



**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

**Analisi di alcuni aspetti dell'Ingegneria dell'Autoveicolo per  
una Mobilità Sostenibile:  
Ambiente, Incidentalità e Materiali.**

**Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica  
Scuola di Dottorato in Scienze e Tecnologie per l'Innovazione  
Industriale  
Corso di Dottorato di Ricerca in Energia e Ambiente**

**Candidato  
Filippo Carollo  
Matricola n. 1653652**

Tutor  
Vincenzo Naso

Co-tutor  
Gabriele Virzì Mariotti

A/A 2016/2017

## **INDICE**

INTRODUZIONE.....	1
1. INQUINAMENTO ATMOSFERICO .....	2
1.1 NORMATIVE SULL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO.....	4
1.1.1 DIRETTIVE COMUNITARIE EUROPEE.....	5
1.1.2 LA REGOLAMENTAZIONE ITALIANA DELLA QUALITÀ DELL'ARIA .....	7
1.2 MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA.....	8
1.3 FENOMENOLOGIA DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO .....	10
1.3.1 GENERAZIONE ED ACCUMULO DEGLI INQUINANTI.....	11
1.3.2 SMOG FOTOCHIMICO .....	12
1.3.3 RIMOZIONE E DISPERSIONE DELLE SOSTANZE INQUINANTI IN ATMOSFERA .....	12
1.3.4 LE DINAMICHE ATMOSFERICHE .....	13
2. IL PROCESSO DI EMISSIONE DEI VEICOLI.....	15
2.1 FATTORI CHE INFLUENZANO L'EMISSIONE .....	18
2.1.1 APPROCCIO MODELLISTICO ALL'INQUINAMENTO DA TRAFFICO .....	19
2.1.2 DEFLUSSO VEICOLARE.....	21
2.1.3 MODELLO DI EMISSIONE.....	23
2.1.4 COPERT .....	24
2.1.5 DISPERSIONE DELLE SOSTANZE INQUINANTI IN ATMOSFERA - MODELLI DI DISPERSIONE.....	26
3. CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL VEICOLO.....	29
3.1 STATO DELLA MECCANICA DEI VEICOLI .....	35
3.1.1 DINAMICA DEL MOTORE E CONDIZIONI TERMICHE .....	35
3.2 NORMATIVE EUROPEE SULLE EMISSIONI DEI GAS DI SCARICO...	37
3.3 ANALISI "WELL TO WHEEL": DAL POZZO ALLE RUOTE.....	39
3.3.1 TANK-TO-WHEEL.....	41
3.3.2 WELL-TO-TANK.....	46

4. CONTRIBUTO DEI CONDUCENTI E CONTRIBUTO POLITICO .....	48
4.1 LE REGOLE DELL'ECODRIVING.....	48
4.1.1 IL CODICE EURO .....	49
4.1.2 I COMBUSTIBILI ALTERNATIVI .....	50
4.2 IL CONTRIBUTO DEI COSTRUTTORI.....	52
4.2.1 TRAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA .....	52
4.2.2 LA TRAZIONE IBRIDA ED ELETTRICA.....	54
4.2.3 IL SISTEMA HYBRID 4 DEL GRUPPO PSA.....	60
4.2.4 I SISTEMI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA.....	63
4.2.5 LA TRAZIONE ELETTRICA.....	67
4.2.6 MERCEDES CLASSE B ELECTRIC DRIVE.....	73
4.3 L'AUTO ELETTRICA INQUINA SEMPRE MENO DELL'AUTO CON MOTORE TERMICO?.....	75
5. MOBILITÀ SOSTENIBILE.....	76
5.1 LA MOBILITÀ URBANA SOSTENIBILE.....	76
5.2 MOBILITA' SOSTENIBILE, MOBILITY MANAGEMENT E MOBILITY MANAGER .....	79
5.2.1 COSA SIGNIFICA MOBILITÀ SOSTENIBILE .....	79
5.2.2 I TRASPORTI E LA MOBILITÀ SOSTENIBILE .....	80
5.2.3 GLI INDICATORI AMBIENTALI.....	83
5.2.4 COSA È IL MOBILITY MANAGEMENT .....	85
5.2.5 COME ATTUARE IL MOBILITY MANAGEMENT? .....	87
5.2.6 MOBILITY MANAGEMENT E CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	88
5.2.7 MOBILITY MANAGEMENT E BENESSERE FISICO.....	89
5.2.8 IL MOBILITY MANAGER .....	91
5.2.9 MOBILITY MANAGER D'AZIENDA E D'AREA .....	93
5.2.10 PIANI DI SPOSTAMENTO CASA-LAVORO .....	94
5.2.11 MOBILITY MANAGER E ENERGY MANAGER: SIMILITUDINI E DIFFERENZE.....	96
5.2.12 SMART CITY.....	97

5.3 INQUINAMENTO DA TRAFFICO URBANO: INTERVENTI ATTUATI E LORO VALUTAZIONE .....	98
5.3.1 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DELL'INQUINAMENTO.....	100
5.3.2 ESEMPI DI INTERVENTI PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI MEZZI DI TRASPORTO .....	102
5.3.3 INTERVENTI CHE PREVEDONO LA PROMOZIONE DEI SERVIZI DI TRASPORTO PUBBLICO.....	105
5.3.4 INTERVENTI CON PROMOZIONE DELLA MOBILITÀ ATTIVA CICLABILE E PEDONALE .....	106
5.3.5 MOBILITÀ IN ITALIA.....	107
5.3.6 CITTÀ METROPOLITANA DI PALERMO. TRAFFICO E INQUINAMENTO .....	109
5.3.7 MOBILITÀ E TRASPORTI.....	111
5.3.8 SISTEMA DI RILEVAMENTO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA .....	116
5.3.9 INTERVENTI PROPOSTI PER LIMITARE LE EMISSIONI DA TRAFFICO .....	118
5.3.10 MOBILITÀ SOSTENIBILE E PROGETTI DI CAMBIAMENTO.....	120
5.4 GLI ALTRI ASPETTI DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILE .....	121
6. SICUREZZA STRADALE: L'INCIDENTALITÀ .....	121
6.1 IMPATTO FRONTALE VEICOLO-BARRIERA.....	131
6.2 IMPATTO LATERALE .....	131
6.3 POLE TEST .....	132
6.4 IMPATTO VEICOLO/CICLISTA .....	133
6.4.1 SCALA DELLE LESIONI .....	137
6.4.2 CRITERI DI LESIONE .....	137
6.4.3 LA CURVA WSTC ED IL GSI.....	138
6.4.4 CRITERIO DEI 3 MS .....	142
7. USO DI MATERIALI INNOVATIVI PIÙ LEGGERI ALL'INTERNO DELL'AUTOVEICOLO.....	145
7.1 COMPOSITO.....	146

7.2 NANOCOMPOSITO .....	147
8. PARTE SPERIMENTALE .....	150
8.1 AMBIENTE .....	150
8.1.1 RAPPORTO IDROGENO CARBONIO AD OGGI .....	151
8.2 ORGANIZZAZIONE DI EVENTI E CAMPAGNE DI PROMOZIONE DELLA MOBILITA' SOSTENIBILE. ENERGY DAY ALLA SAPIENZA ....	158
8.2.1 LE FASI METODOLOGICHE .....	158
8.2.2 PRIMA MOSSA: LA RETE .....	159
8.2.3 L'ANALISI.....	160
8.2.4 REPORT DELL'EVENTO .....	161
8.3 INCIDENTALITÀ .....	162
8.3.1 REALIZZAZIONE DEI MODELLI VIRTUALI.....	162
8.3.2 PROVA D'IMPATTO PICK-UP CICLISTA.....	165
8.3.3 ANALISI DELLE PROVE .....	173
8.3.4 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI.....	182
8.3.5 VALUTAZIONE DELLE LESIONI AL TORACE MEDIANTE IL CRITERIO DEI 3MS .....	213
8.3.6 LOCALIZZAZIONE DEI PUNTI D'IMPATTO E CONFRONTO.....	222
8.3.7 CALCOLO DELLE DISTANZE DI PROIEZIONE .....	224
8.4 MATERIALI.....	227
8.4.1 MATERIALI UTILIZZATI.....	227
8.4.2 LAVORAZIONE .....	228
8.4.3 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI .....	231
8.4.4 CARATTERIZZAZIONE .....	234
8.4.5 RISULTATI E DISCUSSIONE.....	235
CONCLUSIONI.....	242
BIBLIOGRAFIA .....	244

## **INTRODUZIONE**

Sin dai tempi antichi l'uomo ha avuto la necessità di spostarsi per andare incontro ai suoi bisogni; da questo suo insito bisogno è nato il concetto di mobilità, che riguarda non solo lo spostamento di persone da un luogo ad un altro, ma anche lo spostamento di beni di consumo tramite gli odierni mezzi di trasporto.

La mobilità ha necessariamente bisogno di energia per funzionare. La portata di energia necessaria alla mobilità è ingente, data l'enorme entità di persone, merci ed informazioni che si spostano ogni giorno. Per una mobilità efficiente e veloce è anche necessaria un'energia di grande qualità e fornita con sistemi affidabili.

La qualità degli spostamenti e le regole della strada sono parametri fondamentali per garantire il benessere e la sicurezza dell'individuo. Inoltre, le misure sempre più restrittive sulla riduzione dell'inquinamento globale e sulla sicurezza alla guida, accompagnate dalla necessità di gestire l'enorme quantità di veicoli circolanti, hanno fatto sì che le case automobilistiche concentrino gran parte dei loro studi su soluzioni sempre più economiche, sicure e ad impatto ridotto. Infatti, negli ultimi dieci anni, il mercato dei veicoli ha subito un notevole sviluppo, fino ad arrivare all'incredibile numero di quasi un miliardo e duecento milioni di automobili che circolano oggi in tutto il mondo.

Questa crescita è dovuta soprattutto a Paesi in via di sviluppo come la Cina, in cui, fino a pochi anni fa, possedere un'auto era considerato un privilegio per pochi. Questi numeri, secondo una ricerca condotta da Navigant, un'azienda che si occupa di analisi e statistiche a livello globale, sono destinati ad aumentare fino a raggiungere i cinque miliardi nel 2050. Ciò comporterebbe conseguenze rilevanti sull'impatto ambientale nel nostro Pianeta e quindi anche sulla salute di tutti coloro che abitano le città più trafficate.

Oggi la mobilità, in particolar modo quella urbana, riveste per ognuno di noi un ruolo fondamentale ai fini della propria vita, sia lavorativa che sociale. Tuttavia essa può produrre degli effetti negativi sull'ambiente, ma anche sulle stesse persone. Tra i vari problemi che possono essere introdotti dalla mobilità

ritroviamo l'inquinamento atmosferico (gas serra o altri inquinanti), l'inquinamento acustico e, non ultima, l'incidentalità.

L'obiettivo di questa tesi è quello di analizzare alcune delle soluzioni effettive proposte dai grandi produttori di automobili per uno sviluppo di veicoli sempre più ecocompatibili, che possano migliorare la mobilità urbana ed extraurbana e garantire la sicurezza di chi conduce e degli utilizzatori deboli della strada, sia mediante dispositivi di prevenzione degli impatti, sia attraverso sistemi di sicurezza passiva.

Tra le soluzioni studiate in questo lavoro verrà proposta anche la possibilità di ottenere materiali leggeri (creati e testati in laboratorio) che incrementino il risparmio di carburante con la sostituzione di parti dell'autoveicolo con componenti più leggere, che contribuisca non solo al risparmio energetico, ma che si ripercuota anche sulle dimensioni del sistema frenante, del motore e dei serbatoi di carburante. Infine, sono effettuate delle considerazioni sulla valutazione delle lesioni negli impatti tra un veicolo ed alcuni utilizzatori deboli della strada.

## **1. INQUINAMENTO ATMOSFERICO**

L'inquinamento atmosferico rappresenta uno dei maggiori fattori di rischio ambientale per la salute umana. Nell'ultimo decennio, grazie all'inasprimento della normativa europea sull'inquinamento, le emissioni di molti inquinanti atmosferici sono diminuite in modo sostanziale, determinando una migliore qualità dell'aria ambiente, ma, ciononostante, lasciando i livelli di alcuni inquinanti ancora troppo elevati, facendo persistere, ancora, i problemi legati alla qualità dell'aria.

Una parte significativa della popolazione, soprattutto nelle grandi aree urbane, è esposta a livelli elevati di inquinanti, superiori ai limiti fissati dalla normativa in vigore (Direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE, D. Lg. 155/2010). È stato stimato che il 90% della popolazione che vive in aree urbane europee è esposta a livelli di inquinanti atmosferici non sicuri.

Numerosi studi documentano scientificamente gli effetti sanitari, acuti e cronici, dell'inquinamento atmosferico: tali effetti vanno dai sintomi respiratori alla morbosità e mortalità per cause respiratorie, cardiologiche e tumorali.

I problemi della circolazione e della mobilità rappresentano uno dei temi più sentiti dalla collettività. Le conseguenze dell'incremento della mobilità sono misurabili direttamente sulle strade: aumentano gli incidenti e, peggiorano costantemente le condizioni dell'ambiente in cui viviamo. Questo perché alla crescita delle esigenze della mobilità non ha risposto un equilibrato miglioramento del sistema di offerta, cioè delle infrastrutture, dei servizi e delle regolazioni per il trasporto pubblico e privato.

Il conflitto paradossale tra lo sviluppo del sistema dei trasporti e la salvaguardia dell'ambiente ha portato i dirigenti governativi comunitari a ridefinire i parametri di tollerabilità degli agenti inquinanti e a promuovere politiche orientate ad una mobilità sostenibile.

I sistemi di trasporto su gomma, più diffusi e distribuiti sulla popolazione in maniera capillare, sono causa di numerose pressioni sull'ambiente, tra cui le emissioni in atmosfera che risultano marcatamente dannose per l'ambiente e per la salute dell'uomo.

La trasformazione del carburante in energia termica e meccanica comporta perdite energetiche ed emissioni inquinanti. Nei gas di scarico sono presenti sostanze non nocive alla salute (come acqua, azoto ed anidride carbonica) e sostanze dannose sia per l'ambiente che per l'uomo; tra queste vi sono:

- Idrocarburi incombusti, ovvero parte di combustibile non bruciato;
- Monossido di carbonio, altamente tossico perché si lega all'emoglobina alterandone le proprietà;
- Particolato, composto prevalentemente da carbonio incombusto ed è causa del fumo nero che esce dagli scarichi. I granuli di carbonio possono avere diametri diversi ed alcuni di questi, come quelli del valore di 10  $\mu\text{m}$ , possono essere inalati e causare seri danni all'apparato respiratorio;



- Ossidi di azoto, nocivi per il sistema nervoso e che, legandosi con l'ossigeno, sono causa delle piogge acide.

Il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico avviene tramite alcune centraline di misurazione, sparse nel territorio. Esso viene applicato per il rilevamento delle sostanze più pericolose (CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMCOV, composti organici volatili non metanici, O<sub>3</sub>, polveri).

Per un approccio più completo della valutazione dello stato di degrado ambientale, risulta utile affiancare alle reti suddette, strumenti di simulazione (modelli) che siano in grado di riprodurre l'emissione, il trasporto e la diffusione degli inquinanti in atmosfera.

## **1.1 NORMATIVE SULL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO**

L'inquinamento atmosferico è nocivo sia per la salute della popolazione, sia per l'ambiente in cui si vive. Esso è in grado di provocare malattie cardiovascolari, respiratorie e tumori, e costituisce la principale causa di morte prematura, nell'Unione Europea, legata all'ambiente. Inoltre, l'inquinamento atmosferico ha effetti negativi sulla qualità dell'acqua e del suolo, oltre che a danneggiare gli ecosistemi per mezzo di fenomeni come le piogge acide. Le fonti di tale inquinamento sono diverse, ma, principalmente, è causato dal settore industriale, da quello dei trasporti, della produzione energetica e dal settore agricolo.

Nelle grandi aree urbane si raggiungono elevati livelli di concentrazione di alcuni inquinanti, come il particolato atmosferico (PM10 e PM2,5, a seconda che la dimensione delle polveri sia inferiore a 10 micrometri o a 2,5 micrometri), l'ozono (O<sub>3</sub>) e il biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), che, a causa della loro tossicità, determinano un forte impatto sulla salute umana.

I trasporti, in particolare quelli su gomma, sono la prima sorgente del particolato atmosferico, seguiti dall'industria, dal settore civile, dallo smaltimento dei rifiuti e dall'agricoltura.

Per quanto riguarda l'emissione degli ossidi di azoto, la fonte principale è rappresentata dai trasporti, di cui quelli stradali costituiscono il peso maggiore, dall'industria, dalla produzione di energia e dal settore civile.

Per il risanamento della qualità dell'aria si è fatto tanto, soprattutto nel settore della mobilità, testimoniato dalla presenza di segnali di miglioramento, ma tali misure finora realizzate non sono state sufficienti a far rientrare i livelli degli inquinanti nell'aria nei limiti normativi.

### **1.1.1 DIRETTIVE COMUNITARIE EUROPEE**

Gli strumenti normativi e i provvedimenti in materia di qualità dell'aria e di inquinamento atmosferico sono strutturati su diversi livelli, che vanno dalle direttive comunitarie, passando dalle norme nazionali, fino agli strumenti di governo locale.

L'ultimo rapporto commissionato dall'Agenzia Ambientale Europea (EEA) conferma che le misure intraprese dagli Stati membri nel corso degli ultimi anni non sono state sufficienti per la soluzione al problema dell'inquinamento.

Sebbene si siano ridotte significativamente le concentrazioni di alcuni inquinanti, come il monossido di carbonio e gli ossidi di zolfo, restano ancora troppo elevate le concentrazioni per il materiale particolato (il PM10 e PM2,5) e per l'ozono troposferico (O<sub>3</sub>). Sulla base degli obiettivi della strategia europea, circa l'inquinamento atmosferico del 2005, nel giugno 2008, è stata adottata una revisione della direttiva relativa alla qualità dell'aria ambiente. La nuova direttiva, la 2008/50/CE, istituisce limiti, ai principali inquinanti atmosferici (anidride solforosa, biossido di azoto, ossidi di azoto, materiale particolato, piombo, benzene, monossido di carbonio e ozono), che devono essere raggiunti entro un termine stabilito. Essi non devono essere superati in alcun luogo dell'UE.

Le misure sono intese a mantenere la qualità dell'aria ambiente, laddove sia buona, mentre obbliga ad adottare dei provvedimenti laddove si superino i valori limite. Gli Stati membri sono tenuti a definire zone e agglomerati per valutare e gestire la qualità dell'aria ambiente, monitorare le tendenze a lungo termine e garantire che le informazioni sulla sua qualità siano messe a disposizione del pubblico. La soglia di allarme costituisce il livello delle concentrazioni tali da determinare una situazione di inquinamento atmosferico che, qualora persista,

determina una potenziale condizione di superamento dei valori limite di qualità dell'aria con rischio immediato per la popolazione. Quanto detto si trova nell'allegato XI, "Valori limite per la protezione della salute umana", e nell'allegato XII, "Soglie di informazione e di allarme".

Alla fine del 2013, la Commissione ha proposto un nuovo pacchetto di provvedimenti per un'aria pulita che presenta due obiettivi principali. Il pacchetto comprende un nuovo programma, "Aria pulita per l'Europa", che descrive la problematica e le misure strategiche necessarie per conseguire i nuovi obiettivi, volti a ridurre l'impatto sulla salute e sull'ambiente fino al 2030. Esso propone la revisione della direttiva 2001/81/CE, che stabiliva, a livello europeo, i tetti alle emissioni nazionali, con l'aggiornamento dei limiti nazionali per il 2020 e il 2030, relativamente agli inquinanti attualmente disciplinati.

Al fine di superare l'eccessiva frammentazione e diversificazione dei flussi informativi sulla qualità dell'aria tra Europa e Paesi membri, si sta lavorando a un nuovo sistema di comunicazione delle informazioni che superi tale limite. Detto sistema è definito nella 2011/850/UE: esso sarà un sistema unico, basato sull'uso esclusivo di tecnologie informatiche, che dovrà garantire interrelazione di tutte le componenti informative, verifica della qualità, completezza, consistenza e aggiornamento, condivisione e interoperabilità delle informazioni, tra i vari livelli (Europeo, Nazionale, Locale) e tempestività di informazione.

Per quanto riguarda la limitazione dell'inquinamento causato dal settore dei trasporti, sono state adottate numerose direttive, che fissano norme di emissione per diverse categorie di veicoli (automobili, veicoli commerciali leggeri, autocarri, autobus e motocicli), disciplinando la qualità del carburante e il relativo tenore di zolfo e piombo. La norma di emissione attualmente in vigore, per le autovetture e i furgoni leggeri, è la Euro 6. Essa fissa limiti di emissione per una serie di inquinanti atmosferici, in particolare gli ossidi di azoto (NOx) e il particolato (PM). Gli Stati membri sono tenuti a negare l'omologazione, l'immatricolazione, la vendita e l'introduzione di veicoli che non rispettano i limiti in questione. Il regolamento (CE) n. 715/2007 fissa norme sulla conformità in servizio, la durata

dei dispositivi di controllo dell'inquinamento, i sistemi diagnostici di bordo (OBD), la misurazione del consumo di carburante e disciplina l'accessibilità delle informazioni per la riparazione e la manutenzione del veicolo per gli operatori indipendenti. Inoltre, l'UE ha introdotto il divieto di commercializzazione della benzina contenente piombo, nonché l'obbligo di rendere disponibili carburanti senza zolfo all'interno dell'Unione.

Lo stesso vale per il regolamento (CE) n. 595/2009, che fissa valori limite di emissione per i veicoli pesanti (autobus e camion).

Tabella 1: Norma di emissione dei veicoli in Europa con riferimento agli anni di attuazione.

<b>Categoria veicolo</b>	<b>Euro 1</b>	<b>Euro 2</b>	<b>Euro 3</b>	<b>Euro 4</b>	<b>Euro 5</b>	<b>Euro 6</b>
Autovetture	Luglio 1992	Gennaio 1996	Gennaio 2000	Gennaio 2005	Settembre 2009	Settembre 2014
Veicoli commerciali leggeri (N1-I)	Ottobre 1993	Gennaio 1996 (benzina),	Gennaio 2000	Gennaio 2005	Settembre 2009	Settembre 2014 (diesel)
Veicoli commerciali leggeri (N1-II & III)		Gennaio 1998 (diesel)	Gennaio 2001	Gennaio 2006		Settembre 2015 (diesel)
Autocarri e bus	1992	1995	1999	2005	2009	2014
Motocicli	2000	2004	2007	//	//	//
Ciclomotori	2000	2004	2007	//	//	//

### **1.1.2 LA REGOLAMENTAZIONE ITALIANA DELLA QUALITÀ DELL'ARIA**

La norma quadro in materia di controllo dell'inquinamento atmosferico è rappresentata dal Decreto Legislativo n. 155/2010 (recepimento direttiva 2008/50/CE), che ha abrogato il Decreto Legislativo n. 351/99 e i rispettivi decreti

attuativi DM 60/02, il Decreto Legislativo n.183/2004 e il DM 261/2002. Il Decreto individua l'elenco degli inquinanti per i quali è obbligatorio il monitoraggio (NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, PM10, PM2,5, Benzene, Benzo(a)pirene, Piombo, Arsenico, Cadmio, Nichel, Mercurio, precursori dell'Ozono) e stabilisce le modalità della trasmissione e i contenuti delle informazioni, sullo stato della qualità dell'aria, da inviare al Ministero dell'Ambiente.

Il provvedimento individua nelle Regioni le autorità competenti per effettuare la valutazione della qualità dell'aria e per la redazione dei Piani di Risanamento della qualità dell'aria, nelle aree nelle quali sono stati superati i valori limite. Inoltre, le Regioni devono predisporre i Piani di Azione per la riduzione del rischio di superamento dei valori limite, valori obiettivo e soglie di allarme. Sono stabilite le modalità per la realizzazione o l'adeguamento delle reti di monitoraggio della qualità dell'aria. In base al confronto tra i dati raccolti e gli standard di legge, si deve effettuare la valutazione della qualità dell'aria e pianificare gli interventi e le azioni finalizzate al rispetto dei livelli stabiliti dalla normativa per raggiungere gli obiettivi di risanamento e mantenimento della qualità dell'aria.

## **1.2 MONITORAGGIO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA**

Per la valutazione della qualità dell'aria possono essere utilizzate le seguenti tecniche:

1. Misurazioni in siti fissi, che prevede la determinazione dei livelli di concentrazione degli inquinanti atmosferici, mediante rilevamento in centraline automatiche, dislocate in punti fissi del territorio. Il monitoraggio degli inquinanti viene realizzato mediante l'impiego di strumentazione, automatica o manuale, contenuta nelle centraline. Il campionamento dell'aria ambiente avviene con frequenza oraria o giornaliera. I dati prodotti da ciascuno strumento sono raccolti e archiviati da un computer (Data-logger) presente in ciascuna centralina; il Data-logger trasmette i dati ai centri operativi provinciali, dove viene eseguita l'operazione di verifica dei dati

(validazione) e l'immissione degli stessi nella tabella della qualità dell'aria presente nel sito internet.

2. Metodi di misura indicativi, mediante campagne di misura con laboratori mobili. Con tali metodi si ottengono misure che sono meno accurate di quelle ottenute nei siti fissi, ma hanno il vantaggio di stimare i livelli di concentrazione degli inquinanti nelle aree non coperte da rete fissa.
3. Modelli di valutazione di emissione e dispersione di inquinanti atmosferici.

Per quanto riguarda la misurazione in siti fissi, il monitoraggio della qualità dell'aria si effettua attraverso una rete di stazioni di misurazione fisse (cabine di monitoraggio), il cui numero deve essere sufficiente a garantire una copertura dei dati su tutto il territorio. Le cabine sono classificate, in base al tipo di zona, in urbana, suburbana e rurale, ed in base al tipo di stazione: da traffico, industriale e di fondo (background).

I siti fissi di campionamento urbani sono inseriti in aree prevalentemente edificate, quelli suburbani in aree sia edificate che non urbanizzate, quelli rurali sono in tutte le aree diverse da quelle precedenti. In particolare, il sito fisso si definisce rurale remoto se è localizzato ad una distanza maggiore di 50 km dalle fonti di emissione.

Qualora i dati ottenuti con stazioni fisse non siano sufficienti, la Regione o gli enti delegati da essa, indicano delle campagne di monitoraggio, al fine di integrare tali dati con quelli dei laboratori mobili.

Sulla base dell'interpretazione dei dati ottenuti dalle misurazioni, vengono individuate le zone sul territorio regionale che presentano situazioni simili in termini di qualità dell'aria e, per esse, si individuano i piani di azione, risanamento e/o mantenimento.

L'allegato XV e l'Appendice IV al Decreto Legislativo 155/2010 forniscono i criteri per l'elaborazione di detti piani e programmi, sviluppati sulla base dei dati rilevati.

### **1.3 FENOMENOLOGIA DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO**

L'aria è una miscela eterogenea formata da gas e particelle di varia natura e dimensioni. La sua composizione si modifica, nello spazio e nel tempo, per cause naturali e non, rendendo difficile la definizione delle sue caratteristiche di qualità.

L'inquinamento atmosferico è quel fenomeno per il quale le particelle estranee alla composizione naturale dell'atmosfera, nocive per il benessere o la salute umana, sono presenti nell'atmosfera con diversi livelli di concentrazione. L'inquinamento atmosferico può essere sia di origine "naturale", attribuibile a cause, appunto, naturali, sia "artificiale", attribuibile, invece, ad azioni legate alle attività svolte dall'uomo.

Le attività artificiali principalmente responsabili dell'inquinamento dell'aria sono le industrie, i trasporti, le attività domestiche e gli impianti per la produzione di energia (centrali termoelettriche). La misura dell'inquinamento atmosferico avviene in funzione della concentrazione nell'atmosfera di sostanze inquinanti, generalmente misurata in parti per milione o *g/mc*. Si definiscono sostanze inquinanti le sostanze responsabili dell'inquinamento atmosferico; si ritiene inquinata l'aria la cui composizione eccede i limiti stabiliti per legge.

I fenomeni di inquinamento sono il risultato di più fattori: alcuni portano ad accumulo degli inquinanti, altri determinano la loro rimozione e la loro diluizione in atmosfera. I fattori principali che producono variazioni spazio-temporali della composizione dell'aria sono le entità e le modalità di emissione, i tempi di persistenza degli inquinanti, il grado di mescolamento dell'aria; mentre, i principali meccanismi di rimozione possono essere di tipo fisico (lavaggi dovuti alle piogge, assorbimenti su solidi o nel terreno, assorbimento nei diversi sistemi idrici), di tipo biologico (reazioni prodotte dalla respirazione delle piante e dei batteri presenti nei terreni), di tipo chimico (reazioni chimiche semplici, catalitiche o fotochimiche).

In base al livello di nocività ed alla durata del fenomeno inquinante, si può parlare di inquinamento acuto, se la concentrazione di sostanze inquinanti è elevata per

un breve periodo di tempo, oppure di inquinamento cronico, se la concentrazione di sostanze inquinanti è modesta, ma persiste per lunghi periodi di tempo.

### **1.3.1 GENERAZIONE ED ACCUMULO DEGLI INQUINANTI**

Gli inquinanti immessi direttamente dall'uomo nell'aria ambiente sono denominati inquinanti primari. A seguito dell'emissione in atmosfera, gli inquinanti primari sono soggetti a processi di diffusione, trasporto e deposizione, nonché a processi di trasformazione chimico-fisica, che possono portare alla formazione degli inquinanti secondari, nuove specie chimiche che spesso risultano più tossiche e di più vasto raggio d'azione dei composti originari.

Gli inquinanti primari possono essere di tipo gassoso o particellare. Tra i gas i principali sono:

- composti dello zolfo ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ );
- composti dell'azoto ( $\text{NO}$ ,  $\text{NH}_3$ );
- composti del carbonio ( $\text{CO}$ , COV composti organici volatili: idrocarburi non metanici e IPA idrocarburi policiclici aromatici, tra cui il benzene e benzo(a)pirene);
- composti alogenati ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HBr}$ , CFC).

Il particolato si classifica in ragione del diametro delle particelle: si considerano grossolane quelle con diametro maggiore di 2,5 *micron* e fini quelli di diametro minore di 2,5 *micron*. Si distinguono, inoltre, come inalabili le particelle con diametro minore di 10 *micron* (PM10).

I principali inquinanti secondari di tipo gassoso sono, invece:

- $\text{NO}_2$ , formato da  $\text{NO}$  primario;
- $\text{O}_3$ , formato per via fotochimica.

Il particolato secondario può derivare da reazioni chimiche che coinvolgono inquinanti gassosi sia primari che secondari. I più noti sono:

- la trasformazione di  $\text{SO}_2$  in solfati;
- la trasformazione di  $\text{NO}_2$  in nitrati;
- la trasformazione di composti organici in particelle organiche.



Naturalmente gli inquinanti atmosferici, sia primari che secondari, si caratterizzano per la loro grande mobilità indotta dal trasporto convettivo e dispersivo.

### **1.3.2 SMOG FOTOCHIMICO**

Col termine “smog fotochimico” si indica un insieme di processi che coinvolgono ozono, ossidi di azoto e composti organici volatili e presenza di radiazione solare, necessaria per l’innesco delle reazioni. Esso rappresenta una delle forme di inquinamento più dannose per l’ecosistema. Questa catena di reazioni porta all’ossidazione del monossido di azoto (NO) in biossido di azoto (NO<sub>2</sub>), alla produzione di ozono (O<sub>3</sub>) ed all’ossidazione degli idrocarburi. Vi è formazione di aldeidi, perossidi, di acidi nitriloperacetici (PAN), acido nitrico, nitrati e nitroderivati, in fase particellare, e centinaia di altre specie chimiche minori.

Lo smog fotochimico si manifesta con una leggera foschia e gli episodi critici possono interessare aree e periodi molto ampi, in quanto la loro distribuzione spazio-temporale dipende dalle masse d’aria che contengono gli inquinanti precursori e che sono sede di processi di trasformazione.

### **1.3.3 RIMOZIONE E DISPERSIONE DELLE SOSTANZE INQUINANTI IN ATMOSFERA**

I più importanti fenomeni che determinano la dispersione sono il trasporto delle sostanze nell’aria, la loro partecipazione ai processi di reazione chimica e la loro deposizione al suolo o, più in generale, la loro rimozione.

Il fenomeno del trasporto è puramente fisico e consiste nel movimento delle particelle inquinanti causato dai moti dell’aria nell’atmosfera. Le sostanze inquinanti vanno ad occupare volumi sempre più grandi, facendo sì che la loro presenza, massima in corrispondenza della sorgente, decresca progressivamente allontanandosi da questa. Il fenomeno delle reazioni chimiche può avvenire, nelle condizioni fisiche e termodinamiche tipiche dell’atmosfera, sia fra gli stessi componenti della sostanza considerata, che fra questi e altre specie chimiche

presenti nell'aria. Il risultato può essere una modifica della composizione dell'aria con aumento o diminuzione della specie inquinante.

Il fenomeno della deposizione al suolo di una sostanza presente in atmosfera può avere diverse cause, principalmente l'azione della gravità e delle piogge.

Il risultato dell'azione contemporanea dei tre fenomeni dà luogo alla presenza, in un certo punto dello spazio e in un certo istante di tempo, di una determinata quantità della generica sostanza inquinante che altera la naturale composizione dell'aria atmosferica.

La misura di queste quantità viene effettuata in termini di concentrazione. La variabile dimensionale più usata per esprimere le concentrazioni inquinanti è il rapporto massa/volume (rapporto fra la massa inquinante presente in una certa porzione di atmosfera e il volume della porzione stessa). I rapporti volume/volume sono generalmente espressi in parti di inquinante per milioni di parti di aria (parti per milione, *ppm*).

Per il modo in cui la concentrazione è stata definita, la sua misura dipende dalle condizioni termodinamiche dell'atmosfera. Per uniformare la scala di misura è, dunque, necessario riferire le misure a condizioni di riferimento, che, generalmente, sono definite da una temperatura di  $25^{\circ}\text{C}$  e una pressione di  $1\text{ atm}$ .

I fenomeni che danno luogo all'esistenza delle concentrazioni sono così rapidi da rendere difficoltosa la misura istantanea; per questo, la misura delle concentrazioni viene espressa come media temporale su intervalli di tempo sufficientemente lunghi da permettere di specificare una tale media.

#### **1.3.4 LE DINAMICHE ATMOSFERICHE**

La quasi totalità dei fenomeni di inquinamento atmosferico avviene nella porzione più bassa dell'atmosfera chiamata "Planetary Boundary Layer" (Strato Limite Planetario), PBL, e si estende fino a oltre  $1\text{ km}$  di altezza. I più importanti fattori meteorologici che interessano i fenomeni di inquinamento atmosferico sono:

- il vento orizzontale (velocità e direzione);

- la stabilità atmosferica, che è un indicatore della turbolenza atmosferica alla quale si devono i rimescolamenti dell'aria e, quindi, il processo di diluizione degli inquinanti;
- la quota sul livello del mare;
- le inversioni termiche che determinano l'altezza del PBL;
- i movimenti atmosferici verticali dovuti a sistemi baroclini od orografici.

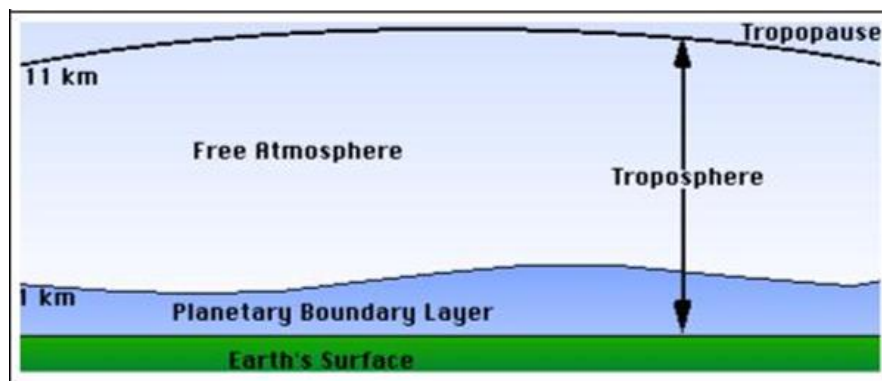


Figura 1: Planetary Boundary Layer.

Nella troposfera la temperatura decresce all'aumentare dell'altitudine. Il profilo di temperatura di riferimento per valutare il comportamento delle masse d'aria è quello osservato per una particella d'aria che si innalza espandendosi adiabaticamente. Quando il profilo reale coincide con quello di riferimento, una particella d'aria, a qualsiasi altezza venga portata, si trova in equilibrio indifferente, cioè non ha alcuna tendenza né a salire né a scendere (atmosfera neutra). Quando la temperatura decresce con l'altezza più velocemente del profilo di riferimento, le particelle d'aria ad ogni quota si trovano in una condizione instabile, perché, se vengono spostate sia verso il basso che verso l'alto, continuano il loro movimento nella medesima direzione, allontanandosi dalla posizione di partenza. Se, invece, la temperatura decresce con l'altezza più lentamente del profilo adiabatico, o, addirittura, aumenta (situazione detta di "inversione termica"), le particelle d'aria sono inibite sia nei movimenti verso l'alto che verso il basso e la situazione è detta stabile. Si capisce, quindi, che i più gravi episodi di inquinamento si verificano in condizioni di inversione termica; in questi casi, infatti, gli inquinanti emessi al di sotto della quota dell'inversione non

riescono ad innalzarsi poiché risalendo si trovano ad essere comunque più freddi e, dunque, più pesanti dell'aria circostante.

La diffusione turbolenta è quel fenomeno per il quale si ha il rapido ed irregolare movimento di macroscopiche porzioni di fluido.

Infine, anche le caratteristiche geometriche della via, per quel che riguarda l'inquinamento urbano, rappresentano un ulteriore fattore legato alla dispersione delle sostanze inquinanti. Strade larghe con edifici di modesta altezza favoriscono il processo di dispersione; al contrario, strade strette con edifici molto alti ostacolano la dispersione, e in queste strade è facilitato l'accumulo degli inquinanti. Assume particolare rilievo il rapporto tra altezza degli edifici e larghezza della strada. Più è alto questo rapporto, maggiormente ostacolata sarà la dispersione delle sostanze inquinanti. Segmenti di strade urbane strette, caratterizzate da edifici alti, sono dette "canyon urbani".

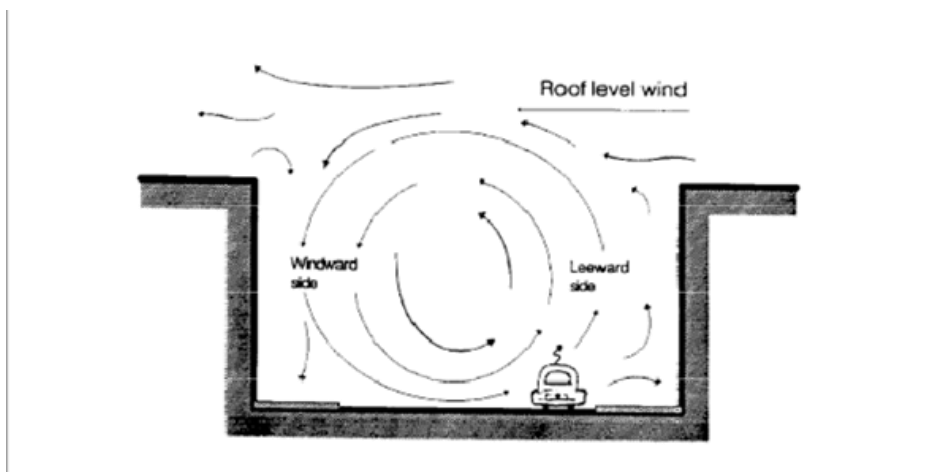


Figura 2: Geometria di un canyon urbano.

## 2. IL PROCESSO DI EMISSIONE DEI VEICOLI

Le attività dei motori a combustione, utilizzati dai veicoli terrestri, navi e aerei, sono causa di emissioni inquinanti atmosferiche da sorgenti mobili. La quota più rilevante è associata al traffico autoveicolare terrestre, che, principalmente, produce tre tipologie di emissione:

- le emissioni allo scarico;
- le evaporative;

- quelle derivanti dal consumo di materiali (per esempio, pneumatici e freni).

Quantitativamente, le prime, che sono le più rilevanti, sono una diretta conseguenza del processo di combustione e dipendono da una serie di fattori legati al tipo di veicolo, al ciclo di funzionamento ed alla configurazione del motore, al suo regime di utilizzo, allo stato di usura ed al combustibile utilizzato.



Figura 3: Emissioni inquinanti dei veicoli.

Le presenze più consistenti di inquinanti, limitati dalle normative, sono:

- idrocarburi incombusti o parzialmente ossidati (HC), costituiti da quella parte del combustibile che non è bruciata o si è decomposta solo in parte;
- ossido di carbonio (CO), dovuto alla presenza di zone di combustione in difetto di ossigeno;
- ossidi di azoto (NOx), derivanti da reazioni tra l'azoto e l'ossigeno dell'aria, reazioni che a temperatura ambiente sono del tutto trascurabili, ma che divengono importanti alle alte temperature dovute alla combustione;
- particolato (Particulate Matter, PM), il cui principale costituente è la fuliggine, materiale ad altissimo contenuto di carbonio.

L'entità e le caratteristiche qualitative delle emissioni dagli autoveicoli risultano determinate dalle modalità di combustione e dal tipo di combustibile, a seconda del tipo di motore utilizzato: benzina nei motori ad accensione comandata (ciclo otto) o gasolio in quelli ad accensione spontanea (ciclo diesel). I due tipi di motore presentano condizioni di combustione assai diverse, che risultano variabili con il regime di funzionamento del motore stesso, con la sua età e con il suo stato di manutenzione.

I principali inquinanti presenti allo scarico dei motori a combustione interna sono il monossido di carbonio (CO), composti organici volatili (COV), ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>, miscela di NO e NO<sub>2</sub>) e, in particolare per i motori diesel, anidride solforosa (SO<sub>2</sub>) e materiale particolato, quest'ultimo di granulometria inferiore a 10 nm, costituito in prevalenza da particelle carboniose e da idrocarburi pesanti adsorbiti.

L'equilibrio termodinamico delle numerose reazioni coinvolte nell'ossidazione stechiometrica con aria prevede che, nelle condizioni di temperatura e pressione allo scarico del motore, i gas siano costituiti unicamente da CO<sub>2</sub> ed H<sub>2</sub>O (prodotti dalla combustione), e da N<sub>2</sub> ed altri componenti inerti, contenuti nell'aria comburente. Tuttavia, lo studio della combustione all'interno dei cilindri di un motore mette in evidenza come, nelle distinte fasi che ne caratterizzano il ciclo di funzionamento (aspirazione, compressione, accensione ed espansione, scarico), si verifichino variazioni locali di temperatura intense, con velocità tali da non garantire tempi di permanenza sufficienti al raggiungimento dell'equilibrio. In altre parole, la completezza della combustione non viene mai raggiunta all'interno del motore.

All'incompletezza delle reazioni attivate dal processo di combustione sono da imputarsi le emissioni di CO e di idrocarburi, tipici prodotti di ossidazioni solo parziali.

Per quanto riguarda, invece, l'emissione di idrocarburi incombusti, la loro origine è, invece, da attribuirsi agli intensi gradienti di temperatura che si verificano in zone di spessore limitato lungo le pareti del cilindro (zona di "quenching") o all'interno di micro fessure presenti sulla parete stessa, in corrispondenza delle quali si verificano brusche riduzioni locali della temperatura.

Un ulteriore fattore che esercita una notevole influenza sulle emissioni, legato alle modalità di combustione nel motore, è costituito dal parametro  $\lambda$ , ossia il rapporto A/F, fra l'aria ed il combustibile alimentato nei cilindri. In condizioni stechiometriche, tale rapporto vale, in termini di peso, per i combustibili di comune utilizzo (benzina e gasolio), tra 14,5 e 15: valori inferiori danno luogo ad

un eccesso di combustibile rispetto all'aria, dunque miscele ricche, valori superiori indicano un eccesso d'aria rispetto a quella richiesta dalla stechiometria della combustione, cioè miscele povere.

La carenza di ossigeno, che si verifica nelle miscele ricche, favorisce la presenza di CO ed idrocarburi, prodotti di incompleta combustione, mentre riduce quella degli NO<sub>x</sub>, la cui formazione è strettamente dipendente dalla disponibilità dell'ossigeno stesso. Per miscele prossime ai rapporti stechiometrici, le emissioni di CO ed idrocarburi si riducono sensibilmente, mentre gli NO<sub>x</sub> raggiungono le massime concentrazioni, in virtù della presenza di O<sub>2</sub> e delle alte temperature caratteristiche della combustione in tali condizioni. Per miscele povere, l'ampia disponibilità di O<sub>2</sub> minimizza le emissioni di CO e quelle di idrocarburi, che, tuttavia, presentano un successivo incremento per miscele estremamente povere, in seguito alle difficoltà di combustione per la massiccia presenza di aria; le concentrazioni di NO<sub>x</sub> subiscono, invece, una costante riduzione, in virtù della progressiva diminuzione di temperatura con l'impoverimento della miscela, legata all'effetto diluente dell'aria in eccesso.

La presenza o meno di SO<sub>2</sub> e particolato nelle emissioni dei motori risulta fortemente dipendente dal tipo di combustibile utilizzato. L'SO<sub>2</sub> deriva totalmente dall'ossidazione dello zolfo contenuto nel combustibile, mentre il materiale particolato è legato alle difficoltà di combustione dei carburanti contenenti frazioni idrocarburiche pesanti: ambedue i composti sono, pertanto, caratteristici dei gas di scarico dei motori alimentati a gasolio e, risultano praticamente assenti in quelli a benzina.

## **2.1 FATTORI CHE INFLUENZANO L'EMISSIONE**

È utile definire alcuni parametri relativi alle caratteristiche e alle condizioni di funzionamento dei veicoli.

1) In un primo gruppo si possono individuare i parametri rappresentativi delle caratteristiche costruttive del veicolo, distinte in:

- caratteristiche generali del veicolo (peso a vuoto, efficienza aerodinamica, ecc.);

- caratteristiche dell'apparato di propulsione.

Quest'ultime esercitano il ruolo più importante nella determinazione del tipo e dell'entità delle emissioni delle sostanze inquinanti.

I parametri che descrivono l'apparato di propulsione possono essere suddivisi in più gruppi. La categoria principale è composta dal tipo di motore, che può essere ad accensione comandata o ad accensione spontanea, dal tipo di combustibile utilizzato, dalle caratteristiche del fluido evolvente, dal tipo di dispositivo di controllo delle emissioni, dalle caratteristiche di cilindrata e potenza.

2) Una seconda categoria di parametri comprende quelli che influenzano la meccanica del veicolo, come lo stato di usura, lo stato di manutenzione, le condizioni di regolazione. Naturalmente, lo stato della meccanica dell'apparato di propulsione è il più importante nell'influenzare le emissioni.

3) In un terzo gruppo possono essere individuati i parametri che rappresentano le condizioni operative del veicolo, ed in particolare dell'apparato di propulsione. Questo terzo gruppo può essere descritto da due categorie di variabili, fra loro dipendenti: quelle legate alla dinamica del motore, fra cui le più importanti sono la velocità di rotazione del motore e l'entità del carico a esso fornito, e quelle che descrivono lo stato termodinamico del fluido evolvente all'interno del cilindro, che determina le caratteristiche della combustione (temperatura del motore, umidità e densità dell'aria, ecc.).

Infine, le caratteristiche operative del veicolo, possono essere raggruppate in diversi sottoinsiemi: lo stato dell'aria esterna (temperatura ambiente, pressione atmosferica e umidità relativa dell'aria); le caratteristiche della via (pendenza longitudinale, sinuosità, caratteristiche della pavimentazione); le condizioni di traffico (caratteristiche di deflusso); il tipo di uso attuale del veicolo (massa trasportata, lunghezza degli spostamenti, comportamento del guidatore).

### **2.1.1 APPROCCIO MODELLISTICO ALL'INQUINAMENTO DA TRAFFICO**

Si è detto che il controllo della qualità dell'aria può essere effettuato solo in un numero finito di punti, coincidenti con le postazioni di misura delle varie reti di



rilevamento presenti sul territorio nazionale e, che non consente di ottenere una fotografia precisa della distribuzione spazio-temporale della concentrazione dei vari inquinanti di interesse.

Si è, dunque, reso necessario l'impiego di un modello matematico in grado di ricostruire, il più fedelmente possibile, lo stato di concentrazione dei vari inquinanti in un dominio di calcolo spazio-temporale.

A tal fine si è resa necessaria anche la definizione di modelli matematici per ottenere la distribuzione e la caratterizzazione del traffico sulla rete stradale, a partire dai dati sulla richiesta ed offerta di mobilità che possano permettere una valutazione delle emissioni da traffico sulla qualità dell'aria e, modelli che, a partire dai dati caratterizzanti le sorgenti inquinanti e lo stato meteorologico, simulino l'andamento della concentrazione degli inquinanti.

Il modello standard europeo per le emissioni stradali è COPERT (Computer Programme for estimating Emissions from Road Transport), un programma che stima le emissioni inquinanti da sorgenti mobili e che fornisce il valore medio delle emissioni veicolari su un dato percorso.

Nella simulazione del traffico veicolare all'interno di una rete urbana, il modello, attraverso l'uso di una o più matrici OD (origine-destinazione) di spostamento, ripartisce i flussi veicolari all'interno della rete stradale, a partire da nodi di origine verso i poli attrattivi di destinazione dei percorsi. I dati in uscita sono costituiti dal flusso veicolare (*veicoli/h*) e la velocità media (*km/h*), definiti per ogni arco stradale. Questo modello stabilisce relazioni funzionali tra velocità media e quantitativo di sostanza emessa per chilometro. Tali relazioni sono state ricavate interpolando dati sperimentali forniti da prove di emissione ripetute su un banco a rulli o banco motori. Le curve di emissione sono basate sull'ipotesi che il veicolo percorra un ciclo di guida standard, come definito nelle direttive EURO. Ovviamente, a parità di velocità media, i cicli di guida possono essere molto diversi tra di loro. Si capisce, quindi, che il ciclo di guida, descritto dalle norme EURO, non è rappresentativo delle reali condizioni di guida su strada. Per superare tale limite, i modelli più recenti introducono un ulteriore parametro, da

affiancare alla velocità media: generalmente l'andamento dell'accelerazione nel tempo, oppure il prodotto di velocità e accelerazione.

Il modello emissivo necessita in ingresso delle seguenti informazioni:

- condizioni climatiche e periodo della simulazione;
- inquinanti e sorgenti oggetto di studio;
- descrizione delle sorgenti;
- informazioni caratterizzanti le modalità di emissione.

In uscita si otterrà la quantificazione delle emissioni e dei consumi di combustibile, in forma aggregata o in modo specifico, per ciascuna categoria veicolare e per ciascun arco stradale.

Lo studio della diffusione atmosferica delle sostanze inquinanti può essere eseguito per mezzo di modelli fisici, che sono delle vere e proprie riproduzioni in scala del fenomeno indagato, o di modelli teorici.

### **2.1.2 DEFLUSSO VEICOLARE**

La simulazione del deflusso veicolare nasce con lo scopo di rappresentare in maniera realistica i fenomeni connessi al traffico veicolare, prevenendone l'evoluzione e fornendo un ausilio alla gestione dei trasporti. Inoltre, essa ha il vantaggio di far conoscere le variazioni dei flussi di traffico già in fase di progetto, riducendo notevolmente il rischio di scelte progettuali/organizzative che si potrebbero rivelare errate una volta messe in atto.

Le prime ricerche si basavano sull'assunzione che il moto dell'insieme dei veicoli presenti su un tronco stradale potesse essere assimilato al moto di un fluido continuo mono-dimensionale. Questa assunzione permise di definire alcune variabili di stato, funzioni del tempo e dello spazio, quali il flusso, la densità e la velocità veicolare. La rete stradale venne considerata come una rete di canalizzazioni percorsa dai flussi di traffico. Le caratteristiche dei tronchi della rete (capacità, velocità medie, ecc.) e la domanda di mobilità (volume di traffico, origine/destinazione dei veicoli, ecc.) determinavano il modo con cui la rete veniva percorsa da tali flussi. L'evoluzione nel tempo delle variabili di stato erano modellizzate attraverso un'equazione differenziale basata sulla relazione

sperimentale stazionaria tra flusso e densità, che includeva la conservazione della massa.

Modelli di questo tipo sono detti macroscopici e possono essere a spazio continuo o a spazio discreto: i primi si basano su variabili definite in ogni punto dello spazio (possibile solo per schemi semplici; per situazioni più complesse è richiesta una soluzione numerica attraverso una discretizzazione spazio/temporale), nei secondi, invece, le variabili di base, che influenzano la prestazione del ramo (densità e velocità), sono definite a livello dell'intero ramo e la loro soluzione richiede solitamente una discretizzazione temporale.

La ricerca ha successivamente portato alla definizione di modelli mesoscopici, in cui viene simulato il moto del singolo veicolo (oppure di pacchetti di veicoli). In questi modelli il flusso di traffico è discreto, mentre il moto dei veicoli dipende da leggi che descrivono le relazioni tra le variabili del deflusso o da funzioni probabilistiche.

Per aumentare la qualità e l'accuratezza dei modelli di simulazione del deflusso veicolare, si sono creati modelli microscopici che nascono dalla necessità di rappresentare l'interazione tra i singoli veicoli. Ogni veicolo possiede le proprie caratteristiche relative alle prestazioni dei mezzi (per esempio l'accelerazione massima o la velocità) o alle caratteristiche dei guidatori (per esempio il tempo di reazione o la velocità desiderata). Tali modelli considerano la coppia veicolo/guidatore come un unico elemento e non separano il processo decisionale del guidatore dal controllo del veicolo.

Sono stati messi a punto modelli che riproducono alcuni comportamenti propri della coppia veicolo/guidatore, che cercano di rispecchiare le proprietà globali (macroscopiche) del deflusso veicolare. Nel campo dei fattori umani sono stati modellizzati alcuni dei processi decisionali propri del soggetto umano (guidatore) come, ad esempio, la percezione del moto dei veicoli.

La disomogeneità di comportamento dei guidatori è alla base dei fenomeni di instabilità del deflusso veicolare verificabili nel sistema reale per valori della portata prossimi alla congestione dell'infrastruttura.

### **2.1.3 MODELLO DI EMISSIONE**

Un modello di emissione è composto dall'unione di un sistema di modelli comprendente un modulo di interazione domanda-offerta di trasporto (ripartizione modale, assegnazione dei flussi di traffico), un modulo di deflusso e il modello di emissione vero e proprio. Tale sistema fornirà le quantità totali di inquinante emesse da un generico flusso di veicoli nell'unità di spazio percorso o nell'unità di tempo, denominate, rispettivamente, fattore lineare di emissione e fattore temporale di emissione.

I modelli di emissione consistono nella formulazione matematica delle relazioni esistenti tra le emissioni inquinanti dei veicoli a motore e le variabili da cui tali emissioni sono influenzate (caratteristiche costruttive, stato della meccanica e condizioni di funzionamento dei veicoli, condizioni dell'ambiente esterno).

Le emissioni indicate come "emissioni di base" sono quelle in cui le variabili indipendenti del modello di base sono soltanto quelle relative alla dinamica di funzionamento dell'apparato di propulsione, calcolate tenendo conto della dipendenza delle emissioni dalla dinamica di funzionamento del motore in determinate condizioni di regime termico, di stato della meccanica e ambientale. Alle emissioni di base si aggiungono le aliquote di emissioni dovute ai transitori termici del motore (emissioni a freddo), alla pendenza della via e allo stato non di regime della meccanica.

Lo sviluppo dei modelli può essere condotto sia con un approccio dinamico, volto alla simulazione delle caratteristiche istantanee del fenomeno, sia secondo un approccio statico che permette, invece, soltanto il calcolo dei valori medi delle emissioni nell'intervallo temporale al quale si riferisce l'analisi.

L'approccio dinamico permette di descrivere il fenomeno nel dettaglio, ma necessita di una quantità notevole di informazioni sul comportamento istantaneo delle variabili esplicative. Essi trovano campi ottimali di applicazione nella simulazione di configurazioni di complessità limitata, come l'analisi delle emissioni dei singoli veicoli, di singoli tronchi stradali o di intersezioni stradali.

L'approccio statico alla simulazione conduce alla determinazione delle emissioni medie in un certo intervallo di tempo, in funzione dei valori medi assunti dalle variabili indipendenti nell'intervallo considerato, ed è adatto al calcolo delle emissioni in condizioni stazionarie di funzionamento del sistema di trasporto, come l'analisi delle emissioni dovute a veicoli in condizioni di moto uniforme e di moto non uniforme ma caratterizzato dal valore della velocità media, come è il caso di traffico in condizioni di flusso ininterrotto (tronchi stradali extraurbani, direttrici di traffico, ecc.), oppure l'analisi delle reti di trasporto in condizioni di equilibrio.

#### **2.1.4 COPERT**

Il modello per l'elaborazione di scenari delle emissioni atmosferiche, frequentemente utilizzato in Europa, per la stima delle emissioni di inquinanti atmosferici dovuti ai trasporti stradali è denominato COPERT.

Tale metodologia è basata sul calcolo dei fattori di emissione dei principali inquinanti, partendo dalla conoscenza delle seguenti variabili:

- tipologia di veicolo (tipo di carburante, anno di produzione, cilindrata per veicoli leggeri o motocicli e peso per veicoli di trasporto merci);
- velocità media;
- lunghezza del tratto percorso;
- presenza o meno del ciclo di preriscaldamento (vista l'esistenza dei tre contributi emissivi: a freddo o in transitorio termico, a caldo o a regime termico ed evaporativo);
- tipo di strada percorsa (urbana, extraurbana, autostrada);
- temperatura ambiente.

Si tratta di un modello disaggregato, in quanto consente di ottenere i valori delle emissioni per ogni categoria veicolare.

COPERT si applica ad autovetture passeggeri (PCs), veicoli commerciali leggeri (LDVs), veicoli commerciali pesanti (HDVs), bus (Buses), motocicli e ciclomotori (Motorcycles e Mopeds), suddivisi secondo 266 diverse categorie per classi di cilindrata, o portata, tipo di alimentazione, normativa di riferimento.

Esso consente la stima di tutti gli inquinanti regolamentati dalla normativa europea (CO, NO<sub>x</sub>, VOC, NMCOV, PM e CO<sub>2</sub>); permette il calcolo delle emissioni anche di alcuni inquinanti non regolamentati come CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, metalli pesanti, idrocarburi policiclici aromatici (IPA), inquinanti organici persistenti (POP) e, infine, è in grado di fornire le emissioni di NMCOV distinte nelle singole specie.

La metodologia di calcolo del COPERT si basa sui seguenti parametri:

Parco circolante suddiviso per:

- tipologia di veicolo (numero di PCs, LDVs, HDVs, ecc.);
- tipo di combustibile utilizzato (benzina, gasolio, GPL, ecc.);
- classe di anzianità, in relazione alle normative europee di introduzione di dispositivi per la riduzione delle emissioni (Euro I, II, III, ecc.);
- classe di cilindrata (per le autovetture) o classe di peso (per i veicoli commerciali);
- consumi e caratteristiche dei combustibili.

Condizione di guida:

- percorrenze medie annue e velocità medie (distinte in base al ciclo di guida ovvero alla tipologia di percorso effettuato, urbano, extraurbano, autostradale).
- fattori di emissione;
- pendenza della strada;
- condizioni climatiche:
- temperatura massima;
- temperatura minima;
- carico trasportato nel caso dei veicoli commerciali.

A parte i fattori di emissione, presenti nel codice di calcolo del programma, gli altri dati devono essere introdotti dall'utente durante la creazione del database di input.

Il fattore di emissione di un inquinante, per una particolare categoria veicolare e per un particolare tipo di percorso o ciclo di guida, viene calcolato rapportando il corrispondente dato di emissione nazionale (stimato con il COPERT ed espresso

in *tonnellate/anno*) al prodotto del numero di veicoli appartenenti a quella categoria per le relative percorrenze medie annue (espresse in *km/anno*).

Nella stima nazionale alle emissioni allo scarico e alle emissioni evaporative, si affiancano le emissioni da usura di gomme e freni dei veicoli. L'attenzione è rivolta al particolato primario, derivante direttamente dai fenomeni di usura.

Purtroppo mancano al momento dati sperimentali sui fattori di emissione che tengano conto delle diverse combinazioni tra pneumatici e superfici stradali. Le condizioni climatiche (temperature ed umidità) possono influire in modo determinante.

### **2.1.5 DISPERSIONE DELLE SOSTANZE INQUINANTI IN ATMOSFERA - MODELLI DI DISPERSIONE**

Ogni modello necessita di essere calibrato (tuning), così da potersi ritenere tarato per una rappresentazione realistica della realtà.

Per valutare il campo di concentrazione è necessario schematizzare un considerevole numero di fenomeni specifici, che hanno luogo durante il trasporto della sostanza in atmosfera:

- fisici (trasporto, diffusione, ecc.);
- chimico-atomici (reazioni chimiche di trasformazione, decadimento radioattivo, ecc.);
- fisico-chimici (deposizione, ecc.).

#### **2.1.5.1 INQUINAMENTO IN CANYON URBANO**

Da analisi sulle caratteristiche micrometeorologiche degli ambienti altamente urbanizzati, si è constatato che essi sono caratterizzati da molti canyon urbani (strade strette ed edifici alti). Il canyon urbano costituisce una sorta di trappola per gli inquinanti emessi al loro interno, e che derivano, quasi esclusivamente, dal traffico autoveicolare che percorre le strade cittadine. La particolarità geometrica di un canyon urbano determina la presenza di una zona di atmosfera caratterizzata da proprietà distinte da quelle dell'aria sovrastante e di conseguenza particolari condizioni per la dispersione degli inquinanti emessi.

Per studiarne le problematiche connesse a tale conformazione, è opportuno far riferimento ad un modello che isoli un solo canyon e lo caratterizzi geometricamente. Tale struttura è caratterizzata da tre parametri principali: l'altezza media  $H$  degli edifici lungo il canyon, la dimensione trasversale  $W$  e quella longitudinale  $L$  del canyon. Tali parametri si compongono per definire due indicatori fondamentali: il fattore di forma del canyon ( $W/H$ ) ed il fattore di forma degli edifici ( $L/H$ ). Un canyon si dice regolare quando  $W/H$  è circa pari a 1. Quando il fattore di forma del canyon raggiunge e supera il valore 2 si parla di un canyon profondo (deep canyon). Se si considera il fattore di forma degli edifici, si dice che si è in presenza di un canyon corto quando  $L/H \approx 3$ , medio quando  $L/H \approx 5$  e lungo quando  $L/H \approx 7$ .

Un canyon in cui le due file di edifici che lo fiancheggiano hanno la medesima altezza si dice canyon simmetrico. Considerando per ora un canyon simmetrico, è opportuno definire un lato sottovento (leeward) ed un lato sopravvento (winward). I canyon che si incontrano il più delle volte nelle realtà urbane sono di tipo asimmetrico. In questo caso si parla di canyon step-up, quando la fila di edifici sul lato leeward è più alta di quella sul lato winward, ed un canyon step-down, quando ad essere più elevata è la fila di edifici sul lato winward.

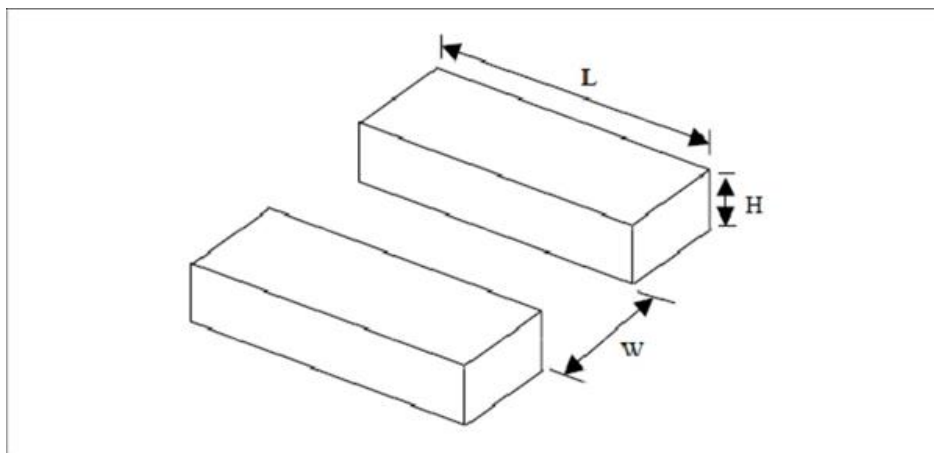


Figura 4: Schematizzazione di un canyon urbano.

Il campo di moto dell'aria all'interno del canyon è determinato:

- dalle caratteristiche geometriche del canyon (i fattori di forma);
- dal valore della velocità media del vento al di sopra degli edifici;



- dalla direzione di provenienza del vento al di sopra degli edifici;
- dal bilancio energetico che si viene a creare all'interno del canyon.

L'angolo tra la direzione del vento nell'aria libera sovrastante e l'asse del canyon condiziona la circolazione locale che si viene ad instaurare al suo interno. Sono possibili diverse situazioni:

- 1) vento perpendicolare al canyon: quando tra l'asse dello stesso e la direzione del vento si ha un angolo non inferiore a  $30^\circ$ ;
- 2) vento parallelo al canyon;
- 3) Vento obliquo: quando l'angolo tra la direzione del canyon e quella del vento è superiore a  $30^\circ$ .

### **2.1.5.2 MODELLI SEMPLIFICATI DI DISPERSIONE**

Nelle simulazioni più spinte della dispersione degli inquinanti in un canyon urbano vengono impiegati normalmente modelli complessi di tipo che inevitabilmente ricostruiscono sia la fluidodinamica caratteristica del canyon sia la distribuzione degli inquinanti e che limitano l'indagine ad un dominio bidimensionale (il piano trasversale al canyon), ipotizzando, di fatto, un canyon di lunghezza infinita. Simulazioni di questo genere sono altamente realistiche e hanno fornito risultati comparabili con le misure disponibili a scala reale. Questi modelli, però, sono accompagnati da una notevole complessità. Per questo sono stati messi a punto modelli di maggiore semplicità e di minori richieste di calcolo che fossero in grado di fornire ricostruzioni attendibili della distribuzione dell'inquinamento entro un canyon urbano. I principali modelli di questa famiglia più utilizzati nella pratica corrente sono:

#### 1) Modello Street:

Esso assume che all'inquinamento dovuto alle emissioni dal traffico automobilistico locale (contributo stradale  $C_s$ ) si venga a sommare l'inquinamento presente nell'aria che scorre sopra la città a livello dei tetti (contributo di background  $C_b$ ). Il contributo stradale è direttamente proporzionale all'emissione locale degli autoveicoli ed inversamente proporzionale alla velocità del vento misurata alla quota dei tetti. Con vento sopra i tetti circa perpendicolare

all'asse del canyon, il modello predice maggiori concentrazioni al lato leeward che al lato windward. Quando l'angolo tra asse del canyon e la direzione del vento risulta inferiore a  $30^\circ$ , in teoria questo modello non dovrebbe essere utilizzato, anche se, pragmaticamente, viene comunque usato. Il modello è estremamente semplice e non può essere impiegato, a rigore, quando la velocità del vento è molto bassa.

## 2) Modello di Hotchkiss e Harlow:

Consiste nell'individuare una soluzione approssimata dell'equazione euleriana del trasporto e della dispersione dell'inquinante in condizioni stazionarie. Una volta integrata, da questa equazione, con le opportune condizioni iniziali e al contorno, si ottiene la relazione per la concentrazione nella sezione del canyon. Nonostante la maggiore fisicità del modello (più apparente che reale), i risultati ottenuti in situazioni reali non sono molto differenti da quelli ottenuti dal modello Street. Entrambi sono in grado di riprodurre in modo corretto le caratteristiche generali del fenomeno, anche se, quantitativamente, spesso differiscono non poco dalle misure reali. Ciò era prevedibile visto che si è cercato di condensare, in modelli algebrici semplicissimi, l'enorme complessità fluidodinamica del canyon urbano.

## **3. CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL VEICOLO**

I parametri rappresentativi delle caratteristiche dell'apparato di propulsione possono essere raggruppati in tre diversi sottoinsiemi: tipo di propulsione del veicolo, caratteristiche di potenza e dispositivi di controllo delle emissioni.

Il tipo di propulsione del veicolo, tranne rari casi, può essere classificato in motore ad accensione comandata o ad accensione spontanea. Dal tipo di propulsione dipendono il tipo di combustibile utilizzato (benzina o diesel) e le proprietà del fluido evolvente. Nei motori ad accensione comandata l'innesco della combustione avviene tramite una scintilla, prodotta dalla candela, durante la fase di compressione della miscela nel cilindro. La combustione, nelle diverse condizioni di carico del motore, avviene, praticamente, sempre in fase omogenea: la benzina viene miscelata con l'aria comburente nel carburatore, ove evapora prima di essere immessa nei cilindri.

Caratteristica essenziale dei motori ad accensione comandata è quella di utilizzare rapporti aria/combustibile leggermente ricchi o stechiometrici, con conseguenti elevate emissioni di CO e COV. Le emissioni presentano una dipendenza anche da alcune caratteristiche del combustibile, in particolare dal contenuto di idrocarburi aromatici (con funzioni antidetonanti, in sostituzione dei derivati alchilici del piombo), per ciò che riguarda l'emissione di benzene e, dal contenuto di composti ossigenati, per ciò che riguarda l'emissione di aldeidi e altri composti carbossilici.

Nei motori ad accensione spontanea (diesel), le reazioni di combustione si auto-innescano quando la miscela raggiunge le condizioni di temperatura e pressione che ne determinano l'auto-accensione. L'iniezione del combustibile avviene qualche istante prima del punto morto superiore, per cui, per gran parte della fase di compressione, nei cilindri è presente solo aria: la conseguente assenza dei rischi legati all'insorgere di fenomeni di detonazione consente di utilizzare rapporti di compressione più spinti e ottenere rendimenti più elevati rispetto ai motori a ciclo Otto. Operando in tal modo, la combustione avviene in fase eterogenea: il combustibile non viene evaporato e miscelato con l'aria prima dell'alimentazione e le reazioni di combustione si innescano in fase liquida. Tale eterogeneità comporta una certa difficoltà nel raggiungere condizioni ottimali di combustione e ciò causa emissioni di materiale particolato, caratteristiche di questo tipo di motore e, di idrocarburi incombusti.

Una delle caratteristiche più importanti del motore diesel è costituita dal suo funzionamento nell'intervallo di rapporti aria/combustibile estremamente poveri, pertanto le emissioni di CO sono molto contenute. Le emissioni di COV sono, invece, elevate poiché crescono con l'impoverimento della miscela.

Gli intermedi di ossidazione allo scarico sono anche fortemente influenzati dalla presenza di condizioni locali che limitano il processo di ossidazione, risultando dipendenti dalla configurazione della camera di combustione e del sistema di iniezione. L'ottimizzazione della turbolenza all'interno dei cilindri e l'adozione di sistemi di iniezione completamente nuovi (indiretta a precamera, diretta con

iniezione a pompa o common rail), rappresentano elementi molto qualificanti per il controllo di tutti gli inquinanti e per le polveri, nell'ultima generazione di motori diesel.

Il contenuto di zolfo presente nel gasolio comporta la presenza di SO<sub>2</sub> allo scarico. Inoltre lo zolfo contribuisce anche alla formazione del particolato, tramite l'ossidazione in SO<sub>3</sub> e la successiva idrolisi in acido solforico e solfati.

Uno studio sperimentale ha mostrato che le emissioni dai veicoli diesel sono, rispetto a quelli a benzina, più basse circa 30 volte per il CO e circa 16 volte per gli HC. Invece, le emissioni di CO<sub>2</sub> risultano del 14% minori per i veicoli a benzina con partenza a caldo e del 4% per quelli con partenza a freddo, le emissioni di IPA sono, per veicoli a benzina, maggiori del 21% a caldo e del 20% a freddo.

Le emissioni di NO<sub>x</sub> mostrano, invece, un andamento generalmente crescente con velocità media per i veicoli a benzina, decrescenti per quelli diesel.

Fra le variabili connesse alle caratteristiche di potenza dell'apparato di propulsione, si trova la cilindrata, la quale, oltre ad essere un parametro distintivo per la normativa più recente della Comunità Europea, è anche un parametro ben correlato alla massa e alla potenza dei veicoli in commercio. Studi recenti mostrano una certa correlazione tra la cilindrata e le emissioni di NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> per i veicoli a benzina, a parità di velocità media del moto. Tali emissioni aumentano con l'aumentare della cilindrata per tutte le velocità medie studiate. Le emissioni di CO dei veicoli diesel aumentano, invece, con la cilindrata solo per velocità inferiori a circa 50 km/h. Anche le emissioni di IPA sono più alte quando la cilindrata è maggiore.

La potenza massica (potenza sviluppata dal motore per unità di massa) di un veicolo è un parametro, generalmente, correlato con l'accelerazione massima. Le emissioni di IPA sono una funzione decrescente della potenza massica, in maniera più accentuata nei veicoli a benzina. L'emissione di particolato dai veicoli diesel è, anch'essa, ben correlata alla potenza massica del veicolo.

La tipologia di dispositivi di controllo delle emissioni impiegati dal veicolo e la loro efficacia sono, frequentemente, legate alla disponibilità tecnologica e alle norme legislative di omologazione in vigore nell'anno della loro produzione. Per questa ragione, l'anno di produzione o gli estremi delle normative corrispondenti sono adoperate come parametro distintivo della tipologia veicolare.

Le possibilità di controllare le emissioni risiedono, in larga misura, nelle fasi di formazione delle emissioni stessa e si sviluppano su tre grandi possibilità di intervento:

- interventi primari su modifiche motoristiche più o meno avanzate, fino all'uso di propulsori completamente diversi dai convenzionali (motori ibridi ed elettrici, motori elettrici in linea con pile a combustibile);
- interventi secondari che puntano a migliorare o predisporre di nuovi di sistemi di trattamento dei gas di combustione (marmitte catalitiche) e delle perdite evaporative (trappole di adsorbimento);
- modifiche dei carburanti fino all'impiego di prodotti del tutto diversi da quelli convenzionali (idrogeno).

Gli interventi primari, oltre che verso la riduzione delle emissioni, convergono anche verso la riduzione dei consumi, a parità di prestazioni. Lo sviluppo di sistemi di iniezione diretta del combustibile, riciclo dei gas di scarico (EGR) e il controllo elettronico delle valvole sono i percorsi principali che consentiranno di raggiungere gli obiettivi, indicati dall'Unione Europea, per i nuovi motori. Sullo sfondo delle soluzioni motoristiche vi è l'impiego di motori elettrici e, soprattutto, ibridi, con batterie ricaricabili.



Figura 5: Vetture ibride con motori a benzina ed elettrico.

Alla seconda direttrice appartengono le marmitte catalitiche: quelle attualmente in uso sono strutture monolitiche a nido d'ape di ceramica o metallo, rivestite da sostanze attive, tipicamente rodio e platino. Il dispositivo è indicato anche con il termine a tre vie perché realizza contestualmente l'ossidazione di CO e idrocarburi (preferibilmente sul platino) e la riduzione degli ossidi di azoto (in prevalenza sul rodio). Si tratta di reazioni di riduzione degli ossidi di azoto, NO<sub>x</sub>, ad azoto molecolare, che utilizzano, come riducenti, le altre due forme inquinanti (CO ed idrocarburi), a loro volta ossidate a CO<sub>2</sub> e acqua.

Le emissioni evaporative sono controllate da trappole con sostanze adsorbenti, rigenerate automaticamente da flussi di aria calda e avviate successivamente alla combustione nel motore.

Una possibilità di attenuare le perdite risiede nella riduzione della volatilità del combustibile, normalmente espressa in termini di RVP (Reid Vapor Pressure).

Il controllo del particolato si realizza attraverso filtri, in grado di bloccare, con grande efficienza, le particelle con l'impiego di trappole filtranti, rigenerate, periodicamente, per combustione catalitica dei residui.

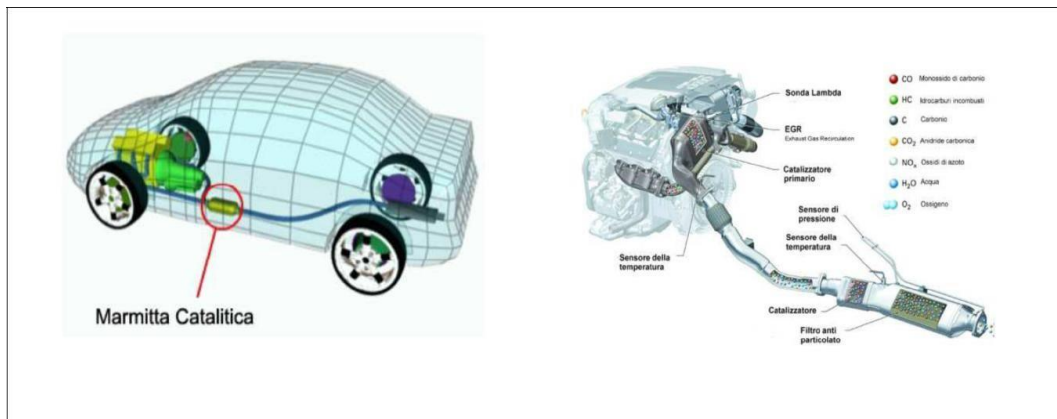


Figura 6: Marmitta catalitica e Filtro anti-particolato diesel DPF.

Alla terza direttrice appartiene la possibilità di impiegare, nell'autotrazione, carburanti formulati a partire da materie prime non petrolifere. Tra i carburanti alternativi vi è il GPL, Gas-Petrolio-Liquefatto, che è una miscela di propano e butano in diverse proporzioni. Esso può essere stoccato allo stato liquido (con una densità energetica paragonabile a quella della benzina). Inoltre ha un elevato numero d'ottano, che permetterebbe l'uso di motori ad alto rapporto di compressione con un aumento di rendimento rispetto alla benzina. Tale vantaggio è solo virtuale perché la rete di distribuzione è limitata anche nei Paesi in cui il GPL è più diffuso; per assicurare il rifornimento, i costruttori di autoveicoli non costruiscono motori funzionanti con il solo GPL. Di conseguenza, il veicolo deve sempre essere dotato di due serbatoi, per la benzina e per il GPL, con riduzione dello spazio e del carico utile.

Il gas naturale è una delle fonti energetiche più abbondanti e, negli ultimi decenni ha assunto un'importanza crescente come misura per ridurre le emissioni tossiche degli autoveicoli. Il principale svantaggio intrinseco del gas naturale è la sua bassa densità energetica che, a parità di percorrenza, implica l'uso di serbatoi di stoccaggio molto più voluminosi di quelli necessari per i carburanti liquidi.

A causa della loro diffusione relativamente bassa, i veicoli a GPL non sempre godono di dispositivi di trattamento dei gas di scarico altrettanto efficienti e sofisticati dei veicoli alimentati a benzina o a gasolio.

Infine, tra i carburanti puliti, vi è l'idrogeno. L'enorme interesse suscitato dall'idrogeno è dovuto al fatto che la sua combustione genera, virtualmente, solo

vapore d'acqua, quindi nei fumi di scarico non sono presenti sostanze tossiche né generatrici di effetto serra. Il suo impatto ambientale locale è, dunque, praticamente nullo. I principali ostacoli sono relativi ai problemi di sicurezza (in caso di perdite l'idrogeno diffonde molto rapidamente nell'aria, formando una miscela facilmente esplosiva) e alla densità di energia: il contenuto energetico per unità di volume dell'idrogeno liquido, è 3,5 volte inferiore a quello della benzina, il che comporta serbatoi piuttosto grandi e un'autonomia ridotta.

### **3.1 STATO DELLA MECCANICA DEI VEICOLI**

L'entità delle emissioni inquinanti di un veicolo a motore è fortemente influenzata dallo stato della meccanica del veicolo e del suo apparato di propulsione. L'entità dell'uso di un veicolo influenza lo stato di invecchiamento, a causa di fattori meccanici, consistenti nel deterioramento delle parti meccaniche, determinando un aumento dell'entità delle emissioni. Le attività di manutenzione contrastano il processo di invecchiamento delle parti meccaniche e tendono a ridurre l'entità media delle emissioni inquinanti.

La letteratura tecnica non è prodiga di studi sulla correlazione tra emissioni inquinanti e stato della meccanica dei veicoli stradali, in quanto i dati sperimentali sono di difficile interpretazione, sia a causa dell'interazione degli effetti contrastanti dell'usura e degli interventi manutentivi, sia dalla dipendenza di questi ultimi da un gran numero di fattori di non facile schematizzazione.

#### **3.1.1 DINAMICA DEL MOTORE E CONDIZIONI TERMICHE**

Vi è una correlazione tra la quantità delle sostanze emesse dal veicolo e le principali variabili del moto, ossia la velocità e l'accelerazione del veicolo. Le variabili legate alla dinamica del funzionamento del motore, che influenzano maggiormente le emissioni inquinanti, sono la velocità di rotazione del motore (espressa in numero di giri per minuto) e la quantità di combustibile immessa per ciclo (carico di combustibile).

Il prodotto tra la velocità e l'accelerazione rappresenta un'energia per unità di massa; l'energia persa dal veicolo durante un'accelerazione è direttamente correlata al valore di tale prodotto: maggiore è l'energia fornita dall'apparato di



propulsione, maggiore è anche il valore di tale prodotto e minore sarà l'efficienza della combustione nei cilindri, tanto più quanto il motore è prossimo alle condizioni limiti di funzionamento. All'aumentare del prodotto velocità per accelerazione risultano maggiori le emissioni di CO e di idrocarburi. Uno studio ha messo a confronto le emissioni rilevate a motore caldo su cicli di guida a velocità variabile con quelle rilevate su cicli a velocità stabilizzata (costante), per analoghi valori della velocità media; il risultato è stato che le emissioni rilevate a velocità costante sono risultate, per tutti gli inquinanti, minori di quelle rilevate a velocità variabile, con differenze più accentuate nel caso di veicoli a benzina e velocità più basse.

Le emissioni inquinanti di un veicolo sono influenzate dalla temperatura del sistema di propulsione. Si ha una prima fase di riscaldamento del motore, dal momento in cui esso viene avviato fino a quando non raggiunge il regime termico. Una volta raggiunto quest'ultimo, la temperatura si mantiene pressoché costante, durante tutto il tempo successivo di funzionamento del motore. A causa dell'impossibilità pratica di misurazione della temperatura interna dei cilindri, la definizione della temperatura di funzionamento a regime termico di un motore a combustione interna viene specificata attraverso un valore di riferimento assunto dal liquido di raffreddamento. Tale valore è convenzionalmente fissato in  $70^{\circ}\text{C}$  per l'acqua oppure di  $80^{\circ}\text{C}$  per l'olio.

Si definisce fase di funzionamento a caldo, o fase di funzionamento a regime termico, di un motore a combustione interna quella fase in cui il motore funziona a regime termico, in quanto la temperatura dell'acqua di raffreddamento ha raggiunto i  $70^{\circ}\text{C}$  (o dell'olio di  $80^{\circ}\text{C}$ ). Quando si parla di emissioni inquinanti, senza far riferimento alle temperature del motore, ci si riferirà sempre alla fase di funzionamento a regime termico.

Si definisce fase di funzionamento a freddo, o fase di funzionamento in transitorio termico, di un motore a combustione interna quella fase in cui il motore funziona in transitorio termico, in quanto la temperatura dell'acqua di raffreddamento è inferiore a  $70^{\circ}\text{C}$  (o quella dell'olio a  $80^{\circ}\text{C}$ ). In queste condizioni le emissioni

inquinanti e il consumo di combustibile sono maggiori di quelli medi della fase a regime.

La causa principale consiste nella bassa qualità della combustione conseguente alla bassa temperatura: il combustibile non vaporizza nella maniera migliore e si verificano fenomeni di combustione parziale o mancata. Durante il funzionamento a freddo, inoltre, per consentire la messa in moto a motore freddo, si ha un arricchimento della miscela.

Infine, maggiori emissioni e consumi sono determinati, nei veicoli dotati di catalizzatore, dal cattivo funzionamento dei convertitori catalitici con temperature dei gas di scarico troppo basse.

Mediamente il rapporto tra le emissioni misurate nelle due fasi di transitorio dopo una partenza a freddo (Cold Transient) e funzionamento a caldo (Hot Stabilized) è pari circa a 3 per gli HC incombusti e il CO, 1,5 per gli ossidi di azoto. Il consumo di combustibile, invece, non varia in maniera apprezzabile (meno del 20%).

Nella fase di transitorio dopo la partenza a motore caldo (Hot Transient), rispetto alla fase Hot Stabilized, si registrano immissioni di NOx più alte, ma di CO e HC più basse: questo fenomeno è giustificato dal fatto che la velocità media della fase Hot Stabilized è minore. Inoltre i veicoli a benzina si dimostrano essere più sensibili alla temperatura del motore rispetto ai diesel.

Le sovra-emissioni a freddo sono di entità importante per tutti gli inquinanti, in particolare per gli HC e gli IPA, con l'eccezione degli NOx.

### **3.2 NORMATIVE EUROPEE SULLE EMISSIONI DEI GAS DI SCARICO**

La legislazione Europea sulle emissioni dei veicoli stradali indica la quantità massima di inquinanti che il motore di un veicolo può emettere durante il suo funzionamento. In particolare, stabiliscono la quantità, in grammi per chilometro, di inquinanti che possono essere emessi (monossido di carbonio (CO), idrocarburi (HC), ossidi di azoto (NOx) e, per i veicoli diesel, il particolato). Essi, note con le sigle di Euro 0, Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4, Euro 5, Euro 6, variano a seconda

del tipo di veicolo: mezzi pesanti, automobili e motocicli. In Tabella si riporta un quadro completo relativo ai limiti di emissione allo scarico per autovetture previsti dalle normative UE con l'indicazione delle date relative alle immatricolazioni (segue CODICE EURO al capitolo 4.1.1).

Tabella 2: Standard alle emissioni per autoveicoli (g/km).

<b>Diesel</b>							
<b>Tipo</b>	<b>Data</b>	<b>CO</b>	<b>THC</b>	<b>NMHC</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC+ NO<sub>x</sub></b>	<b>PM</b>
<b>Euro 1</b>	Luglio 1992	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	0.14 (0.18)
<b>Euro 2</b>	Gennaio 1996	1.00	-	-	-	0.70	0.08
<b>Euro 3</b>	Gennaio 2000	0.64	-	-	0.50	0.56	0.05
<b>Euro 4</b>	Gennaio 2005	0.50	-	-	0.25	0.30	0.03
<b>Euro 5</b>	Settembre 2009	0.50	-	-	0.18	0.23	0.01
<b>Euro 6</b>	Settembre 2014	0.50	-	-	0.08	0.17	0.01
<b>Benzina</b>							
<b>Tipo</b>	<b>Data</b>	<b>CO</b>	<b>THC</b>	<b>NMHC</b>	<b>NO<sub>x</sub></b>	<b>HC+ NO<sub>x</sub></b>	<b>PM</b>
<b>Euro 1</b>	Luglio 1992	2.72 (3.16)	-	-	-	0.97 (1.13)	-
<b>Euro 2</b>	Gennaio 1996	2.200	-	-	-	0.500	-
<b>Euro 3</b>	Gennaio 2000	2.300	0.200	-	0.150	-	-
<b>Euro 4</b>	Gennaio 2005	1.000	0.100	-	0.080	-	-
<b>Euro 5</b>	Settembre 2009	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005*
<b>Euro 6</b>	Settembre 2014	1.000	0.100	0.068	0.060	-	0.005*
* si applica solo ai veicoli con iniezione diretta.							

Gli autofurgoni (veicoli commerciali leggeri, con peso totale ammesso inferiore a 2,5 t) sono soggetti alle medesime prescrizioni delle automobili. Gli autofurgoni grandi, con peso totale ammesso superiore a 2,5 tonnellate, possiedono valori limite più elevati sui gas di scarico.

I veicoli pesanti (autocarri e autobus con peso superiore a 3,5 t), dal 2013, sono soggetti a prescrizioni molto severe che prevedono un valore limite di NO<sub>x</sub> basso (0,4 g/kWh) e introducono un valore limite relativo al numero di particelle. Questi valori limite severi possono essere rispettati soltanto con un sistema di post-trattamento dei gas di scarico attraverso filtri anti-particolato e impianti DeNO<sub>x</sub>.

Autocarri e autobus devono essere esaminati periodicamente, inoltre, sono previsti controlli decentralizzati sui gas di scarico.

I motoveicoli sono soggetti a prescrizioni sui gas di scarico molto meno severe rispetto alle automobili, e, per questa ragione, numerosi motoveicoli leggeri e pesanti producono ancora quantità di inquinanti ben superiori rispetto alle automobili, cosicché la Commissione dell'Unione Europea ha proposto una tabella di marcia per una futura riduzione graduale dei valori limite per i gas di scarico, in base a questa i motoveicoli leggeri e pesanti saranno soggetti alle medesime prescrizioni delle automobili a partire dal 2021 circa.

### 3.3 ANALISI “WELL TO WHEEL”: DAL POZZO ALLE RUOTE

In Italia, il settore dei trasporti su ruote è quello che ha i maggiori consumi di energia e questi, sono in continua crescita, sebbene moderata. La crescita dei consumi è causata dall'aumento di merci e individui che necessitano di essere dislocati da un punto all'altro all'interno del tessuto organizzativo della società ed è contenuta grazie al perfezionamento dell'efficienza delle tecnologie.

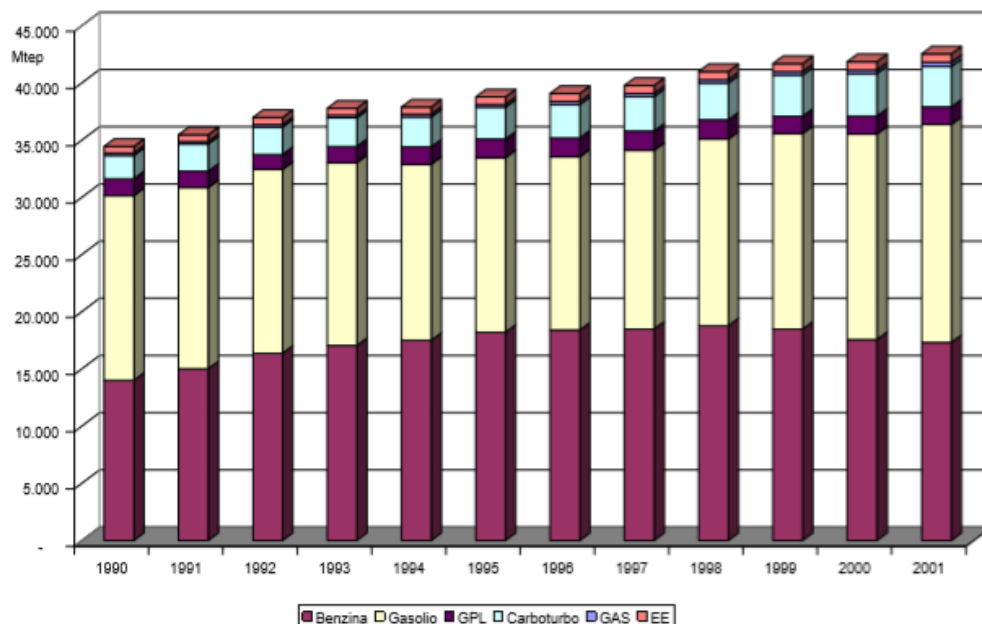


Figura 7: Consumi di energia nel settore dei trasporti.

Dalla Figura 7 è possibile notare che, in sostanza, tutta l'energia consumata per i trasporti è di origine fossile, con benzina e gasolio che, da soli, superano l'85%. Si evidenzia come è molto modesta l'incidenza dell'energia elettrica (EE).

Le emissioni di CO<sub>2</sub> sono legate esclusivamente alla quantità di combustibile bruciato e, il 29% delle emissioni provengono dal settore trasporti. Questo dato si lega anche al fatto che in Italia, quasi un terzo dei consumi di energia proviene da questo settore.

Emissioni tipiche dei motori a combustione interna sono il monossido di carbonio, CO, e gli ossidi di azoto, NO<sub>x</sub>. Risultano anche considerevoli le emissioni delle cosiddette polveri sottili, COVNM (Composti Organici Volatici Non Metallici). Nel caso dei sistemi energetici per la mobilità, tale analisi è detta well-to-wheel, dal pozzo alle ruote, Figura 8.

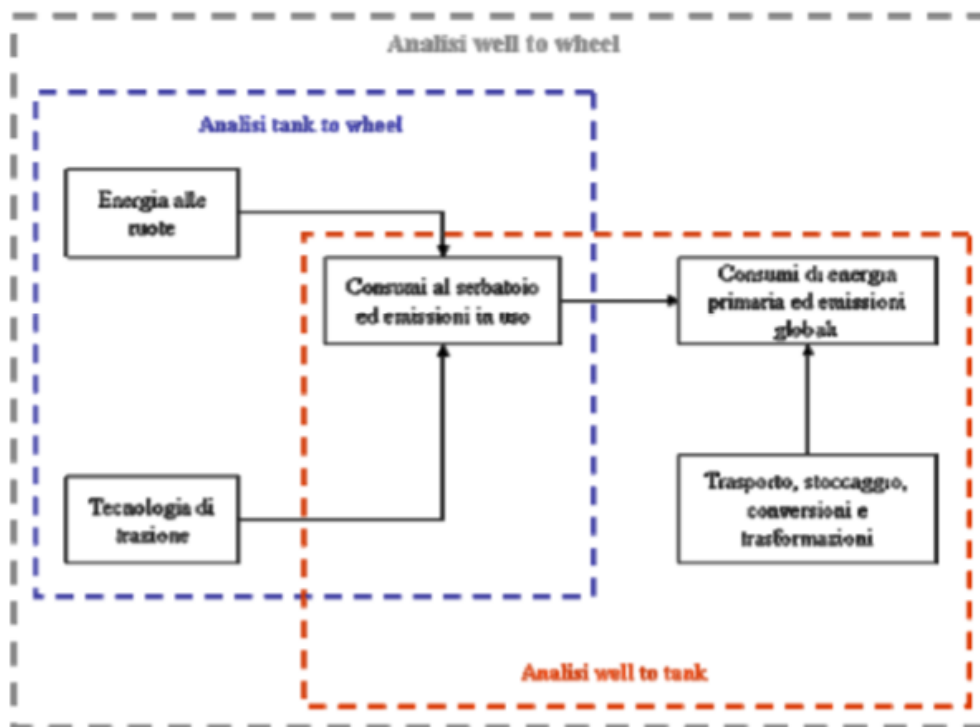


Figura 8:Schema per l'analisi Well to Wheel.

L'analisi può essere frazionata in due fasi separate:

- Tank-to-wheel;

- Well-to-tank.

La prima riguarda i processi all'interno del veicolo per la conversione in energia meccanica, ovvero dal serbatoio alle ruote; la seconda studia i processi di trasformazione necessari per acquisire la risorsa.

Dalla tecnologia di trazione e dall'energia necessaria alle ruote si ricavano i consumi al serbatoio e quindi le emissioni in uso. Dunque, dal tipo di risorsa utilizzata, considerando il trasporto, lo stoccaggio e le trasformazioni per avere la risorsa disponibile al serbatoio del veicolo, si ricavano i consumi di energia primaria e le emissioni globali.

### 3.3.1 TANK-TO-WHEEL

Il lavoro effettuato per spostare persone e merci dipende, oltre che dalla massa e dalla distanza, anche dalle caratteristiche del percorso e dalla modalità di percorrenza dello stesso.

La forza motrice da applicare ad un veicolo è:

$$F_m = m \cdot a + m \cdot g \cdot \sin \alpha + F_r$$

Essendo  $a$  l'accelerazione del mezzo,  $\alpha$  la pendenza della strada e  $F_r$  le forze resistenti. Queste ultime possono essere espresse nel seguente modo:

$$F_r = m \cdot (A + B \cdot V^2)$$

Con  $A$  e  $B$  coefficienti che dipendono dalla forma del veicolo, dalla densità dell'aria e da altri coefficienti empirici.

La forza motrice sarà quindi somma di tre aliquote: una che dipende dalle caratteristiche del moto, una dipendente dalle proprietà del percorso e l'altra proporzionale al quadrato della velocità.

$$F_m = m \cdot [a + g \cdot \sin \alpha + (A + B \cdot V^2)]$$

Per conoscere la potenza necessaria basterà moltiplicare per la velocità:

$$P_m = F_m \cdot V$$

Ipotizzando che le pendenze, positive e negative, si compensino, per la determinazione del fabbisogno energetico è indispensabile conoscere come evolve il moto. Per fare ciò, si utilizzano i cosiddetti cicli di marcia che riportano, col passare del tempo, la velocità del veicolo. È da notare che questi cicli sono

fortemente influenzati dalle condizioni del traffico e dallo stile di guida del conducente. Si possono avere condizioni diverse anche nello stesso arco di strada in diverse ore del giorno e specialmente queste variano enormemente da una città all'altra.

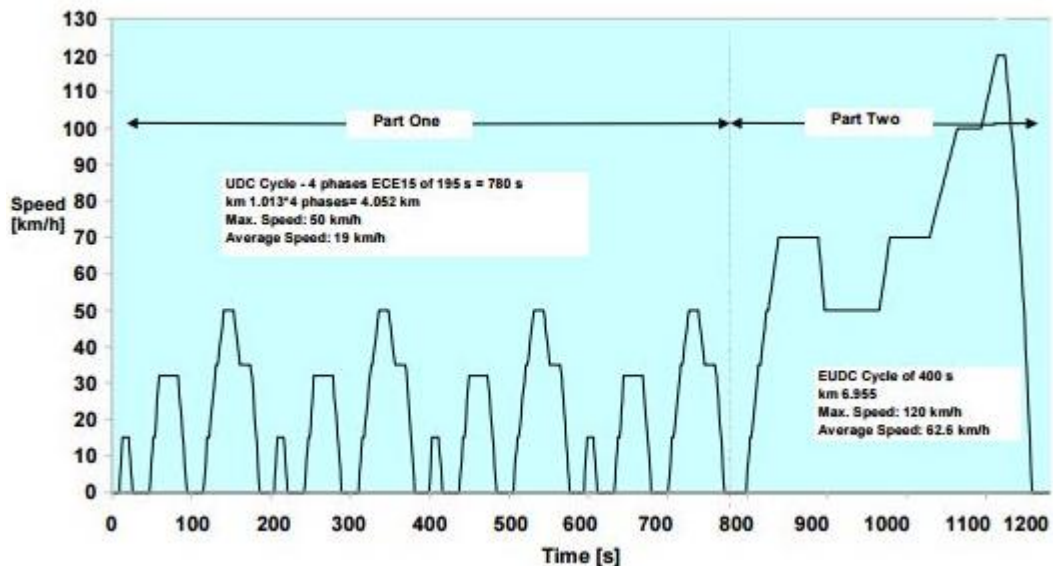


Figura 9: Ciclo di marcia NEDC.

All'interno dell'Unione Europea sono stati messi a punto dei cicli di marcia convenzionali per avere uno standard nella definizione dei fabbisogni energetici. Si hanno due cicli, uno urbano, UDC (Urban Driving Cycle), e uno extraurbano, EUDC (Extra Urban Driving Cycle). Dall'unione dei due cicli si ha il ciclo misto, NECD (New European Driving Cycle). Oltre che per la definizione dei consumi e delle emissioni, questi cicli sono anche utilizzati per le omologazioni dei veicoli (EURO I, II, ecc.).

Se si facesse riferimento ad un ciclo reale, ovvero un ciclo misurato con apposita strumentazione su di un veicolo, si noterebbe che questo è caratterizzato da variazioni di velocità, dovute allo stile di guida del guidatore, e quindi con accelerazioni maggiori. Da queste, come si è visto, dipende il consumo di energia per lo spostamento del veicolo.

La disomogeneità nel condurre il veicolo non è tenuta in conto nel NECD, anche se influenza significativamente i consumi e di conseguenza le emissioni; per tali

ragioni, sarebbe opportuno che in futuro tale fattore venisse adeguatamente considerato.

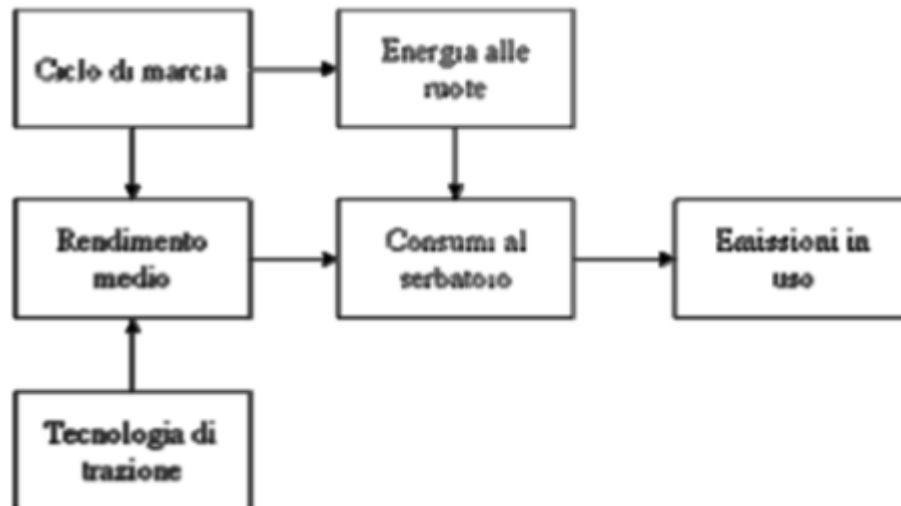


Figura 10: Schema per l'analisi tank to wheel.

Seguendo lo schema di Figura 10 è possibile procedere all'analisi dei consumi al serbatoio e delle emissioni in uso. Infatti, conosciuto l'utile di energia sulla base del ciclo di marcia e il rendimento medio del motore, si può calcolare l'energia necessaria da trasferire alle ruote e di conseguenza i consumi al serbatoio. Dal tipo di risorsa utilizzata per produrre l'energia è possibile stimare le emissioni in uso.

Prendendo come riferimento il ciclo ECE 15, precedentemente visto in Figura 9, è possibile calcolare la potenza alle ruote. Valutando un percorso in assenza di dislivelli ( $sena = 0$ ), la potenza alle ruote sarà composta solamente da due termini: ci sarà una componente dovuta all'accelerazione del mezzo e una componente dovuta alle resistenze del moto. La prima componente può essere positiva, negativa o nulla a seconda che il veicolo stia accelerando, decelerando o si muova a velocità costante; la seconda sarà sempre positiva e proporzionale alla velocità se il veicolo si sta muovendo o, nulla, in caso di veicolo fermo.

Possiamo diagrammare l'andamento delle due potenze, Figura 11, del ciclo ECE 15. L'area sottesa dal diagramma sarà pari all'energia alle ruote. Quando la potenza sarà positiva l'energia è assorbita dalle ruote, mentre quando la potenza sarà negativa, l'energia è resa alle ruote e questa aliquota dovrà essere dissipata frenando.



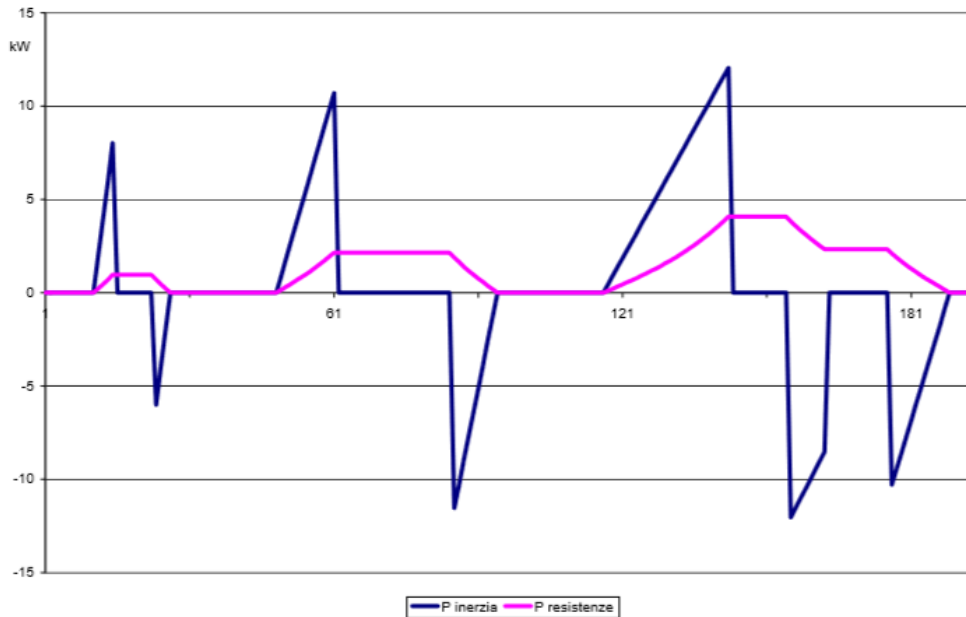


Figura 11: Potenza d'inerzia e potenza dovuta alla resistenza al moto su ciclo ECE 15.

Procedendo all'integrazione delle curve, è possibile calcolare l'energia da fornire alle ruote

$$ET_r = 454 \text{ kJ}$$

e l'energia da dissipare in frenata

$$ET_f = 172 \text{ kJ}$$

Sapendo che in tutto il ciclo ECE 15 il veicolo percorre una distanza pari a 1013m, è possibile definire l'energia alle ruote per km percorso:

$$Er = \frac{ET_r}{1,013} = 448 \text{ [kJ/(km)]}$$

$$Er = \frac{ET_f}{1,013} = 172 \text{ [kJ/(km)]}$$

Il consumo di energia al serbatoio sarà, avendo stimato il rendimento medio  $\eta$  della tecnologia considerata, sarà:

$$CE = \frac{Er}{\eta} \text{ [kJ/(km)]}$$

I calcoli riportati sono stati eseguiti per un'autovettura di grossa cilindrata con massa di 1.695 kg e sezione frontale di 2,03 m<sup>2</sup>. I risultati dipendono fortemente dalla massa del veicolo e dalla sua sezione frontale. È da notare, tuttavia, che il

ciclo considerato è solamente un riferimento e che i cicli reali richiedono potenze certamente maggiori. Inoltre, non sono stati computati i consumi degli ausiliari che vengono successivamente inseriti come una percentuale dei consumi al serbatoio.

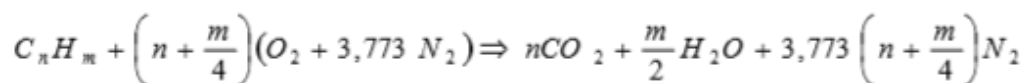
Per avere un'idea dei rendimenti delle tecnologie utilizzate per l'autotrazione è possibile osservare la Figura 12. In questa sono riportati i rendimenti che prendono atto di tutti i processi di conversione dell'intero sistema energetico.

<b>Tecnologia</b>	<b>Combustibile</b>	<b>Rendimento</b>
MCI	Benzina	18,0 %
	GPL	18,0 %
	Gasolio	25,0 %
	Metano	15,7 %
	Biodiesel	22,0 %
	Bioetanolo	16,5 %
	Idrogeno	18,0 %
Ibrido (MCI + elettrico)		35,0 %
FC	Idrogeno	45,0 %
Elettrico		80,0 %

Figura 12: Rendimenti indicativi delle principali tecnologie per autotrazione.

È da constatare che, le emissioni nel caso di trazione elettrica ed a idrogeno sono nulle.

Per il calcolo delle emissioni da parte di combustibili fossili è possibile utilizzare la formula di combustione in aria di un generico idrocarburo:



Tale formula è utilizzabile qualora la combustione del combustibile sia completa, ma in realtà ciò non avviene mai e questo comporta l'emissione di sostanze come CO, NOx, polveri sottili e ossidi di zolfo se sono presenti nel combustibile. Nel veicolo, d'altra parte, sono presenti strumenti per l'abbattimento delle emissioni (vedi i catalizzatori) e, questo comporta l'impossibilità del calcolo in modo teorico.

Dalla formula, però, si può notare che le moli di anidride carbonica prodotta sono pari agli atomi di carbonio nella molecola dell'idrocarburo e le moli di acqua sono la metà degli atomi di idrogeno presenti nella molecola di combustibile.

Conoscendo, quindi, il peso molare del combustibile è possibile risalire alle quantità di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O emesse. Poiché i rispettivi pesi molari di acqua e anidride carbonica sono 18g/mole e 44g/mole, i grammi di queste sostanze per grammo di combustibile bruciato, ovvero le emissioni specifiche, saranno:

$$E_{s[CO_2]} = n \cdot \frac{P_{mCO_2}}{P_{mc}} = \frac{n}{P_{mc}} \cdot 44$$

$$E_{s[H_2O]} = n \cdot \frac{P_{mH_2O}}{P_{mc}} = \frac{n}{P_{mc}} \cdot 18$$

Essendo  $P_{mc}$  il peso molare del combustibile.

Le emissioni per km percorso, una volta noti i consumi al serbatoio, sono quantificabili per mezzo della conoscenza del potere calorifico inferiore,  $PCI$ , del combustibile. Queste, dunque, saranno:

$$E = \frac{CE}{PCI} \cdot E_s \text{ [ g / km ]}$$

### 3.3.2 WELL-TO-TANK

Per la stima dei consumi dal punto di vista delle fonti primarie e quindi delle emissioni globali, è necessario fare riferimento al tipo di risorsa impiegata. Da questa dipende fortemente il conteggio dell'energia primaria.

Nel caso di combustibili di origine fossile è possibile fare riferimento ad un unico rendimento, chiamato rendimento alla pompa ( $\eta_p$ ), che tiene conto dell'energia necessaria affinché il combustibile sia disponibile al serbatoio del veicolo.

Verranno, quindi, inglobati gli impieghi di energia per:

- l'estrazione;
- il trasporto;
- la raffinazione;
- la fornitura.

Il consumo di energia da parte dei motori a combustione interna non è rinnovabile e in questo caso è definibile come:

$$CE_p = \frac{CE}{\eta_p} [kJ / km]$$

Il servizio elettrico è generalmente prelevato dalla rete di distribuzione o, prodotto in loco. Nel caso che il servizio energetico venga prelevato dalla rete, si devono considerare diversi fattori per il calcolo dei consumi di energia, quali:

- perdite di trasporto e di distribuzione;
- rendimento di conversione del parco elettrico nazionale;
- dividere le fonti per la produzione di energia elettrica in rinnovabili e non rinnovabili;
- energia utilizzata per l'eventuale utilizzo di combustibile per produrre il servizio elettrico (estrazione, trasporto, ecc.).

Per le emissioni globali bisognerà far riferimento alle emissioni specifiche dichiarate dal parco elettrico nazionale.

Noto il consumo di energia richiesto dal veicolo e precedentemente calcolato, tramite il rendimento di trasporto e di distribuzione ( $\eta_{TD}$ ), è possibile ricavare l'energia elettrica da produrre per ottenere l'energia necessaria per lo spostamento del veicolo di un chilometro:

$$EE = \frac{CE}{\eta_{TD}} [kJ / km]$$

Una volta conosciuta l'energia elettrica da produrre, per risalire all'energia elettrica primaria ci si serve del rendimento medio di conversione ( $\eta_m$ ), quindi:

$$EP = \frac{EE}{\eta_m} [kJ / km]$$

L'energia effettivamente consumata è quella che deriva da fonti non rinnovabili. Bisognerà, quindi, decurtare da tutta l'energia primaria prodotta l'aliquota proveniente da altre fonti. Per fare ciò si fa ricorso alla percentuale di energia non rinnovabile utilizzata per la produzione di quella elettrica,  $NR\%$ .

Il consumo di energia primaria non rinnovabile è dunque:

$$EPNR = EP \cdot NR \text{ , [kJ / km ]}$$

Per la stima delle emissioni, come detto precedentemente, bisognerà far uso delle emissioni specifiche, *ES*, per unità di energia prodotta, del parco elettrico italiano. Queste, per esempio, per quanto riguarda la CO<sub>2</sub>, ammontano a 560 g/kWh.

Le emissioni per km percorso saranno:

$$E = EPNR \cdot ES \text{ [g / km ]}$$

Se l'energia elettrica fosse prodotta in loco, si dovrebbe applicare la stessa procedura per il calcolo dei consumi in termini di fonti primarie e delle emissioni globali, senza però considerare le perdite causate dalla distribuzione.

## **4. CONTRIBUTO DEI CONDUCENTI E CONTRIBUTO POLITICO**

### **4.1 LE REGOLE DELL'ECODRIVING**

Il conducente, con il suo stile di guida, può limitare i consumi e di conseguenza le emissioni; è possibile infatti, con una guida più accorta, applicare le cosiddette regole dell'ecodriving, contribuendo ad un maggiore rispetto dell'ambiente. Ad esempio, è buona norma guardare sempre avanti per anticipare una reazione, come vedere in lontananza un semaforo rosso ed iniziare a decelerare lentamente, in modo da diminuire anche i tempi di sosta; si possono evitare accelerazioni e frenate brusche, che non hanno alcun beneficio sui tempi di percorrenza e che aumentano i tempi di sosta; inoltre, è possibile utilizzare marce alte per tenere basso il numero di giri e sprecare quindi meno energia per vincere le resistenze interne.

Con pochi e semplici accorgimenti è quindi possibile ridurre le emissioni di monossido di carbonio e di particolato anche del 60% e di anidride carbonica fino al 20%.

Anche il conducente ne può trarre innegabili benefici in termini di stress e di rischi di incidenti.

### 4.1.1 IL CODICE EURO

Il codice EURO, in vigore dal 1991, è un insieme di standard sulle emissioni inquinanti, che vengono applicati ai veicoli destinati al mercato europeo. Secondo tale codice, i veicoli vengono classificati in categorie di appartenenza e vengono imposte, anno dopo anno, nuove soluzioni volte a limitare le emissioni inquinanti. Le soluzioni di maggiore rilievo sono state:

- La marmitta catalitica (EURO 1): il catalizzatore ha il compito di accumulare in un filtro i prodotti nocivi della combustione e di introdurli poi all'interno della marmitta, dove vengono sottoposti ad una ulteriore combustione, in modo da aumentare le quantità di acqua e di anidride carbonica a fronte di una riduzione dei prodotti di combustione. Non risulta particolarmente efficiente nei brevi tragitti in quanto, per poter funzionare, ha bisogno di temperature di esercizio piuttosto elevate.

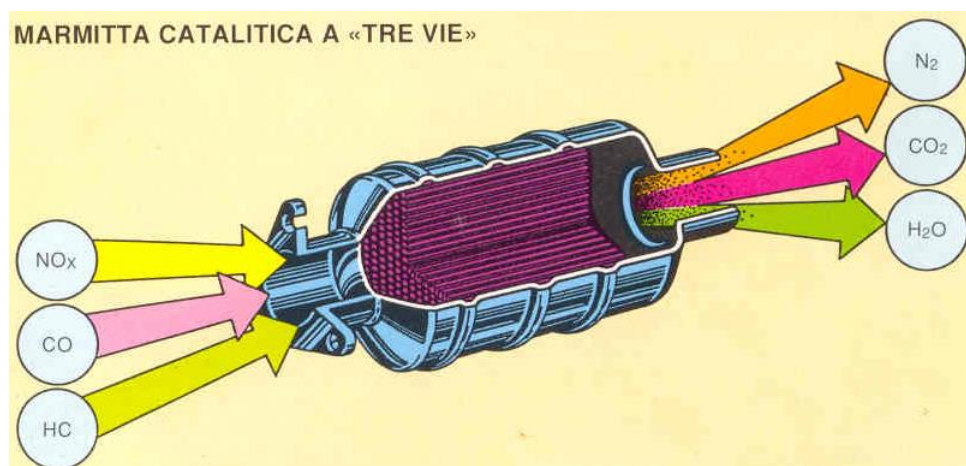


Figura 13: Marmitta catalitica a 3 vie.

- Sottosistema “emission relevant” tramite diagnostica a bordo OBD (EURO 3): mediante l’uso di sensori, è possibile in tal modo monitorare lo stato di salute di quei componenti che, se mal funzionanti, comportano un incremento delle emissioni. Il sistema OBD, in generale, fornisce anche utili informazioni che influenzano il consumo del veicolo, come l’indicatore di cambio marcia e il sensore di pressione dei pneumatici; questi ultimi sono parametri che invece vengono definiti dalla casa costruttrice.

- Filtro antiparticolato FAP (EURO 4): è un dispositivo che svolge il compito di aggregare il particolato dei motori diesel in agglomerati più grandi di particelle. In tal modo, questi vengono imprigionati in un filtro e non vengono quindi dispersi in atmosfera. Essendo quindi un sistema di accumulo, questo tende periodicamente ad intasarsi; nonostante ciò il computer di monitoraggio del sistema FAP “decide” quando effettuare la rigenerazione, ovvero quando bruciare gli agglomerati e liberare il filtro. Alcuni modelli sono dotati di un serbatoio contenente un additivo che diminuisce la temperatura necessaria per effettuare la rigenerazione.

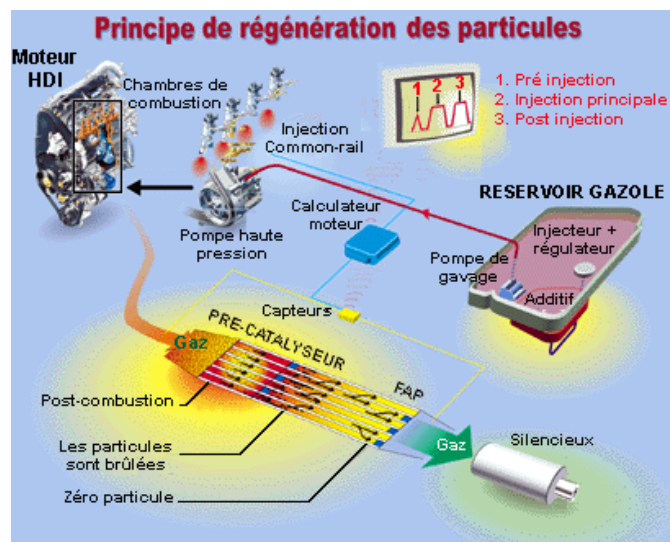


Figura 14: Sistema FAP PSA.

#### 4.1.2 I COMBUSTIBILI ALTERNATIVI

I carburanti alternativi a benzina e gasolio rappresentano un'altra importante strada da seguire per riuscire a ridurre le emissioni nocive. Un veicolo con carburante alternativo deve pur sempre soddisfare le esigenze di mercato, deve cioè garantire consumi inferiori, prestazioni, autonomia e sicurezza pari o superiori ad un veicolo tradizionale; infine costi di acquisto e manutenzione devono essere contenuti e non di molto superiori. Verrà di seguito fatta una breve descrizione dei carburanti alternativi più diffusi.

- Veicoli a GPL e Metano: rappresentano l'alternativa più diffusa ai combustibili tradizionali; le auto a benzina possono essere semplicemente convertite in un

sistema bifuel o direttamente acquistate con l'impianto già montato dalla casa produttrice; questa soluzione comporta il vantaggio di un alloggiamento dei serbatoi meno invasivo. Tramite un pulsante nell'abitacolo (o a volte è tutto gestito dalla centralina), è possibile scegliere quale dei due sistemi di alimentazione utilizzare. Gli impianti a GPL e Metano devono rispettare severe leggi per la sicurezza in caso di urti ai serbatoi, esposizione al calore estivo o incendio; inoltre i serbatoi non devono essere riempiti oltre l'80% del proprio volume per evitare un'eccessiva sovrappressione interna dovuta, ad esempio, ad un surriscaldamento. I vantaggi fondamentali dei sistemi CNG e GPL sono: costo dei carburanti inferiore, basse emissioni e la possibilità di circolare nelle zone a traffico limitato. Di contro, il costo d'acquisto dei veicoli è maggiore, le stazioni di rifornimento non sono diffusissime e la pericolosità della fase di rifornimento del gas richiede strutture particolari lontane dalle principali attività umane.

- **Biocarburanti:** rientrano in questa categoria Bioetanolo, Biodiesel, Biometanolo, Biogas e Bio-olio. I biocombustibili sono ottenuti dalle biomasse, come mais, bietole e canne da zucchero e sono considerate risorse rinnovabili, ovvero fonti di energia che si rigenerano in tempi così brevi da non compromettere la loro disponibilità e che a volte possono essere considerate inesauribili. Rispetto al petrolio, i biocombustibili producono molte meno sostanze inquinanti; sono inoltre totalmente biodegradabili e bruciano meglio poiché hanno un maggiore quantitativo di ossigeno. Tuttavia, il bilancio energetico può anche essere negativo per l'impatto ambientale; infatti si espande lo sviluppo della monocultura in aree non agricole, che rappresenta un motore della deforestazione. Sono in via di sviluppo degli studi sui biocarburanti di seconda generazione, che vengono prodotti non più da colture alimentari, ma da residui agricoli, che non hanno ancora raggiunto costi di produzione e livelli di commerciabilità competitivi.
- **Idrogeno:** facendo reagire il diidrogeno con l'ossigeno, è possibile produrre come unico prodotto di scarto il vapore acqueo, eliminando completamente le



emissioni di anidride carbonica. Può quindi essere utilizzato per alimentare motori ad accensione comandata al pari di altri carburanti come benzina, GPL e CNG. Il problema principale è che l'idrogeno molecolare è raro in natura e si trova spesso legato ad altri elementi; esso quindi non rappresenta una fonte primaria di energia come il petrolio, il metano o il gas naturale, in quanto deve essere prodotto artificialmente. Inoltre l'uso dell'idrogeno come combustibile alternativo presenta numerosi altri problemi; essendo volatile e leggero, i metodi di stoccaggio hanno dei problemi di sicurezza e di mantenimento, che richiedono strutture di rifornimento adeguate e diverse a seconda di come viene immagazzinato.

## **4.2 IL CONTRIBUTO DEI COSTRUTTORI**

### **4.2.1 TRAZIONE CON MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA**

Una prima classificazione dei motori a combustione interna può essere effettuata sulla base del ciclo termodinamico che questi sono tenuti a compiere, ciclo Otto e ciclo Diesel.

I combustibili come benzina, GPL, idrogeno e metano possono essere utilizzati per l'alimentazione di un ciclo Otto.

Sapendo che il rendimento ideale del ciclo termodinamico è:

$$\eta_{id} = \frac{L}{Q_{ass}}$$

Applicando le dovute equazioni termodinamiche e considerando il  $c_v$  costante si ricava:

$$\eta_{id} = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

essendo  $\gamma$  il rapporto tra i coefficienti specifici ed  $r$  il rapporto volumetrico di compressione della miscela aria-benzina. Si può notare che il rendimento ideale aumenta con l'incrementarsi del rapporto di compressione. In questo ciclo, però,

non si può superare una certa soglia di  $r$  (8 – 10), per evitare l'autoaccensione della miscela.

In realtà, il ciclo si discosta da quello ideale considerando principalmente che l'aspirazione e lo scarico non avvengono a pressione costante richiedendo del lavoro.

Si passa facilmente da un rendimento del 56,5% del ciclo ideale a un rendimento reale del 25%. Se si considera che il motore non lavora a regime costante (il suo regime di lavoro dipende dai cicli di marcia) e le perdite dovute alla fondamentale trasmissione, si avrà un rendimento alle ruote del solo 18%.

Ipotizzando di dover fornire energia alle ruote pari a 448 kJ, valore di energia precedentemente ricavato dal ciclo ECE 15, in Figura 15 è possibile osservare quanta energia da parte del combustibile deve essere fornita. Si è supposto che il MCI abbia un rendimento del 20% e che quello della trasmissione sia del 90%.

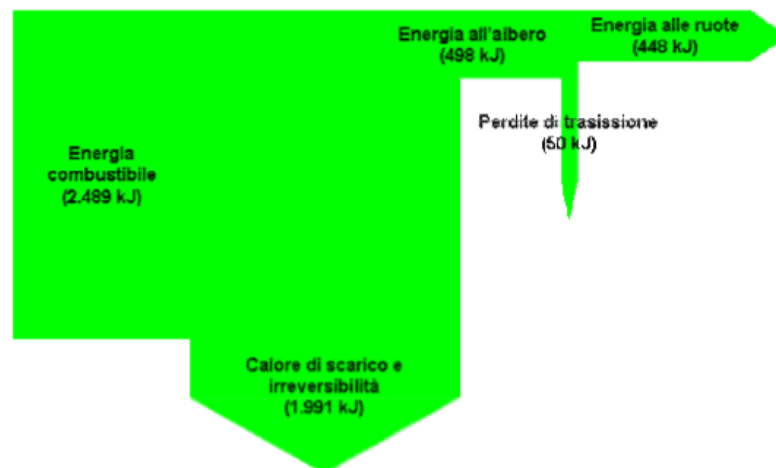


Figura 15: Flussi di energia dal serbatoio alle ruote in autovettura con MCI ciclo Otto.

I MCI che adottano il ciclo Diesel sono alimentati a gasolio o, con i cosiddetti biocombustibili.

Partendo dalla definizione di rendimento, con le appropriate equazioni termodinamiche, si arriva al rendimento ideale del ciclo Diesel:

$$\eta_{id} = 1 - \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\left(\frac{1}{e}\right)^\gamma - \left(\frac{1}{r}\right)^\gamma}{\frac{1}{e} - \frac{1}{r}}$$

avendo definito  $e$  come rapporto volumetrico di introduzione del combustibile, ovvero il rapporto tra la fine e l'inizio dell'espansione volumetrica, che avviene durante la combustione. Anche in questa circostanza il rendimento aumenta al crescere del rapporto di compressione.

Rispetto al ciclo Otto, qui la fase di compressione avviene con la presenza della sola aria nel cilindro e,  $r$  può raggiungere anche valori di 18 – 20.

Passando dal ciclo Diesel ideale a quello reale, si ottengono rendimenti del 35% anziché del 63%. Prendendo in considerazione anche le perdite nella trasmissione ed il funzionamento a regime variabile del motore, si giunge ad un rendimento alle ruote di circa il 25%.

Si possono vedere i flussi di energia dal serbatoio alle ruote così come fatto per veicolo con MCI ciclo Otto, Figura 16. I rendimenti del motore e della trasmissione sono rispettivamente del 28% e del 90%.

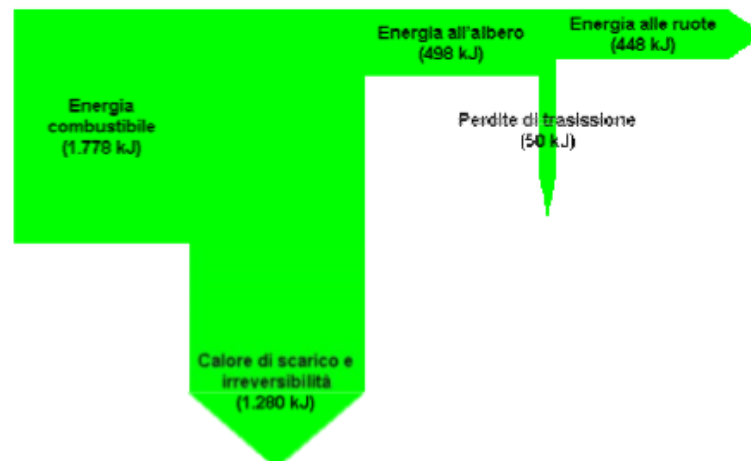


Figura 16: Flussi di energia dal serbatoio alle ruote in autovettura con MCI ciclo Diesel.

#### 4.2.2 LA TRAZIONE IBRIDA ED ELETTRICA

L'attenzione rivolta al rilascio di sostanze nocive per l'ecosistema e per la salute dell'uomo ha portato i maggiori costruttori di veicoli a studiare e sviluppare nuovi sistemi di propulsione alternativi agli ormai diffusissimi motori a benzina e diesel. I maggiori progressi compiuti in termini tecnologici e di mercato nell'ambito dei sistemi di trazione alternativi riguardano il sistema di propulsione ibrido.

Per ibrido si intende un veicolo con due differenti sistemi di propulsione accoppiati, che sono nella maggior parte dei casi un motore termico ed uno elettrico. Il sistema ibrido ha il compito di recuperare l'energia spesa nella fase di frenatura e di immagazzinarla in appositi accumulatori, che solitamente sono agli ioni di litio.

La prima auto ibrida ha origini ben più antiche di quanto si possa pensare; il primo veicolo full hybrid, infatti, si deve a Ferdinand Porsche il quale, nel 1900, presentò il concept "Lohner-Porsche Semper Vivus", la prima auto "senza trasmissione". La trazione, infatti, era garantita da due motori elettrici sincroni, montati direttamente all'interno dei mozzi anteriori ed alimentati da una batteria dal peso di oltre 400 kg, che garantiva un'autonomia di 50 km ed una velocità massima di 50 km/h.



Figura 17: Dettaglio motore elettrico.

Il nome Semper Vivus è dovuto proprio al fatto che, per ridurre la capacità della batteria e quindi anche peso ed ingombri, l'auto è stata dotata di un motore termico a quattro cilindri Daimler da 16 CV collegato tramite un albero ad un generatore elettrico. L'auto entrò in produzione con nome di Lohner-Porsche Mixte Hybrid e rappresenta il primo esempio di vettura ibrida con sistema in serie.



Figura 18: Il prototipo della Lohner-Porsche Mixte Hybrid.

La produzione si fermò in quanto il prezzo elevato la rese un'auto esclusiva ed il ritorno economico non compensava le spese per gli sviluppi tecnici costanti cui l'auto era soggetta. Inoltre le auto a benzina diventavano sempre più affidabili ed economiche.

Il successo commerciale nell'era moderna delle auto ibride si deve a Toyota, che nel 1997 fece debuttare il modello Prius; oggi, tutti i più grandi costruttori hanno nella propria gamma le versioni Hybrid dei loro modelli di punta.

La tecnologia ibrida è utilizzata anche in modelli sportivi e supersportivi in quanto consente di aumentare notevolmente l'efficienza del veicolo riducendone i consumi e, di anno in anno, viene affinata sempre di più ed integrata con soluzioni innovative. I benefici in termini di emissioni inquinanti sono notevoli; basti pensare che in un veicolo convenzionale, traffico e conducente hanno il doppio dell'influenza sui consumi. Inoltre le emissioni di monossido di carbonio possono ridursi anche dell'80% e l'ossido di azoto di oltre il 60%. Infine si riducono anche le emissioni di anidride carbonica.

Esistono tre diversi livelli di sistema ibrido, a seconda della differenza tra potenza del propulsore elettrico e potenza totale installata:

- ibridazione minima: la percorrenza in modalità puramente elettrica è estremamente ridotta;
- ibridazione leggera: il sistema elettrico non è in grado di completare da solo un intero ciclo di guida normalizzato;
- ibridazione totale: è possibile percorrere un normale ciclo di guida normalizzato in modalità puramente elettrica.

Spesso si commette l'errore di parlare di livello di microibridazione per veicoli dotati di sistema stop and start; questa è una definizione impropria in quanto l'uso di questo sistema non comporta la necessità di installare un secondo sistema di propulsione.

Vi sono tre differenti schemi di propulsione ibrido:

- Ibrido serie: il motore termico non è collegato alle ruote ed ha la funzione "range extender", ovvero di aumentare l'autonomia del mezzo, alimentando un generatore che carica le batterie che forniscono energia al motore elettrico che, a sua volta, la converte in moto. I veicoli dotati di schema ibrido serie non necessitano di un sistema di trasmissione complesso, in quanto i motori elettrici operano in una grande vastità di regimi di rotazione ed il motore termico non subisce né accelerazioni né decelerazioni, dovendo operare sempre ad un numero di giri che garantisca la massima efficienza. Questa configurazione permette inoltre di spegnere il motore termico e di operare in modalità puramente elettrica.

La mancanza di una trasmissione pone un limite alla velocità massima, problema che invece non è presente negli ibridi in parallelo.

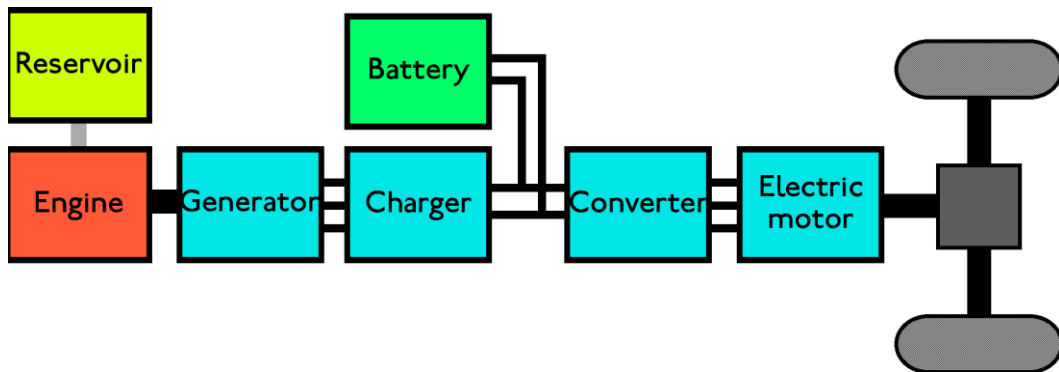


Figura 19: Schema ibrido serie.

Supponendo di utilizzare un motore termico con ciclo Diesel, in Figura 20 si possono osservare i flussi di energia dal serbatoio alle ruote. I rendimenti di tutti i componenti sono deducibili dalle perdite causate dagli stessi.

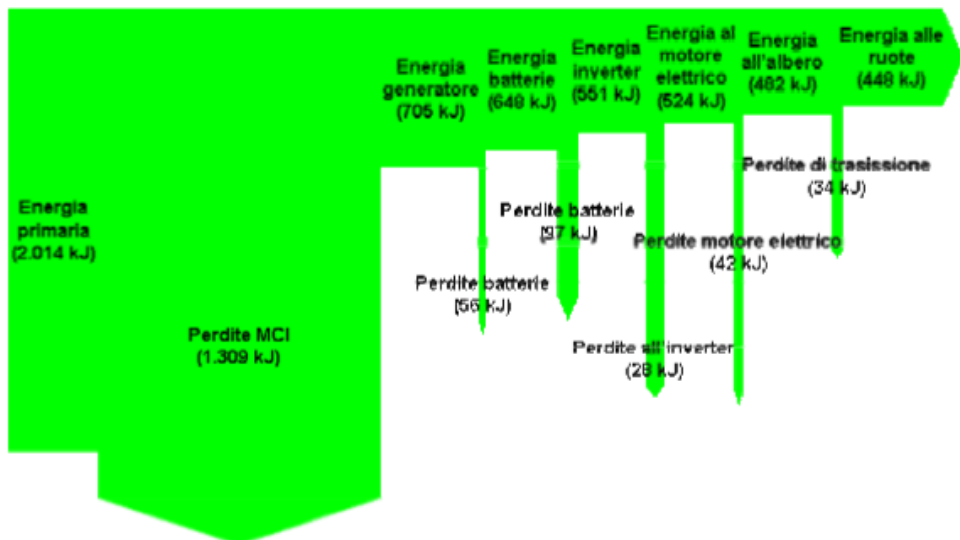


Figura 20: Flussi di energia dal serbatoio alle ruote per un ibrido serie.

Il rendimento che si ottiene è di circa il 22%, di poco inferiore a quello di un veicolo Diesel tradizionale. In compenso il veicolo ibrido serie può circolare come vettura a zero emissioni (con alimentazione a sole batterie) ed è possibile il recupero dell'energia cinetica in frenata. Con l'attuazione di questi accorgimenti è possibile raggiungere dei rendimenti alle ruote prossimi al 30%.

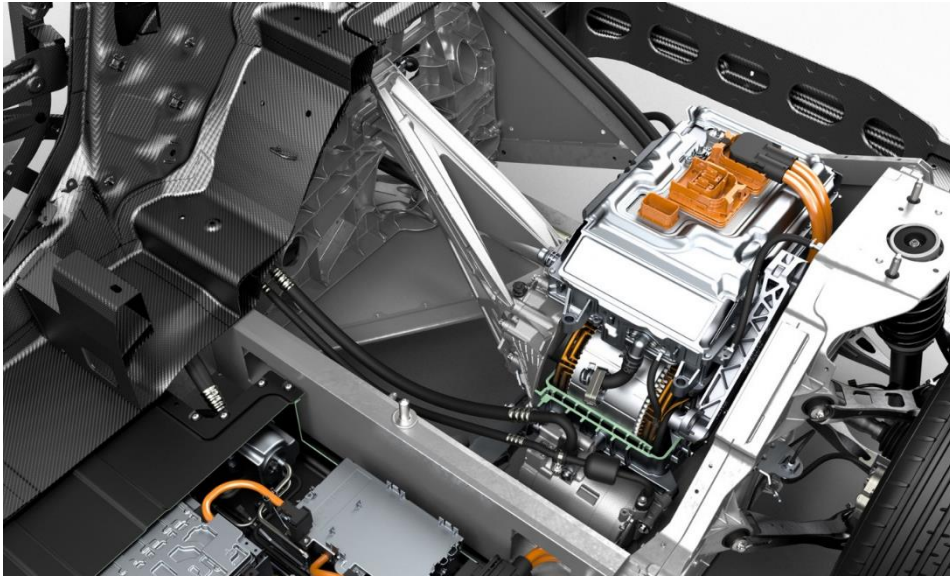


Figura 21: Sistema di propulsione BMW i3.

La BMW i3 è un validissimo esempio di auto dotata di schema ibrido in serie, progettata per la mobilità in città; garantisce, infatti, un'autonomia di 130-160 km, che può aumentare fino a 270-300 con l'ausilio del piccolo motore termico a due cilindri collocato accanto al motore elettrico (sull'asse posteriore) che si attiva soltanto quando il livello della batteria è scarso.

- Ibrido parallelo: è lo schema più diffuso; entrambi i motori forniscono la coppia alle ruote. Generalmente il motore termico svolge il ruolo principale, mentre quello elettrico fornisce una potenza aggiuntiva nei casi di necessità, come in partenza o in fase di accelerazione.



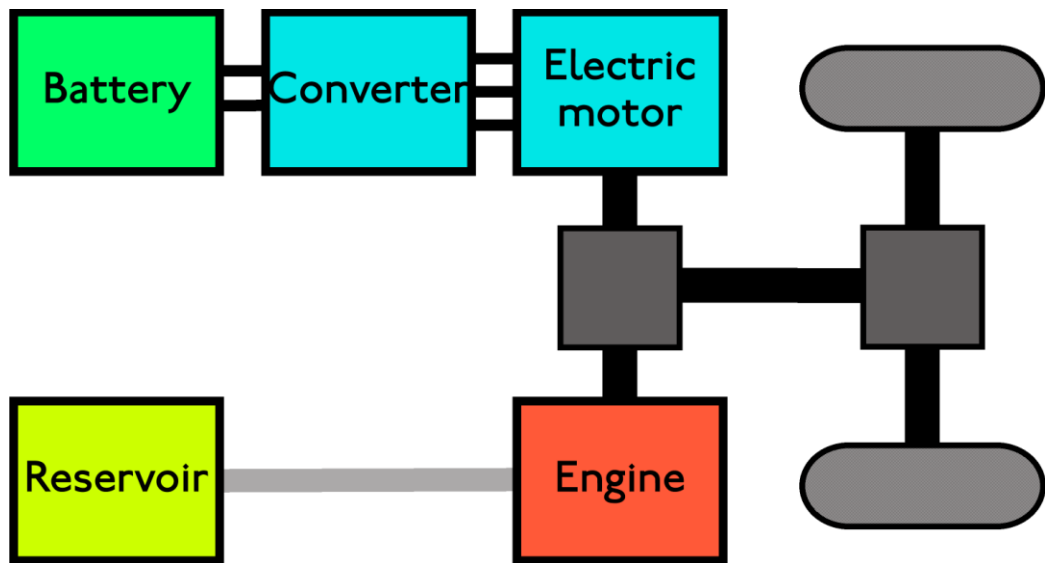


Figura 22: Schema ibrido parallelo.

- Ibrido bimodale: è uno schema misto che permette di collegare e scollegare i motori, anche singolarmente, alle trasmissioni.

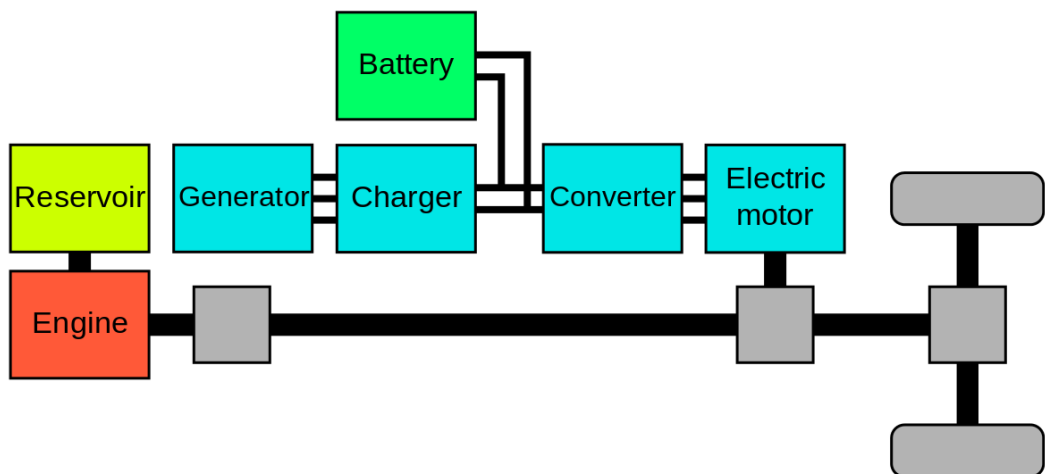
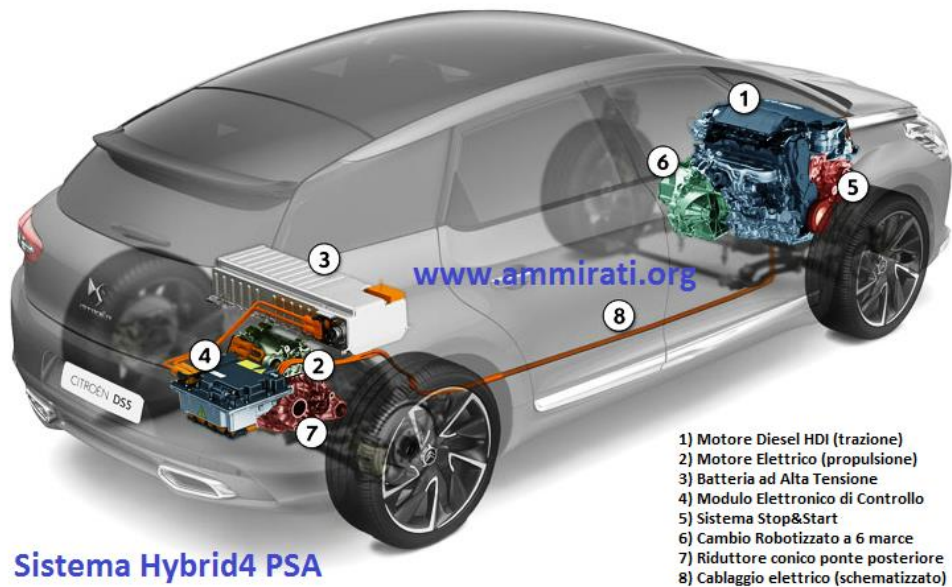


Figura 23: schema ibrido bimodale.

#### 4.2.3 IL SISTEMA HYBRID 4 DEL GRUPPO PSA

La tecnologia Hybrid 4 sviluppata dal gruppo PSA rappresenta una delle evoluzioni maggiori dei sistemi ibridi e, con una potenza che può raggiungere i 200 CV garantisce un compromesso sorprendente tra prestazioni e rispetto dell'ambiente. Lo schema ibrido è quello in parallelo; la trasmissione a quattro ruote motrici è garantita dal motore termico che aziona l'asse anteriore e da quello

elettrico che aziona il posteriore; i due motori comunicano tramite il sistema “by wire” gestito da un modulo elettronico di controllo.



#### Sistema Hybrid4 PSA

Figura 24: Sistema Hybrid 4 in una Citroen DS5.

Il motore termico è il tipico Diesel HDI presente nella gamma Peugeot-Citroen che sviluppa una potenza massima ed una coppia massima rispettivamente di 163 CV e 300 Nm. La motorizzazione elettrica fornisce invece una potenza di picco di 37 CV ed una coppia massima di 200 Nm disponibile nella modalità SPORT, che permette di ottenere la massima efficacia o di ricaricare la batteria in fase di recupero di energia.

Gran parte dei veicoli ibridi equipaggiati con sistemi di nuova generazione, sono dotati, infatti, di diverse modalità di guida che possono essere selezionate a discrezione del guidatore o, a volte, “scelte” dall’auto stessa, in modo da potere sempre garantire la massima efficienza a seconda delle condizioni della strada o semplicemente delle esigenze del conducente. Il sistema Hybrid 4 può funzionare secondo quattro diverse modalità di guida, selezionabili da una rotella multifunzione:



Figura 25: Modalità di guida di un sistema Hybrid 4.

- **Modalità AUTO:** volta al piacere di guida, è una modalità che gestisce in maniera automatica la trazione ibrida e che permette di viaggiare anche in modalità puramente elettrica al di sotto dei 70 km/h. Rappresenta la funzione più utilizzata, in quanto garantisce comfort e consumi sempre ottimizzati. Durante la fase di cambio marcia, il motore elettrico si avvia in modo da far percepire il meno possibile la mancanza improvvisa di coppia. La massima potenza disponibile è di 163 CV e al di sopra dei 120 km/h rimane attivo soltanto il motore termico.
  - **Modalità SPORT:** viene variata la taratura del pedale dell'acceleratore e privilegiata la potenza dell'unità elettrica. In questa modalità si ottiene un comportamento dell'auto più sportivo, con i rapporti che vengono mantenuti più a lungo ed una risposta maggiore. Il motore elettrico, come nella modalità AUTO, garantisce la coppia nelle fasi di cambio marcia. La potenza massima disponibile è di 200 CV.
  - **Modalità ZEV:** è la modalità "Zero Emission Vehicle" e permette di viaggiare utilizzando soltanto l'unità elettrica.
  - **Modalità 4WD:** permette di viaggiare con la trazione attiva su tutte e quattro le ruote, migliorando la sicurezza e la versatilità dell'auto; il motore termico resta sempre attivo e garantisce la coppia all'asse anteriore mentre il motore elettrico gestisce l'asse posteriore e, in caso di batteria al livello minimo, interviene il motorino di avviamento del sistema Stop and Start che fornisce una potenza, seppur bassa, alle ruote posteriori. La massima potenza disponibile è di 190 CV.
- Le auto dotate di questi sistemi forniscono anche numerose informazioni, come la percentuale di utilizzo del sistema ibrido, i dati di marcia, il livello della carica

della batteria e le sagome del veicolo che rappresentano le interazioni tra i due motori ed il battery pack. Inoltre, grazie ad indicatori di consumo/generatore di energia, è possibile sapere in quali fasi si sta recuperando o consumando energia, a seconda delle condizioni di uso del veicolo.

Il battery pack viene raffreddato tramite un sistema di ventilazione comune a quello di climatizzazione dell'abitacolo ed è montato in posizione trasversale sopra al motore elettrico.

Il sistema Hybrid 4 garantisce una riduzione dei consumi di assoluto rilievo; su una Citroen DS5 nel ciclo urbano, la riduzione può arrivare fino al 38%, mentre sul ciclo misto si può arrivare fino al 23%.

#### **4.2.4 I SISTEMI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA**

Il principale obiettivo dei costruttori di veicoli ibridi (ed elettrici) è quello di equipaggiare i propri mezzi con sistemi di accumulo dell'energia che possano sempre garantire le migliori performances in termini di durabilità, capacità di accumulo, potenza disponibile, pesi ed ingombri. Esistono, a tal proposito, diverse tipologie di accumulatori:

- **Elettrochimici:** tra i vari tipi di accumulatori elettrochimici che si sono susseguiti nel tempo, gli studi maggiori sono attualmente concentrati sulle batterie al litio, caratterizzate da un'elevata potenza specifica, dagli ingombri estremamente ridotti e da un'autonomia superiore alle precedenti generazioni di batterie. Essi, inoltre, non soffrono di effetto memoria né di auto-scarica. Tuttavia perdono in modo permanente la loro capacità nel tempo, ciò avviene indipendentemente dai cicli di carica e scarica e la loro durabilità è fortemente influenzata dalla temperatura di esercizio. Sono accumulatori già in uso nei cellulari, nei computer e in generale per prodotti tecnologici di ultima generazione e sembrano rappresentare il futuro degli accumulatori per l'autotrazione. Un altro grande punto di forza delle batterie al litio è il peso; esse, infatti arrivano a pesare anche 5 volte in meno rispetto alle tradizionali batterie al piombo, in quanto gli ioni di litio hanno una densità di carica molto elevata.

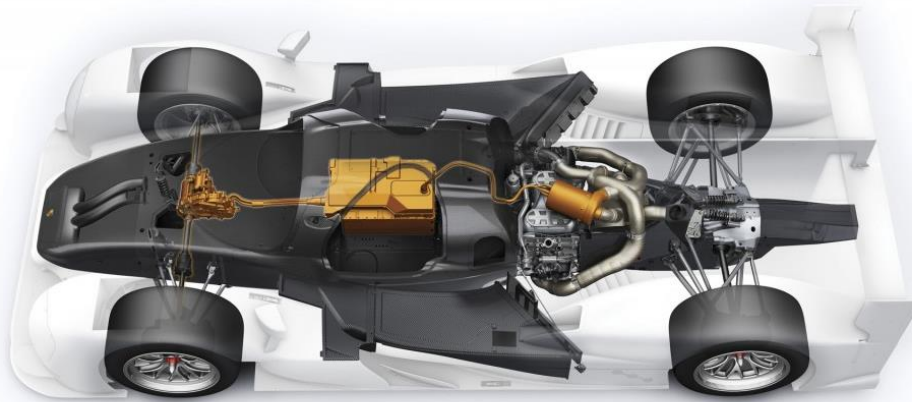


Figura 26: Energy Recovery Sistem Porsche 919 Hybrid; gli accumulatori utilizzati sono al litio.

- **Elastici:** si servono di macchine idrauliche per trasformare l'energia meccanica in energia di pressione e sono caratterizzati da un'elevata potenza specifica.
- **Cinetici:** rientrano in questa categoria i volani, dei quali viene sfruttata l'energia cinetica rotazionale per accumulare energia e per rilasciarla quando necessario. Questo sistema ha trovato applicazione anche nel motorsport con l'introduzione del sistema kers nelle formula uno e fino all'anno scorso è stato utilizzato da Audi nel WEC, per poi essere rimpiazzato con gli accumulatori elettrochimici. Le difficoltà che si incontrano nella progettazione di questo sistema riguardano le perdite per attrito con l'aria, che ad elevati regimi di rotazione non sono trascurabili e che impongono l'utilizzo di una camera sottovuoto entro cui porre il volano; combattere gli effetti della forza centrifuga con leghe sempre più resistenti; utilizzare cuscinetti a sospensione magnetica per ridurre ulteriormente l'attrito meccanico.

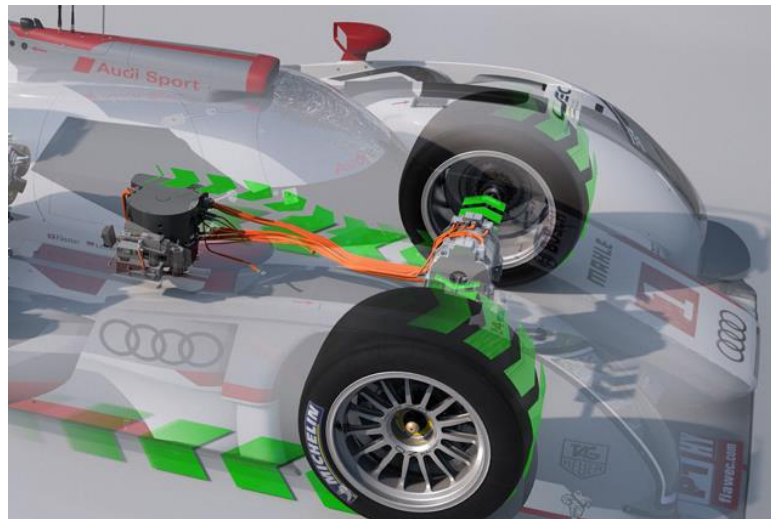


Figura 27: Sistema di recupero dell'Energia Audi R18 e-tron quattro.

- **Magnetodinamici:** l'accumulo magnetodinamico consiste in un volano la cui parte rotante è costituita da magneti annegati in fibre di carbonio e la cassa esterna costituisce lo statore di un motore elettrico. Quando il rotore accelera (statore che fornisce potenza), il sistema accumula energia; quando rallenta (statore che richiede potenza), la cede.
- **Elettrostatici:** rientrano in questa categoria i supercondensatori. Il loro funzionamento è basato sul principio dei classici condensatori elettrici, ovvero sull'accumulo dell'energia separando le cariche elettriche sulle due armature (che in genere sono in alluminio) fino a quando non si raggiunge l'equilibrio elettrostatico (condensatore completamente carico). Il condensatore può mantenere l'energia immagazzinata per un tempo prestabilito; in questo modo viene mantenuta una differenza di potenziale che può essere sfruttata da un carico esterno, il quale sottraendo una quantità di carica dalla seconda armatura, crea uno squilibrio che determina l'inizio della fase di scarica del condensatore.

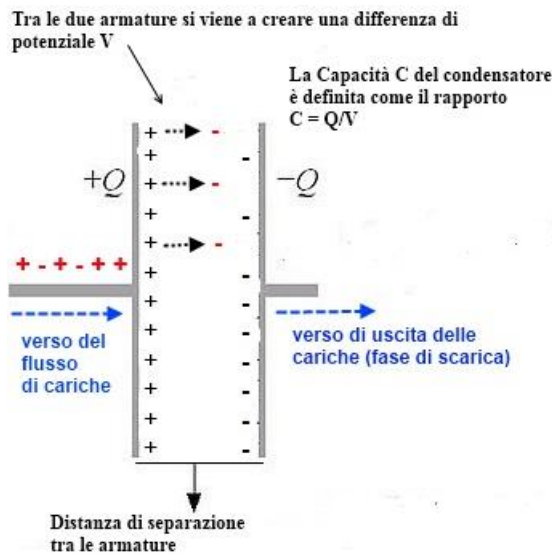


Figura 28: esempio di accumulatore elettrostatico.

Rispetto ai condensatori normali, i supercondensatori possono avere capacità anche di tre ordini di grandezza superiori. L'aspetto negativo di questi sistemi di accumulo sono il peso e la quantità di carica accumulabile, che è piuttosto limitata e dipende dall'ampiezza delle superfici di interfaccia elettrodo/elettrolita. Questa soluzione per l'accumulo di energia è stata adottata da Toyota nel WEC e ha contribuito alla vittoria del campionato mondiale endurance 2014.

Sono in fase di sviluppo altri metodi per convertire in energia elettrica quella che verrebbe altrimenti dispersa in calore. Audi, ad esempio, ha messo a punto un sistema che sfrutta il continuo molleggio del corpo vettura, sia su strada liscia che dissestata, accumulando l'energia cinetica del veicolo attraverso un sistema chiamato eROT; alla base di questo sistema vi sono degli ammortizzatori elettromeccanici rotativi a controllo elettronico che contengono al loro interno due piccoli alternatori che immagazzinano l'energia in una batteria di piccola capacità. L'energia accumulata può essere utilizzata per alimentare la batteria o altri piccoli sistemi che necessitano di corrente, come le barre antirollio elettromeccaniche o i compressori elettrici che equipaggiano i modelli di punta.

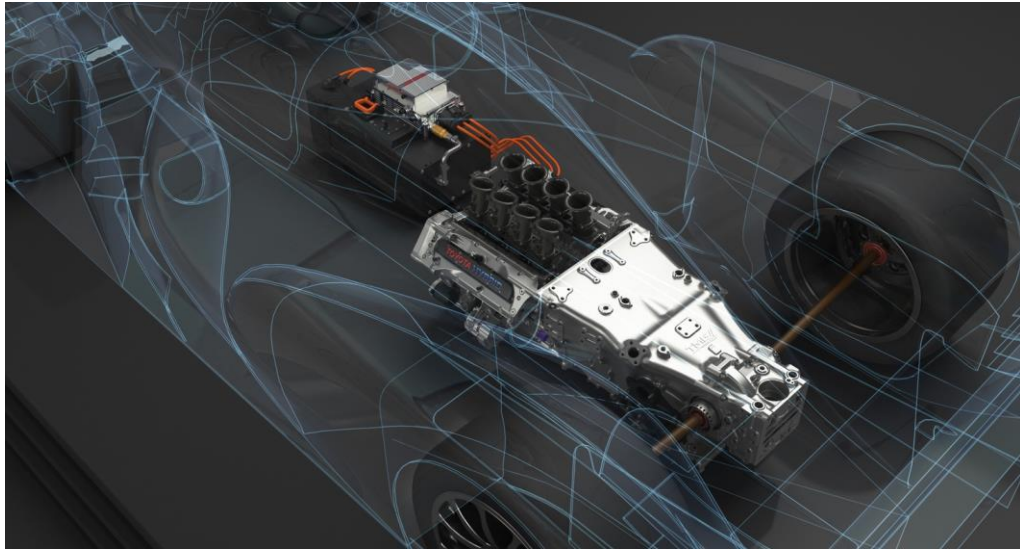


Figura 29: sistema di recupero dell'energia Toyota TS030 HYBRID.

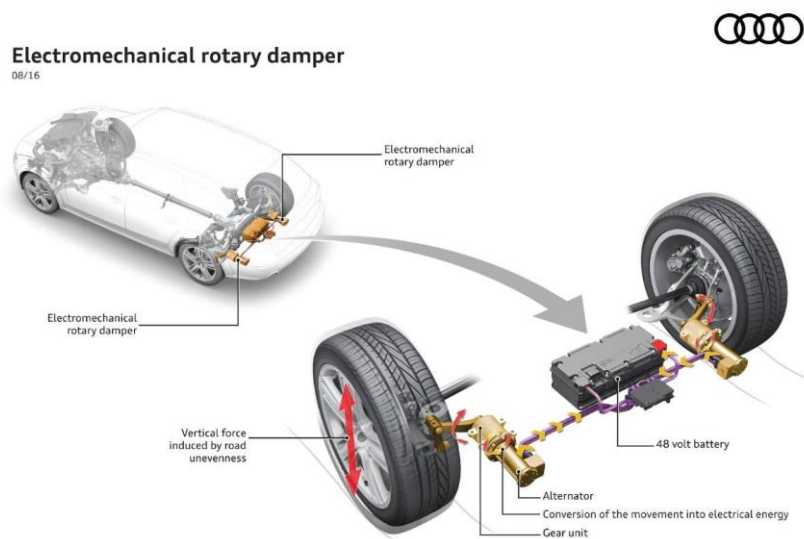


Figura 30: sistema Audi eROT.

#### 4.2.5 LA TRAZIONE ELETTRICA

Un'altra tipologia di veicolo in forte via di sviluppo negli ultimi anni è quello a propulsione elettrica, ovvero dove la trazione è garantita da un motore elettrico, a sua volta alimentato da batterie che devono essere periodicamente ricaricate con elettricità proveniente dalla rete o mediante altri sistemi.

Le prime auto elettriche risalgono alla prima metà dell'ottocento ed erano ben più diffuse di quelle a benzina; erano infatti preferite a queste ultime per la loro silenziosità, per l'assenza di vibrazioni, perché non emettevano sgradevoli odori e



per l'assenza del cambio. Proprio per questi motivi, risultavano facili da guidare e richiedevano poca manutenzione ed avevano riscontri molto favorevoli presso il pubblico femminile. Basti pensare che nel 1897 a New York tutti i taxi erano elettrici. I limiti tecnologici delle batterie tuttavia non permettevano velocità superiori ai 35 km/h ed autonomie di oltre 50 km, rendendo questi veicoli più adatti per piccoli spostamenti e per la circolazione urbana. Nacquero così anche le prime soluzioni per una mobilità più sostenibile, come il primo car sharing, grazie al quale le auto potevano essere sia condivise che noleggiate. A partire poi dagli anni '20, si invertì la tendenza a favore delle auto a benzina; i motivi furono molteplici:

- La scoperta di grandi giacimenti di petrolio abbassò notevolmente il costo del carburante;
- L'invenzione del motorino di avviamento fece abbandonare la difficoltosa accensione a manovella;
- I primordiali silenziatori applicati alle marmitte diminuirono il rumore;
- L'invenzione del radiatore evitava i fenomeni di surriscaldamento, a favore di spostamenti più veloci, di un'autonomia maggiore del mezzo e di una vita utile del motore superiore.
- Infine, la catena di montaggio di Henry Ford abbattè definitivamente i costi di produzione e trasformò l'automobile con motore a scoppio in un prodotto destinato al mercato di massa.

La prima grande casa automobilistica che si occupò della produzione di un veicolo elettrico è stata la Peugeot nel 1941 con il modello VLV (Voiture Légère de Ville). Durante il periodo della guerra, infatti, il mercato dell'automobile subì grosse ripercussioni, in quanto la vasta produzione di mezzi da guerra diminuì drasticamente la disponibilità del carburante. Per questi motivi benzina e metallo cominciarono a scarseggiare e si iniziò a pensare a soluzioni alternative destinate al mercato non bellico, che videro la trazione elettrica al centro dell'interesse della casa del Leone. La Peugeot VLV era una piccola cabriolet elettrica dal contenutissimo peso di 365 kg (accumulatori compresi) grazie all'impiego

dell'alluminio per la realizzazione della carrozzeria e della tela per il tetto ripiegabile.

Il grande vantaggio delle auto elettriche è quello di essere poco rumorose e di non produrre emissioni nocive, risolvendo quindi il problema dell'inquinamento atmosferico ed acustico. Bisogna però specificare che a livello globale le emissioni di anidride carbonica non è detto che diminuiscano, in quanto dipendono dalla metodologia di produzione dell'energia elettrica; di questo grande "dibattito" se ne parlerà in seguito.

L'impiego di una trazione totalmente elettrica consente di sfruttare al meglio la struttura e gli ingombri del veicolo, favorendo quindi una maggiore flessibilità nella progettazione dello stesso. A favore della propulsione elettrica vi è anche un'efficienza del 90%.

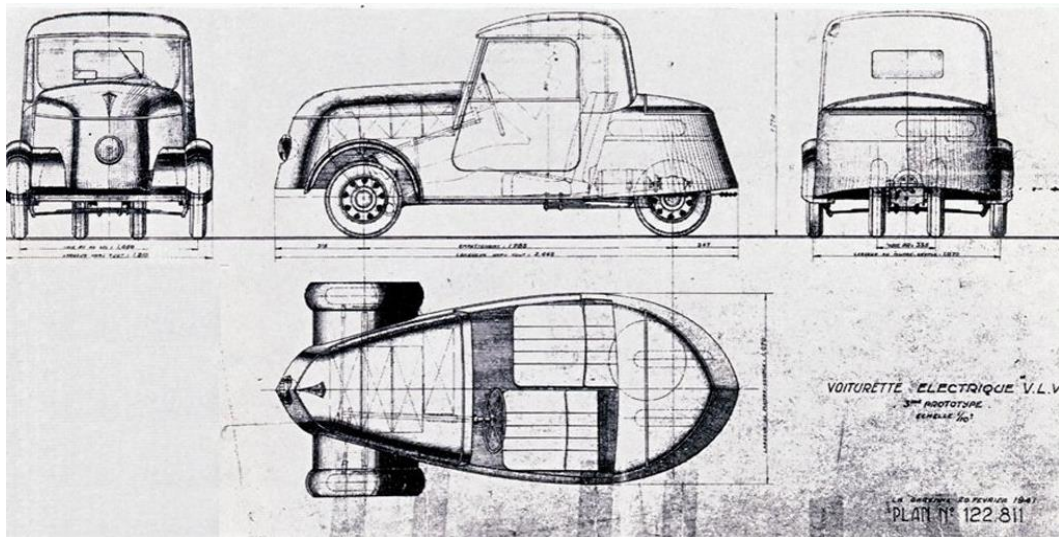




Figura 31: disegni originali della Peugeot VLV.

Il sistema di trazione di un veicolo elettrico è essenzialmente costituito da:

- batterie per lo stoccaggio dell'energia a bordo;
- inverter, sistema di regolazione;
- motore elettrico.

Per il calcolo del rendimento alle ruote dovrà essere presa in considerazione la serie dei rendimenti dei singoli componenti. Noti i rendimenti di scarica della batteria, dell'inverter e del motore si avrà:

$$\eta = \eta_{SB} \cdot \eta_I \cdot \eta_{ME}$$

Tenendo presente che le perdite nella trasmissione sono basse, soprattutto per l'assenza del cambio e, prendendo atto che le macchine elettriche sopracitate hanno un elevato rendimento, quello alle ruote risulterà prossimo al 73%.

Due importanti accorgimenti si possono attuare per migliorare la resa di un'autovettura dotata di trazione elettrica:

1. l'utilizzo di motori-ruota, che permettono di abolire la trasmissione, inserendo i motori elettrici direttamente nelle ruote, con l'inconveniente dell'aumento del peso e quindi dell'inerzia alle alte velocità;
2. il recupero dell'energia in frenata, di grande interesse, possibile grazie alla natura reversibile del motore elettrico che può funzionare anche da generatore, convertendo, così, parte dell'energia cinetica del veicolo in quella elettrica. Non è possibile recuperare interamente l'energia di frenata per le limitazioni dovute alla massima potenza del generatore, nonché per i vari rendimenti dei componenti, vi è una soglia minima atta a soddisfare un recupero di potenza utilizzabile.

Un altro fattore essenziale è lo stato di carica (State of Charge, SOC) della batteria. Il sistema di accumulo di energia elettrica, infatti, va dimensionato affinché questo possa sempre fornire energia necessaria alla trazione del veicolo; oltre a ciò non deve essere mai completamente carico al fine di poter recuperare l'energia in frenata. Usualmente si dimensiona il pacco batterie affinché abbia un SOC tra 30 – 70% dello stato di carica globale dell'accumulo.

Quest'ultimo accorgimento, oltre ai precedenti vantaggi, allunga il ciclo di vita delle batterie in quanto evita inutili e gravosi carica-scarica.

I flussi di energia di un'auto elettrica per un utile alle ruote 448 kJ sono riportati in Figura 32.

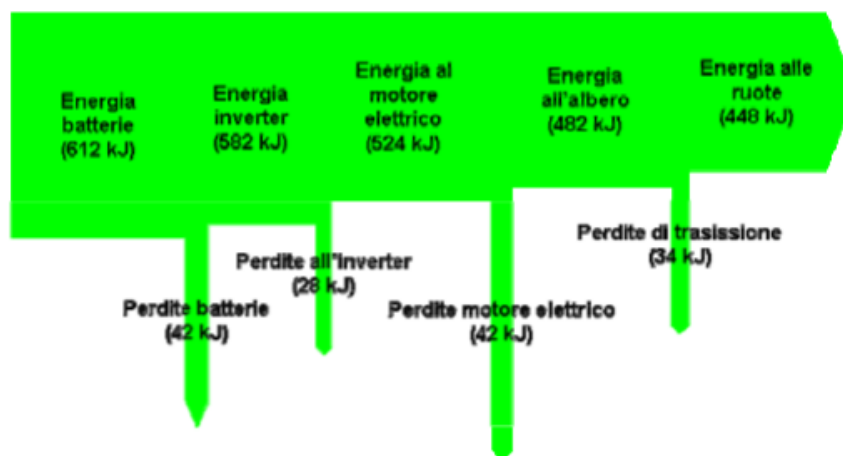


Figura 32: Flussi di energia dalle batterie di accumulo alle ruote di un'auto elettrica.

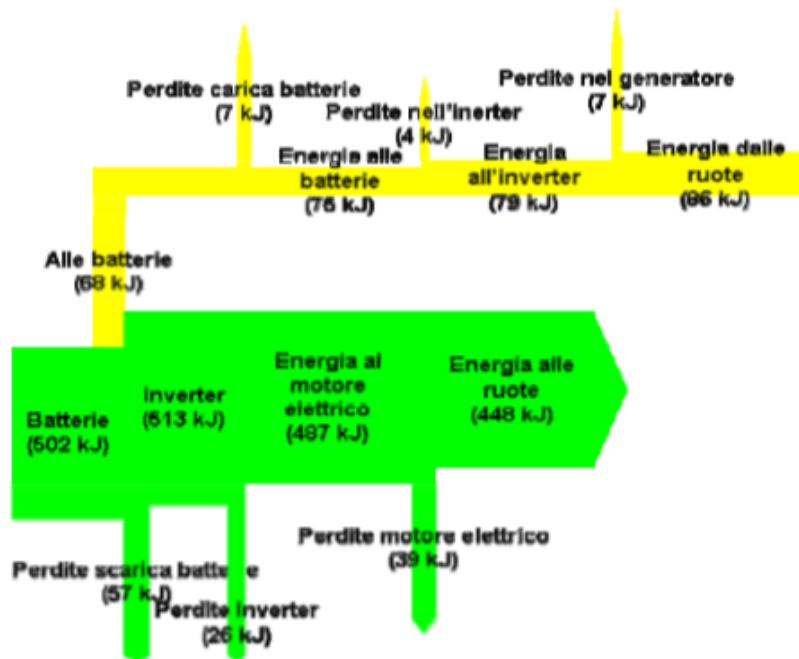


Figura 33: Flussi di energia di un'auto elettrica con motori ruota e recupero dell'energia in frenata.

Invece, se l'auto è provvista di motori-ruota e supponendo di recuperare il 50% dell'energia nelle frenate ( $ER_f$ ), 86 kJ per il ciclo ECE 15, il rendimento globale del sistema di trazione sarà pari a:

$$\eta = \frac{448}{502} = 89,2\%$$

È possibile osservare i flussi di energia in Figura 34. Si è supposto che, i rendimenti del motore/generatore, dell'inverter e di carica della batteria fossero rispettivamente 92%, 95% e 90%.

Tuttavia questi tipi di veicoli presentano problemi riguardanti le limitate autonomie e i tempi di carica abbastanza lunghi. A causa delle batterie, anche il peso dell'autovettura è alquanto elevato. I costi di produzione non sono per niente irrilevanti.

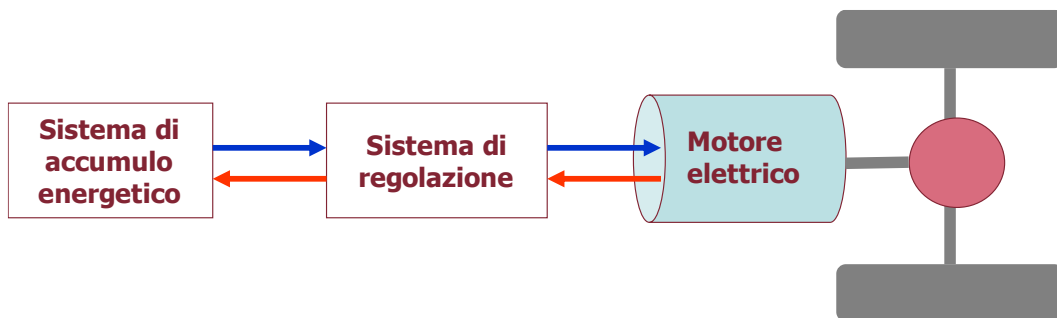


Figura 34: Schema di un powertrain elettrico.

#### 4.2.6 MERCEDES CLASSE B ELECTRIC DRIVE

Come ci ha ormai abituati nel motorsport, Mercedes ancora una volta sorprende con l'introduzione della versione elettrica della classe B, un'auto apparentemente "normale" in grado di ingannare anche i più accaniti tradizionalisti.

Esteticamente, infatti, l'auto si presenta uguale alle versioni benzina e diesel, sia fuori che dentro; l'unico elemento aggiuntivo sono gli indicatori di recupero/rilascio di energia e quello dell'efficienza del motore. Anche l'indicatore del livello di carica della batteria è identico a quello del livello di carburante presente nelle versioni normali.



Figura 35: cruscotto della Mercedes Classe B Electric Drive.

### B-Class Electric Drive



Figure 2-1: Electric drive components of the B-Class Electric Drive

Figura 36: componenti elettrici della Mercedes Classe B Electric Drive.

L'indole elettrica viene fuori non appena si inizia la marcia; il motore da 180 CV, infatti, montato sull'asse anteriore, dispone fin da subito di una coppia di 340 Nm, che garantisce una accelerazione 0-100 km/h in poco più di 7 secondi e di raggiungere una velocità massima autolimitata di 160 km/h. Il pacco batterie è a base di ioni di litio, realizzato in collaborazione con Tesla ed è posto tra l'assale anteriore e quello posteriore, in modo da non compromettere minimamente gli ingombri dell'auto e l'abitabilità, che restano identici alle versioni "normali". La casa della stella a tre punte dichiara un'autonomia di 230 km nella modalità di guida più parsimoniosa ed è possibile ricaricarla in meno di tre ore tramite colonnina pubblica o wallbox privata (stazione di ricarica domestica); la presa domestica, invece, assicura una ricarica in 9 ore.

Il sistema di guida prevede tre diverse modalità di funzionamento:

- Economy Plus (E+): è la modalità di guida più attenta ai consumi, perfetta per l'uso cittadino; fornisce la potenza di 88 CV ed una velocità massima di 110 km/h.
- Economy (E): modalità particolarmente orientata al comfort, con una potenza fornita di 133 CV che garantisce comunque una buona autonomia con prestazioni di maggiore rilievo rispetto alla modalità E+.

- Sport (S): è la modalità che garantisce una guida più dinamica. La potenza fornita è quella massima disponibile. I 340 Nm di Coppia permettono uno scatto al limite del pattinamento e risulta apprezzabile il lavoro svolto dal sistema ESP nella gestione dell'accelerazione.

Il comportamento della vettura, nonostante gli oltre 1600 kg di peso, risulta sempre dinamico e brillante, grazie anche ad una taratura piuttosto rigida delle sospensioni.

I costi di gestione sono inferiori rispetto alle versioni con motore a combustione e l'auto è totalmente ad impatto ambientale nullo; Enel, infatti, che si occupa anche di installare le stazioni di ricarica domestiche, assicura la rinnovabilità dell'energia utilizzata per la ricarica delle batterie.

Il prezzo dell'auto è di ben 17.000 euro superiore a quello della versione base e si aggira sui 41.000 euro, in linea comunque con la concorrente BMW i3.

### **4.3 L'AUTO ELETTRICA INQUINA SEMPRE MENO DELL'AUTO CON MOTORE TERMICO?**

La risposta è immediata: se l'energia è prodotta da fonti rinnovabili, allora l'auto elettrica inquina meno di una con motore a combustione. Risulta utile infatti andare a studiare le emissioni, non direttamente ai gas di scarico, ma quelle che derivano dalla produzione dell'energia elettrica. E' stata condotta una ricerca poi pubblicata sulla rivista Environmental Science and Technology, basata sull'analisi delle polveri sottili in 34 grandi città cinesi; il risultato è stato che l'energia necessaria a far funzionare le auto elettriche produce una maggiore quantità di polveri sottili rispetto a quelle emesse dalle auto tradizionali. Infatti, in Cina, dove le auto elettriche sono il doppio di quelle a benzina (grazie anche a notevoli agevolazioni economiche messe in atto dal Ministero delle Finanze del Paese), circa l'85% dell'energia elettrica è prodotta da carburanti fossili.

Questo studio è stato portato avanti confrontando l'intero ciclo di vita dei veicoli elettrici con quello dei mezzi tradizionali; gioca un ruolo fondamentale l'impatto che deriva dalla produzione delle batterie e dal loro smaltimento.



In generale è possibile affermare che il contributo all'effetto serra dato dalle auto elettriche risulta essere addirittura il doppio di quello dato dalle auto tradizionali. Questo dato risulta "vero" in ogni Paese che, come la Cina, si serve dei combustibili fossili per produrre energia. Tra questi Paesi non vi sono nazioni europee, nelle quali l'energia viene prodotta da fonti rinnovabili e dove l'impatto ambientale dell'intero ciclo di vita delle auto elettriche, a conti fatti, è minore di quello delle auto a combustione.

## **5. MOBILITÀ SOSTENIBILE**

Nell'intero pianeta, ogni giorno, si muovono tre categorie: persone, merci ed informazioni, indipendentemente o più frequentemente in maniera congiunta. La società contemporanea è, rispetto a quelle precedenti, contrassegnata da un movimento continuo. Questa società deve provvedere a sistemi energetici in grado di garantire una mobilità dinamica e veloce per le tre categorie.

La società deve garantire anche un ambiente più pulito ed un consumo delle risorse naturali non eccessivo; questi due punti, vanno in contrasto con gli odierni sistemi energetici per la mobilità, il cui miglioramento è abbastanza difficile data la loro enorme e tradizionale diffusione nell'intero globo.

La catena energetica per la mobilità, oramai radicalizzata, si basa sul consumo di combustibili fossili, attraverso i motori a combustione interna, capaci di realizzare la mobilità tanto desiderata e necessaria per ogni singolo individuo della società odierna. Questi combustibili, però, sono una risorsa primaria non illimitata in natura, che danno origine come si è detto ad emissioni sia a livello locale che mondiale.

### **5.1 LA MOBILITÀ URBANA SOSTENIBILE**

La libera circolazione delle persone e delle merci è una condizione essenziale per l'esercizio delle libertà individuali e per lo svolgimento degli scambi a livello nazionale e internazionale. Il sistema dei trasporti e la relativa dotazione di infrastrutture (strade, porti, aeroporti, ferrovie) realizzano l'accessibilità necessaria ad un territorio, al fine di consentire ai cittadini la partecipazione alla

vita sociale, economica e politica. La mobilità delle persone e delle merci produce tuttavia effetti negativi sull'ambiente naturale e sulla salute umana, in termini di inquinamento atmosferico, acustico, di congestione stradale ed incidentalità. La mobilità urbana è una componente essenziale del sistema sociale, la gran parte degli spostamenti avviene in distanze di corto-medio raggio. In Italia circa il 75% degli spostamenti avvengono entro un raggio di 10 km (Fonte: ISFORT). In Italia vi sono oltre 8.000 Comuni, tuttavia oltre il 25% della popolazione (circa 15 milioni di abitanti) risiede nei 45 Comuni con oltre 100.000 abitanti. La politica dei trasporti rappresenta uno dei settori politici comuni da più di 30 anni. Essa è stata avviata con la sentenza della Corte di giustizia dell'Unione europea (CGUE) del 22 maggio 1985 sul ricorso per carenza presentato dal Parlamento europeo nei confronti del Consiglio. Il tema della «mobilità sostenibile» assumerà maggiore importanza dal 2020, nel contesto del costante aumento delle emissioni di gas a effetto serra, che minacciano di compromettere gli obiettivi climatici dell'Unione europea. Già nei trattati di Roma gli Stati membri avevano sottolineato l'importanza di una politica comune dei trasporti dedicando all'argomento un intero titolo. Quella dei trasporti è stata quindi una delle prime politiche comuni della Comunità europea; l'obiettivo principale era l'istituzione di un mercato comune dei trasporti, per il conseguimento della libera prestazione dei servizi e dell'apertura dei mercati. Tale obiettivo è stato ampiamente raggiunto ed inoltre anche i mercati ferroviari (servizi di trasporto nazionale di passeggeri) si apriranno progressivamente alla concorrenza. Con l'apertura dei mercati dei trasporti è essenziale creare nel contempo condizioni di concorrenza eque per i diversi tipi di trasporto. Per tale motivo, l'armonizzazione delle norme legislative, regolamentari e amministrative nazionali, ivi incluse le condizioni quadro di natura tecnica, sociale e fiscale, ha acquisito un'importanza crescente nel corso del tempo. Nonostante la diminuzione del traffico registrata a seguito della crisi economica del 2008, sul medio termine, i volumi trasportati, di persone come di merci, sono aumentati, come conseguenza del completamento del mercato interno dell'Unione, dell'abolizione delle frontiere interne, della riduzione dei prezzi dei

trasporti derivante dall'apertura e dalla liberalizzazione dei mercati, nonché delle modifiche a livello di sistema di produzione e di gestione delle scorte.

Se da un lato il settore dei trasporti si è dimostrato economicamente prospero e dinamico, dall'altro ha comportato costi sociali ed ecologici sempre crescenti, ed è per questa ragione che l'idea di una «mobilità sostenibile» ha acquisito sempre maggiore importanza. Si tratta di un'idea che tenta di coniugare due obiettivi tra loro in contraddizione. Da un lato vi è la necessità di garantire una mobilità efficiente sia per le merci che per le persone, poiché è un elemento centrale per un mercato interno competitivo, nonché requisito per la libera circolazione delle persone. Dall'altro lato si tratta di contrastare l'aumento del traffico e di ridurre i costi che ne conseguono, indotti da incidenti stradali, malattie respiratorie, cambiamenti climatici, inquinamento acustico, danni ambientali e ingorghi. L'adozione dell'idea di una mobilità sostenibile presuppone un approccio integrato volto all'ottimizzazione dell'efficienza del sistema dei trasporti, della relativa organizzazione e della sicurezza, e alla riduzione dei consumi energetici e dell'impatto ambientale. Tra gli elementi principali figurano, tra l'altro, la promozione della competitività di modi di trasporto più rispettosi dell'ambiente, la creazione di catene di trasporto integrate che utilizzino due o più mezzi di trasporto (trasporto combinato ferrovia-strada e intermodalità) e la creazione di condizioni favorevoli per una concorrenza equa tra i vari modi di trasporto attraverso una corretta imputazione dei costi generati dagli stessi. Nonostante numerosi sforzi, la politica europea dei trasporti deve ancora affrontare grandi sfide nell'ambito della sostenibilità. Il settore dei trasporti produce quasi un quarto del totale delle emissioni di gas a effetto serra (GES) dell'Unione a 28 (si tratta del secondo settore per quantità di emissioni GES, dopo quello dell'energia). Inoltre, in Europa, il trasporto è l'unico settore le cui emissioni di GES sono aumentate dal 1990, complessivamente di quasi il 22%. (Dalla recessione del 2008, tali emissioni hanno cominciato a diminuire, ma la tendenza a lungo termine è ancora in aumento). Per tale motivo il Libro bianco sui trasporti del 2011 chiede una riduzione delle emissioni (comprese quelle dell'aviazione internazionale ed

escluso il trasporto marittimo internazionale) del 20% tra il 2008 e il 2030 e almeno del 60% tra il 1990 e 2050, nonché una riduzione delle emissioni del trasporto marittimo internazionale del 40% tra il 2005 e il 2050. Il Libro bianco propone inoltre l'uso del 40% di carburanti sostenibili a basso tenore di carbonio nel settore dell'aviazione entro il 2050, e la diminuzione, del 50% entro il 2030 e del 100% entro il 2050, della quota delle autovetture a carburante tradizionale nei trasporti urbani.

## **5.2 MOBILITA' SOSTENIBILE, MOBILITY MANAGEMENT E MOBILITY MANAGER**

### **5.2.1 COSA SIGNIFICA MOBILITÀ SOSTENIBILE**

Secondo la definizione proposta dal MIT, la mobilità sostenibile è la *“capacità di soddisfare i bisogni della società di muoversi liberamente, di accedere, di comunicare, di stabilire relazioni senza sacrificare altri valori umani ed ecologici essenziali oggi e in futuro”*. Si tratta in pratica della realizzazione di modalità di spostamento finalizzate alla riduzione di impatti ambientali, economici e sociali. Una politica di mobilità sostenibile deve dunque essere volta a sviluppare le aree cittadine in ottica di sostenibilità e quindi a garantire il benessere dei cittadini. Naturalmente riveste una fondamentale importanza il settore dei trasporti. In generale, per passare da un sistema insostenibile ad uno sostenibile è necessario che si verifichino i seguenti punti:

- meno necessità di effettuare spostamenti;
- riduzione della lunghezza degli spostamenti;
- maggiore efficienza del trasporto pubblico.

Le iniziative correlate alla mobilità sostenibile devono essere opportunamente pubblicizzate, in modo tale da garantirne la massima diffusione. Si possono utilizzare mezzi quali:

- eventi nazionali o cittadini;
- gadget di vario tipo;
- poster.



Figura 37: Poster pubblicitario su mobilità sostenibile.

Il concetto di mobilità sostenibile deve oggi manifestarsi in un contesto profondamente urbanizzato. Lo scenario cittadino è quindi quello che maggiormente deve essere sottolineato in quest'ottica.

## 5.2.2 I TRASPORTI E LA MOBILITÀ SOSTENIBILE

Come detto precedentemente, il punto cruciale della mobilità sostenibile è rappresentato dal sistema di trasporti. Infatti, ai fini di attuare gli obiettivi proposti dalla mobilità sostenibile, bisogna opportunamente collegare i problemi connessi al trasporto passeggeri e merci, con la pianificazione territoriale ed energetica. Nasce così anche un concetto di sostenibilità nei trasporti, definito come *“un sistema capace di provvedere da un lato a fornire strumenti e opportunità in grado di rispondere in maniera efficiente ed equa alle esigenze economiche, sociali ed ambientali, d'altro lato a ridurre impatti dannosi, non desiderabili e non necessari, compresi i costi a loro associati, sia su scala spaziale che temporale”*. In base a quanto detto, un sistema di trasporti diviene sostenibile se:

- garantisce un facile accesso ai luoghi e ai servizi cittadini;
- è accessibile a tutti;

- è sicuro, in particolar modo in termini di incidentalità;
- favorisce il rispetto ambientale;
- favorisce il benessere economico.

Secondo quanto studiato nel TERM (Transport and Environment Reporting Mechanism), in Europa non si è ancora sommariamente raggiunto questo modello di sostenibilità. Le cause indicabili di quanto detto sono le continue emissioni di gas inquinanti, fonti di rumore e spreco di energia non rinnovabile. Riferendosi in particolar modo all'Italia, l'annuario dei dati ambientali di ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) ha stimato che ben il 25,5% delle emissioni di gas serra o altri inquinanti siano causate proprio dai trasporti (dati che sono relativi al 2014).



Figura 38: Annuario ISPRA dei dati ambientali.

Tra i vari veicoli che quotidianamente circolano per le strade, quelli che hanno maggiormente peso in termini di inquinamento, sono quelli privati: infatti, essi incrementano particolarmente il fenomeno della congestione della rete stradale. Questo fatto influenza tantissimo la qualità dell'aria in maniera negativa, a causa:

- dell'utilizzo di mezzi non ecologici;
- di un basso coefficiente di riempimento di ogni autovettura (viene stimato che ci siano solo 1,2 passeggeri per ogni autoveicolo, in pratica ci sono troppi mezzi in circolazione).

L'obiettivo proposto dall'Europa è quello di cambiare le abitudini di spostamento del cittadino indirizzandolo da un lato verso l'utilizzo dei trasporti pubblici e dall'altro verso l'utilizzo di quelli ecologici. Operativamente invece, le misure da attuare o già attuate sono:

- incremento dei trasporti pubblici;
- costruzione di aree parcheggio;
- favorire e stimolare l'utilizzo della bicicletta come mezzo di spostamento;
- istituzione di zone traffico limitato e aree pedonali;
- promozione del Mobility Management (concetto approfondito nel seguito);
- istituzione di servizi di car sharing (o pool sharing) e bike sharing.

Particolare importanza ha il servizio di car sharing. Esso è un tipo di approccio molto utilizzato da industrie ed enti nell'ambito della mobilità sostenibile. E' utile a persone che effettuano gli stessi spostamenti negli stessi orari. Si tratta di un servizio destinato a riempire posti vuoti nelle auto e quindi particolarmente utile a ridurre in maniera considerevole il traffico e il numero di auto che quotidianamente circolano nella città. E' necessario per chiarezza fare una distinzione tra i servizi di car pooling e di car sharing. Il *Car pooling* riguarda la condivisione di automobili private fra gruppi di persone che devono effettuare gli stessi spostamenti. Se utilizzato all'interno di un'azienda, deve necessariamente prevedere delle opportune postazioni di sosta e un giusto contributo al conducente, oltre che un supporto informatico per l'organizzazione dei tragitti. Il *Car sharing* riguarda il noleggio di un'autovettura da parte di un'azienda o di un ente. L'adozione di un servizio di questo tipo prevede da parte del lavoratore un'opportuna integrazione con l'utilizzo di mezzi pubblici. È opportuno che per tale scopo siano utilizzati veicoli a basso consumo. Anche in questo caso è necessario predisporre aree di sosta gratuita e aree di parcheggio. Sicuramente sono notevoli i vantaggi offerti da un servizio di questo tipo, tra cui la riduzione di veicoli circolanti e di conseguenza una maggiore accessibilità per tutti gli spostamenti, in particolar modo quelli casa-lavoro. Tuttavia è necessario considerare anche alcuni aspetti negativi quali:

- un forzato cambio di abitudini da parte di chi usufruisce del servizio;
- necessità di indicazioni operative per l'organizzazione dei passaggi;
- un possibile disagio personale.

In Italia esistono diversi progetti pilota atti alla promozione di car pooling e car sharing. Tra di questi è possibile citare:

- progetto car pooling della ferrovia Andria-Mestre: *“è un invito, in particolare ai viaggiatori pendolari che si servono della ferrovia, a utilizzare un'unica vettura per il medesimo percorso che porta ad una delle stazioni della linea ferroviaria”*;
- progetto pilota autostrade per l'Italia A8-A9: iniziativa per la creazione di gruppi car pooling nelle autostrade A8 e A9 (in Lombardia);
- car pooling per i dipendenti della Regione Emilia-Romagna;
- mobilità e car pooling nella provincia di Chieti;
- car pooling Lombardia: progetto nato per la diffusione di un uso sostenibile dell'autovettura.



Figura 39: Logo di car pooling Lombardia.

### **5.2.3 GLI INDICATORI AMBIENTALI**

Parlando di mobilità sostenibile è spesso necessario fare riferimento ad alcuni parametri atti a dare una misura utile alla valutazione della qualità della situazione ambientale. Questi parametri prendono il nome di “indicatori ambientali”. Vengono elaborati a partire dai dati sperimentali ottenuti in seguito ad una valutazione, per effettuarne una successiva analisi utile alla creazione di indici ed indicatori (schema sottostante). L’obiettivo di un buon indicatore è quello di



semplificare al massimo la comunicazione di dati e ridurre il numero di parametri atti alla loro descrizione.



Figura 40: Schema-tipo per la creazione di un indicatore ambientale.

In generale, la valutazione dei risultati della sostenibilità viene effettuata in termini di:

- indicatori descrittivi: descrivono la realtà tramite le analisi effettuate;
- indicatori prestazionali: pongono in relazione i risultati delle analisi con gli effetti ambientali che producono.

Uno fra i modelli più importanti è il DPSIR (Driving forces, Pressures, State, Impacts, Responses).

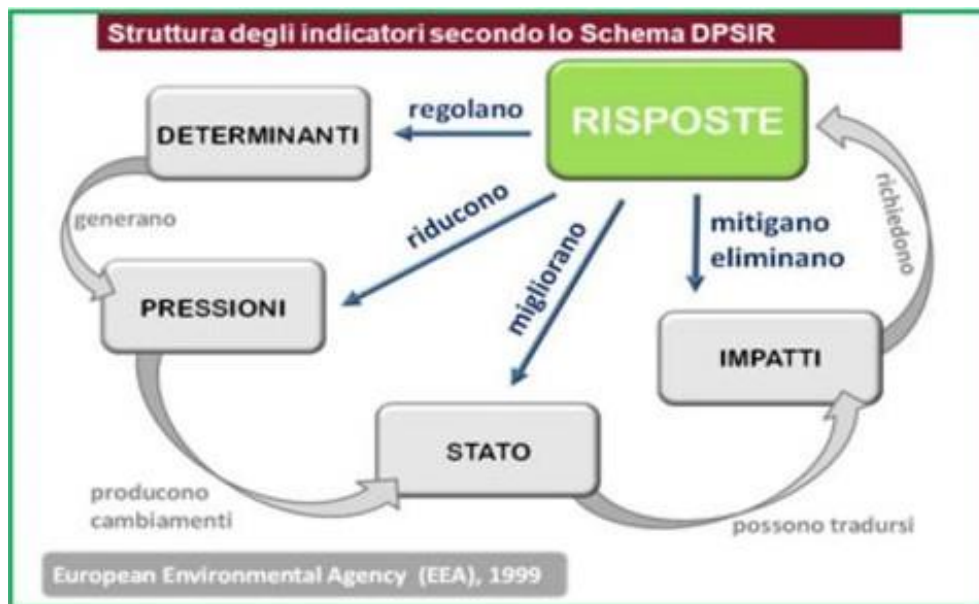


Figura 41: Schema DPSIR.

Secondo quanto rappresentato in fig. 41, questo modello analizza l'insieme delle caratteristiche e delle qualità fisiche, chimiche e biologiche (stato). Lo stato è alterato da emissioni atmosferiche, rifiuti o inquinamento (pressioni) principalmente generate da attività umane (determinanti); tutto ciò produce gravissimi effetti (impatti) su uomini, animali ed ecosistema, ai quali rispondono delle specifiche misure (risposte). Gli obiettivi proposti sono dunque:

- intervenire sui determinanti;
- ridurre le pressioni;
- migliorare la qualità dello stato;
- eliminare (o quantomeno ridurre) gli impatti.

#### **5.2.4 COSA È IL MOBILITY MANAGEMENT**

Si tratta di un concetto introdotto per la prima volta da nazioni quali USA, Olanda, Svizzera, Belgio, Regno Unito e Francia. E' un approccio volto a promuovere lo sviluppo del trasporto sostenibile, mirando a modificare l'abitudine dell'automobilista in tutti i suoi spostamenti, o del viaggiatore nel caso si faccia riferimento al turismo. Esso poggia fondamentalmente su aspetti di tipo:

- economici;
- ambientali;

- gestionali;
- amministrativi.

Ma, il punto centrale del mobility management resta l'analisi del comportamento umano: infatti, come detto precedentemente, si vuole andare a modificare *“l'abitudine dell'automobilista in tutti i suoi spostamenti”*. Appare dunque evidente lo stretto legame che esiste tra mobility management e le scienze comportamentali, ovvero tutte quelle discipline che studiano il comportamento umano per poterlo descrivere, spiegare e prevedere. Tra di esse sono presenti discipline quali psicologia cognitiva, psicologia sociale, neuroscienze ed economia comportamentale (quest'ultima, molto importante in questo contesto, è volta all'arricchimento di modelli di scelta economici con la considerazione degli aspetti psicologici). Viene studiato dunque, come si possa stravolgere la scelta di un individuo per quanto concerne la mobilità, con l'obiettivo finale di orientarla verso un comportamento di tipo sostenibile. Il mobility management è considerabile un green job, ovvero rientra nella categoria di lavori che contribuiscono a preservare o migliorare la qualità dell'ambiente. La definizione di green jobs viene fornita dall'UNEP (United Nations Environment Programme): *“Si definiscono green jobs quelle occupazioni nei settori dell'agricoltura, del manifatturiero, nell'ambito della ricerca e sviluppo, dell'amministrazione e dei servizi che contribuiscono in maniera incisiva a preservare o restaurare la qualità ambientale”*. Questi tipi di lavoro possono spaziare in vari ambiti, quali:

- energie rinnovabili;
- settore agro-alimentare;
- turismo;
- edilizia;
- ingegneria;
- biotecnologie;
- trasporti;
- gestione dei rifiuti.

In generale si può dire che un lavoratore che applica competenze “verdi” nelle proprie mansioni sta svolgendo comunque un green job.

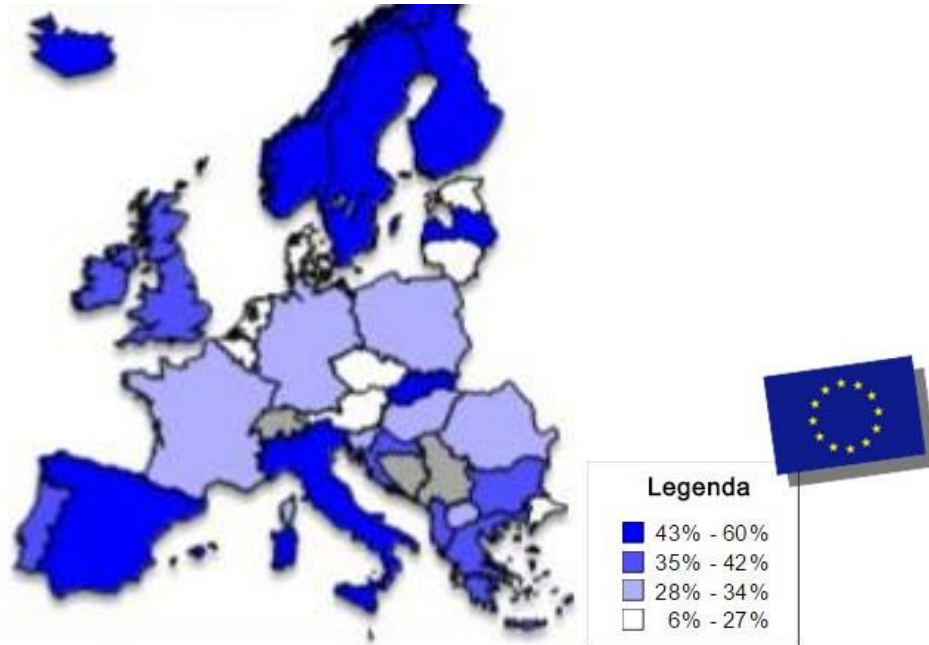


Figura 42: Diffusione europea di green jobs.

### 5.2.5 COME ATTUARE IL MOBILITY MANAGEMENT?

Tra le varie strategie adottate per perseguire questi obiettivi, si possono innanzi tutto distinguere le misure soft dalle misure hard; quest'ultime devono rafforzare l'efficacia di quello che viene attuato dalle misure soft. Tra le misure soft possiamo utilizzare questi termini:

- informazione e comunicazione;
- coordinamento delle attività e degli interventi;
- controllo delle funzioni dei diversi enti;
- promozione di alternative di trasporto.

Esempi di misure hard sono:

- la costruzione di nuove linee tram;
- la costruzione di nuove strade;
- la costruzione di piste ciclabili.

Per la realizzazione del modello proposto dal mobility management è necessaria in prima istanza una fase preliminare, nella quale viene condotta una campagna di

sensibilizzazione e informazione, attraverso ad esempio programmi a stampo educativo. Fatto ciò, la vera e propria fase operativa può svolgersi sia in ambito collettivo sia a livello di singola unità (oppure di una particolare impresa). A livello dell'impresa (o ente) è possibile istituire una forma di trasporto aziendale, in modo da utilizzare il minor numero possibile di veicoli; inoltre la stessa azienda può farsi promotrice dell'utilizzo di mezzi alternativi all'autovettura personale. A livello di macro-area possono essere facilitate le opzioni di spostamento, incrementando e regolando adeguatamente il trasporto pubblico e quindi fornendo delle opzioni efficienti per la scelta dei trasporti da utilizzare.

### **5.2.6 MOBILITY MANAGEMENT E CAMBIAMENTI CLIMATICI**

Il cambiamento climatico è un fenomeno sempre più preoccupante negli ultimi anni. E' dovuto sia a cause naturali (come l'innalzamento della radiazione solare) ma principalmente all'attività umana (industrie e trasporti). Infatti l'aumento di gas inquinanti favorisce l'incremento del fenomeno dell'effetto serra. Nel grafico che segue è riportata la variazione di quantità di anidride carbonica nell'aria negli ultimi 60 anni.

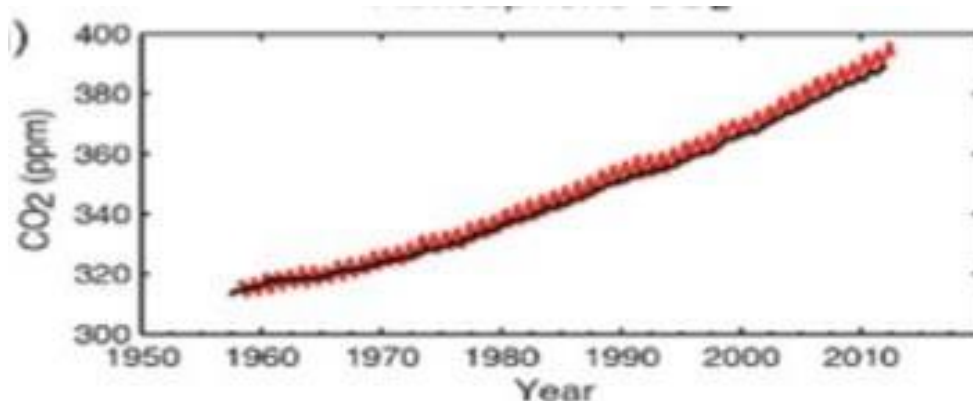


Figura 43: Variazione di concentrazione di CO<sub>2</sub> in parti per milione (p.p.m.) dal 1950 al 2010. Inoltre negli ultimi anni la temperatura è cresciuta sempre più rapidamente rispetto al passato, provocando diversi effetti quali:

- modifica del ritmo delle precipitazioni;
- scioglimento dei ghiacciai;

- innalzamento dei livelli del mare;
- eventi climatici estremi sempre più frequenti (alluvioni, uragani).

Sono due le strategie proposte contro la lotta dell'innalzamento climatico: la mitigazione e l'adattamento. La prima è una strategia volta alla prevenzione e dunque al combattimento delle cause; la seconda, di contro, tende a contrastare gli effetti prodotti dall'innalzamento climatico. Il settore dei trasporti può essere fortemente influenzato dal cambiamento climatico. Eventi quali innalzamento delle temperature, aumento delle precipitazioni e innalzamento del livello del mare possono arrecare seri danni alle infrastrutture (strade, ferrovie, terreni e costruzioni lungo la costa). Le misure di adattamento che devono essere previste sono:

- creazione di aree verdi (si tratta di zone dense di flora che si trovano lungo le varie infrastrutture e possono essere destinate all'erosione dei fiumi);
- progetto e costruzione di nuove infrastrutture.

### **5.2.7 MOBILITY MANAGEMENT E BENESSERE FISICO**

Un altro importante concetto su cui il mobility management pone attenzione è quello del benessere fisico. L'attività fisica è da considerare un aspetto pressoché fondamentale. Possiamo, dai seguenti schemi, vedere alcuni effetti positivi prodotti che essa può produrre su adulti e giovani.

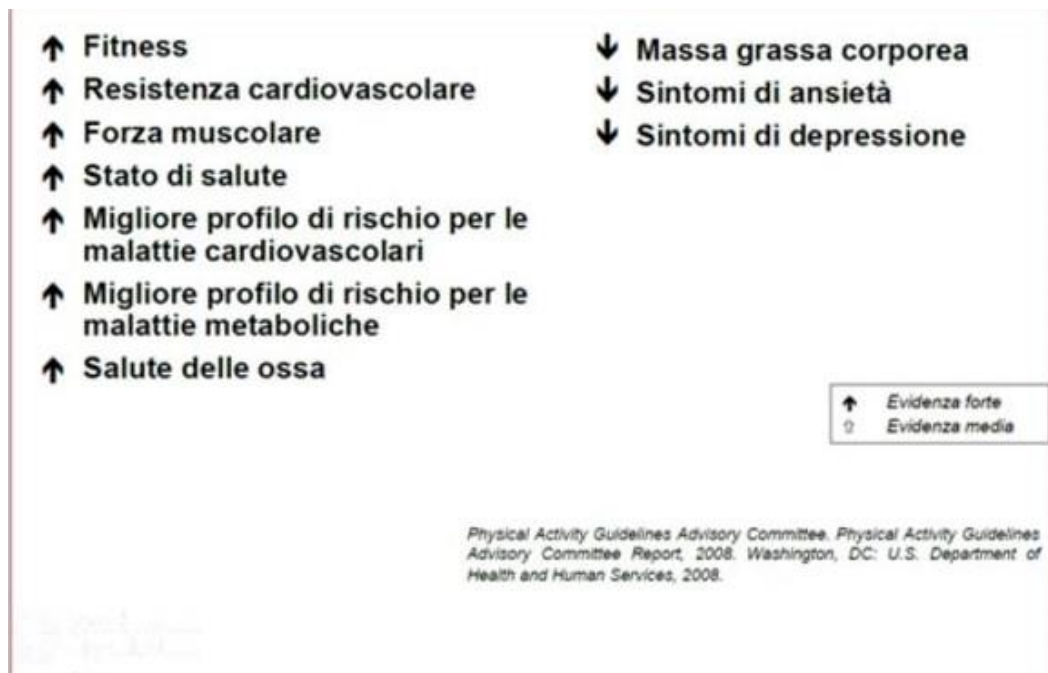


Figura 44: Effetti positivi su un soggetto giovane.



Figura 45: Effetti positivi su un soggetto adulto.

Di contro, una vita esente da attività fisica può condurre a diversi effetti negativi, come l'aumento di probabilità di essere soggetti a tumore o diabete.



Figura 46: Raccomandazioni globali dell'OMS sul tema dell'attività fisica.

Dunque, in questo frangente, il mobility management ha come scopo principale quello di incentivare gli spostamenti a piedi o in bicicletta, i quali sicuramente sono funzionali per i punti di benessere sopra citati. Inoltre il risultato di alcuni studi hanno correlato l'utilizzo della bicicletta con la riduzione dell'incidentalità, giustificandone ulteriormente l'utilizzo. A titolo di esempio si riporta quanto affermato da una ricerca danese, la quale ha dimostrato che l'utilizzo di bicicletta per recarsi a lavoro può portare ad una riduzione del rischio di morte del 38%, per tutti i motivi legati all'utilizzo di quest'ultima. Per raggiungere questi obiettivi allora è necessario rendere il percorso stradale sicuro e accessibile a tutte le possibili utenze.

### 5.2.8 IL MOBILITY MANAGER

Il mobility manager è una figura professionale che nasce verso la fine degli anni '90. Egli ha la funzione di gestire la mobilità di un'azienda o di un'area. Nello specifico, un mobility manager ha lo scopo di promuovere una mobilità di tipo sostenibile. La sua preparazione deve essere di tipo interdisciplinare, densa di ottime competenze in termini di:

- comunicazione;
- marketing;



- capacità relazionali;
- conoscenze tecniche.

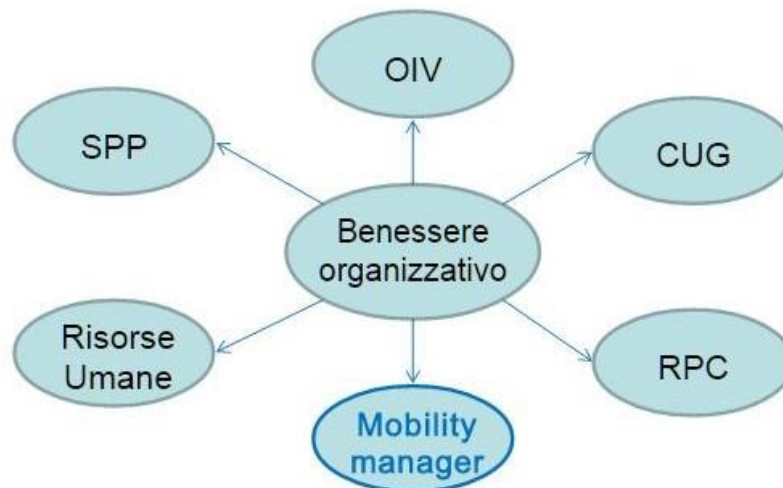
Si tratta dunque di un professionista che ha il compito di studiare la mobilità locale, prendendo contatti con chiunque se ne occupi; di conseguenza dovrà costruire e proporre dei servizi volti allo sviluppo della mobilità sostenibile. E' una figura riconosciuta anche a livello istituzionale: infatti il Decreto Ronchi del 27 marzo 1998 ha introdotto la figura del Mobility Manager, dichiarando obbligatoria la sua presenza in aziende private con più di 800 dipendenti, o pubbliche con più di 300 (in città a rischio inquinamento). Inoltre esistono diverse associazioni nate con lo scopo di sviluppare e promuovere il mobility manager presso imprese e pubbliche amministrazioni: una di queste è Euromobility, nata nel 2000.



Figura 47: Logo di Euromobility.

L'attività svolta da un mobility manager si intreccia in più con il concetto di benessere organizzativo. Si tratta di un concetto nato e sviluppato tra gli anni 30 e gli anni 70 del '900 ed è legato alla salute fisica e mentale di un lavoratore. Secondo la definizione fornita da F. Avallone e M. Bonaretti, esso è un *“insieme dei nuclei culturali, dei processi e delle pratiche organizzative che animano la dinamica della convivenza nei contesti di lavoro promuovendo, mantenendo e migliorando la qualità della vita e il grado di benessere fisico, psicologico e*

sociale delle comunità lavorative”. Di seguito si riporta uno schema fornito dall’ISPRA riguardo all’idea di benessere organizzativo.



Legenda dei Principali soggetti coinvolti	
OIV	Organismo Indipendente di Valutazione
CUG	Comitato Unico di Garanzia
RPC	Responsabile Prevenzione della Corruzione
SPP	Servizio Prevenzione e Protezione

Figura 48: Schema fornito dall’ISPRA sul concetto di benessere organizzativo.

### 5.2.9 MOBILITY MANAGER D’AZIENDA E D’AREA

Come detto precedentemente, si possono distinguere due “*categorie*” di mobility managers: quelli aziendali da quelli d’area. L’obiettivo di fondo delle due figure è quello di promuovere il mobility management. Il mobility manager di un azienda ha il ruolo di sensibilizzare la stessa a ridurre impatti ambientali e deve occuparsi personalmente di redigere piani di spostamento casa-lavoro (PSCL). Si occupa dunque di ridurre al minimo i tempi di spostamento per massimizzare la produzione, considerando naturalmente l’ottimizzazione dei costi aziendali nel rispetto di una politica sostenibile. Se lo ritiene necessario, può istituire:

- aree di parcheggio aziendali;
- biciclette destinate all’utilizzo dei dipendenti;
- navette aziendali.

Il mobility manager d'area ha il compito di coordinare i mobility manager d'azienda e di attuare il coinvolgimento di istituzioni e imprese alla mobilità sostenibile. Dunque i suoi obiettivi sono:

- promozione del mobility management;
- soluzioni e verifica.

Nel 2014 è stata effettuata un'indagine sulla presenza o meno dei mobility manager d'area nelle 50 principali città d'Italia, i risultati sono riportati in fig. 49.



Figura 49: mobility managers nelle 50 principali città italiane.

### 5.2.10 PIANI DI SPOSTAMENTO CASA-LAVORO

Come accennato nel paragrafo precedente, il piano di spostamento casa-lavoro (PSCL) rappresenta una parte fondamentale dell'attività del mobility manager. Si tratta di un insieme di soluzioni e iniziative che comprendono tutte quelle attività proposte al lavoratore in sostituzione dell'utilizzo della sua auto privata per recarsi quotidianamente a lavoro. È un'idea applicabile sia all'azienda che all'area (naturalmente con opportune differenziazioni). I vantaggi che possono scaturire da

un piano del genere sono molteplici e versano su più fronti. In particolare ne sono interessati i dipendenti stessi, ma anche l'azienda e la collettività. I vantaggi per i dipendenti sono:

- la riduzione netta dei costi di trasporto personali;
- la riduzione dei tempi di spostamento;
- la riduzione di possibilità di incidenti.

I vantaggi per l'azienda possono essere raggruppati in queste categorie:

- l'imposizione di PSCL può garantire l'accesso a fondi regionali o ministeriali, che possono dunque essere destinati alla crescita della stessa;
- garantisce una certa regolarità e puntualità nell'arrivo dei dipendenti;
- riduzione delle zone destinate ai parcheggi, e di conseguenza guadagno di spazio;
- si offre un servizio utile, e ciò tende a migliorare molto l'immagine dell'azienda agli occhi sia del pubblico che dei dipendenti.

Per l'intera collettività i vantaggi sono:

- la riduzione delle emissioni di gas inquinanti conseguenti alla riduzione di mezzi nella circolazione stradale;
- l'aumento di sicurezza nelle strade;
- la riduzione del traffico e meno;
- la riduzione dei tempi di spostamento da un punto all'altro della città.

Per redigere un piano di detto tipo, lo schema logico che può essere seguito dal mobility manager è quello riportato in fig. 50.



Figura 50: Schema utile all'istituzione di un PSCL.

### 5.2.11 MOBILITY MANAGER E ENERGY MANAGER: SIMILITUDINI E DIFFERENZE

La figura dell'energy manager è nata prima rispetto a quella del mobility manager. Infatti essa fu introdotta già negli anni 80 per delineare l'immagine di un professionista dedito allo studio di tematiche energetiche. Questa figura si è profondamente sviluppata negli ultimi anni, intrecciando le attitudini energetiche a quelle ambientali. A differenza di un mobility manager, la preparazione di un energy manager è decisamente più indirizzata alla cura degli aspetti tecnici riguardanti l'utilizzo di energia. Egli ha infine il compito di proporre delle soluzioni di stampo tecnico per i suddetti problemi. Si può dire che le due figure appena descritte siano decisamente affini fra di loro, infatti entrambi devono coordinare svariate attività per il raggiungimento di obiettivi di stampo puramente sostenibile. Entrambi inoltre coordinano l'idea di smart city, che è un punto particolarmente importante della politica del mobility management. Essa è descritta più dettagliatamente nel prossimo paragrafo.

### 5.2.12 SMART CITY

Con la dizione “*smart city*” (città intelligente) si intende un insieme di strategie di pianificazione urbanistica volte all'ottimizzazione e all'innovazione dei servizi pubblici così da mettere in relazione le infrastrutture materiali delle città «*con il capitale umano, intellettuale e sociale di chi le abita*» grazie all'impiego diffuso delle nuove tecnologie della comunicazione, della mobilità, dell'ambiente e dell'efficienza energetica, al fine di migliorare la qualità della vita e soddisfare le esigenze di cittadini, imprese e istituzioni. In base a quanto detto una città può essere detta intelligente se viene garantito uno sviluppo sostenibile della qualità della vita, il che può essere valutato in termini di:

- mobilità;
- qualità delle condizioni dell'ambiente;
- governance del sistema urbano;
- contesto economico cittadino;
- partecipazione a vita sociale;
- vivibilità della città.

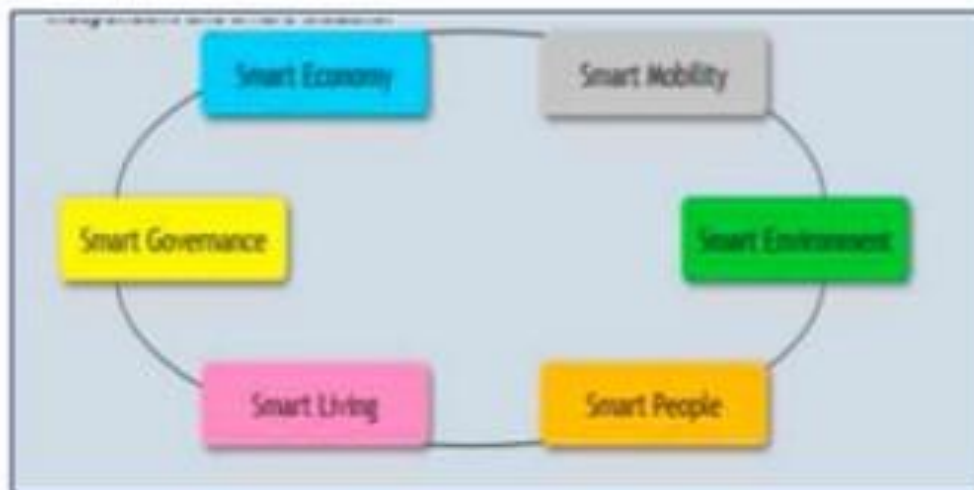


Figura 51: Punti di una smart city.

Vi sono tuttavia alcuni punti critici che possono generarsi dallo sviluppo delle Smart cities:

- Altre vie alternative di sviluppo urbano potrebbero essere erroneamente sottovalutate o ignorate;
- sottovalutazione dei possibili effetti negativi dello sviluppo delle nuove infrastrutture tecnologiche e di rete.

Di seguito si riportano alcuni esempi di smart cities:

- Laguna Ecopark, la prima Social Smart City di Planet Idea a Fortaleza.
- Varese Smart City, uno degli esempi più importanti di smart city a livello italiano
- Smart City di Amsterdam;
- Cairo Smart Village;
- Dubai SmartCity;
- Smart City di Málaga;
- Smart City a Malta;
- Smart Santander, probabilmente il più esteso Wireless Sensor Network al mondo (2011). Al momento, sono 1.100 i sensori installati: 400 per misurare i posti auto e 700 per controllare i parametri ambientali come il rumore, la concentrazione di monossido di carbonio, la temperatura e la luce solare;
- Il municipio di Southampton utilizza il termine per definire l'insieme di servizi accessibili tramite smart card;
- Torino Smart City;
- Smart city Syracuse.

### **5.3 INQUINAMENTO DA TRAFFICO URBANO: INTERVENTI ATTUATI E LORO VALUTAZIONE**

I sempre più frequenti fenomeni di congestione e le criticità esistenti per il rispetto degli standard europei e nazionali di qualità dell'atmosfera delle aree urbane hanno portato gran parte delle amministrazioni locali a riesaminare i propri sistemi di "mobility management" e a tentare soluzioni alternative. Gli sforzi della comunità scientifica internazionale sono rivolti alla definizione di indicatori di

esposizione e di salute della popolazione adeguati per la valutazione delle strategie di intervento. Si possono individuare tre tipologie valutazione:

1. Valutazione della sostenibilità urbana e del sistema dei trasporti: strumento di medio-lungo periodo, per valutare l'efficacia di strategie integrate di riduzione dell'inquinamento atmosferico.

2. Valutazione dell'efficacia delle strategie di intervento in termini di conseguimento dei risultati attesi: indicatori di performance. L'efficacia è valutata secondo un approccio basato sul confronto tra i risultati conseguiti e gli obiettivi stabiliti, pianificando eventualmente la necessità di adottare azioni correttive. Tale metodologia segue il seguente schema concettuale:

- caratterizzazione della situazione prima dell'adozione della strategia e valutazione della sua evoluzione in assenza di interventi (baseline scenario e valutazione ex-ante);
- definizione degli obiettivi specifici (obiettivi quantificati);
- identificazione dei potenziali impatti, positivi e negativi, delle azioni previste;
- definizione del set di indicatori da utilizzare per il conseguimento degli obiettivi e per il monitoraggio degli impatti;
- raccolta dei dati, elaborazione degli indicatori e confronto con la situazione iniziale.

3. Valutazione di efficacia delle strategie di intervento in termini di miglioramento della qualità dell'aria. La valutazione può essere condotta eseguendo analisi dei dati rilevati mediante stazioni di monitoraggio oppure applicazioni di metodi di stima. Il primo si basa sul confronto tra i livelli di concentrazione degli inquinanti monitorati in determinate postazioni prima e dopo l'implementazione delle misure di intervento (valutazione ex-post). Il secondo approccio prevede l'applicazione, in fase di progettazione della strategia di intervento (valutazione ex-ante), di modelli per la stima delle emissioni e delle concentrazioni in atmosfera derivanti dal traffico, consentendo di simulare i livelli di emissione in



diversi scenari di traffico e di modellare i processi di diffusione degli inquinanti in atmosfera.

### **5.3.1 STRATEGIE PER LA RIDUZIONE DELL'INQUINAMENTO**

Gli interventi “classici” per contenere i problemi di mobilità e per la razionalizzazione della circolazione stradale nelle aree urbane sono in larga parte di tipo strutturale e costruttivo, dunque costosi e lunghi nei tempi di attuazione. Sarebbe sicuramente preferibile puntare all'aumento dell'efficienza delle strutture esistenti.

Una delle classificazioni con cui possono essere suddivise gli interventi è quella relativa al tempo di azione/efficacia:

- interventi a breve termine,
- interventi a medio termine,
- interventi a lungo termine.

Per interventi a breve termine si intendono quelle strategie i cui tempi di applicazione e gli effetti si manifestano nel giro di mesi. Tra queste si possono ricordare:

- lo sviluppo di sistemi d'informazione allo scopo di dare notizie circa lo stato di congestione dei rami in modo tale che gli utenti possano scegliere le vie meno congestionate;
- la riallocazione e redistribuzione del deflusso veicolare verso arterie con maggiore capacità ambientali;
- l'aumento di corsie preferenziali e percorsi in sede protetta per mezzi pubblici su tutte le vie di accesso alle città;
- interventi di tipo politico/fiscale con diversificazione delle tariffe dei parcheggi a pagamento aumentando i ticket per le aree più assediate dal traffico;
- la realizzazione di assi blu, ovvero di strade dove vietare la sosta e la fermata lungo le arterie di maggiore traffico al fine di fluidificare la circolazione;
- l'istituzione di zone a traffico limitato, aree in cui l'accesso è consentito solo ai veicoli che rispettano particolari standard di emissione.

Per interventi a medio termine si intendono quelle strategie i cui tempi di applicazione e gli effetti si manifestano al massimo in qualche anno. Tra queste si ricordano:

- il Road Pricing, tariffazione dell'uso di alcune strade o zone della città. I veicoli che passano per opportuni punti di controllo vengono riconosciuti tramite un sistema elettronico e si impone loro un pedaggio;
- il Park Pricing, tariffazione della sosta di tipo flessibile. Le tariffe di parcheggio sono regolate e diversificate per aree cittadine e/o per fasce orarie, al fine di modificare i comportamenti dell'utenza secondo le esigenze di controllo della circolazione;
- il Park and Ride, parcheggio di interscambio che consente di abbandonare il veicolo privato ai margini delle aree congestionate, per trasferirsi sulla rete dei trasporti pubblici.

Per interventi a lungo termine si intendono, invece, quelle strategie i cui tempi di applicazione e il verificarsi degli effetti hanno tempi più lunghi. Si distinguono:

- le nuove tecnologie per la propulsione dei veicoli stradali;
- il tele-working e/o il tele-shopping: il tele-working consiste nel lavoro da casa, riducendo la domanda nell'ora di punta, mentre con il tele-shopping è possibile effettuare acquisti direttamente da casa, riducendo non solo il numero di spostamenti, ma anche la necessità di parcheggiare;
- lo sviluppo di "brown field site", la riqualificazione di aree situate a ridosso di zone destinate ad uffici, in modo tale da incentivare i lavoratori al trasferimento in tali zone, evitando così l'uso del mezzo privato per recarsi su posto di lavoro;
- il Car-sharing, che consiste nel mettere a disposizione dell'utenza dei veicoli che verranno usati solo per il tempo di cui si ha bisogno (compresi i tempi molto brevi); dopo che un utente ha utilizzato il veicolo, questo viene rimesso a disposizione di altri utenti nelle aree di parcheggio appositamente create, l'utente dovrà pagare una tariffa proporzionata alla durata di utilizzo e ai chilometri percorsi;

- il Car-pooling, che consiste nella condivisione di un mezzo privato tra più utenti che percorrono lo stesso tragitto;
- il potenziamento del trasporto collettivo ed in particolare quello di natura ferroviaria con trazione elettrica.

### **5.3.2 ESEMPI DI INTERVENTI PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI MEZZI DI TRASPORTO**

#### a) Interventi di breve durata.

La breve durata ha consentito l'adozione di misure drastiche di regolazione del traffico con un effetto rilevante sul numero di mezzi a motore circolanti e sulle conseguenti emissioni. Ad Atlanta, durante le olimpiadi del 1996, le azioni intraprese hanno prodotto un raddoppio degli utilizzatori dei mezzi pubblici ed una riduzione dei transiti nelle ore di punta. Le concentrazioni di O<sub>3</sub> ed NO<sub>2</sub> sono risultate essere circa il 20-30% inferiori durante i Giochi Olimpici rispetto alle settimane precedenti e successive. A Pechino, durante il periodo di attuazione della zona a traffico limitato, le concentrazioni medie giornaliere dei principali inquinanti (CO, PM10, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) sono diminuite in modo significativo rispetto al periodo antecedente.

#### b) Interventi di lunga durata/permanenti.

- I. Aree urbane con tassa di ingresso (road pricing);
- II. Limitazione della velocità dei veicoli;
- III. Introduzione di veicoli con carburante alternativo alla benzina o al diesel;
- IV. Introduzione di zone "a traffico limitato" e "a bassa emissione".

#### I. Aree urbane con tassa di ingresso (road pricing).

Le aree urbane con accesso a pagamento sono state sperimentate in numerose città anche se molte esperienze sono state interrotte per le proteste dei cittadini contro la tassazione. In Europa, a Londra, il "Congestion Charging Scheme" (CCS) rappresenta un esempio di politica a lungo termine di tariffazione della congestione del traffico. Si tratta di un ticket giornaliero, che consente di guidare in centro dalle 7 alle 18:30. Da subito il sistema è servito a decongestionare il traffico e a incoraggiare l'uso dei mezzi pubblici. La tassa si applica su circa 20

kmq nel centro di Londra: non esistono barriere o postazioni per pagare il pedaggio, ma tutte le auto che circolano nella zona sono riprese da telecamere che registrano le targhe e stabiliscono se la tassa è stata pagata. La conclusione dell'analisi più aggiornata del CCS di Londra sembra indicare effetti di modesta entità sui livelli di inquinamento e assenza di modifiche nella composizione del particolato.

A Stoccolma è stato introdotto un sistema di accesso a tariffazione denominato "Stockholm Trial" che ha previsto anche un potenziamento del trasporto pubblico (16 nuove linee, aumento del 7% dei bus circolanti) e un ampliamento dei parcheggi sia nella città sia nelle vicinanze. L'intervento di accesso a tariffa riguarda l'area centrale della città, con una tariffa nei giorni lavorativi variabile in relazione alle ore di maggiore congestione. La restrizione di accesso ha portato ad una riduzione del 22% del numero di transiti di veicoli e si è verificato un aumento del traffico dei bus. Le restrizioni del traffico hanno portato ad una diminuzione dei livelli delle emissioni di NOx, PM10 e CO (8.5%, 13% e 14%, rispettivamente) nel centro della città. Le concentrazioni atmosferiche di NOx hanno presentato una riduzione più marcata di quella attesa in base al trend generale. Le concentrazioni di PM10 hanno, invece, presentato una minor variabilità per l'interferenza delle condizioni climatiche.

Per quanto riguarda l'Italia, un intervento la cui applicazione ha avuto risultati positivi, è il progetto EcoPass di Milano che ha adottato uno schema di restrizioni del traffico e di tassazioni simile a quello londinese. L'intervento, iniziato nel 2008, ha coinvolto il 4,5% (8,2 kmq) del territorio e imponeva un pedaggio d'ingresso a conducenti di alcune categorie di automezzi privati per poter accedere alla zona a traffico limitato. Le sue modalità di applicazione rimasero pressoché immutate fino al 31 dicembre 2011, venendo quindi sostituite dal 16 gennaio 2012 da quelle del sistema attuale detto Area C, avente diversa tariffazione e nuovi divieti di ingresso.

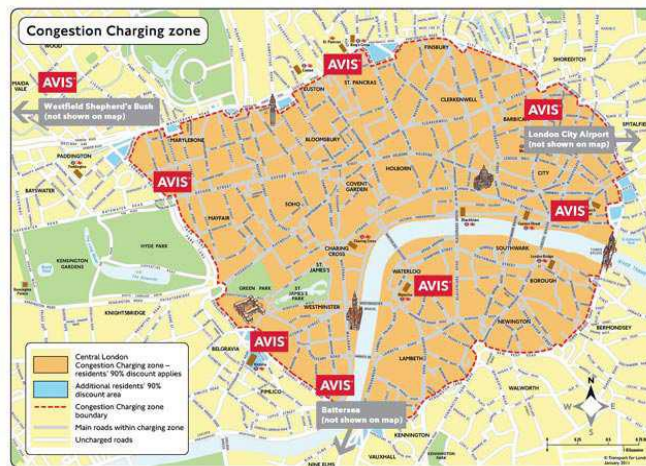


Figura 52: Area C di Milano e Congestion Charging di Londra

I risultati conseguiti dall' Area C hanno confermato la sua efficacia nel ridurre il traffico: nei 230 giorni di applicazione, il calo è stato infatti del 30,1%, con una media di 41.000 ingressi in meno ogni giorno rispetto allo stesso periodo del 2011. Ed è anche grazie ad Area C che Milano in pochi anni è diventata la migliore in Europa dal punto di vista della riduzione del traffico. Dal punto di vista ambientale, nell'Area C, le emissioni di Black Carbon, il carbonio elementare contenuto nel PM10 totale da traffico, hanno presentato un calo del 34% tra il 2010 e il 2013.

## II. Limitazione della velocità dei veicoli.

Recenti studi hanno dimostrato che, abbassando la velocità di percorrenza di alcune autostrade che attraversano i centri urbani a 80 km/h, si ottiene una

diminuzione delle emissioni del 5-30% per gli NOx e del 5-25% per il PM10. L'effetto è dovuto ad un flusso più fluido che riduce la guida "stop and go" ed è più marcato in relazione al livello di congestione prima dell'intervento ed alla presenza di mezzi pesanti circolanti.

III. Introduzione di veicoli con carburante alternativo alla benzina o al diesel.

Gli interventi sul parco veicolare pubblico riguardano una grande varietà di misure rivolte ai veicoli comunali e i veicoli del trasporto pubblico, da realizzarsi mediante diverse soluzioni tecniche e ambientali a seconda degli obiettivi specifici (biofuel, veicoli elettrici, EURO IV e V, veicoli ibridi). Rispetto al settore pubblico, le misure relative ai veicoli privati hanno presentato maggiori difficoltà. Al fine di rendere meno inquinante il parco macchine sono stati adottati diversi strumenti: campagne di sensibilizzazione della popolazione, assistenza ed incentivazione finanziaria, assistenza tecnica e supporto, campagne rivolte a specifici gruppi target (tassisti, aziende).

IV. "Zona a traffico limitato" e "Zona a bassa emissione":

Le Zone a Bassa Emissione sono aree in cui i veicoli più inquinanti sono soggetti a specifiche disposizioni e, non solo può essere loro vietato il transito all'interno dell'area, ma anche assoggettarle a sanzioni qualora accedano alla zona limitata e le loro emissioni siano oltre il livello stabilito. Oltre 70 città in otto paesi d'Europa hanno attivato, o si stanno apprestando a farlo, le "Zone a Bassa Emissione" o "Zone Ambientali" per migliorare la qualità dell'aria.

### **5.3.3 INTERVENTI CHE PREVEDONO LA PROMOZIONE DEI SERVIZI DI TRASPORTO PUBBLICO**

La disponibilità di un sistema di mezzi pubblici moderni, in particolare elettrici su rotaia, riveste un ruolo centrale nella riduzione del traffico veicolare. I mezzi pubblici di tipo urbano o extraurbano offrono una serie di benefici di tipo economico, ambientale e sociale. Gli spostamenti effettuati con autobus sono tre volte meno dispendiosi in termini di consumo di carburante rispetto a quelli effettuati dalle automobili, e producono un inquinamento da CO e CO<sub>2</sub> circa venti volte inferiore a quello prodotto dalle auto. Si suggerisce, dunque, di utilizzare i

nuovi bus a bassa emissione in relazione alle caratteristiche del traffico e delle strade e di porre attenzione alle emissioni dei veicoli nei punti di sosta, quali fermate e punti di scambio intermodale, in particolare, quando questi rappresentano luoghi ad elevato tasso di inquinamento. Alcuni elementi centrali per lo sviluppo del sistema pubblico dei trasporti, sono sicuramente: l'inserimento del trasporto pubblico in una politica integrata dei trasporti, con l'integrazione tra le varie modalità di mezzi pubblici, la facilitazione dei passeggeri nello scambio intermodale, la facilitazione delle modalità di pagamento del biglietto e l'uso di un sistema integrato di biglietti/tariffazione che copra le diverse tipologie di trasporto presenti in un'area, l'integrazione con il trasporto privato (per esempio parcheggi scambiatori) per evitare l'accesso alle aree centrali delle città.

#### **5.3.4 INTERVENTI CON PROMOZIONE DELLA MOBILITÀ ATTIVA CICLABILE E PEDONALE**

Negli ultimi decenni molte nazioni hanno esplicitamente sostenuto l'uso della bicicletta per migliorare la salute e ridurre l'inquinamento atmosferico, la congestione, il rumore ed altri effetti dannosi dovuti all'uso dell'automobile. Sono state espresse preoccupazioni circa la possibilità di aumentare i rischi di infortuni e l'esposizione all'inquinamento atmosferico dei pedoni e dei ciclisti, ma studi mostrano che i benefici sanitari legati all'uso della bicicletta sopravanzano i rischi sanitari derivanti da incidenti stradali. Inoltre molti studi hanno evidenziato che con l'aumento dei ciclisti si riduce il rischio di incidenti (principio del safety in numbers), in quanto la crescita del numero dei ciclisti aumenta la percezione della loro presenza da parte degli automobilisti e la probabilità che un automobilista modifichi il proprio atteggiamento di guida essendo contemporaneamente un ciclista.

In moltissime città europee la quota di spostamenti in bicicletta è più che raddoppiata attraverso l'attuazione di programmi di promozione della mobilità attiva che hanno previsto la costruzione di strutture per le biciclette ed un sistema di bike sharing.

Il bike sharing ha avuto un grande successo in molte città anche se l'impatto di questo programma è comunque difficile da valutare.

Per quanto riguarda il car sharing, il numero degli utenti e la flotta dei veicoli in Europa è destinata nei prossimi anni a crescere in modo significativo. La Germania risulta il Paese in cui il car sharing è maggiormente diffuso, con oltre 37 città servite, una crescita del 37% dal 2012 a oggi, quasi 800mila utenti e oltre 13mila veicoli sul territorio. Tra le capitali europee, Berlino (2.300 vetture e 207.000 utenti) può vantare il primato assoluto dell'auto condivisa, seguita da Londra (2.250 veicoli e 120mila utenti) e Parigi (2.000 veicoli e 105mila utenti); ancora in fase di start up Roma (120 veicoli e 2.500 utenti) e Madrid (8.000 utenti e 130 veicoli), dove, però, nei primi mesi del 2014 hanno preso avvio nuove iniziative destinate a imprimere una forte accelerazione. A livello nazionale il primato spetta a Milano che a fine 2013 poteva contare su una flotta di oltre 1.500 vetture e oltre 90mila utenti.

### **5.3.5 MOBILITÀ IN ITALIA**

Sul piano degli adempimenti normativi, a livello comunale, si osserva l'adozione e revisione del Piano Urbano del Traffico (PUT) in tutte le città italiane e la frequente adozione di altri strumenti quali il bilancio ambientale. Una valutazione dei Piani Regionali di Risanamento della Qualità dell'Aria, altro strumento adottato a livello regionale da utilizzare per elaborare piani di rientro entro i limiti di legge di inquinanti atmosferici in caso di superamento, ha evidenziato che tali piani hanno avuto una portata d'azione limitata.

Per quanto riguarda il tasso di motorizzazione (auto ogni 100 abitanti), le città italiane sono caratterizzate da un elevato tasso, con una tendenza ad una modesta riduzione nell'ultimo biennio per quanto riguarda auto e moto, con differenze consistenti tra le varie città, più evidente in molte città del Sud. Le più motorizzate sono L'Aquila con 78,9 e Potenza con 73,4 auto ogni 100 abitanti, seguite da Catania con 72,5 e Latina con 72,1.



Le modifiche della consistenza del parco auto circolante sono state accompagnate da un suo rinnovamento con una riduzione dei veicoli rispondenti agli standard emissivi più vecchi, sempre con marcate differenze tra le varie città.

Sul piano delle misure volte ad incoraggiare l'uso di modalità di spostamento alternative al mezzo privato è da segnalare il ridotto sviluppo di metropolitane e sistemi tranviari ed il ritardo nell'ammodernamento delle reti esistenti di trasporti ferroviari suburbani. Tali ritardi sono evidenti se messi a confronto con quanto avviene in molte città europee di varia ampiezza demografica, dove il trasporto su rotaia riveste un ruolo centrale nella mobilità in ambito urbano.

L'offerta di trasporto pubblico, misurata come chilometri percorsi annualmente dalle vetture per abitante, varia da un massimo di Milano, seguita da Cagliari, Roma e Torino, ad un minimo di Palermo. Per quanto riguarda la domanda di trasporto pubblico, misurata come numero passeggeri trasportati per abitante per anno, i dati Istat sanciscono che, dopo un triennio di relativa stabilità, la tendenza negativa del calo del numero dei passeggeri iniziata nel 2012 (con 7,7%) è proseguita anche nel 2013 (-4,3%). Si tratta di un fenomeno che riguarda maggiormente i capoluoghi del Mezzogiorno (11,1%) rispetto al Centro (1,4%) e al Nord (5,3%).

L'estensione delle ZTL è elevata solo in due città, Firenze e Bologna, mentre è di entità molto ridotta, o è assente, nelle altre città. Anche l'estensione delle aree pedonali, a parte il valore eccezionalmente elevato di Venezia legato alle caratteristiche strutturali della città, è estremamente variabile, con le percentuali più elevate a Torino e Firenze.

La disponibilità di piste ciclabili, valutata in relazione al numero di abitanti, è più ampia a Bologna, Venezia, Firenze e Torino. Tuttavia l'estensione non permette di esprimere una valutazione su importanti fattori che ne influenzano la fruibilità, quali lo stato di manutenzione, il grado di interconnessione tra le piste, il livello di protezione nelle intersezioni pericolose con la rete viaria, ecc.

Il servizio di car sharing è presente solo in 23 città (soprattutto al nord), quello di bike sharing (presente in 188 città), anche se ha avuto un notevole incremento

negli ultimi anni i relativi progetti al momento sono ben lontani dall'essere definiti positivi; a partire dai buchi di bilancio e dalla scarsa cultura ciclistica di buona parte della popolazione, c'è la sensazione che si potrebbe fare molto di più, anche per fronteggiare i costi ed evitare che il servizio finisca in perdita. In definitiva i servizi di bike e car sharing esistono ma risultano ininfluenti, troppo poco sviluppati in proporzione al numero di abitanti che ne potrebbero beneficiare.

La presenza di verde pubblico presenta valori elevati in quattro città (Palermo, Ancona, Roma e Napoli), molto basso a Venezia, Bari e Trieste, assente a Taranto ed intermedio nelle altre città. Queste disomogeneità sono solo in parte spiegabili con le peculiarità locali e, in larga parte, fanno pensare ad una diversa attenzione "storica" alle problematiche ambientali e ad un'estemporaneità delle scelte effettuate dalle varie Amministrazioni.

La questione della sostenibilità finisce per incrociare il tipico circolo vizioso che lega, in modo articolare le diverse città italiane:

- la scarsa qualità dei servizi di trasporto erogati (non solo in termini di orari e velocità, ma anche di leggibilità e integrazione delle reti, comfort dei mezzi, etc);
- l'inadeguatezza delle strutture tariffarie, largamente insufficienti a sostenere i costi del servizio e anche poco adeguate alle esigenze di fidelizzazione della clientela in un'ottica di concorrenza al modo motorizzato privato;
- la bassa produttività delle aziende, che finiscono spesso per assumere logiche imprenditoriali strettamente legate a un livello di sussidio elevato.

### **5.3.6 CITTÀ METROPOLITANA DI PALERMO. TRAFFICO E INQUINAMENTO**

Una campagna di monitoraggio itinerante, realizzata con il patrocinio del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Mare, nella città di Palermo, nel periodo tra il 14 e 16 febbraio 2014, ha dimostrato come a Palermo la situazione circa l'inquinamento sia abbastanza grave. Tale monitoraggio è stato effettuato con l'utilizzo di un Laboratorio Mobile, per 72 ore consecutive, posizionato in

piazza Verdi (angolo di Via Maqueda) e in Corso Calatafimi. Oltre ai valori del PM10, sono state raccolte informazioni sulle concentrazioni nell'aria di benzene, biossido di azoto, monossido di carbonio, biossido di zolfo e ozono. Nel corso dei tre giorni di monitoraggio sono stati registrati valori notevoli di benzene con una media giornaliera, rispettivamente, di  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e  $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; i primi due risultano, perciò, più elevati rispetto al limite di  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , previsto, come media annuale, dal Decreto legislativo 155/2010. Tutti gli altri inquinanti, durante il monitoraggio, non hanno superato i limiti previsti dalla normativa. Le condizioni meteo di forte instabilità atmosferica sicuramente hanno influito abbassando la concentrazione delle polveri sottili. Con l'instaurarsi di condizioni meteo stabili, le concentrazioni di PM10 sono aumentate fino a raggiungere dei picchi di  $119 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , in corrispondenza di un alto afflusso veicolare. Da segnalare, anche, i valori del PM2,5, che registrano una media giornaliera di  $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabella 3: Rilievo Laboratorio mobile qualità dell'aria, piazza Verdi angolo via Maqueda, nelle giornate del 14, 15 e 16 febbraio 2014.

Inquinanti monitorati	10/02	15/02	16/02	Limiti di legge
PM10 <sup>(1)</sup>	12	36	21	Limite giornaliero:50 Superamenti annui consentiti: 35
PM	//	26	15	Limite medio annuo consentito: 25
Benzene <sup>(2)</sup>	7	8.4	4.3	Limite annuo consentito: 5
Biossido di Zolfo <sup>(1)</sup>	2.6	8.6	6.6	Limite sulle 24 ore: 125
Biossido di Azoto <sup>(2)</sup>	72	101	75	Limite orario 200
Monossido di Carbonio <sup>(3)</sup>	0.7	1.8	1.5	Limite giornaliero su otto ore: 10
Ozono <sup>(2)</sup>	36	37	40	Limite di attenzione: 180 Livello di allarme: 240
(1) microgrammi su metro cubo ( $\mu/\text{m}^3$ ) – media su 24h (2) microgrammi su metro cubo ( $\mu /\text{m}^3$ ) (3) milligrammi su metro cubo ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ). La normativa: i limiti di legge degli inquinanti sono fissati dal DL n. 155 del 13/08/2010 e s.m.l.				

Gli inquinanti presenti nell'aria sono una diretta conseguenza delle emissioni prodotte dal traffico automobilistico, aggravato dal fatto che i mezzi circolanti a Palermo sono molto vecchi. Il capoluogo siciliano è tra i peggiori, in Italia, per quanto riguarda l'età media dei mezzi circolanti, per l'alto tasso di motorizzazione

privata e per la qualità del parco auto. Il 56,6% delle auto circolanti ha un'età superiore agli otto anni (media italiana del 49,7%). Numeri che non si discostano dalle altre realtà siciliane. Nell'isola, l'età media di un'auto è di 9 anni.

### 5.3.7 MOBILITÀ E TRASPORTI

La città di Palermo, centro maggiore dell'omonima provincia per la presenza di poli attrattori quali scuole, Università, servizi ed uffici pubblici, strutture culturali, ricreative e sportive, strutture ospedaliere, polarità commerciali, ecc., si estende su 158.88 *kmq* e conta 659.433 abitanti. Il Comune di Palermo si inserisce in un'area urbana metropolitana che comprende 26 comuni, oltre il capoluogo, con una popolazione complessiva di 1.065.595 abitanti. Il peso della città di Palermo è rappresentato da una popolazione che costituisce il 63,52% del totale dei residenti nell'area metropolitana, mentre nei comuni gravitanti risiede il rimanente 36,48%. Negli ultimi anni si è evidenziata una certa tendenza della popolazione urbana verso i comuni limitrofi.

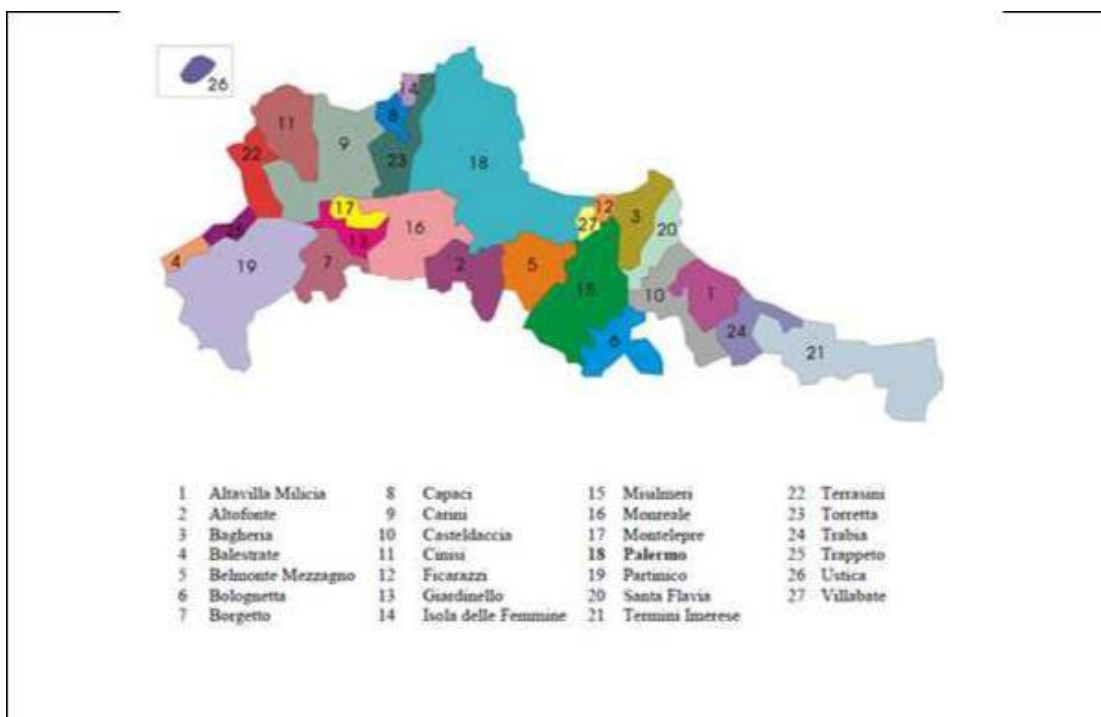


Figura 53:Palermo e la sua area metropolitana.

Lo scenario della mobilità che caratterizza la città di Palermo e alla sua area metropolitana è costituito essenzialmente:

- dalla mobilità interna all'area urbana, che costituisce la maggioranza (80%) del totale degli spostamenti che interessano l'intero sistema urbano dei trasporti;
- dal pendolarismo, fenomeno che è stato accentuato, progressivamente, dall'aumento della popolazione che risiede nei comuni limitrofi.

Il ruolo e le funzioni di capoluogo di provincia e di regione, unitamente alla forte attrattività che la città offre in termini di servizi, attività commerciali e terziarie, contribuiscono ad innalzare i livelli della pendolarità.

Inoltre, lungo la costa dell'area metropolitana è presente un sistema di attività industriali in via di espansione, localizzate in tre aree industriali abbastanza consolidate, poste agli estremi ed al centro del territorio dell'area metropolitana (Carini, Brancaccio e Termini Imerese), situazione che determina un ulteriore incremento dei livelli di mobilità, generati dagli spostamenti conseguenti dal trasporto merci, che è causa di aggravio per i livelli di congestione della rete stradale principale. Bisogna tener presente anche la domanda di mobilità generata dalla presenza del porto, in considerazione del continuo aumento del trasporto passeggeri/merci via mare.

Palermo e la sua "area vasta" si connotano per il ridotto numero di connessioni che permettono il collegamento tra i vari centri urbani ed il capoluogo; eclatante è il fatto che sia presente solo un'unica linea ferroviaria (Messina/Palermo/Trapani) che serve, oltre Palermo, 15 dei 26 comuni ubicati lungo la fascia costiera. Alla scarsità di infrastrutture ferroviarie si contrappone il consistente numero di veicoli del trasporto pubblico extraurbano, che, giornalmente, insistono sull'area urbana di Palermo, il che contribuisce ad aumentare l'addensamento dei mezzi motorizzati che percorrono le arterie cittadine.

La struttura viaria principale di Palermo può essere descritta distinguendo il sistema della viabilità di accesso alla città ed il sistema della viabilità urbana. Il sistema della viabilità che consente l'accesso alla città è costituito dalle

autostrade, dalla cosiddetta “circonvallazione” e dalle strade statali e provinciali che con assetto radiale collegano il capoluogo con il suo hinterland:

- l’autostrada A19 (Palermo-Catania), che serve le relazioni con le aree industriali di Termini Imerese, Bagheria e Brancaccio, nonché le relazioni con Messina e il continente, attraverso il collegamento con la A20 (Palermo-Messina) allo svincolo di Buonfornello, e con le province di Catania, Siracusa, Ragusa, Enna, Caltanissetta;
- l’Autostrada A29 (Palermo-Mazara del Vallo/Trapani), che serve le relazioni con l’aeroporto di Punta Raisi, con l’area industriale di Carini e con la Sicilia Occidentale;
- Viale della Regione Siciliana, con funzioni sia di sistema collettore e distributore urbano per i traffici interni e provenienti dagli assi di penetrazione radiali, sia di collegamento e di bypass urbano per i traffici di attraversamento tra la A19 e la A29;
- S.S. 113 est Settentrionale Sicula in direzione di Messina, con funzione di collegamento tra i centri costieri;
- S.S. 121 Catanese, S.P. 37 di Gibilrossa, S.P. 5 di Piana, S.S. 186 di Monreale, S.P. 1 di Montelepre, S.S. 113 ovest Settentrionale Sicula con flussi da e per Trapani.

La “circonvallazione”, oggi, con l’espansione della città, ha assunto la funzione di arteria interna rispetto agli insediamenti. Essa ha una sezione di tipo autostradale ed è utilizzata come tangenziale urbana.



Figura 54: Sistema di accesso alla città: autostrade, strade statali e provinciali.

Il sistema della viabilità urbana è incentrato sul reticolo di strade a maglia ortogonale dell'area centrale. In particolare, l'area centrale di Palermo risulta caratterizzata dalla presenza di due importanti assi ortogonali:

- Corso Vittorio Emanuele - Corso Calatafimi, che costituisce la direttrice est-ovest, su cui è sorto il nucleo originario della città, poi proseguita, in epoca successiva, fino a Monreale (SS 186);
- Via Maqueda, lungo il cui asse seicentesco sono state ordite le successive espansioni a sud, lungo Via Oreto, ed a nord, lungo l'itinerario Via Ruggero Settimo-Via della Libertà.

I suddetti assi dividono in quattro settori il Centro Storico, caratterizzato al suo interno da una viabilità poco permeabile con sezione molto ridotta e disomogenea.

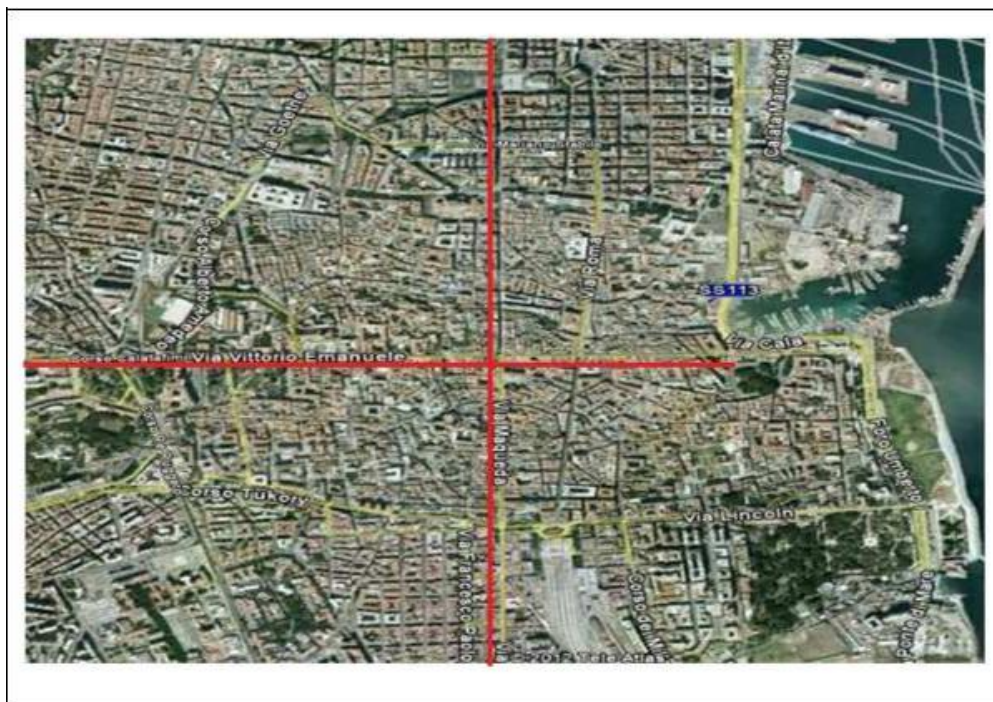


Figura 55: Sistema di viabilità urbana: reticolo di strada a maglia ortogonale dell'area centrale

La campagna di analisi condotte sul parco veicolare circolante del Comune di Palermo, effettuata ai fine della redazione del PGTU (Piano Generale del Traffico Urbano), ha evidenziato che ogni giorno, il sistema urbano di Palermo è interessato da un flusso di autovetture pari a 898.352 (di cui 69.104 nell'ora di punta 07:30-08:30). Dei 69.104 spostamenti effettuati durante l'ora di punta, 56.910 effettuano spostamenti interni alla città e rappresentano la mobilità interna dei residenti; i restanti 12.194 sono relativi agli spostamenti di scambio e di attraversamento del centro urbano. Il trasporto pubblico urbano su gomma è risultato interessato da un volume di domanda di circa 19.230, durante l'arco dell'ora di punta mattutina 07:30-08:30 e nell'ambito degli spostamenti interni al territorio comunale. Il numero medio di passeggeri a bordo delle auto (coefficiente di occupazione) è risultato pari a 1,3.

Tabella 4: Dati di mobilità relativi al PGTU.

<b>Flusso di auto nell'ora di punta (07:30-08:30)</b>		69.104
	spostamenti interni al territorio comunale	56.910
	spostamenti di scambio e di attraversamento	12.194
<b>Coefficiente medio di occupazione delle auto (persone/auto)</b>		1,3



<b>Flusso di persone su auto nell'ora di punta (07:30-08:30)</b>		74.000
<b>Flusso di passeggeri su mezzo pubblico su gomma interni al territorio comunale nell'ora di punta (07:30-08:30)</b>		19.230
<b>Ripartizione modale degli spostamenti interni al territorio comunale nell'ora di punta (07:30-08:30)</b>		
	<b>auto privata</b>	80%
	<b>mezzo pubblico</b>	20%
<b>Flusso giornaliero di auto</b>		898.352
<b>Flusso giornaliero di persone su auto</b>		1.167.857

### **5.3.8 SISTEMA DI RILEVAMENTO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA**

La prima azione verso il contrasto al fenomeno dell'inquinamento atmosferico è stata una spinta all'installazione di nuove reti di monitoraggio o al potenziamento delle esistenti in modo da conoscere l'entità e l'estensione del problema. Tuttavia, tali reti controllano un numero limitato di punti e non è sempre garantito che essi rappresentino, effettivamente, la realtà di un territorio.

Nell'ambito delle correlazioni tra dati di traffico e gli agenti inquinanti, si è fatto ricorso ai dati forniti dalla rete di stazione di rilevamento fisse, installate nel territorio palermitano dall'AMIA. Tale rete di monitoraggio della qualità dell'aria, istituita nel 1991 ed entrata in funzione nell'agosto del 1966, è costituita da:

- 18 punti di monitoraggio, di cui 10 stazioni di monitoraggio ed 8 mini centraline montate su pali che utilizzano dei microsensori per il rilevamento continuo degli inquinanti e del livello di inquinamento acustico;
- 89 apparecchiature di rilevamento di parametri chimici e fisici dell'aria;
- 1 centro di raccolta elaborazioni ed archiviazione;
- 2 punti di diffusione delle informazioni al pubblico.

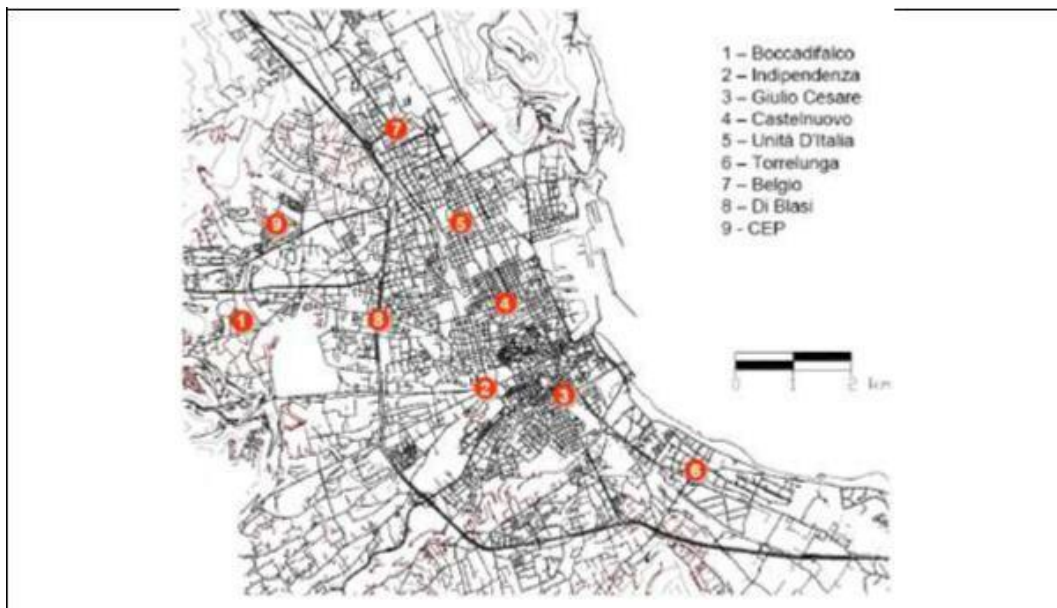


Figura 56: Ubicazione delle stazioni della rete di rilevamento di qualità dell'aria.

Tutte le cabine sono collegate, tramite modem e linea telefonica commutata ISDN, al centro di supervisione, sito nella sede AMIA. Il centro consente la supervisione ed il controllo, in tempo reale, di tutte le apparecchiature di rilevamento dei parametri chimici e fisici installati nelle cabine, nonché dello stato delle cabine stesse (alimentazione elettrica, intrusioni, temperatura interna, ecc.). Il centro, in assenza dell'operatore, è programmato per acquisire periodicamente, da ciascuna cabina, tutti i dati relativi al funzionamento della cabina stessa e degli strumenti ed i valori di inquinamento rilevati, nonché per ricevere le eventuali segnalazioni di anomalia (allarmi) trasmesse automaticamente. Tutti i dati, allarmi, ecc. sono memorizzati in linea, per oltre due anni, su un database, e possono essere visualizzati, in forma grafica e/o tabellare, secondo vari criteri di ricerca o di sintesi statistica.

I dati rilevati dalle diverse centraline vengono pubblicati sul sito dell'AMIA (oggi R.A.P. spa Risorse Ambiente Palermo – Settore Monitoraggio dell'Aria), sotto forma di bollettini giornalieri e mensili.

Dall'analisi effettuata, sulla base degli oltre dieci anni di rilevamenti continui della rete fissa di monitoraggio del Comune di Palermo, si può concludere che:

- l'ossido di carbonio, da alcuni anni, non costituisce più un inquinante critico per la città di Palermo, in quanto, negli ultimi anni, non sono mai stati registrati superamenti del valore limite e i valori massimi di concentrazione rilevati raggiungono la metà circa del valore limite solo in poche occasioni all'anno e sotto particolari condizioni meteo (inversione termica);
- il biossido di zolfo, per quasi tutta la città di Palermo, non ha mai rappresentato un problema. Solo negli ultimi anni e solo per le aree prospicienti la zona portuale, sono stati superati, sotto particolari condizioni atmosferiche, i valori limite orario e giornaliero;
- il biossido di azoto risulta tra gli inquinanti più critici per il territorio, con valori superiori al limite della media annuale nella zona centrale dell'agglomerato urbano e qualche superamento del valore limite orario abbondantemente entro il limite massimo previsto;
- il PM10 risulta essere un inquinante particolarmente critico per la città di Palermo, sia per il numero di superamenti del valore limite giornaliero di protezione della salute umana, sia per il valore limite annuale. Il problema riguarda l'intera area urbana ed è maggiormente accentuato in prossimità delle aree interessate da intenso traffico veicolare o frequenti ingorghi o rallentamenti;
- il benzene, fino al 2010, non ha costituito un inquinante critico in quanto i valori rilevati rientravano entro il limite maggiorato del margine di tolleranza. Con l'azzeramento del margine di tolleranza, in buona parte della città non è stato più rispettato tale limite e il benzene si è aggiunto agli altri inquinanti critici esistenti.

### **5.3.9 INTERVENTI PROPOSTI PER LIMITARE LE EMISSIONI DA TRAFFICO**

Il Piano Generale del Traffico Urbano (PGTU) di Palermo, approvato nel novembre 2012, per limitare le emissioni da traffico, ha proposto alcuni interventi:

Aree pedonali e piste ciclabili: sono estese le aree già preesistenti e se ne creano nuove, operando scelte atte a valorizzare i contesti urbani e monumentali di maggior pregio ed interesse. Per quanto riguarda le piste ciclabili, vengono confermate integralmente gli orientamenti e le scelte dello strumento urbanistico vigente in relazione alla mobilità ciclabile, ribadendo la volontà di dotarsi di una rete di piste ciclabili.

Zone a Traffico Limitato (ZTL): è entrata in vigore una ZTL nella zona centrale della città. Previo pagamento di un ticket (giornaliero, settimanale o annuale) l'ingresso è consentito solo ai veicoli a due ruote a partire da Euro 2 e alle auto Euro 3 o superiori, mentre è categoricamente negato ai veicoli appartenenti alle classi Euro 0, Euro 1 ed Euro 2 (oltre il 35% dell'intero parco auto cittadino). Per agevolare l'utenza cittadina, si sono messe in atto alcune soluzioni fondate su servizi sostitutivi che possano assicurare un livello accettabile di accessibilità all'area regolata. Tra queste soluzioni presentano funzioni importanti le linee navetta gratuite, esercitate con minibus (anche per la possibilità di utilizzare efficientemente mezzi a ridotta emissione), in grado di servire i parcheggi di scambio per distribuirne l'utenza nelle aree a traffico limitato, il car sharing ed il bike sharing.

Interventi sul trasporto pubblico; le principali proposte sono state:

- piano delle corsie riservate ai mezzi pubblici;
- sistema telematico di controllo dei transiti nelle corsie riservate;
- sistema di telecontrollo della flotta;
- istituzione di “Linee Express” per il collegamento tra parcheggi periferici di interscambio ed il centro città;
- valorizzazione dei parcheggi d'interscambio e conseguente diminuzione dell'attraversamento del centro urbano da parte delle linee di trasporto extraurbano su gomma. A tal proposito, tutti i pullman provenienti dai comuni limitrofi si attesteranno presso i parcheggi di interscambio, previo interventi infrastrutturali per migliorarne gli ingressi;
- nuova integrazione tariffaria con biglietto unico Ferrovie-Amat;

- creazione di nuove linee del Tram.

### **5.3.10 MOBILITÀ SOSTENIBILE E PROGETTI DI CAMBIAMENTO**

Sebbene negli ultimi anni si è assistito allo spostamento della popolazione cittadina verso i comuni limitrofi, gli effetti di diminuzione della popolazione sono solo apparenti. Palermo rimane il polo di attrazione degli spostamenti per motivi di lavoro.

Il numero elevato di spostamenti in auto è riconducibile, principalmente, alle disfunzioni del sistema dei mezzi pubblici, per cui solo una parte ridotta dei pendolari si sposta in treno o in autobus. Purtroppo le abitudini di spostamento sono ancora fortemente incentrate sull'uso dell'automobile. Emerge la centralità dell'automobile come mezzo irrinunciabile nella vita quotidiana; a questo si aggiunge l'identificazione del mezzo privato con la possibilità dell'autonomia, della libertà di movimento e della certezza (o almeno la presunzione di tale certezza) di potere raggiungere la propria destinazione in tempi brevi, senza rischiare ritardi o imprevisti dovuti al malfunzionamento dei mezzi pubblici.

Sono stati predisposti diversi interventi per migliorare la situazione della mobilità. Tra questi gli interventi infrastrutturali che prevedono il raddoppio del passante ferroviario Palermo-Punta Raisi, il completamento dell'anello metro-ferroviario e la costruzione, oltre alle prime quattro già realizzate, di nuove linee della tramvia per collegare il centro con le periferie. Inoltre, in città sono stati già attivati sistemi di car sharing, taxi sharing e bike sharing.

Un altro problema sottolineato di frequente e riguardante il tema della mobilità in città è rappresentato dall'assenza d'intermodalità: il sistema di trasporto attuale è caratterizzato da un panorama variegato di mezzi che però non sono tra loro in connessione. Laddove, invece, esistono condizioni minime per permettere un certo grado d'intermodalità, queste sono spesso ignorate; caso significativo è quello dei parcheggi d'interscambio: negli ultimi anni ne sono stati costruiti almeno tre in corrispondenza di punti ritenuti strategici per l'accesso alla città, ma con scarsi risultati in termini d'impatto e utilizzo. Nella maggior parte dei casi

sono rimasti vuoti o addirittura utilizzati con funzione diversa da quella prevista. Le ragioni di ciò sono da ritrovarsi ancora una volta nella scarsa fiducia nutrita nei confronti della sicurezza e affidabilità dei mezzi pubblici.

La promozione dell'intermodalità rimane, dunque, una condizione necessaria affinché il sistema della mobilità cittadina possa migliorare nel tempo. Mezzi trasporto più efficienti, insieme alla possibilità di un loro uso integrato, potrebbero contribuire a disincentivare in modo significativo l'abitudine a spostarsi in auto.

#### **5.4 GLI ALTRI ASPETTI DELLA MOBILITÀ SOSTENIBILE**

Il concetto di mobilità sostenibile non si limita soltanto a tematiche come l'inquinamento atmosferico ed acustico, bensì si estende anche ad aspetti come la sicurezza e l'incidentalità.

Risulta utile quindi dare una definizione più generale di mobilità: si parla di mobilità quando per accedere ad una opportunità è necessario uno spostamento; essa è, quindi, la possibilità di effettuare uno spostamento. Gli spostamenti, oltre che ecosostenibili, comodi e veloci, devono essere sicuri. Lo studio dell'incidentalità consiste nell'analizzare con precisione tutti quegli elementi che influiscono sulla pericolosità in modo da adoperarsi per mettere in atto modifiche che possano garantire la sicurezza stradale. La maggior parte degli incidenti, purtroppo, deriva dall'errore umano e quindi dalla non osservazione del codice della strada, come non mantenere le distanze di sicurezza, non utilizzare gli indicatori di direzione, non rispettare i semafori e la segnaletica in generale. Un'altra delle principali cause di incidenti è la mancanza di manutenzione del proprio veicolo, che spesso porta ad imprevisti che possono arrecare seri danni non solo per chi viaggia all'interno del mezzo ma anche per chi vi sta intorno.

#### **6. SICUREZZA STRADALE: L'INCIDENTALITÀ**

Le case costruttrici sono estremamente impegnate nel campo della sicurezza; nei nuovi modelli vengono introdotti sistemi sempre più all'avanguardia per "aiutare" i conducenti nella concentrazione alla guida, nel rispetto delle regole e per limitare quanto più possibile i danni in seguito agli impatti. In auto distinguiamo intanto due tipi di sicurezza:

- Sicurezza attiva: si intende l'insieme di elementi che hanno una funzione preventiva e che quindi hanno l'obiettivo di impedire il verificarsi di incidenti. L'elemento di sicurezza attiva più importante è senza dubbio il conducente che, con la sua condotta, è quello che più di ogni altro sistema può garantire la sicurezza durante la guida. Anche la segnaletica stradale e la strada stessa possono essere considerate, se ben disposte e ben progettate, un elemento di sicurezza attiva. Altri elementi di sicurezza attiva sono: i freni, le luci, gli ammortizzatori, lo sterzo, gli pneumatici ed i tergilavafari.

Esistono poi tanti altri sistemi secondari ma non di minore importanza:

- ABS: con questo sistema, in fase di frenata, si evita il bloccaggio di una ruota mentre le altre ancora girano.

Durante la manovra di frenatura, infatti, bisogna contrastare l'energia cinetica che il veicolo aveva acquistato durante la marcia. Le forze che si oppongono all'energia cinetica del mezzo si manifestano lungo la superficie di contatto ruota-asfalto e al contatto fra la pastiglia e il disco freno; il lavoro che compiono viene dissipato sotto forma di calore. Se la ruota si blocca, ovvero se non viene più dissipata energia nell'area di contatto pastiglia-disco, questa deve essere totalmente dissipata sulla superficie di contatto gomma-asfalto. Tuttavia l'energia termica massima che si può generare è quella che fa fondere il battistrada (e che causa la classica fumata della gomma con evidenti segni lasciati sull'asfalto) e risulta inferiore a quella in condizioni di rotolamento puro.

L'ABS interviene facendo diminuire la pressione sulla pinza del freno di quella ruota, permettendo così a chi guida di mantenere la capacità di dirigere il veicolo. Tramite i denti di una ruota fonica, infatti, un apposito sensore genera delle variazioni di corrente che invia ad una centralina; quando la ruota è bloccata ed alla centralina non arriva alcun segnale, questa manda un impulso alla valvola di ritorno che si apre, diminuendo la pressione sulla pinza e lasciando risalire il liquido del freno verso il serbatoio, per poi subito dopo far ritornare la pressione sulla pinza. Questo procedimento viene ripetuto secondo cicli controllati.

I benefici sono uno spazio di frenata inferiore ed un maggiore controllo in caso di asfalto bagnato.

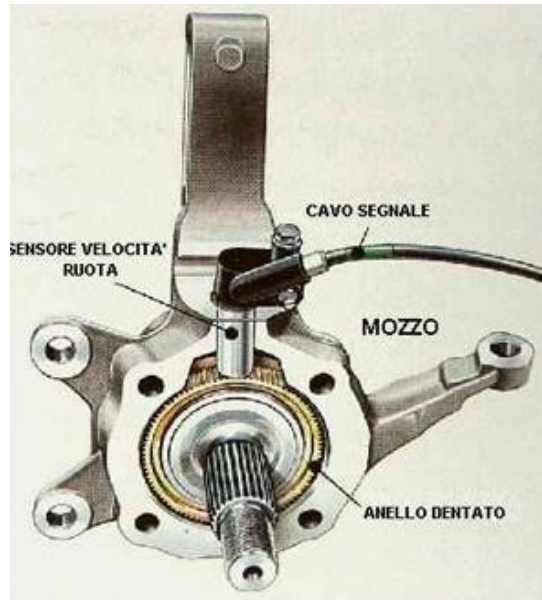


Figura 57: Dettaglio ruota fonica.

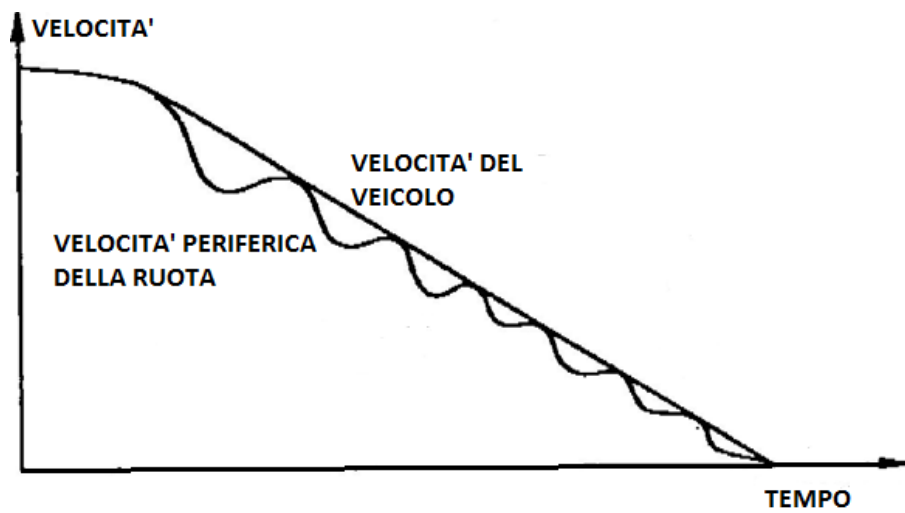


Figura 58: Decelerazione nella frenatura con ABS.



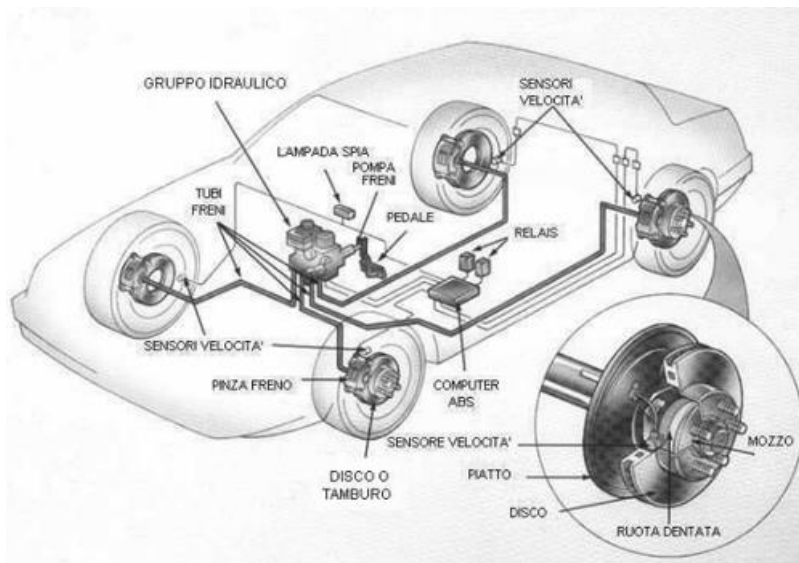


Figura 59: Disposizione sistema ABS.

- ESP: è obbligatorio su tutti i veicoli immatricolati dopo il 1° Novembre 2014. La sigla sta per “Programma Elettronico di Stabilità” ed il compito di questo sistema è quello di mantenere stabile il veicolo in caso di manovre improvvise, sottosterzo, sovrasterzo e di sbandata in generale. I componenti di cui è costituito sono: un sensore di angolo sterzo, che comunica alla centralina i movimenti del guidatore; 4 sensori di velocità, che sono gli stessi del sistema ABS; 3 accelerometri posti a centro auto. Grazie a tutte le informazioni provenienti da questi sensori, la centralina è in grado di intervenire sia singolarmente sui freni di ciascuna ruota, sia sull'alimentazione del motore, correggendo la dinamica del veicolo.

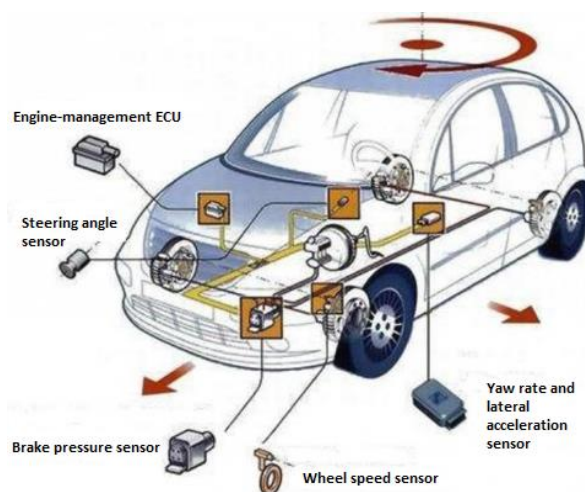


Figura 60: Disposizione sistema ESP.

- Sistemi anticollisione: sono dei sistemi che svolgono il ruolo di rilevare e segnalare al conducente la presenza di ostacoli o di veicoli in avvicinamento. Essi sono costituiti da radar o da telecamere sensibili ai raggi infrarossi che emettono dei segnali; questi, rimbalzando, tornano indietro e, grazie ad un software che tiene sotto controllo la velocità del veicolo e la distanza dell'ostacolo, la centralina valuta se questo può costituire un pericolo ed eventualmente attiva un allarme sonoro e lo segnala su un apposito display.
- Sistemi di rilevazione delle condizioni del conducente: si tratta di una serie di sensori che svolgono la funzione di monitorare dei “comportamenti tipo” del conducente e di attivare sistemi di allarme che lo obbligano a riprendere la concentrazione o a volte addirittura a fermarsi. I principali segni fisici caratteristici che possono essere rilevati sono la chiusura delle palpebre, una presa del volante più debole, la presenza di vapori alcolici all'interno dell'abitacolo o ancora l'invasione di una corsia sbagliata ed il superamento dei limiti della carreggiata. Vi sono anche sistemi che interpretano il comportamento alla guida, come una variazione brusca della direzione o una guida a zig-zag ed avvisano una centrale operativa in grado di localizzare il veicolo ed inviare eventuali soccorsi.
- Sicurezza passiva: è quella che deve limitare i danni conseguenti ad un impatto già avvenuto. I sistemi di sicurezza passiva hanno il compito di assorbire quanto più possibile l'energia cinetica posseduta da chi occupa il veicolo, in modo da diminuire l'entità dell'impatto con le strutture del veicolo. Rientrano in questa categoria:
  - Cinture di sicurezza: esse sono il sistema di protezione più importante, in quanto “trattengono” il corpo ed evitano che questo venga sbalzato all'esterno del veicolo o che urti volante, cruscotto e parabrezza. Se indossata correttamente ed in qualunque momento, la cintura di sicurezza diminuisce il rischio di lesioni gravi anche del 50% e, se accoppiata ad un sistema di pretensionamento che la stringe una volta riconosciuta la concreta possibilità di impatto, assicura una dissipazione dell'energia ancora maggiore. Il limite della cintura di sicurezza è

quello di non impedire l'urto della testa contro il volante; limite a cui sopperisce l'airbag.

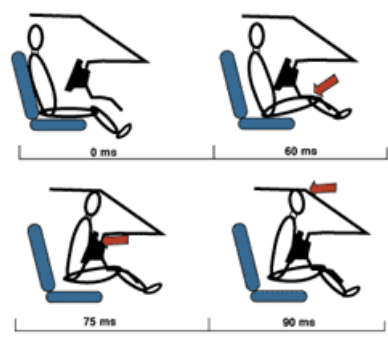


Figura 61: Urto senza cintura di sicurezza.

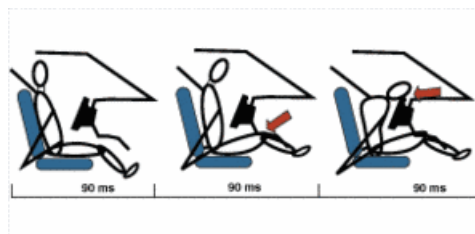


Figura 62: Urto con cintura di sicurezza.



Figura 63: Urto con airbag.

- Airbags: l'airbag interviene nel caso di urti con forti decelerazioni. La centralina che riceve il segnale da un apposito sensore comanda l'attivazione del detonatore, che accende le sostanze contenute in una capsula esplosiva. L'airbag è composto da un "sacco" di materiale sintetico che viene gonfiato dalla grande quantità di gas emesso per l'esplosione e si va sgonfiando tramite dei fori posteriori ad impatto avvenuto, attenuando maggiormente l'urto della testa e di parte del torace. Questo è posto dietro il volante per il guidatore, dietro il cruscotto dal lato passeggero ed esistono anche quelli laterali ed a tendina per i passeggeri.
- Poggiatesta: il poggiatesta è molto utile sia in caso di tamponamento che in caso di urto frontale, in quanto evita la flessione del collo e conseguenti danni alle

vertebre cervicali ed ai tessuti muscolari. E' importante una regolazione adeguata, con il bordo superiore all'altezza del margine superiore della testa.

Altri elementi di sicurezza passiva al di fuori dei veicoli sono i guard rail, la cui deformabilità è studiata in modo da assorbire l'energia cinetica dovuta agli impatti.

Inoltre il veicolo in sé deve costituire un elemento di sicurezza passiva in quanto la struttura della parte anteriore, posteriore e laterale deve essere opportunamente progettata al fine di dare all'abitacolo la maggiore resistenza possibile. Da qui la necessità di sottoporre i veicoli a prove che ne verifichino l'integrità e la sicurezza in qualsiasi circostanza (ancor prima che il consumatore acquisti il veicolo) e l'introduzione di normative che diano garanzie sul prodotto realizzato dalle case automobilistiche. Solo dopo aver studiato esempi di urto veicolo-veicolo o veicolo-pedone/ciclista e aver compreso i meccanismi di lesione del corpo umano e i limiti di resistenza che questo ha, sono state messe a punto delle normative che obbligano i produttori a immettere sul mercato prodotti in linea con gli studi effettuati. Un passo in questa direzione dal punto di vista della sicurezza sia attiva che passiva è stato fatto con il programma EuroNCAP. Il programma europeo di valutazione dei nuovi modelli di automobili, tramite esecuzione di crash test specifici, assegna delle stelle per aiutare i consumatori a scegliere il veicolo migliore per le proprie esigenze.



Figura 64: classificazione della sicurezza nella normativa EuroNCAP.

Il numero di stelle riflette le prestazioni del veicolo nei test, ma è influenzata anche dall'equipaggiamento di sicurezza che il costruttore offre; anche la protezione dei pedoni è diventata parte integrante dello schema di valutazione. I risultati di alcuni veicoli ibridi o elettrici di cui è stato discusso in precedenza sono riportati in fig. 65 in maniera esplicitiva.

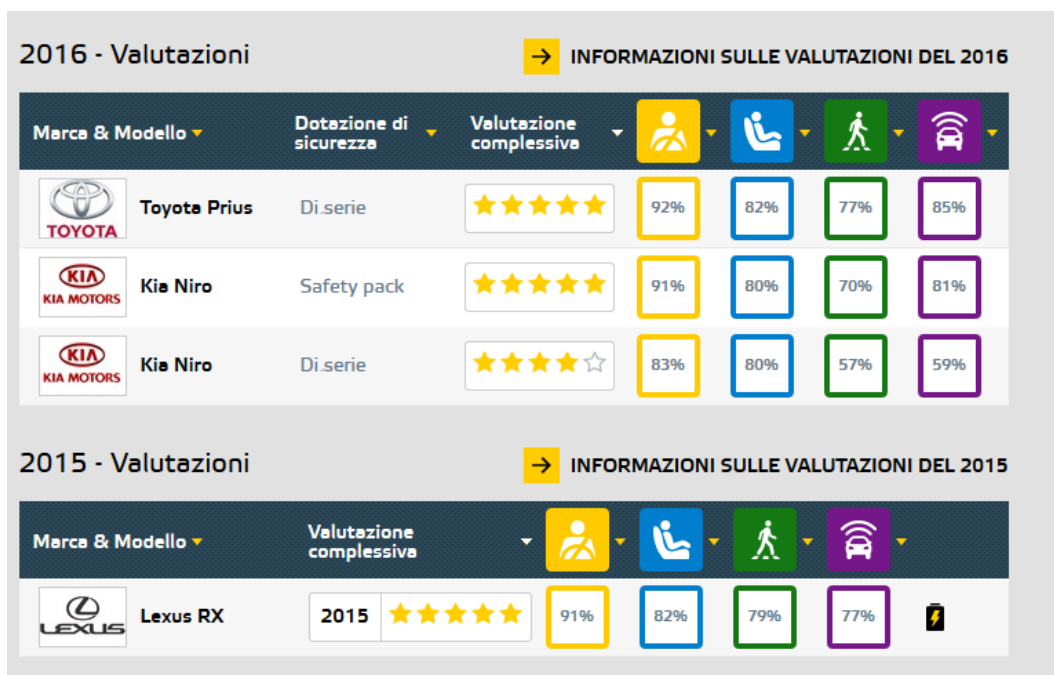


Figura 65: valutazione della sicurezza nella normativa EuroNCAP.

Il programma EuroNCAP fa parte di quella più vasta categoria di prove sul veicolo chiamata *consumer test*. Come già è stato detto per l'EuroNCAP, i consumer test forniscono informazioni al consumatore sulle differenti prestazioni di prodotti in concorrenza sul mercato delle compravendite. Proprio per questa ragione, per esempio, non è richiesto il superamento di alcuna soglia minima oltre la quale il test è superato, ma conta il punteggio raggiunto in rapporto ai concorrenti.

Questi basano il loro giudizio su pochi test che riproducono gli incidenti più pericolosi e che si ripetono più frequentemente. Il consumer test si propone come stimolo per le case produttrici a realizzare veicoli con caratteristiche di sicurezza superiori a quelle minime prescritte dalle normative.

La tabella seguente racchiude tutti i principali programmi di consumer test attuati nel mondo fino ad oggi:

Tabella 5: esempi di consumer test.

Mercato	Rating	Utenti considerati	Incidenti simulati	Finalità
Europa, Australia	Euro NCAP	Occupanti adulti sui sedili anteriori. Occupanti bambini sui sedili posteriori.	1. Scontro frontale tra due veicoli, overlap parziale. 2. Vettura che urta il fianco di un veicolo. 3. Fianco del veicolo contro palo o albero.	Valutazione della self protection di adulti e bambini in urti severi.
Europa	Euro NCAP	Pedoni adulti e bambini.	Veicolo a 40 km/h contro pedone.	Valutazione protezione pedoni.
USA	USNCAP	Occupanti adulti sui sedili anteriori.	Scontro frontale contro ostacolo rigido o altro veicolo, overlap totale.	Valutazione della self protection adulti in urti severi.
USA	LINCAP	Guidatore e passeggero posteriore adulti.	Vettura che urta il fianco di un veicolo.	
USA	IIHS	Guidatore.	Scontro frontale tra due veicoli, overlap parziale.	
USA	IIHS	Guidatore e passeggero posteriore di piccola statura.	SUV che urta il fianco di un veicolo.	Valutazione della self protection delle persone piccole in urti laterali molto severi.
Giappone	Japan NCAP	Occupanti adulti sui sedili anteriori.	1. Scontro frontale tra due veicoli, overlap parziale. 2. Scontro frontale contro ostacolo rigido o altro veicolo, overlap totale. 3. Vettura che urta il fianco di un veicolo.	Valutazione della self protection adulti in urti severi.
Europa e USA	IIWPG	Occupanti adulti sui sedili anteriori.	Urto posteriore di bassa severità.	Valutazione rischio di colpo di frusta.

Le normative, invece, nascono dall'osservazione delle statistiche sugli incidenti e dall'individuazione delle parti critiche del veicolo negli impatti ed hanno la finalità di elevare gli standard di qualità e di resistenza minima di codeste parti.

Prima di emettere una normativa o di modificarne una esistente, è necessario un'accurata valutazione dei benefici e dei costi che essa comporta; il maggior costo del veicolo deve essere compensato dalla riduzione dei costi sociali conseguenti all'adozione della nuova normativa.

Per valutare quest'ultimo si calcola il costo per rendere i veicoli conformi alla nuova normativa e la riduzione dei costi sociali derivati dal minor numero di vittime, morti e feriti, che si otterrebbero con l'introduzione della nuova normativa.

I due principali corpi normativi esistenti sono quello europeo e quello americano. Nonostante si cerchi di ridurre le disparità tra essi, le difficoltà sono molteplici e riguardanti diversità di infrastrutture, di utilizzo dei veicoli e di statistiche diverse sugli incidenti tra Europa ed America.

A grandi linee possiamo dire che i principali regolamenti americani sono più severi rispetto agli europei sugli urti frontali e sugli impatti sui rivestimenti interni, mentre gli europei lo sono su temi riguardanti, per esempio, la protezione pedone o la resistenza sedili.

Tabella 6: principali normative europee di sicurezza passiva.

Argomento	Reg. ECE	Direttiva EU	Categorie di veicoli interessate											
			M1	M2	M3	N1	N2	N3	O1	O2	O3	O4		
Urto frontale	33	-	X											
Sistema sterzo	12	74/297	X			X								
Urto frontale con manichini	94	96/79	X											
Urto laterale	95	96/27	X			X								
Serrature e cerniere	11	70/387	X			X	X	X						
Rivestimenti interni	21	74/60	X											
Sedili	17	74/408	X	X	X	X	X	X						
Appoggiatesta	17, 25	78/932	X											
Sporgenze esterne	26	74/483	X											
Ancoraggi cinture	14	76/115	X	X	X	X	X	X						
Cinture di sicurezza	16	77/541	X	X	X	X	X	X						
Seggiolini bambino	44	R44												
Vetri di sicurezza	43	92/72	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Inflammabilità materiali		92/24			X									
Protezione posteriore	58	70/221	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Serbatoi carburante	34													
Urto posteriore	32	-	X											
Protezione pedoni	-	2003/102	X			X								
Protezione laterale veicoli trasporto merci	73	89/297					X	X				X	X	
Protezione anti incastro anteriore	93	2000/40					X	X						

M1: Veicoli trasporto persone aventi al massimo otto posti a sedere oltre al conducente.

M2: Veicoli trasporto persone aventi più di otto posti a sedere oltre al conducente e massa massima ≤ 5 t.

M3: Veicoli trasporto persone aventi più di otto posti a sedere oltre al conducente e massa massima > 5 t.

N1: Veicoli destinati al trasporto di merci aventi massa massima non superiore a 3,5 t.

N2: Veicoli destinati al trasporto merci aventi una massa massima superiore a 3,5 t ma non superiore a 12 t.

N3: Veicoli destinati al trasporto di merci aventi massa massima superiore a 12 t.

O: Rimorchi e semirimorchi.

Le normative dell'unione europea sono chiamate "direttive". I Test per dimostrare la conformità dei veicoli sono denominati "omologativi" e possono essere effettuati in un qualunque laboratorio accreditato da uno dei Ministeri dei

Trasporti dell'Unione Europea. La tabella 6 contiene le principali normative europee di sicurezza passiva e i veicoli su cui sono applicate.

Nei paragrafi successivi si riporta qualche esempio di test eseguito dal programma EuroNCAP.

## 6.1 IMPATTO FRONTALE VEICOLO-BARRIERA

L'autovettura viene fatta impattare alla velocità di 64 km/h contro una barriera deformabile eccentrica rispetto alla parte frontale del veicolo.

La barriera è un blocco fisso formato da vari strati sovrapposti di alluminio a "nido d'ape" che simula il frontale di un'altra auto.

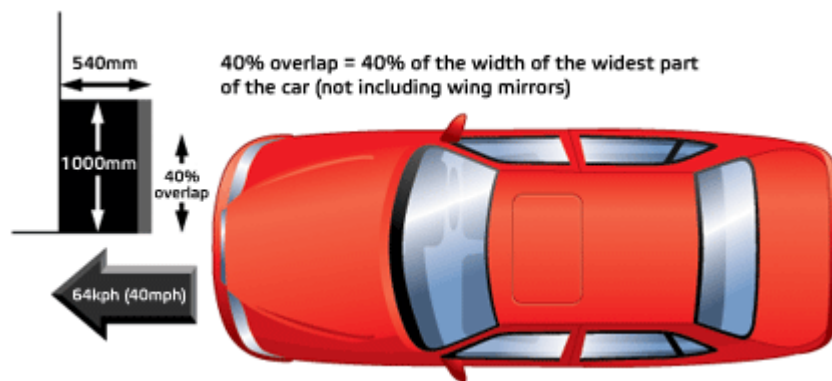


Figura 66: esempio di impatto frontale nella normativa EuroNCAP.

L'urto intende rappresentare la tipologia di collisione più frequente negli incidenti stradali, in cui i passeggeri riportano lesioni di tipo grave o fatale. Il test misura la capacità della vettura di resistere all'impatto senza che elementi strutturali penetrino nell'abitacolo.

## 6.2 IMPATTO LATERALE

EuroNCAP simula questo tipo di collisione proiettando una barriera mobile deformabile contro la portiera del conducente alla velocità di 50 km/h.

È importante sottolineare come l'adozione degli airbag laterali sul veicolo sia avvenuta a partire dall'esecuzione di questo tipo di test.



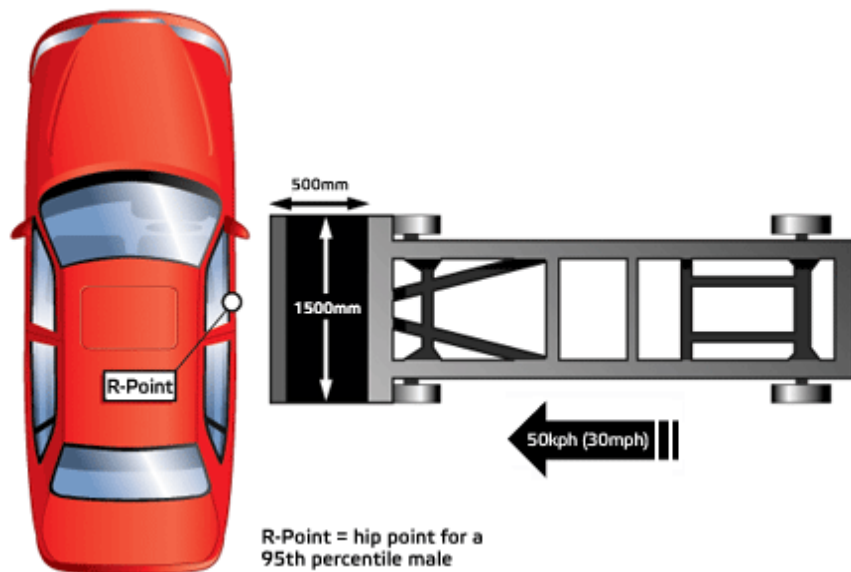


Figura 67: esempio di impatto laterale nella normativa EuroNCAP.

### 6.3 POLE TEST

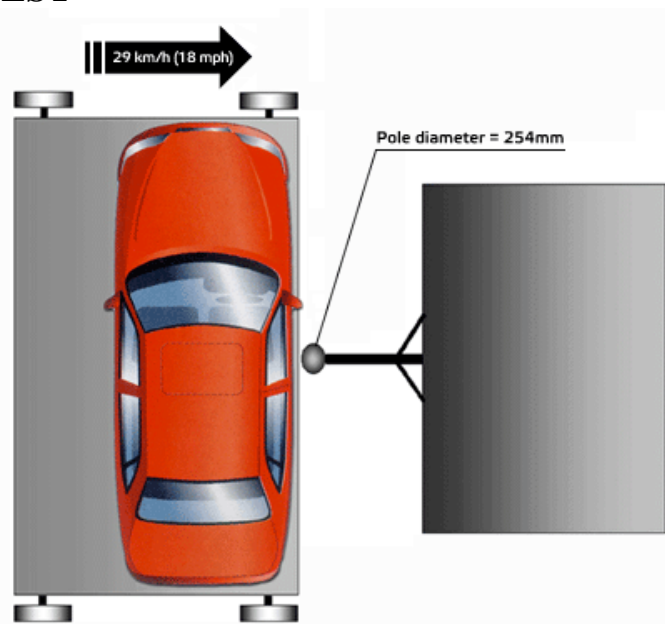


Figura 68: esempio di pole test nella normativa EuroNCAP.

Il test simula l'impatto laterale della vettura contro un palo rigido e indeformabile alla velocità di 29 km/h. Il palo è relativamente stretto e questo gli consente di penetrare nella fiancata della vettura.

Anche qui risulta particolarmente importante equipaggiare il veicolo con degli airbag laterali. Infatti, la testa del conducente potrebbe colpire il palo con una forza sufficiente a provocare un trauma cranico fatale.

La normativa, in questo contesto, interviene descrivendo i dispositivi tecnici da utilizzare nelle prove. All'interno dei dispositivi esistono strumenti di misura che permettono la misurazione di forza ed accelerazione così da poter stimare la severità dell'impatto.

## **6.4 IMPATTO VEICOLO/CICLISTA**

Negli ultimi anni, complice il periodo di crisi economica che stiamo vivendo e l'aumento smisurato del costo del carburante per i veicoli, si è registrato un incremento del numero di biciclette circolanti. Da qui la proposta di studiare l'impatto fra un veicolo ed un ciclista.

Le cause principali di incidenti a danno dei ciclisti sono molteplici:

- 1) condizioni disastrose delle strade (buche, tombini montati in modo scorretto, fondi sconnessi);
- 2) scontri con autovetture e camion:
  - apertura improvvisa delle portiere,
  - immissione improvvisa nel flusso del traffico,
  - svolte improvvise delle auto a destra con conseguente taglio della strada,
  - eccessiva e pericolosa vicinanza delle auto alle biciclette,
  - eccesso di velocità delle autovetture;
- 3) disattenzione del ciclista o presenza di altre biciclette;
- 4) presenza di cani randagi sulle strade extraurbane;

L'utilizzo di un approccio indiretto al test d'impatto veicolo-ciclista si pone come obiettivo la riproduzione reale di un incidente tra un ciclista ed un veicolo sotto determinate condizioni.

Nell'impatto si possono differenziare quattro fasi che non sempre sono presenti e/o consequenziali:

- fase di urto;
- fase di abbattimento;
- fase di caricamento;
- fase di propulsione;
- fase di arruotamento.

La fase di urto è il primo contatto tra il veicolo investitore ed il corpo dell'investito. La fase di abbattimento si ha con il contatto della vittima con il suolo dopo l'urto ed è la prevalente causa di danno ai gomiti, alle ginocchia e alle mani. La fase di caricamento si ha quando il soggetto viene "caricato", a seguito dell'urto, contro il cofano e/o parabrezza del mezzo investitore con lesività specie al capo o al volto. La fase di propulsione si ha quando il soggetto investito viene proiettato in avanti con lesività sia fratturative che escoriative agli arti. La fase di arruotamento si ha quando la ruota del mezzo investitore monta sopra il corpo della vittima stesa al suolo.

Le fig. 69, 70, 71 evidenziano le aree del cofano che maggiormente vengono coinvolte quando la testa del soggetto colpisce la parte frontale della vettura durante l'impatto.

La marcatura del veicolo per l'individuazione delle medesime aree (WAD) avviene secondo le direttive Euroncap.

Poiché il codice stradale fissa il limite massimo di percorrenza del territorio urbano ad una velocità massima di 50 km/h, anche le prove di crash test rispettano tale limite. Considerando che una velocità di 50 km/h può essere fatale in caso di urto, si è scelto di eseguire i crash test anche alla velocità di 20 km/h, 30 km/h e di 40 km/h.

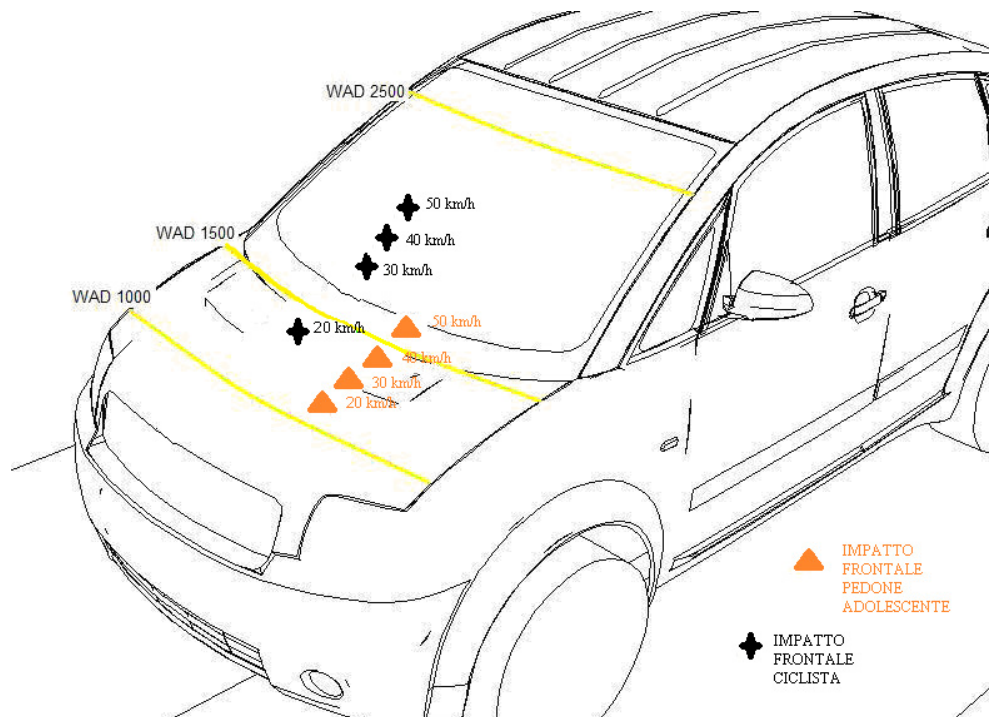


Figura 69: esempio di confronto WAD negli studi impatto adolescente e ciclista adolescente nell'impatto frontale.

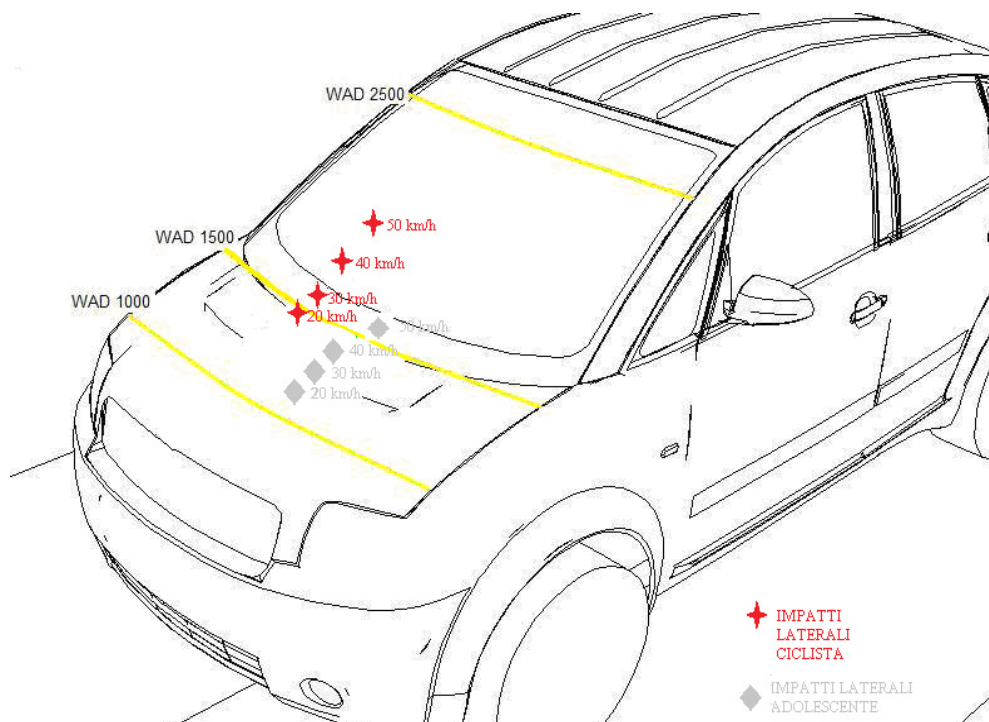


Figura 70: esempio di confronto WAD negli studi impatto adolescente e ciclista adolescente nell'impatto laterale.

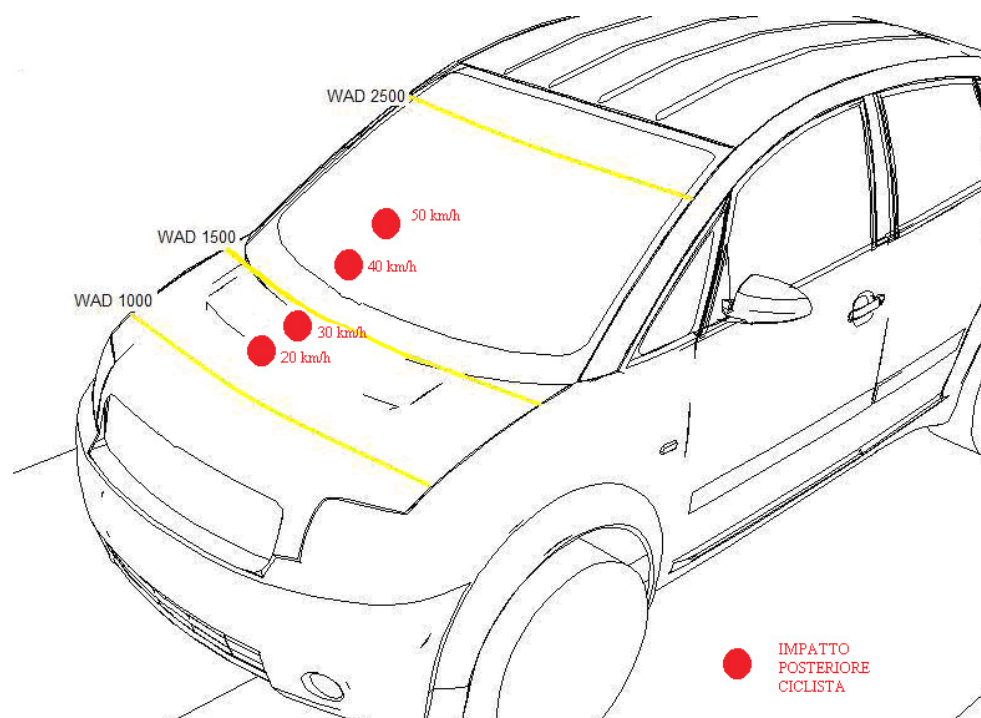


Figura 71: esempio di valutazione WAD nelle varie velocità d'impatto negli studi impatto ciclista adolescente nell'impatto posteriore.

Nelle figure vengono messi in risalto i punti d'impatto nel caso di studio delle simulazioni auto-ciclista adolescente. Con la velocità di 20 km/h entrambe le simulazioni risaltano le stesse zone d'impatto (WAD 100). Con le velocità di 30 e 40km/h il ciclista colpisce la parte sottostante al parabrezza (zone compresa tra WAD 2100 e WAD 1500) a differenza del pedone che si trova a colpire la parte superiore del cofano (zona compresa tra WAD 1000 e WAD 1500).

Per quanto riguarda invece una velocità di 50 km/h i punti d'impatto si trovano sul parabrezza, ma ad un'altezza diversa. Queste differenze sono dovute dalla diversa altezza del ciclista e del pedone.

Per uno studio completo e mirato, non si può prescindere dallo studio di entrambi i soggetti coinvolti nell'impatto. Così nasce la biomeccanica degli impatti. Si occupa di studiare il tipo di lesione consequenziale ad un qualsiasi tipo di urto in modo da fornire i dati per lo sviluppo di successivi dispositivi sempre più sicuri e mirati a proteggere specifiche parti del corpo. Alla conoscenza delle forze e dei movimenti del corpo si unisce la conoscenza dell'anatomia funzionale, della fisiologia umana e della meccanica dei tessuti umani biologici. Inoltre è stata

creata una classificazione delle ferite traumatiche e della loro correlazione con l'entità delle azioni che le hanno provocate.

La valutazione dei danni provocati alla testa o al torace (le zone più critiche per questo tipo di impatto) è effettuata sulla base di alcuni criteri di lesione quali, per esempio, HIC, TTI, criterio dei 3 ms.

#### **6.4.1 SCALA DELLE LESIONI**

La classificazione delle ferite traumatiche è stata eseguita attribuendo ad ogni lesione un valore numerico in modo tale da procedere ad una valutazione della gravità delle lesioni. Si è venuta così a creare una vera e propria "Scala di Lesione" dove è possibile distinguere un primo tipo di lesioni dette strutturali, come ad esempio le fratture, e un secondo tipo inficiante la funzionalità degli organi. Diversi sono gli indici di trauma esistenti, ma la scala anatomica di lesione più nota e diffusa a livello mondiale è l'AIS, Abbreviated Injury Scale.

##### **AIS Entità della lesione**

- 0 Nessuna lesione
- 1 Lesione minima
- 2 Lesione moderata
- 3 Lesione grave, senza pericolo di vita
- 4 Lesione grave, con pericolo di vita
- 5 Lesione critica con sopravvivenza incerta
- 6 Lesione fatale entro 24 ore
- 7-9 Lesione immediatamente fatale o sconosciuta.

#### **6.4.2 CRITERI DI LESIONE**

Con criterio di lesione si intende un sistema in grado di mettere in relazione un tipo di incidente con le conseguenti possibili lesioni di gravità variabile.

I criteri di lesione adoperati sono empirici e si basano sull'accelerazione lineare e sulle forze che agiscono in certi punti dove è possibile eseguire delle misure durante un urto.

Questi possono riassumersi come di seguito riportati:

- forze di contatto fra parti del corpo e del veicolo;
- accelerazioni, forze e momenti d'inerzia associati alle prime;
- comportamento individuale nei confronti di una lesione.

Mentre i primi due fattori dipendono dall'accelerazione indotta dal veicolo e dalla sua caratteristica a deformarsi internamente ed esternamente, l'ultimo fattore è più legato ai parametri incogniti e soggettivi, che differiscono da individuo ad individuo diventando assai complessi da individuare.

I criteri di rischio formulati per le varie parti del corpo sono molteplici, quelli maggiormente presi in riferimento e più diffusi sono: l'Head Injury Criterion (HIC) e il Gadd Severity Response (GSR) per la testa, il TTI (Thorax Trauma Index) per il torace, il Viscous Injury Response (VC) e il 3ms Criterion (3MS) utilizzati per il torace, il collo, i femori e le tibie.

È stato stimato che il Trauma cranico, sia la terza causa di morte nei paesi Occidentali, che la metà di tutti i traumatismi cranici siano dovuti ad incidenti di transito coinvolgenti automobili, motociclette, biciclette, e pedoni.

Le lesioni da trauma cranico possono essere dirette da contatto e inerziali, se dovute a brusche accelerazioni o decelerazioni, oppure si possono avere danni secondari che possono manifestarsi dopo un certo lasso di tempo.

Numerosi studi sono stati condotti per capire e dare un'indicazione di quale debba essere l'entità dell'urto per produrre delle lesioni gravi al cervello, al fine di migliorare i sistemi di sicurezza impiantati nelle autovetture ecc. Tuttavia fornire con esattezza una risposta su quale sia il livello di tolleranza dell'uomo è pressoché impossibile.

### **6.4.3 LA CURVA WSTC ED IL GSI**

I ricercatori della Wayne State University furono i primi studiosi ad effettuare una quantificazione su larga scala del livello di tolleranza umana ad un impatto della testa, attraverso l'utilizzo della Wayne State Tolerance Curve (WSTC) una curva che, preso il caso di urto con contatto della testa, mette in relazione il livello di accelerazione lineare con la durata di un impulso che da luogo ad una lesione di pari gravità. La figura 72 riporta una raffigurazione della curva WSTC.

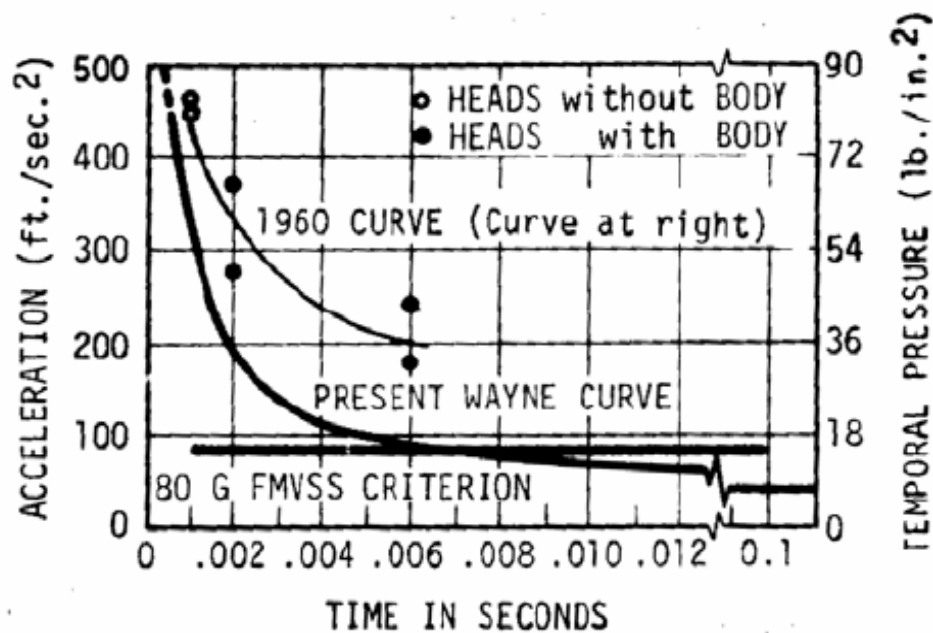


Figura 72: la Wayne State Tolerance Curve (WSTC).

La curva WSTC riporta l'accelerazione effettiva, espressa in g, misurata dietro la testa in funzione del tempo di applicazione espresso in millisecondi. Essa rappresenta la linea di separazione tra la zona di frattura e non del cranio e ad ogni suo punto corrisponde la stessa soglia di lesione.

Mentre i punti posti al di sopra della curva WSTC rappresentano le combinazioni accelerazione-tempo in corrispondenza dei quali si hanno consistenti danni al cervello, i punti al di sotto individuano situazioni che sono all'interno della tollerabilità umana.

Secondo le normative vigenti in Europa L.18/17 del 21.01.97, direttiva 96/79/CE del Parlamento Europeo, il valore asintotico deve assumersi pari ad una accelerazione misurata nel baricentro della testa inferiore a 80g, per un intervallo di tempo che si estende per meno di 3 ms.

Difficoltà rilevanti si riscontrano nel determinare l'accelerazione effettiva che permane per tutta la durata dell'intervallo di tempo da considerare. Per superare tale problema nel 1966 venne sviluppato il GSI, Gadd Severità Index, criterio di sintesi esprimibile mediante la relazione:



$$GSI = \int_{T_0}^{T_e} R \cdot (t)^n dt$$

Dove:

- R(t) è l'accelerazione lineare risultante misurata nel centro di gravità della testa, espressa in g;
- T<sub>0</sub> è il tempo di inizio della simulazione in secondi;
- T<sub>e</sub> è il tempo finale della simulazione in secondi;
- n è il cosiddetto indice di peso costante pari a 2.5.

L'indice di rischio più comune si chiama HIC e viene utilizzato per caratterizzare il comportamento delle diverse zone del veicolo durante l'impatto con la testa al fine di trovare delle correlazioni fra l'entità della deformazione riscontrata nel veicolo e l'entità dell'accelerazione media.

L'HIC non deve superare il valore 1000 su di un intervallo di ampiezza massima di 36 ms. Esso è basato su un'elaborazione dell'accelerazione risultante del baricentro della testa del manichino, secondo la seguente formula:

$$HIC = \max_{T_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq T_E} \left[ \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt \right)^{2.5} (t_2 - t_1) \right] \leq 1000$$

Dove:

- R(t) è l'accelerazione risultante, in g, misurata nel baricentro della testa;
- T<sub>0</sub> il tempo di inizio della simulazione in secondi;
- T<sub>E</sub> il tempo di fine simulazione in secondi;
- t<sub>1</sub> e t<sub>2</sub> rispettivamente rappresentano l'istante iniziale e finale di un intervallo di tempo, espresso in secondi, durante il quale l'HIC assume valore massimo; l'ampiezza di questo intervallo è convenzionalmente pari a 36 ms.

La curva di accelerazione viene costruita con i valori sperimentali letti dagli accelerometri, a questa si applica una finestra temporale mobile di 36 ms per poi

calcolare il corrispondente valore HIC per ciascun intervallo, successivamente si prende il valore massimo corrispondente al HIC cercato.

I valori più alti di HIC si hanno in corrispondenza dei montanti del parabrezza, dei lati del cofano e della zona di congiunzione cofano-parabrezza.

L'intervallo della durata di tempo è importante; per calcolare l'HIC nei casi di impatto della testa con corpi rigidi è stato proposto di accorciare l'intervallo da 36 a 15 ms.

Se da un lato un HIC pari a 1000 individua un incidente di forte gravità, un valore di HIC pari a 2000 ha valori di gravità maggiori di mille, ma la probabilità di letalità dell'evento non è raddoppiata.

La correlazione HIC- AIS viene utilizzata unicamente sul test di impatto che riguarda la testa.

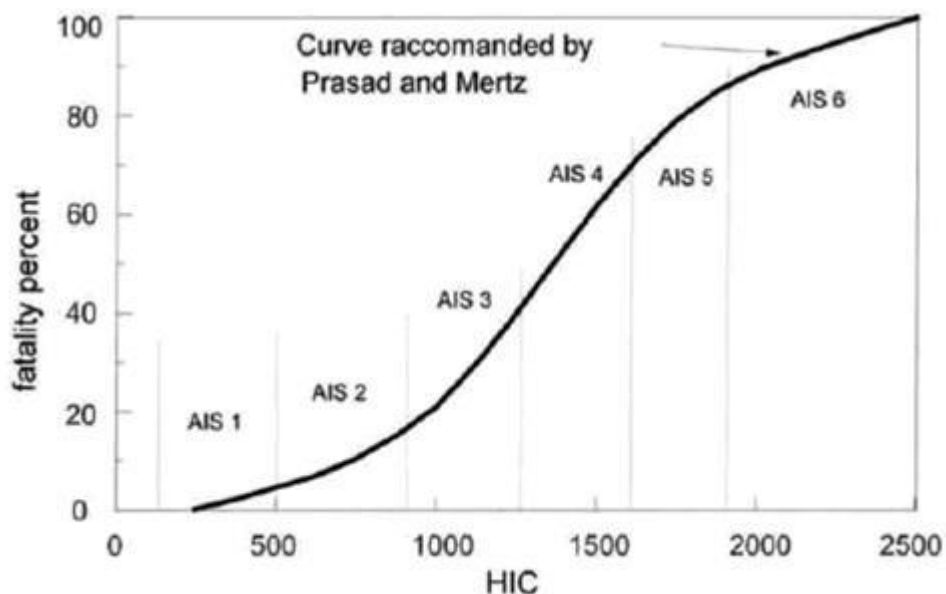


Figura 73: curva di correlazione HIC- AIS.

Il torace è l'unica parte del corpo che trae benefici dalla mancanza della cintura di sicurezza e dall'airbag, infatti, sorretto dalla cintura di sicurezza, subisce uno schiacciamento massimo di 20 mm, con le sole cinture, 15 mm con l'airbag. Sempre la normativa americana stabilisce che il valore critico di schiacciamento della cassa toracica, per l'Hybrid III 50th% è di 63 mm, quindi anche questo

parametro non è troppo severo nei confronti del guidatore. Nel caso del manichino libero il valore di schiacciamento è appena di 3 mm.

Se il torace subisce un urto a causa di un impatto brusco, si possono distinguere almeno tre tipi di lesione: compressione, carico viscoso e forza d'inerzia sugli organi interni, nei casi più gravi una combinazione di questi tre fenomeni.

Le lesioni più frequenti sono quelle allo scheletro e dei tessuti molli.

Per determinare la risposta biomeccanica del torace in termini di valori di tolleranza per vari casi di carico sono stati effettuati diversi esperimenti. I criteri più comunemente usati nel trauma toracico e le soglie di tolleranza sono: il Compression Criterion, il Viscous Criterion, Thoracic Trauma Index e il Criterio dei 3 ms. In questo lavoro ci soffermeremo a discutere soltanto quest'ultimo perché particolarmente utile per le valutazioni sul ciclista.

#### **6.4.4 CRITERIO DEI 3 MS**

Il criterio dei 3ms si basa sulle curve WSTC, e viene utilizzato sia dalla normativa europea che da quella statunitense.

Il criterio dei 3 ms prescrive che il baricentro del torace e della testa non subiscano accelerazioni superiori a 60 g e 80g rispettivamente per un tempo superiore a 3ms.

La probabilità di lesione AIS4+ è data dalla seguente espressione:

$$Prob (AIS4+) = 1 / (1 + \exp (4,3425 - 0,0630 * g_t))$$

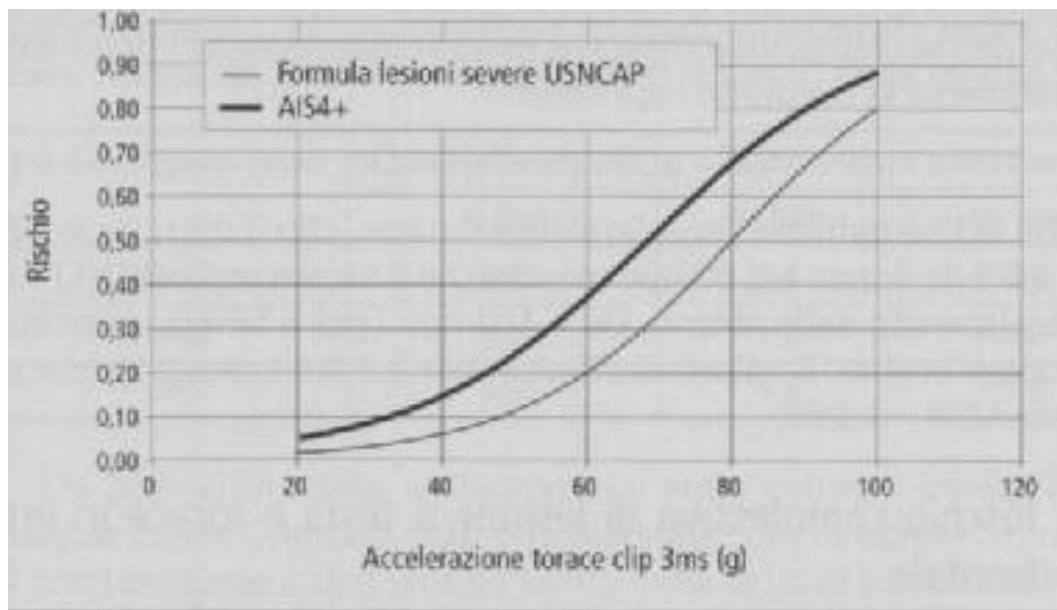


Figura 74: la curva di probabilità di lesione AIS4+

Un'altra considerazione che non può essere tralasciata riguarda la valutazione delle lesioni al torace mediante il criterio dei 3ms.

I valori estrapolati dalle simulazioni risultano quasi tutti superiori al limite imposto dalla normativa vigente (60g), più elevati di quelli risultanti dal confronto con il pedone e con un più alto parametro AIS+4 (ovvero frattura del torace e lacerazione aortica). Anche questa volta il motivo è da ricercare nella posizione del baricentro del ciclista che, come detto precedentemente, è più alto rispetto a quello del pedone e al momento dell'impatto vede il torace ricadere in prossimità del parabrezza.

Le azioni del conducente del veicolo assumono un'importanza determinante nell'evolversi dell'incidente.

L'atteggiamento più frequente di un'automobilista che vuole ridurre le conseguenze di un impatto è quello di decelerare per istinto, ma resta da dimostrare se l'azione dei freni della vettura, risolva positivamente o meno l'evolversi dell'incidente.

É di facile comprensione che una riduzione della velocità non può che causare minori lesioni sul ciclista rispetto ad una velocità costante o superiore; purtroppo però nonostante i tempi di percezione e reazione del conducente e quelli della

vettura stessa, la reale diminuzione della velocità della vettura risulta spesso molto scarsa: sebbene la vettura abbia una capacità frenante capace di imporre mediamente una decelerazione di 0.6g, l'efficacia dell'azione frenante si raggiungerebbe il più delle volte in prossimità del momento d'impatto.

Le simulazioni sono molto utili per riprodurre fedelmente le condizioni dell'impatto. Qualcosa si può dire sugli studi effettuati:

La posizione assunta dal ciclista al momento del sinistro: la posizione laterale risulta essere più dannosa di quella frontale, infatti analizzando i valori dell'HIC ricavati dalle simulazioni si evince che: durante l'impatto laterale i valori risultano più elevati perché è la testa del ciclista che colpisce immediatamente il cofano dell'auto che lo travolge e non la bici, che al contrario potrebbe assorbire l'urto ma non vi riesce.

Diversa cosa è ciò che avviene nell'impatto frontale e in quello posteriore. In questo caso infatti l'auto colpisce in primis la bici che assorbe l'urto; il punto d'impatto, quindi, si evidenzia in prossimità della ruota e il ciclista, che si trova ad una distanza apparentemente irrilevante, ma effettivamente maggiore, cade in modo differente.

È possibile altresì notare come, nelle simulazioni effettuate, tutti i valori dell'HIC ricadano all'interno del valore 1000 (limite imposto dalla normativa vigente); ciò è possibile perché buona parte dell'urto viene assorbito dalla bicicletta e non dal corpo del ciclista così come invece avviene nel caso del pedone, che al contrario registra al momento dell'impatto anteriore e posteriore, valori di HIC molto più elevati.

Lo scopo di questa analisi è sicuramente in primo luogo quello di invogliare ed invitare tutti i ciclisti ad indossare il casco, che è di fondamentale importanza non solo nelle "pedalate sportive", ma anche nelle passeggiate della domenica. L'educazione stradale è inoltre importante non solo per i conducenti, ma per chiunque occupi la carreggiata, a piedi, in bicicletta, in auto o moto che siano. I produttori di automobili non si limitano soltanto ai dispositivi di sicurezza attiva, come sensori e videocamere, ma si stanno anche occupando della protezione di

chi sta fuori dall'auto, con forme dei cofani che possano ridurre la forza degli impatti e con dispositivi di sicurezza passiva quali gli airbag per la testa del pedone/ciclista posti sul bordo inferiore del parabrezza.



Figura 75: esempio di dispositivi di sicurezza passiva quali gli airbags per la testa posti sul bordo inferiore del parabrezza.

## **7. USO DI MATERIALI INNOVATIVI PIÙ LEGGERI ALL'INTERNO DELL'AUTOVEICOLO**

La possibilità di utilizzare materiali con struttura leggera che incrementassero il risparmio di carburante, è stato uno dei punti forza per lo sviluppo dei compositi nelle auto. La sostituzione di parti con componenti meno pesanti, non solo contribuisce al risparmio energetico, ma si ripercuote anche nelle dimensioni del sistema frenante, del motore e dei serbatoi di carburante che potranno essere ridotte.

In seguito all'incremento di numerosi problemi ambientali, è cresciuto l'interesse verso i biopolimeri. Le bioplastiche possono sia essere riciclate attraverso il recupero organico sia essere utilizzate come fertilizzanti, sono cioè compostabili.

Secondo la norma italiana UNI EN 13432, un materiale è definito compostabile se presenta i seguenti attributi:

- biodegradabilità, determinata misurando l'effettiva conversione metabolica del materiale compostabile in anidride carbonica;
- disintegrabilità, cioè la frammentazione e perdita di visibilità nel compost finale (assenza di contaminazione visiva);
- assenza di effetti negativi sul processo di compostaggio;
- bassi livelli di metalli pesanti (al di sotto di valori massimi predefiniti) e assenza di effetti negativi sulla qualità del compost.

In questo lavoro sono state analizzate le proprietà meccaniche e termomeccaniche di un polimero sintetico biodegradabile, l'acido polilattico (PLA), sia allo stato puro, sia come matrice per la realizzazione di due materiali compositi: il primo materiale è un microcomposito costituito da una matrice di PLA e da un rinforzo di farina di legno, il secondo è un nanocomposito con matrice di PLA e nanorinforzo di montmorillonite modificata.

## **7.1 COMPOSITO**

Un composito è un materiale costituito da più materiali semplici differenti, ognuno dei quali corrisponde ad una diversa fase, separati da un'interfaccia che è sede di particolari interazioni chimico-fisiche fondamentali per il trasferimento di carico tra le fasi. Ciascuno dei materiali che fa parte di un composito è dotato di proprietà differenti a livello sia macroscopico che strutturale.

I singoli materiali che formano i compositi sono chiamati costituenti e, a seconda della loro funzione, prendono il nome di matrice e rinforzo (o carica).

La matrice è costituita da una fase continua omogenea che ha il compito di racchiudere il rinforzo, così da assicurare la coesione del materiale composito e, di garantire che le particelle di rinforzo presentino la giusta dispersione all'interno del composito al fine di non avere la segregazione di rinforzo in zone localizzate.

Nella maggioranza dei casi le matrici utilizzate sono polimeriche (termoplastiche o termoindurenti) poiché garantiscono una bassa densità, quindi, leggerezza del

materiale finale. Hanno però il difetto di veder decrescere drasticamente le proprietà meccaniche all'aumentare della temperatura.

Il rinforzo è rappresentato da una fase che viene dispersa in varie modalità all'interno della matrice. A seconda del tipo di rinforzo, i materiali compositi vengono suddivisi in compositi particellari e compositi fibro-rinforzati.

Nei compositi particellari il rinforzo è costituito da particelle che, a differenza delle fibre, possono assumersi equiassiche, ovvero con un rapporto tra diametro e lunghezza di ogni particella circa unitario.

Le proprietà chimico-fisiche dei materiali compositi particellari dipendono dalla concentrazione, dalla distribuzione e dalla geometria del sistema particellare, ovvero dalle dimensioni e dalla forma delle particelle.

## **7.2 NANOCOMPOSITO**

Un nanocomposito è un materiale solido multifase dove una delle fasi ha almeno una delle dimensioni inferiore a 100 nanometri. I nanocompositi possono sia mostrare proprietà dominate dalle interazioni interfacciali tra fase rinforzante e matrice, che esibire gli effetti dovuti alle strutture nanodimensionali disperse all'interno. Questi effetti ottenuti vengono indicati solitamente con il termine di "nano effetto" che indica i cambiamenti nelle proprietà della matrice causati dall'alta area superficiale della carica e dalle piccole distanze tra le nanoparticelle. I componenti di rinforzo possono essere formati da particelle organiche o non organiche. Questi nanorinforzi possono essere raggruppati in tre categorie generali:

- Nano cariche 3D, come nanoparticelle o nanosfere, le quali sono praticamente equiassiali;
- Fibre o tubi con diametri minori di 100 nm (whiskers);
- Nano cariche a forma di lamelle (platelets), con spessore tipicamente nell'ordine di 1 nm.

Quando le dimensioni della carica arrivano nell'intorno dell'intervallo nanometrico, l'interazione all'interfaccia diviene molto grande grazie al rapporto superficie/volume elevatissimo e allo straordinario rapporto d'aspetto della fase



rinforzante (solitamente l'estensione dell'interfaccia nei nanocompositi supera di un ordine di grandezza quella dei compositi convenzionali). L'ampia area interfacciale comporta che anche una piccola concentrazione di nanofase può avere immediati effetti osservabili sulle proprietà macroscopiche del composito. Per questo motivo, la possibilità di usare basse concentrazioni di rinforzo implica una minore difficoltà nella produzione di questi materiali che risulta solitamente complicata per i compositi tradizionali.

Affinché le particelle abbiano un effetto positivo sulle proprietà della matrice, devono essere disperse in modo uniforme. Questo solitamente è un punto critico della produzione di questi materiali poiché il nanorinforzo all'interno della matrice tende ad agglomerarsi.

Il nanorinforzo viene generalmente disperso all'interno della matrice durante la fase di lavorazione. La percentuale in peso dei nanoparticolati introdotti può rimanere molto bassa, dal 0,5% al 5%, specialmente per i riempitivi ad alto rapporto d'aspetto non sferici più comunemente utilizzati come le piastrine sottili nanometriche di argille.

In base al tipo di materiale utilizzato come matrice, i nanocompositi possono essere suddivisi in:

- Ceramic Matrix Nanocomposites;
- Metal Matrix Nanocomposites;
- Polymer Matrix Nanocomposites.

Tra questi, i polimeri sono apprezzati per la facilità di produzione, la bassa densità e per la natura usualmente duttile. Hanno, però, il problema di avere modulo elastico e resistenza inferiori rispetto ai metallici ed ai ceramici. Dato che l'efficienza dei rinforzi è molto elevata si possono disperdere concentrazioni minime di rinforzi metallici o ceramici all'interno di una matrice polimerica preservando le proprietà tipiche dei polimeri come il basso peso e la duttilità.

Negli ultimi anni, la categoria di nanocompositi maggiormente studiata è quella che utilizza silicati lamellari come rinforzo (PLS, polymer layered silicate), ottenuti dall'intercalazione delle catene polimeriche nella struttura del rinforzo. Le

nanoparticelle che spiccano per questa categoria sono quelle di montmorillonite. Una particolare caratteristica trainante per la classe dei PLS, è l'abilità delle lamelle di silicato di disperdersi individualmente nella matrice. Mentre lo spessore della carica è ben definito, circa 0,94 nm, le dimensioni laterali sono variabili con valori di 100-200 nm. I rapporti di aspetto sono compresi tra 10-1000 i quali, dopo le fasi di mescolamento ad alti sforzi, si abbassano a circa 30-300.

La formazione di nanocompositi con rinforzo a forma di lamelle, ha come scopo quello di ottenere la separazione e la dispersione della carica nella matrice polimerica, processo chiamato esfoliazione. Questa morfologia non viene mai ottenuta completamente ma si raggiungono dei determinati gradi di dispersione. I PLS possono essere divisi quindi in base al grado di dispersione del rinforzo:

- Immiscibili, il polimero non riesce a penetrare tra le lamelle di silicato e non si ha nessun significativo aumento delle proprietà a meno di grandi quantità di carica inserite. Si ottiene un composito con proprietà analoghe ai microcompositi convenzionali;
- Intercalato, una singola catena di polimero può penetrare tra le lamelle producendo una struttura multistrato ben alternata;
- Esfoliato, gli strati dei silicati sono completamente e uniformemente dispersi nella matrice polimerica dando una struttura esfoliata e delaminata. Si ottiene quindi una riduzione di difetti e di punti deboli rispetto a un composito convenzionale.

In figura 76 si mostrano le tre categorie ottenibili in base al grado di esfoliazione.

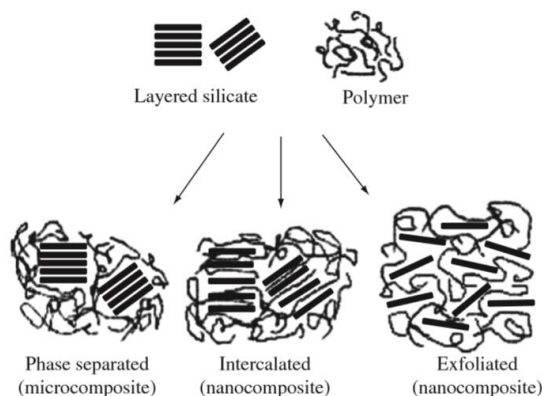


Figura 76: Differenti tipi di compositi ottenibili in base al grado di esfoliazione.

## **8. PARTE SPERIMENTALE**

### **8.1 AMBIENTE**

Com'è noto, la CO<sub>2</sub> è un gas inerte, inodore ed incolore, naturalmente presente in atmosfera in concentrazioni limitate. Non è tossica, né nociva; è un composto naturale e, come tale, è parte dei cicli naturali. Una volta che viene generata, la CO<sub>2</sub> trova il suo “destino ambientale” nell'atmosfera dove permane e contribuisce positivamente all'effetto serra naturale, il quale rappresenta il fenomeno di termoregolazione naturale della terra, che regola il bilancio termico e mantiene una temperatura più omogenea e costante nella crosta terrestre.

Tuttavia, le attività antropiche hanno fatto sì che tale fenomeno degenerasse: infatti, questo gas, a causa delle emissioni provocate dal “progresso industriale”, si va progressivamente accumulando in atmosfera e, da gas inerte e non nocivo, diventa dannoso creando uno squilibrio nel naturale bilancio termico e provocando quindi l'ormai noto riscaldamento del clima terrestre.

Anche se ancora non è stato accertato che le emissioni di CO<sub>2</sub> siano la principale causa del surriscaldamento globale, tuttavia risulta utile e necessario tenere il fenomeno sotto controllo e cercare in qualche modo delle soluzioni ottimali al problema.

In tal senso si è cercato di ovviare al problema delle emissioni, diventato col passare degli anni non indifferente, cercando di trovare delle vie alternative di produzione energetica, diverse da quelle che sfruttano risorse a base di combustibili fossili e fonti non rinnovabili.

Nonostante ciò, il problema non risiede solo nell'ambito ambientale, bensì anche e soprattutto in campo economico. Infatti, non tutti sanno che gli investimenti energetici hanno dei cicli industriali molto lunghi e, i capitali investiti per lo sviluppo di tali risorse, potranno essere recuperati in tempi non indifferenti, a volte pari anche a un paio di decenni.

Le ormai conosciute fonti energetiche rinnovabili, quali il solare-termico, l'eolico e altri, potrebbero ovviare notevolmente al problema delle emissioni, ma essendo

nuove tecnologie di risorse energetiche, hanno ancora costi di gestione e di attivazione troppo elevati e non accessibili a tutti.

La soluzione più immediata e meno dispendiosa, eccetto per i paesi in via di sviluppo, è di imporre delle soglie di sicurezza delle emissioni oltre il quale non sia possibile sfiorare.

### 8.1.1 RAPPORTO IDROGENO CARBONIO AD OGGI

Come unità di misura della qualità del combustibile utilizzato, nonché dell'inquinamento prodotto per tonnellata di combustibile si è ricorsi al rapporto Idrogeno/Carbonio. Esso è riferito all'abbondanza atomica dei due atomi nella molecola di combustibile usato; quindi combustibili come il metano  $\text{CH}_4$  si ritroveranno ad avere un rapporto 4:1, combustibili di tipo paraffinico liquido come la benzina 2:1, combustibili solidi come il carbone 1:1. Il rapporto è legato a due caratteristiche del combustibile: il potere calorifero per Kg, che cresce con il contenuto di idrogeno e, la produzione di  $\text{CO}_2$  per Kg di combustibile bruciato. L'incremento di carbonio presente nella molecola unito al minor potere calorifero comporta difatti un maggior volume di  $\text{CO}_2$  prodotta a parità di energia rilasciata.

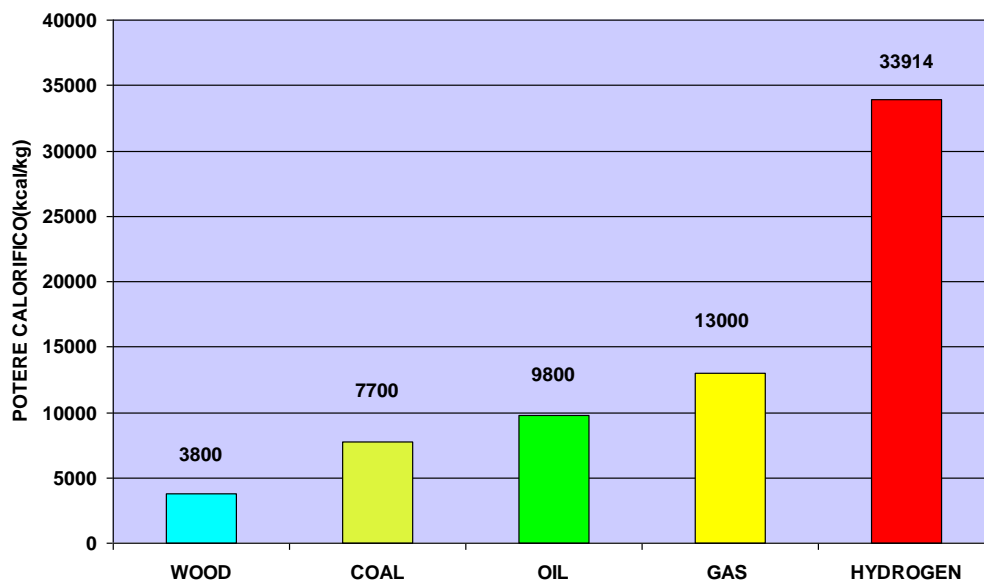


Figura 77: Potere calorifero dei diversi combustibili.

Pertanto nell'ipotesi di voler contenere le emissioni di CO<sub>2</sub> in aria risulta necessario cambiare tipologia di combustione a favore di combustibili ad alto rapporto H/C.

Per il calcolo del rapporto Idrogeno/Carbone utilizzeremo i diagrammi di J. Ausubel (1996) affinché, utilizzando i consumi in tonn. di Combustibili quali Oil, Coal e Gas forniti dalla © BP p.l.c. (originariamente British Petroleum), moltiplicati per i relativi coefficienti del grafico di fig. 78 si possa avere un'idea dapprima su scala nazionale e poi su scala mondiale di tale prezioso indice.

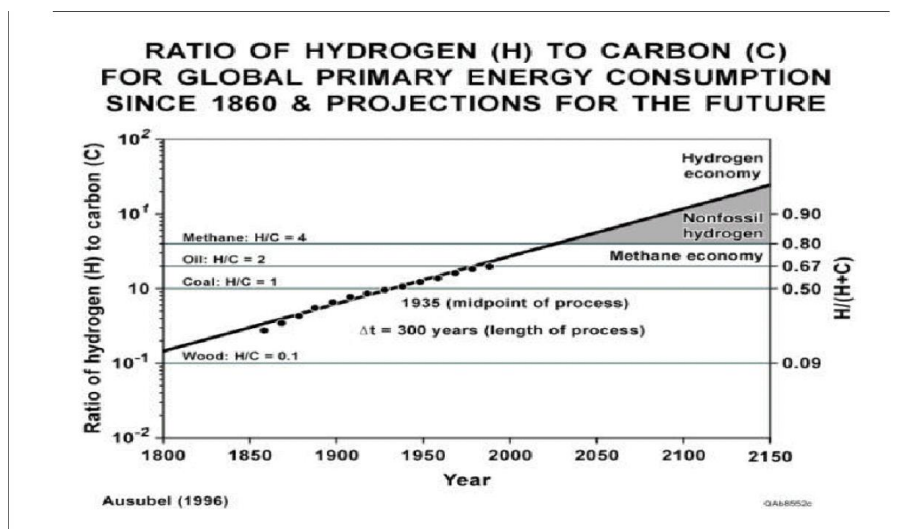


Figura 78: diagrammi di J. Ausubel.

Considerando questo rapporto un indicatore di “virtuosismo” (investimenti svolti per ridurre le emissioni) per i paesi della fascia OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development ovvero, l'organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico), in quanto direttamente collegato alla quantità di CO<sub>2</sub> rilasciata per energia prodotta, non venendo ad oggi accumulata o filtrata in alcun modo. Possiamo quindi collegare direttamente i consumi nazionali di oli, carboni e gas alla CO<sub>2</sub> rilasciata in atmosfera. Passando dunque ad analizzare il rapporto a livello mondiale si ottiene un peggioramento marcato dagli anni 2000 con un livellamento dello stesso negli ultimi 7 anni come mostrato in Fig. 79.

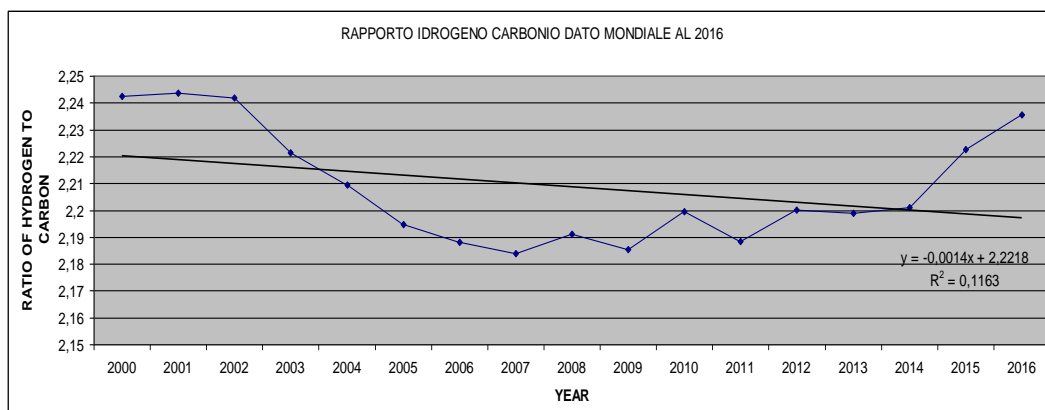


Figura 79: Rapporto H/C dato mondiale al 2016.

Questo crollo può essere identificato con l'incremento dei prezzi dei combustibili fino al 2007. Negli ultimi anni, con il crollo degli stessi la situazione ha subito un'inversione di rotta e un lieve miglioramento. Passando alle principali macro-aree mondiali si ottengono i grafici in Fig. 80, 81, 82, 83. Si è scelto di trascurare alcune aree, come l'afrika o il medio oriente, per via degli scarsi consumi e del conseguente basso impatto sulla CO<sub>2</sub> prodotta nel resto del mondo.

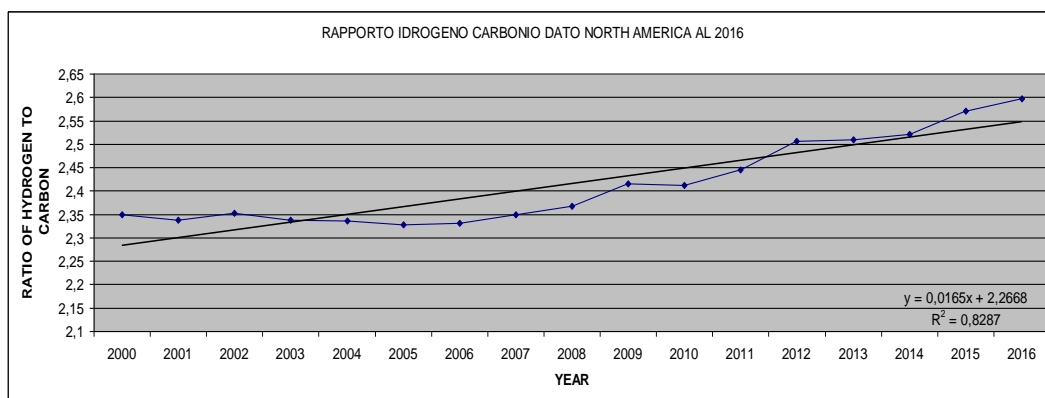


Figura 80: Rapporto H/C dato Nord America al 2016.

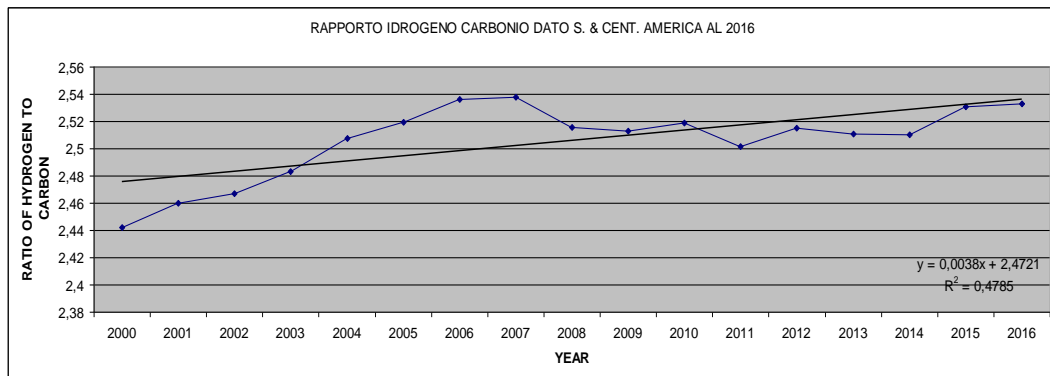


Figura 81: Rapporto H/C dato Sud e Centro America al 2016.

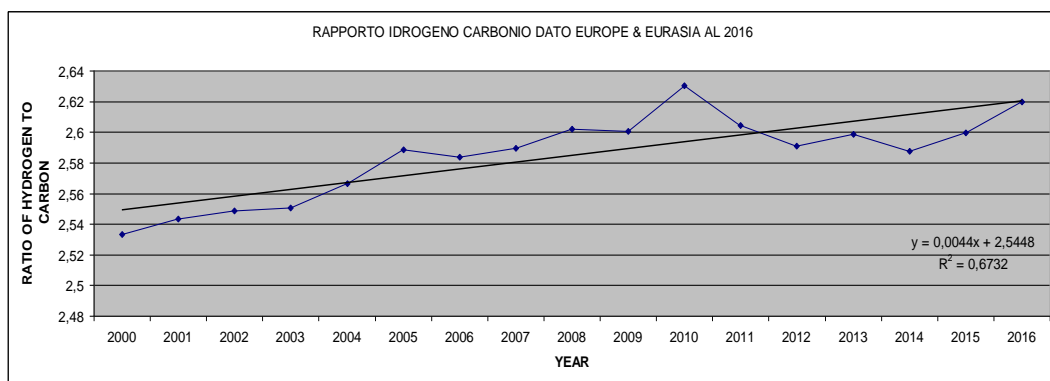


Figura 82: Rapporto H/C dato Europa ed Eurasia al 2016.

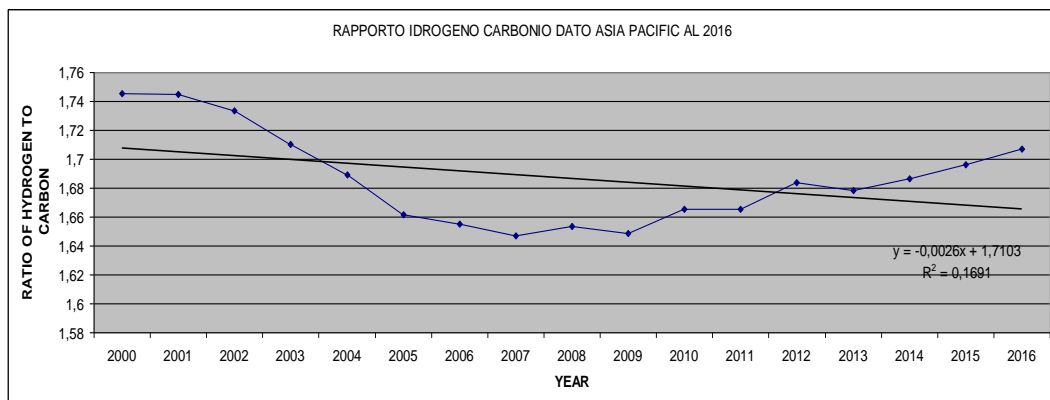


Figura 83: Rapporto H/C dato Asia e territori del Pacifico al 2016.

Come si può notare dai grafici globalmente l'area europea e americana si sono mostrate molto attente al problema con un incremento costante del rapporto H/C, con un picco europeo del 2,63:1. L'area asiatica invece ha visto una riduzione della percentuale di idrogeno nei combustibili usati a favore di un maggior utilizzo del carbone (rapporto H/C >2:1) con un valore minimo di 1,65:1 quasi 1 punto sotto il valore europeo. Il resto del mondo si è mantenuto in linea con le

direttive sull'inquinamento ambientale. Inoltre come si può notare dal confronto tra le Fig. 79 e 83 l'andamento globale è fortemente influenzato dall'area asiatica, che con i colossi di Cina e India, detta l'andamento del rapporto mondiale. Passando alla situazione Europea si ottengono i dati in Tabella 7. Per completezza si è aggiunta anche la Russia, che essendo uno dei maggiori produttori di gas naturale mondiale ha tra i valori più alti di questo rapporto.

Tabella 7: Rapporto H/C Territorio Europa ed Eurasia.

Paese	Rapp. H/C		Popol. 2016	Incr.	Incr.	Rapp. H/C
	2000	2016	n. persone	%	[anno]	[mil. di p.]
<b>Austria</b>	2,48	2,53	8.747.358	2,02	0,003	0,29
<b>Belgio</b>	2,36	2,51	11.348.159	6,36	0,011	0,22
<b>Danimarca</b>	2,26	2,28	5.731.118	0,88	0,001	0,40
<b>Finlandia</b>	2,09	1,97	5.495.096	-5,74	-0,010	0,36
<b>Francia</b>	2,40	2,56	66.896.109	6,67	0,011	0,04
<b>Germania</b>	2,20	2,27	82.667.685	3,18	0,005	0,03
<b>Grecia</b>	1,82	2,02	10.746.740	10,99	0,018	0,19
<b>Italia</b>	2,63	2,83	60.600.590	7,60	0,013	0,05
<b>Olanda</b>	2,73	2,62	17.018.408	-4,03	-0,007	0,15
<b>Polonia</b>	1,58	1,81	37.948.016	14,56	0,024	0,05
<b>Portogallo</b>	2,02	2,34	10.324.611	15,84	0,026	0,23
<b>Russia</b>	2,98	3,05	144.342.396	2,35	0,004	0,02
<b>Spagna</b>	2,09	2,41	46.443.959	15,31	0,026	0,05
<b>Svezia</b>	1,95	1,97	9.903.122	1,03	0,002	0,20
<b>Svizzera</b>	2,29	2,40	8.372.098	4,80	0,008	0,29
<b>Inghilterra</b>	2,68	2,82	65.637.239	5,22	0,009	0,04

Contrariamente a quanto previsto abbiamo in testa l'Italia, con un rapporto di 2,83:1 e l'Inghilterra, con un rapporto di 2,82:1 al 2016. Agli ultimi posti abbiamo invece Svezia e Polonia con 1,97:1 e 1,81:1

Si possono inoltre notare i rapporti più favorevoli di crescita in Belgio, Francia, Grecia, Italia, Polonia, Portogallo e Spagna che proseguono con un incremento



superiore allo 0,01 annuo il rapporto H/C. Tra i peggiori da questo punto di vista abbiamo invece la Finlandia e l'Olanda che vedono una riduzione dal 2000 al 2016 del loro rapporto H/C, nonostante siano partiti da valori alti rispetto al resto d'Europa.

Analizzando il rapporto H/C per milione di persone abbiamo Germania, Francia, Inghilterra e Italia agli ultimi posti, questo rapporto è identificativo degli investimenti necessari a cambiare il rapporto, minore risulta essere il numero maggiore dovrà essere l'intervento per la totalità della popolazione. Paesi piccoli possono infatti cambiare più agevolmente il proprio approvvigionamento energetico necessitano di meno tempo e investimenti per farlo.

Per concludere l'analisi si riporta la situazione Italiana dal 2000 al 2016, Fig. 84, da confrontarsi con il grafico mondiale in Fig. 79 e delle macro-aree in Fig. 80, 81, 82, 83, come si può notare la situazione Italiana riguardo al rapporto H/C è buona e contrariamente a molte aspettative una delle migliori a livello mondiale, ben 0,6 punti sopra la media. Questo comporta una bassa emissione di CO<sub>2</sub> rispetto ai combustibili bruciali e quindi un'attenzione molto alta al problema dei gas serra.

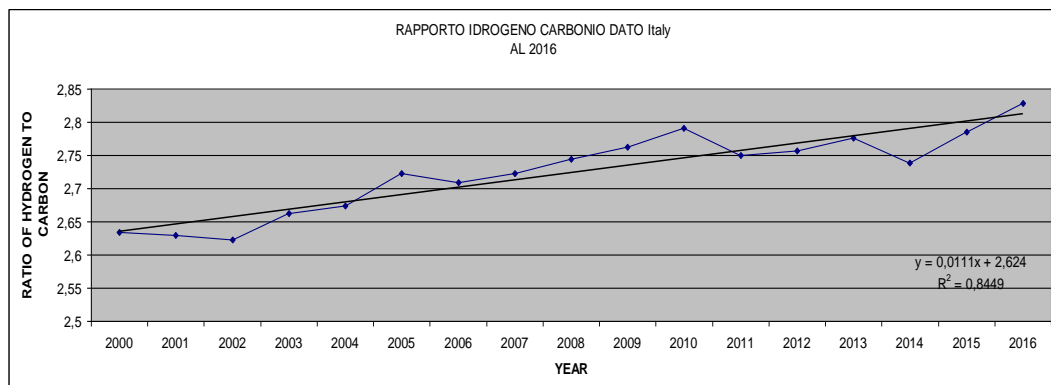


Figura 84: Rapporto H/C dal 2000 al 2016.

Questa analisi non vuole essere esaustiva in quanto non tiene conto anche di altri elementi come il rapporto nazionale del mix energetico (la divisione delle diverse fonti), dei problemi di approvvigionamento e del consumo pro-capite di energia. Tuttavia rimane esaustiva e completa sulla scelta e sulla tipologia di combustibili

utilizzati a livello energetico e sul come il loro rapporto influenzi la CO<sub>2</sub> che si emette in aria.

Come si rileva dal grafico di Fig. 85, l'inquinamento da CO<sub>2</sub> dell'atmosfera è aumentato notevolmente negli anni. Il limite di guardia di 350 ppm<sub>v</sub>, linea rossa in figura, è stato ormai superato dal 1988. Nel 2011 siamo arrivati a circa 391,67 ppmv. La retta che indica la pendenza della crescita dal 1980 al 2010 ha un coefficiente angolare di 1,65. Se il periodo di analisi fosse allungato, dal 1959 al 2017, la retta di simulazione della crescita avrebbe un coefficiente angolare di 1,45. Questo significherebbe che vi è stata negli anni recenti un'accelerazione nel trend di crescita delle concentrazioni di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera. Questa tendenza è perfettamente in linea con la crescita delle emissioni gassose da fonti fossili, che hanno il massimo sviluppo della domanda nei paesi tipo Cina e India.

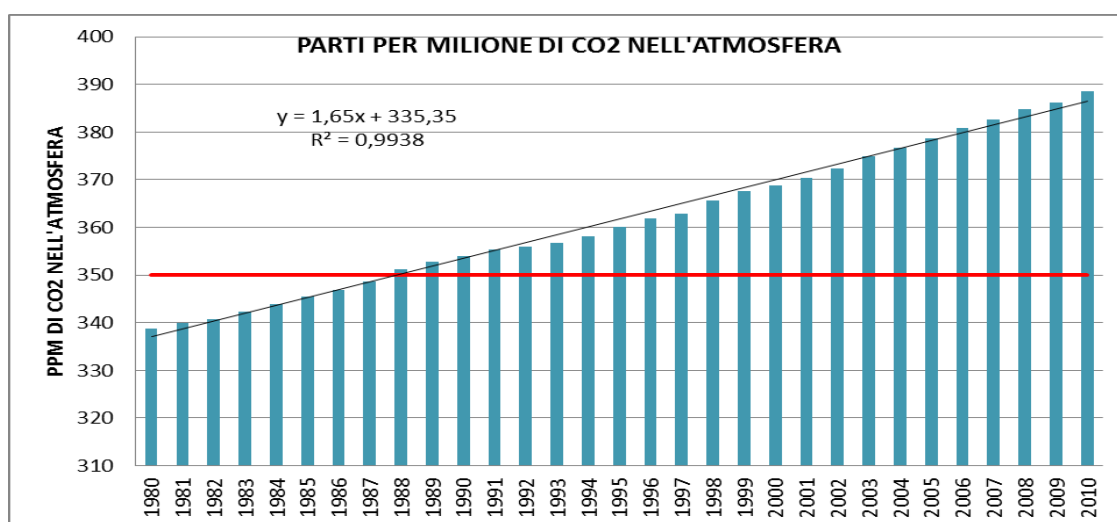


Figura 85: Inquinamento atmosferico da CO<sub>2</sub> 1980 – 2010.

Se si tiene conto dell'aumento delle temperature medie mondiali, per evitare un eccessivo surriscaldamento del globo, è necessario prendere con la massima urgenza delle misure immediate per ridurre le emissioni gassose da fonti fossili nell'atmosfera, con un uso ragionato delle fonti di energia. Quello che deve destare maggiore preoccupazione per la salvaguardia della salute è l'accelerazione che il fenomeno delle emissioni ha avuto in questi ultimi anni. Nella Tabella 8 si riportano alcuni dati per meglio valutare il grado di accelerazione che ha assunto il problema nelle decadi che vanno dal 1991 al 2010.

Tabella 8: Accelerazione delle immissioni di CO2 in atmosfera 1961-2010.

Decadi 1961-2010	Delta (ppmv)	ppmv/anno
1961-1970	8,77	0,88
1971-1980	13,00	1,30
1981-1990	15,48	1,55
1991-2000	15,24	1,52
2001-2010	20,38	2,04

## 8.2 ORGANIZZAZIONE DI EVENTI E CAMPAGNE DI PROMOZIONE DELLA MOBILITA' SOSTENIBILE. ENERGY DAY ALLA SAPIENZA

Per le campagne di comunicazione sulla mobilità sostenibile l'Unione Europea durante l'anno solare promuove l'organizzazione di una settimana di incontri atti a sensibilizzare il mondo accademico, quello professionale e il cittadino comune su tematiche inerenti l'energia sostenibile.

L'EUSEW è la conferenza europea più importante che riguarda le politiche per l'energia sostenibile. Viene organizzata annualmente dalla Commissione Europea. Il suo scopo è dare la possibilità a tutti gli aventi interesse di dibattere sullo sviluppo delle politiche del settore, incontrarsi e condividere esperienze positive per l'energia sostenibile che possano essere d'ispirazione ad altri. È un importante momento per far conoscere nuove idee e sviluppare collaborazioni per la realizzazione degli obiettivi energetici e climatici europei.



Figura 86: logo dell'EUSEW.

### 8.2.1 LE FASI METODOLOGICHE

Premesso che, data la novità dell' iniziativa ed il modo partecipato della sua redazione, si è cercato di attenersi il più possibile alla proposta progettuale di un Workshop quale momento d'incontro e riunione nel quale ognuno può sentirsi

parte attiva; animando la discussione si condividono le proprie idee, si elaborano soluzioni raggiungendo risultati tangibili.

La prima fase del presente progetto ha definito una mappa degli attori della comunicazione, educazione ed informazione della sostenibilità. L'evento è stato rivolto a:

- dottorandi;
- studenti;
- associazioni della società civile;
- società di investimento nelle tecnologie rinnovabili;
- cittadini;
- politici.

### 8.2.2 PRIMA MOSSA: LA RETE

In questa mappa degli attori locali della comunicazione si sono distinte entità istituzionali che autonomamente, allo scopo di formare i loro iscritti e sensibilizzare la società per un futuro energetico sostenibile hanno patrocinato l'evento realizzando una vera e propria rete di comunicazione, sponsorizzando il form di partecipazione allo scopo di premiare i contributi più significativi a partecipare all'agenda dell'evento:



Figura 87: La Sapienza Università di Roma.



Figura 88: Ordine degli Architetti di Roma.



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEI PERITI INDUSTRIALI  
E DEI PERITI INDUSTRIALI LAUREATI  
PRESSO IL MINISTERO DELLA GIUSTIZIA

Figura 89: Consiglio Nazionale dei Periti Industriali.



Figura 90: Collegio Provinciale dei Periti Industriali di Roma.

### **8.2.3 L'ANALISI**

In base alle proposte ricevute e all'adesione di iscrizione al Workshop sono stati individuati attraverso un momento d'indagine ed analisi sulle attività, gli interventi da inserire in agenda, anche alla luce dei partecipanti potenziali. I dottorandi hanno illustrato progetti innovativi relativi a diversi settori di grande interesse: dallo stoccaggio dell'energia, ai trasporti, dall'edilizia all'agricoltura, all'elettrificazione dei paesi in via di sviluppo. Il workshop è stato introdotto dal prof. Gugliermetti, Coordinatore del dottorato di ricerca in Energia e Ambiente e dalla prof. Giovenale, Preside della Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Roma La Sapienza. A seguire il prof. Navvab dell'Università del Michigan ha esposto una presentazione sull'integrazione delle nuove ricerche nel sistema energetico. Successivamente, è stato allestito un laboratorio di Visioning, come esercizio collettivo di immaginazione per aprire a sviluppi futuri.



Figura 91: locandina dell'evento Energy Day alla Sapienza.

## 8.2.4 REPORT DELL'EVENTO

L'Energy Day alla Sapienza, che si è svolto il 28 giugno 2016, è stata una giornata piena di contenuti, che ha visto protagonisti dottorandi e studenti impegnati sul tema dell'energia sostenibile. L'evento romano ha portato all'attenzione dei partecipanti innovazioni che consentono di ottimizzare la produzione e il consumo di energia. Se si considera che il 39% dell'energia prodotta è destinata ad usi civili, si comprende l'importanza del rinnovamento urbano che vede in prima linea gli interventi per i trasporti, le reti informatiche e la partecipazione degli utenti finali. Tutto ciò per arrivare a realizzare una "città condivisa". L'attenzione al contesto e l'armonizzazione di molteplici livelli, da quello tecnologico a quello estetico, sociale ed economico, ha trovato spazio anche nello studio presentato da Filippo Carollo: un progetto di riqualificazione e risparmio energetico per il centro storico di Palermo, che con un costo contenuto permetterebbe di abbattere le emissioni di CO2 e al tempo stesso migliorare la

qualità della vita e abbellire la città. Ripensare le attività nei centri storici alla luce delle esigenze di risparmio energetico può andare di pari passo con l'aggiornamento delle prassi imprenditoriali. L'innovazione energetica richiede per la sua implementazione un supporto e un consenso che solo una visione collettiva positiva può fornire. Il Visioning è uno strumento per sviluppare insieme una visione del futuro. Durante l'Energy Day i partecipanti, dopo un'introduzione a questo approccio, hanno potuto esplorare e condividere la loro idea di un'energia più sostenibile. Infine, l'Energy Day, nel dare voce ai giovani ricercatori, ha gettato un seme per ulteriori iniziative, allargandole e condividendole in uno spirito multidisciplinare. In questa occasione, rapportandosi a una problematica di portata mondiale, i partecipanti hanno tratto nuovi stimoli per dare un senso all'impegno per la sostenibilità energetica.

### **8.3 INCIDENTALITÀ**

Obblighi del Mobility Manager sono quelli di aumentare la sicurezza stradale; a seguire verrà illustrato lo studio d'impatto tra il mezzo di trasporto più sostenibile ed economico al mondo, la bici e, il veicolo a motore più venduto in assoluto negli Stati Uniti d'America e in Thailandia, il Pick-up.

#### **8.3.1 REALIZZAZIONE DEI MODELLI VIRTUALI**

Nel capitolo che segue ci si propone di analizzare nello specifico i dati derivanti dall'impatto tra un ciclista e un Pick-up.

Per realizzare tale progetto si è rivelato prezioso il lavoro precedentemente svolto dall'ingegnere Golfo per lo studio del modello antropomorfo della figura umana di un adolescente, intesa come un complesso di ossa, muscoli e articolazioni; degli ingegneri Battaglia e Damiani dedicatisi al progetto del telaio e la geometria della bicicletta.

Con l'ausilio del programma di simulazione Sim Wise 4D è stato così possibile realizzare simulazioni virtuali che hanno permesso di quantificare i danni accusati dal ciclista adolescente coinvolto in un sinistro con un Pick-up nelle parti relative alla testa e al torace. Nello specifico per quanto concerne le lesioni alla testa si è

usato il criterio HIC mentre per lo studio dei danni al torace è stato utilizzato il criterio del 3 ms, come da normativa.

Le dinamiche prese in esame per le valutazioni sopra indicate hanno riguardato lo scontro frontale, lo scontro laterale e posteriore.

Non poche sono state le difficoltà incontrate nel corso dello studio, tra le quali la realizzazione delle articolazioni della figura umana; ruota, scocca, telaio cofano e paraurti anteriore del Pick-up, la geometria del telaio, la posizione verticale del baricentro e lo studio della stabilità della bicicletta.

### **8.3.1.1 REALIZZAZIONE MODELLO CICLISTA**

Dovendo realizzare il modello ciclista è stato necessario soffermarsi sullo sviluppo del modello umano e della bicicletta. Il programma di animazione video utilizzato per il proporzionamento di ogni segmento corporeo è stato il Poser Pro. Le caratteristiche di questo corpo antropomorfo sono la sua altezza, che non supera 1.45m, la sua massa complessiva (45kg), e successivamente importato su Rhinoceros ai fini della compatibilità del modello corporeo con il Sim Wise 4D. Per la determinazione del momento d'inerzia, velocità, accelerazione ecc. di tutti gli elementi è stato posizionato un sistema di riferimento sul baricentro della testa del modello umano.

Il modello della bicicletta è stato realizzato per lo studio della stabilità e della manovrabilità, eseguendo prove dinamiche per diverse configurazioni geometriche. Per caratterizzare una bicicletta, solitamente si fa riferimento alle seguenti grandezze geometriche: il passo, l'avancorsa, l'angolo di inclinazione dello sterzo. Queste grandezze concorrono a definire la geometria e la maneggevolezza della bici; non è però possibile esaminare gli effetti di un solo parametro indipendentemente dagli altri, a causa della loro forte interazione. Per evidenziare meglio questo legame, aggiungiamo a queste grandezze anche il diametro delle ruote. Notiamo che cambiando la misura ad un elemento, di conseguenza variano pure le altre, influenzando contestualmente anche la guida.



L'interfaccia grafica di Sim Wise 4D per la simulazione dinamica di tipo multibody è abbastanza immediata in quanto permette di aprire nello stesso ambiente più file corrispondente a diversi oggetti. In genere i programmi di simulazione dinamica considerano gli elementi del corpo come corpi rigidi che si scambiano le forze reattive in corrispondenza dei vincoli imposti durante l'assemblaggio e ciò consente di utilizzare geometrie più semplici per realizzare il modello.

Nel nostro caso si simula un impatto tra tre corpi cercando di preservare le geometrie delle forme originali, dopo aver importato ogni singolo frame dall'ambiente Rhinoceros su Sim Wise. Il risultato di questa operazione è rappresentato in figura 92, nella quale è evidente il sistema di riferimento e una serie di elementi colorati diversamente per una migliore distinzione.

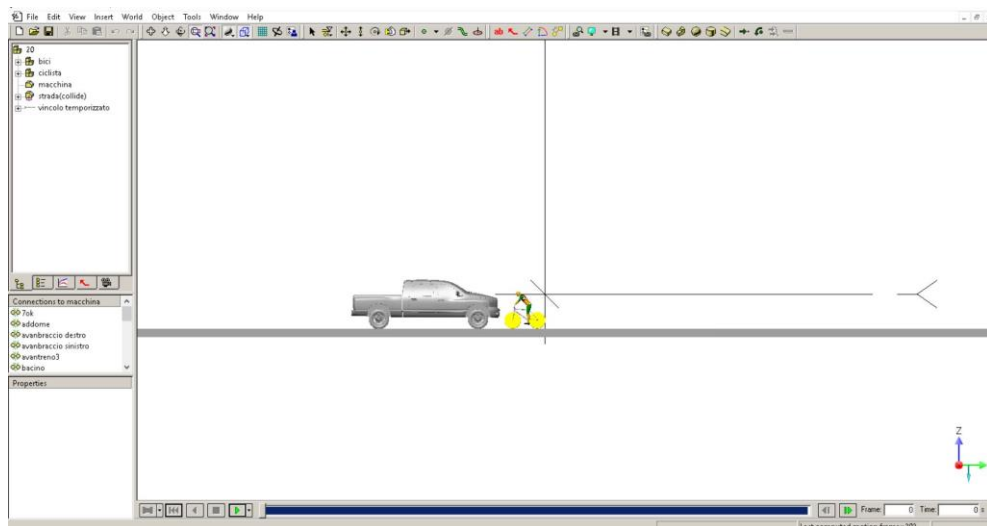


Figura 92: modello ciclista in ambiente Sim Wise.

### 8.3.1.2 IL MODELLO VIRTUALE PICK-UP

La vettura scelta per le simulazioni è un Pick-up della casa automobilistica Dodge. Le informazioni su passo, altezza, lunghezza sono state fornite dalla casa produttrice stessa.

Prendendo in considerazione le modalità d'impatto è stato scelto questo tipo di Dodge Ram per le sue caratteristiche: il telaio è stato totalmente ridisegnato usando acciai ad alta resistenza che ne aumentano rigidità e potere torsionale

diminuendo vibrazioni e rumore e nonostante il nuovo frontale aggressivo, l'aerodinamica è la migliore di qualsiasi altro pickup.

In questo caso è stato utilizzato il software Autodesk 3D Studio Max per ottenere il modello STL, che successivamente è stato importato in Sim Wise, attribuendo le masse, i baricentri e i momenti d'inerzia dei singoli componenti quali: ruota, scocca, telaio, cofano, paraurti anteriore; questi sono parametri essenziali per il corretto svolgimento della prova e l'acquisizione dei risultati.

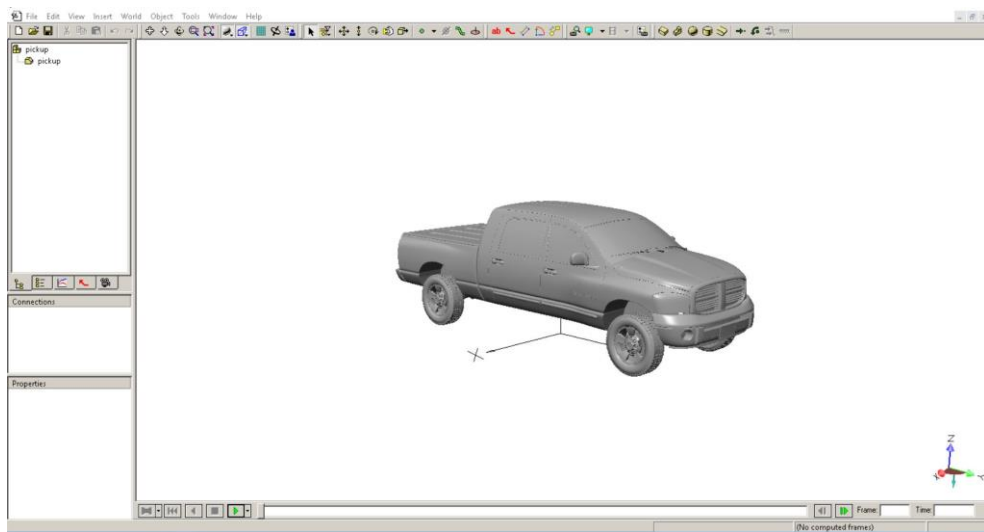


Figura 93: Pick-up in ambiente Sim Wise.

### 8.3.2 PROVA D'IMPATTO PICK-UP CICLISTA

In questo capitolo ci si propone di illustrare ed elencare attraverso l'ausilio di grafici, tabelle e raffigurazioni, le prove effettuate per valutare il danno prodotto sul ciclista adolescente al variare delle condizioni d'impatto, così da poter ottenere i risultati necessari per il calcolo del parametro HIC per quanto concerne il trauma alla testa e l'applicazione del criterio 3ms per la valutazione dei danni al torace. Grazie all'utilizzo del Sim Wise è stato possibile ricostruire le principali condizioni che costituiscono la dinamica di un impatto ciclista adolescente – Pickup.

### **8.3.2.1 POSIZIONE DELL'ADOLESCENTE CICLISTA RISPETTO AL PICKUP**

Nel caso generale l'adolescente ciclista è posto in posizione perpendicolare all'asse longitudinale della strada, e procede ad una velocità trascurabile in direzione ortogonale rispetto al veicolo che sorraggiunge. Le azioni del conducente del veicolo assumono un'importanza determinante nell'evolversi dell'incidente.

L'atteggiamento più frequente di un'automobilista che vuole ridurre le conseguenze di un impatto è quello di decelerare per istinto, ma resta da dimostrare se l'azione dei freni del Pickup, risolve positivamente o meno l'evolversi dell'incidente.

É di facile comprensione che una riduzione della velocità non può che causare minori lesioni sul ciclista rispetto ad una velocità costante o superiore; purtroppo però nonostante i tempi di percezione e reazione del conducente e quelli del Pickup stesso, la reale diminuzione della velocità del Pickup risulta spesso molto scarsa: sebbene il Pickup abbia una capacità frenante capace di imporre mediamente una decelerazione di 0.6g, l'efficacia dell'azione frenante si raggiungerebbe il più delle volte in prossimità del momento d'impatto.

Questo lavoro si propone di eseguire il test considerando l'adolescente ciclista in tre posizioni: Nella prima esso è posizionato come descritto precedentemente, immaginandolo quindi fermo sulla carreggiata con il fianco rivolto verso il Pickup in procinto di sorraggiungere (impatto laterale).

Nel secondo caso il ciclista si trova di fronte al Pickup in procinto di sorraggiungere (impatto frontale), mentre nel terzo e ultimo caso il ciclista viene posto alle spalle del Pickup (impatto posteriore o tamponamento).

Il vincolo temporizzato, chiamato "rope" che è possibile inserire in ambiente Sim Wise 4D fa sì che il ciclista riesca a rimanere in posizione eretta fino ad un istante prima che avvenga l'impatto con il Pickup.

### 8.3.2.2 VELOCITÀ DEL PICKUP

Poiché il codice stradale fissa il limite massimo di percorrenza del territorio urbano ad una velocità massima di 50 km/h, anche le prove di crash test rispettano tale limite. Considerando che una velocità di 50 km/h può essere fatale in caso di urto, si è scelto di eseguire i crash test anche alla velocità di 20 km/h, 30 km/h e di 40 km/h.

### 8.3.2.3 SIMULAZIONI NUMERICHE, PROVE DI CRASH CICLISTA- PICKUP

I parametri misurati durante il corso delle prove sono:

- accelerazione nel baricentro della testa;
- accelerazione nel baricentro del torace.

Di seguito si propongono gli andamenti dell'accelerazione della testa e del torace, per mezzo dei grafici, in funzione del tempo per tutte le prove eseguite:

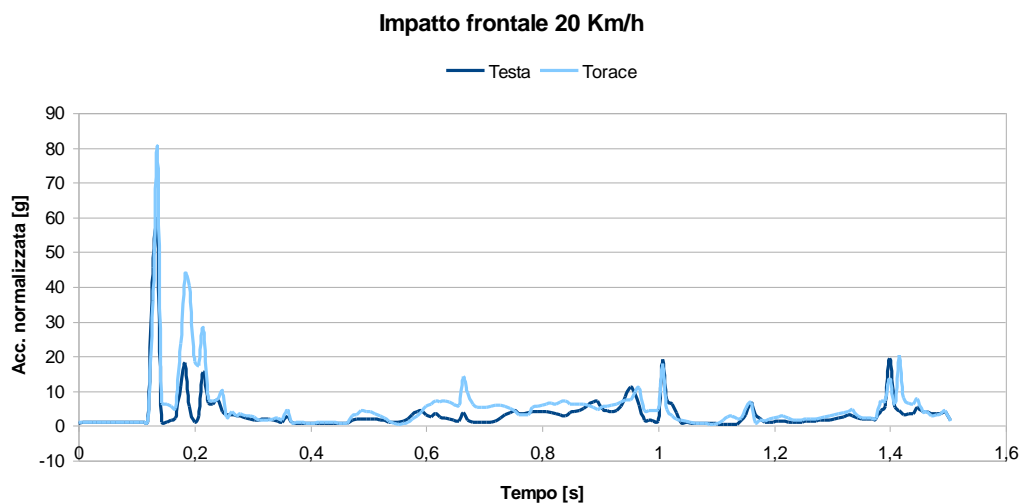


Grafico 1: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto frontale a 20km/h.

### Impatto frontale 30 Km/h

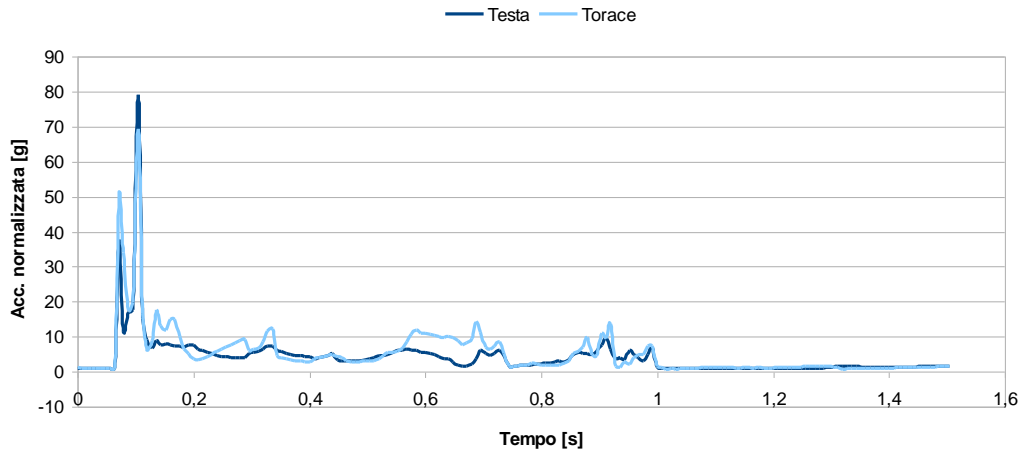


Grafico 2: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto frontale a 30km/h.

### Impatto frontale 40 Km/h

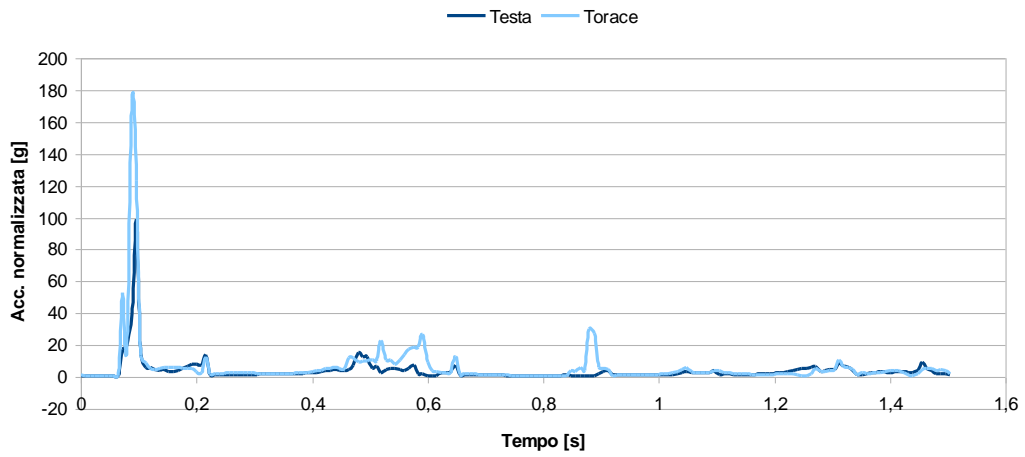


Grafico 3: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto frontale a 40km/h.

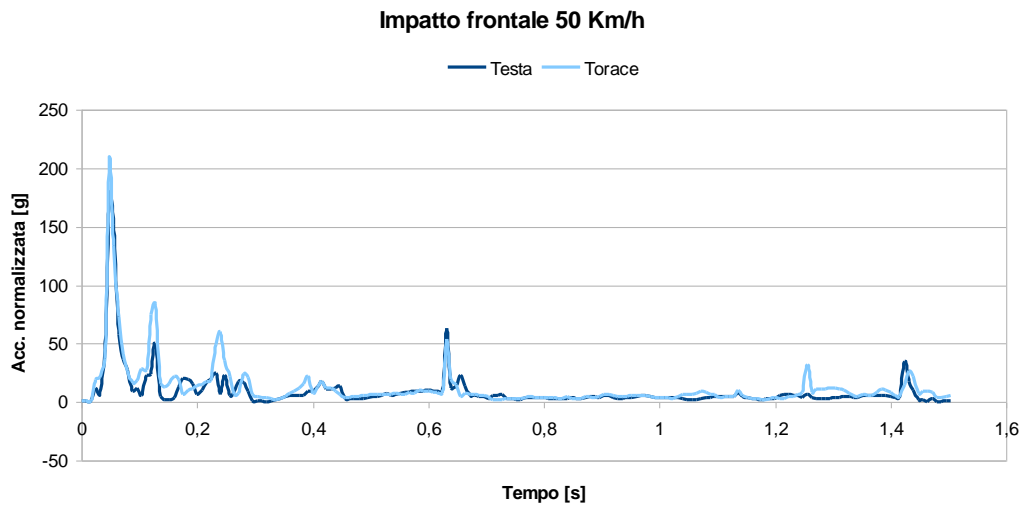


Grafico 4: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto frontale a 50km/h.

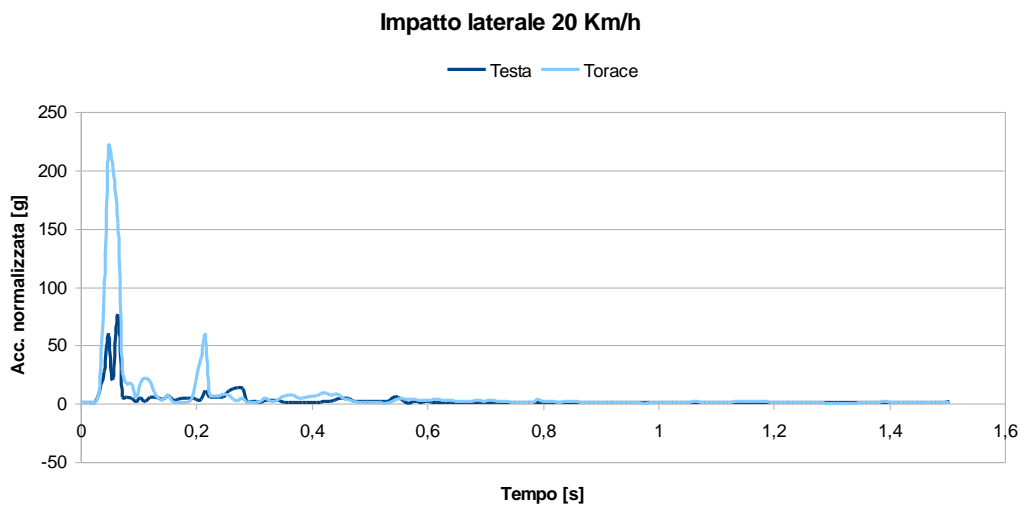


Grafico 5: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto laterale a 20km/h.

### Impatto laterale 30 Km/h

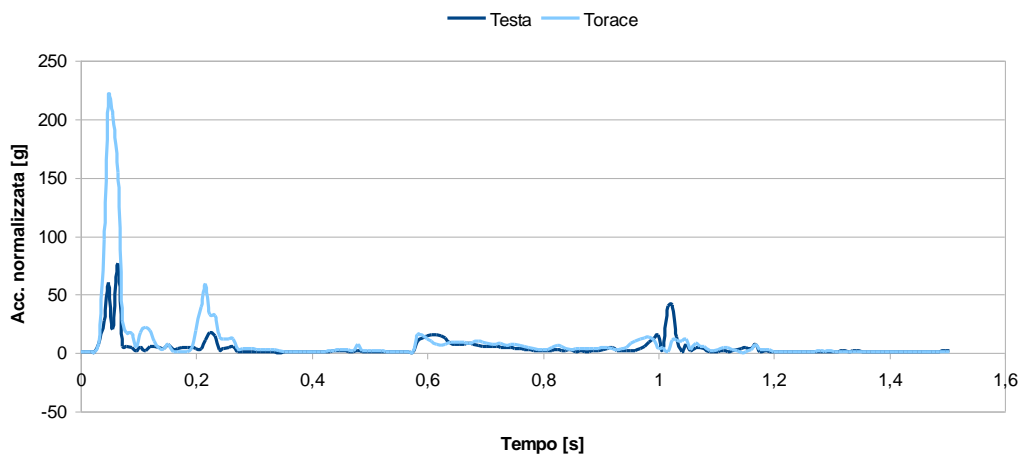


Grafico 6: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto laterale a 30km/h

### Impatto laterale 40 Km/h

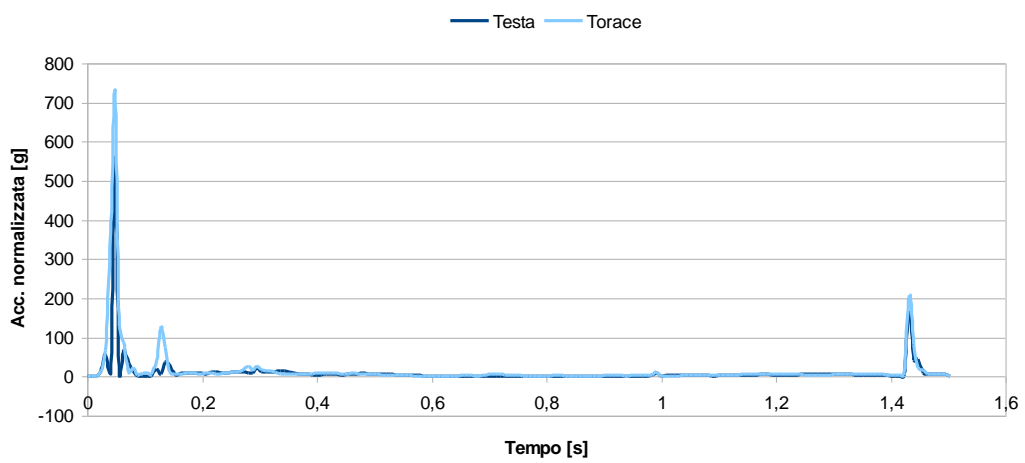


Grafico 7: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto laterale a 40km/h

### Impatto laterale 50 Km/h

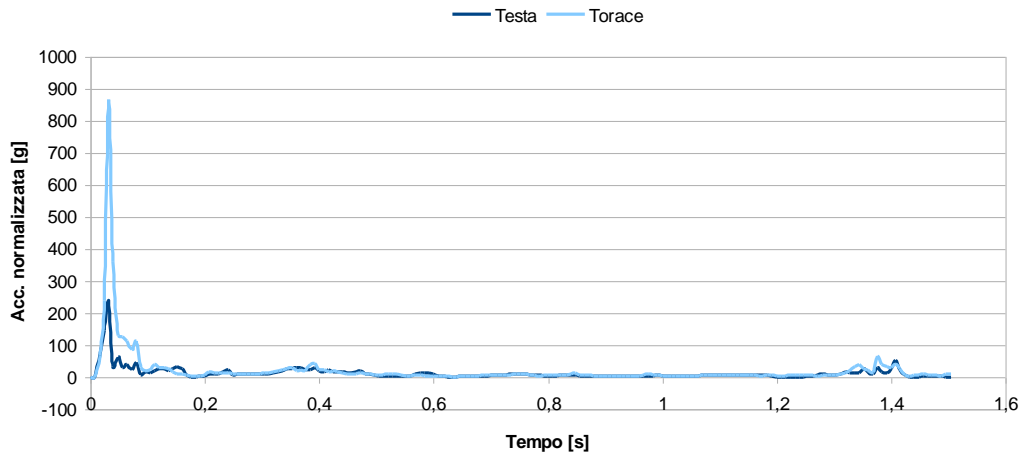


Gráfico 8: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto laterale a 50km/h

### Impatto posteriore 20 Km/h

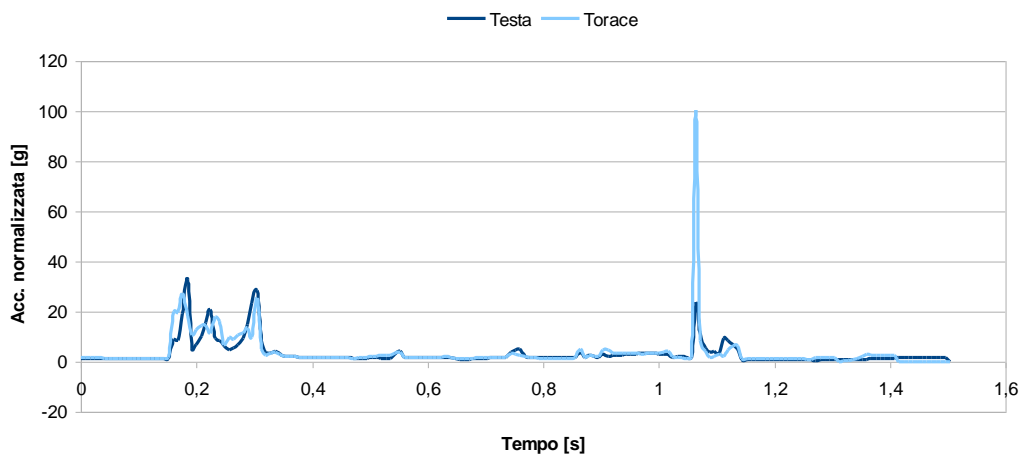


Gráfico 9: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto posteriore a 20km/h



### Impatto posteriore 30 Km/h

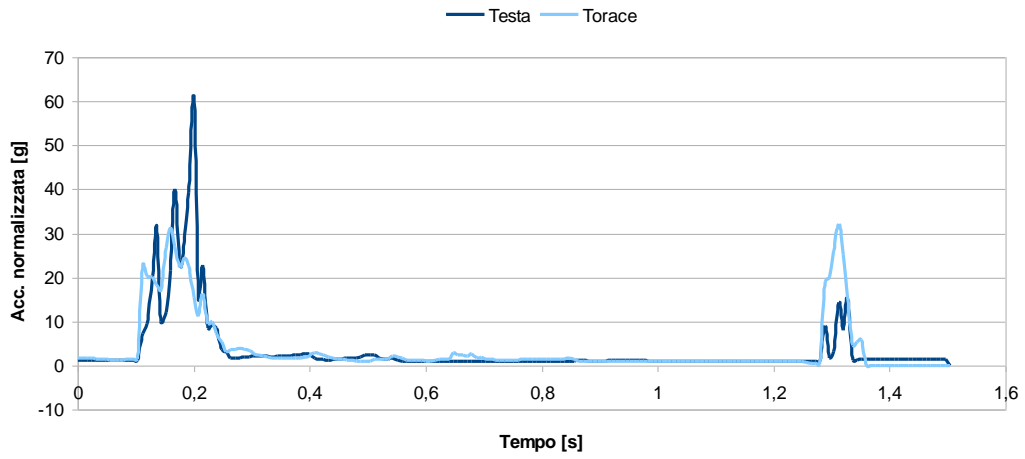


Grafico 10: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto posteriore a 30km/h

### Impatto posteriore 40 Km/h

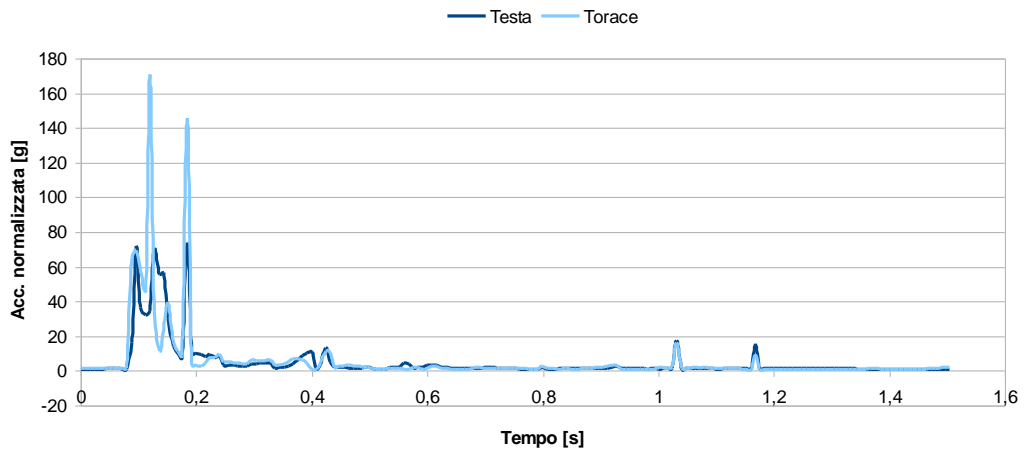


Grafico 11: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto posteriore a 40km/h

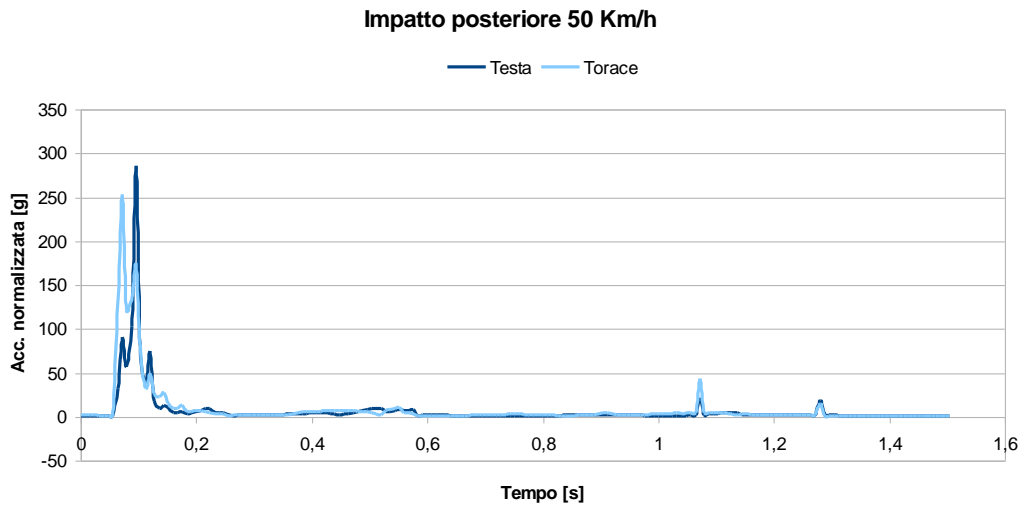


Grafico 12: andamento dell'accelerazione della testa e del torace nell'impatto posteriore a 50km/h

### 8.3.3 ANALISI DELLE PROVE

La ricostruzione in Sim Wise degli eventi in determinate condizioni e circostanze permette di osservare le traiettorie assunte dall'adolescente ciclista nel corso dell'intero urto confrontando volta per volta i dati estratti dalle prove con i fotogrammi del test.

Le quattro sequenze rappresentate nelle figg. 94, 95, 96 e 97 mostrano le diverse traiettorie assunte in funzione delle diverse condizioni di prova:

I primi sei fotogrammi illustrano la dinamica dell'impatto laterale in esame a 20 km/h; è possibile notare la spinta del paraurti anteriore e la proiezione in avanti del ciclista.

Il secondo caso ritrae la traiettoria assunta dal ciclista che viene investito posteriormente dal veicolo che sopraggiunge a velocità costante di 30 km/h.

Si nota la spinta in avanti e l'arruotamento del corpo del ciclista.

La terza sequenza mostra il ciclista in posizione laterale rispetto al Pickup che procede ad una velocità costante di 40 km/h. Si nota in questa simulazione la fase di caricamento sul cofano e il volteggio sullo stesso del corpo del ciclista.

Nel quarto e ultimo caso il ciclista si trova in posizione posteriore rispetto al Pickup che procede ad una velocità di 50 km/h. Anche in questa simulazione si nota il volteggio, tipico degli incidenti ad alta velocità.

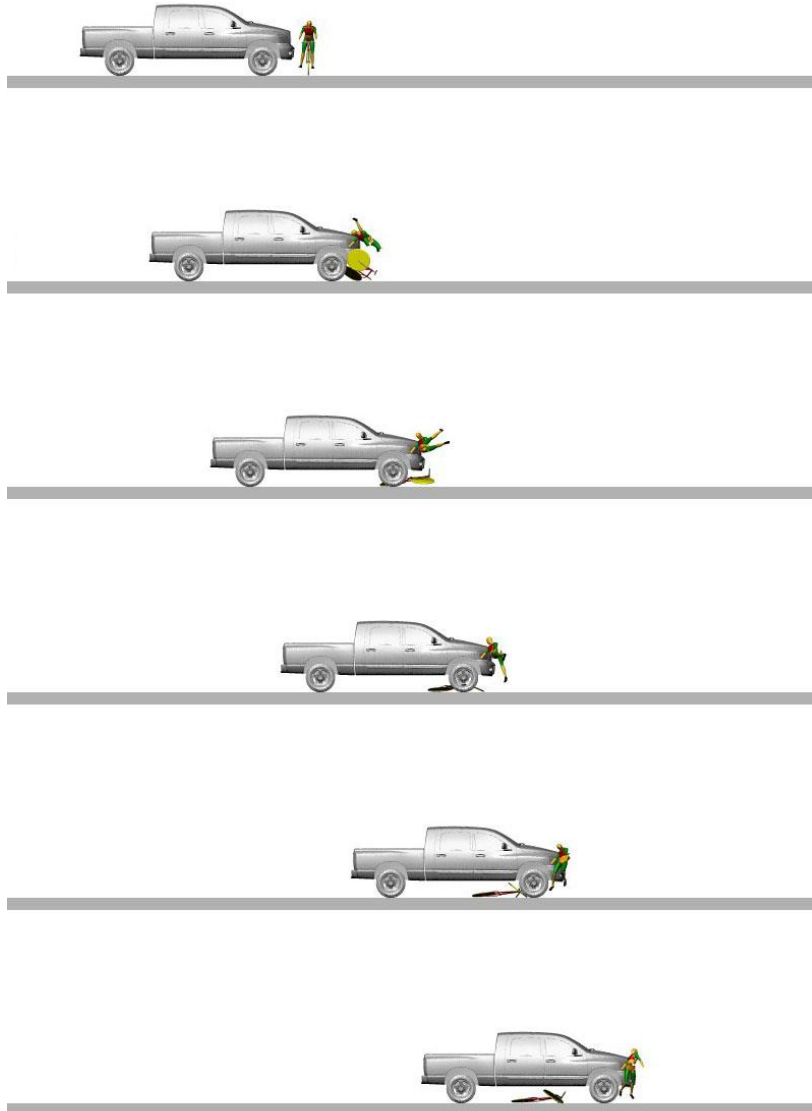


Figura 94: impatto laterale a 20km/h, velocità costante.

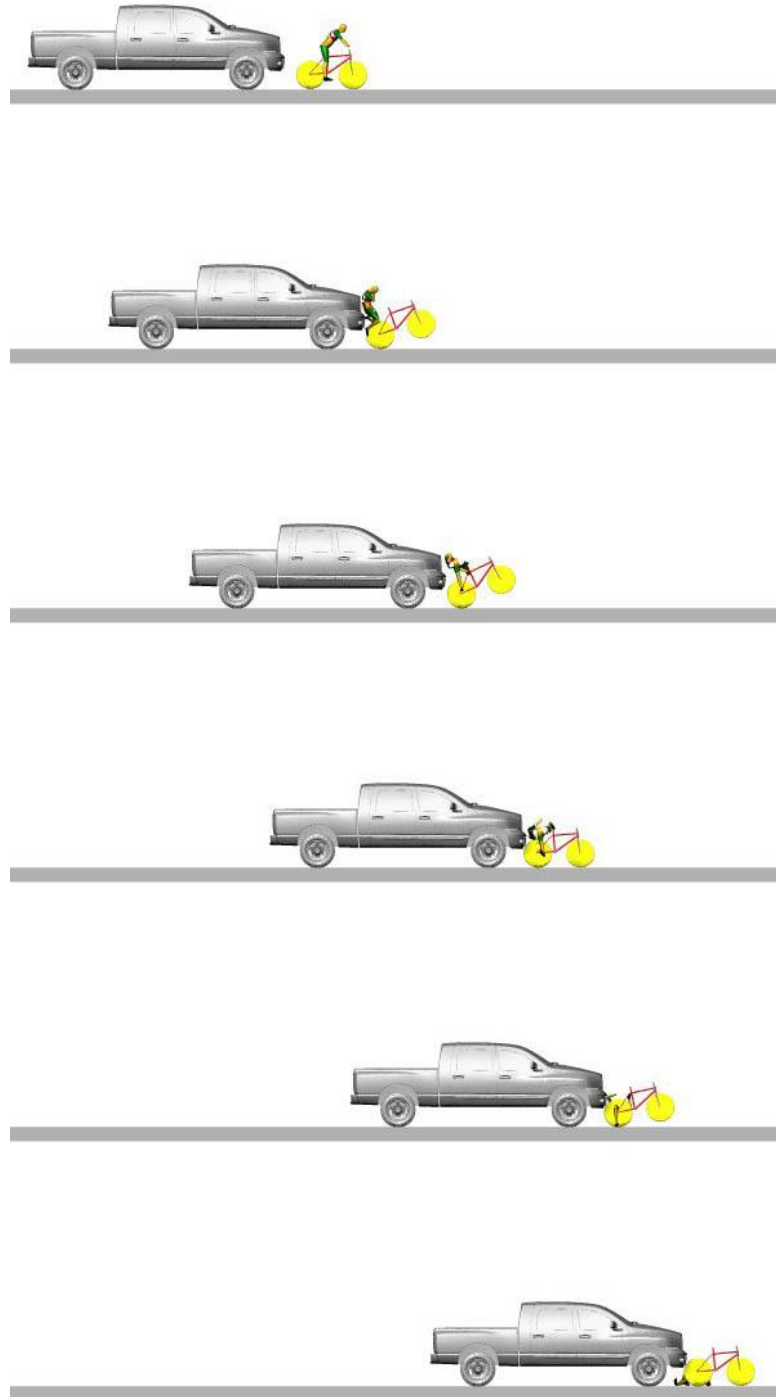


Figura 95: impatto posteriore a 30km/h, velocità costante.

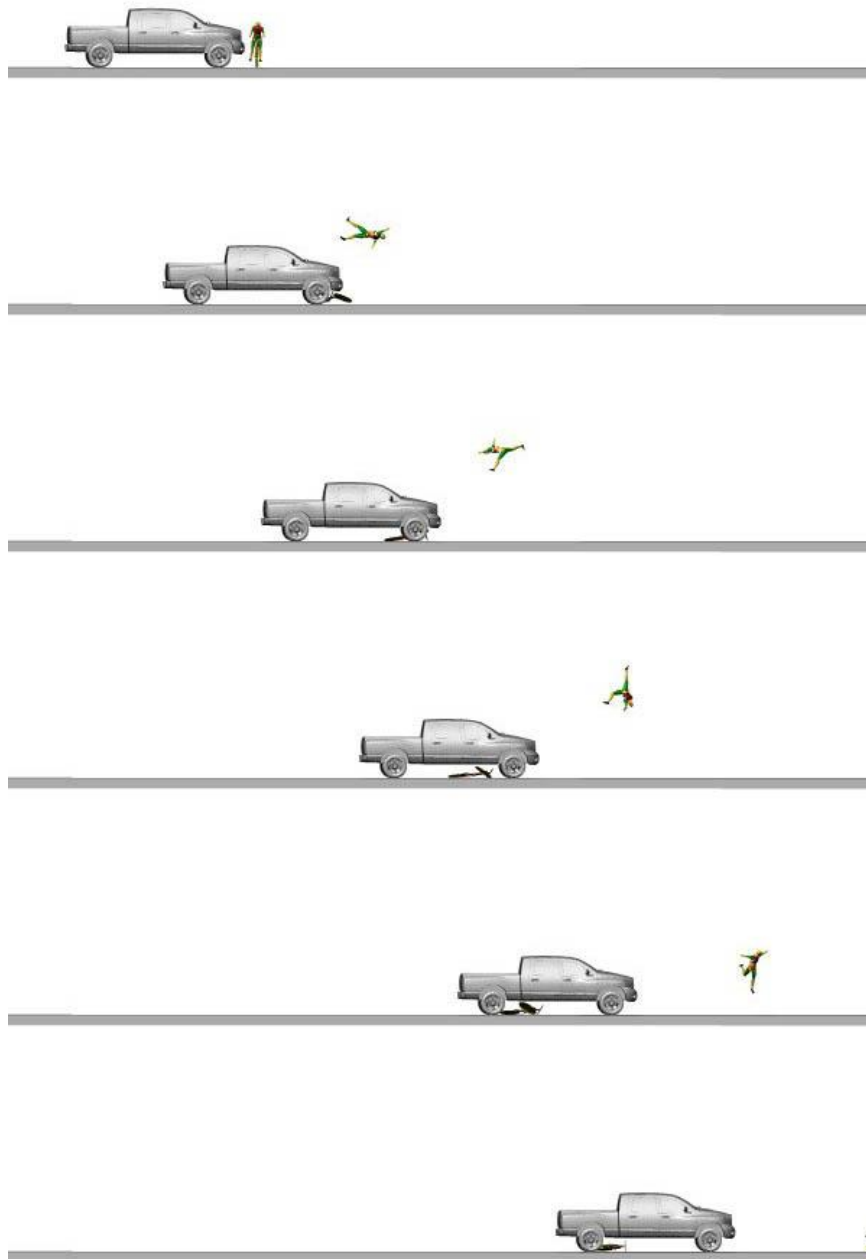


Figura 96: impatto laterale a 40km/h, velocità costante.

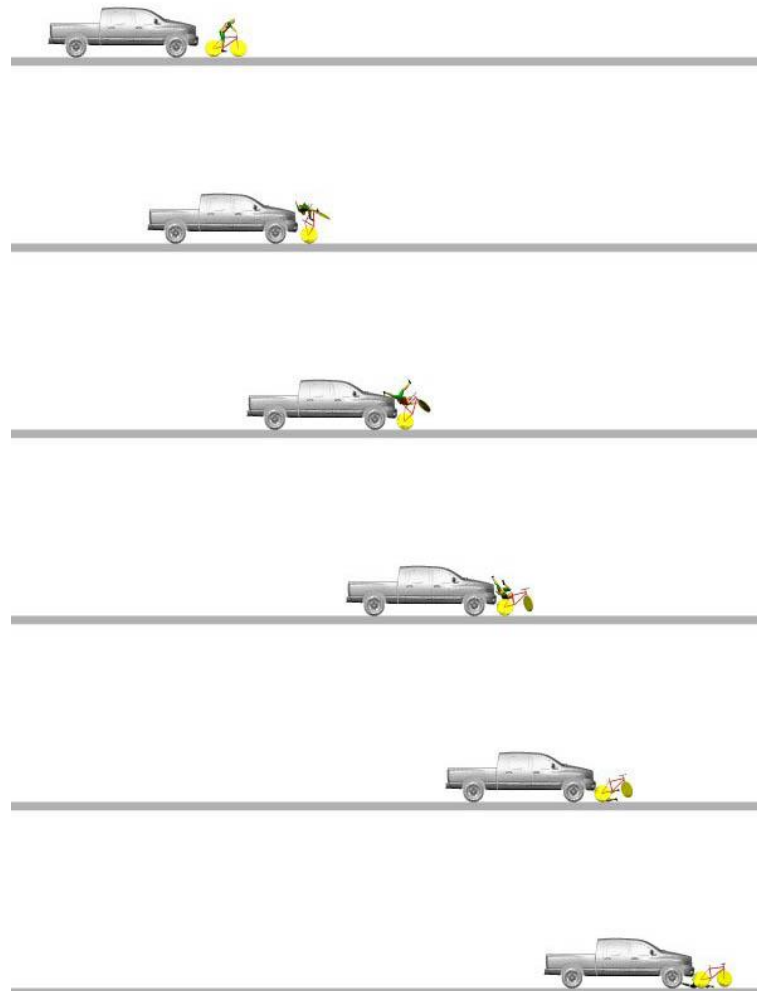


Figura 97: impatto posteriore a 50km/h, velocità costante.

### 8.3.3.1 ANALISI E RIEPILOGO DEI RISULTATI OTTENUTI DALLE PROVE E CALCOLO DELL' HIC

Le prove effettuate hanno portato alla luce una miriade di informazioni molto utili al fine di analizzare gli aspetti più importanti. Di seguito viene proposta una tabella con la sintesi dei risultati ottenuti e dei relativi valori HIC.

Tabella 9: sintesi dei valori ottenuti e dei relativi valori di HIC

Prova	Posizione	Vel. impatto [km/h]	$A_{max}$ testa [g]	HIC
1	Frontale	20	69,51	372,18
2	Frontale	30	78,94	411,72

3	Frontale	40	99,19	784,78
4	Frontale	50	177,01	4464,56
5	Laterale	20	111,85	213,04
6	Laterale	30	76,41	362,75
7	Laterale	40	563,19	4832,44
8	Laterale	50	236,56	7726,09
9	Posteriore	20	40,14	54,46
10	Posteriore	30	68,74	277,26
11	Posteriore	40	73,85	473,88
12	Posteriore	50	285,44	7543,26

I grafici che seguono mostrano l'andamento dell'HIC in funzione della velocità di impatto per le prove eseguite:

#### Grafico HIC impatto frontale

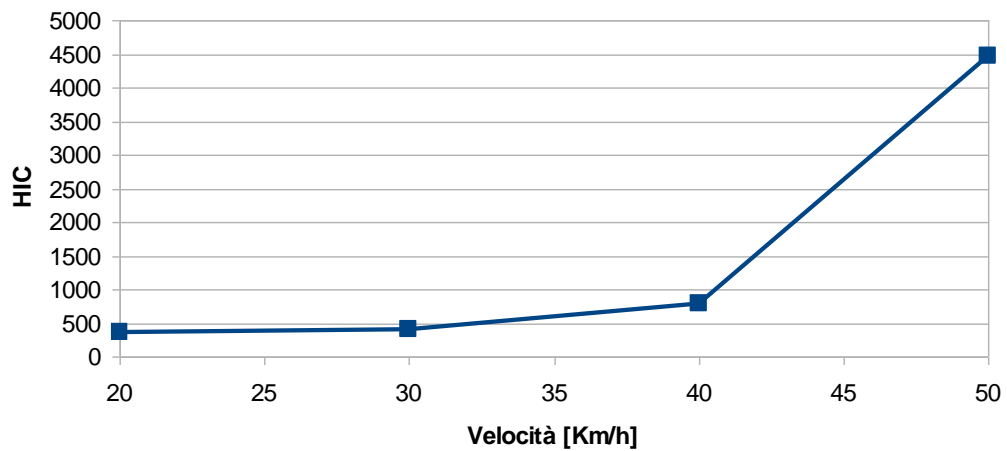


Grafico 13: valori di HIC in funzione della velocità d'impatto frontale

**Grafico HIC impatto laterale**

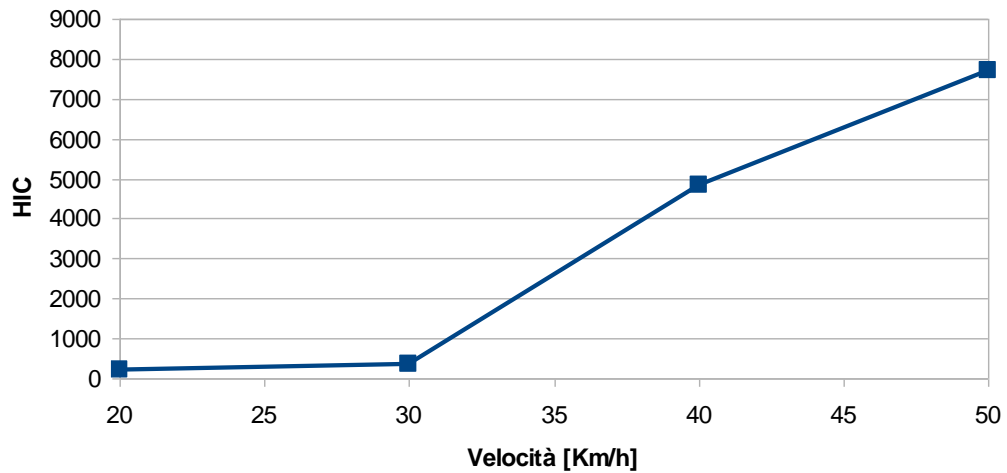


Grafico 14: valori di HIC in funzione della velocità d'impatto laterale

**Grafico HIC impatto posteriore**

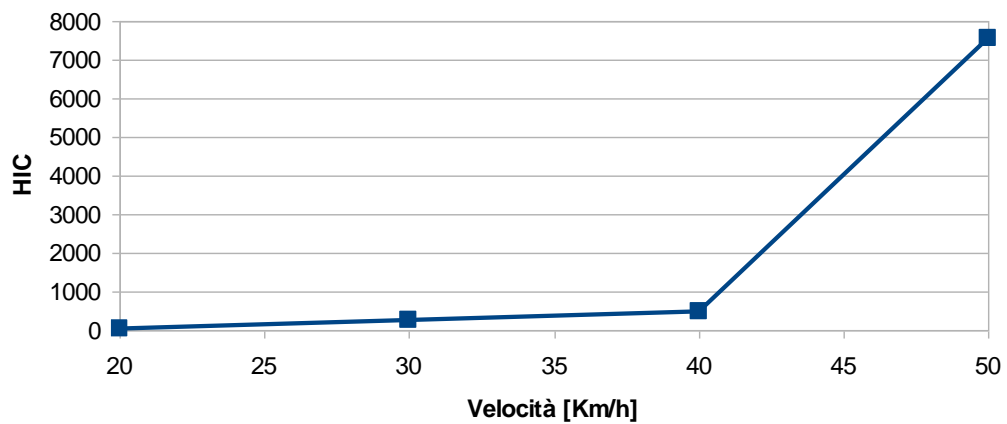


Grafico 15: valori di HIC in funzione della velocità d'impatto posteriore

### **8.3.3.2 GRAVITÀ DELL'EVENTO A SEGUITO DEGLI IMPATTI; CORRELAZIONE HIC-AIS**

Le figure 98, 99 e 100 mostrano la correlazione HIC-AIS. I dati HIC ottenuti nelle prove insieme con la scala di lesione AIS determinano la percentuale dell'evento.



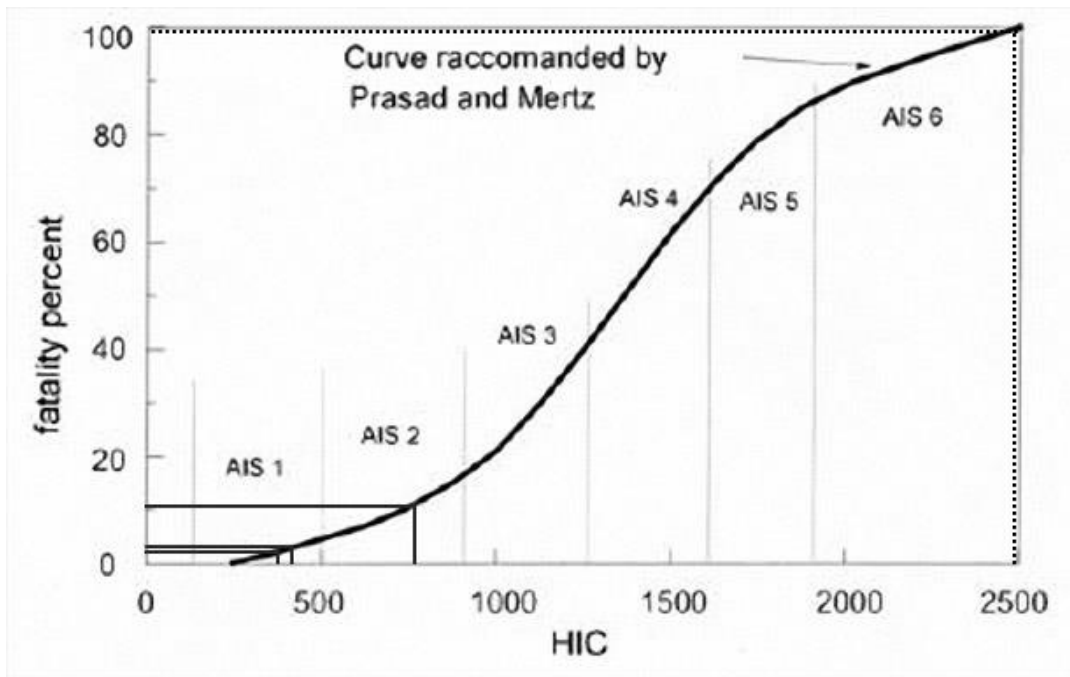


Figura 98: correlazione HIC-AIS (Frontale a velocità costante)

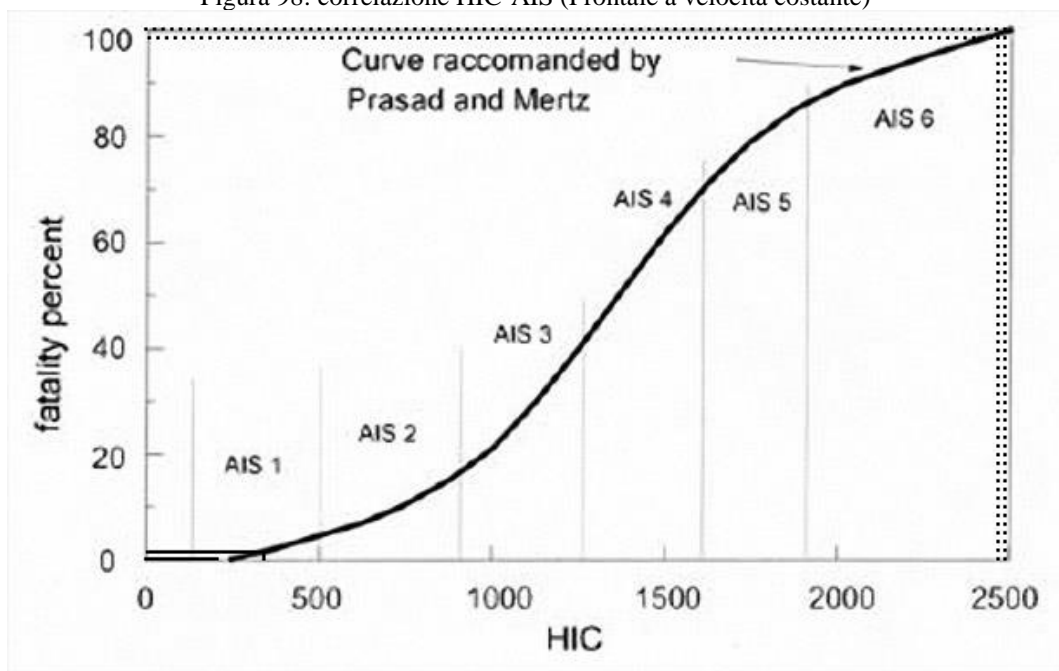


Figura 99: correlazione HIC-AIS (Laterale a velocità costante)

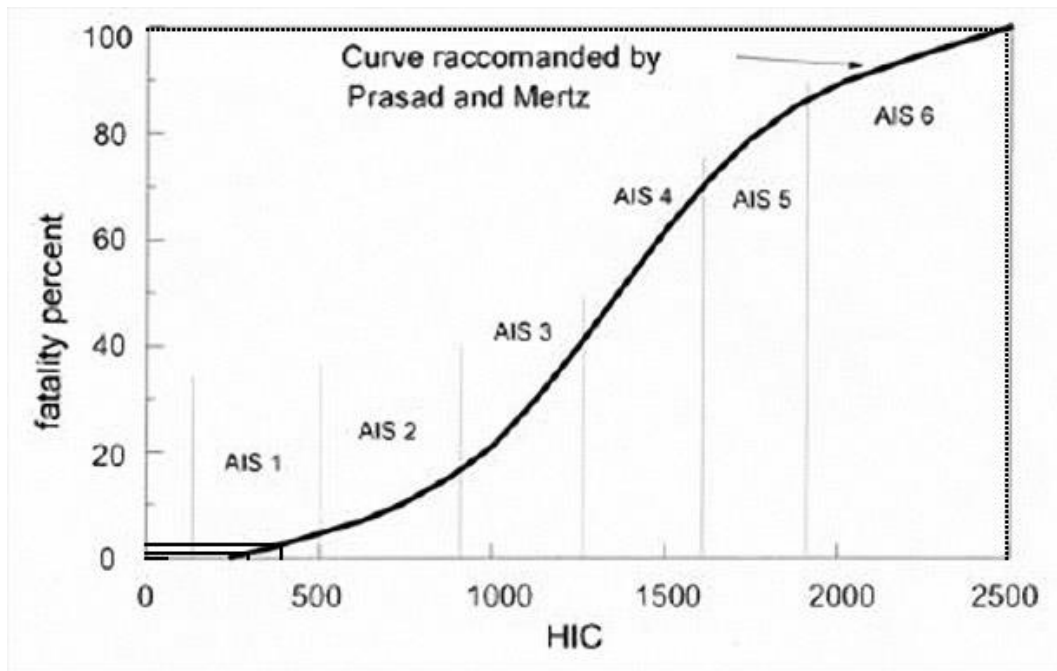


Figura 100: correlazione HIC-AIS (Posteriore a velocità costante)

Dai grafici di correlazione è possibile ricavare la percentuale di letalità a cui porta l'evento preso in considerazione.

Prova	Posiz.	Vel. impatto [km/h]	AIS	% letalità
1	Frontale	20	1	0-5
2	Frontale	30	1	0-5
3	Frontale	40	1	10-20
4	Frontale	50	6	100
5	Laterale	20	1	0
6	Laterale	30	1	0-5
7	Laterale	40	6	100
8	Laterale	50	6	100
9	Posteriore	20	1	0
10	Posteriore	30	1	0-5
11	Posteriore	40	1	0-5
12	Posteriore	50	6	100

Tabella 10: percentuale di letalità in base alla correlazione HIC – AIS

### **8.3.4 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI**

Per quanto riguarda gli andamenti dei grafici di accelerazione-tempo ottenuti possiamo distinguere le prove in 3 gruppi:

1. le prove 5-> 8 condotte per urti laterali;
2. le prove 1-> 4 condotte per urti frontali;
3. le prove 9 -> 12 condotte per urti posteriori.

Gli impatti frontali, laterali e posteriori vedono una serie di picchi d'accelerazione causate dall'urto sul piano laterale del cranio contro il frontale del PICKUP (paraurti e cofano); in questi casi il primo contatto con il cofano avviene all'altezza della spalla e in un secondo momento con la testa.

Questi picchi si ripetono in genere nel breve intorno di 0,01s a causa di alcune rapide rotazioni della testa intorno all'articolazione cervicale del collo.

Gli altri picchi sono meno accomunabili tra loro in base alla velocità assunta per la prova tant'è che i grafici accelerazione - tempo appaiono molto diversi al variare della velocità. Ciò avviene perché la testa a causa del primo contatto subito dall'adolescente ciclista nel paraurti del veicolo, viene proiettata all'indietro con forza. In questo modo il centro d'istantanea rotazione dell'articolazione cervicale varia determinando una variazione del momento della quantità di moto che ha come risultato un consistente aumento dell'accelerazione angolare di tutta la testa.

Quando in alcuni casi, vi è una sovrapposizione dell'urto della testa e il contatto del torace sul cofano vi è invece una crescita considerevole delle accelerazioni misurate per il torace.

#### **8.3.4.1 CONFRONTO TRA I RISULTATI**

Nella tabella 11 viene illustrata la differenza in percentuale tra l'analisi d'impatto SUV- ciclista e PICKUP-ciclista, in termini di HIC, posto il confronto dei dati ottenuti:

Tabella 11: confronto HIC PickUp - SUV

Prova	Posiz.	Vel.impatto [km/h]	Differenze con SUV
			HIC
1	Frontale	20	+55,39%
2	Frontale	30	+68,05%
3	Frontale	40	+37,83%
4	Frontale	50	+207,17%
5	Laterale	20	+1934,77%
6	Laterale	30	+90,62%
7	Laterale	40	+754,86%
8	Laterale	50	+486,57%
9	Posteriore	20	+16,37%
10	Posteriore	30	+52,37%
11	Posteriore	40	-42,42%
12	Posteriore	50	+146,85%

Nelle figure seguenti si mostrano l'andamento e il confronto.

### Confronto HIC impatto frontale Pick-up SUV Berlina

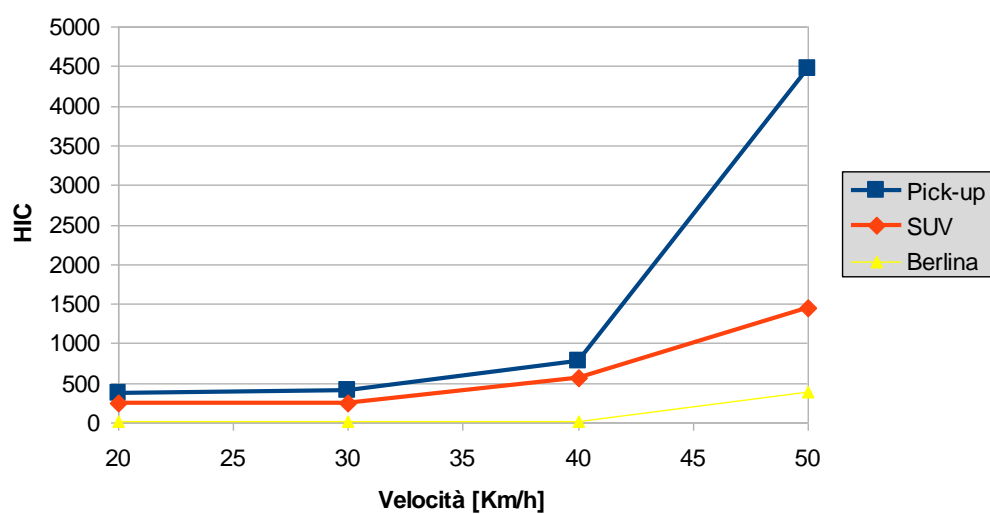


Figura 101: confronto HIC impatto frontale PICKUP – SUV – Berlina

### Confronto HIC impatto laterale Pick-up SUV Berlina

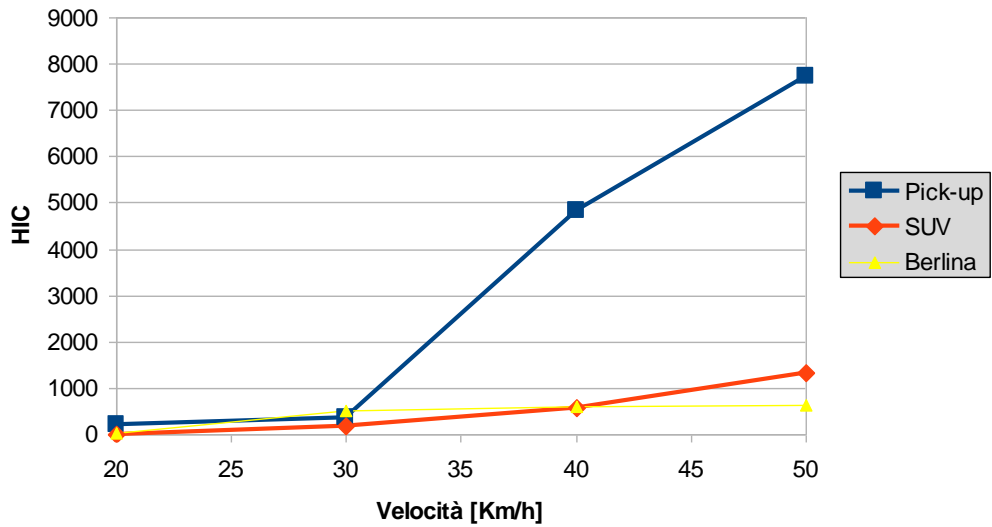


Figura 102: confronto HIC impatto laterale PICKUP – SUV – Berlina

### Confronto HIC impatto posteriore Pick-up SUV Berlina

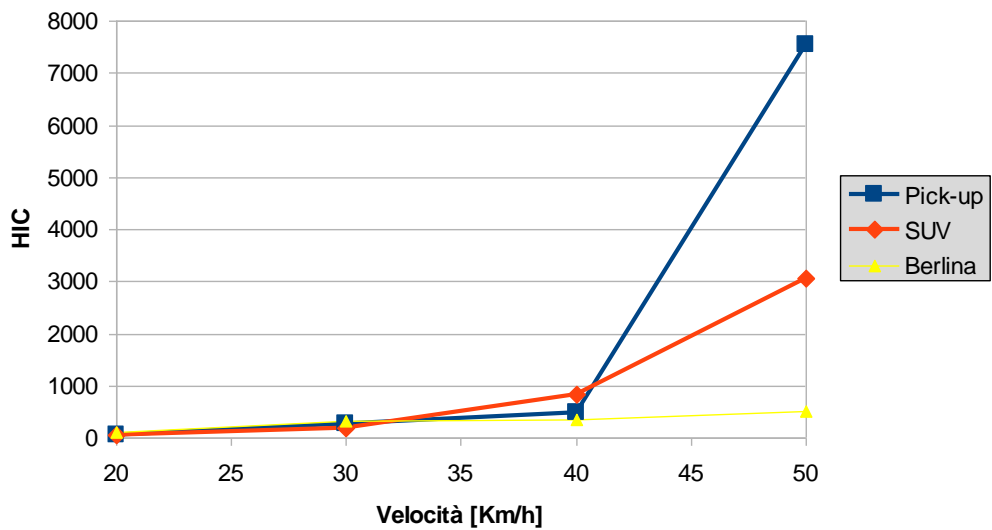


Figura 103: confronto HIC impatto posteriore PICKUP – SUV – Berlina

Da tale confronto è possibile dire che l'adolescente ciclista ha ancora di più scarse possibilità di sopravvivere all'impatto frontale, laterale e posteriore con il PICKUP nel range di velocità di 40-50km/h rispetto ad un SUV o ad una Berlina poiché i

valori di HIC si mantengono costantemente al di sopra dei valori precedentemente riscontrati.

### 8.3.4.2 CONFRONTO RAPPORTO HIC/MASSA CON ALTRI VEICOLI

È possibile effettuare un confronto dal rapporto HIC/MASSA con i veicoli esaminati durante il percorso accademico, cercando di comprenderne l'andatura tra Berlina (968kg), SUV(2900kg) e Pick-up(3084kg).

Nelle prove analizzate il ciclista adolescente si trova in posizione frontale, laterale e posteriore rispetto ai veicoli esaminati.

Le figure 18, 19 e 20 mostrano l'andamento e il confronto.

**Confronto rapporto HIC/MASSA impatto frontale ciclista**

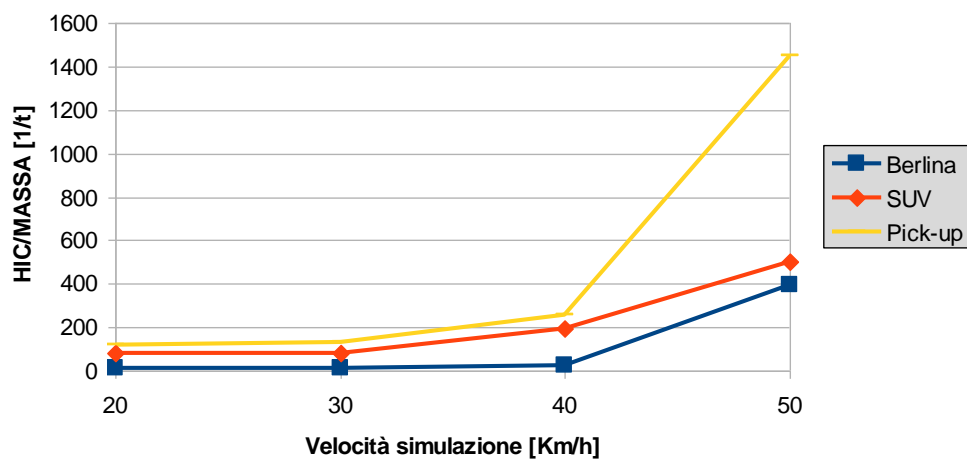


Figura 104: confronto rapporto HIC/MASSA impatto frontale ciclista.

### Confronto rapporto HIC/MASSA impatto laterale ciclista

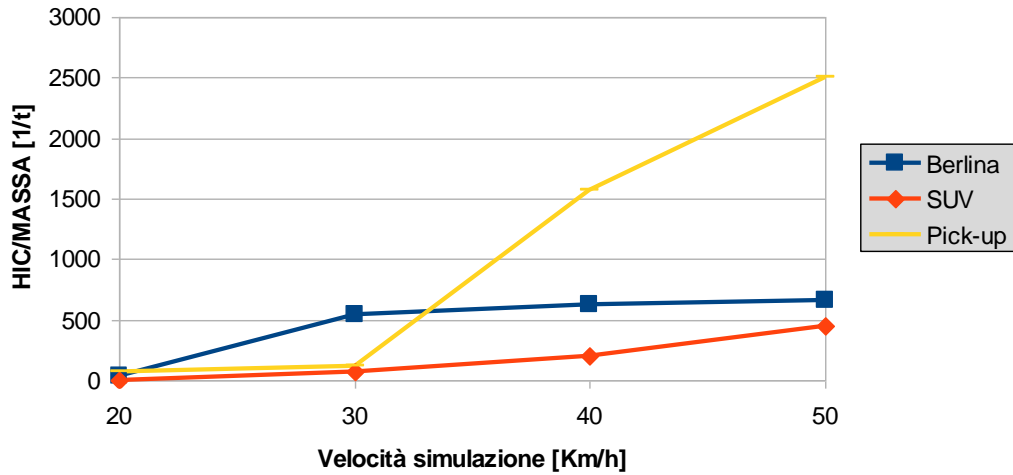


Figura 105: confronto rapporto HIC/MASSA impatto laterale ciclista.

### Confronto rapporto HIC/MASSA impatto posteriore ciclista

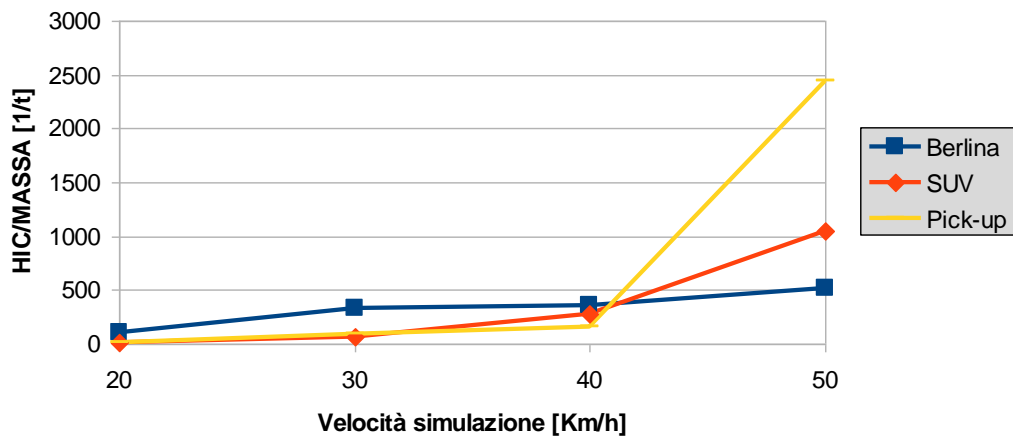


Figura 106: confronto rapporto HIC/MASSA impatto posteriore ciclista.

Da tale confronto si possono fare una serie di considerazioni:

- esaminando gli impatti frontali e posteriori sino alla velocità di 40km/h gli andamenti del rapporto HIC/[MASSA VEICOLO] con l'aumentare della velocità producono un grafico pressoché coincidente o al più parallelo;

- i dati con i due programmi multibody evidenziano come 20km/h siano le velocità con minima lesività mentre l'aumento di tale indice vede nei 50km/h la massima criticità;
- durante l'impatto laterale i valori risultano più elevati perché è la testa del ciclista che colpisce immediatamente il cofano del veicolo che lo travolge e non la bici, che al contrario potrebbe assorbire l'urto ma non vi riesce;
- la massa del veicolo investitore ha un'influenza sicuramente determinante nella gravità delle lesioni, specialmente alla velocità maggiore.

### 8.3.4.3 CONFRONTO CON ALTRI PROGRAMMI MULTIBODY

È possibile un confronto con alcuni dati reperibili dal S.MUKHERJEE, A. CHAWLA, D. MOHAN, M. SINGH, R. DEY “*Effect of vehicle design on head injury severity and throw distance variations in bicycle crashes*”, Transportation Res, and Injury Prevention program Indian Institute of Technology. New Delhi 07-0467 dove sono state eseguite delle prove di impatto realizzate mediante l'utilizzo di un programma multibody MAYDMO.

Nelle prove analizzate il ciclista si trova in posizione frontale rispetto ai veicoli.

La figura 107 mostra l'andamento e il confronto.

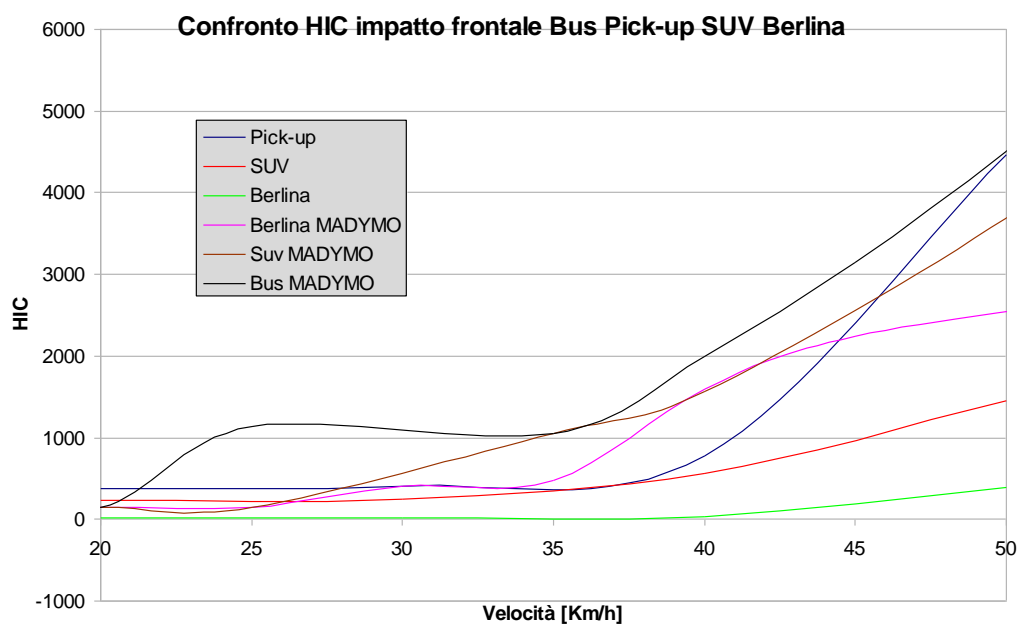


Figura 107: confronto HIC frontale simulazioni in ambienti Sim Wise e MAYDMO



Da tale confronto si possono fare una serie di considerazioni:

- la lesività nell'impatto frontale con il Bus è elevata poiché i valori di HIC si mantengono costantemente al di sopra dei valori riscontrati nelle simulazioni di ambo i programmi multibody rispetto a Berlina, SUV e Pick-up
- i valori di HIC tra i due programmi in ambienti SIMWISE e MAYDMO nei confronti delle simulazioni con SUV e Berlina differiscono per differenti masse dei veicoli e dei ciclisti in esame.

Volendo fare un confronto dal rapporto HIC/MASSA con le due Berline esaminate, cercando di comprenderne l'andatura tra il modello di AUDI A2 (967kg) e MARUTI ZEN (766kg) esaminiamo la figura n. 108

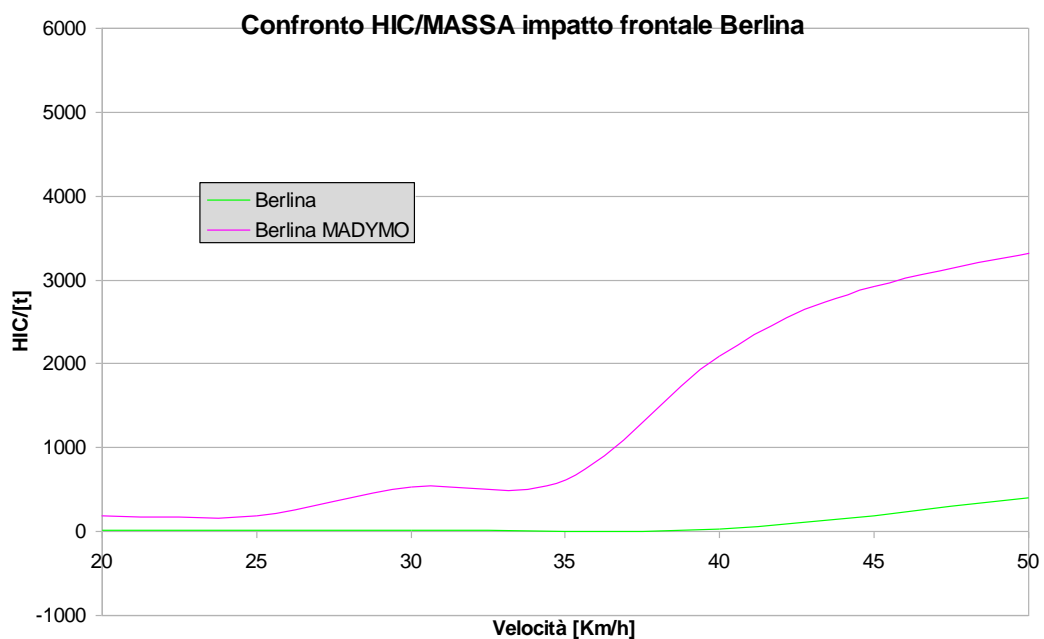


Figura 108: confronto HIC/MASSA frontale simulazioni in ambienti Sim Wise e MAYDMO

Da tale confronto si evince che le masse dei veicoli influiscono sui valori di HIC rilevati.

#### 8.3.4.4 CONFRONTO HIC CON UN PEDONE ADULTO

È possibile un confronto con alcuni dati reperibili dal X.J. LIU, J.K. YANG & P. LÖVSUND, *A Study of Influences of Vehicle Speed and Front Structure on*

*Pedestrian Impact Responses Using Mathematical Models – Traffic Injury Prevention, 3:1, 31-42, 2010 ISSN:1538-9588* dove sono state eseguite delle prove di impatto veicolo – pedone adulto, realizzate mediante l'utilizzo di un programma multibody MAYDMO, nelle prove analizzate il pedone si trova in posizione frontale rispetto al veicolo a 40km/h.

Le figure 109 e 110 mostrano l'andamento e il confronto.

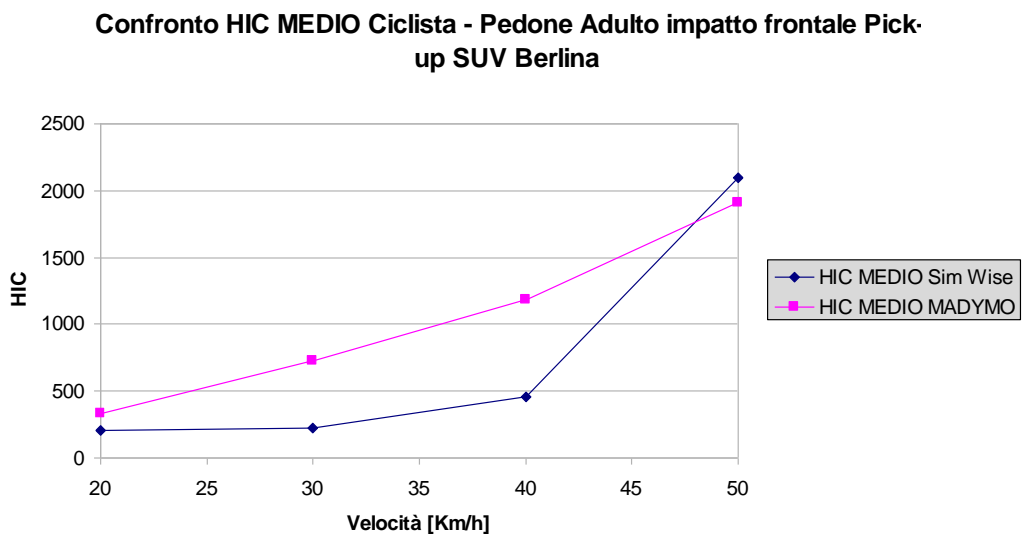


Figura 109: Confronto HIC MEDIO Ciclista – Pedone Adulto(Sim Wise, MAYDMO) dei veicoli Berlina, SUV e Pick Up

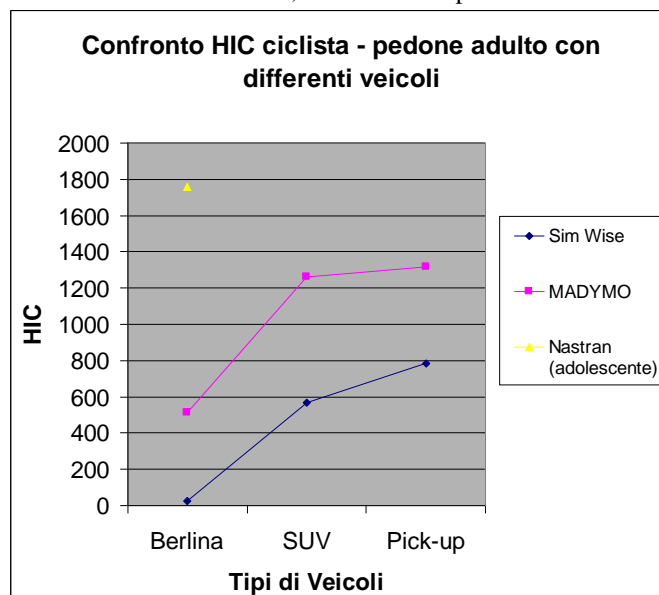


Figura 110: Confronto HIC(Sim Wise, MAYDMO, Nastran). Nelle prove analizzate il pedone si trova in posizione frontale rispetto al veicolo a 40km/h

Da tale confronto si possono fare una serie di considerazioni:

- Anche questa volta l'adolescente ciclista possiede maggiori possibilità di sopravvivere all'impatto frontale rispetto all'urto del pedone adulto poiché i valori di HIC si mantengono costantemente al di sotto dei valori riscontrati. Questo perché parte dell'energia cinetica d'impatto viene assorbita dal telaio della bicicletta.
- la massa del veicolo investitore ha un'influenza sicuramente determinante nella gravità delle lesioni.

### 8.3.4.5 CONFRONTO RISULTANTE VELOCITÀ DELLA TESTA CON UN PEDONE ADULTO

I parametri misurati durante il corso delle prove sono:

- risultante della velocità nel baricentro della testa;
- risultante della velocità nel baricentro del torace.

Di seguito si propongono gli andamenti dell'accelerazione della testa e del torace, per mezzo dei grafici, in funzione del tempo per tutte le prove eseguite:

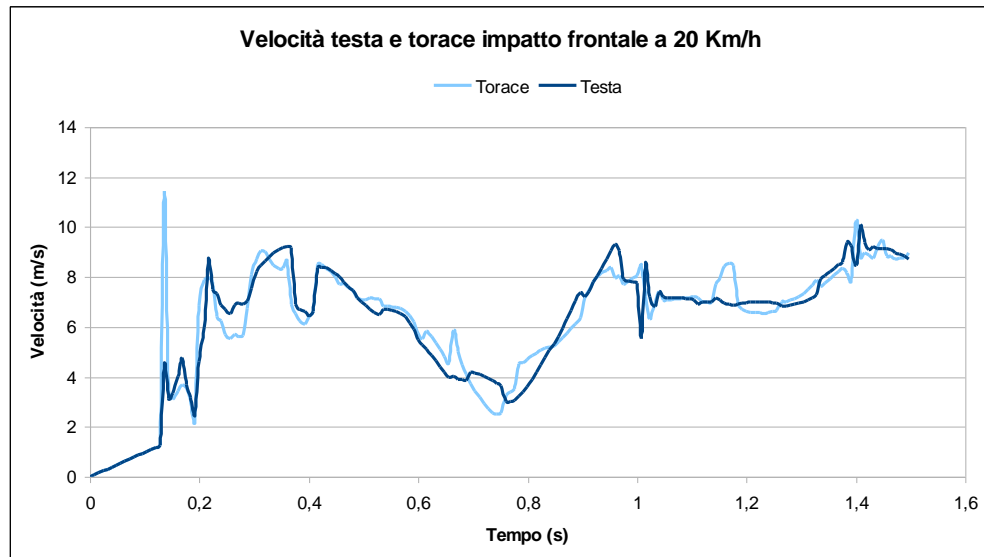


Grafico 16: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale BERLINA a 20km/h.

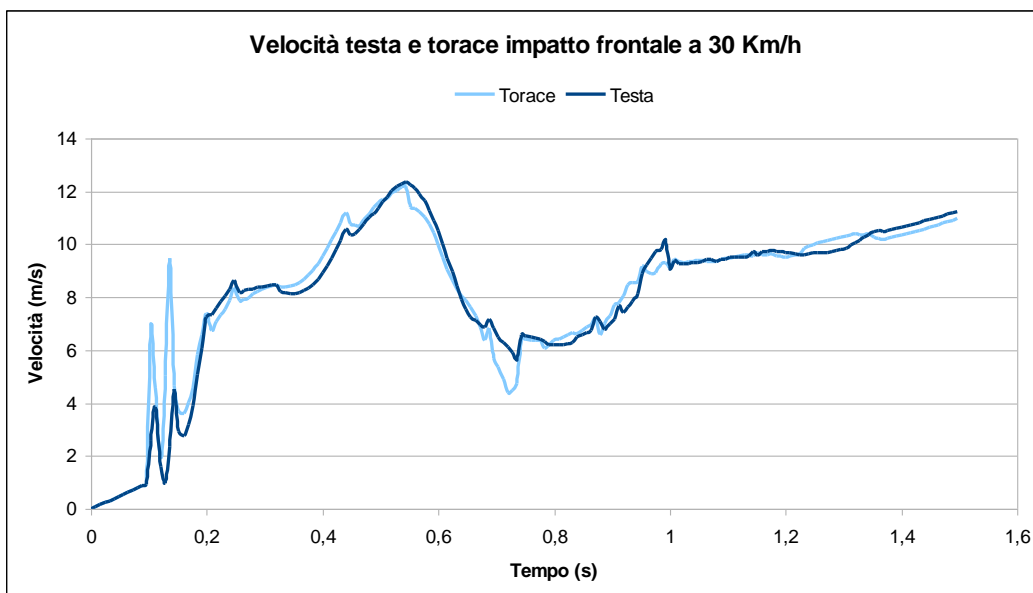


Grafico 17:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale BERLINA a 30km/h.

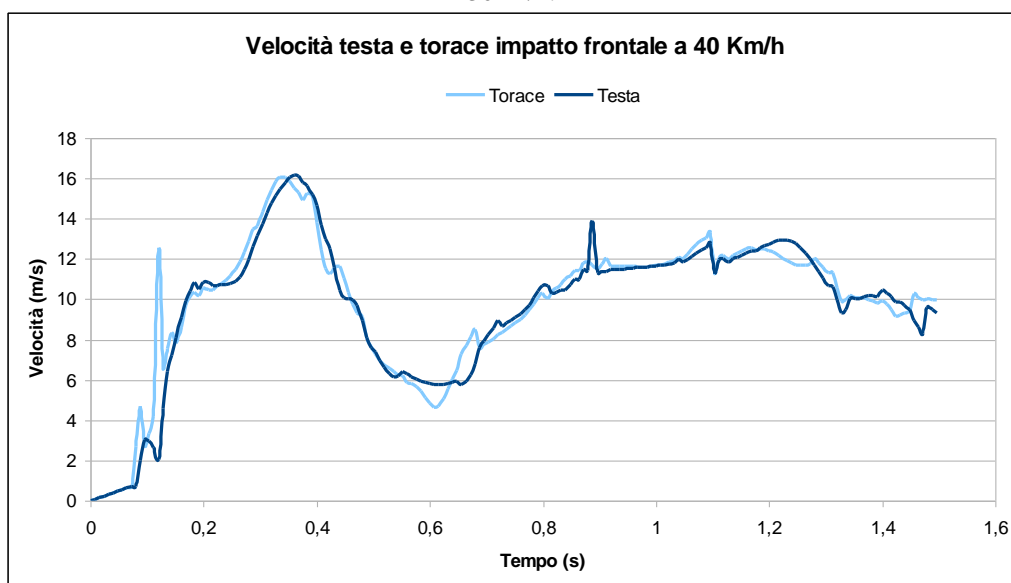


Grafico 18:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale BERLINA a 40km/h.

### Velocità testa e torace impatto frontale a 50 Km/h

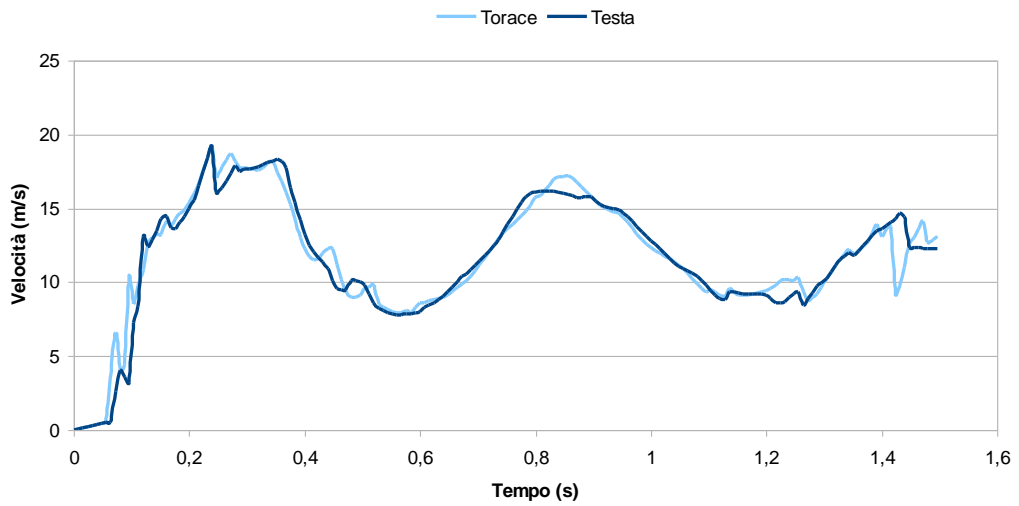


Grafico 19:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale BERLINA a 50km/h.

### Velocità testa e torace impatto frontale a 20 Km/h SUV

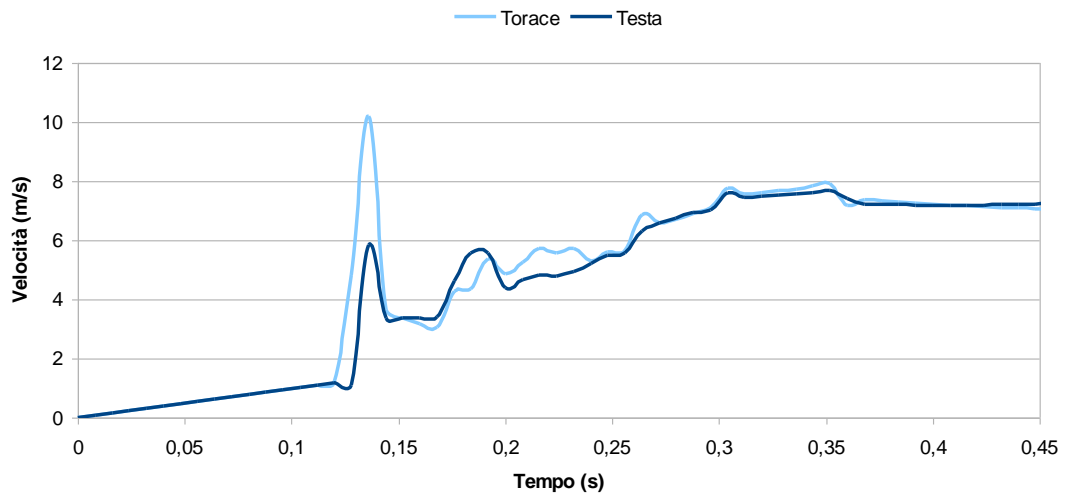


Grafico 20:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale SUV a 20km/h.

**Velocità testa e torace impatto frontale a 30 Km/h SUV**

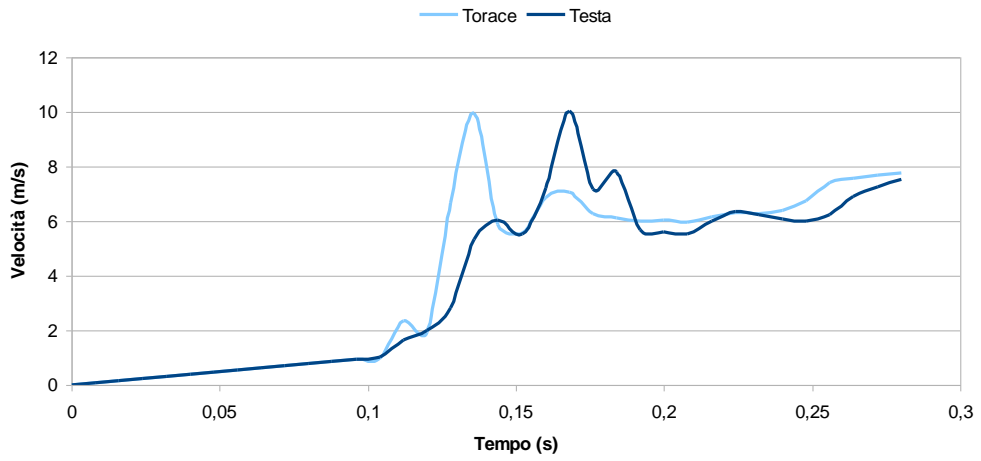


Grafico 21: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale SUV a 30km/h.

**Velocità testa e torace impatto frontale a 40 Km/h SUV**

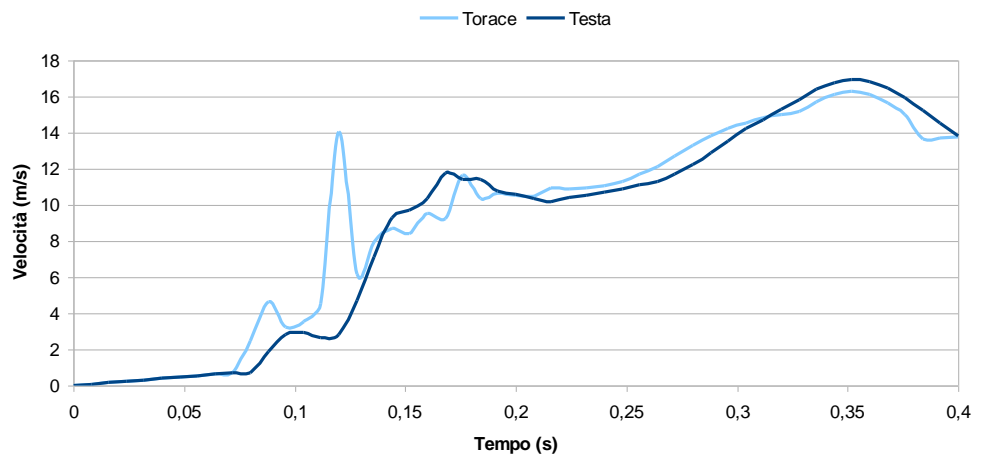


Grafico 22: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale SUV a 40km/h.

### Velocità testa e torace impatto frontale a 50 Km/h SUV

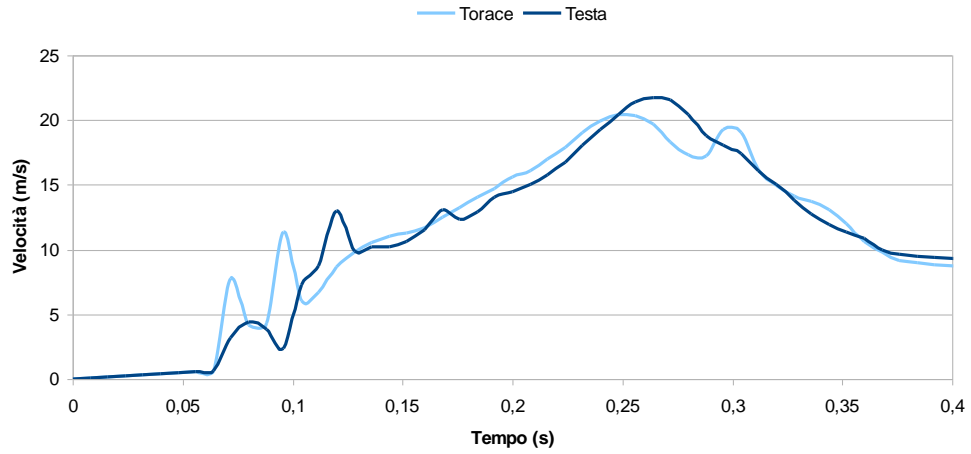


Grafico 23:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale SUV a 50km/h.

### Velocità testa e torace impatto frontale a 20 Km/h PICK UP

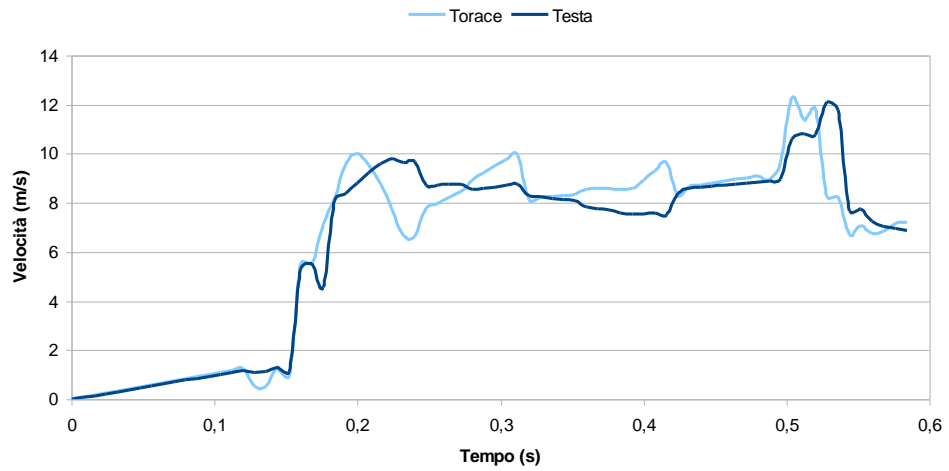


Grafico 24:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale PICK UP a 20km/h.

**Velocità testa e torace impatto frontale a 30 Km/h PICK UP**

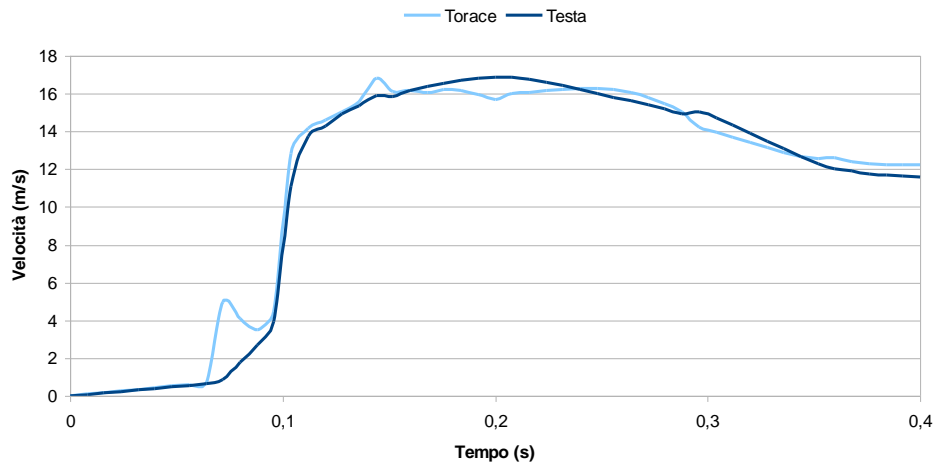


Grafico 25: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale PICK UP a 30km/h.

**Velocità testa e torace impatto frontale a 40 Km/h PICK UP**

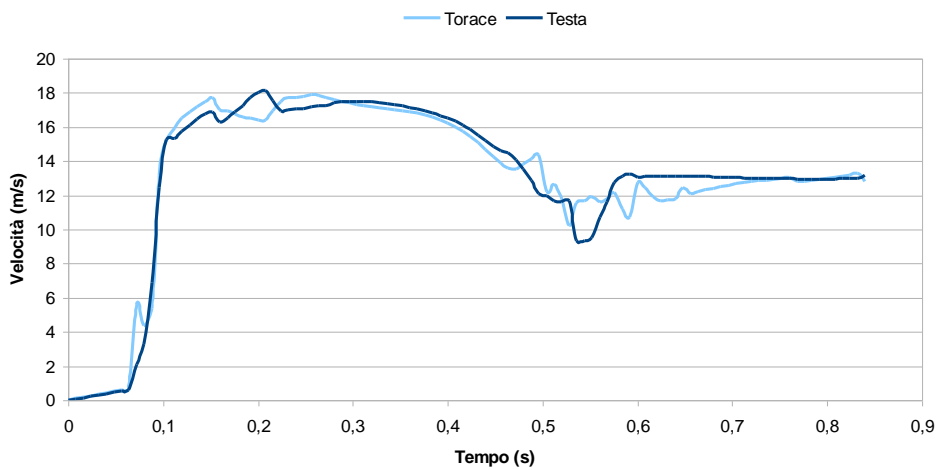


Grafico 26: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale PICK UP a 40km/h.



**Velocità testa e torace impatto frontale a 50 Km/h PICK UP**

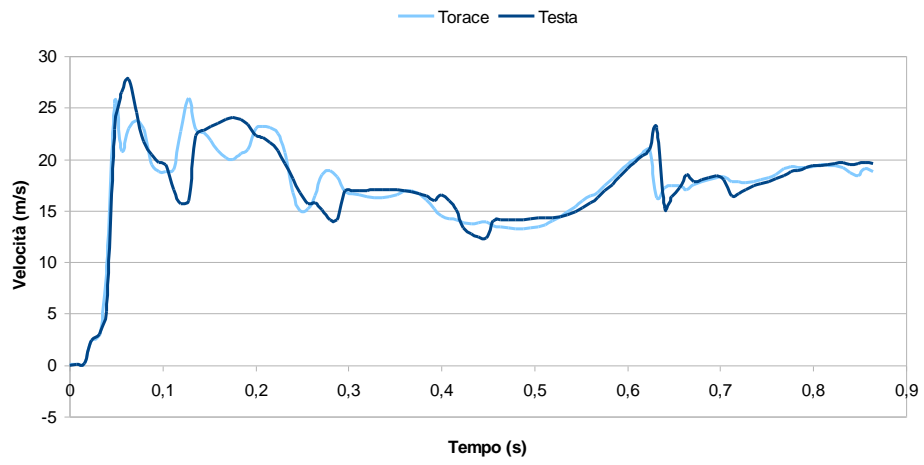


Grafico 27: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto frontale PICK UP a 50km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 20 Km/h**

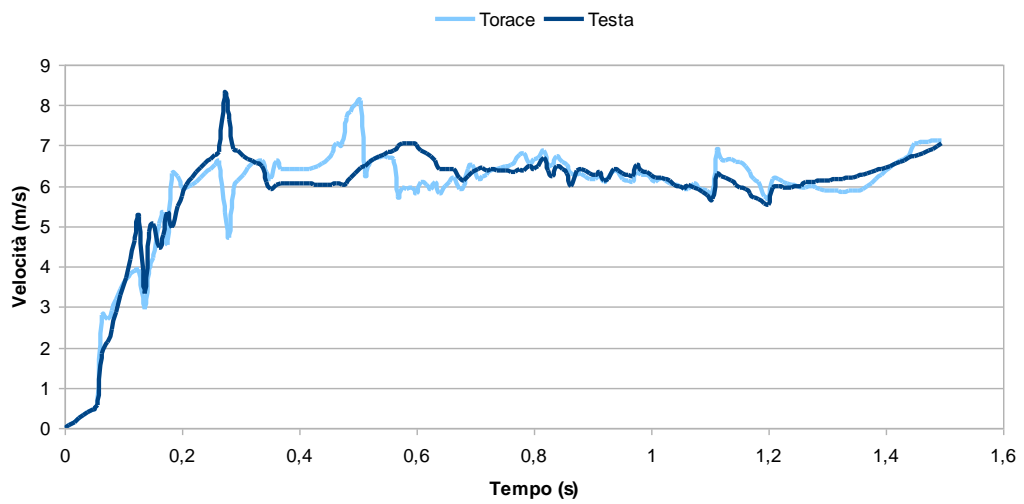


Grafico 28: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale BERLINA a 20km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 30 Km/h**

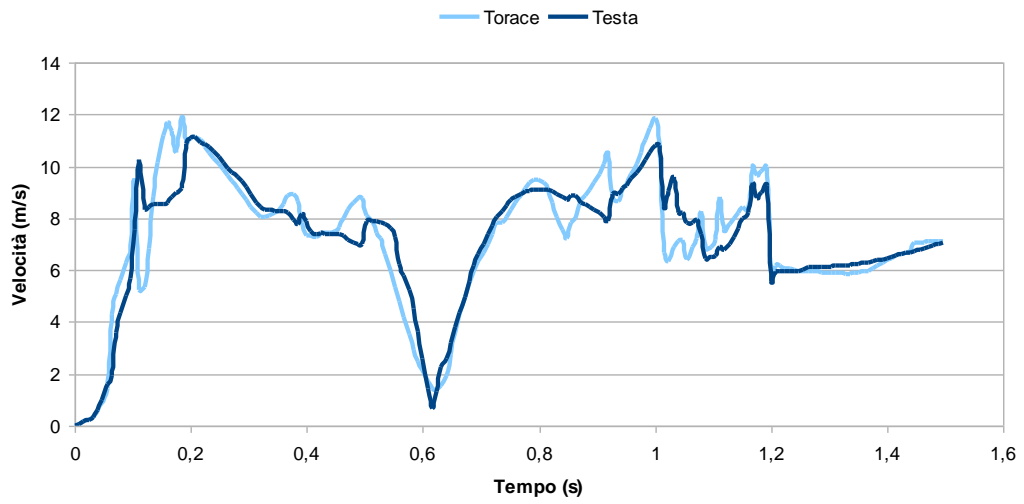


Grafico 29: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale BERLINA a 30km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 40 Km/h**

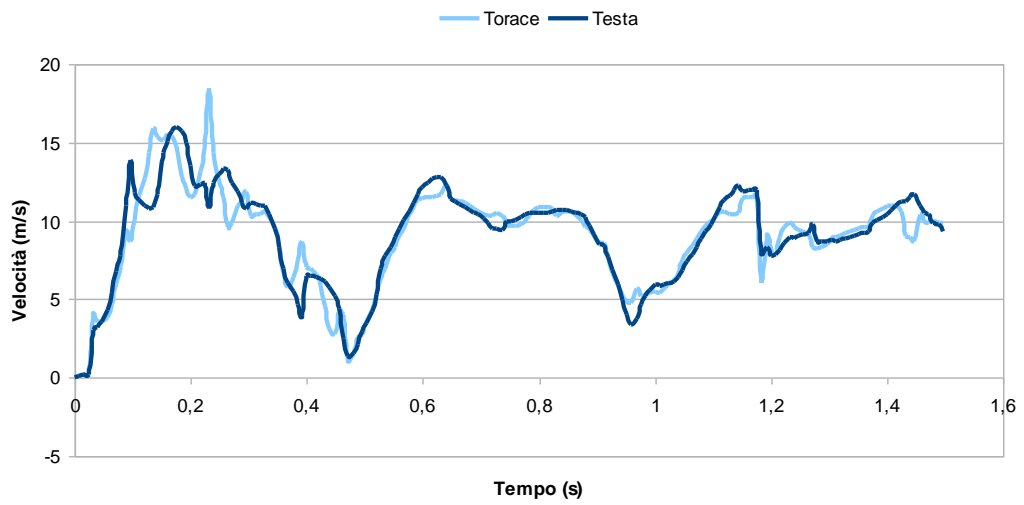


Grafico 30: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale BERLINA a 40km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 50 Km/h**

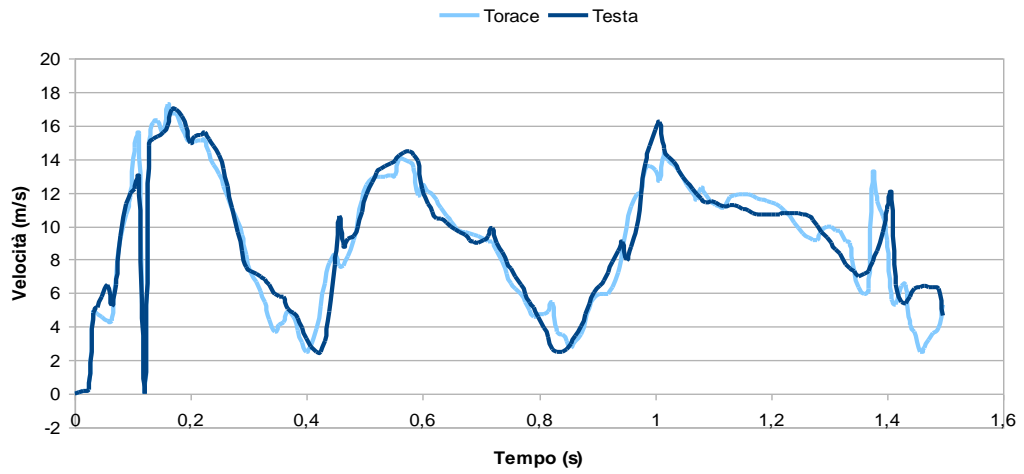


Grafico 31: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale BERLINA a 50km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 20 Km/h SUV**

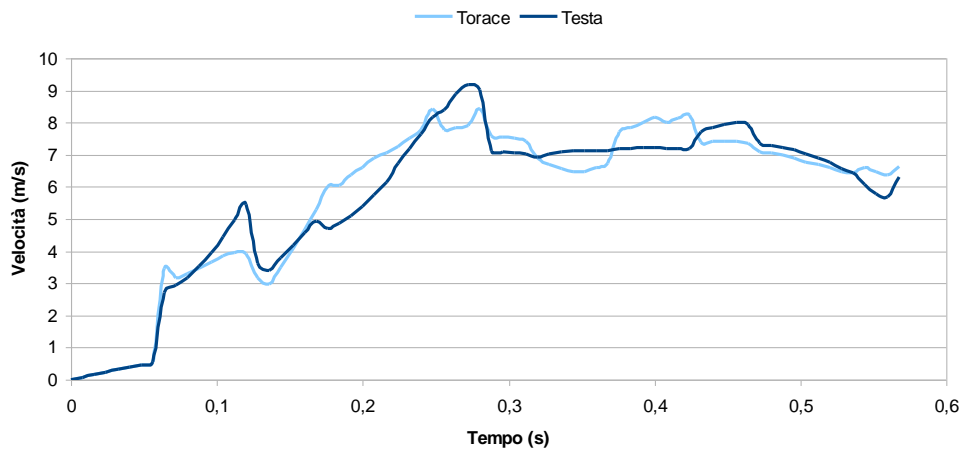


Grafico 32:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale SUV a 20km/h.

### Velocità testa e torace impatto laterale a 30 Km/h SUV

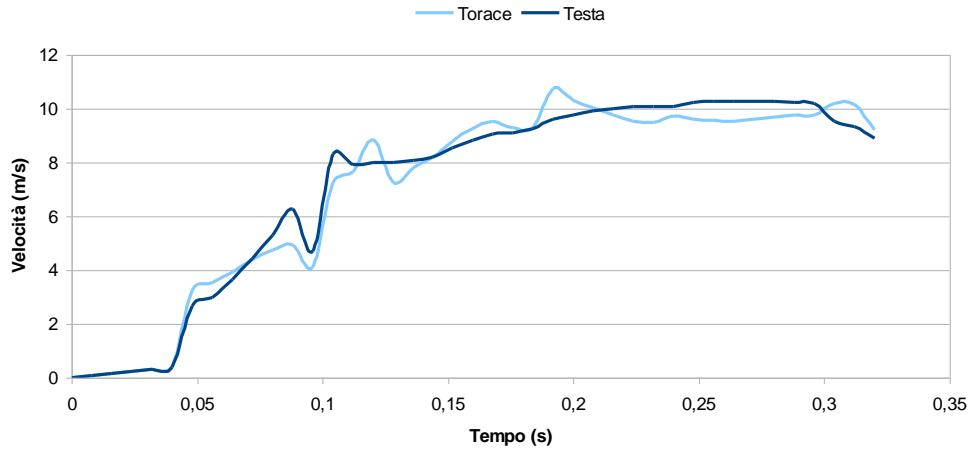


Grafico 33:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale SUV a 30km/h.

### Velocità testa e torace impatto laterale a 40 Km/h SUV

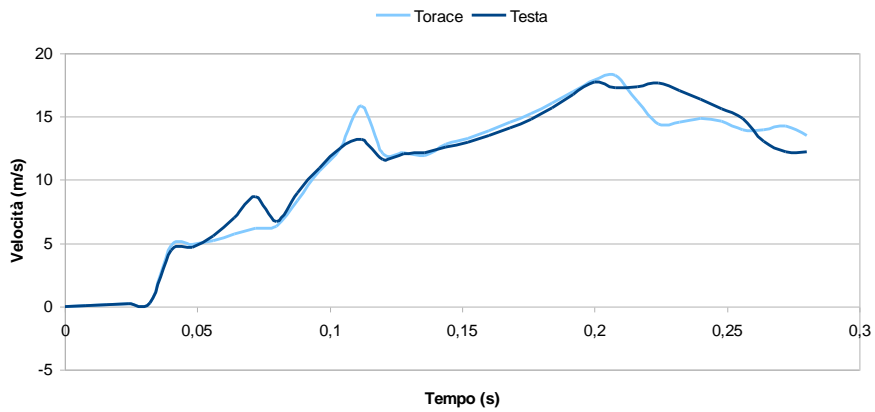


Grafico 34:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale SUV a 40km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 50 Km/h SUV**

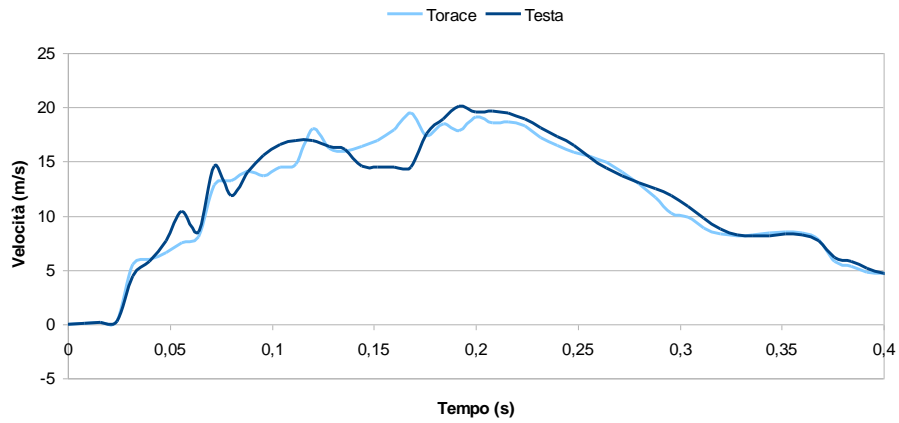


Grafico 35:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale SUV a 50km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 20 Km/h PICK UP**

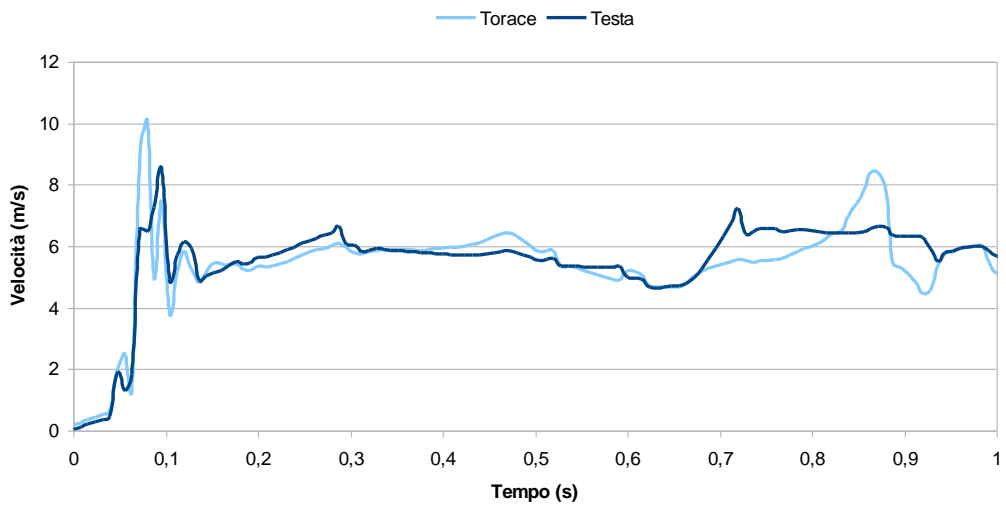


Grafico 36:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale PICK UP a 20km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 30 Km/h PICK UP**

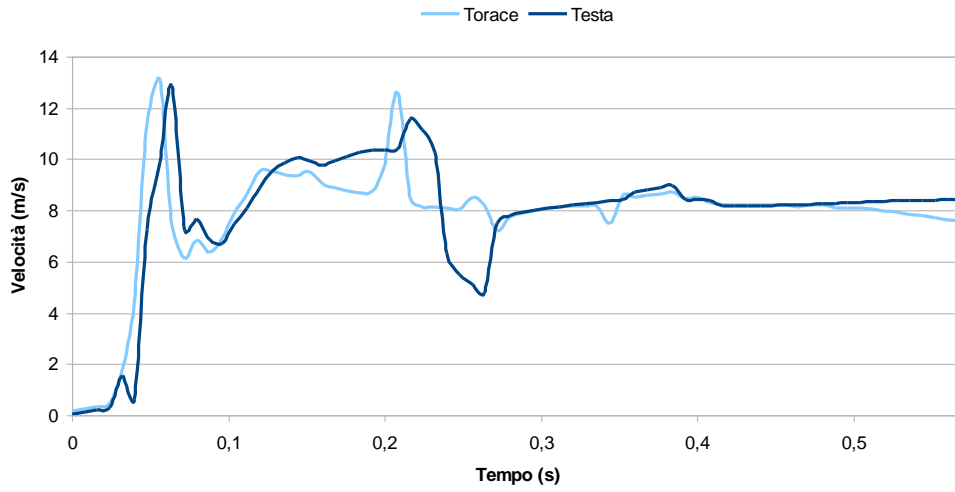


Grafico 37: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale PICK UP a 30km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 40 Km/h PICK UP**

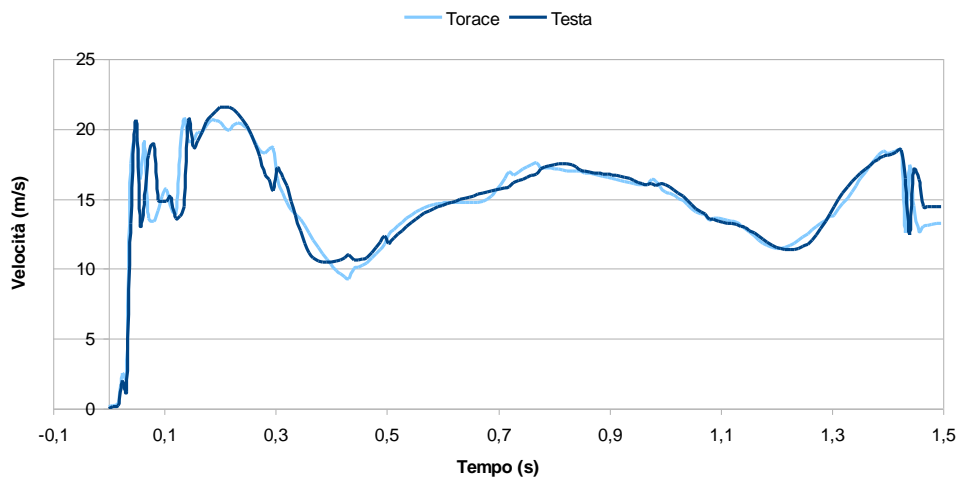


Grafico 38: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale PICK UP a 40km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 50 Km/h PICK UP**

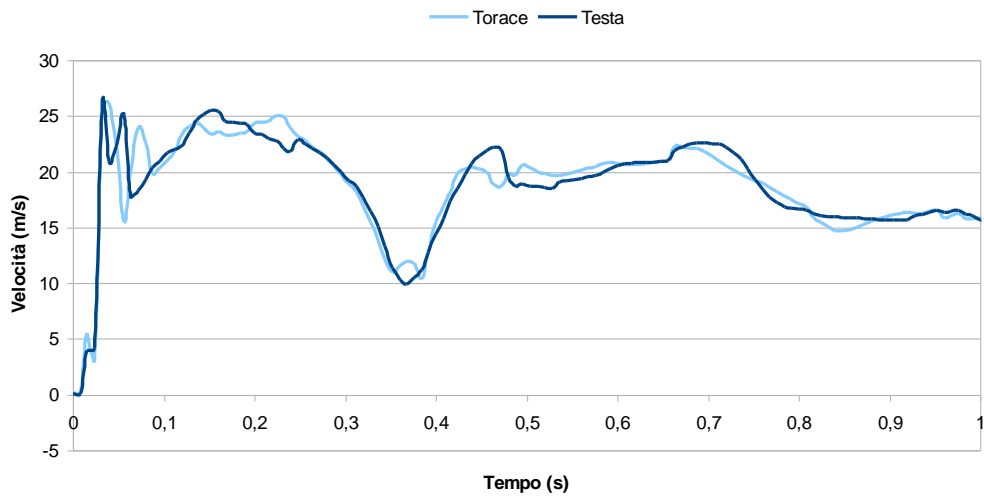


Grafico 39:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto laterale PICK UP a 50km/h.

**Velocità testa e torace impatto posteriore a 20 Km/h**

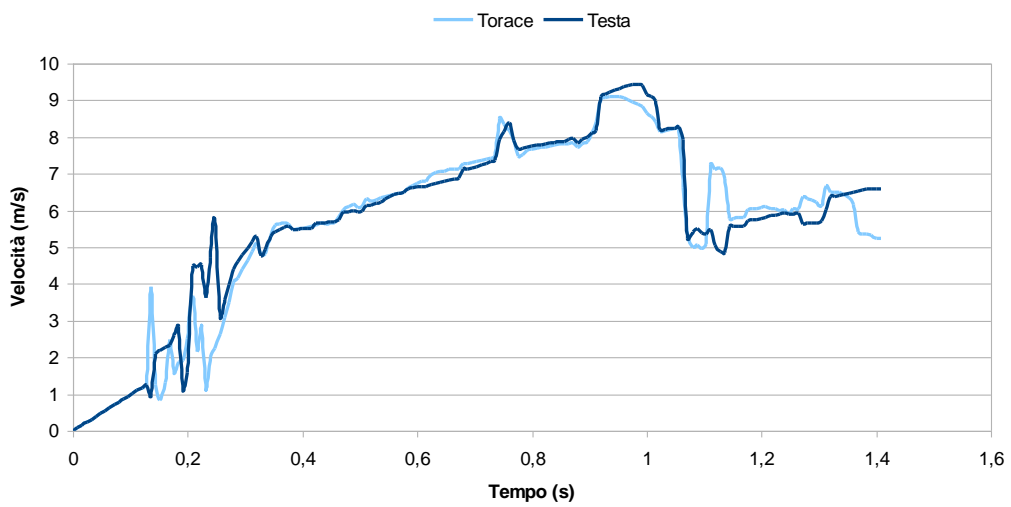


Grafico 40:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore BERLINA a 20km/h.

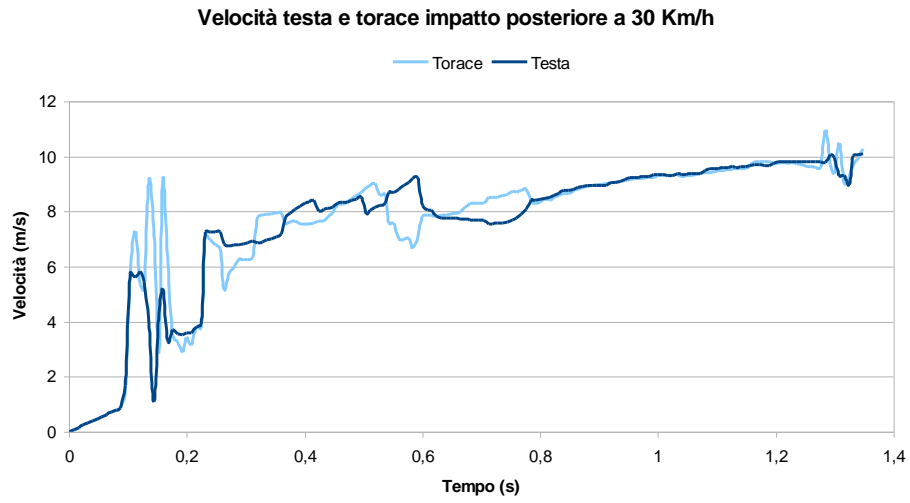


Grafico 41: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore BERLINA a 30km/h.

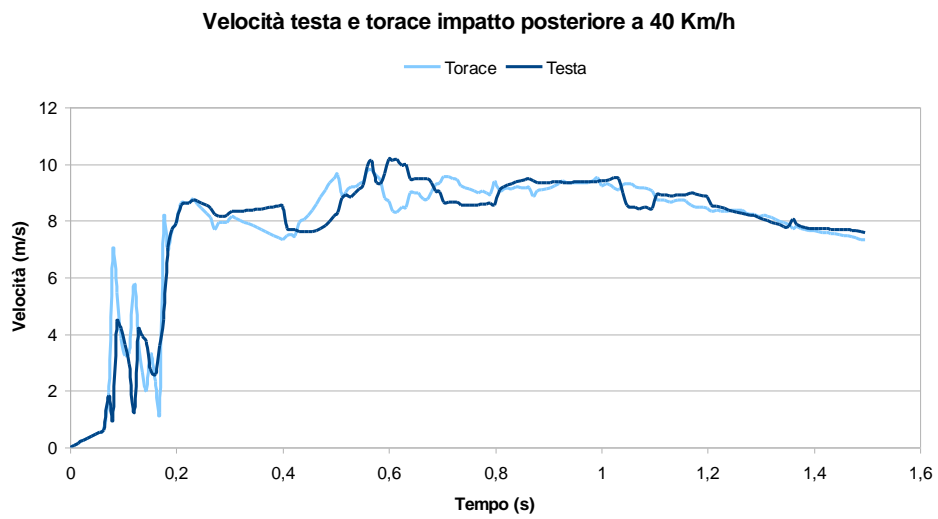


Grafico 42: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore BERLINA a 40km/h.



### Velocità testa e torace impatto posteriore a 50 Km/h

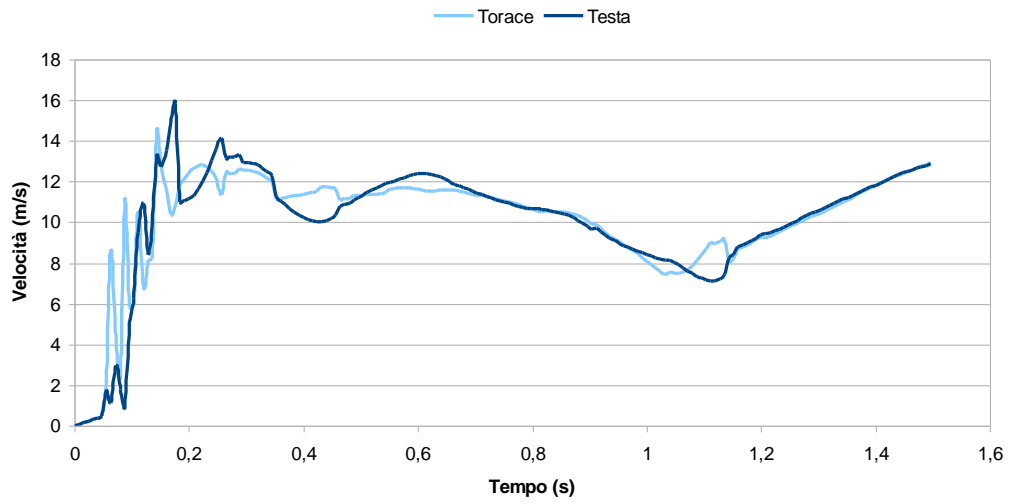


Grafico 43:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore BERLINA a 50km/h.

### Velocità testa e torace impatto posteriore a 20 Km/h SUV

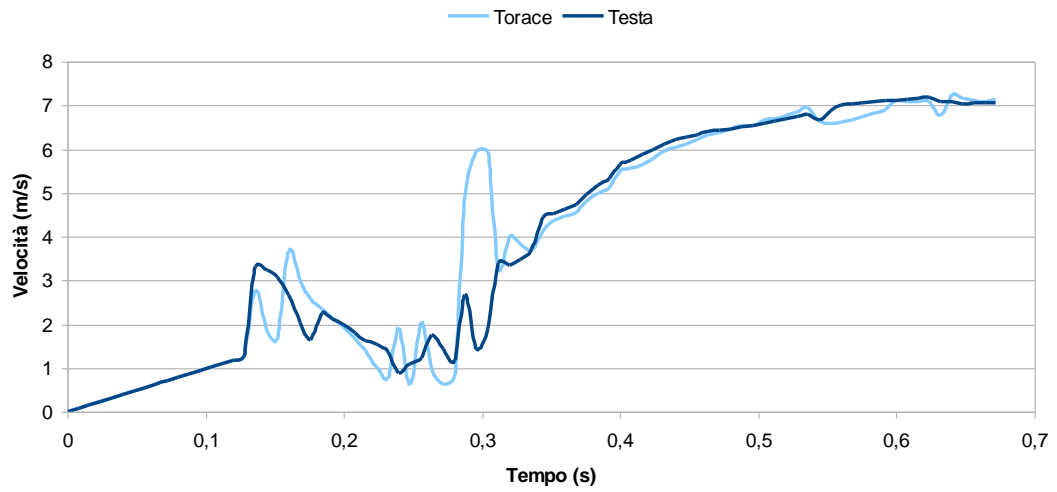


Grafico 44:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore SUV a 20km/h.

### Velocità testa e torace impatto posteriore a 30 Km/h SUV

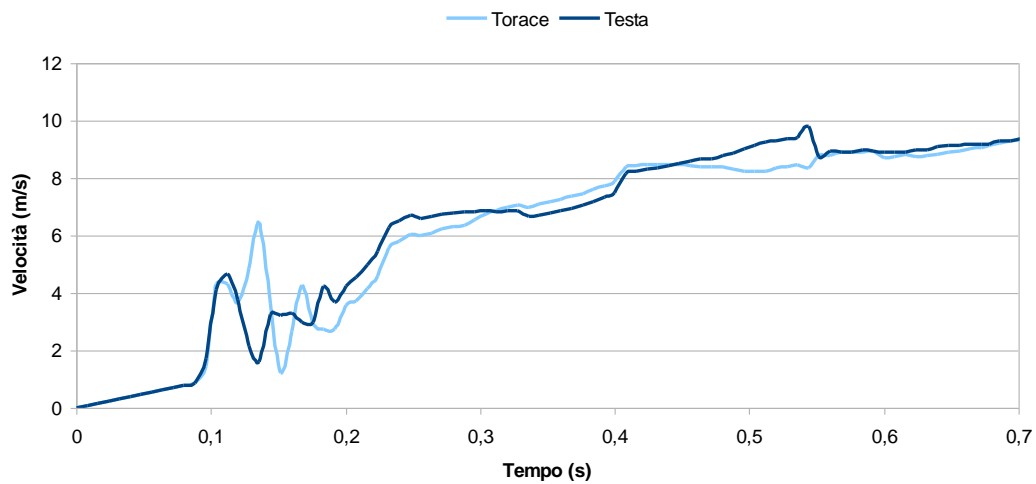


Grafico 45: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore SUV a 30km/h.

### Velocità testa e torace impatto posteriore a 40 Km/h SUV

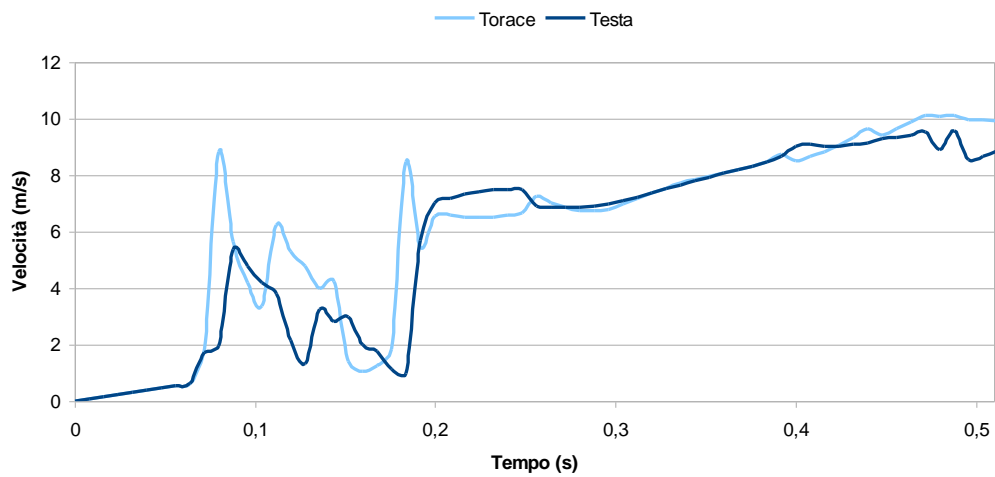


Grafico 46: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore SUV a 40km/h.

**Velocità testa e torace impatto posteriore a 50 Km/h SUV**

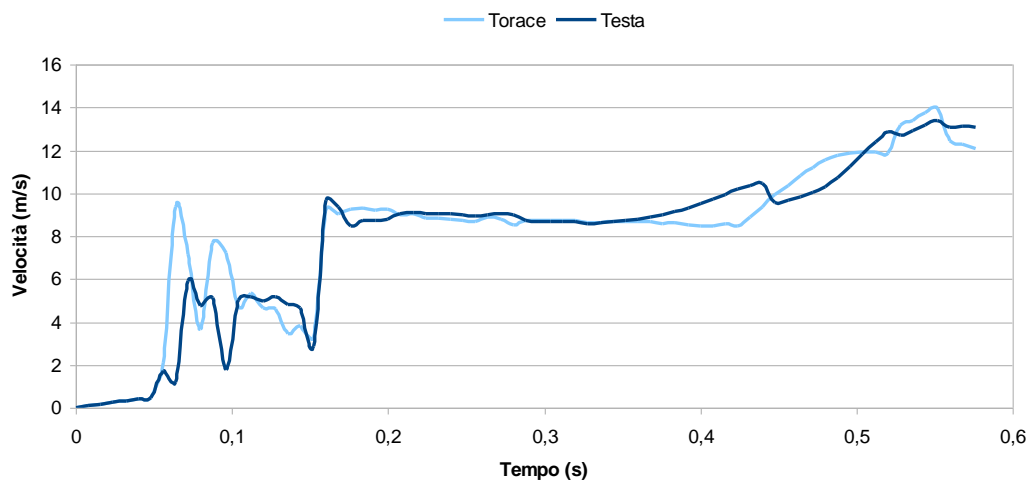


Grafico 47:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore SUV a 50km/h.

**Velocità testa e torace impatto posteriore a 20 Km/h PICK UP**

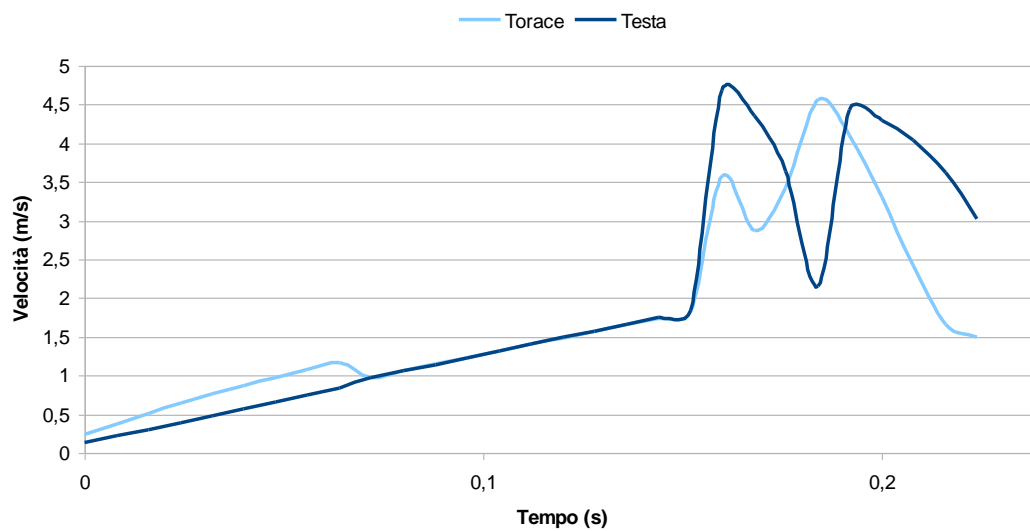


Grafico 48:andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore PICK UP a 20km/h.

**Velocità testa e torace impatto laterale a 50 Km/h PICK UP**

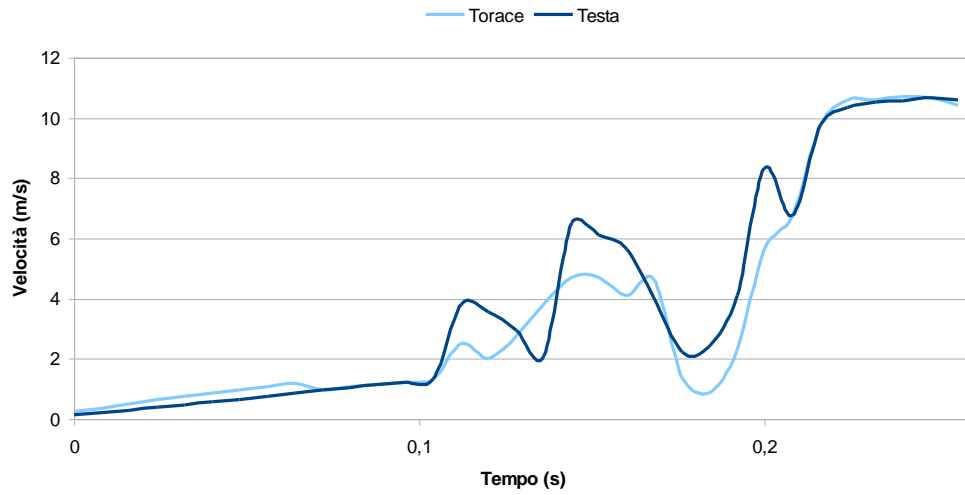


Grafico 49: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore PICK UP a 30km/h.

**Velocità testa e torace impatto posteriore a 40 Km/h PICK UP**

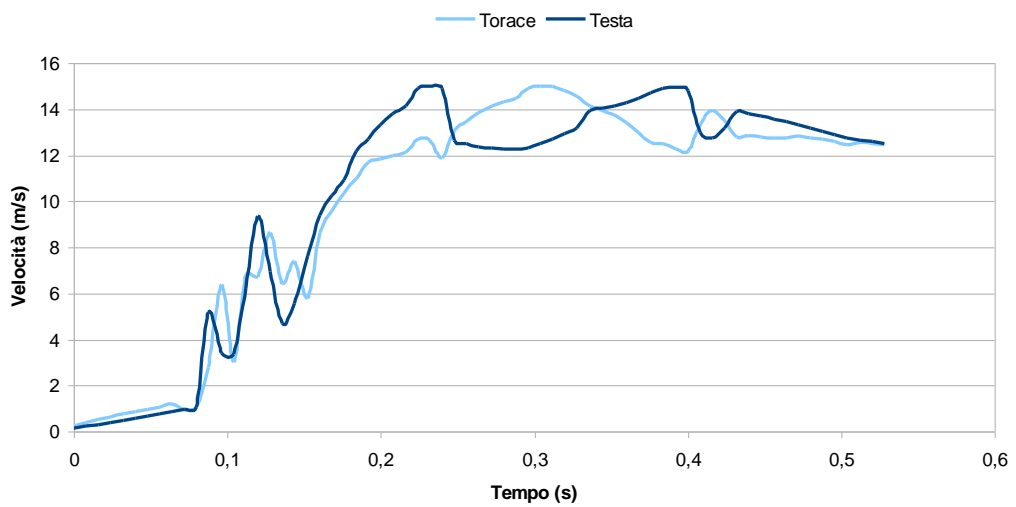


Grafico 50: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore PICK UP a 40km/h.

### Velocità testa e torace impatto posteriore a 50 Km/h PICK UP

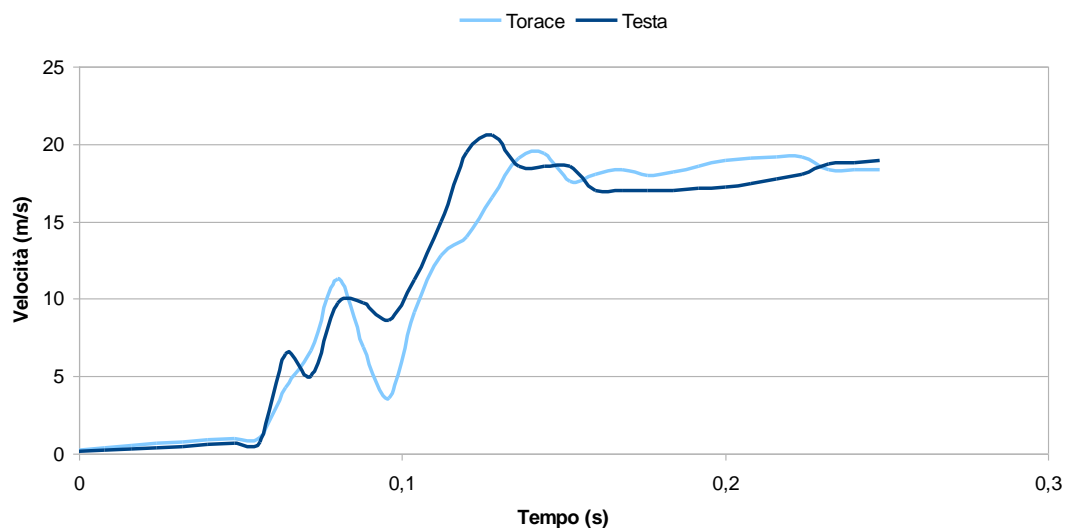


Grafico 51: andamento della velocità della testa e del torace nell'impatto posteriore PICK UP a 50km/h.

La tabella 12 presenta una sintesi dei risultati ottenuti e dei relativi valori di velocità massima d'impatto della testa, del torace e il conseguente tempo di contatto:

Prova	Veicolo	Posiz.	Vel.impatto [km/h]	V <sub>max</sub> testa [m/s]	V <sub>max</sub> torace [m/s]	T <sub>contatto</sub> [ms]
1	Berlina	Frontale	20	10,10	11,44	1408
2	Berlina	Frontale	30	12,35	12,20	544
3	Berlina	Frontale	40	16,18	16,05	360
4	Berlina	Frontale	50	19,13	19,25	240
5	SUV	Frontale	20	7,67	10,20	352
6	SUV	Frontale	30	10,04	9,96	168
7	SUV	Frontale	40	16,93	16,32	352
8	SUV	Frontale	50	21,73	20,40	264
9	Pick UP	Frontale	20	12,10	12,30	528
10	Pick UP	Frontale	30	16,88	16,80	200
11	Pick UP	Frontale	40	18,12	17,92	208

12	Pick UP	Frontale	50	27,74	25,90	64
13	Berlina	Laterale	20	8,29	8,11	272
14	Berlina	Laterale	30	11,13	11,96	208
15	Berlina	Laterale	40	16,03	18,49	176
16	Berlina	Laterale	50	16,98	17,26	176
17	SUV	Laterale	20	9,18	8,43	272
18	SUV	Laterale	30	10,29	10,76	272
19	SUV	Laterale	40	17,77	18,28	200
20	SUV	Laterale	50	20,11	19,50	192
21	Pick UP	Laterale	20	8,51	10,10	96
22	Pick UP	Laterale	30	12,88	13,06	64
23	Pick UP	Laterale	40	21,58	20,78	208
24	Pick UP	Laterale	50	26,13	26,20	32
25	Berlina	Posteriore	20	9,42	9,11	984
26	Berlina	Posteriore	30	10,11	10,98	1348
27	Berlina	Posteriore	40	10,17	9,82	600
28	Berlina	Posteriore	50	15,87	14,45	176
29	SUV	Posteriore	20	7,19	7,25	640
30	SUV	Posteriore	30	9,81	9,33	544
31	SUV	Posteriore	40	9,57	10,13	472
32	SUV	Posteriore	50	13,39	13,96	552
33	Pick UP	Posteriore	20	4,69	4,57	160
34	Pick UP	Posteriore	30	10,67	10,69	248
35	Pick UP	Posteriore	40	14,99	15,01	232
36	Pick UP	Posteriore	50	20,61	19,41	128

Tabella 12: riepilogo velocità max d'impatto della testa, del torace e il tempo di contatto.

Nelle figure seguenti si mostrano l'andamento e il confronto.

### Confronto Vmax testa impatto frontale ciclista

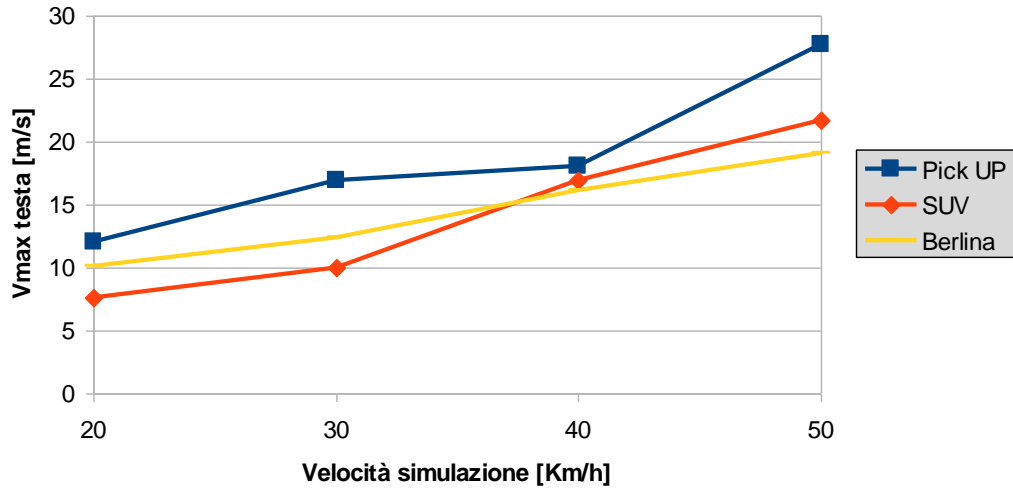


Figura 111: confronto Vmax impatto frontale.

### Confronto Vmax testa impatto laterale ciclista

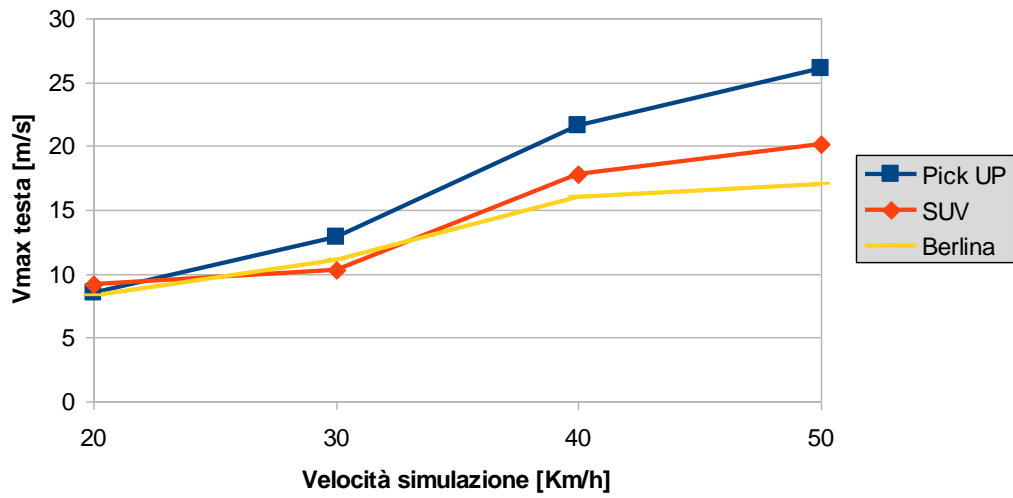


Figura 112: confronto Vmax impatto laterale.

### Confronto Vmax testa impatto posteriore ciclista

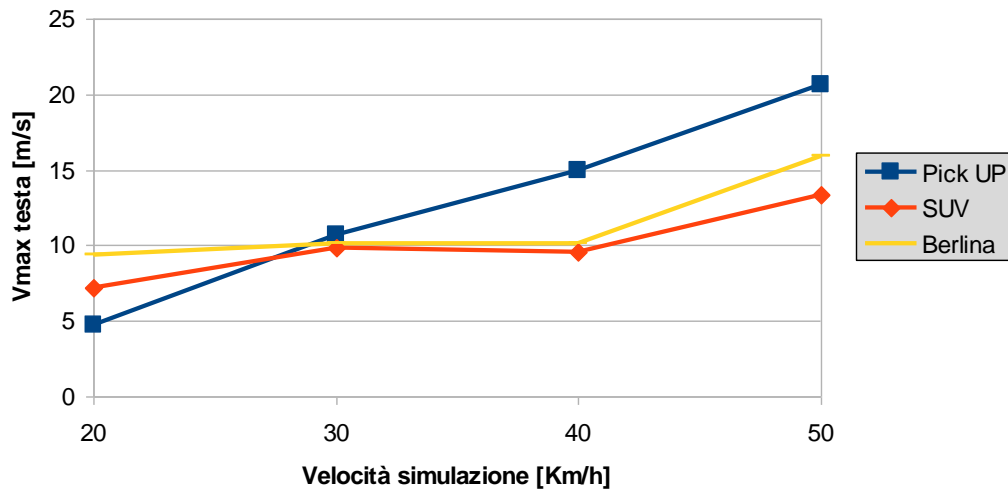


Figura 113: confronto Vmax impatto posteriore

Da tale confronto è possibile dire che la velocità della testa del ciclista è fortemente dipendente dalla forma del frontale del veicolo, oltre che dalla velocità.

È possibile un confronto con alcuni dati reperibili dal X.J. LIU, J.K. YANG & P. LÖVSUND, *A Study of Influences of Vehicle Speed and Front Structure on Pedestrian Impact Responses Using Mathematical Models* – Traffic Injury Prevention, 3:1, 31-42, 2010 ISSN:1538-9588 dove sono state eseguite delle prove di impatto veicolo – pedone adulto, realizzate mediante l'utilizzo di un programma multibody MAYDMO.

La figura 114 mostra l'andamento e il confronto.



### Confronto Vmax testa impatto laterale ciclista

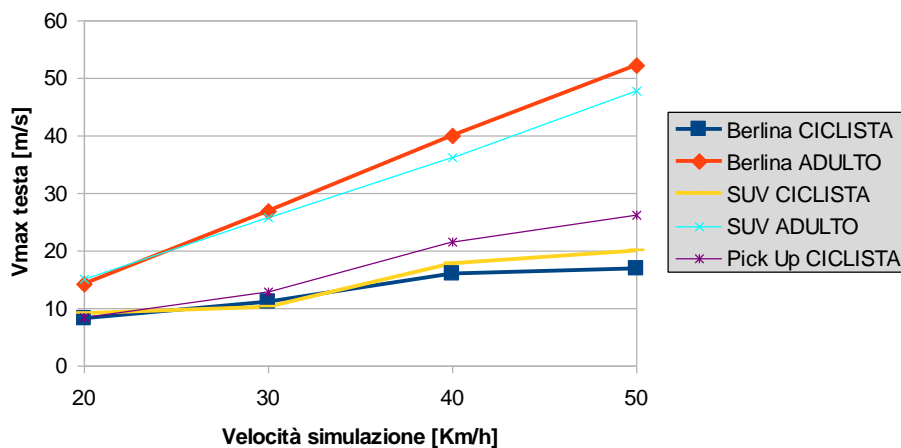


Figura 114: confronto Vmax simulazioni in ambienti Sim Wise e MAYMO.

Da tale confronto si possono fare una serie di considerazioni:

- La velocità di impatto del ciclista adolescente è crescente al variare della tipologia del veicolo esaminato
- la massa del veicolo investitore ha un'influenza sicuramente determinante nella gravità delle lesioni.
- il pedone adulto ha una velocità di impatto maggiore rispetto al ciclista adolescente, probabilmente poiché parte dell'energia dell'urto è dissipata dal telaio della bici.

La figura 115 mostra l'andamento ed il confronto delle velocità della testa nelle condizioni di un impatto laterale alla velocità di 40 km/h.

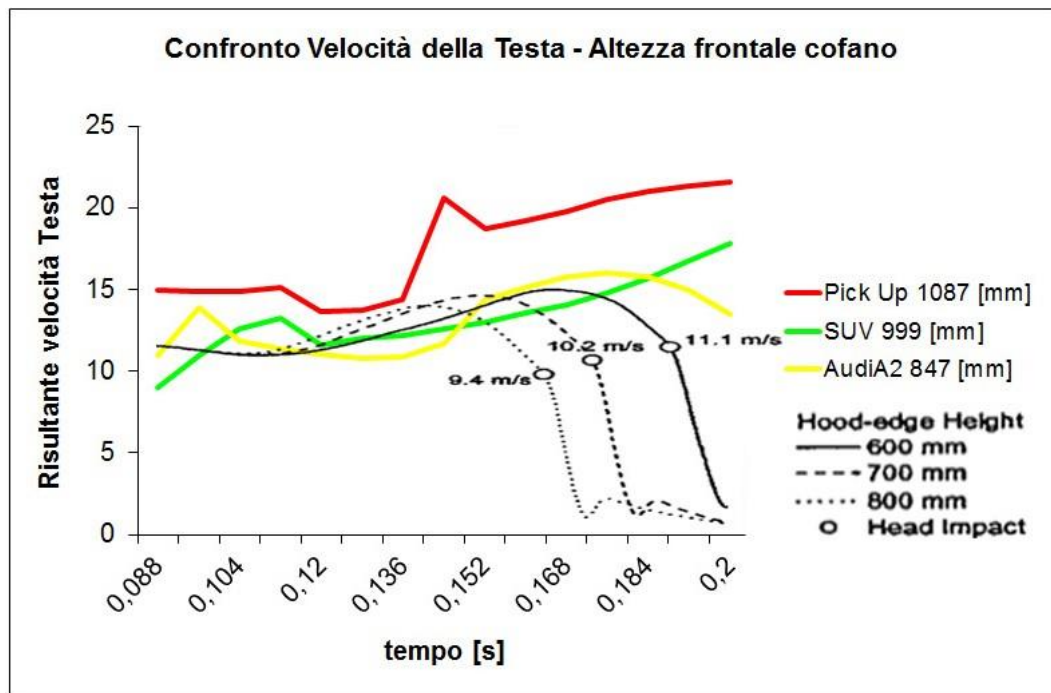


Figura 115: confronto impatto laterale a 40km/h in funzione di una crescente graduazione dell'angolo superiore del cofano.

Confrontando gli impatti con i vari veicoli in funzione dell'angolo superiore del cofano per l'altezza crescente dell'angolo del cofano abbiamo una velocità maggiore della testa

### 8.3.5 VALUTAZIONE DELLE LESIONI AL TORACE MEDIANTE IL CRITERIO DEI 3MS

Le valutazioni sulle lesioni al torace provocate da urti frontali vengono eseguite per mezzo del criterio dei 3 ms.

Il criterio 3ms prevede che il baricentro del torace e il baricentro della testa non subiscano accelerazioni superiori a 60g e 80g rispettivamente, per un tempo maggiore di 3ms.

Per ricavare i risultati d'interesse, è stato inserito un accelerometro virtuale sul centro di massa del torace solo per le simulazioni frontali. La tabella 13 illustra i valori trovati:

Tabella 13: valori trovati applicando il criterio dei 3ms

Prova	Posizione	Velocità [km/h]	3ms [g]
1	frontale	20	63
2	frontale	30	68
3	frontale	40	180
4	frontale	50	260
5	laterale	20	142
6	laterale	30	230
7	laterale	40	470
8	laterale	50	900
9	posteriore	20	27
10	posteriore	30	32
11	posteriore	40	170
12	posteriore	50	260

I grafici 52, 53 e 54 mostrano l'andamento dei valori trovati applicando il criterio dei 3ms in funzione della velocità di impatto per le prove eseguite:

**Grafico 3ms impatto frontale**

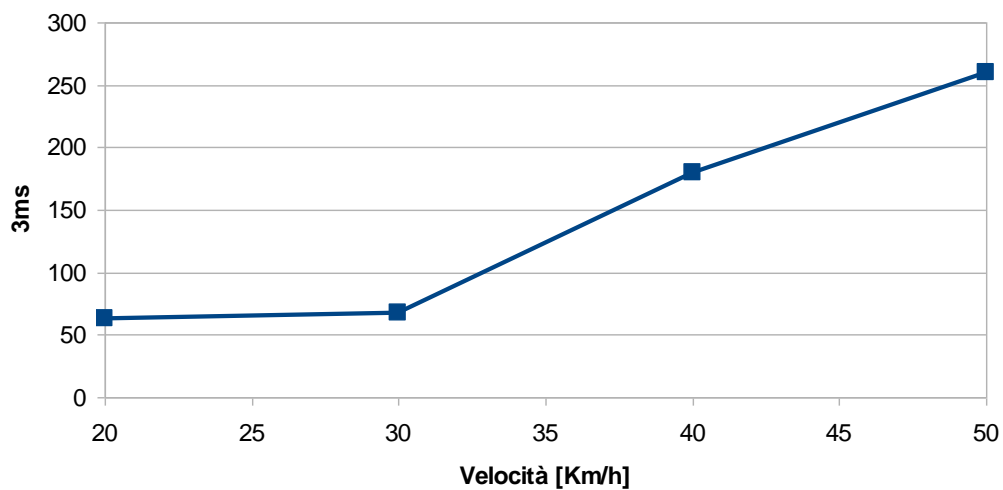


Grafico 52: andamento dei valori trovati applicando il criterio dei 3ms nell'impatto frontale

**Grafico 3ms impatto laterale**

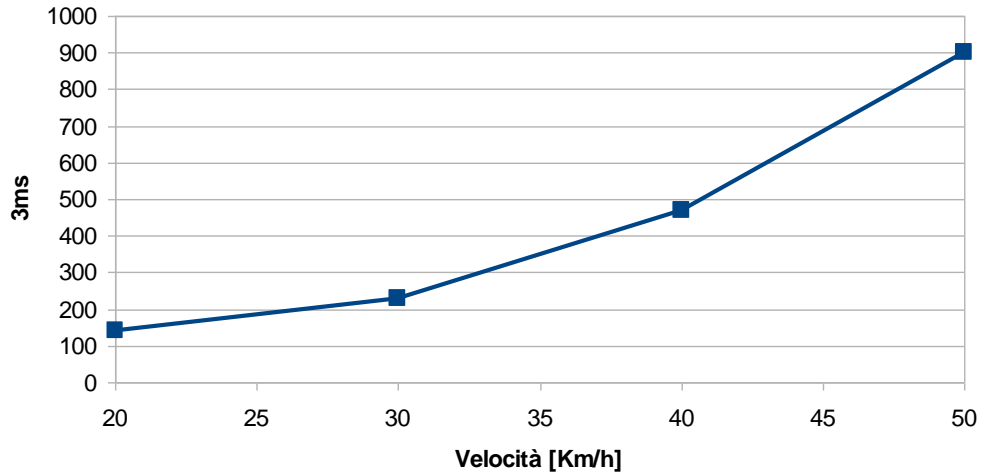


Grafico 53: andamento dei valori trovati applicando il criterio dei 3ms nell'impatto laterale

**Grafico 3ms impatto posteriore**

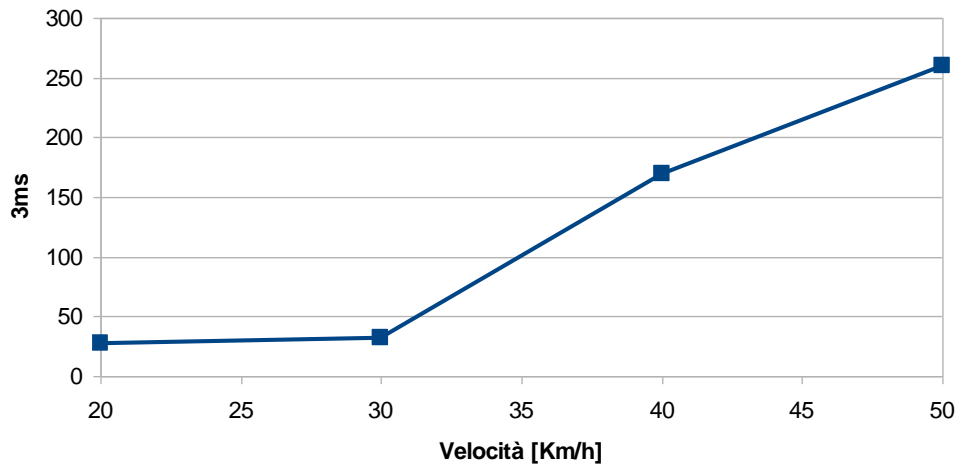


Grafico 54: andamento dei valori trovati applicando il criterio dei 3ms nell'impatto posteriore

Grazie all'espressione:

$$Prob (AIS4+) = 1 / (1 + \exp (4,3425 - 0,0630 * g_t))$$

la probabilità di lesione AIS4+ (la frattura del torace e la lacerazione dell'aorta).

La tabella 14 mette in evidenza le probabilità di AIS4+ per i casi esaminati.

Tabella 14: probabilità di lesione AIS 4+ nei casi esaminati.

Prova	Posiz.	Velocità [km/h]	Prob (AIS 4+)
1	frontale	20	40,77%
2	frontale	30	48,54%
3	frontale	40	99,91%
4	frontale	50	100,00%
5	laterale	20	99,01%
6	laterale	30	100,00%
7	laterale	40	100,00%
8	laterale	50	100,00%
9	posteriore	20	6,65%
10	posteriore	30	8,90%
11	posteriore	40	99,83%
12	posteriore	50	100,00%

Dalla tabella è possibile constatare come negli urti frontali e posteriori alle velocità di 40-50km/h i valori di accelerazione subiti dal torace sono molto elevati. Ciò è dovuto alla capacità del tronco di flettersi al contatto diretto del torace con il PICKUP. Nel caso degli urti laterali i valori di accelerazione subiti dal torace sono sempre elevati a causa del frontale del veicolo.

### 8.3.5.1 CONFRONTO TRA I RISULTATI NEL CRITERIO DEI 3MS

La tabella 15 illustra la differenza in percentuale tra l'analisi d'impatto PICKUP-ciclista e SUV-ciclista, in termini dei valori ottenuti mediante il criterio dei 3ms, posto il confronto dei dati ottenuti:

Tabella 15: confronto dei valori ottenuti mediante il criterio dei 3ms PICKUP - SUV.

Prova	Posiz.	Vel.impatto [km/h]	Differenze con SUV
			3ms
1	Frontale	20	-16,00%
2	Frontale	30	-41,88%

3	Frontale	40	+12,50%
4	Frontale	50	+44,44%
5	laterale	20	+735,29%
6	laterale	30	+259,38%
7	laterale	40	+710,34%
8	laterale	50	+500,00%
9	posteriore	20	+12,50%
10	posteriore	30	-61,45%
11	posteriore	40	-49,10%
12	posteriore	50	-29,73%

Le figure 116, 117 e 118 mostrano l'andamento e il confronto.

#### Confronto 3ms impatto frontale Pick Up - SUV - Berlina

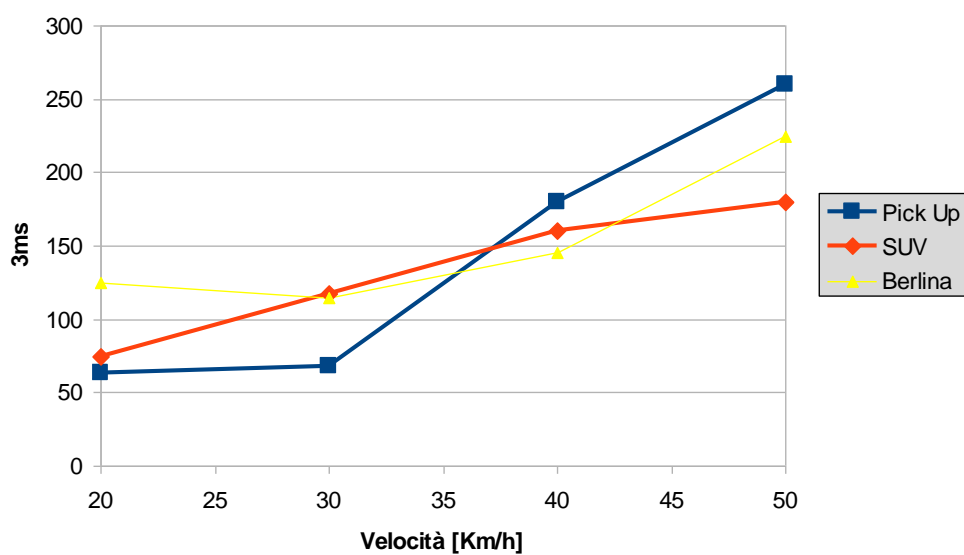


Figura 116: confronto 3ms impatto frontale – SUV – Berlina

### Confronto 3ms impatto laterale Pick Up - SUV - Berlina

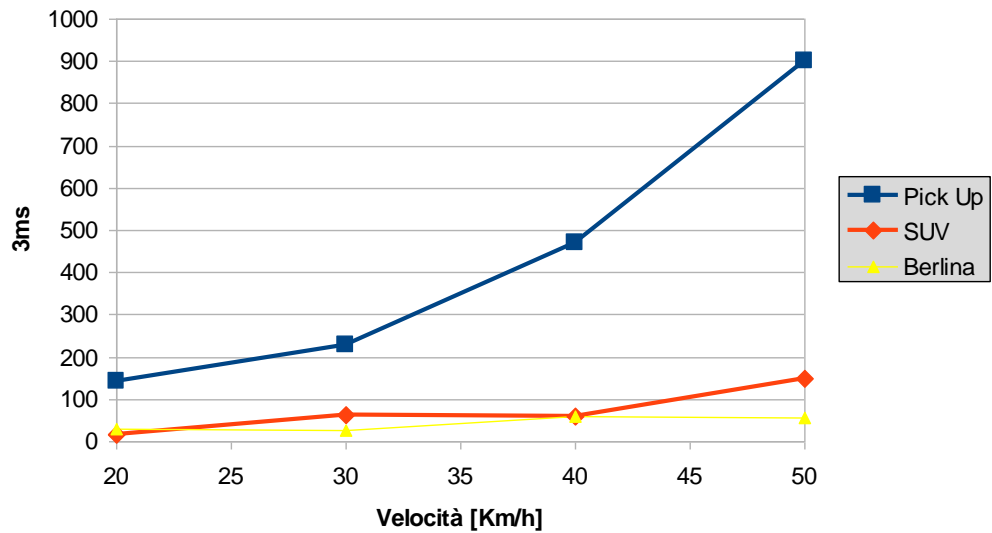


Figura 117: confronto 3ms impatto laterale – SUV – Berlina

### Confronto 3ms impatto posteriore Pick Up - SUV - Berlina

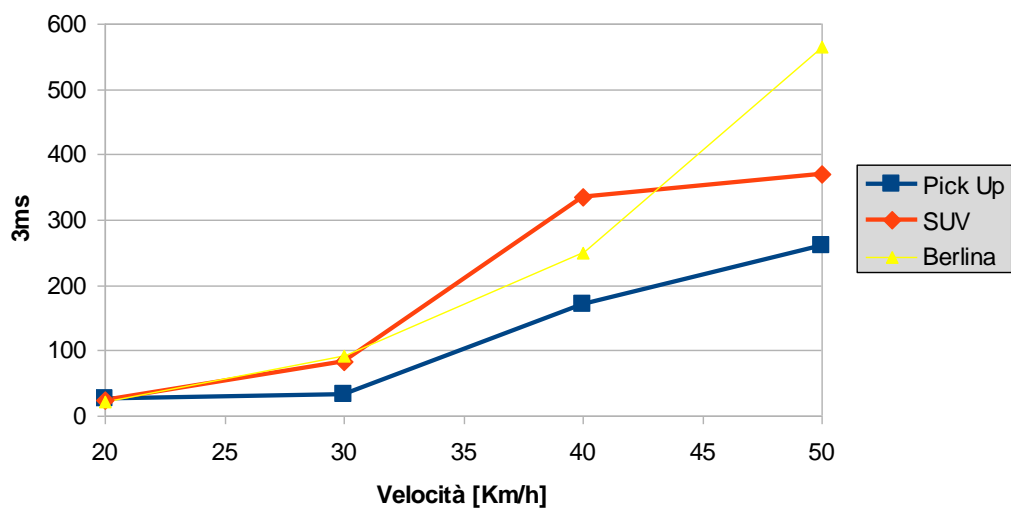


Figura 118: confronto 3ms impatto posteriore PICKUP – SUV – Berlina

Da tale confronto è possibile dire che l'adolescente ciclista ha maggiori probabilità di subire una lesività al torace negli impatti posteriori con la Berlina poiché i

valori ottenuti applicando il criterio dei 3ms si mantengono al di sopra dei valori riscontrati con il SUV e il PICKUP. Questo perché il torace del ciclista si proietta sul parabrezza della Berlina, la parte più rigida del veicolo. Diversamente nell'impatto laterale e frontale il PICKUP, per via delle dimensioni maggiori e dell'altezza dal suolo, genera maggiori lesività al torace del malcapitato.

### 8.3.5.2 CONFRONTO RAPPORTO 3ms/MASSA CON ALTRI VEICOLI

È possibile eseguire un confronto dal rapporto 3ms/MASSA con i veicoli esaminati durante il percorso accademico, cercando di comprenderne l'andamento tra Berlina (968kg), SUV (2900kg) e Pick-up (3084kg).

Nelle prove analizzate il ciclista adolescente si trova in posizione frontale, laterale e posteriore rispetto ai veicoli esaminati.

Le figure 119, 120 e 121 mostrano l'andamento e il confronto.

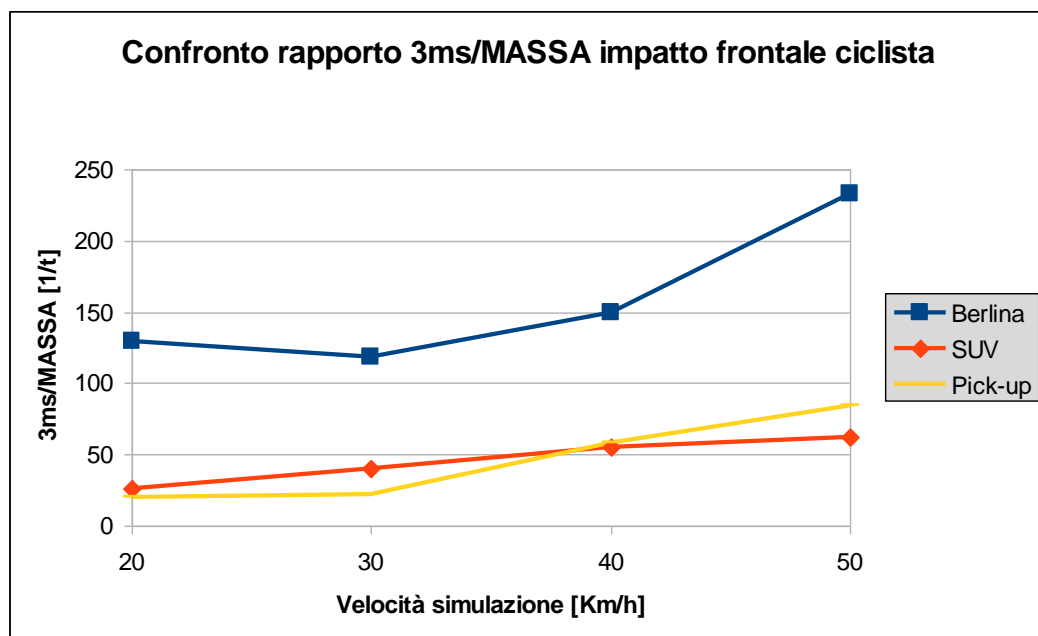


Figura 119: confronto rapporto 3ms/MASSA impatto frontale ciclista.



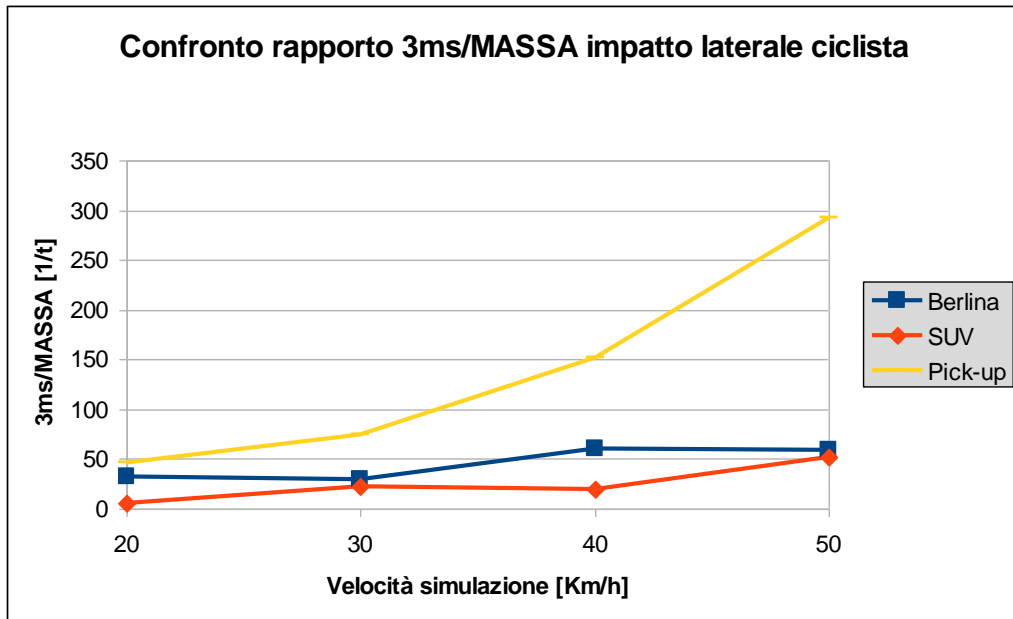


Figura 120: confronto rapporto 3ms/MASSA impatto laterale ciclista.

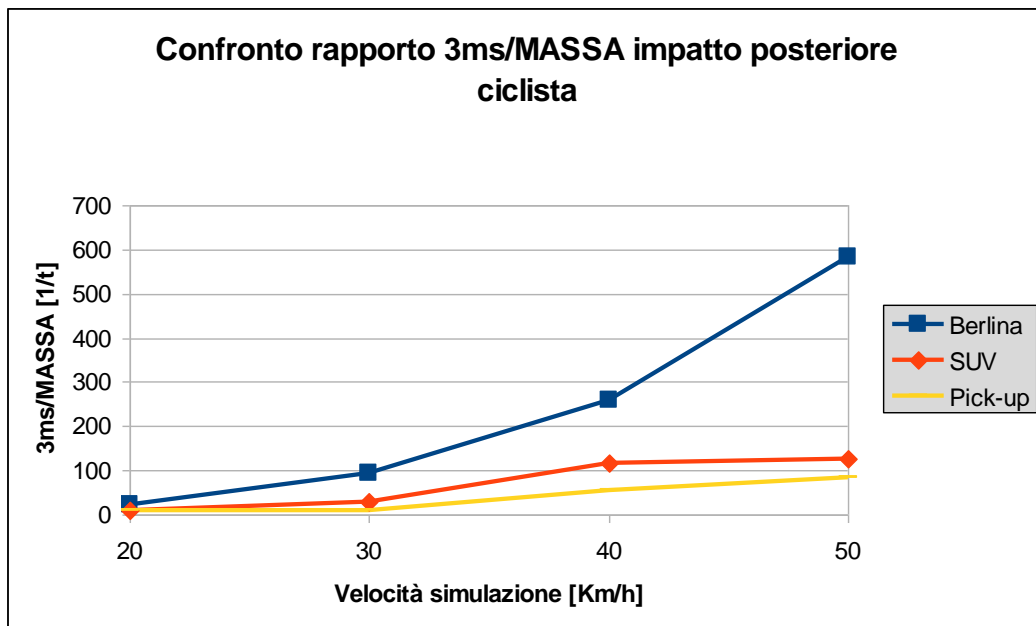


Figura 121: confronto rapporto 3ms/MASSA impatto posteriore ciclista.

Da tale confronto si possono fare una serie di considerazioni:

- esaminando gli impatti frontali e posteriori gli andamenti del rapporto 3ms/[MASSA VEICOLO] del SUV e del Pick-up con l'aumentare della velocità producono un grafico pressoché coincidente o al più parallelo;

- esaminando l'impatto laterale gli andamenti del rapporto  $3ms/[MASSA\ VEICOLO]$  della Berlina e del SUV con l'aumentare della velocità producono un grafico pressoché coincidente o al più parallelo;
- durante l'impatto frontale e posteriore il rapporto  $3ms/[MASSA\ VEICOLO]$  risulta più elevato esaminando una Berlina poiché il ciclista colpisce rovinosamente il parabrezza del veicolo che lo travolge.
- la massa del veicolo investitore ha un'influenza sicuramente determinante negli impatti.

### 8.3.5.3 CONFRONTO 3MS CON UN PEDONE ADULTO

È possibile un confronto con alcuni dati reperibili dai X.J. LIU, J.K. YANG & P. LÖVSUND, *A Study of Influences of Vehicle Speed and Front Structure on Pedestrian Impact Responses Using Mathematical Models* – Traffic Injury Prevention, 3:1, 31-42, 2010 dove sono state eseguite delle prove di impatto veicolo – pedone adulto, realizzate mediante l'utilizzo del programma multibody MAYDMO, nelle prove analizzate il pedone si trova in posizione frontale rispetto al veicolo a 40km/h.

La figura 122 mostra l'andamento e il confronto.

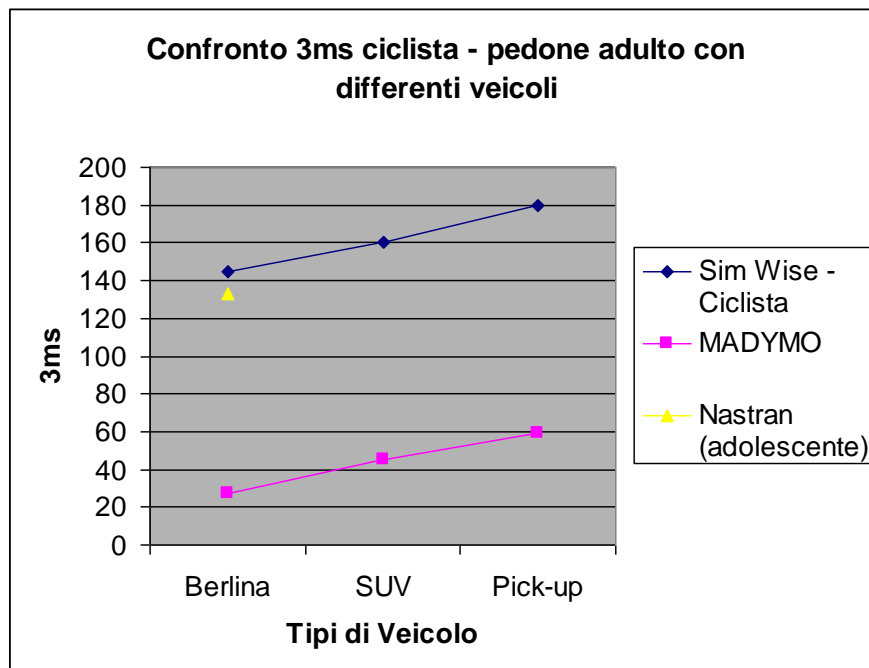


Figura 122: Confronto 3ms(Sim Wise, MAYDMO, Nastran)

Da tale confronto si possono fare una serie di considerazioni:

- L'adolescente ciclista subisce delle lesioni al torace di entità superiore rispetto al pedone adulto poiché i valori si mantengono costantemente al di sopra dei valori riscontrati con il MADYMO. Questo a causa della posizione sopraelevata del ciclista;
- la massa del veicolo investitore ha un'influenza sicuramente determinante nella gravità delle lesioni.

### 8.3.6 LOCALIZZAZIONE DEI PUNTI D'IMPATTO E CONFRONTO

Le figure 123 e 124 mostrano le aree del cofano che maggiormente vengono coinvolte quando la testa del soggetto colpisce la parte frontale del PICKUP durante l'impatto.

La marcatura del veicolo per l'individuazione delle medesime aree (WAD) avviene secondo le direttive EURONCAP.

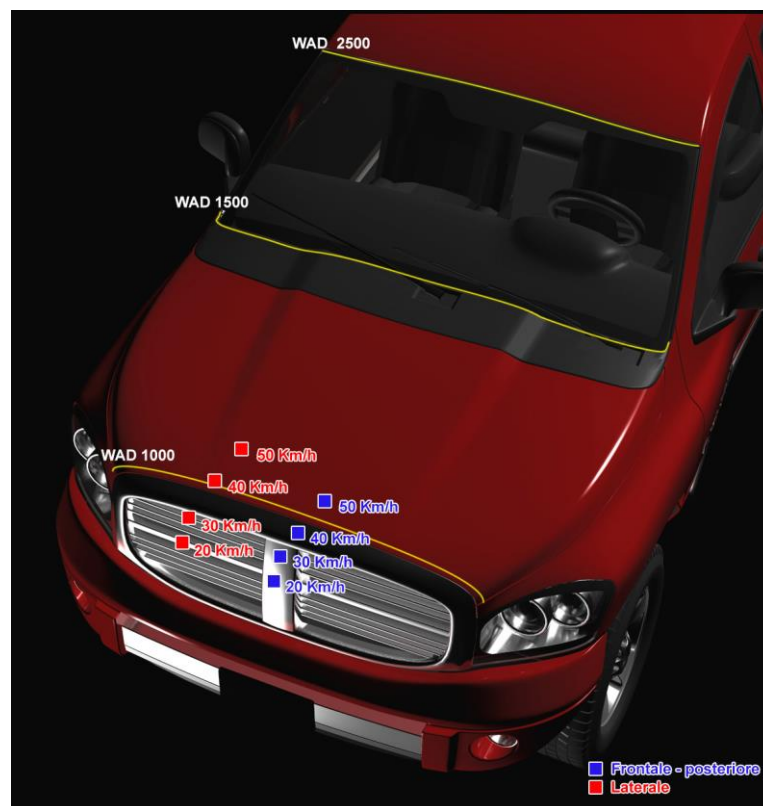


Figura 123: prove crash test frontali, laterali e posteriori punti di contatto testa-PICKUP

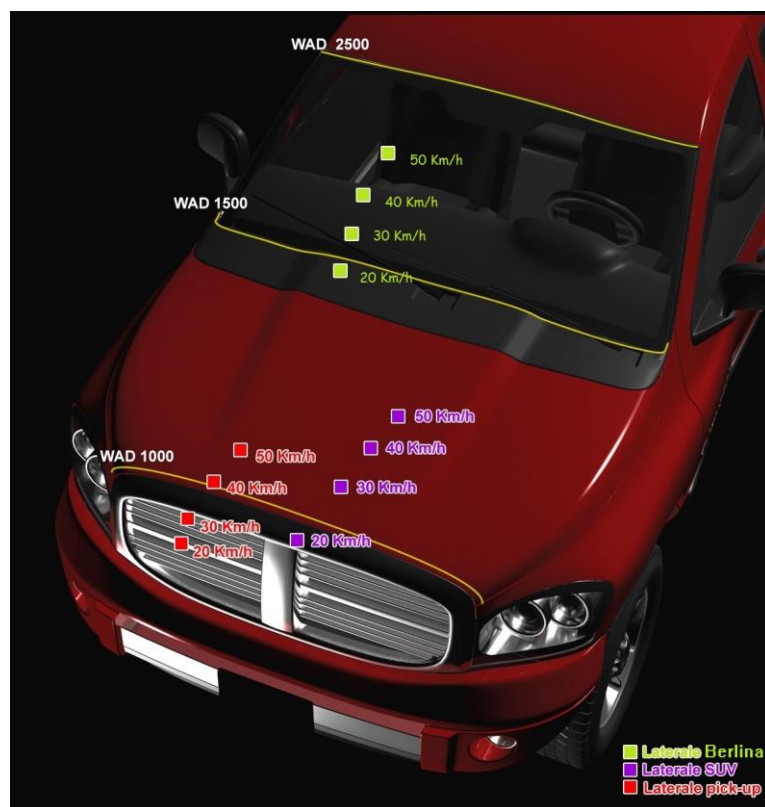


Figura 124: prove crash test laterali, punti di contatto testa- Berlina, testa-SUV e testa-Pickup.

È possibile notare come la dispersione dei punti d’impatto sia localizzata in tutti i casi nella zona della WAD 1000 tranne per gli impatti a 50Km/h (WAD 1000 – WAD 1500).

Per quanto concerne le prove per urto laterale la dispersione dei punti interessa un’area più grande rispetto al caso precedente (quello frontale/posteriore).

Inoltre l’analisi dei punti di contatto di entrambi i casi consente di ottenere una nuova conferma sull’accuratezza dei valori. I picchi di accelerazione, anche molto intensi, corrispondono generalmente ad un urto contro una parete rigida del frontale della vettura.

Nella figura 124 vengono messi in risalto i punti d’impatto nel caso di studio delle simulazioni con la Berlina, il Pickup e il SUV. Con la velocità di 20 km/h le simulazioni di Pick UP e SUV risaltano le stesse zone d’impatto (WAD 1000). Con le velocità di 40 e 50km/h il ciclista colpisce il cofano (zone compresa tra WAD 1000 e WAD 1500). La testa dell’adolescente ciclista con esclusione della

velocità di 20km/h finisce nella zona d’impatto compresa tra WAD 1500 e 2500 nel caso d’urto con una Berlina.

### 8.3.7 CALCOLO DELLE DISTANZE DI PROIEZIONE

Nella tabella viene illustrata una sintesi dei risultati ottenuti e dei relativi valori delle distanze di proiezione del ciclista adolescente in relazione del veicolo oggetto dell’analisi e nelle velocità esaminate:

Tabella 16: riepilogo distanza di proiezione del ciclista in relazione al veicolo e alla velocità d’impatto.

Prova	Tipo Veicolo	Posizione	Vel. impatto [km/h]	Distanza di proiezione [m]
1	Berlina	Frontale	20	7,674
2	Berlina	Frontale	30	12,754
3	Berlina	Frontale	40	17,054
4	Berlina	Frontale	50	20,054
5	Berlina	Laterale	20	0,078
6	Berlina	Laterale	30	0,302
7	Berlina	Laterale	40	1,416
8	Berlina	Laterale	50	2,006
9	Berlina	Posteriore	20	7,036
10	Berlina	Posteriore	30	9,846
11	Berlina	Posteriore	40	12,946
12	Berlina	Posteriore	50	14,846
13	SUV	Frontale	20	6,554
14	SUV	Frontale	30	13,684
15	SUV	Frontale	40	17,374
16	SUV	Frontale	50	20,754
17	SUV	Laterale	20	0,544
18	SUV	Laterale	30	0,836
19	SUV	Laterale	40	3,154

20	SUV	Laterale	50	3,266
21	SUV	Posteriore	20	2,846
22	SUV	Posteriore	30	5,516
23	SUV	Posteriore	40	13,346
24	SUV	Posteriore	50	16,346
25	Pick- Up	Frontale	20	7,104
26	Pick- Up	Frontale	30	15,154
27	Pick- Up	Frontale	40	17,854
28	Pick- Up	Frontale	50	21,754
29	Pick- Up	Laterale	20	0,556
30	Pick- Up	Laterale	30	0,889
31	Pick- Up	Laterale	40	3,354
32	Pick- Up	Laterale	50	3,646
33	Pick- Up	Posteriore	20	5,646
34	Pick- Up	Posteriore	30	6,646
35	Pick- Up	Posteriore	40	13,646
36	Pick- Up	Posteriore	50	18,546

Le figure 125, 126 e 127 mostrano l'andamento delle distanze di proiezione in funzione della velocità di impatto per le prove eseguite:

**Andamento delle distanze di proiezione per l' impatto frontale Pick-up SUV Berlina**

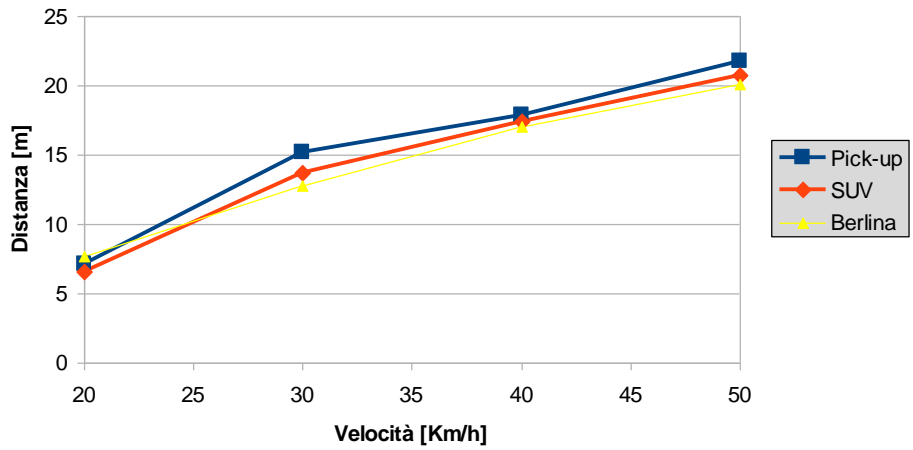


Figura 125: Andamento delle distanze di proiezione per l'impatto frontale Pick-up SUV Berlina.

**Andamento delle distanze di proiezione per l' impatto laterale Pick-up SUV Berlina**

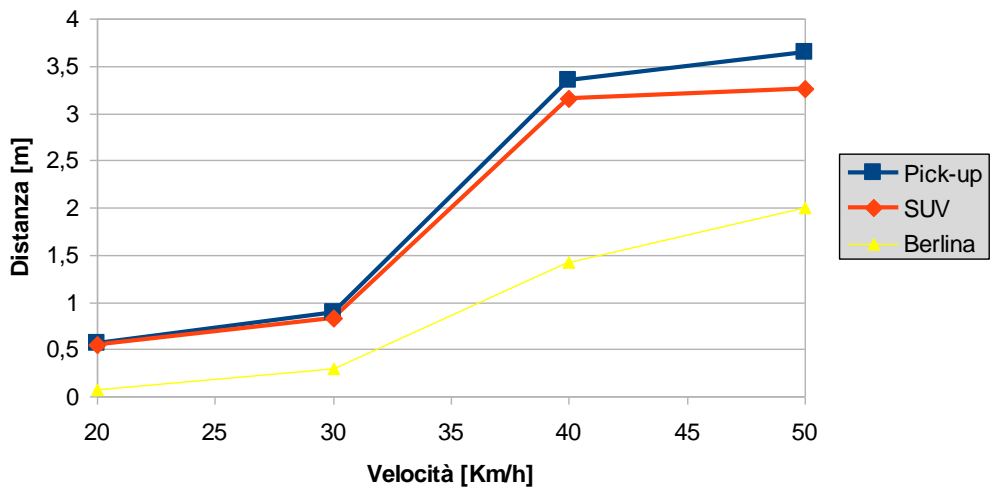


Figura 126: Andamento delle distanze di proiezione per l'impatto laterale Pick-up SUV Berlina.

### Andamento delle distanze di proiezione per l'impatto posteriore Pick-up SUV Berlina

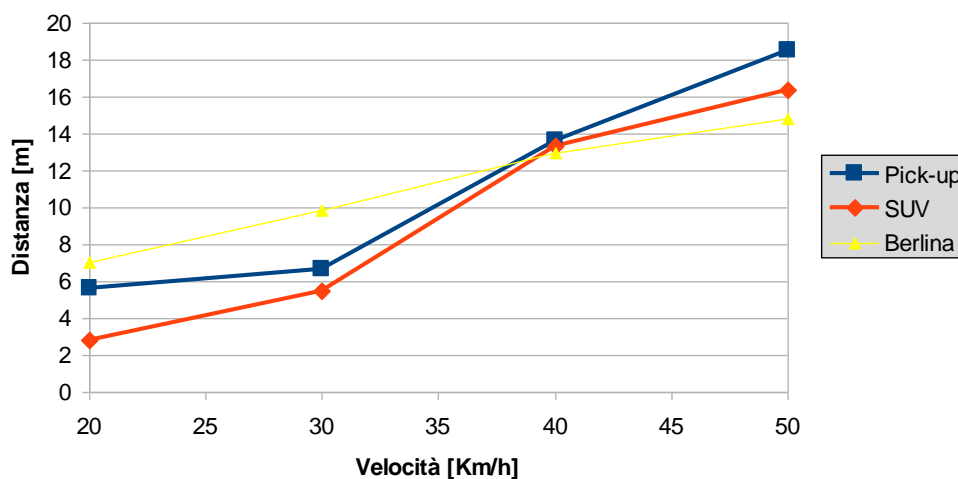


Figura 127: Andamento delle distanze di proiezione per l'impatto posteriore Pick-up SUV Berlina.

## 8.4 MATERIALI

Si è già accennato che una possibile soluzione atta a ridurre l'impiego di carburante per il funzionamento degli autoveicoli, può riscontrarsi nella sostituzione di alcune parti di essi, con materiali più leggeri.

A questo proposito, sono stati creati e testati in laboratorio, dei materiali compositi innovativi a base di acido polilattico caricato.

### 8.4.1 MATERIALI UTILIZZATI

La matrice polimerica utilizzata in questo lavoro di tesi è PLA (Ingeo™ Biopolymer 4032D, NatureWorks, Minnetonka, Minnesota, USA), densità  $1,24 \text{ g/cm}^3$  e punto di fusione a  $155\text{-}170 \text{ °C}$ .

La farina di legno (proveniente principalmente da faggi) è stata fornita da La.So.Le (Percoto, Italia), con una dimensione delle particelle variabile da  $300$  a  $500 \text{ }\mu\text{m}$ .

La nanocarica è un campione di silicato Dellite 72T fornito da Laviosa Chimica Mineraria (Livorno, Italia). La montmorillonite è stata modificata con sali organici di alchilammonio per migliorare ed accrescere la delaminazione e l'adesione dell'argilla con la matrice polimerica.



Nella tabella 17 sono riportate le composizioni dei materiali preparati.

Tabella 17: Composizione percentuale dei compositi preparati.

<b>Matrice</b>	<b>Carica</b>
PLA 100%	Non caricato
PLA 70%	Farina di Faggio 30%
PLA 95%	Dellite 5%

Per confronto, il PLA puro è stato trattato alle stesse condizioni adottate per i compositi.

#### **8.4.2 LAVORAZIONE**

Per espellere l'umidità residua che avrebbe causato l'idrolisi del polimero (ovvero la prematura degradazione dello stesso a contatto con l'acqua) durante la miscelazione, il PLA è stato messo in una stufa sottovuoto (modello NSV 9035) alla temperatura di 80 °C per tutta la notte (circa 16-17 ore). In una stufa identica alla precedente si è fatta essiccare la carica di Dellite per lo stesso tempo ma ad una temperatura di 110 °C.

L'essiccazione della farina di faggio, invece, è avvenuta in una stufa ventilata a 80°C sempre per tutta la notte. Data la propensione di questa carica all'assorbimento di molta umidità dall'aria si è preferito far avvenire il suo essiccamento in una stufa ventilata per evitare la formazione di condensa sulle pareti della stufa durante il processo.

Noto il volume massimo della camera del miscelatore (50 cm<sup>3</sup>) e nota la densità del PLA (1,24 g/cm<sup>3</sup>), si è utilizzata come base di calcolo una massa di 45 g per la preparazione delle miscele. Una volta pesate le quantità di matrice e carica da impiegare, i grani di PLA e la carica sono stati mescolati in un becker prima del loro inserimento nel miscelatore.



Figura 128: Mescola di PLA e farina di faggio prima della miscelazione.

I materiali sono stati miscelati in un miscelatore Plasti-Corder Brabender PLE 330 alla temperatura di 190 °C per permettere la fusione del polimero. In figura 130 sono mostrate le camme presenti all'interno della camera di miscelazione con uno schema di queste durante il funzionamento. La mescola è stata immessa nella camera con velocità di rotazione delle camme di 10 rpm. La fase di carico è stata eseguita in 60 secondi, successivamente si è aumentata la velocità di rotazione delle camme a 60 rpm. La miscelazione è stata interrotta quando il momento torcente offerto dal fuso ha raggiunto un valore costante. Questo indica la completa fusione del polimero e l'eventuale omogeneizzazione di questo con la carica (se presente). Sono stati sufficienti 5 minuti per raggiungere un valore costante del momento torcente.

Conclusa la miscelazione, dal miscelatore viene prelevato un fluido viscoso che, a temperatura ambiente, rapidamente solidifica. È importante asportare il materiale dal miscelatore in tempo breve per evitare che questo possa degradarsi rimanendo troppo tempo alla temperatura di 190 °C. Questa operazione è stata eseguita in 120 secondi. Tutto il materiale ricavato oltre questo tempo è stato scartato.



Figura 129: Foto del miscelatore Plasti-Corder Brabender utilizzato.



Figura 130: A sinistra: foto delle camme del miscelatore. A destra: schema delle camme in funzione.

Il materiale prelevato dal miscelatore è stato rimesso in stufa sottovuoto alla temperatura di 80 °C tutta la notte prima di essere pressato nella forma desiderata.

### 8.4.3 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

I provini sono ricavati da uno stampo rettangolare. Per conoscere la quantità di materiale da immettere in ogni stampo è stato misurato il volume di quest'ultimo (14,3 cm<sup>3</sup>). Nota quindi la densità del PLA sono stati pesati 19 g di ogni materiale e messi nello stampo, figura 131. La quantità pesata è leggermente superiore di quella necessaria per essere certi che tutto lo stampo si riempia.

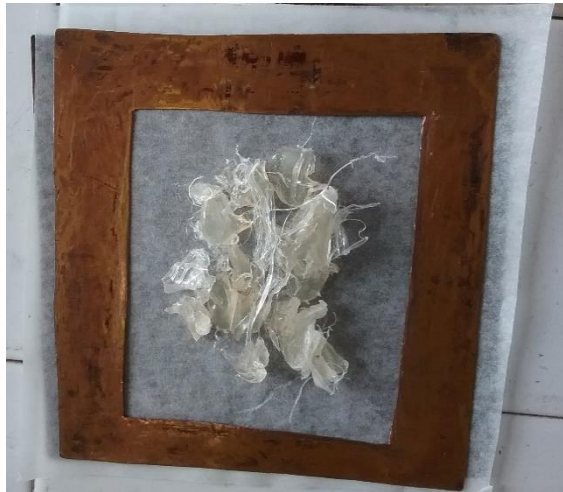


Figura 131: Preparazione alla pressofusione del PLA non caricato.

È stata utilizzata una pressa da laboratorio Carver (Wabash, IN, USA), figura 132. I film sono stati realizzati pressando il materiale alla temperatura di 190 °C, per 2 minuti a pressione ambiente e per 1 minuto con le piastre completamente forzate sullo stampo ad una pressione di 100 bar per garantirne il completo riempimento da parte del materiale. Dopo questo tempo sono state spente le resistenze elettriche ed è stata fatta circolare dell'acqua a temperatura ambiente dentro le piastre della pressa per raffreddarle. Quando si è raggiunta una temperatura di 40 °C lo stampo è stato estratto dall'apparecchiatura.



Figura 132: Foto della pressa utilizzata per la pressofusione.

Il materiale è stato quindi estratto dallo stampo e sono stati fustellati i provini tramite una fustellatrice da laboratorio. La forma (dumbbell) di questi segue le dimensioni della norma tecnica ASTM D638, in particolare sono del tipo IV.

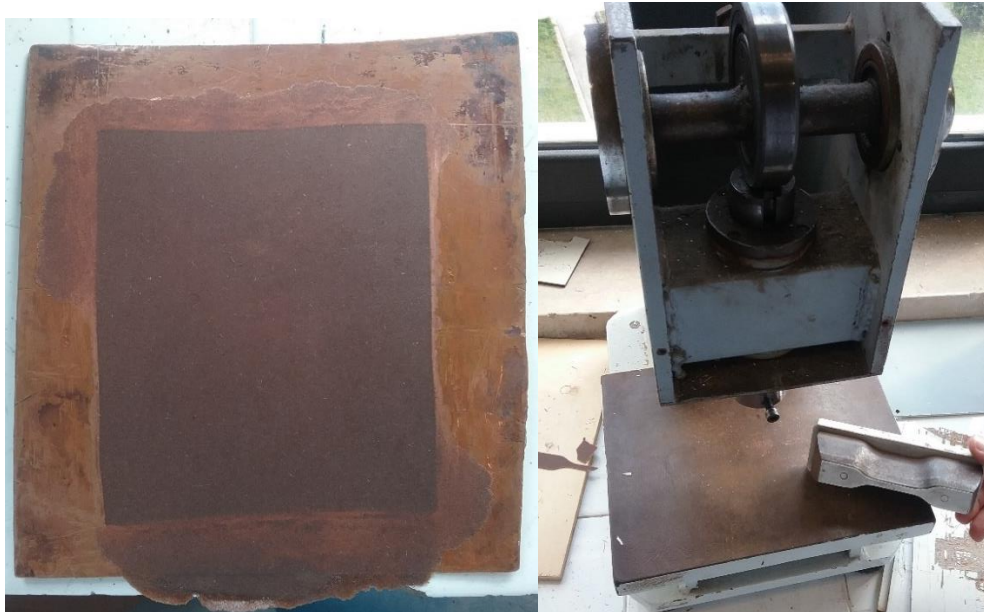


Figura 133: A sinistra: materiale pressato dentro lo stampo. A destra: foto della fustellatrice utilizzata.

Da due film per ogni materiale sono stati ricavati sei - sette campioni per effettuare le prove di trazione.

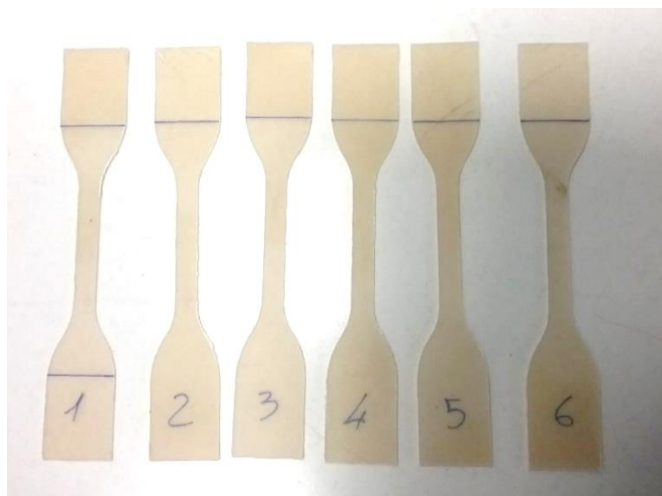


Figura 134: Provini di PLA + Dellite per la prova di trazione.

Cambiando la forma dello stampo della fustellatrice sono stati ricavati tre provini, per ogni materiale preparato, a forma di parallelepipedo con lunghezza di 30 mm e larghezza di 5 mm utilizzati per l'esecuzione delle analisi dinamico meccaniche. Dopo la numerazione di tutti i campioni è stato misurato lo spessore degli stessi

tramite calibro centesimale; per il calcolo dello spessore di ogni provino è stata fatta la media della misurazione in tre punti.

## 8.4.4 CARATTERIZZAZIONE

### 8.4.4.1 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA

Le prove di trazione sono state eseguite usando una macchina universale di prova Zwick Roell z005 utilizzando una cella di carico di 5 kN.



Figura 135: Foto dell'apparecchiatura utilizzata per le prove di trazione.

La determinazione del modulo elastico è avvenuta con una velocità iniziale della traversa di 1 mm/min. Dopo l'acquisizione del modulo di Young la velocità della prova è stata aumentata a 20 mm/min fino alla rottura. La deformazione del provino è stata ricavata dallo spostamento delle traverse.

I dati rilasciati dall'apparecchiatura sono stati elaborati tramite un foglio di calcolo (Microsoft Excel) dove è stato possibile ricalcolare il modulo elastico e gli altri dati ricavabili dalla prova (tensione di rottura, tensione di snervamento, allungamento al carico massimo e allungamento a rottura).

#### **8.4.4.2 CARATTERIZZAZIONE TERMOMECCANICA**

Le prove sono state eseguite tramite l'apparecchiatura Metravib DMA +150 (dotata di un sensore capacitivo per la misurazione della forza (carico massimo 150 N) e di un accelerometro per la misurazione dello spostamento).

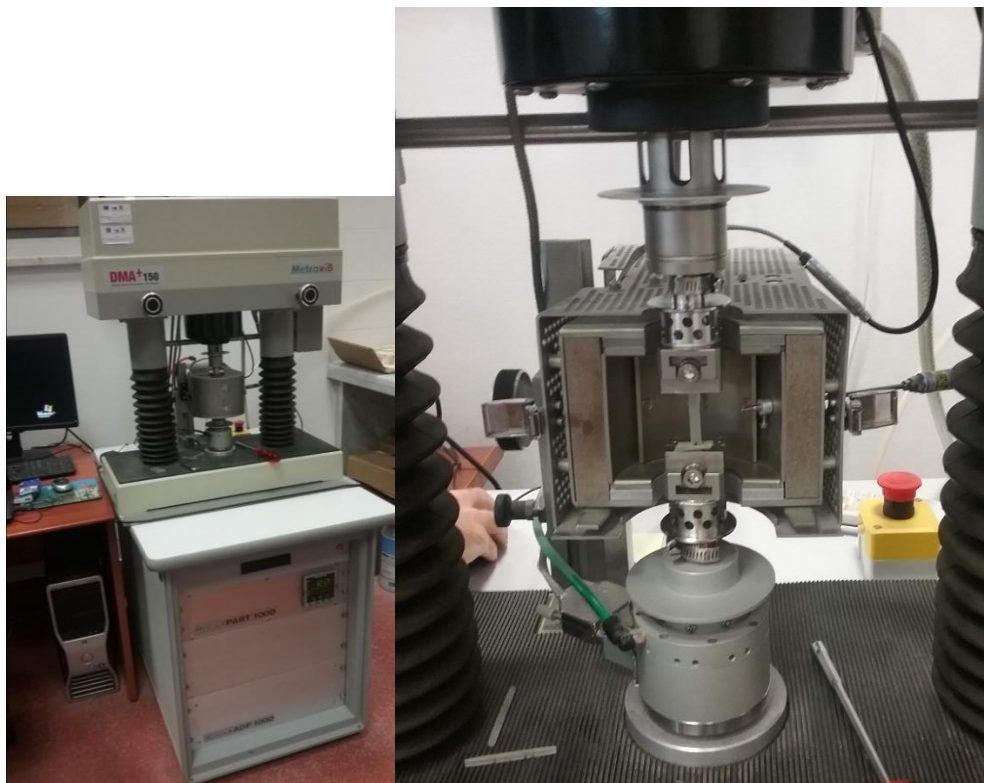


Figura 136: A sinistra: foto dell'apparecchiatura utilizzata per le DMA. A destra: ammorsaggi e camera termica.

È stato applicato uno spostamento di trazione di 0,01 mm alla frequenza di 1 Hz. La prova è stata effettuata con una rampa di temperatura con partenza dalla temperatura ambiente (25 – 30 °C) fino alla temperatura di 130 °C con un incremento di 3 °C/min.

### **8.4.5 RISULTATI E DISCUSSIONE**

#### **8.4.5.1 MOMENTO TORCENTE**

La viscosità dei diversi sistemi è stata misurata durante la fase di miscelazione: si è proceduto alla misura del momento torcente offerto dal fuso e ne sono stati appuntati i valori ad intervalli di tempo di 30 secondi fino al termine



dell'operazione. Nel grafico seguente, figura 137, si riportano i valori del momento torcente in funzione del tempo per i tre materiali preparati.

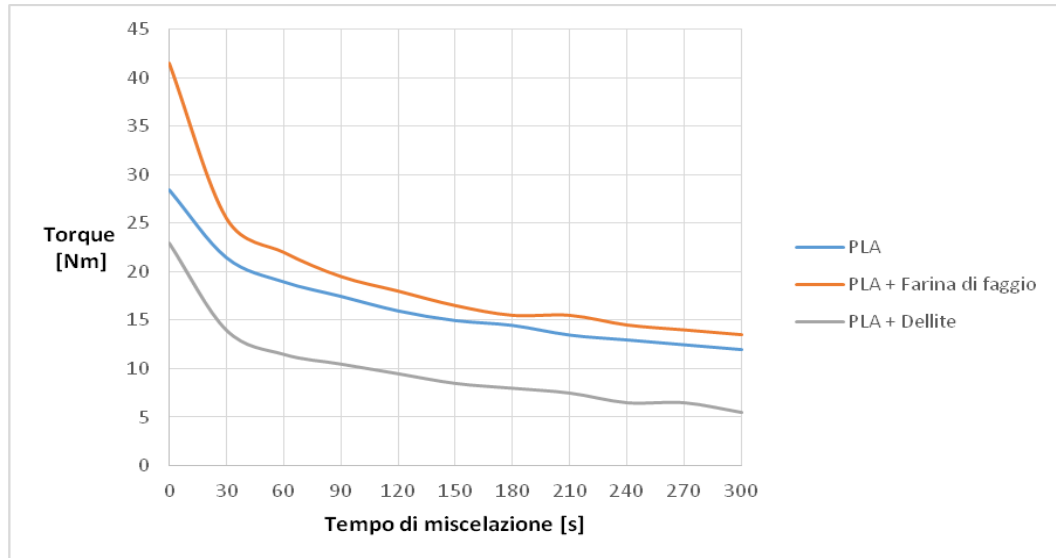


Figura 137: Momento torcente offerto dalle miscele in funzione del tempo di miscelazione.

Osservando la figura 137 si nota che, dopo la rapida discesa iniziale dovuta alla fusione del polimero in miscelazione, le curve tendono a raggiungere uno stato stazionario per la fusione completa del materiale polimerico e per l'omogeneizzazione nel caso della presenza della carica.

Come è noto, il momento torcente è una misura indiretta della viscosità, perciò la miscela di PLA + farina di faggio ha un valore di viscosità più alto del solo PLA. L'aumento di viscosità è un fenomeno ben noto per l'aggiunta di cariche che produce un effetto di rinforzo della matrice. Questo aumento di viscosità era atteso anche per l'aggiunta della Dellite ma si rivela che la viscosità del nanocomposito è inferiore a quella della sola matrice. La viscosità del PLA diminuisce probabilmente a causa del degrado della catena polimerica. La letteratura scientifica riporta che questo effetto è attribuito ad una notevole diminuzione del peso molecolare dovuto a diversi processi complessi di degradazione, come l'idrolisi e la degradazione radicale. Sempre la letteratura, riporta che questo effetto è probabilmente dovuto alla presenza del modificatore organico nella montmorillonite che potrebbe, a sua volta, promuovere i fenomeni

di degradazione. Questo avvenimento è stato osservato in molti casi, per esempio nell'utilizzo di idrotalciti (HT) come nanocarica.

#### 8.4.5.2 PROPRIETÀ MECCANICHE

Nella figura 138 sono riportate le curve sforzo – deformazione rappresentative per ogni materiale preparato.

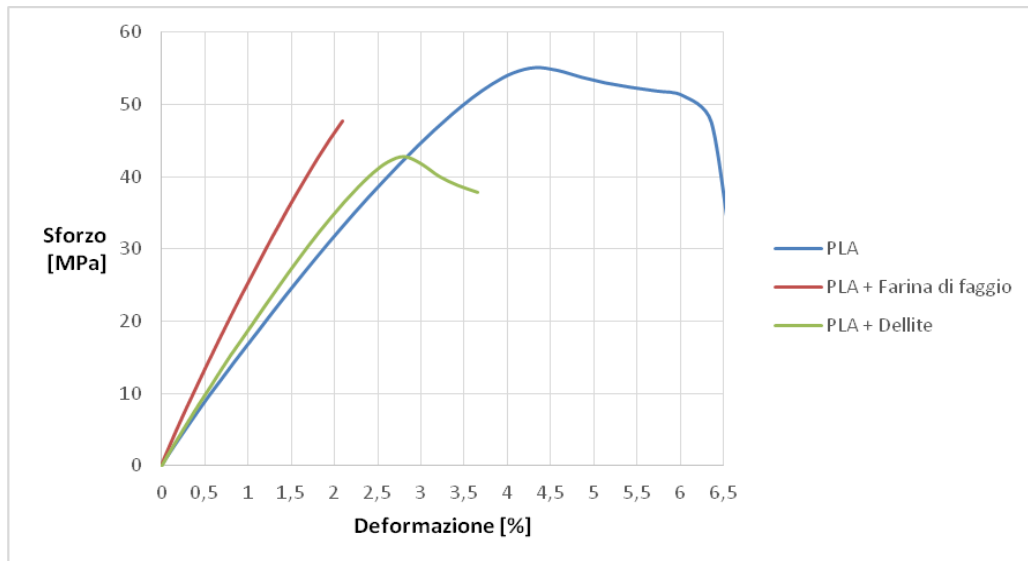


Figura 138: Andamento rappresentativo sforzo – deformazione.

Il carico di snervamento ( $\sigma_y$ ) è stato calcolato in modo convenzionale utilizzando il metodo di Jhonson, ovvero determinando lo sforzo ad una deformazione permanente prestabilita dello 0.2%. Tale metodo è mostrato in figura 139 dove il punto P indica il limite di proporzionalità elastica lineare e la linea a tratti è con pendenza E.

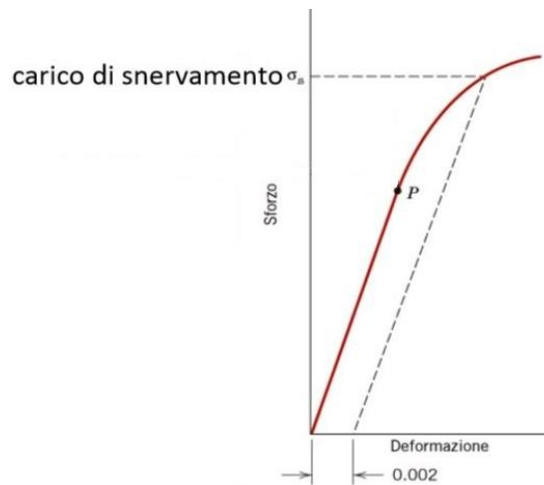


Figura 139: Determinazione del carico di snervamento con il metodo di Jhonson.

I valori delle tensioni e degli allungamenti estratti, sono riportati nella tabella seguente:

Tabella 18: Valori ricavati sperimentalmente dalle prove di trazione.

<b>Materiale</b>	<b>E</b> [MPa]	<b><math>\sigma_{max}</math></b> [MPa]	<b><math>\sigma_y</math></b> [MPa]	<b>All. Fmax</b> [%]	<b>All. Break</b> [%]
<b>PLA</b>	$1831 \pm 37$	$56.6 \pm 1.6$	$28.0 \pm 2.1$	$4.8 \pm 0.7$	$7.6 \pm 2.4$
<b>PLA + Farina di faggio</b>	$2689 \pm 88$	$50.3 \pm 2.3$	$36.3 \pm 1.3$	$2.3 \pm 0.2$	$2.3 \pm 0.2$
<b>PLA + Dellite</b>	$1989 \pm 73$	$44.7 \pm 2.2$	$35.1 \pm 1.1$	$2.9 \pm 0.1$	$3.8 \pm 0.4$

Notiamo che il PLA ha un comportamento duttile con i più alti valori di tensione massima e allungamento a rottura. Stesso comportamento si presenta con l'aggiunta di Dellite, mentre con la farina di faggio il materiale si presenta fragile. Questo era atteso dato l'incremento di viscosità mostrato durante la miscelazione. Rispetto al PLA puro, entrambi i compositi trattati mostrano un aumento del modulo elastico con l'aggiunta di riempitivo. Il valore più elevato si raggiunge con la microcarica di farina di faggio con un incremento del 47%. L'utilizzo di

Dellite come rinforzo porta anch'esso, seppur in minor misura (9%), all'aumento del modulo di Young. Quest'ultima prestazione meccanica è probabilmente il risultato di un equilibrio tra l'effetto positivo dell'introduzione della montmorillonite e l'effetto negativo dei fenomeni di degradazione della matrice dovuti alla presenza del modificatore organico.

Per quanto riguarda l'allungamento a rottura, la presenza di cariche causa un abbassamento di tale proprietà. Un'ipotesi di ciò potrebbe essere il differente grado di cristallinità dei materiali preparati. Infatti, la cristallinità dipende, oltre che dalla composizione chimica e dalla configurazione delle catene, anche dalla velocità di raffreddamento durante la solidificazione. I campioni sono stati ritagliati da film che sono passati, all'interno della pressa, dalla temperatura di 190 °C alla temperatura di 40 °C senza il controllo della velocità di raffreddamento. L'ipotesi di aumento di cristallinità potrebbe essere confermata anche dal fatto che la dispersione di carica all'interno della matrice plastica ha una profonda influenza sulla struttura interna del materiale. Infatti, quando un processo di cristallizzazione avviene in spazi confinati si hanno mutamenti sia della velocità di cristallizzazione che del grado di cristallinità. La dispersione di particelle agisce sia da centro di nucleazione che da "barriera", limitando la velocità di diffusione delle catene.

I valori della tensione massima seguono la stessa tendenza mostrata dall'allungamento a rottura.

#### **8.4.5.3 PROPRIETÀ TERMOMECCANICHE**

Per quanto riguarda le analisi dinamico meccaniche, l'andamento del modulo elastico ( $E'$ ) e del fattore di perdita ( $\tan \delta$ ) al variare della temperatura effettiva misurata dalla termocoppia sono mostrati rispettivamente nelle figure 140 e 141.

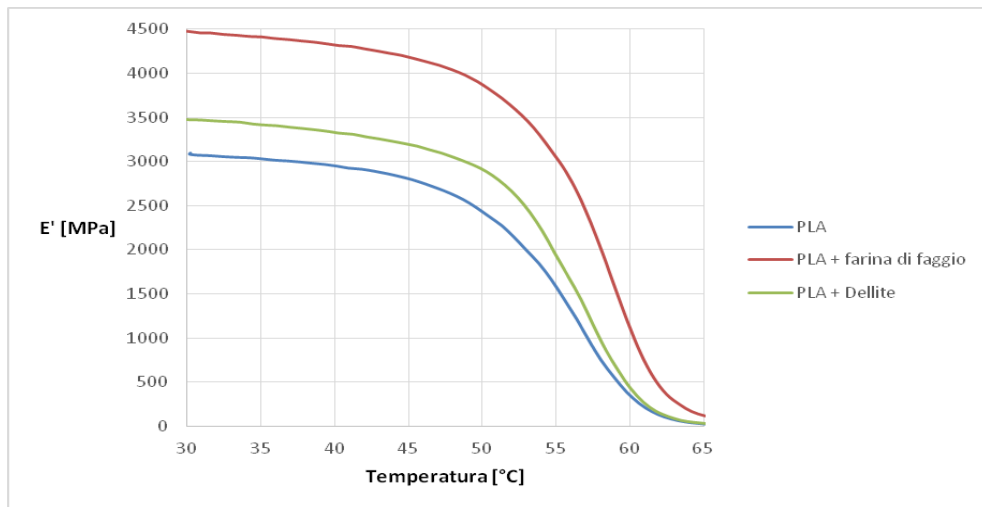


Figura 140: Variazione del modulo  $E'$  in funzione della temperatura.

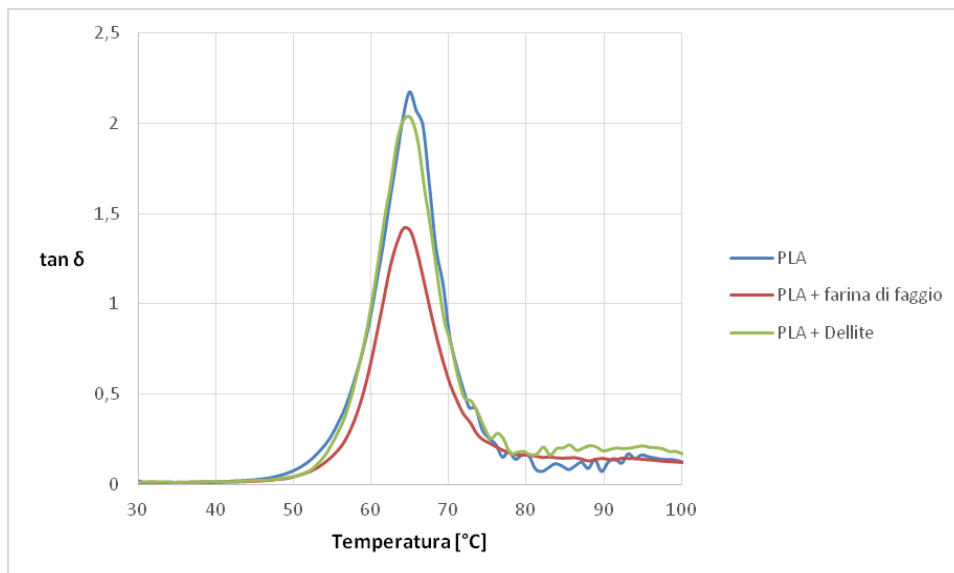


Figura 141: Variazione del fattore di smorzamento  $\tan \delta$  in funzione della temperatura.

Dalla figura 141 si nota che il modulo di conservazione  $E'$  del composito con farina di faggio si mantiene il più elevato. Quello con l'aggiunzione di Dellite si mantiene di poco superiore al modulo del PLA puro. Questi dati sono in accordo con i risultati derivanti dalla prova di trazione dato che la farina di faggio rafforza in modo migliore la matrice di PLA rispetto alla Dellite.

La stessa figura 140 mostra che il modulo  $E'$  diminuisce aumentando la temperatura per tutti i materiali preparati, con un decremento notevole nell'intervallo di temperatura tra i 50 e i 60 °C.

Osservando l'evoluzione del fattore di smorzamento  $\tan \delta$  in funzione della temperatura in figura 141, si osserva come l'andamento per il PLA puro sia simile a quello con l'aggiunta di Dellite. Per la farina di faggio si ha un picco di  $\tan \delta$  ad un valore più basso. L'incorporazione di cariche in una matrice polimerica influenza il comportamento di smorzamento dei compositi, il quale è dovuto sia alle concentrazioni di sforzo di taglio all'interfaccia carica – matrice, sia alla dissipazione di energia viscoelastica nella matrice. Quindi, il fattore di smorzamento dipende dall'adesione tra carica e matrice. Pertanto, un'adesione debole porta a valori più alti di  $\tan \delta$ , mentre una buona adesione limita la mobilità delle catene polimeriche facendo abbassare lo smorzamento. Si nota, infatti, che un valore basso dello smorzamento porta una migliore capacità di carico del composito. Questo risultato è concorde con quanto ottenuto durante la misurazione del momento torcente.

La temperatura di transizione vetrosa ( $T_g$ ) è stabilita come la temperatura alla quale il fattore di smorzamento raggiunge il valore massimo. Non si rileva una variazione apprezzabile con l'aggiunta delle due cariche. La  $T_g$  si mantiene ad un valore di 65 °C per tutti i materiali esaminati.

Concludendo le caratteristiche termomeccaniche del biopolimero PLA sono state analizzate al fine di valutare l'eventuale applicabilità nel settore dell'automotive. Per migliorarne le performance si sono inglobate delle cariche nella matrice polimerica: farina di faggio e montmorillonite modificata. Si è osservato che, l'aggiunta di farina di faggio ha portato ad un aumento del modulo elastico del 47% causando un infragilimento del polimero, mentre, la carica di montmorillonite modificata ha mantenuto un comportamento duttile del materiale aumentando del 9% il modulo elastico.

Resta ancora il problema del decadimento delle caratteristiche meccaniche per temperature superiori ai 55 – 60 °C; l'aggiunta delle cariche, purtroppo, non ha provocato un aumento della temperatura di transizione vetrosa. Uno dei prerequisiti richiesti per l'uso di un polimero negli interni di un veicolo, è che

questo non deve perdere le sue proprietà meccaniche, in modo drastico, alla temperatura di 100 °C.

L'utilizzo di PLA come matrice per compositi è l'ideale per poter ottenere dei materiali polimerici completamente bioderivati, ma questo va irrobustito, va dunque ricercata una carica che faccia aumentare la temperatura alla quale il PLA perde resistenza.

## **CONCLUSIONI**

In conclusione, per crescere economicamente senza minare l'ecologia del pianeta, come membri dell'UE-17, dovremmo emettere meno gas serra nell'atmosfera, ritornando sotto la soglia di sicurezza dei 350 ppmv. Questo vale non solo per il nostro Paese, ma soprattutto per alcuni del Nord Europa, Olanda in primis, che hanno parametri di inquinamento atmosferico per persona doppi di quelli dell'Italia. Principalmente, bisogna rimboccarsi le maniche e lavorare di più sull'efficienza energetica del settore trasporto, che è uno dei maggiori produttori di CO<sub>2</sub>, su quella del settore Power, sull'isolamento termico degli edifici, sulla Carbon Capture e Storage della CO<sub>2</sub>, sul mix dei combustibili.

L'obiettivo di ridurre drasticamente le emissioni sul territorio in ambiti fortemente antropizzati o protetti, ottenendo dalle tecnologie oggi disponibili i risultati ambientali ed energetici più significativi, implica un cambiamento radicale dell'approccio alla mobilità sostenibile.

In questo lavoro di tesi sono stati trattati diversi argomenti al fine di proporre soluzioni innovative al problema. Tra questi, oltre lo studio delle emissioni, anche l'impatto che l'incremento della presenza di mezzi di trasporto ha sulla sicurezza stradale nell'ambito dell'incidentalità. È stata dunque evidenziata l'attenzione che il mondo automotive ha posto nei confronti delle principali problematiche legate alla forte crescita dei veicoli in circolazione.

I progressi compiuti nell'ambito dell'ingegneria dell'autoveicolo devono andare di pari passo con le esigenze dei consumatori e con i cambiamenti degli stili di vita. In un mondo sempre più attento all'aspetto ecologico è giusto proporre soluzioni in grado di dare il loro contributo per il rispetto dell'ambiente e la

sicurezza delle persone. L'impegno nella progettazione e nella produzione ha bisogno di essere assecondato dall'interesse al progresso e dalla volontà di fare un investimento per il futuro.

I costi di un prodotto nuovo, che rappresenti un'innovazione nell'ambito sostenibile, soprattutto per quanto riguarda i veicoli ibridi ed elettrici, sono un biglietto da visita poco gradito ma necessario. Da questo punto di vista, gli incentivi alla mobilità sostenibile giocano un ruolo sicuramente fondamentale per spingere i consumatori all'acquisto di un veicolo più rispettoso dell'ambiente; non solo al momento dell'acquisto, ma anche durante la quotidianità, piccole agevolazioni come parcheggi gratuiti (o a tariffa ridotta) e circolazioni nelle zone a traffico limitato (provvedimento già in uso) potrebbero rappresentare una incentivazione in più.

Una valida possibilità di contribuire positivamente all'inquinamento urbano è rappresentata anche dal Car Sharing; il trasporto condiviso, i numerosi parcheggi in cui lasciare l'auto e gli abbonamenti dal prezzo "invitante" stanno facendo sì che anche in Italia si stia diffondendo questa modalità di trasporto già ampiamente consolidata in Stati vicini come Francia e Germania.

L'interesse di fare anche una trattazione sugli impatti auto-ciclista nasce dal fatto che in questi ultimi anni il mondo della bicicletta ha iniziato a rappresentare un'alternativa per i piccoli spostamenti quotidiani, come casa-lavoro, casa-università, ecc. I motivi sono molteplici: si evita il traffico cittadino delle ore di punta, ci si sposta in modo economico e sostenibile e, soprattutto, fa bene alla salute. Purtroppo, un'educazione stradale non sempre adeguata, le strade spesso pericolose e la mancanza di attenzione da parte di automobilisti, motociclisti e ciclisti, sono causa di una quantità di incidenti che hanno portato il nostro Paese ad avere un tasso di mortalità dei ciclisti tra i più elevati di Europa. Sono nate, a tal proposito, numerose iniziative che si pongono come obiettivo quello di promuovere la bicicletta come mezzo di spostamento alternativo e di aumentare la sicurezza degli utilizzatori deboli della strada.



Un altro modo per promuovere una mobilità più sostenibile, è investire nella ricerca di materiali innovativi più leggeri ed ecocompatibili per la costruzione di parti dell'autoveicolo. In questo lavoro è stato altresì sviluppata una ricerca per la produzione di un materiale leggero a base di acido polilattico (PLA) caricato, al fine di poterlo utilizzare all'interno del veicolo. Purtroppo i risultati di questa ricerca si sono rivelati poco soddisfacenti, dato che la matrice di PLA dovrebbe essere irrobustita con una carica tale da aumentare la resistenza termica del polimero a 100°C e oltre.

Tuttavia, con veicoli sempre più tecnologici e più “attenti” a quello che li circonda e con la collaborazione dell’individuo a migliorare la sicurezza propria e quella degli altri, è possibile perseguire l’obiettivo “mobilità sostenibile” e tentare di migliorarlo in modo continuo.

## **BIBLIOGRAFIA**

### ***Studi e monografie:***

- CAROLLO, F; VIRZI' MARIOTTI, G; SCALICI, E, *Biomechanics Parameters in the Vehicle-Cyclist Crash with Accident Analysis in Palermo*. pp.139-148. In Proceedings of the 5th European Conference of Mechanical Engineering (ECME' 14) - ISBN:978-960-474-405-3
- CAROLLO, F; VIRZÌ MARIOTTI, G; SCALICI, E, *Injury Evaluation in Teenage Cyclist-Vehicle Crash by Multibody Simulation*. pp.203-217. In WSEAS TRANSACTIONS ON BIOLOGY AND BIOMEDICINE - ISSN:1109-9518 vol. 11 (11)
- CAROLLO, F; VIRZÌ MARIOTTI, G; NASO, V, *HIC Evaluation in Teenage Cyclist – SUV Accident*. pp.252-259. In RECENT RESEARCHES IN MECHANICAL AND TRASPORTATION STSTEMS - ISBN:978-1-61804-317-7
- CAROLLO, F; VIRZI' MARIOTTI, G; NASO, V, *Biomechanics Parameters in Teenage Cyclist – SUV Accident and Comparison with the Pedestrian*. pp.77-87. In *Applied Mathematics and Materials* - ISBN:978-1-61804-347-4. In MATHEMATICS AND COMPUTERS IN SCIENCE AND ENGINEERING SERIES - ISSN:2227-4588
- CAROLLO, F; VIRZI' MARIOTTI, G; SCALICI, E, *Valutazione delle lesioni nell'impatto ciclista adolescente -veicolo con simulazione multibody*. pp.75-88. In SCIENZE E RICERCHE - ISSN:2283-5873 (24)
- CAROLLO, F; NASO, V; VIRZI' MARIOTTI, G, *Teenage cyclist - Pick up crash by multibody simulation; HIC evaluation and comparison with previous*

- results*. pp.75-83. In INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING - ISSN:2367-8968 vol. 1 (1)
- CAROLLO, F; NASO, V; VIRZI MARIOTTI, G. *Injury and Throwing Distance in Teenage Cyclist- Vehicle Crash*. pp.171-182. In WSEAS TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS - ISSN:1790-5060 vol. 11
- F. CAROLLO, G. VIRZI` MARIOTTI, V. NASO, S. GOLFO, *Head, chest and femur injury in teenage pedestrian-SUV crash; mass influence on the speeds*, Proc IMechE Part D, J Automobile Engineering, IMechE 2018, DOI: 10.1177/0954407017753803 journals.sagepub.com/home/pid
- FRANCESCA GUADAGNINI, ALDO ORIOLI, SALVATORE AMOROSO, “Emissioni inquinanti dal traffico veicolare: modellizzazione e interventi di best practices per migliorare la qualità ambientale”
- AGENZIA NAZIONALE PER LA PREVENZIONE E L’AMBIENTE, (2001), “*I modelli nella valutazione della qualità dell’aria*”.
- AGENZIA NAZIONALE PER LA PREVENZIONE E L’AMBIENTE, “*Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale*”, *Serie Stato dell’ambiente*, n. 12, 2000.
- BELL M.C., GALATIOTO F., 2006, “*Exploring the processes governing roadside pollutant concentrations in an urban street canyon*”, proceedings “XIV° Panamerican conference”, Las Palmas de Gran Canaria.
- BELL MC, BLYTHE P., SHARIF B., NEASHAM J., SURESH V., GALATIOTO F., Hill G., et al., 2009, *Field deployment of the MESSAGE System for environmental monitoring, Traffic Engineering & Control (TEC)*, December 2009, Vol. 50 n° 11.
- CONTALDI M., DE LAURETIS R., PICINI P. (2000): “*Analisi e validazione di metodologie per il calcolo delle emissioni inquinanti dei trasporti*”, Rapporto Tecnico ANPA, Giugno 2000.
- Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 Maggio 2008, relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa.
- ECCLESTON B.H., HURN R.W. (1974), *Ambient temperature and trip length. Influence on Automobile fuel economy and emissions*, SAE Paper n. 780613.
- EGGLESTON H.S., GLAUDIOSO D., GORRISSEN N., JOURMARD R., RIJKEBOER R.C., SAMERES Z., ZIEROCK K.H., (1991), *CORINAIR Working Group on Emissions Factors For Calculating 1990. Emissions for Road Traffic – Vol. 1: Methodology and Emissions Factors* Final Report, dicembre 1991, L.A.T.EnviconCEE.
- ELLIS G.W., CAMP W.T., TREADWAY A. (1978), *The determination of vehicular cold and hot operating fractions for estimating highway emissions*, settembre 1978, US Department of Transportation, Washington D.C.
- European Conference of Ministers of Transport, 1997. *CO2 Emissions from Transport. ECMT, Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris. European Environment Agency, 1998. Europe’s Environment. The Second Assessment*. EEA, Copenhagen.

- FAIZ, A., Weaver, C. S. and Walsh, M., 1996. *Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions*. World Bank, Washington, DC.
- FENG, L. (1992) *Regional Diffusion Model for Estimating LongTerm Average Concentrations of Atmospheric Pollutants*, Atmospheric Environment 26, 27332735.
- GALATIOTO, F., 2007, *I Sistemi di trasporto Intelligenti (ITS) come strumento per la gestione, il monitoraggio e la programmazione della circolazione veicolare urbana pubblica e privata*. Ph.D. Thesis, Transport Engineering Department.
- GALATIOTO, F., ZITO, P., MIGLIORE M. 2007. *Traffic parameters estimation to predict road side pollutant concentrations using neural networks*. Environmental Modeling & Assessment 13 (February).
- GUALTIERI, TARTAGLIA (1997), *a street canyon model for estimation NOx concentration due to road traffic: measurement and modelling in enviromental pollution* (editor San Josè, C.A. Brebbia), computational mechanics publication Southampton (UK) and Boston (USA).
- HOROWITZ H. L. (1982), *Air quality analisys for urban transportation planning*, MIT press, Cambridge Massachussets.
- HOROWITZ H.J., TOBIN R.L. (1979), *The influence of urban trip characteristics on vehicle warmupimplication for urban automobile fuel consumption*, SAE Paper n. 790656
- J. KUKKONEN, E. VALKONEN, J. WALDEN, T. KOSKENTALO, P. AARNIO, A. KARPPINEN, R. BERKOWICZ, K. R. RAIMO KARTASTENPAKA, *A measurement campaign in a street canyon in Helsinki and comparison of results with predictions of the OSPM model*, Atmospheric Environment, 35, 231234 (2001).
- JOHNSON W.B., F.L. Ludwig, W.F. Dabbert, R.J. Allen (1973): *An urban diffusion simulation model for carbon monoxide – JAPCA*, 23, 490 498.
- JOST et al. (1992), *emission and fuel consumption modelling based on continuous measurement*, DRIVE project, del n°12, maggio 1992.
- JOUMARD et al. (1992), *model of exhaust and noise emission and fuel consumption of traffic in urban areasmanual*, DRIVE Project, del n°11, INRETS, France.
- LA GENNUSA, NICOLETTI, RIZZO, SCACCIANOCE, “*mobilit à sostenibile in ambito urbano, proposta di un modello per la valutazione di scenari alternativi*”, D.R.E.A.M., università di Palermo.
- M. AGOSTINACCHIO, S. OLITA, (2003), “*Sull’applicabi lità di un modello diffusivo per la previsione delle concentrazioni di inquinanti da traffico veicolare in ambito urbano*”, *Atti del XIII Convegno Nazionale S.I.I.V.* (Società Italiana Infrastrutture Viarie) – Università degli Studi di Padova, Facoltà di Ingegneria, Padova 3031 Ottobre 2003.
- M. MAHMUD, B. VAN AREM and TRAIL Research Scool, 2008, *A Simulation framework for modeling the impacts of an integrated roadvehicle system*

- on local air quality, Centre for Transport Studies, University of Twente, the Netherlands*
- Manifesto dell'ISSI sulla mobilità urbana sostenibile, in città liberi dall'auto (Roma, 20 marzo 2002).
- Modelli e metodi per l'analisi e il controllo delle reti di trasporti*, Ennio Cascetta, Economia Ambientale e dei Trasporti 1a edizione 1993.
- NUZZOLO et al. (1993), *Simulazione dell'inquinamento da traffico nelle aree urbane*.
- OSTROM et al. (1991), *FREQ10, modification: emission factors, gasoline consumption and growth factor*, giugno 1991, institute of transportation studies university of California, Berkeley.
- P. LENSCHOW, H. J. ABRHAM (2001), "some ideas about the sources of PM10" department of urban development, Berlin, German.
- P.G. BOULTER AND I.S. MCCRAE, 2007, *The links between microscale traffic, emission and air pollution models*, Transport Research Laboratory (TRL), published project report PPR 269.
- R.M. HECK, R.J. FARRAUTO, *Catalytic air pollution*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- TARTAGLIA M. (1995), *la simulazione dinamica delle emissioni inquinanti da traffico*, quaderni dell'istituto di trasporti n°48, marzo 1995, Università di Bologna, Bologna.
- TARTAGLIA M., "L'inquinamento dell'aria da traffico stradale", editoriale BIOS S.A.S., 1999.
- Traffic Analysis Toolbox Volume III: *Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*, Jeffery A. Lindley, P.E. (2004).
- WILLIAMSON S. J. (1993), *fundamentals of air pollution*, AddisonWesley, reading mass.
- ZITO, P., CHEN, H., BELL, M.C., 2008. *Predicting realtime roadside CO and NO2 concentration using neural networks*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System 9 (3), 514522.
- FISCHER H. R., J. J. DE VLIENER (2009). *Starch - Based Nanocomposites Using Layered Minerals*. IN: BIODEGRADABLE POLYMER BLENDS AND COMPOSITES FROM RENEWABLE RESOURCES (LONG YU, ED.), JOHN WILEY & SONS, INC. (U.S.A.).
- GIANT SRL. *Le "BIONORME" UNI EN 13432: 2002 e la UNI EN 14995: 2007*. (CASTELVERDE). [HTTPS://WWW.RETEIMPRESE.IT/ARTS\\_A1140B349](https://www.reteimprese.it/arts_A1140B349)
- JONES R. M., 1975. *Mechanics of composite materials*. Mc Graw-Hill.
- UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA. GILIBERTO S., RINALDI S., *Slide Corso di Tecnologie di Chimica Applicata*. [HTTP://WWW.DMFCI.UNICT.IT/SIRACUSA/WEB1/MATERIALE\\_DIDATTICO/C6.PDF](http://www.dmfc.unict.it/siracusa/web1/materiale_didattico/c6.pdf)
- P.M. AJAYAN, L.S. SCHADLER E P.V. BRAUN, *Nanocomposite science and technology*, WILEY, 2003, ISBN 3-527-30359-6.
- PEDRO HENRIQUE CURY CAMARGO, KESTUR GUNDUPPA SATYANARAYANA, FERNANDO WYPYCH, *Nanocomposite: Synthesis, Structure, Properties and*

- New Application Opportunities*, IN MATERIALS RESEARCH, VOL. 12, 2009, PP. 1-39.
- D. R. PAUL, L. M. ROBESON, *Polymer Nanotechnology: Nanocomposites*, VOL. 49, 2008, PP. 3187-3204.
- YASSER ZARE, *Study of Nanoparticle Aggregation/agglomeration in polymer particulate nanocomposites by mechanical properties*, IN COMPOSITES, A 84, 2016, PP. 158-164.
- FARZANA HUSSAIN, MEHDI HOJJATI, MASAMI OKAMOTO, RUSSEL E. GORGA, REVIEW ARTICLE: *Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview*, in *Journal of Composite Material*, VOL. 40, 2006.
- MINA SABZEVARI, SEYED ABDOLKARIM SAJJADI, AHMAD MOLOODI, *Physical and mechanical properties of porous copper nanocomposite produced by powder metallurgy*, 2016, P. VOL.27; PG. 105-111.
- ASTM D 638 – 03 STANDARD TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF PLASTICS.
- R.SCAFFARO, F. SUTERA, M. C. MISTRETTA, L. BOTTA, F. P. LA MANTIA: *Structure-properties relationships in melt reprocessed PLA/hydroxycitric acid nanocomposites*. *eXPRESS Polymer Letters* VOL.11, NO.7 (2017) 555–564. [HTTPS://DOI.ORG/10.3144/EXPRESSPOLYMLET.2017.53](https://doi.org/10.3144/EXPRESSPOLYMLET.2017.53)
- PILLIN I., MONTRELAY N., BOURMAUD A., GROHENS Y.: *Effect of thermo-mechanical cycles on the physico-chemical properties of poly(lactic acid)*. *Polymer Degradation and Stability*, 93, 321–328 (2008). [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2007.12.005](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.12.005)
- SCAFFARO R., BOTTA L., CERAULO M., LA MANTIA F. P.: *Effect of kind and content of organo-modified clay on properties of PET nanocomposites*. *JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE*, 122, 384–392 (2011). [HTTPS://DOI.ORG/10.1002/APP.34087](https://doi.org/10.1002/app.34087)
- RICHARD G. BUDYNAS, J. KEITH NISBETT. SHIGLEY, *Progetto e costruzione di macchine*. MC GRAW HILL, ISBN 978-88-386-6824-1.
- SLIDE SUL WEB DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALENTO. [HTTPS://WWW.SCIENZEMFN.UNISALENTO.IT/C/DOCUMENT\\_LIBRARY/GET\\_FILE?FOLDERID=3021404&NAME=DLFE-161679.PDF](https://www.scienzemfn.unisalento.it/c/document_library/get_file?folderId=3021404&name=DLFE-161679.pdf)
- LUIGI BOTTA, VINCENZO FIORE, TOMMASO SCALICI, ANTONINO VALENZA AND ROBERTO SCAFFARO: *New Polylactic Acid Composites Reinforced with Artichoke Fibers*. *MATERIALS* 2015, 8, 7770–7779. [WWW.MDPI.COM/1996-1944/8/11/5422](http://www.mdpi.com/1996-1944/8/11/5422)
- FIORE, V.; DI BELLA, G.; VALENZA, A. *The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites*. *Compos. B ENG.* 2015, 68, 14–21. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.COMPOSITESB.2014.08.025](http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.08.025)
- SHANMUGAM, D.; THIRUCHITRAMBALAM, M. *Static and dynamic mechanical properties of alkali treated unidirectional continuous palmyra palm leaf stalk fiber/jute fiber reinforced hybrid polyester composites*. *MATER. DES.* 2013, 50, 533–542. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.MATDES.2013.03.048](http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.048)

- MARTINEZ-HERNANDEZ, A.L.; VELASCO-SANTOS, C.; DE ICAZA, M.; VICTOR, M.C. *Dynamic mechanical and thermal analysis of polymeric composites reinforced with keratin biofibers from chicken feathers*. COMPOS. B ENG. 2007, 38, 405–410. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.COMPOSITESB.2006.06.013](http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2006.06.013)
- MARCO MORREALE, ANTONIO LIGA, MARIA CHIARA MISTRETTA, LAURA ASCIONE AND FRANCESCO PAOLO LA MANTIA. *Mechanical, Thermomechanical and Reprocessing Behavior of Green Composites from Biodegradable Polymer and Wood Flour*. IN MATERIALS, 2015, 8, 7536–7548. [HTTP://WWW.MDPI.COM/1996-1944/8/11/5406](http://www.mdpi.com/1996-1944/8/11/5406)
- AA.VV., *Infortunistica stradale. Aspetti clinico chirurgici, giuridico-assicurativi e medico legali*, GIUFFRÉ EDITORE, 2008.
- CAROLLO FILIPPO, *Analisi di alcuni parametri biomeccanici nello studio d'impatto auto bici*, Palermo, 2014.
- GOLFO SALVATORE, *Analisi dei parametri HIC e TTI ottenuti dalla simulazione numerica dell'impatto veicolo-pedone adolescente*, Palermo, 2012.
- BATTAGLIA SERGIO, DAMIANI IVAN, *Caratteristiche geometriche ed inerziali della bicicletta sportiva. Progetto del telaio*, Palermo, 2005.
- S. BATTAGLIA, I. DAMIANI, G. VIRZÌ MARIOTTI - *La bicicletta sportiva. Caratteristiche geometriche ed inerziali. Simulazione dinamica* - ISBN 88-548-0801-6, 308 pag., Aracne editrice, Roma, ottobre 2006. saggio: <http://www.atnet.it/lista/casbici.htm>
- C K SIMMS, D P WOOD, *Pedestrian risk from cars and sport utility vehicles – a comparative analytical study*, Proc.ImechE Vol. 220 Part : J. Automobile Engineering
- MIHAIL DANIEL IOZSA, DAN ALEXANDRU MICU, STAN CORNELIA, IONESCU ANGEL IONUȚ, “Analytical Estimation of the Hood Behaviour during an Impact with a Pedestrian Head”, Recent Advances in Civil Engineering and Mechanics, ISBN: 978-960-474-403-9
- KOVANDA, H. KOVANDOVÁ, R.SÁGL, *Vehicle-pedestrian collision, simulation in SIMPACK* - User meeting 200 - Bad Ischl, Rakousko, 2001
- JIRÍ SVOBODA, ING; ZDENĚK ŠOLC, PEDESTRIAN PROTECTION-PEDESTRIAN IN COLLISION WITH PERSONAL CAR, Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Automotive and Aerospace Engineering, Technická 4, 16607 Praha 6, Czech Republic
- X.J. LIU, J.K. YANG & P. LÖVSUND, *A Study of Influences of Vehicle Speed and Front Structure on Pedestrian Impact Responses Using Mathematical Models* – Traffic Injury Prevention, 3:1, 31-42, 2010.
- URBAN R., *La rivoluzione non fa sconti*, SCIENZE E TECNICA ISSN 0582-25800 Anno LXXX n.542 Stampa Mura S.r.l.

#### **Sitografia:**

ACI (2003): [http://www.aci.it/sezione\\_istituzionale/studiericerche.html](http://www.aci.it/sezione_istituzionale/studiericerche.html)  
 CONTO NAZIONALE TRASPORTI: [www.infrastrutturetrasporti.it](http://www.infrastrutturetrasporti.it)

COPERT IV USER'S MANUAL (2008): <http://lat.eng.auth.gr/copert/files/tech01.pdf>.  
NORMATIVA ARIA: [http://www.apat.gov.it/site/it/IT/Temi/Aria/Normativa\\_Aria/](http://www.apat.gov.it/site/it/IT/Temi/Aria/Normativa_Aria/).  
UNIONE PETROLIFERA: [www.unione petrolifera.it](http://www.unione petrolifera.it)  
BP: [www.bp.com](http://www.bp.com)  
<http://www.e-action.it/it/storia-dellauto-elettrica-2/>  
[http://www.scame.com/it/infopoint/newmobility/origine\\_auto\\_elettrica.asp](http://www.scame.com/it/infopoint/newmobility/origine_auto_elettrica.asp)  
<http://www.tuttogreen.it/storia-dellauto-elettrica/>  
<http://www.genoaportcenter.it/Pagina.aspx?idPag=129&AspxAutoDetectCookieSupport=1>  
[http://www.corrieredellospport.it/news/motori/green/2016/08/03-13991918/mercedes\\_urban\\_etruck\\_il\\_primo\\_camion\\_completamente\\_elettrico/](http://www.corrieredellospport.it/news/motori/green/2016/08/03-13991918/mercedes_urban_etruck_il_primo_camion_completamente_elettrico/)  
<http://www.lifegate.it/persona/stile-di-vita/camion-ibrido-filobus>  
<http://www.ilgiornale.it/news/cronache/autostrada-arriva-corsia-ricarica-auto-elettriche-1161432.html>  
[http://www.repubblica.it/motori/attualita/2012/02/10/news/motori\\_ricarica\\_wifi\\_e\\_in\\_movimento-29529101/?refresh\\_ce](http://www.repubblica.it/motori/attualita/2012/02/10/news/motori_ricarica_wifi_e_in_movimento-29529101/?refresh_ce)  
<http://www.bmw.it/it/index.html>  
<http://www.veicolielettricinews.it/ricarica-senza-fili-in-autostrada-primo-progetto-pilota-in-gran-bretagna/>  
<http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-attiva-e-preventiva/cosa-si-intende-per-sicurezza-attiva.html>  
<http://www.aci.it/laci/sicurezza-stradale/sistemi-di-sicurezza-passiva/cosa-si-intende-per-sicurezza-passiva.html>  
<https://it.wikipedia.org/wiki/Supercondensatore>  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Veicolo\\_ibrido](https://it.wikipedia.org/wiki/Veicolo_ibrido)  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore\\_di\\_carica\\_elettrica](https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_di_carica_elettrica)  
<http://autoelettric.blogspot.it/>  
[http://www.repubblica.it/motori/sezioni/prodotto/2015/06/12/news/mercedes\\_classe\\_a\\_elettrica-116703093/?refresh\\_ce](http://www.repubblica.it/motori/sezioni/prodotto/2015/06/12/news/mercedes_classe_a_elettrica-116703093/?refresh_ce)  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Mobilit%C3%A0\\_sostenibile](https://it.wikipedia.org/wiki/Mobilit%C3%A0_sostenibile)  
<http://www.greenstyle.it/storie/mobilita-sostenibile>  
<http://www.webnews.it/speciale/mobilita-sostenibile/>  
<http://www.electricmotornews.com/news-ed-eventi/storia/storia-peugeot-vlv-la-mamma-e-la-nonna-delle-due-ion>  
<http://press.porsche.com/news/release.php?id=642>  
<http://www.greencarcongress.com/2016/08/audi-developing-electromechanical-rotary-dampers-potential-for-energy-recuperation-from-suspension-4.html>  
<http://www.treccani.it/>  
<http://www.euroncap.com/it/>