (2010).
- [3] F. An, D. Santini. Mass impacts on fuel economies of conventional versus hybrid electric vehicles, in SAE 2004 World Congress and Exhibition. SAE International, SAE Paper No. 2004-01-0572: Detroit, Michigan, USA (2004).
- [4] A. Casadei, R. Broda. Impact of Vehicle Weight Reduction on Fuel Economy for Various Vehicle Architectures. Ricardo Inc. Report prepared for the Aluminum Association, Inc (2008).
- [5] L. Cheah, C. Evans. Factor of Two: Halving the Fuel Consumption of New U.S. Automobiles by 2035. Massachusetts Institute of Technology (2007).
- [6] A. Delorme, R. Vijayagopal, D. Karbowski, A. Rousseau. Impact of Advanced Technologies on Medium-Duty Trucks Fuel Efficiency. Argonne National Laboratory (2010).
- [7] J.D. Du, W.J. Han, Y.H. Peng, C.C. Gu. Potential for reducing GHG emissions and energy consumption from implementing the aluminum intensive vehicle fleet in China. Energy 35: 4671-4678 (2010).
- [8] J.R. Duflou, J. De Moor, I. Verpoest, W. Dewulf. Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. CIRP Ann – Manuf Technol 58:9-12 (2009).
- [9] R. Eberle, H.A. Franze. Modelling the Use Phase of Passenger Cars in LCI. Total life cycle conference and exposition. Society of Automotive Engineers (SAE), Graz (1998).
- [10] R. Eberle, H.A. Franze. Modelling the Use Phase of Passenger Cars in LCI. Total life cycle conference and exposition. Society of Automotive Engineers (SAE), Graz (1998).
- [11] R. Eberle. Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau. PhD thesis. Technische Universität Berlin (2000)
- [12] M. Finkbeiner, R. Hoffmann. Application of Life Cycle Assessment for the Environmental Certificate of the Mercedes-Benz S-Class (7 pp). Int J Life Cycle Assessment 11, 240–246. doi:10.1065/lca2006.05.248 (2006).
- [13] H.A. Franze, N. Metz, U. Neumann. Environmental Impact Calculations of Automotive Parts by Life Cycle Analysis - The BMW Approach“, SAE Paper 951843, SAE Total Life Cycle Conference, Vienna, (1995).
- [14] H.A. Franze, U. Neumann, R. Marstrander, T.J. Brobak. Life-Cycle Optimization of Car Components“, SAE Paper 950207, International Congress and Exposition, Detroit, February 27 - March 2 (1995).
- [15] H.A. Franze, U. Neumann. Design for Environmental Compatibility of Automobiles - New life-cycle management tools in the BMW product development process -“, Proceedings of the 1997 Total Life Cycle Conference - Design for the Environment, Recycling and Environmental Impact (Part 2), SAE Paper 971192, Warrendale/USA (1997).
- [16] V. Hasenberg. Recycling Lightweight Automobiles. PE International (2011).
- [17] H. Helms, U. Lambrecht, U. Höpfner. Energy savings by light-weighting - Final report. IFEU Institute for Energy and Environmental Research (2003).

- [18] H. Helms, U. Lambrecht. The Potential Contribution of Light-Weighting to Reduce Transport Energy Consumption. *Int. J. Life Cycle Assess.* DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/lca2006.07.258> (2006).
- [19] C. Koffler. *Automobile Produkt-Ökobilanzierung Wolfsburg/Darmstadt: Volkswagen AG, Technische Universität Darmstadt. Dissertation (2007).*
- [20] C. Koffler, S. Krinke, L. Schebek, J. Buchgeister. Volkswagen slimLCI – a procedure for streamlined inventory modelling within Life Cycle Assessment (LCA) of vehicles. *International Journal of Vehicle Design (Special Issue on Sustainable Mobility, Vehicle Design and Development)*. Inderscience Publishers (2007).
- [21] C. Koffler K. Rodhe-Branderburger. On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments. *Int J Life Cycle Assess* 15:128-135. doi:10.1007/s11367-009-0127-z (2010).
- [22] C. Koffler. Life cycle assessment of automotive lightweighting through polymers under US boundary conditions. *Int J Life Cycle Assess* 19, 538–545. doi:10.1007/s11367-013-0652-7 (2013).
- [23] S. Luz, A.C. Pires, P.M. Ferro. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibres as reinforcement in polypropylene composites: eco-design and LCA strategy for automotive components. *Resour Conserv Recyc*; 54:1135-44 (2010).
- [24] A. Mayyas, D. Qattawi, M. Omar, D. Shan. Design for sustainability in automotive industry: A comprehensive overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*: 16, 1845-1862 (2012).
- [25] National Research Council (U.S.), Effectiveness and impact of corporate average fuel economy (CAFE) standards. Washington, D.C.: National Academy Press. xiii, 166 p (2002).
- [26] F. Nemry, G. Leduc, I. Mongelli, A. Uihlein. Environmental Improvement of Passenger Cars, IMPRO-car. Joint Research Center (2008).
- [27] S. Pagerit, P. Sharer, A. Rousseau. Fuel Economy Sensitivity to Vehicle Mass for Advanced Vehicle Powertrains, in SAE 2006 World Congress. SAE International, SAE Paper No. 2006-01-0665: Detroit, Michigan (2006).
- [28] T.S. Pegoretti, F. Mathieux, D. Evrard, D. Brissaud. Use of recycled natural fibres in industrial products: A comparative LCA case study on acoustic components in the Brazilian automotive sector. *Resources, Conservation and Recycling* 84, 1-14 (2014).
- [29] C. Ribeiro, JV. Ferreira, P. Partidário. Life Cycle Assessment of a multi-material car component. *Int J Life Cycle Assessment* 5:336-345 (2007).
- [30] M. Rechs, B. Pingen, O. Kunde. Fahrzeug- und Motorenkonzepte für das 3-Liter-Auto“, 5. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik, Eurogress Aachen, Oktober (1995).
- [31] M. Redelbach, M. Klotzke, H.E. Friedrich. Impact of lightweight design on energy consumption and cost effectiveness of alternative powertrain concepts. 2012 European Vehicle Congress (EEVC), Brussel. (2012).
- [32] L. Ridge. EUCAR – automotive LCA guidelines – phase 2, Total life cycle conference and exposition. Society of Automotive Engineers (SAE), Graz (1998).
- [33] K. Rodhe-Branderburger. Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffverbrauchspotentialen, Einfluss von Gesamtfahrzeugparametern auf Fahrzeugverhalten/Fahrleistung und Kraftstoffverbrauch. Haus der Technik, Essen (1996).
- [34] K. Rodhe-Branderburger, J. Obernolte. Wieviel Kraftstoff kosten 100 kg Mehrgewicht – Theoretische und experimentelle Untersuchungen. Interne Studie, Volkswagen AG, Wolfsburg (2002).
- [35] K. Rodhe-Branderburger, J. Obernolte. CO₂-Potential durch Leichtbau in Pkw, DVM-Tag 2008 – Leichtbaustrategien. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., Berlin (2008).
- [36] S. Schäper, W. Leitermann. Energie-, Emissions- und Wirkbilanzen von Pkw in aluminiumintensiver und in konventioneller Bauweise sowie Optimierung eines Space-Frame-Karosserie-Konzeptes durch Variation der wesentlichen Fertigungsparameter mittels ganzheitlicher Bilanzierung“, *Ganzheitliche Betrachtungen im Automobilbau, VDI-Bericht 1307, VDI-Verlag, Düsseldorf (1996).*
- [37] S. Schäper. Aluminium-Technologie im Karosseriebau - Audi Space Frame ASF“, *Entwicklungsmethodik Umwelt, Passive Sicherheit, Audi AG, Ingolstadt (1997).*

- [38] S. Schäper. Recycling of Aluminium Intensive Cars: The Audi A8“, International Conference on Car Recycling and Recovery, Oct. (1997).
- [39] W-P. Schmidt, E. Dahlqvist, M. Finkbeiner, S. Krinke, S. Lazzari, D. Oschmann, S. Pichon, C. Thiel. Life cycle assessment of lightweight and end-of-life scenarios for generic compact class vehicles. *Int J Life Cycle Assess* 9:405-416 (2004).
- [40] M Spielmann, H J Althaus. Can a prolonged use of a passenger car reduce environmental burdens? : Life Cycle analysis of Swiss passenger cars. *J. Cleaner Production* 15: 11-12. 1122-1134 (2007).
- [41] Thinkstep, GaBi software. Website: <http://www.gabisoftware.com>.
- [42] S.Vinodh, K.Jayakrishna. Environmental impact minimisation in an automotive component using alternative materials and manufacturing processes. *Materials and Design* December 2011, Vol. 32, No. 10, pp.5-82-5090 (2011).
- [43] R.A. Witik, J. Payet, V. Michaud, C. Ludwig, J.A.E. Manson. Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications. *Composites: Part A* 42, 1694-1709 (2011).
- [44] R. Wohlecker, M. Johannaber, and M. Espig, Determination of Weight Elasticity of Fuel Economy for ICE, Hybrid and Fuel Cell Vehicles, in 2007 SAE World Congress. SAE International, SAE Paper No. 2007-01-0343: Detroit, Michigan (2007).
- [45] R. Zah, R. Hischier, A.L. Leao, I. Braun. Curauà fibers in the automobile industry – A sustainability assessment. *J Cleaner Production*; 15:1032-40 (2006).