

Studio del parco circolante sull'autostrada A22 e calcolo delle emissioni prodotte







INDICE

Sommario	3
1.Metodologia e basi dati utilizzate	4
1.1.Procedura COPERT V per il calcolo delle emissioni ed applicazione per il caso	o di
interesse	4
1.2.Database sistema di esazione A22	7
a.Classificazione dei veicoli in macroclassi	7
b.Classificazione dei veicoli in classi EURO e tipologia di alimentazione	9
c.Analisi aggiuntive: origine / destinazione dei flussi veicolari	13
1.3.Database da punti di misura (spire) A22	14
a.Classificazione dei veicoli in macroclassi	14
b.Distribuzione di velocità	15
c.Analisi aggiuntive: verifiche della consistenza dei dati	16
2.Calcolo delle emissioni	19
3.Valutazione degli effetti della riduzione dinamica della velocità a fini trasportistic	ci
(cenni)	28





Sommario

Questo documento presenta i risultati e le indicazioni ricavate nei primi due anni di attività realizzate nell'ambito del progetto LIFE "BrennerLEC", che sta sperimentando sull'A22 un concetto avanzato di gestione dei flussi di traffico basato essenzialmente sull'applicazione dei limiti dinamici di velocità e finalizzato alla riduzione delle emissioni.

In questo documento si riportano nello specifico le analisi effettuate sul parco macchine circolante sull'autostrada del Brennero e le operazioni e procedure adottate per il calcolo delle emissioni da traffico per l'asse autostradale. Tali attività sono state svolte grazie al reperimento di dati misurati specifici relativi all'autostrada in oggetto: un database ricavato dal sistema di esazione del gestore dell'infrastruttura (che registra targhe, classe di pedaggio, nazionalità, casello di entrata e casello di uscita dei veicoli) e un database ricavato dalla raccolta di dati misurati da spire a induzione magnetica disposte lungo l'asse autostradale (che registra velocità istantanea e tipologia dei veicoli).

L'opportuno accoppiamento di tali dati ha consentito di impostare un sistema di calcolo delle emissioni da traffico ad hoc per l'asse stradale considerato, seguendo la procedura COPERT V. Tale sistema di calcolo consente anche di valutare come le emissioni varino al variare della velocità del parco macchine a seguito dell'applicazione dei limiti prevista dal progetto.

La metodologia di analisi così come il presente report è stato sviluppato dalla società CISMA, che si è avvalsa del prezioso aiuto di A22 per quello che riguarda la messa a disposizione delle basi dati e degli altri partner del progetto BrennerLEC per quello che riguarda il raffinamento e la finalizzazione della metodologia elaborata.





1. Metodologia e basi dati utilizzate

L'obiettivo dello studio illustrato in questo report è quello di effettuare una stima precisa delle emissioni di CO₂ e NOx prodotte sulle tratte sperimentali del progetto BrennerLEC. Tale stima viene calcolata a partire da parametri trasportistici misurati (numero di veicoli, tipo di veicoli, velocità).

1.1. Procedura COPERT V per il calcolo delle emissioni ed applicazione per il caso di interesse

Per ogni segmento di strada viene calcolata l'emissione usando l'algoritmo COPERT V tenendo conto dei veicoli transitanti e della variazione temporale. L'algoritmo segue il metodo COPERT, che attualmente è uno standard europeo "de facto" per il calcolo delle emissioni del trasporto su strada (¹,²). Questo algoritmo si basa su una metodologia che consiste nel calcolare l'emissione in funzione della velocità del veicolo, a seconda del tipo di motore e della classe del veicolo (categoria veicolo, carburante utilizzato, dimensioni del motore, classe EURO). La metodologia COPERT è anche suggerita nelle linee guida europee "Guida EMEP" per il calcolo delle emissioni (³).

I fattori di emissione sono calcolati sulla base della seguente formula, per ciascun inquinante considerato e per ciascuna classe di veicoli:

$$EF = [A \cdot v^2 + B \cdot v + C + D/v] / [E \cdot v + F]$$

dove:

- v è la velocità del veicolo [espressa in km / h]
- A..F sono i coefficienti che variano per ogni classe e sostanza inquinante
- EF è il fattore di emissione [espresso in g / km]

I fattori di emissione possono quindi essere calcolati per tutti gli inquinanti regolamentati, compresi gli NOx che sono di interesse per il presente progetto. Per quanto riguarda il CO₂, il calcolo delle emissioni si basa sul consumo di carburante, in funzione del peso molecolare di benzina, diesel, GPL e metano e il

¹ COPERT 4: Computer programme to calculate emissions from road transport, Gkatzoflias et al., EEA,

² COPERT: a European road transport emission inventory model, Ntziachristos et al, Information technologies in environmental engineering, 491-504, 2009

³ EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, 2016





rapporto di combustione quasi stechiometrico. Ad esempio, nel caso più semplice del metano, la formulazione è la seguente: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

Poiché il peso molecolare del metano è 16 e il peso del biossido di carbonio è 44, allora per ogni grammo di metano bruciato vengono prodotti 44/16 = 2,75 g di CO_2 . Per benzina e gasolio, il rapporto è di circa 44/15.

In Figura 1 si riporta un diagramma di flusso riepilogativo di tutti i parametri di input necessari per alimentare la procedura COPERT V e calcolare le emissioni.

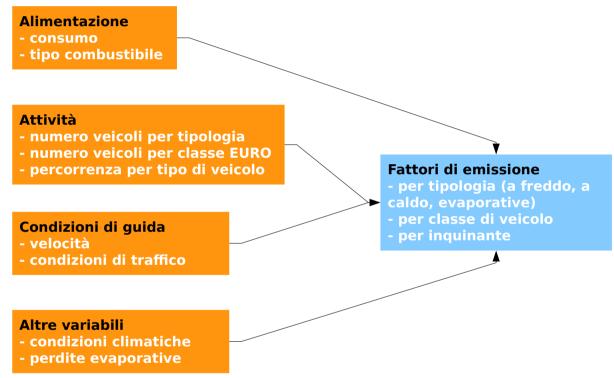


Figura 1: Informazioni necessarie all'applicazione della procedura COPERT V per il calcolo delle emissioni.

Il fattore di emissione di interesse risulta dunque strettamente dipendente dalla velocità dei veicoli, dalla loro classe euro e dal tipo di carburante di alimentazione. Per ottenere informazioni realistiche relative a queste tre caratteristiche del traffico autostradale dell'A22 sono stati utilizzati dati provenienti da due diversi database relativi ai transiti:

1. Dati raccolti dal **sistema di esazione** del gestore autostradale relativi a: targhe, classe di pedaggio, nazionalità, casello di entrata e casello di





uscita; tali dati sono stati estratti per quattro giornate di transito, rappresentative di diverse condizioni di traffico e utenza:

- Venerdì 21 luglio 2017: giorno feriale con turisti
- Giovedì 12 ottobre 2017: giorno feriale senza turisti
- Sabato 15 luglio 2017: giorno festivo con turisti
- Domenica 07 maggio 2017: giorno festivo senza turisti
- 2. Dati raccolti in 5 stazioni di conteggio e classificazione del traffico ("spire" a induzione magnetica) localizzate nelle tratte di interesse alle chilometriche 103, 107, 138, 156 e 164 dell'Autostrada del Brennero. I dati si riferiscono ai singoli transiti per ognuna delle 4 corsie (2 di marcia e 2 di sorpasso) ed includono parametri quali la velocità istantanea e la tipologia di veicolo (mezzo leggero o pesante). Il dato grezzo, raccolto in tempo reale dal gestore stradale, viene elaborato giornalmente e convertito in flusso di traffico (veicoli all'ora).

Le informazioni provenienti da entrambi i database sono state opportunamente analizzate, elaborate e combinate per ottenere i dati necessari all'applicazione della procedura COPERT V e quindi al calcolo delle emissioni. Nello specifico, le informazioni derivanti dal primo database sono state utilizzate per ottenere la distribuzione delle classi euro e dell'alimentazione del parco circolante in autostrada; le informazioni derivanti dal secondo database sono state utilizzate per ottenere le distribuzioni di velocità dei veicoli. Per coordinare i due database e poter combinare le informazioni derivanti da essi, i veicoli sono stati suddivisi in 3 macrocategorie (veicoli leggeri, pesanti e autobus) sulla base di diversi dati contenuti nei database. In Figura 2 si riassume schematicamente il flusso di informazioni trattato, ampiamente commentato nelle sezioni a seguire, dove si presentano le analisi effettuate sui dati di ciascun database e le informazioni aggregate finali ottenute.





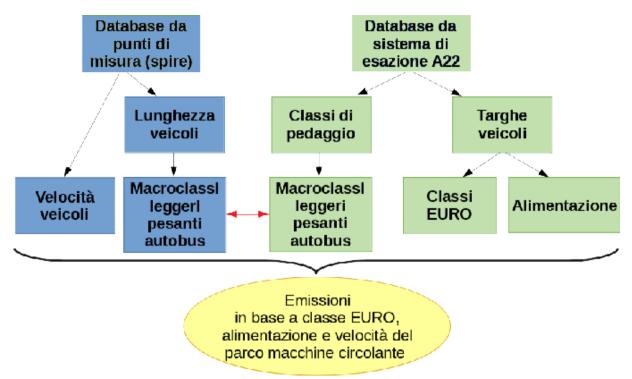


Figura 2: Diagramma di flusso dei dati misurati utilizzati dai due diversi database a disposizione per il calcolo delle emissioni.

1.2. Database sistema di esazione A22

a. Classificazione dei veicoli in macroclassi

Per rendere utilizzabili le informazioni del database del sistema di esazione A22 per il calcolo delle emissioni è stato innanzitutto necessario stabilire una procedura per assegnare ciascuno dei veicoli registrati ad una delle tre macroclassi: veicoli leggeri, pesanti e autobus. Tale classificazione risulta indispensabile per andare poi ad interfacciare le informazioni contenute in questo database con quelle raccolte mediante spire.

L'informazione utilizzata per la classificazione in macroclassi è quella relativa alle classi di pedaggio. Nel database i veicoli sono registrati con 5 diverse classi di pedaggio (A, B, 3, 4 e 5) relative al numero di assi dei veicoli e alle dimensioni degli stessi. In questa analisi, tali classi sono state aggregate come riportato in Tabella 1 per riportarle alle macroclassi di interesse.





	Classi di pedaggio						
	Α	В	3	4	5		
Macroclasse	Leggeri	Leggeri	½ Pesanti ½ Autobus	Pesanti	Pesanti		

Tabella 1: Aggregazione delle classi di pedaggio in macroclassi di tipologia veicoli desiderata.

A titolo di esempio si riportano in Figura 3 le suddivisioni delle classi leggeri e pesanti (in cui in questo caso sono stati accorpati anche gli autobus) sui 4 giorni analizzati con ulteriore suddivisione in veicoli italiani e stranieri, per la tratta Egna – San Michele di interesse per il progetto in corso.

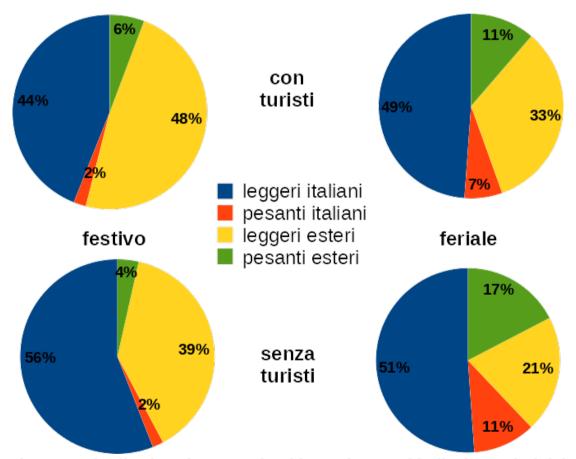


Figura 3: Distribuzione in macroclassi leggeri/pesanti italiani/stranieri dei veicoli transitanti in A22 per le giornate a disposizione sulla tratta Egna - San Michele.





b. Classificazione dei veicoli in classi EURO e tipologia di alimentazione

Le informazioni relative alla distribuzione delle classi EURO e dell'alimentazione dei veicoli è stata derivata dal primo database: esso contiene infatti le targhe dei veicoli transitanti, tramite le quali è stato possibile risalire direttamente alla classe EURO e all'alimentazione degli stessi. Tale approccio consente di ottenere un livello di precisione molto più elevato rispetto al metodo comunemente utilizzato. Quest'ultimo prevede di fare riferimento ai dati forniti annualmente da ACI, che sono essenzialmente una rielaborazione dei veicoli registrati al Pubblico Registro Automobilistico e diviso per provincia. Attualmente i dati più recenti sono per l'anno 2016. Poiché la flotta è costantemente in evoluzione e i fattori di emissione possono variare significativamente tra i diversi tipi di veicoli, è importante che la composizione statistica della flotta sia sempre aggiornata. Il metodo comunemente utilizzato pone differenti problematiche:

- Il parco macchine circolante non può essere assimilato a quello della zona attraversata dalla tratta autostradale, poiché solo una percentuale di traffico sarà imputabile a transiti con origine / destinazione locale
- Il parco macchine circolante in autostrada è tendenzialmente più nuovo di quello immatricolato
- Si ipotizza un'ulteriore divergenza tra il circolante effettivo e quello immatricolato sulla ripartizione per alimentazione (diesel / benzina).
- Nei dati di immatricolazione fra i veicoli pesanti la maggior parte ricade negli autotreni, mentre in autostrada la maggior parte ricade negli autoarticolati.

Grazie ai dati a disposizione le problematiche del metodo tradizionale sono state completamente aggirate, ottenendo informazioni di dettaglio.





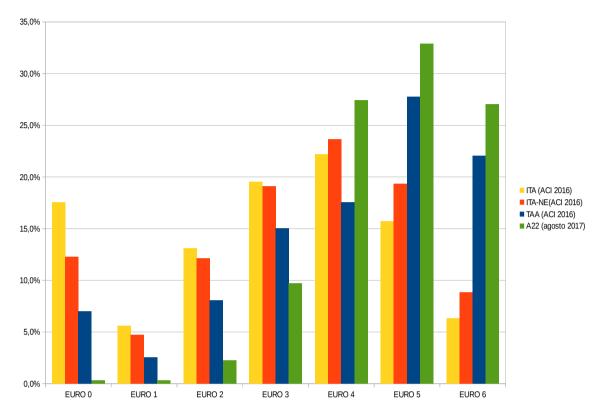


Figura 4: Distribuzione in classi EURO del parco circolante derivato da diversi database: ACI Italia 2016, ACI Italia Nord-Est 2016, ACI Italia Trentino Alto Adige 2016, A22 2017.

In Figura 4 si presenta la distribuzione delle classi EURO ricavata utilizzando diverse fonti di dati, a testimonianza della rilevante differenza fra i risultati ottenibili. Il confronto presentato vede comparati i dati derivanti dalla base ACI 2016 aggregati a diversa scala (Italia, Nord-Est, Trentino Alto Adige) e il parco macchine derivato dal database A22 a disposizione (4 giorni). Tale confronto conferma l'ipotesi che il parco circolante sull'autostrada sia più nuovo di circa 4 anni rispetto a quello immatricolato e che quindi la composizione del parco macchine in termini di classe EURO sia vantaggioso per la riduzione delle emissioni. In particolare, si nota come gli EURO 0/1 siano praticamente assenti in A22.





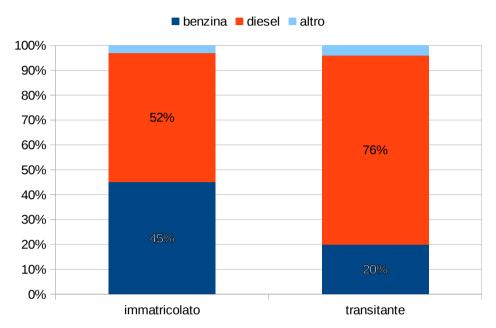
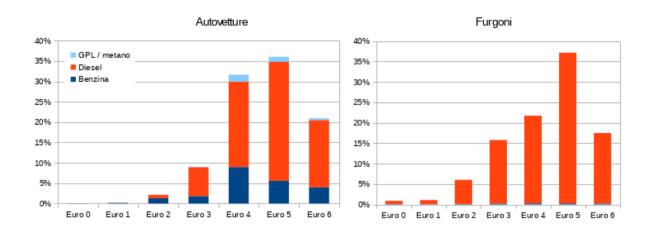


Figura 5: Distribuzione del tipo di alimentazione del parco macchine derivato dal database ACI Italia 2016 ("immatricolato") e dal database A22 2017 ("transitante").

La distribuzione dei veicoli per tipo di alimentazione risulta altrettanto rilevante. Il database del sito ACI fornisce da poco tempo, oltre alla classe EURO, anche l'alimentazione, consentendo di fare un confronto con i risultati ottenuti per l'A22 anche in termini di carburante utilizzato dai veicoli. Come mostrato in Figura 5, la percentuale di veicoli alimentati a gasolio è maggiore per il parco macchine autostradale rispetto a quello immatricolato: tale evidenza comporta uno svantaggio in termini di emissioni per quanto riguarda gli NOx, e va a contrapporsi al vantaggio evidenziato in precedenza relativamente all'età del parco macchine.







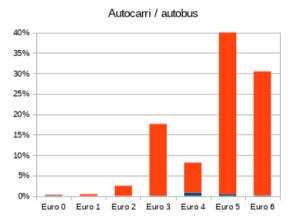


Figura 6: Distribuzione delle tipologie di alimentazione per classe EURO delle classi veicolari autovetture (classe di pedaggio A, leggeri), furgoni (classe di pedaggio B, leggeri) e autocarri e autobus (classi di pedaggio 3, 4, 5).

A titolo di esempio si riportano in Figura 6 e in Figura 7 rispettivamente: la distribuzione delle tipologie di alimentazione per classe EURO delle classi veicolari autovetture (classe di pedaggio A, leggeri), furgoni (classe di pedaggio B, leggeri) e autocarri e autobus (classi di pedaggio 3, 4, 5). Si noti come la classe di pedaggio B (furgoni) abbia una percentuale di alimentazione diesel pari a circa il 100%.





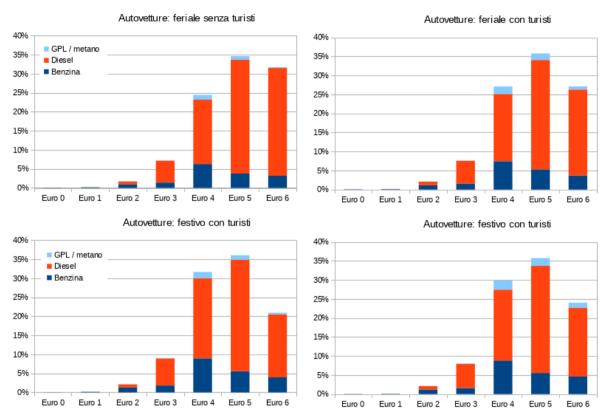


Figura 7: Distribuzione delle tipologie di alimentazione per classe EURO delle sole autovetture nei diversi giorni del database.

c. Analisi aggiuntive: origine / destinazione dei flussi veicolari

I dati contenuti nel database della A22 sono stati utilizzati anche per ulteriori analisi e valutazioni, non specificatamente funzionali al calcolo delle emissioni. Sulla base dei dati di pedaggio sono infatti state ricavate le matrici originedestinazione per i mezzi leggeri transitanti in tutti i caselli dell'autostrada del Brennero, prendendo in esame quattro giorni tipo: festivo senza turisti, feriale senza turisti, festivo con turisti e feriale con turisti. Tale analisi risulta particolarmente utili per individuare i tratti più trafficati dell'asse viario e per meglio comprendere su quali flussi vanno ad incidere le politiche messe in campo all'interno del progetto BrennerLEC. Con riferimento all'area di interesse si è potuto constatare che nei giorni feriali c'è un forte flusso pendolare nelle tratte Bolzano Sud – Egna e Bolzano Sud – Trento Nord, che è più evidente nel caso di basso afflusso turistico. Inoltre, tra Bolzano Sud e Rovereto Sud il traffico leggero di transito (ovvero che si origina fuori e/o termina fuori dal suddetto tratto)





rappresenta una percentuale di circa il 50%, mentre la restante metà è costituito dalla sovrapposizione dei percorsi sulle tratte locali. Nel caso dei giorni festivi si nota una diminuzione complessiva del traffico, imputabile alla riduzione delle tratte brevi (assimilabili a viaggi pendolari). Questo vale con eccezione dei fine settimana caratterizzati da forte flusso turistico, dove si nota l'aumento di ingressi / uscite in alcuni caselli presenti all'interno della zona BrennerLEC e riconducibili ai bacini turistici di Merano (casello di Bolzano), Val di Fiemme (casello di Egna), Valle dei Laghi (casello di Trento Nord) e Garda (casello di Rovereto Sud). In quest'ultimo caso non è individuabile un traffico "di transito" in senso stretto, proprio perché esso ha come origine o destinazione la regione; comunque, tenuto conto di ciò, si valuta che la frazione delle lunghe percorrenze nei weekend turistici si avvicina al 75% dei transiti totali.

1.3. Database da punti di misura (spire) A22

a. Classificazione dei veicoli in macroclassi

Per rendere utilizzabili le informazioni del database da spire per il calcolo delle emissioni è stato innanzitutto necessario stabilire una procedura per categorizzare i veicoli registrati nelle tre macroclassi: veicoli leggeri, pesanti e autobus. Tale classificazione risulta indispensabile per interfacciare le informazioni raccolte mediante spire con quelle del database del sistema di esazione A22.

L'informazione utilizzata per la classificazione in queste macroclassi è quella relativa alle categorie di veicolo. In questo database i veicoli sono registrati con 9 diverse categorie ricavate in base al tipo di "impronta" magnetica rilevata dalle spire: motocicli, autovetture, auto-rimorchi, furgoni, autobus, camion (<12t), camion (>12t), autoarticolati ed autotreni. In questa analisi, tali classi sono state aggregate come riportato in Tabella 2 per riportarle alle macroclassi di interesse.





	Categorie di veicolo										
	Moto- cicli	Auto- vetture	Auto+ rimorchio	Furgoni	Auto- bus	Camion (<12t)	Camion (>12t)	Auto- articolati	Auto- treni		
Macro- classe	Leggeri			Autobus		Pesanti					

Tabella 2: Aggregazione delle categorie di veicoli del database da spire in macroclassi di tipologia veicoli desiderata.

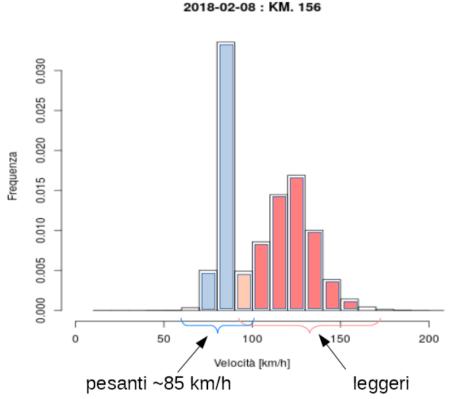


Figura 8: Distribuzione di velocità tipica di tutti i veicoli in transito da database delle spire.

b. Distribuzione di velocità

Le informazioni relative alla distribuzione della velocità del parco circolante è stata derivata dal secondo database, relativo alle misure delle spire: esso contiene infatti la misura diretta della velocità di transito di ciascun veicolo transitante sopra la spira.





In Figura 8 si riporta a titolo di esempio la distribuzione in frequenza delle velocità dei mezzi transitanti ottenibile dal database delle spire: la distribuzione presentata è la composizione delle due diverse distribuzioni di velocità dei mezzi leggeri e di quelli pesanti. Mentre la distribuzione delle velocità dei mezzi leggeri ha deviazione standard maggiore, la distribuzione della velocità dei mezzi pesanti è molto più addensata attorno alla media, pari a circa 85 km/h.

c. Analisi aggiuntive: verifiche della consistenza dei dati

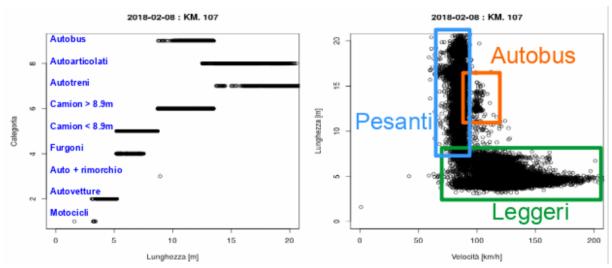


Figura 9: Sinistra: lunghezze dei mezzi in relazione alla loro categoria da database delle spire; destra: lunghezze dei mezzi in relazione alla velocità degli stessi.

I dati contenuti nel database da spire sono stati utilizzati anche per analisi ed elaborazioni ulteriori, non specificatamente funzionali al calcolo delle emissioni, ma di rilevante interesse per la valutazione della consistenza del database.

In Figura 9 si riportano due esempi di analisi dati: nel pannello di sinistra si mostrano le lunghezze dei mezzi in relazione alla loro categoria da database delle spire; nel pannello di destra si mostrano invece le lunghezze dei mezzi in relazione alla velocità degli stessi. Analisi di questo tipo consentono di effettuare delle valutazioni immediate della consistenza della classificazione del database nelle categorie di veicoli: qualora un mezzo categorizzato come motociclo presenti una lunghezza superiore a 5m dimostra un errore di misura dello strumento ed è quindi essenziale rimuoverlo dai dati. I dati raccolti da tutte le





spire sono stati analizzati in questi termini, individuando nelle spire ai km 107, 138, 156 quelle con dati più attendibili e stabili.

I dati raccolti mediante spire possono inoltre essere utilizzati per effettuare delle analisi sull'andamento temporale della velocità e del numero di transiti, misurati per corsie di marcia e di sorpasso, in casi standard o di attivazione del test di riduzione della velocità. Un esempio di visualizzazione di tali informazioni è riportato in Figura 10.





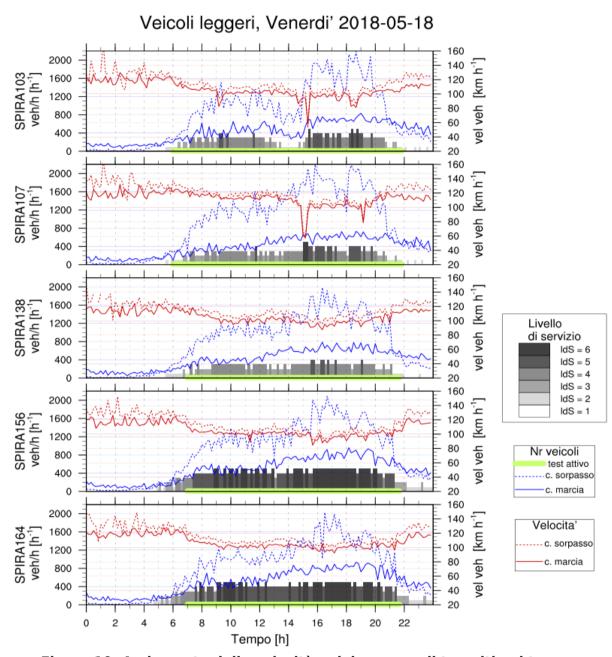


Figura 10: Andamento della velocità e del numero di transiti nel tempo, misurato da ciascuna spira per corsie di marcia e di sorpasso, per un giorno di esempio, con indicato il livello di servizio dell'arteria stradale e l'attivazione del test di riduzione della velocità.





2. Calcolo delle emissioni

Applicando la metodologia sopra esposta è stato possibile calcolare le emissioni dei veicoli transitanti in autostrada con un elevato grado di accuratezza, grazie alla combinazione dei due database messi a disposizione per le finalità del progetto.

Le emissioni possono essere calcolate sulla base temporale di interesse, dalla media annuale fino al dettaglio dei 10 min ed è possibile effettuare valutazioni sull'efficienza, in termini emissivi, dei test di riduzione della velocità condotti.

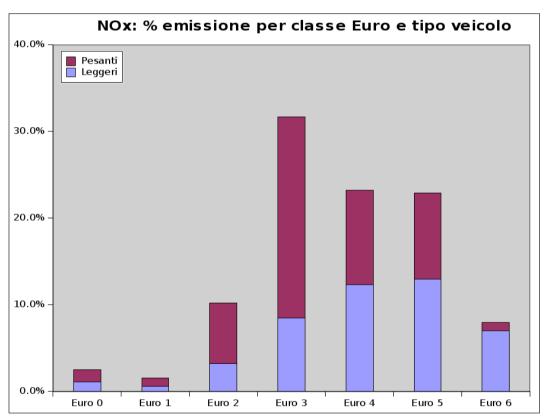


Figura 11: Percentuali di emissioni di NOx per classe EURO e per tipo di veicolo utilizzando tutti i dati raccolti dalla spira al km 107 nell'arco di circa un anno, il 2017.

In Figura 11 si presenta il risultato ottenuto in termini di percentuali di emissioni di NOx per classe EURO e per tipo di veicolo utilizzando tutti i dati raccolti dalla spira al km 107 nell'arco di circa un anno, il 2017. Nel grafico si riportano le emissioni delle categorie mezzi pesanti/autobus aggregate. Complessivamente il contributo alle emissioni di NOx è da attribuirsi per il 55% ai mezzi pesanti e per





il 45% ai mezzi leggeri (di cui il 2% ai leggeri a benzina e il 43% ai leggeri a diesel).

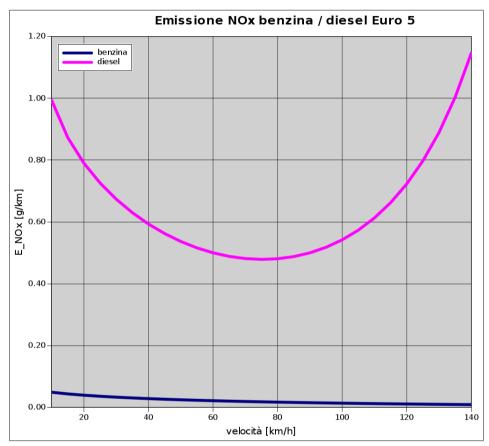


Figura 12: Andamento delle emissioni di NOx in funzione della velocità di veicoli a benzina e diesel (da funzioni di emissione di COPERT V).

Tali risultati hanno rilevante importanza nella valutazione dell'efficienza della riduzione della velocità: quest'ultima infatti risulta molto elevata per autovetture a diesel, mentre è molto ridotta per autovetture a benzina. Tale concetto è richiamato in Figura 12, che riporta le curve emissive ottenute applicando la formulazione COPERT V. A titolo di esempio: le autovetture Euro 5 diesel, attualmente le più diffuse in A22, passando da 130 a 100 km/h riducono le loro emissioni di NOx di circa il 30%, mentre le emissioni, comunque sempre molto ridotte, diminuiscono solo leggermente per le autovetture benzina. Questo andamento così diversificato per benzina e diesel è valido unicamente per le





emissioni di NOx: per altri inquinanti e per la CO₂, si ha una riduzione rilevante anche per i veicoli a benzina.

Nelle Tabelle 3 e 4 si presentano le riduzioni di emissioni in termini percentuali per autovetture a diversa alimentazione e classe EURO per monossido di carbonio, ossidi di azoto, composti organici volatili, polveri sottili e anidride carbonica. Le tabelle sotto riportate contengono i fattori di emissione come dedotti da COPERT V e riferiti alle velocità di riferimento di 130 km/h (limite autostradale) e 100 km/h (limite imposto durante le sperimentazioni della prima fase sul tratto Egna - S. Michele). Naturalmente queste due velocità devono essere considerate come riferimento ottimale, al fine di stimare la variazione potenziale di emissione. Nel caso reale l'effetto tenderà a divergere dal momento che la velocità media dei veicoli leggeri non è pari ai due valori indicati e anzi mostra una distribuzione in freguenza con forma diversa a seconda del limite imposto e delle condizioni di traffico. In ogni caso le tabelle mostrano un'efficacia potenziale molto elevata per quanto riguarda NOx e CO. Con particolare riferimento all'inquinante guida (NOx), va specificato che i fattori emissioni maggiori sono quelli legati alle motorizzazione diesel. Per motori a benzina di nuova generazione si stima al contrario una variazione sostanzialmente nulla passando da 130 km/h a 100 km/h anche a causa dell'ottimizzazione del regime di funzionamento che tende a spostare verso l'alto la velocità di minima emissione; si consideri in aggiunta che in termini di valore assoluto le emissioni di ossidi di azoto da motore a benzina Euro 5/6 si attestano a circa 50 volte in meno rispetto agli omologhi a gasolio per velocità autostradali.

Oltre ai microinquinanti tipici delle emissioni veicolari (NOx, CO, PM, COV) è riportata anche l'emissione chilometrica di CO₂. Si specifica che quest'ultimo è da considerarsi gas serra ad effetto globale e non inquinante locale. La sua emissione è calcolata come proporzionale al consumo di combustibile (sulla base del rapporto stechiometrico combustibile / comburente); vale comunque anche per l'anidride carbonica la valutazione che a minor velocità corrisponde minore emissione.





	-		СО			NOx		COV		
		[g/km]		[%]	[g/km]		[%]	[g/km]		[%]
	Cl. Euro	v130	v100	Δ	v130	v100	Δ	v130	v100	Δ
	0	19.376	16.207	-16%	3.51	3.13	-11%	1.041	1.247	20%
	1	5.449	1.767	-68%	0.81	0.46	-43%	0.176	0.110	-37%
na	2	2.581	0.749	-71%	0.20	0.18	-10%	0.053	0.042	-20%
Benzina	3	3.826	1.148	-70%	0.11	0.05	-54%	0.048	0.026	-47%
Be	4	1.980	0.530	-73%	0.02	0.02	0%	0.022	0.017	-23%
	5	1.426	0.439	-69%	0.01	0.01	0%	0.016	0.007	-58%
	6	1.240	0.374	-70%	0.01	0.01	0%	0.017	0.008	-50%
	0	0.331	0.384	16%	0.80	0.53	-34%	0.048	0.062	28%
	1	0.394	0.206	-48%	0.87	0.66	-24%	0.030	0.026	-16%
<u>.e</u>	2	0.120	0.037	-69%	1.16	0.66	-43%	0.013	0.015	16%
Gasolio	3	0.009	0.013	44%	1.42	0.75	-47%	0.007	0.009	17%
ß	4	0.019	0.022	16%	1.00	0.58	-42%	0.006	0.006	1%
	5	0.015	0.009	-38%	0.89	0.54	-39%	0.001	0.001	8%
	6	0.073	0.045	-38%	0.56	0.34	-39%	0.001	0.001	8%

Tabella 3: Variazioni delle emissioni per autovetture in termini di CO, NOx e COV passando da 130 a 100 km/h, a seconda del tipo di alimentazione (benzina/diesel) e della classe EURO.





	-		PM		CO ₂			
	-	[g/l	km]	[%]	[g/l	[g/km]		
	Cl. Euro	v130	v100	Δ	v130	v100	Δ	
	0	0.002	0.002	0%	286.5	243.8	-15%	
	1	0.002	0.002	0%	222.5	164.5	-26%	
па	2	0.002	0.002	0%	178.9	155.6	-13%	
Benzina	3	0.001	0.001	0%	207.0	169.1	-18%	
Be	4	0.001	0.001	0%	205.2	176.4	-14%	
	5	0.004	0.001	-68%	205.2	176.4	-14%	
	6	0.003	0.002	-53%	205.2	176.4	-14%	
	0	0.312	0.170	-46%	266.1	158.4	-40%	
	1	0.193	0.107	-45%	201.8	153.0	-24%	
<u>.e</u>	2	0.081	0.051	-38%	192.2	154.2	-20%	
Gasolio	3	0.074	0.045	-40%	187.4	144.1	-23%	
Ğ	4	0.034	0.026	-23%	187.4	144.1	-23%	
	5	0.001	0.002	10%	187.4	144.1	-23%	
	6	0.001	0.001	15%	187.4	144.1	-23%	

Tabella 4: Variazioni delle emissioni per autovetture in termini di PM e CO_2 passando da 130 a 100 km/h, a seconda del tipo di alimentazione (benzina/diesel) e della classe EURO.

Tornando ai dati misurati, il medesimo approccio può essere utilizzato per calcolare la variazione emissiva tenendo conto non di una velocità media di riferimento ma della distribuzione in frequenza effettiva delle velocità. In Figura 13 si riportano a confronto le distribuzioni in frequenza delle velocità dei veicoli leggeri e delle corrispondenti emissioni. Il pannello superiore è riferito ad un episodio con velocità media pari a 125 km/h (test non attivo), quello inferiore ad un episodio con velocità media pari a 105 km/h (test attivo). Si noti come la distribuzione delle velocità risulti simmetrica rispetto alla media in condizioni di traffico regolare mentre la simmetria non è mantenuta per quanto riguarda le emissioni: ciò significa che lo stesso numero di veicoli con velocità maggiore della media pesa di più di quello di veicoli con velocità minore della media. Nelle condizioni di test, con limite di velocità ridotto attivato, la velocità media dei





veicoli cala, si riduce la sua varianza, con un risultato complessivo di riduzione delle emissioni.

Ipotizzando condizioni ideali di scorrimento sia quando i test non sono attivi sia quando sono attivi, prendiamo due distribuzioni di velocità simmetriche attorno a valori medi rispettivi di 130 e 110 km/h (Figura 14): a queste corrisponderebbero delle distribuzioni di emissioni con una differenza del 35% fra le due condizioni.

In Figura 15 e 16 si riportano quattro rappresentazioni sintetiche della metodologia applicata. I transiti equivalenti e la velocità equivalente rappresentati in Figura 15 sono stati calcolati seguendo la definizione standard tipicamente utilizzata per analisi trasportistiche di veicoli equivalenti:

$$Nveh_{eq} = Nveh_{leggeri} + 2.5 Nveh_{pesanti}$$

$$vel_{eq} = \frac{vel_{leggeri} * Nveh_{leggeri} + vel_{pesanti} * 2.5 Nveh_{pesanti}}{Nveh_{eq}}$$

Definite queste grandezze, è possibile andare a valutare, oltre alle emissioni totali (pannello superiore Figura 16) anche un indicatore normalizzato, ovvero l'emissione specifica (pannello inferiore, Figura 16): tale grandezza risulta particolarmente pratica per mettere a confronto diverse giornate con diverse condizioni di transito.





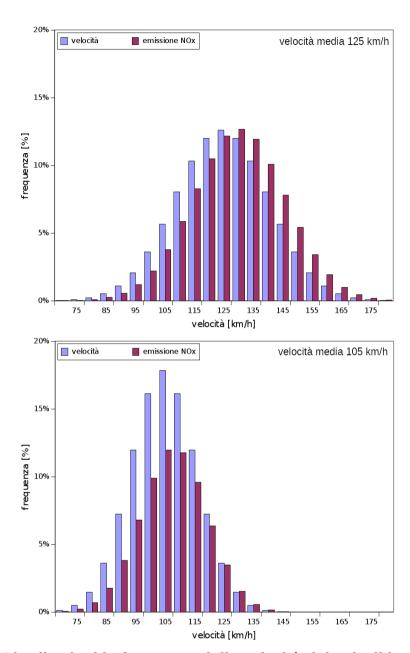


Figura 13: Distribuzioni in frequenza delle velocità dei veicoli leggeri e delle corrispondenti emissioni. Il pannello superiore è riferito ad un episodio con velocità media pari a 125 km/h (test non attivo), quello inferiore ad un episodio con velocità media pari a 105 km/h (test attivo).





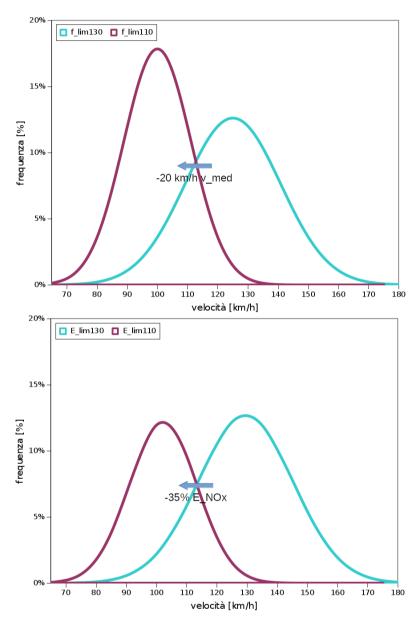


Figura 14: Distribuzioni in frequenza delle velocità dei veicoli leggeri in due ipotetici casi con velocità media pari a 130km/h e 110km/h e corrispondenti distribuzioni delle emissioni. Il pannello superiore è riferito alle velocità, quello inferiore alle concentrazioni.





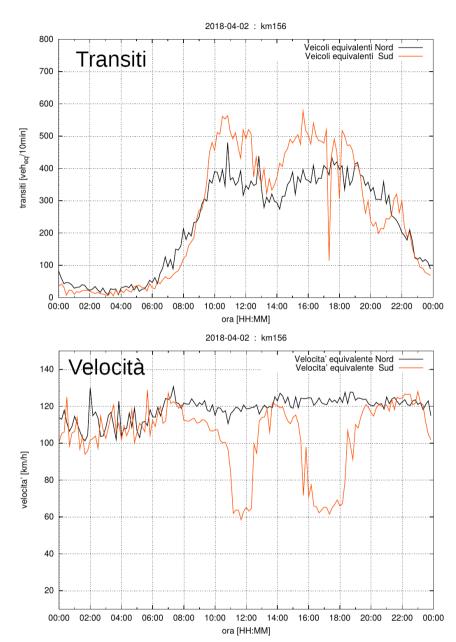


Figura 15: Andamento nel tempo del numero di veicoli equivalenti (pannello superiore) e della velocità equivalente (pannello inferiore) in un giorno di transito, come misurati dalla spira al km 156.





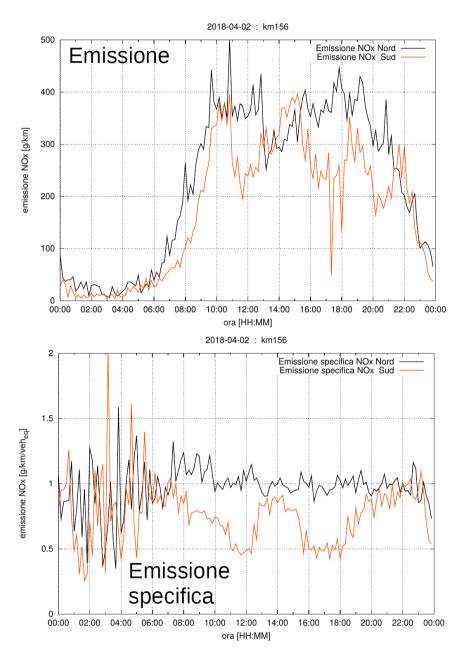


Figura 16: Andamento nel tempo delle emissioni totali (pannello superiore) e della emissione specifica (pannello inferiore) in un giorno di transito, come calcolate a partire dai dati misurati.





3. Valutazione degli effetti della riduzione dinamica della velocità a fini trasportistici (cenni)

I dati a disposizione del progetto consentono di effettuare anche interessanti valutazioni di tipo trasportistico sull'arteria stradale considerata. La capacità stradale è in genere definita da tre principali fattori: la velocità di transito, la densità di transito e la portata stradale. Queste tre grandezze possono essere rappresentate a coppie ottenendo le curve riportate nelle Figure 17, 18 e 19. Tali curve sono caratteristiche del tratto di strada analizzato e dipendono dal tipo di strada considerata, dalla sua geometria e dal tipo di traffico transitante. L'indicatore di sintesi che raggruppa le informazioni su queste tre grandezze è detto livello di servizio: tale indicatore può assumere valori da A, cui corrisponde traffico scorrevole, fino ad F, cui corrisponde un flusso a stop&go.

L'analisi della curva portata – velocità (Q-v), in particolare, consente di dedurre che:

- esiste una velocità ottimale di transito, per la quale la strada ha massima portata/capacità;
- per le tratte di A22 considerate la velocità ottimale è pari a circa 80 km/h con portata pari a circa 3400 veh/h per carreggiata;
- la parte sul piano Q-v ottimale per il funzionamento dal punto di vista trasportistico è quella in alto a destra rispetto al massimo della curva, nel quale sia hanno velocità e capacità elevate;
- l'ottimizzazione del transito può essere ottenuta spostando la curva della portata in funzione della velocità verso destra ovvero verso velocità maggiori.

In Figura 20 si presentano le curve interpolate a partire da dati misurati durante fasi di test di riduzione dinamica della velocità realizzate nel tratto ridotto BLEC-ENV (Trento Sud – Rovereto Sud) in condizioni di traffico da "bollino": in rosso le curve dei test con Q_{max} minore di 2500 [veh_{eq}/h], in giallo i test con Q_{max} compresa fra 2500 e 3000 [veh_{eq}/h] e in verde i test con Q_{max} maggiore di 3000 [veh_{eq}/h]. I punti di Figura 20 rappresentano i dati misurati che, come mostrato, si dispongono sulle curve teoriche e si spostano verso destra quando il test è attivo, a dimostrazione dell'efficacia potenziale associata a questo tipo di misura.





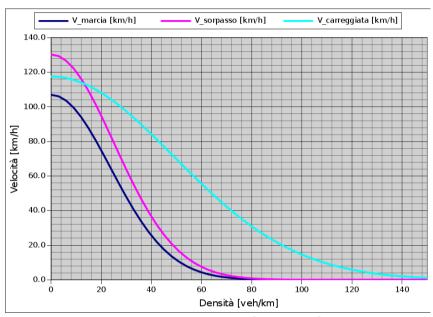


Figura 17: Curve caratteristiche densità-velocità delle sezioni di A22 analizzate.

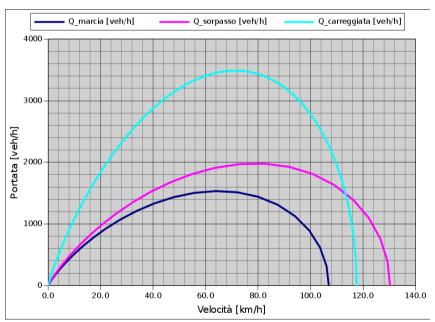


Figura 18: Curve caratteristiche velocità-portata delle sezioni di A22 analizzate.





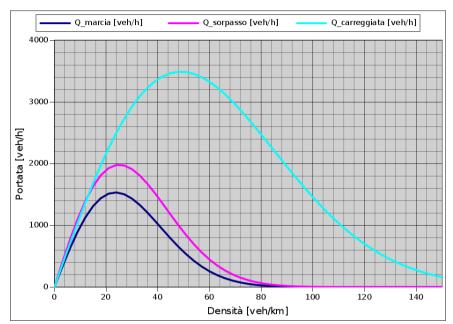


Figura 19: Curve caratteristiche densità-portata delle sezioni di A22 analizzate.

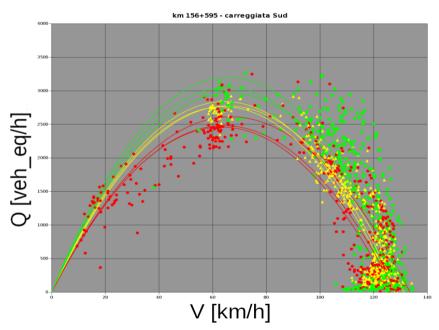


Figura 20: Curve caratteristiche velocità-portata alla chilometrica 156 e dati misurati in diverse condizioni di traffico