

TESI DI DOTTORATO

di

Giulia Del Serrone



**Analisi di
Floating Car Data (FCD)**

per lo studio delle velocità praticate dagli utenti negli
elementi del tracciato stradale

Analisi di Floating Car Data (FCD) per lo
studio delle velocità effettivamente
assunte dagli utenti nei diversi elementi
compositivi un tracciato planimetrico

Dottoranda
Giulia Del Serrone

Relatore
Prof. Ing. Giuseppe Cantisani



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Indice

Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	8
1 Introduzione.....	9
2 Stato dell'arte	15
2.1 Esigenze di sicurezza per le infrastrutture stradali	15
2.1.1 Gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali.....	17
2.2 Analisi della letteratura scientifica.....	23
2.2.1 Road design consistency.....	23
2.2.2 Geometria dei tracciati e algoritmi di fitting ..	32
2.2.3 Raccolta dati di traffico e modelli di velocità operativa	39
2.3 Tecnologie innovative per l'analisi e la gestione della circolazione stradale.....	46
2.3.1 Nuovi metodi per l'acquisizione di dati di velocità	46
3 Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti	57
3.1 Geometrizzazione delle strade esistenti.....	65
3.2 Costruzione del diagramma delle curvature.....	78

3.3	Costruzione del diagramma delle velocità.....	80
4	Analisi dei dati di velocità di percorrenza	82
4.1	Map matching	87
4.2	Filtraggio dei dati	95
5	Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati.....	101
5.1	Ricerca delle condizioni ideali	102
5.1.1	Flusso libero	102
5.1.2	Condizioni metereologiche favorevoli: analisi della piovosità.....	113
5.2	Definizione dell'andamento delle velocità lungo gli elementi compositivi un tracciato.....	118
6	Risultati e analisi dei risultati	122
6.1	Confronto fra velocità operative v_{85} e velocità di progetto v_p	122
6.1.1	Incidentalità.....	129
6.1.2	Modelli di velocità operativa per i rettifili.....	131
6.1.3	Limiti di velocità	134
6.2	Analisi dell'andamento delle velocità lungo il tracciato.....	137

7	Conclusioni.....	140
	APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche.....	147
	APPENDICE B-Circle fitting.....	147
	APPENDICE C-Map Matching.....	179
	APPENDICE D-Analisi delle centraline.....	188
	APPENDICE E-Analisi FCD.....	191
	APPENDICE F-Analisi delle velocità.....	195
	Bibliografia.....	199

Indice delle figure

<i>Figura 1 - Il ciclo complessivo delle attività del processo di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali - “Linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali”, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2 - Le attività della prima parte della macrofase ANALISI RETE - “Linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali”, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3 - Esempio di circle fitting ai minimi quadrati.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4 - Elementi geometrici per il calcolo del CCR [80].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5 - Esempio di diagramma della somma progressiva delle deviazioni angolari planimetriche α in funzione dello sviluppo del tracciato [80].....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 6 - Schema semplificato dell’invio e ricezione del segnale GPS per la raccolta di Floating Car Data.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 7 - Incidenti stradali, morti e feriti per categoria di strada. Fonte Istat (2018)</i>	<i>59</i>
<i>Figura 8 - Rappresentazione geografica della rete viaria gestita da ANAS S.p.A. al 28/10/2019</i>	<i>60</i>
<i>Figura 9 - Rientro strade ex statali e provinciali trasferite alla gestione di ANAS S.p.A.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 10 - Messa a punto del catasto stradale ad opera di ANAS S.p.A.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 11 - Contestualizzazione della strada statale 4 – Via Salaria.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 12 - Grafo della S.S.4 da A a B.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 13 - Esempio di rappresentazione di angolo di deviazione rispetto al Nord.....</i>	<i>69</i>

Indice delle figure

<i>Figura 14 - Andamento dell'angolo di deviazione e delle quote lungo il tracciato dell'S.S.4</i>	<i>70</i>
<i>Figura 15 - Esempio di tecnica di smoothing ottenuta per mezzo dell'applicazione di un filtro "passa basso"</i>	<i>71</i>
<i>Figura 16 - Andamento dell'angolo di deviazione lungo le progressive, rispetto al filtro a media mobile di tipo sgolayfilt della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km</i>	<i>72</i>
<i>Figura 17 - Individuazione dei punti di inizio e fine dei tratti di rettilineo e dei punti di flesso della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 18 - Circonferenze degli archi di curva appartenenti alla S.S.4</i>	<i>77</i>
<i>Figura 19 - Esempio di circle fitting ai minimi quadrati per il calcolo di centro e raggio di una circonferenza</i>	<i>78</i>
<i>Figura 20 - Diagramma delle curvature della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km</i>	<i>79</i>
<i>Figura 21 - Diagramma delle velocità della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km</i>	<i>81</i>
<i>Figura 22 - Esempio di 50000 HCD risalenti a gennaio 2017.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 23 - Poligono approssimante la linea d'asse del tracciato S.S.4</i>	<i>88</i>
<i>Figura 24 - Quadrilatero a maglie per il processo di map matching sulla S.S.4.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 25 - Rappresentazione esemplificativa del metodo point-to-curve</i>	<i>91</i>
<i>Figura 26 - Rappresentazione di un campione limitato dei dati proiettati sul grafo.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 27 - Suddivisione degli HCD in direzione AB, BA e NO dir. sulla S.S.4</i>	<i>93</i>

Indice delle figure

<i>Figura 28 - Esempio di confronto fra HCD e diagramma delle velocità per la S.S.4 in direzione AB.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 29 - Esempio di confronto fra HCD e diagramma delle velocità per la S.S.4 in direzione BA.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 30 - Comune di Monterotondo attraversato dalla S.S.4</i>	<i>97</i>
<i>Figura 31 - Strada Statale 4 Via Salaria - galleria Colle Giardino, nel comune di Rieti - imbocco nord della canna in direzione sud (Roma)</i>	<i>99</i>
<i>Figura 32 - Rappresentazione su QGIS di tutti i punti di inizio e fine delle gallerie, dei centri abitati e dei tratti di strada a carreggiate separate.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 33 - Localizzazione dei sensori sul territorio nazionale - ANAS S.p.A.</i>	<i>103</i>
<i>Figura 34 - Stazione 66 – Centralina esterna alla carreggiata (S.S.4).....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 35 - Stazione 1046 – Centraline su portale (S.S.4)</i>	<i>106</i>
<i>Figura 36 - Localizzazione delle centraline lungo la S.S.4</i>	<i>107</i>
<i>Figura 37 - Diagramma fondamentale della centralina 1046 dir. AB gennaio-febbraio</i>	<i>108</i>
<i>Figura 38 - Giorno feriale tipo della S.S.4 in direzione AB</i>	<i>109</i>
<i>Figura 39 - Giorno festivo tipo della S.S.4 in direzione AB</i>	<i>109</i>
<i>Figura 40 - Distinzione tra flussi liberi e congestionati dir. AB gennaio-febbraio centralina 1046</i>	<i>111</i>
<i>Figura 41 - Dimensione del campione nel tempo – Flussi liberi e congestionati</i>	<i>111</i>
<i>Figura 42 - Localizzazione dei pluviometri disponibili per la S.S.4</i>	<i>115</i>
<i>Figura 43 - Piovosità (mm/giorno) nei mesi compresi fra agosto 2016 e febbraio 2017 nelle stazioni pluviometriche adiacenti la S.S.4</i>	<i>117</i>
<i>Figura 44 - Esempio di smoothing spline</i>	<i>119</i>

Indice delle figure

<i>Figura 45 - Esempio di interpolazione cubic spline</i>	<i>120</i>
<i>Figura 46 - Confronto V_{85} (FFS+dry) - velocità teoriche per la S.S.4 in dir. AB</i>	<i>123</i>
<i>Figura 47 - Confronto V_{85} (FFS+dry) - velocità teoriche per la S.S.4 in dir. BA</i>	<i>123</i>
<i>Figura 48 - Confronto V_{85} FFS / V_{85} FFS+dry S.S.4 dir. AB.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 49 - Confronto V_{85} FFS / V_{85} FFS+dry S.S.4 dir. BA.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura 50 - Confronto fra HCD, v_{media} e fuso dato dagli scarti sulla S.S.4 in dir. AB</i>	<i>127</i>
<i>Figura 51 - Confronto fra HCD, v_{media} e fuso dato dagli scarti sulla S.S.4 in dir. B.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 52 - Dati di incidentalità forniti da ISTAT</i>	<i>130</i>
<i>Figura 53 - Confronto limiti di velocità, velocità operative e diagramma teorico</i>	<i>136</i>
<i>Figura 54 - Andamento delle velocità con cubic spline per la S.S.4 in dir. AB.....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 55 - Andamento delle velocità con cubic spline per la S.S.4 in dir. BA</i>	<i>138</i>
<i>Figura 56 - Comparazione fra V_{media} e andamento delle velocità tramite cubic spline sulla S.S.4</i>	<i>139</i>

Indice delle tabelle

<i>Tabella 1 - Rete viaria di interesse nazionale direttamente gestita da ANAS S.p.A.</i>	<i>61</i>
<i>Tabella 2 - Indicazioni relative a ciascun vertice compositivo del grafo</i>	<i>69</i>
<i>Tabella 3 - Indicazioni relative ai rettifili.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabella 4 - Indicazioni relative alle circonferenze</i>	<i>76</i>
<i>Tabella 5 - Esempio di informazioni derivanti da un campione di HCD</i>	<i>86</i>
<i>Tabella 6 - Distribuzione nei mesi di indagine della numerosità del campione HCD.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabella 7 - Numerosità del campione HCD in base alla direzione di marcia</i>	<i>93</i>
<i>Tabella 8 - Informazioni sui centri abitati disponibili sul sito Anas</i>	<i>96</i>
<i>Tabella 9 - Dati forniti da ANAS S.p.A. relativi alle gallerie presenti sulla S.S.4</i>	<i>98</i>
<i>Tabella 10 - Esempio di dati di traffico provenienti da una centralina ANAS sulla S.S.4</i>	<i>107</i>
<i>Tabella 11 - Fasce orarie di congestione del traffico della S.S.4.....</i>	<i>113</i>
<i>Tabella 12 - Indici di estremi–Precipitazione / WMO–Commission for Climatology</i>	<i>114</i>
<i>Tabella 13 - Elenco dei pluviometri disponibili per la S.S.4</i>	<i>115</i>
<i>Tabella 14 - Informazioni sulle velocità di alcuni elementi planimetrici delle S.S.4.....</i>	<i>126</i>
<i>Tabella 15 - Indicazioni del catasto della segnaletica verticale indicante i limiti di velocità per la S.S.4.....</i>	<i>135</i>

1 Introduzione

Negli ultimi decenni si è riscontrato un forte aumento della mobilità stradale, a servizio di utenti con caratteristiche fisiche proprie – quali ad esempio genere ed età – e capacità attitudinali alla guida molto diverse fra loro. Si è notato infatti che i comportamenti degli automobilisti all'interno delle correnti di traffico differiscono considerevolmente gli uni dagli altri, ad esempio in termini di velocità di guida adottate, di tempi di azione e reazione o di traiettorie seguite.

Di contro, l'impostazione progettuale dell'infrastruttura stradale, secondo la normativa tecnica [1], prevede che il progetto geometrico sia sviluppato sulla base dell'assunzione di un intervallo di velocità di progetto, che implicherebbe altresì un comportamento "di progetto" da parte dei guidatori, ossia corrispondente a caratteristiche deterministiche e standardizzate. Tale impostazione, nella realtà, potrebbe risultare ben lontana dalla descrizione reale dei fenomeni su strada.

Questa contraddizione concettuale, già molto evidente nel caso delle nuove strade, risulta ancor più amplificata nel caso di infrastrutture esistenti, il cui tracciato geometrico risale a epoche lontane nel tempo ed era stato a suo tempo determinato sulla base di altre regole progettuali o, addirittura, in ragione dei soli vincoli presenti nel territorio. In tali circostanze, le modalità d'uso correnti

Capitolo 1

dell'infrastruttura possono risultare fortemente difformi da quelle che, la pratica tecnica odierna, considera sicure ed efficaci, per lo meno su base convenzionale.

Per questo motivo si è deciso di porre l'attenzione sulla valutazione delle condizioni di sicurezza delle strade in esercizio, al fine di identificarne le caratteristiche tecniche, geometriche e funzionali che possono indurre problemi alla circolazione stradale e contribuire al verificarsi di condizioni critiche pre-incidentali; un tale approfondimento può essere evidentemente finalizzato, in un secondo tempo, a individuare, definire e programmare i più appropriati interventi di riqualificazione della viabilità.

La valutazione è stata effettuata attraverso una comparazione, sia quantitativa sia qualitativa, tra le velocità di marcia praticate dagli utenti (condizione sperimentale) e le velocità convenzionali dedotte dalla ricostruzione delle caratteristiche geometriche delle strade esaminate e dall'applicazione, a posteriori, del modello normativo per la costruzione del diagramma delle velocità (modello teorico). Nel corso dell'attività, è risultato anche possibile effettuare un'analisi critica dei modelli teorici che, basandosi su condizioni ideali, non prendono in considerazione né la presenza del traffico né le condizioni ambientali.

Per mezzo della reciproca comparazione, sia tra le velocità di marcia (velocità operative) sia tra le velocità teoriche (velocità di

Introduzione

progetto), è stato inoltre possibile valutare la *road consistency* dei tronchi stradali esaminati, ossia la “consistenza” dei tracciati, che rappresenta in un certo senso la corrispondenza dell’infrastruttura alle aspettative dell’utente. Infatti, la consistenza assicura che gli elementi geometrici posti in successione lungo un tracciato siano opportunamente coordinati, così da favorire prestazioni di guida del conducente armoniose e omogenee ed evitare modifiche inaspettate o improvvise dell’andamento della marcia veicolare. Quando la differenza fra i valori delle velocità assunte dagli utenti e i valori delle velocità di progetto è molto elevata, bisogna ricercarne le cause negli elementi componenti la geometria stradale. È stato evidenziato, infatti, che i conducenti commettono meno errori alla guida quando incontrano sul loro percorso caratteristiche geometriche conformi alle loro previsioni.

L’obiettivo principale di questo studio, pertanto, è consistito nella definizione di una metodologia in grado di valutare preventivamente – ossia dall’esame delle caratteristiche geometriche e operative dei tronchistradali, e non sulla base dell’incidentalità riscontrata – le condizioni di sicurezza delle strade extraurbane a unica carreggiata. La scelta del campione di rete stradale da analizzare è ricaduta su strade gestite direttamente da ANAS S.p.A., poiché in tale ambito ricade circa il 90% delle strade statali italiane. La Società ha fornito il grafo stradale della rete gestita, ottenuto da Rilievi ad Alto

Capitolo 1

Rendimento (RAR), tramite le cui coordinate geografiche tridimensionali è stato possibile ricostruire l'andamento geometrico e in particolare il diagramma delle curvature delle strade in esame. Successivamente è stato applicato il modello teorico per la costruzione del diagramma delle velocità di ciascuna strada esaminata.

Ottenuto l'andamento delle velocità di progetto, questo è stato messo a confronto con dati di velocità reali georiferiti, raccolti per intervalli temporali o spaziali costanti da una flotta di veicoli sonda immersi nei flussi di traffico, e registrati in un centro di elaborazione. Si tratta dei cosiddetti *Floating Car Data* (FCD), ossia dati provenienti da sensori satellitari e relativi a veicoli "fluttuanti" nel traffico. Gli FCD appartengono al novero dei *Big Data*, ossia a un contesto scientifico e tecnologico di grande attualità e interesse, e costituiscono un approccio innovativo al problema della raccolta dei dati riguardanti l'andamento dei flussi veicolari (con particolare riferimento alle velocità praticate), al fine di consentire la costituzione di basi di dati registrati in molteplici e svariate condizioni di traffico, ambientali e locali.

Gli FCD utilizzati in questo studio sono stati raccolti da una società di gestione di dati telematici che, per finalità essenzialmente assicurative, serve un parco veicolare corrispondente a circa il 2% dei veicoli circolanti in Italia. I dati sono stati successivamente associati ai vari tracciati e filtrati per escludere dalle analisi i tratti di strada

Introduzione

ricadenti in ambito urbano, all'interno di gallerie o a carreggiate separate.

Per confrontare le velocità operative con le velocità teoriche, sono state ricercate le condizioni di flusso libero, che presuppongono che l'utente viaggi alla velocità desiderata non essendo in tal senso influenzato dalla presenza di altri veicoli o da dispositivi di regolazione del traffico, quali semafori, rotatorie o segnali di stop. Dato che la conoscenza delle informazioni provenienti dai Floating Car Data non è sufficiente a conoscere i volumi di traffico nel quale l'utente è immerso, è stato necessario richiedere altri dati all'Osservatorio del Traffico di ANAS S.p.A., ottenuti da una rete di sensori a microonde e spire induttive, posizionati su oltre 1150 sezioni di rilevamento su tutta la rete nazionale gestita da ANAS, che registrano le informazioni dei passaggi veicolari e a intervalli di 5 minuti e le inviano alla centrale PANAMA (Piattaforma ANAs Per il Monitoraggio e l'Analisi). Sono state quindi identificate le fasce orarie di flusso libero per i vari tronchi stradali in esame.

Successivamente, al fine di considerare esclusivamente i dati di velocità registrati in buone condizioni meteo, sono stati esclusi dall'analisi i giorni con piovosità significativa, come definiti tramite l'indice R10 (giorni dell'anno con precipitazione maggiore o uguale a 10 mm).

Capitolo 1

I risultati ottenuti dall'analisi dei tracciati stradali riguardano, principalmente, due differenti aspetti delle velocità praticate dagli utenti:

- lo studio del comportamento tipico degli utenti lungo i tracciati in esame, in termini di andamento delle velocità all'interno dei diversi elementi compositivi, ottenuto per mezzo di interpolazione alle *cubic spline* dei dati di velocità proiettati lungo le ascisse curvilinee dei tracciati studiati;

- il confronto fra le velocità operative (85esimo percentile delle velocità praticate in condizioni ideali) e le velocità teoriche desunte dal diagramma delle velocità.

Da tali comparazioni si è evidenziato che le velocità non risultano sempre costanti all'interno degli elementi a curvatura costante, bensì presentano andamenti in accelerazione e decelerazione, e che esistono diverse situazioni in cui le differenze di velocità (sia fra velocità teoriche e velocità operative, sia nell'andamento delle velocità operative fra elementi geometrici posti in successione), sono molto evidenti: tali zone possono essere perciò classificate, in termini di priorità, al fine di pianificare in maniera ordinata ed efficiente le ispezioni sul campo necessarie per le attività di analisi della sicurezza delle infrastrutture e guidare le conseguenti attività di riqualificazione della viabilità.

2 Stato dell'arte

2.1 Esigenze di sicurezza per le infrastrutture stradali

Per garantire un miglioramento della sicurezza delle strade esistenti, definendo interventi di potenziamento e adeguamento della rete, resi necessari dalle mutate condizioni d'uso delle strade e dalle riscontrate situazioni di elevata incidentalità, il sistema stradale va analizzato nel suo complesso, indagando le relazioni esistenti tra i diversi elementi componenti il sistema stesso: uomo, veicolo, ambiente e infrastruttura. Al fine di garantire la massima sicurezza possibile, un progettista deve assicurarsi che l'infrastruttura possa garantire una valida interazione con veicoli affidabili guidati da conducenti capaci e coscienti.

Gli incidenti stradali sono eventi complessi che coinvolgono diverse variabili tra le quali la geometria della strada, i limiti di velocità, le condizioni ambientali -intese specialmente come condizioni meteorologiche e di illuminazione- e il comportamento dei guidatori. Tra tutti, il guidatore ha una primaria funzione di controllo del sistema di guida in quanto è l'unico elemento che può adattare il suo comportamento di guida sia all'ambiente circostante sia alle condizioni della circolazione stradale, in funzione del veicolo guidato, dell'infrastruttura e delle condizioni ambientali che si trova a

Capitolo 2

percorrere. Per questo motivo, spesso, sono a esso riconducibili le cause principali del verificarsi di eventi incidentali, quando si manifesta un comportamento di guida non corretto. Ma è anche l'unico elemento non facilmente modellabile e interpretabile in quanto, molto spesso, il suo comportamento è dettato da scelte per lo più soggettive e non individuabili a priori.

Per questo si può affermare che una corretta percezione da parte del guidatore delle informazioni, geometriche e operative, dell'infrastruttura stradale riveste un ruolo molto importante nello studio della sicurezza e del fenomeno incidentale. Non è possibile attribuire al guidatore un ruolo passivo di mero rispetto delle ipotesi assunte dal progettista, ma bisogna analizzare più nel profondo le relazioni che intercorrono fra utente e infrastruttura e fra utente e utente. Un approccio verso la progettazione e il funzionamento dell'infrastruttura stradale più incentrato sull'utente (cd. *driver-centered approach*) promuoverà continui miglioramenti nella sicurezza stradale.

Quindi, la ricerca di un metodo in grado di consentire un attento esame del funzionamento della rete stradale per determinarne i fattori di rischio, dedurne le criticità ed eseguire analisi di incidentalità risulta di fondamentale importanza, per poter programmare al meglio gli interventi di adeguamento e manutenzione.

2.1.1 Gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali

Da un punto di vista normativo, per effettuare valutazioni di sicurezza della rete stradale esistente in Italia sin da lungo tempo è stata emanata la Circolare 8 giugno 2001 n.3699 [2]. Secondo la circolare, *“è necessaria una verifica preventiva della sicurezza stradale, riconoscendo e valutando le condizioni di rischio potenziale per la circolazione stradale con particolare attenzione al punto di vista dell'utente della strada. Anche per i progetti di nuove infrastrutture, il rispetto delle norme previste per la progettazione e la costruzione delle stesse, pur se necessario non è però sufficiente per garantire che un processo complesso e multidisciplinare, quale è un progetto stradale, finalizzato a definire la soluzione che meglio riesce a soddisfare le diversificate e a volte contrastanti esigenze, riesca a valutare adeguatamente gli aspetti specificamente connessi con la sicurezza della circolazione.”* Risulta altresì fondamentale *“valutare la coerenza dell'ambiente stradale nel suo insieme e correggere anche situazioni che pur non avendo dato luogo a concentrazione di incidenti statisticamente significativa costituiscono fattori di pericolo che è conveniente rimuovere o mitigare”*.

Più recentemente, a livello europeo, è stata emanata la Direttiva 2008/96/CE sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali [3], al fine di *“istituire e attuare procedure relative alle valutazioni di impatto sulla sicurezza stradale, ai controlli sulla sicurezza stradale, alla gestione della*

Capitolo 2

sicurezza della rete stradale e alle ispezioni di sicurezza da parte degli Stati membri”, nei riguardi della rete transeuropea dei trasporti.

L’obiettivo della direttiva è quello di diminuire in maniera drastica gli incidenti sulla rete TEN-T, individuando le sezioni ad elevata incidentalità e mettendo in atto procedure di messa in sicurezza delle stesse, avvisando gli utenti del possibile pericolo cui potrebbero andare incontro nel percorrerle, in modo da far adeguare loro il comportamento attraverso un rispetto più attento del codice della strada.

Tale direttiva è stata recepita a livello nazionale dal Decreto Legislativo n. 35 del 15/03/2011 “Attuazione della direttiva 2008/96/CE sulla gestione della sicurezza delle infrastrutture” [4] nella quale si prevedeva l’emanazione di una serie di decreti attuativi da parte del Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Il decreto suindicato detta disposizioni sull’istituzione e l’attuazione di procedure per la valutazione di impatto sulla sicurezza stradale per i progetti di infrastrutture nuove nonché ai controlli della sicurezza stradale, alla gestione della sicurezza della rete stradale e alle ispezioni di sicurezza:

- PIANIFICAZIONE

Road Safety Impact Assesment - Valutazione d’impatto sulla sicurezza stradale

Stato dell'arte

- PROGETTO

Road Safety Audit - Controlli della sicurezza stradale in fase di progettazione

- GESTIONE

Network Safety Management - Classificazione e gestione della sicurezza periodica della rete stradale

Road Safety Review/Inspection - Ispezioni di sicurezza sulle strade esistenti.

Il decreto “si applica alle strade che fanno parte della rete stradale transeuropea, siano esse in fase di pianificazione, di progettazione, in costruzione o già aperte al traffico. A decorrere dal 1° gennaio 2016 la disciplina contenuta nel presente decreto si applica anche alle strade appartenenti alla rete di interesse nazionale non comprese nella rete stradale transeuropea, siano esse, a quella data, in fase di pianificazione, di progettazione, in costruzione o già aperte al traffico. Entro e non oltre il 31 dicembre 2020, le regioni e le province autonome, nel rispetto dei principi stabiliti dal presente decreto, dettano la disciplina riguardante la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali di competenza delle regioni e degli enti locali, con particolare riferimento alle strade finanziate a totale o parziale carico dell’Unione europea”.

Il 2 maggio 2012 con Decreto Ministeriale numero 137 sono state altresì emanate le “Linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali” [5] con la finalità di orientare, coordinare e

Capitolo 2

rendere omogenee le attività di tutti i soggetti coinvolti nel processo della sicurezza delle infrastrutture stradali. Il processo descritto dalle linee guida si avvia con un'attenta analisi della rete, cui seguono le ispezioni da effettuarsi nelle sezioni critiche dell'infrastruttura al fine di classificare le priorità di intervento sulla rete. Tali attività sono riassumibili nel ciclo rappresentativo del processo di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali, come di seguito rappresentato in Figura 1:



Figura 1 - Il ciclo complessivo delle attività del processo di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali - "Linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali", Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

La prima macrofase è l'analisi della rete descritta in dettaglio in Figura 2. Essa porta a ripartire e riconoscere i tratti caratterizzati da

un'elevata concentrazione di incidenti e di conseguenza alla classificazione della sicurezza della rete esistente.



Figura 2 - Le attività della prima parte della macrofase ANALISI RETE - “Linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali”, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Questo lavoro di ricerca si rivolge proprio a questa prima fase, avendo l'intento di analizzare le caratteristiche geometriche e funzionali dell'infrastruttura, e individuare le sezioni stradali omogenee classificandone i tratti in base ai diversi livelli di sicurezza.

All'interno di una strategia globale di gestione della sicurezza da mettere in atto per aumentare l'affidabilità della rete stradale, nasce il concetto di analisi preventiva di sicurezza delle strade in esercizio, che si pone l'obiettivo di identificare le caratteristiche tecniche, geometriche e funzionali delle infrastrutture che possono contribuire al verificarsi di incidenti [6].

In quest'ottica, risulta opportuno porre l'attenzione sull'idea di prevenzione dell'incidentalità: non si eseguono analisi post incidente ma si vanno a studiare situazioni anomale, quelle in cui ad esempio le velocità adottate dai guidatori differiscono di molto da quanto previsto in fase di progetto, che potrebbero portare problemi alla circolazione stradale [7] e [8]. Di conseguenza, l'analisi preventiva non può

Capitolo 2

considerarsi sostitutiva della tradizionale ricerca dei *black spots* e, più in generale, di incidentalità lungo un'arteria stradale, ma ne vuole rappresentare un completamento, in quanto ricerca situazioni a rischio di incidente laddove l'evento potrebbe non essere ancora avvenuto.

La valutazione preventiva della sicurezza, infatti, non deve risultare un'azione di verifica isolata dall'analisi più generale dell'incidentalità, bensì deve essere di ausilio per programmare interventi di riqualificazione della viabilità, in un approccio sistematico di verifica della sicurezza del patrimonio stradale esistente [9]. Tale valutazione può essere intesa come fase preliminare da attuare all'interno di un processo di gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali al quale possono seguire livelli di approfondimento successivi, una volta definiti, ad esempio, degli indici di *performance* per lo studio della rischiosità stradale [10].

Per far questo, l'analista si pone come obiettivo la valutazione della sicurezza del progetto stradale per correggere quelle situazioni che, seppur non abbiano comportato una concentrazione statisticamente significativa di incidenti, possono risultare pericolose e devono quindi essere eliminate o attenuate.

La maggior parte della rete stradale esistente, la cui progettazione è antecedente alle innovazioni normative riguardanti la geometria stradale degli ultimi decenni del secolo scorso, risente di un notevole aumento della flotta circolante e delle prestazioni veicolari,

con una composizione del parco circolante che si è diversificata negli anni, e di una manutenzione della rete inesistente o insufficiente a soddisfare i nuovi requisiti di sicurezza del traffico. Quasi sempre la contromisura adottata per far arginare il crescente numero di incidenti è unicamente l'imposizione di limiti di velocità, recepiti senza considerarne razionalmente le conseguenze, che producono solamente un rallentamento del traffico veicolare con ritardi inaccettabili nei tempi di trasporto, senza ricavare gli sperati incrementi di sicurezza [11].

2.2 Analisi della letteratura scientifica

2.2.1 Road design consistency

Le valutazioni di sicurezza per le strade di nuova costruzione possono essere compiute secondo le indicazioni della normativa regolante la progettazione. In Italia, in particolare, il DM 2001 [1], riprendendo la classificazione delle strade stabilita nell'art.2 del Codice della Strada [12], definisce le caratteristiche costruttive, tecniche e funzionali di ciascun tipo di strada e in relazione a ciò impone prescrizioni per la progettazione degli elementi geometrici. La norma, infatti, assegna a ciascuna tipologia stradale funzioni, criteri di progettazione e dimensioni degli elementi componenti, sia l'asse sia la piattaforma, affinché la circolazione degli utenti ammessi si svolga in sicurezza e regolarmente. A ciascuna strada si associa un intervallo di velocità di progetto, compreso fra un limite inferiore -che corrisponde

Capitolo 2

alla velocità che può essere mantenuta da un veicolo mentre percorre elementi planoaltimetrici più restrittivi e vincolanti, come archi di curva o pendenze significative altimetriche - e un limite superiore - che corrisponde alla massima velocità che si può raggiungere in rettilineo orizzontale e dimensiona gli elementi meno vincolanti del tracciato-. Di conseguenza, si può assumere come velocità di progetto la velocità più alta che un utente può mantenere in sicurezza, a seconda dell'elemento che sta percorrendo, in condizioni favorevoli meteorologiche, di traffico e ambientali. Sotto tali condizioni, infatti, il guidatore è libero di mantenere la velocità di marcia desiderata, senza che il suo comportamento sia influenzato da avverse condizioni atmosferiche o di illuminazione o dalla presenza di altri veicoli lungo il suo tragitto. In condizioni di flusso libero, la circolazione di un determinato veicolo non è vincolata dalla presenza di altri veicoli e la scelta della velocità di guida riflette sia la risposta del conducente alle caratteristiche geometriche della strada, sia la percezione del rischio da parte del guidatore.

Anche altre normative stradali per la definizione della geometria, sia europee sia di diversi Paesi del mondo, utilizzano criteri di dimensionamento degli elementi plano altimetrici che suppongono costanti sia le velocità nei tratti a curvatura costante sia i valori di accelerazione e decelerazione che un utente adotta per variare la sua velocità di marcia [13]. Vengono proposti modelli teorici, per la

progettazione di strade nuove, utili alla costruzione dei diagrammi delle velocità, che descrivono l'evoluzione della velocità teorica lungo il tracciato.

La verifica della correttezza della progettazione comprende, in particolare, il controllo della *road consistency* o coerenza di progettazione. In questo senso, la coerenza di un tracciato rappresenta anche la capacità dell'infrastruttura di soddisfare le aspettative dell'utente e assicura che gli elementi geometrici posti in successione siano coordinati (al fine di produrre prestazioni del conducente armoniose e omogenee) e non provochino eventi inaspettati. Un'incoerenza nella progettazione, infatti, può essere descritta come una caratteristica geometrica o una combinazione di caratteristiche insolite che possono generare comportamenti di guida scorretti e, a volte, non sicuri.

La verifica della coerenza del tracciato (*road consistency*), viene effettuata verificandone l'omogeneità, ossia la sussistenza di una limitata differenza di velocità di progetto tra elementi planimetrici consecutivi caratterizzati da diversa curvatura.

Osservando il reale comportamento degli utenti su strada, però, ci si accorge che spesso il profilo delle velocità di progetto, definito secondo i suesposti criteri, non corrisponde al profilo delle velocità effettivamente assunte dagli utenti, evidenziando, molto spesso, valori di velocità praticata ben più elevati di quelli teorici e valori di

Capitolo 2

accelerazione e decelerazione non costanti e anche molto diversi da quelli nominali.

Di conseguenza, molte ricerche si sono proposte l'obiettivo di esplorare se e in che modo le caratteristiche geometriche della strada possano indurre elevati differenziali di velocità sia tra elementi stradali successivi [14] e [15], sia tra velocità teoriche e praticate [16], al fine di identificare preventivamente segmenti stradali potenzialmente poco sicuri.

Posto che le condizioni operative/di esercizio differiscono anche significativamente da quelle teoriche di verifica, si possono individuare gli scenari di massima criticità che si vengono a formare come combinazione di più variabili, quali ad esempio:

- Accelerazioni, velocità desiderate, composizione della flotta veicolare (veicoli leggeri e pesanti);
- Larghezza delle corsie, ampiezza dei raggi di curvatura, valori della sopraelevazione (avvicinamento o meno al limite di equilibrio dinamico in curva), stato della pavimentazione (ammaloramenti o asciutta/bagnata), valori della pendenza longitudinale;
- Problema sostanziale della presenza del traffico, comportamento dell'utente, esperienze pregresse;
- Elemento meteorologico, luminosità.

Esistono, quindi, variabili che devono essere tenute in conto per garantire una progettazione dell'infrastruttura stradale che si fonda sulla sicurezza dell'esercizio viario, quali le condizioni operative, le necessità e le aspettative degli utenti, i condizionamenti e le restrizioni imposte dalle interferenze veicolari. I diversi comportamenti degli utenti, infatti, sono condizionati non solo dalle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura, ma anche dai condizionamenti reciproci che i guidatori subiscono quando si trovano all'interno di flussi di traffico non riconducibili a condizioni di marcia isolata.

Ciò premesso, uno dei problemi generati dalla variabilità del comportamento degli utenti è capire in quale misura i valori di progetto indicati dalla normativa per le diverse categorie stradali, sotto l'ipotesi di veicolo isolato, siano rappresentativi del comportamento reale di guida.

Pertanto, un obiettivo essenziale della presente ricerca è consistito nel proporre e definire un metodo di valutazione della coerenza del tracciato stradale, attraverso l'analisi delle velocità reali degli utenti, che si determinano sotto diverse condizioni ambientali e di flusso, da comparare con le velocità teoriche di progetto.

Come detto, la coerenza di un tracciato si concretizza nella successione di elementi geometrici coordinati in maniera armoniosa, tali da non indurre eventi inaspettati, che possono generare comportamenti di guida scorretti da parte degli utenti.

Capitolo 2

Un esempio comune di improvviso cambiamento della composizione dell'asse stradale potrebbe identificarsi nella presenza di una curva circolare di piccolo raggio situata alla fine di un lungo tratto di rettilineo. Per curve di piccolo raggio, infatti, la velocità imposta dal D.M. 2001 [1] è costante e si calcola per mezzo delle condizioni di equilibrio dinamico in curva; per i rettilinei la velocità tende al limite superiore dell'intervallo di velocità di progetto caratteristico del tipo di strada studiato. Per questo motivo potrebbe risultare una differenza di velocità eccessiva tra i due elementi geometrici posti in successione.

Al fine di valutare la coerenza dei tracciati risultano utili le informazioni riguardanti l'infrastruttura (come la geometria stradale, le caratteristiche della pavimentazione, la segnaletica orizzontale e verticale presente e le condizioni ambientali), il volume di traffico (anche in termini di picchi orari e composizione veicolare) ed eventualmente l'incidentalità e risulta fondamentale legare le caratteristiche geometriche dell'infrastruttura alle velocità veicolari registrate lungo tutti gli elementi dell'infrastruttura.

I metodi più noti proposti in letteratura, per poter valutare la coerenza dei tracciati stradali, sono definiti sulla base dei tre criteri di sicurezza di Lamm, che definiscono anche tre diversi livelli di qualità del progetto (buono, discreto, non accettabile) [17] e [18]:

1. confronto fra l'analisi della velocità operativa (v_{85_i}), attraverso lo studio di modelli predittivi di velocità, di cui si discuterà nel

Stato dell'arte

seguito, e la velocità prevista in fase di progettazione (v_p) per ogni elemento geometrico attraversato (così facendo si relaziona la geometria stradale, da cui deriva l'andamento delle velocità di progetto, con le velocità attuate dagli utenti);

Valutazione	Differenza di velocità [km/h]
Buono	$ v_{85_i} - v_p \leq 10$
Accettabile	$10 \leq v_{85_i} - v_p \leq 20$
Non accettabile	$ v_{85_i} - v_p \geq 20$

2. confronto fra le velocità operative in due elementi geometrici che si susseguono ($v_{85_i}; v_{85_{i+1}}$) all'interno dell'allineamento orizzontale;

Valutazione	Differenza di velocità [km/h]
Buono	$ v_{85_i} - v_{85_{i+1}} \leq 10$
Accettabile	$10 \leq v_{85_i} - v_{85_{i+1}} \leq 20$
Non accettabile	$ v_{85_i} - v_{85_{i+1}} \geq 20$

3. confronto tra il coefficiente di attrito laterale assunto (f_{RA}) per la curva progettata con il coefficiente di attrito richiesto (f_{RD}) per il veicolo che sta percorrendo la curva alla velocità operativa.

Valutazione	Differenza di velocità [km/h]
Buono	$ f_{RA} - f_{RD} \leq 10$
Accettabile	$10 \leq f_{RA} - f_{RD} \leq 20$
Non accettabile	$ f_{RA} - f_{RD} \geq 20$

Capitolo 2

Per velocità operativa si intende l'85esimo percentile della distribuzione delle velocità praticate dagli utenti senza risentire del condizionamento dato dalla presenza di altri utenti sulla strada, in condizioni ambientali ottimali, con pavimentazione asciutta e condizioni metereologiche buone [19]. La velocità teorica, invece, è definita come la velocità di progetto che determina le caratteristiche geometriche del tracciato [20].

Quando la differenza fra i valori di velocità assunte dagli utenti e i valori di velocità di progetto è molto elevata, bisogna ricercarne le cause negli elementi compositivi la geometria stradale [21]. Larghezze eccessive delle corsie e delle banchine potrebbero portare, infatti, l'utente a impostare delle traiettorie i cui raggi di curva risultano essere sensibilmente maggiori dell'elemento che sta percorrendo, inducendolo ad affrontare la curva con una velocità ben maggiore di quella con cui è stato progettato l'elemento stesso [22], [23] e [24].

Altro fattore che ha dato evidenza sperimentale di apportare modifiche al comportamento degli utenti è l'andamento del profilo longitudinale: in condizioni di livellette molto pendenti le prestazioni dei veicoli possono diminuire, con la conseguenza di restituire valori di velocità inferiori a quanto ci si aspetterebbe andando a valutare il solo andamento planimetrico [25].

Un comportamento insolito degli utenti su strada si verifica, altresì, in condizioni metereologiche avverse e di scarsa illuminazione

[26], [27] e [28]. È stato, infatti, riscontrato che le autovetture hanno una velocità operativa fortemente influenzata dalle precipitazioni, in particolare in curva [29]. Oltre alle precipitazioni anche le condizioni notturne producono effetti significativi sulle velocità operative, provocandone marcati abbassamenti. Ecco perché nella definizione di velocità operativa si fa sempre riferimento a condizioni ideali di volumi di traffico medio-bassi e condizioni ambientali ottimali.

Le regole che guidano la progettazione stradale dovrebbero assicurare che un guidatore sia indotto spontaneamente ad adottare un comportamento alla guida congruente con le reali caratteristiche della strada. Si parla, in questi casi, di *"self-explaining roads"*, che vengono definite come quelle strade in cui i conducenti percepiscono il tipo di strada che stanno percorrendo e *"istintivamente"* sanno come comportarsi [30]. Dato che il comportamento del guidatore è direttamente correlato alla percezione dell'itinerario che sta seguendo, un progettista dovrebbe rendere la strada il più leggibile possibile, così da guidare l'utente nelle scelte comportamentali da adottare, idonee ad affrontare anche le situazioni più pericolose [31].

Questa ricerca si concentra, in particolare, sull'identificazione della geometria orizzontale e verticale delle strade oggetto di studio, il suo effetto sulle velocità attuate dagli utenti lungo il tracciato e le relative conseguenze sulla sicurezza.

2.2.2 Geometria dei tracciati e algoritmi di fitting

A fronte di quanto esposto finora, l'identificazione delle caratteristiche geometriche plano-altimetriche dei tracciati stradali rimane ancora oggi un argomento di grande interesse nell'ambito dell'ingegneria civile e dei trasporti, specialmente con l'obiettivo di eseguire analisi di sicurezza stradale e di comportamento del conducente.

Gli studi sulla coerenza della progettazione delle strade esistenti per essere eseguiti richiedono, infatti, dati idonei a rappresentare correttamente le caratteristiche geometriche delle infrastrutture; tali dati spesso non sono accessibili, non sono aggiornati o non hanno l'accuratezza e la precisione richiesta per eseguire l'analisi che si vuole compiere.

Frequentemente si pone il problema di non avere a disposizione banche dati stradali esaustive e dettagliate da poter consultare, né progetti aggiornati da poter esaminare, magari poiché questi risalgono a decine di anni prima dello studio. Per rispondere a tale necessità e acquisire informazioni riguardanti le caratteristiche geometriche, di composizione e di arredo funzionale dell'infrastruttura, nonché le relative condizioni di deflusso veicolare, l'analista si potrebbe trovare nella condizione di dover eseguire rilievi in sito. In generale, per ovviare alla mancanza di informazioni progettuali della rete stradale in esercizio, sono state impiegate molte energie nel campo della ricerca

per ricavare da diverse fonti la geometria degli elementi compositivi il tracciato. Si è cercato di ottenere informazioni riguardanti l'allineamento orizzontale e verticale sia da immagini georeferenziate aeree e satellitari, sia dalle mappe stradali dei sistemi di informazione geografica, sia da dati raccolti con sensori di posizionamento su sistemi e veicoli mobili.

Esistono, ad oggi, diverse tecniche di rilievo della geometria stradale che si possono suddividere - in base alla strumentazione utilizzata per procurarsi i dati - in statiche e dinamiche.

Tra i procedimenti statici si ricordano:

- metodi di acquisizione completamente automatizzati che estraggono i dati delle curve orizzontali direttamente dalle mappe stradali presenti in ambiente GIS [32] e [33] e [34];
- l'identificazione automatica della geometria stradale dai dati vettoriali digitali [35].

Tra quelli dinamici, invece, si segnalano:

- sistemi di rilevamento che utilizzano la tecnologia M.M.S. (Mobile Mapping System). Essi sono ampiamente apprezzati sia per la loro versatilità d'uso sia per i bassi costi operativi. In generale, gli M.M.S. sono costituiti da veicoli equipaggiati con diverse strumentazioni, opportunamente integrate tra loro: un ricevitore GPS, un sistema inerziale INS (Inertial Navigation System) e un odometro [36], [37], [38] e [39]. In un caso specifico è stato utilizzato il "*digital*

Capitolo 2

highway data vehicle'' (DHDV), attraverso cui sono stati misurati tre angoli di Eulero, la velocità di guida e l'accelerazione del veicolo utilizzato, per eseguire il rilievo in modo rigoroso [37]. Altro veicolo strumentato utilizzato per la raccolta di informazioni geometriche è stato il van ARAN (Automatic Road Analyzer), in grado di raccogliere dati anche dello stato della pavimentazione;

- ricevitori GPS montati su veicoli, che viaggiano a velocità pressoché costanti, strumentati con giroscopi verticali e girobussole in grado di fornire informazioni sulla posizione del veicolo (coordinate x , y , z) e sull'orientamento (angolo di inclinazione, rollio e imbardata) [40], [41], [42], [43] e [44]. In alcuni casi i posizionamenti veicolari sono stati registrati tramite smartphone [45].

Una volta ottenuti, con le diverse strumentazioni sopra descritte, i dati puntuali utili alla definizione della geometria stradale, nasce l'esigenza di sviluppare una procedura rapida ed economica che consenta di ottenere con sufficiente precisione la definizione geometrica dell'andamento planoaltimetrico dei tracciati.

Negli anni sono stati costruiti molteplici algoritmi in grado di identificare, in maniera più o meno automatizzata, gli archi di curva circolare e i rettili; il metodo che ha riscosso maggior successo è stato quello del *fitting* ai minimi quadrati dei vertici componenti la linea d'asse della strada.

L'algoritmo più diffusamente utilizzato riguarda il *circle fitting* ai minimi quadrati, agevolmente implementabile, in grado di stimare con un'elevata precisione raggio, angolo al centro e sviluppo dell'arco di curva, come si può notare in Figura 3, minimizzando i discostamenti fra la curva trovata e i punti originari [46].

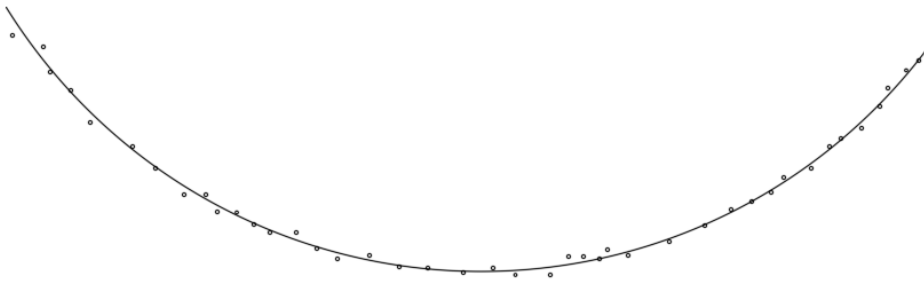


Figura 3 - Esempio di circle fitting ai minimi quadrati

Il metodo di regressione ai minimi quadrati è una tecnica volta a determinare una funzione analitica che approssimi un insieme di valori senza necessariamente passare per i punti che li rappresentano. Infatti, se i dati provengono da misure sperimentali e sono, quindi, affetti da errore di misura o dello strumento, oppure se la qualità del dato non è molto precisa (poche cifre significative), allora è opportuno approssimare ai minimi quadrati anziché interpolare. In particolare, la funzione trovata deve essere quella che minimizza la somma dei quadrati delle distanze tra i punti e la curva generata [47].

Capitolo 2

Come implementazione dell'algoritmo sopra richiamato, è nato anche un algoritmo iterativo di *circular fitting* ai minimi quadrati, che ricerca in maniera iterativa circonferenze approssimanti i dati disponibili, cambiando di volta in volta centro e raggio dell'arco, fino ad ottenere differenze le più piccole possibili fra i dati di input e l'output originato [40]. Altro metodo simile, utile per la ricerca dei parametri caratteristici delle curve orizzontali, è descritto tramite un metodo di calcolo di ogni cerchio che può essere costruito utilizzando tutte le terzine di punti non allineati, riducendo iterativamente la distanza tra il cerchio e l'insieme completo di punti, utilizzando un metodo di minimizzazione [48].

In generale gli algoritmi sviluppati tramite il metodo del *fitting* ai minimi quadrati hanno cercato di valutare l'attendibilità e l'accuratezza dei risultati ottenuti, tenendo conto degli errori dovuti alla strumentazione GPS di rilievo [44], [49] e [50]. Esiste anche un metodo di stima del raggio di curvatura del percorso di un veicolo che è stato brevettato e che sfrutta la tecnica dei minimi quadrati [51].

Per la misurazione del raggio sono stati utilizzati anche altri approcci definiti per mezzo di dati raccolti da unità di misura inerziali montate su veicoli equipaggiati circolanti su strada, tra i quali: il metodo cinematico, il metodo della geometria, il metodo di accelerazione trasversale e il metodo di offset della corda [37] e [52]:

- Il metodo cinematico prevede di utilizzare i valori di velocità longitudinale (v) e accelerazione centrifuga (a) ottenuti direttamente dal data-set fornito dal veicolo, secondo la seguente formula:

$$R = \frac{v^2}{a};$$

- Il metodo della geometria prevede di approssimare linearmente la traiettoria del veicolo tra un punto di misura e il successivo – linearizzazione resa possibile data l'alta frequenza di campionamento dei dati- e di calcolare il raggio della curva tramite il reciproco della curvatura:

$$R = \frac{[1 + (\frac{dy_i}{dx_i})^2]^{3/2}}{\frac{d^2y_i}{dx_i^2}};$$

- Il metodo dell'accelerazione trasversale utilizza i dati di sopraelevazione, coefficiente di aderenza trasversale e velocità per il calcolo del raggio corrispondente:

$$R = \frac{v^2}{127(q + f_t)};$$

- In base al metodo di offset della corda, la lunghezza della corda (L) e l'offset tra la corda e il punto medio dell'arco (freccia M) vengono misurati attraverso la traiettoria del veicolo per calcolare il raggio della curva:

$$R = \frac{L^2}{8M} + \frac{M}{2}.$$

Capitolo 2

Per l'identificazione dei punti di inizio e fine degli archi di curva circolare, invece, sono stati studiati gli andamenti degli angoli azimutali ed è stata determinata una loro variazione lineare [37] e [52].

Diversi autori hanno utilizzato un metodo per ricreare la geometria stradale, completamente diverso da quanto esposto fino ad ora; tale metodo prevede l'interpolazione dei dati grezzi, acquisiti per identificare l'andamento del tracciato, tramite *splines* [41], [42], [53] e [54].

L'individuazione dei parametri identificativi delle curve circolari ha riscosso per molti anni un grande interesse da parte della comunità scientifica, più di quello dimostrato per gli altri elementi planimetrici del tracciato quali rettifili e, dove presenti, archi clotoidici. Gli archi di curva, infatti, sono gli elementi la cui progettazione risulta essere la più vincolante: a parte i problemi di visibilità, infatti, tra gli aspetti che ai fini della sicurezza devono essere prioritariamente analizzati vi sono la congruenza di ciascuna curva con il resto dello sviluppo planimetrico e la stabilità dinamica dei veicoli in curva. I modelli teorici stabiliscono che per determinati valori di raggio, a pendenza trasversale imposta, corrispondano dei valori di velocità teorica fissati. È apparso quindi molto interessante valutare se i parametri caratteristici delle curve planimetriche, da cui dipendono le velocità teoriche che si possono assumere lungo tali elementi,

corrispondano effettivamente alle velocità degli utenti durante la percorrenza dei diversi archi.

Più di recente, in effetti, stanno aumentando anche lungo i rettifili gli studi relativi all'andamento delle velocità assunte dai guidatori [55] e [56].

2.2.3 Raccolta dati di traffico e modelli di velocità operativa

Risulta perciò fondamentale eseguire una raccolta di dati di velocità al vero, sia per poter confrontare tali valori con le velocità teoriche di ciascun elemento planimetrico, desunte dal diagramma delle velocità costruito utilizzando i modelli proposti dalla letteratura e dalla normativa, sia per costruire modelli predittivi di velocità operativa in grado di correlare le caratteristiche geometriche delle infrastrutture con le velocità realmente assunte dagli utenti.

Con modelli predittivi di velocità operativa si intendono generalmente quei modelli in grado di definire l'ottantacinquesimo percentile della distribuzione delle velocità rilevate su un elemento, in condizioni di flusso libero, sulla base di alcune caratteristiche proprie di ciascun elemento.

Spesso, però, le normative si trovano a dover affrontare diversi problemi per la definizione dei modelli di velocità, quali quelli relativi alla raccolta dei dati, a presupposti non realistici del comportamento del conducente, a difficoltà nella stima dei cambiamenti di velocità tra

Capitolo 2

elementi geometrici successivi, alla mancanza di uniformità tra i modelli, considerando un traffico composto di sole autovetture [57].

Per raccogliere i dati di traffico ci si è avvalsi, negli anni, di dispositivi più tradizionali di misura come il conteggio manuale, oppure avanzati, come:

- stazioni di rilevamento, costituite da telecamere digitali collegate a computer portatili che mostrano le immagini acquisite [58];
- contatori di traffico automatici [55] e [59];
- pistole radar e laser [60] e [61];
- videocamere [62].

I metodi di acquisizione dei dati di velocità praticata dagli utenti, maggiormente utilizzati, sono i rilievi statici eseguiti in determinate sezioni dell'infrastruttura, ma sono riportati in letteratura anche rilievi in continuo effettuati grazie all'utilizzo di veicoli sonda.

La maggior parte dei modelli di velocità operativa si basa su dati di velocità raccolti su sezioni stradali prefissate. Spesso le stazioni di rilevamento sono posizionate in diverse sezioni lungo il tracciato al fine di registrare il flusso e le velocità dei veicoli che le attraversano, all'interno di un determinato intervallo di tempo. Per definire i modelli predittivi di velocità, i dati puntuali vengono acquisiti nel centro della curva e nel punto medio del tratto di rettilo che la precede [33] e [63] poiché viene assunta una velocità costante sulle curve e sui rettifili e si

ipotizza che le accelerazioni e le decelerazioni si verifichino interamente sulle curve clotoidiche.

Sono stati sperimentati, successivamente, metodi innovativi di raccolta dei dati di velocità tramite l'utilizzo di veicoli equipaggiati con dispositivi GPS, per raccogliere tempi di percorrenza e velocità assunte dai veicoli a intervalli costanti spaziali o temporali. Questa nuova metodologia ha permesso ai ricercatori di osservare il comportamento effettivo dei conducenti e di sviluppare modelli di velocità operativa più precisi di quanto fosse possibile in precedenza, con la raccolta dei dati di velocità puntuale, consentendo così una definizione più accurata del fenomeno reale e quindi una migliore misurazione della consistenza progettuale [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70] e [71]. Vengono ormai correntemente utilizzati, per le misurazioni in continuo, anche dati provenienti da veicoli equipaggiati con smartphone [72].

A differenza delle misurazioni della velocità puntuali, i dati di velocità in continuo sono utili per studiare il profilo di velocità reale degli utenti, in relazione al comportamento di accelerazione-decelerazione e velocità massima raggiunta sia sui rettili che sugli archi di curva [73]. Naturalmente è necessario che i dati raccolti si riferiscano a campioni adeguatamente rappresentativi, per numero e composizione, della popolazione degli utenti stradali.

Capitolo 2

Una volta raccolti i dati di velocità, questi vengono utilizzati per costruire i modelli predittivi di velocità operativa attraverso l'identificazione e la taratura delle variabili che maggiormente influenzano la scelta della velocità di marcia degli utenti su strada. Per validare i modelli predittivi si confrontano, successivamente, i risultati ottenuti dal modello sotto forma di velocità di flusso libero all'85esimo percentile, con le velocità registrate dal vero in condizioni isolate, che si assume corrispondano alle velocità desiderate dai conducenti su strade a basso volume di traffico.

Come anticipato, la stima dei modelli predittivi di velocità operativa ha necessità di disporre di dati di velocità praticate, statisticamente significativi (per il tipo di variabili rilevate, per la numerosità dei campioni, etc.) da trattare, con l'obiettivo di individuare le variabili più significative che incidono sulla definizione di tali valori. Questi dati servono a implementare numerosi profili di velocità [74] e modelli predittivi di velocità operativa, sia lineari sia non lineari, ottenuti con tecniche di regressione graduale lineare multipla [63] o modelli di regressione con reti neurali [75].

Con questo approccio, la geometria della strada e le caratteristiche del traffico vengono utilizzate per stimare la massima velocità operativa per ciascuna combinazione di variabili esplicative [76].

Al fine di eliminare dai set di dati valori di velocità operativa anomali si possono utilizzare il criterio di Chauvenet e il metodo Vivatrat, ben descritti nella letteratura scientifica [77].

Ciascuno dei modelli è funzione di variabili spesso anche molto diverse fra loro, ma sono state individuate le variabili che maggiormente influenzano le velocità praticate sia per le curve che per i rettifili. Per i modelli predittivi in curva si ritrovano molto spesso il raggio della curva, il CCR, la lunghezza della curva e il tasso di sopraelevazione [70], [78] e [78].

Il CCR definisce il tasso di variazione di curvatura della singola curva, il cui valore analitico è dato dal rapporto tra la deviazione angolare totale in gradi centesimali e la lunghezza complessiva del tratto curvilineo [79].

$$CCR = \frac{\left(\frac{L_1+L_2}{2R} + \frac{L_C}{R}\right)}{L} * \frac{200}{\pi}, \quad \left[\frac{\text{gradi cent.}}{m}\right]$$

In cui risulta, come da Figura 4, L_1 lunghezza del primo arco clotoidico, L_2 lunghezza del secondo arco clotoidico, L_C lunghezza dell'arco e $L=L_1 + L_2 + L_C$.

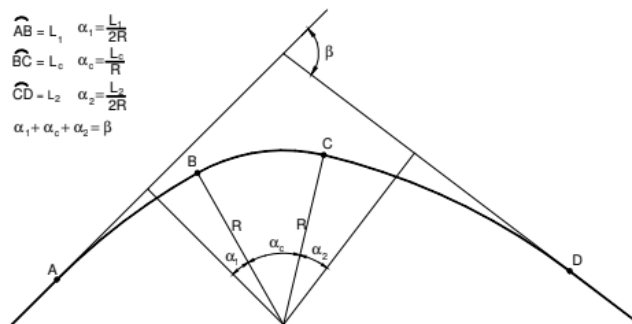


Figura 4 - Elementi geometrici per il calcolo del CCR [80]

Capitolo 2

Per i rettifili, invece, la lunghezza del rettifilo stesso [72], la velocità operativa del precedente elemento stradale [69], i raggi delle curve prima e dopo la sezione, gli elementi della sezione trasversale e l'allineamento verticale [56].

In generale, sono assunte come variabili fondamentali dei modelli la distanza di visuale libera, la larghezza delle corsie, la larghezza delle banchine, il numero delle corsie e il traffico giornaliero medio annuo, valutandone anche la composizione del flusso [81], [82], [83] e [84].

In altre ricerche, sono stati costruiti modelli predittivi di velocità non analizzando dati sperimentali, ma sviluppando un'estensione GIS in grado di analizzare la relazione tra le caratteristiche geometriche di una strada e quelle che un conducente si aspetta di percorrere [73]. Sono stati, altresì, validati i modelli con l'utilizzo del simulatore di guida [84] e [85].

I modelli predittivi, una volta definiti, possono diventare un importante strumento per valutare le incoerenze esistenti fra velocità operative, di progetto e limiti di velocità [86], [87] e [88]. La velocità dell'85° percentile dovrebbe essere selezionata come fattore primario nella determinazione del limite di velocità esposto per qualsiasi zona omogenea della carreggiata. Si riscontra, dagli studi effettuati, che oltre il 50% dei conducenti supera il limite di velocità imposto, spesso perché sovrastima la velocità degli altri conducenti [89], oltre che

perché indotto da cattive scelte progettuali. Si capisce, quindi, come velocità e sicurezza stradale siano fortemente correlate [90] e come la presenza di altri utenti sulla strada possa influire sulle velocità adottate dai guidatori; se a un aumento del flusso, infatti, i guidatori non fanno corrispondere una diminuzione delle velocità, si potrebbero creare le condizioni critiche che spesso preludono al verificarsi di eventi incidentali, ossia di collisioni fra veicoli [91].

Al momento i modelli predittivi cui si presta maggiore attenzione sono quelli che inseriscono nel modello la velocità ambientale, che è definita come la velocità alla quale gli utenti viaggiano in condizioni di flusso libero quando non sono vincolati dall'allineamento della strada e da avverse condizioni metereologiche [55] e [92]. Si tratta del valore massimo di velocità assunto su un tronco di strada omogeneo, valutando esclusivamente lunghi tratti di rettilineo o archi di circonferenza caratterizzati da ampi raggi. Per valutare i tronchi omogenei si fa riferimento a parametri che caratterizzano globalmente il tracciato tenendo conto della sua tortuosità, come il tasso di variazione di curvatura medio CCR_m , che si trova diagrammando la somma progressiva delle deviazioni angolari planimetriche α_i , come si evince in Figura 5:

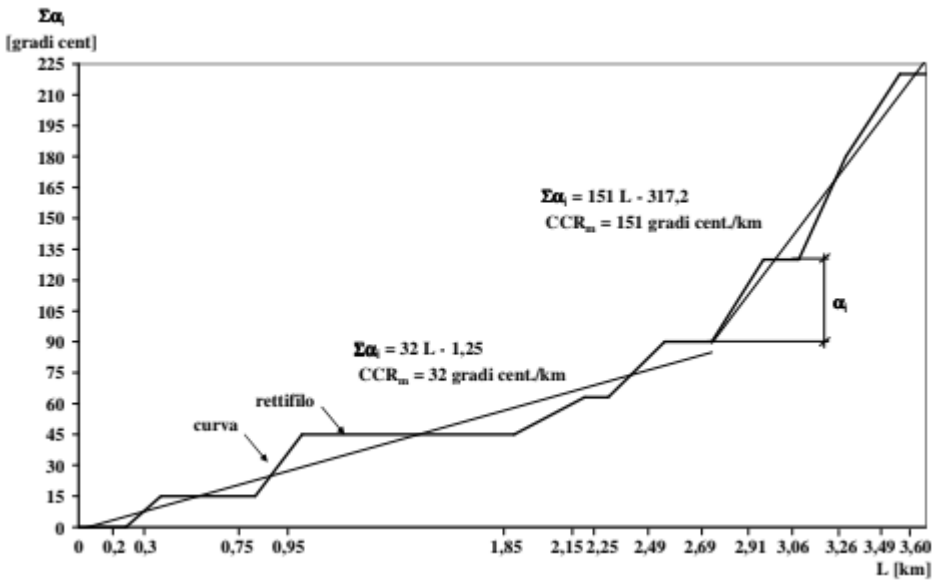


Figura 5 - Esempio di diagramma della somma progressiva delle deviazioni angolari planimetriche α_i in funzione dello sviluppo del tracciato [80]

2.3 Tecnologie innovative per l'analisi e la gestione della circolazione stradale

2.3.1 Nuovi metodi per l'acquisizione di dati di velocità

I processi di innovazione nell'ambito delle tecnologie informatiche e di comunicazione (ICT), che hanno portato all'ampliamento e al miglioramento della connessione da parte degli utenti stradali alla rete mobile -per acquisire e/o scambiare informazioni con l'ambiente circostante, stanno rendendo possibile l'acquisizione di una grande mole di dati georeferenziati che possono avere grande utilità ai fini del monitoraggio della mobilità. Il crescente utilizzo di dispositivi mobili elettronici dotati di GPS, quali telefoni cellulari, palmari, smartphone, tablet, laptop e scatole nere montate sui

veicoli per fini assicurativi, genera informazioni e dati, che se raccolti, elaborati e interpretati attentamente, sono utili alla ricostruzione delle modalità di guida, dei percorsi effettuati dai conducenti e delle relative velocità di marcia.

Quando si dispone di un insieme talmente numeroso e complesso di dati, che diventa necessaria la definizione di nuovi strumenti e metodi per poter conservare, gestire e processare informazioni (con tempi e procedure ragionevoli), mediante la definizione di modelli di *data mining* [93] e [94], si parla di *Big Data*. Si tratta di una quantità crescente di informazioni estesa in termini di volumi, velocità di acquisizione e varietà, che sta aumentando all'aumentare del processo di sviluppo dell'evoluzione tecnologica.

Le raccolte estese di dati georeferenziati provenienti dai veicoli stradali circolanti -i cosiddetti *Floating Car Data* (FCD)- rappresentano, allora, un nuovo strumento di monitoraggio del traffico, molto efficace e a basso costo, per lo studio e la valutazione della circolazione veicolare.

Attualmente la maggior parte delle amministrazioni statali che si occupano della gestione delle infrastrutture stradali utilizza circuiti a induzione, telecamere o sensori a infrarossi per acquisire informazioni sul traffico, quali, ad esempio numerosità e velocità dei veicoli transitanti. Questi sistemi tradizionali sono di comprovata

Capitolo 2

efficacia per la raccolta dei dati sul traffico, ma presentano anche alcuni svantaggi, di seguito riassunti:

- il costo iniziale può essere piuttosto elevato perché questi sistemi comportano l'installazione di dispositivi tecnologici lungo la strada o direttamente sul manto stradale;
- i costi di manutenzione possono risultare significativi, a causa di eventuali danni provocati da condizioni meteorologiche avverse o da atti vandalici;
- la maggior parte di questi sistemi tradizionali non è in grado di misurare accuratamente i tempi di percorrenza degli itinerari di viaggio e può fornire solo velocità registrate in sezioni specifiche del tracciato.

Si tratta di sistemi di raccolta dei dati circoscritti a predeterminate sezioni dislocate lungo la rete stradale, la cui analisi relativa ai flussi di traffico e alle velocità veicolari è svolta unicamente nel dominio del tempo.

Al contrario, il principio dei *Floating Car Data* è quello di raccogliere dati sul traffico localizzando il veicolo con cellulari o GPS su tutta la rete stradale; ciò significa, sostanzialmente, che ogni veicolo in cui è presente un telefono cellulare o un GPS funge da sensore in movimento lungo la rete stradale. I dati inerenti la posizione dell'auto, la velocità e la direzione di viaggio vengono inviati a un centro di elaborazione centrale e raccolti in modo anonimo in un database.

Questi dati forniscono, quindi, un nuovo metodo per misurare velocità, tempi di viaggio e quindi prestazioni del sistema di mobilità (dall'osservazione dei veicoli su strada) [95] e [96] non più a sezioni fisse, ma nel dominio dello spazio.

Poiché questi veicoli sono liberi di spostarsi ovunque sulla rete stradale vengono considerati come "sonde galleggianti" e offrono numerosi vantaggi rispetto ai metodi di raccolta dati di traffico tradizionali sopra descritti in quanto:

- non richiedono alcuna installazione o manutenzione di apparecchiature lungo la strada, risparmiando costi considerevoli ed evitando interruzioni del flusso di traffico;
- forniscono informazioni sull'intera rete stradale e non si limitano alle sezioni in cui è stato installato il sistema di monitoraggio fisso;
- misurano velocità e tempi di percorrenza su tratti più lunghi, nonché la variazione di velocità lungo il percorso;
- aumentano in numero in presenza di congestione, e quindi trasmettono dati più accurati e, di conseguenza, più attendibili.

Ciò significa che le misure forniscono un quadro rappresentativo di ciò che sta realmente accadendo sulla strada e, poiché vengono effettuate in continuo, possono essere eseguite -ad esempio- anche con cattive condizioni meteorologiche in uno o più giorni di rilevamento.

Capitolo 2

Con un numero sempre maggiore di dispositivi connessi abilitati al GPS, i FCD sono diventati una fondamentale fonte di informazioni per la gestione dinamica del traffico [97] e [98]. Con il loro supporto è possibile incrementare le informazioni sulla rete, tramite un sistema di acquisizione dati affidabile e completo, che può contribuire ad aumentare la sicurezza stradale e il comfort del conducente [99] e [100].

In Italia, i servizi FCD sono principalmente associati all'attività delle compagnie assicurative che, per differenziare i premi assicurativi e offrire tariffe più basse e possibilità di rintracciare la vettura con il GPS, montano delle scatole nere all'interno delle autovetture, che registrano e trasmettono la propria posizione ai satelliti cui sono collegate e altre informazioni come la velocità, la direzione di marcia attraverso un angolo azimutale, l'orario di invio dell'informazione, la qualità del segnale e il tipo di veicolo (Figura 6).

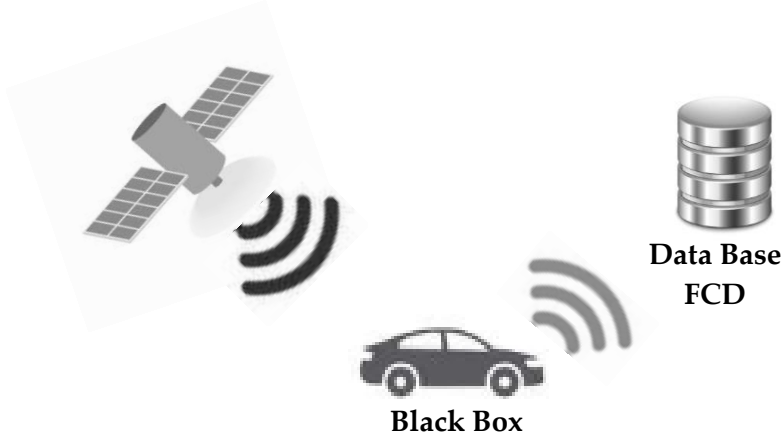


Figura 6 - Schema semplificato dell'invio e ricezione del segnale GPS per la raccolta di Floating Car Data

I veicoli equipaggiati con i terminali assicurativi rappresentano, ad oggi, in Italia circa il 10% dell'intera flotta, e continuano a registrare negli ultimi anni una continua crescita in termini percentuali.

È molto importante conoscere la frequenza di campionamento e trasmissione del dato per capire quale sia la rappresentatività del campione veicolare registrato rispetto all'intero flusso circolante. Soprattutto su strade a basso flusso veicolare la disponibilità dei dati, anche storici, potrebbe risultare insufficiente per poter eseguire analisi sull'andamento delle velocità operative e poter eseguire analisi sia di massa sia sul singolo veicolo. Le black box montate sui veicoli inviano dati alle centraline fisse ogni 2 km se il veicolo transita su strade secondarie, oppure con una frequenza più ravvicinata, sull'ordine dei 30 secondi, se viaggia su strade principali. Il terminale rileva le posizioni del veicolo per tutta la durata del viaggio, dall'atto dell'accensione a quello di spegnimento del motore.

Rimane, ad oggi, da stabilire l'affidabilità del campione di FCD, in quanto il numero dei veicoli sonda che forniscono i dati rappresenta pur sempre una percentuale alquanto limitata dell'intero flusso veicolare [101]. È stato dimostrato, tuttavia, che anche con una rappresentatività di solo il 2% dell'intero parco veicolare circolante, l'attendibilità statistica dei risultati, che si ottengono dalle analisi dei dati forniti, risulta comunque molto elevata [102].

Capitolo 2

Ulteriori criticità riscontrate nell'utilizzo di questi dati riguardano l'errore sistematico dello strumento da cui dipende l'accuratezza del dato raccolto in termini di posizionamento geografico, direzione di marcia e velocità registrate. Si evidenzia anche la difficoltà, per le società detentrici di tali dati, di creare delle strutture di memorizzazione capienti ed economiche per permettere l'elaborazione di tutte queste informazioni, che altrimenti rimangono solamente grezze e poco esplicative del reale comportamento degli utenti quando opportunamente trattate.

Le informazioni fornite da questi dati possono essere utilizzate sia in *real time* sia rielaborate successivamente, una volta che i dati sono stati immagazzinati in *database* sotto forma di serie storiche di dati relative a determinati archi temporali [103]; per ognuno dei due utilizzi risulta comunque fondamentale realizzare la corrispondenza del dato veicolare alla mappa digitale della rete, che fa da riferimento per la localizzazione.

Durante tale processo le misurazioni GPS vengono abbinate a una mappa digitale utilizzando un algoritmo di *map matching*, che assegna ciascuna misurazione della velocità GPS a un segmento stradale. Tali algoritmi sono stati ampiamente trattati e descritti in letteratura con l'obiettivo di trovare un metodo per far coincidere computazionalmente il percorso di latitudine/longitudine del GPS con i dati della mappa digitale e identificare in maniera precisa le strade

percorse dagli utenti [104], [105], [106] e [107]. Il processo di *matching*, infatti, prevede di associare, inizialmente, il dato veicolare al tracciato stradale corretto, correggendo gli errori di posizionamento dovuti al GPS [108], e successivamente di proiettare il dato sulla strada selezionata [109].

Per utilizzare i FCD in tempo reale sono state sviluppate diverse tecniche utili per migliorare il tempo di esecuzione del calcolo del processo di *map matching*, per fornire ai guidatori informazioni aggiornate sul traffico il più velocemente possibile [110].

In quest'ottica, l'utilizzo di questi dati si dimostra un sistema rapido ed economico per raccogliere tempi e velocità di viaggio accurati all'interno delle reti stradali e per migliorare le previsioni a termine delle condizioni di viaggio [111] e [112], inserendo nel modello di descrizione del traffico in tempo reale anche i dati di incidentalità [113].

In generale, i *Floating Car Data* possono essere analizzati in relazione alle scelte effettive dei percorsi tramite analisi delle matrici O/D e ai tempi di percorrenza [114] e [115] e, anche, sia in termini di distribuzione spaziale –fissando un veicolo- sia temporale –specificando una sezione lungo il tracciato-. Si possono, altresì, ricavare informazioni legate al comportamento degli utenti e alla loro propensione al rischio, valutandone gli stili di guida attraverso la definizione di indici comportamentali [116].

Capitolo 2

Come illustrato nella sezione precedente, le velocità praticate dagli utenti sono uno dei fattori che maggiormente influenzano la sicurezza stradale. L'ampia disponibilità del dato fornito dai FCD fa sì che si possano condurre monitoraggi della velocità su tutta la rete stradale, e non più solo in determinate sezioni del tracciato, come si è costretti a fare con i dati forniti dai metodi tradizionali di raccolta di informazioni sul traffico [117]. Questo nuovo metodo di acquisizione dei dati di velocità, infatti, consente all'analista di disporre di un campione di dati di velocità e posizione veicolare estratto dal flusso di traffico, di cui non si mantiene il riferimento ai singoli veicoli che lo hanno generato per motivi di protezione dei dati sensibili e di anonimato, e di effettuare delle valutazioni di coerenza geometrica dell'intera infrastruttura stradale, in maniera molto rapida e diffusa sul territorio [118]. In questo modo si supera il vincolo di poter generare dei modelli predittivi di velocità operativa solo in determinate sezioni stradali, al centro degli archi di curva o dei tratti di rettilineo, ma si possono effettuare studi di coerenza del tracciato in esame utilizzando profili di velocità costruiti su interi elementi di tracciato successivi [76].

Con questo tipo di analisi non ci si sofferma né sugli aspetti quantitativi, come i volumi, né su quelli qualitativi, come i livelli di servizio della corrente di traffico, ma si pone particolare attenzione, nell'ambito delle condizioni operative, all'aspetto velocità.

Considerando, infatti, che l'infrastruttura viene utilizzata entro un'ampia casistica di condizioni ambientali e di traffico, l'analisi statistica è indirizzata a considerare tali fattori come elementi variabili casualmente. Di conseguenza, si assume, come ipotesi, che il campione di FCD disponibili sia rappresentativo dell'intera popolazione delle possibili condizioni di esercizio e che, pertanto, i fattori aleatori siano espressi come variabilità statistica associata all'analisi del fenomeno assunto.

A seconda poi delle verifiche che si vogliono compiere, come ad esempio la valutazione del comportamento degli utenti in condizioni ambientali non ideali, si andrà a leggere all'interno di tutta la distribuzione statistica delle velocità non più l'85-esimo percentile, che probabilmente si riferisce a condizioni ideali, bensì un percentile differente, probabilmente minore.

Seguendo questa impostazione, la ricerca qui proposta intende confrontare le velocità osservate dalle informazioni raccolte dagli FCD, registrati su alcune strade selezionate, con le velocità teoriche di progetto o i limiti di velocità esistenti su queste infrastrutture e identificare se -e in tal caso, perché- esistono sezioni stradali che presentano scostamenti significativi tra la loro velocità di progetto e le velocità effettivamente raggiunte dagli utenti su di esse. Si intende quindi utilizzare tale confronto per valutare quali siano i fattori che influenzano maggiormente un comportamento errato dell'utente nella

Capitolo 2

scelta della velocità di guida, che possono essere riconducibili, ad esempio, alla larghezza delle corsie e delle banchine, alla pendenza delle livellette, alla prossimità del conducente alle intersezioni e al tipo e alla lunghezza delle sezioni stradali precedenti.

Di conseguenza, risulta fondamentale la scelta del campione di dati da analizzare a seconda dei diversi obiettivi che ci si propone di raggiungere: non essendo a conoscenza del reale flusso di traffico nelle diverse sezioni stradali, per trovare un parallelismo fra velocità operative e di progetto si dovrebbe scegliere quel sottoinsieme di dati che si ritiene non sia affetto sensibilmente dalla presenza del traffico, da condizioni di tempo meteorologico avverso, da scarsa illuminazione e da eventi incidentali che producono un'alterazione delle condizioni ideali, sulla base di una preliminare analisi degli andamenti delle variabili associate.

Per risolvere tali problemi si può ricorrere, peraltro, ai dati di traffico contestualmente raccolti da centraline fisse e così individuare e dividere le fasce orarie in base ai valori di flusso di traffico registrati sulle sezioni stradali oggetto di osservazione.

3 Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

Nei capitoli precedenti si è posto il tema della valutazione della coerenza di un tracciato stradale in relazione allo sviluppo delle analisi di sicurezza. Si è constatato come alcune scelte progettuali, violando le aspettative dell'utente, possano influire negativamente sul suo comportamento, inducendo il guidatore disorientato a modificare le sue scelte di guida abituali e portandolo ad avere condotte di guida a rischio. Peraltro, l'abitudine a imputare all'utente la responsabilità primaria dell'evento accidentale spesso si traduce, purtroppo, nell'autorizzare la realizzazione e la gestione di infrastrutture gravemente inadeguate. L'inadeguatezza -a seconda dei casi- può essere rilevata sotto diversi aspetti, tra i quali ad esempio: valori di aderenza delle pavimentazioni decisamente inadeguati a garantire il trasferimento delle azioni dinamiche tra ruota e superficie stradale, progettazioni geometriche degli allineamenti orizzontali e condizioni dell'ambiente che circonda l'infrastruttura insufficienti a garantire una corretta percezione del tracciato, soprattutto per gli utenti occasionali. Problemi progettuali, realizzativi, ma soprattutto manutentivi sono sovente causa o concausa di elevati livelli di sinistrosità sulla rete nazionale italiana.

Capitolo 3

Risulta pertanto necessario indagare in maniera più approfondita quale possa essere il ruolo dell'infrastruttura nel verificarsi degli eventi incidentali, per poter valutare che tipo di contromisure si possano mettere in atto per garantire più elevati standard di sicurezza.

Secondo il resoconto degli incidenti stradali in Italia nell'anno 2018, il cui testo integrale è stato pubblicato il 25 luglio 2019 sul sito Istat (Istituto Nazionale di Statistica), gli incidenti stradali con lesioni a persone in Italia sono stati 172.553, in calo rispetto al 2017 (-1,4%), con 3.334 vittime (morti entro 30 giorni dall'evento) e 242.919 feriti (-1,6%). Tra le cause che maggiormente hanno provocato i sinistri si riscontrano i comportamenti errati dei guidatori: mancato rispetto della precedenza, distrazione alla guida per utilizzo inappropriato di telefoni cellulari e velocità di guida eccessive.

Nel 2018 sulle strade urbane si sono verificati 126.744 incidenti (73,5% del totale), con 169.607 feriti (69,8%) e 1.401 morti (42,0%). Sulle autostrade e raccordi autostradali gli incidenti sono stati 9.437 (5,5% del totale) con 330 decessi (9,9%) e 15.545 feriti (6,4%); sulle altre strade extraurbane, comprensive delle strade statali, regionali, provinciali e comunali extraurbane, gli incidenti rilevati ammontano a 36.372 (21,1% del totale), le vittime a 1.603 (48,1%) e i feriti a 57.767 (23,8%) (Figura 7).

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

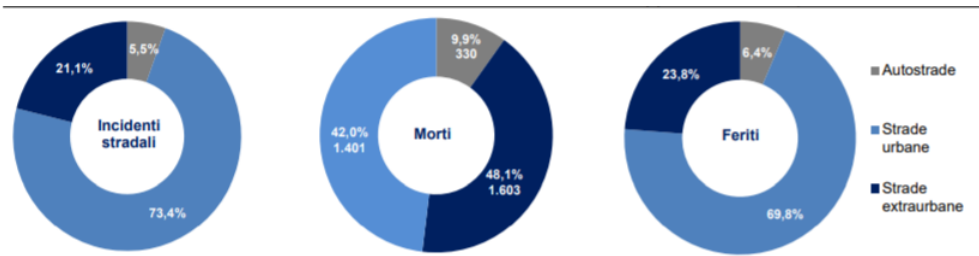


Figura 7 - Incidenti stradali, morti e feriti per categoria di strada. Fonte Istat (2018)

Da quanto osservato, si denota che gli incidenti stradali e i feriti diminuiscono su strade urbane e autostrade mentre aumentano sulle strade extraurbane, dove si registra un incremento rispettivamente del 3,7% e 2,6% rispetto al 2017.

Dato l'alto tasso di incidentalità riscontrato su strade appartenenti a questa categoria e data la maggior facilità di studiare e comprendere i comportamenti degli utenti in ambito extraurbano piuttosto che urbano, dove il condizionamento dell'ambiente circostante e degli altri utenti della strada risulta essere meno vincolante, si è scelto di focalizzare lo studio proprio sulle strade ricadenti al di fuori delle perimetrazioni urbane.

L'obiettivo di questa analisi è la definizione di una metodologia in grado di valutare preventivamente le condizioni di sicurezza delle strade extraurbane a unica carreggiata, attraverso procedure che si avvalgono dei criteri di verifica delle condizioni di sicurezza riferite alla geometria del tracciato.

Poiché le strade statali italiane sono diffuse su tutto il territorio nazionale e di questa rete circa il 90% è gestita da ANAS S.p.A.

Capitolo 3

(secondo quanto prescritto nel Decreto Legislativo 29 Ottobre 1999 n. 461 e successive modifiche), la scelta della rete stradale da analizzare è ricaduta sulle strade statali gestite direttamente da questo ente, che amministra anche alcune strade delle Regioni a statuto speciale Sicilia e Sardegna, come si evince dalla Figura 8:

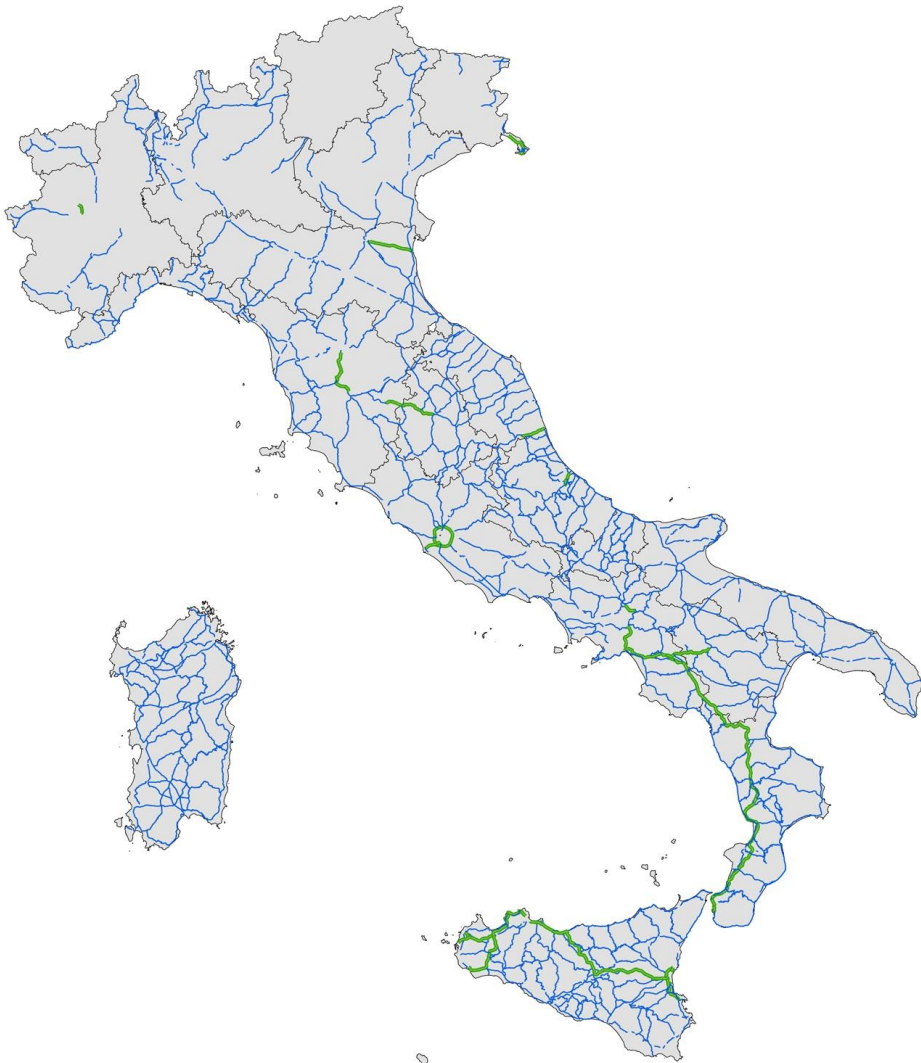


Figura 8 - Rappresentazione geografica della rete viaria gestita da ANAS S.p.A. al 28/10/2019

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

Un quadro generale della situazione attuale delle strade e autostrade gestite da ANAS S.p.A. può essere riassunto nella seguente Tabella 1, estratta dal sito ufficiale della Società, i cui dati sono aggiornati al 28/10/2019:

Autostrade in gestione diretta:	939,646 Km
Raccordi autostradali:	355,101 Km
Strade Statali:	22.661,835 Km
Strade in corso di classifica o declassifica (NSA):	317,670 Km
Svincoli e Complanari:	4.921,801 Km
Totale:	29.196,053 Km

Tabella 1 - Rete viaria di interesse nazionale direttamente gestita da ANAS S.p.A.

Per garantire maggiore continuità territoriale degli itinerari di valenza nazionale che attraversano le varie regioni, evitando la frammentazione delle competenze nella gestione delle strade e dei trasporti, è stato avviato il recupero di oltre 6000 chilometri di strade ex statali, regionali e provinciali, secondo il piano "Rientro Strade", avviato di comune accordo con il Ministero delle Infrastrutture e Trasporti per la riorganizzazione e ottimizzazione della gestione della rete viaria. L'iter di "rientro" è iniziato nell'agosto 2017 con l'intesa sancita dalla Conferenza Unificata per la revisione delle reti di 11 Regioni ed è proseguito con l'emissione del Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri il 20 febbraio 2018. Ad oggi sono rientrati nella gestione di ANAS S.p.A. tutti i tratti di strade previsti, in Figura 9, che saranno oggetto di ingenti interventi finalizzati al potenziamento della

Capitolo 3

viabilità, per conseguire standard di sicurezza più elevati e omogenei su tutto il territorio nazionale.



Figura 9 - Rientro strade ex statali e provinciali trasferite alla gestione di ANAS S.p.A.

Nel frattempo, tramite l'emanazione del DM n. 3484 del 2001 [119] ai sensi dell'art. 13, comma 6, del D. Lgs. n. 285/1992 [12], e s.m.i. è diventato obbligatorio per *"gli enti proprietari delle strade di istituire e tenere aggiornati la cartografia, il catasto delle strade e le loro secondo le modalità stabilite con apposito decreto emanato dal Ministro dei Lavori Pubblici, sentito il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ed il Consiglio Nazionale delle Ricerche"*.

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

A tal fine, è stato realizzato da ANAS il Sistema Informativo Catasto Strade di cui fanno parte:

- le informazioni geografiche relative al grafo della rete stradale in gestione;
- un database in Oracle a caratteri alfanumerici utile per l'archiviazione delle informazioni delle pertinenze;
- una serie di applicativi per la localizzazione sul territorio, consultazione e manutenzione delle informazioni.

Il Grafo stradale, realizzato grazie all'utilizzo di Rilievi ad Alto Rendimento (RAR) di tutti gli elementi facenti parte lo spazio stradale, è composto da coordinate geografiche tridimensionali e rappresenta, per ogni tracciato, l'andamento dell'asse geometrico di ogni carreggiata, in cui le doppie carreggiate sono rappresentate da due assi stradali affiancati, e delle intersezioni principali e secondarie. Nonostante il sistema di registrazione e di gestione dei dati cartografici, realizzato fin dal 2006, rispondesse esattamente ai requisiti e alle caratteristiche prescritte dalla sopracitata normativa, l'intera metodologia è stata oggetto di un'approfondita revisione nel corso dell'anno 2008 nella sua componente Web, al fine di conformarne i contenuti a criteri di maggior rendimento ed efficacia applicativa.

In Figura 10 è rappresentato il processo che dal 1992 ha interessato ANAS per la messa a punto del catasto stradale della rete di suo interesse:

Catasto Strade

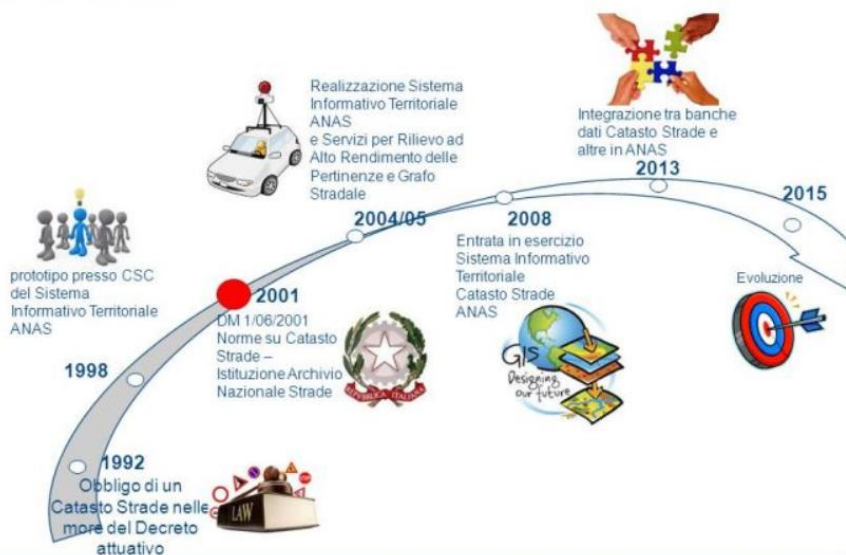


Figura 10 - Messa a punto del catasto stradale ad opera di ANAS S.p.A.

Attraverso la redazione del catasto stradale vengono catalogate e schedate tutte le strade ad uso pubblico presenti sul territorio italiano al fine di conoscerne tutti gli elementi relativi alle caratteristiche geometriche. Secondo quanto prescritto dal DM n. 3484 del 2001 [119] per quanto riguarda la modalità di acquisizione dei dati, gli elementi di cui è necessario rilevare i dati sono gli assi stradali, il profilo longitudinale, il profilo trasversale e la larghezza della strada:

“Gli assi stradali vanno rilevati come sequenza di punti. Per ogni elemento stradale, rettilineo o curvo devono essere rilevati punti in numero sufficiente da poterne ricavare la geometria con un procedimento di minimi quadrati; i punti devono essere forniti in coordinate geografiche ellissoidiche

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

WGS84. [...] *Gli errori nelle coordinate piane dei punti dell'asse stradale devono essere contenuti entro un metro. [...]*

Il profilo della strada può venir costruito in base alla successione di punti dei quali è stata determinata la quota. La precisione della quota geoidica di tali punti rispetto il riferimento altimetrico nazionale deve essere migliore di 5,0 metri ma la precisione relativa deve essere tale che l'errore massimo nella pendenza sia dello 1%, ovvero deve essere migliore di 10 centimetri se calcolata fra punti distanti meno di 10 metri. [...]

Qualora gli enti proprietari dispongano già di un sistema informativo riferito ai cippi chilometrici esistenti, è necessario collegare tali informazioni al nuovo sistema di riferimento."

3.1 Geometrizzazione delle strade esistenti

Il grafo della rete, come visto, è costituito da raccolte di punti georeferenziati ma non riconosce né descrive gli elementi geometrici componenti i tracciati. Pertanto è stato necessario ideare e sviluppare una procedura, che è stata successivamente implementata, finalizzata all'individuazione dei diversi elementi geometrici dei tracciati planimetrici.

Nel seguito viene descritta tale procedura e, titolo di esempio, si riporta il caso di studio relativo alla sua applicazione alla strada statale n. 4 (S.S. 4).

Nota come Via Salaria, la S.S. 4 si annovera fra le più importanti strade statali del centro Italia: essa collega Roma ad Ascoli Piceno e dal

Capitolo 3

capoluogo delle Marche la statale si innesta sul Raccordo Autostradale "Ascoli - Porto d'Ascoli ", proseguendo come SP 235. Dal 2001, infatti, il tratto Ascoli Piceno - Porto d'Ascoli è passato in gestione dall'ANAS S.p.A. alla Regione Marche, che ha ulteriormente devoluto le competenze alla Provincia di Ascoli Piceno. Tale tratta è stata quindi declassata a Strada Provinciale e denominata come SP 235.

Sviluppandosi nelle due regioni di Lazio (per 128.85 km) e Marche (per 36.64 km), la strada attraversa il capoluogo di Rieti per giungere ad Ascoli Piceno, grazie al valico dell'appennino centrale, come si può osservare in Figura 11.

Presenta una piattaforma generalmente riconducibile a una strada extraurbana secondaria, formata da un'unica carreggiata con una corsia per senso di marcia, a meno del tratto che collega il Grande Raccordo Anulare (GRA) al bivio con la A1 Diramazione Roma Nord all'altezza della località Settebagni e di un tratto in prossimità di Rieti, dove la piattaforma è formata da 2 carreggiate separate con 2 corsie per senso di marcia.

Ne deriva, quindi, che questa infrastruttura è caratterizzata da elementi geometrici molto vari, passando gradualmente da superstrada a strada di montagna.

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti



Figura 11 - Contestualizzazione della strada statale 4 – Via Salaria

Acquisito dalla società ANAS il grafo della rete stradale ricadente nella sua gestione, è stata estrapolata l'informazione geografica della strada di interesse, considerato che il grafo è realizzato in primitive spaziali di tipo 3D (x,y , quota ortometrica). Grazie alle coordinate Est e Nord riportate secondo il Sistema di Riferimento WGS 84 UTM zone 32N, e le quote in m s.l.m è stato ricostruito l'andamento planimetrico e successivamente altimetrico del tracciato.

La lettura delle progressive è stata fissata convenzionalmente crescente nell'andare dal punto A in corrispondenza del GRA –nei pressi di Roma- al punto B coincidente con la città di Ascoli Piceno, come da Figura 12:

Capitolo 3

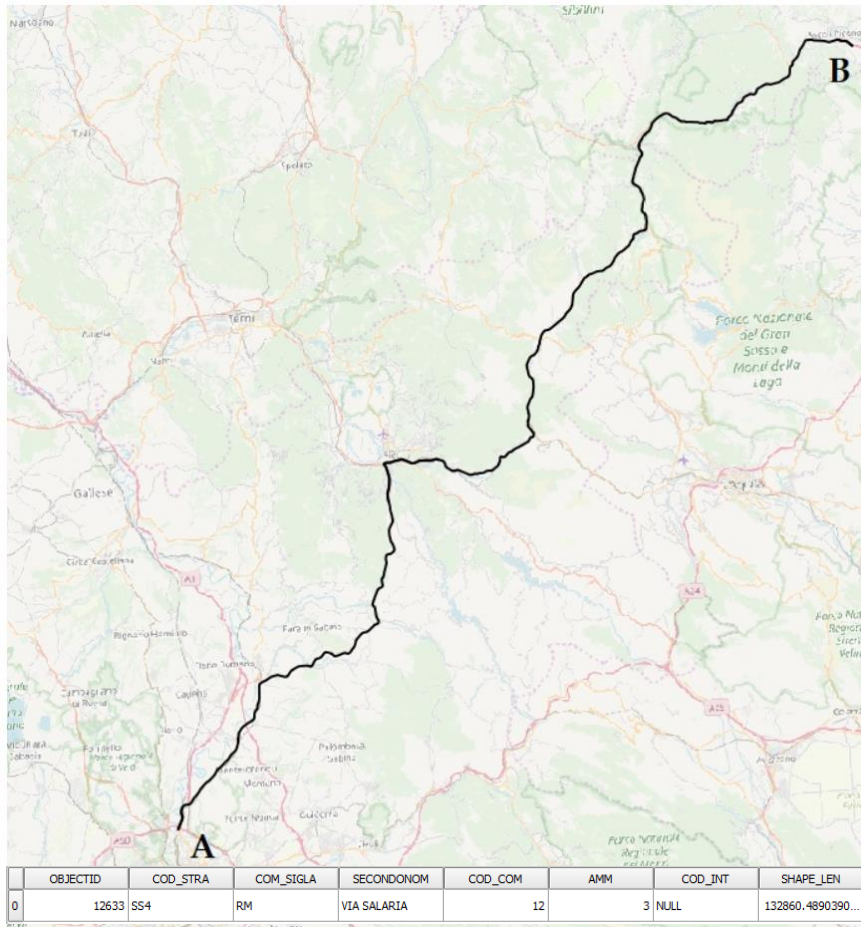


Figura 12 - Grafo della S.S.4 da A a B

La ricostruzione della planimetria, come successione di elementi rettilinei e curvi, è avvenuta per fasi successive, descritte nel seguito, attraverso l'implementazione di un codice Matlab riportato in Appendice A.

Inizialmente è stata realizzata una ridiscretizzazione dei punti dell'asse di tracciamento, misurando le distanze parziali tra un vertice e il successivo e facendo in modo che i segmenti più lunghi di 6 m

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

venissero suddivisi in segmenti più piccoli. Di ogni punto sono state poi tabellate, come riportato in Tabella 2, le coordinate cartesiane, la quota, il codice identificativo, l'azimut –ossia l'angolo di deviazione rispetto al Nord, rappresentato in Figura 13- del segmento contenuto fra il punto i-esimo e il successivo, il coefficiente angolare e il termine noto della retta passante fra i 2 punti suddetti, la distanza parziale e, in ultimo, la progressiva.

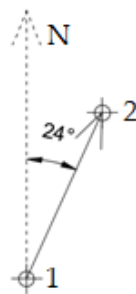


Figura 13 - Esempio di rappresentazione di angolo di deviazione rispetto al Nord

E	N	Q	i	azimut	m	q	Parziali	Progressive
(m)	(m)	(m)		(°)	y=mx+q		(m)	(m)
790885.2	4654322.3	24.79	1	22.8	2.4	2769909.0	1.286	0.00
790885.7	4654323.4	24.776	2	22.6	2.4	2749917.0	1.289	1.29
790886.2	4654324.6	24.763	3	22.4	2.4	2738193.8	1.290	2.57
790886.7	4654325.8	24.756	4	22.5	2.4	2740488.4	1.289	3.86
790887.2	4654327.0	24.737	5	22.3	2.4	2723133.1	1.292	5.15
790887.7	4654328.2	24.723	6	21.9	2.5	2686229.1	1.294	6.44
790888.2	4654329.4	24.726	7	21.8	2.5	2672991.9	1.295	7.74
790888.7	4654330.6	24.712	8	21.5	2.5	2648700.0	1.300	9.03
790889.1	4654331.8	24.697	9	21.3	2.6	2626662.2	1.305	10.33
790889.6	4654333.0	24.692	10	21.1	2.6	2608805.8	1.306	11.64

Tabella 2 - Indicazioni relative a ciascun vertice compositivo del grafo

Capitolo 3

Calcolato l'angolo di deviazione rispetto al Nord di ciascun segmento che compone il grafo, ne è stato rappresentato su di un grafo l'andamento in funzione delle progressive, riportato in Figura 14, su cui è stato inserito anche l'andamento delle quote.

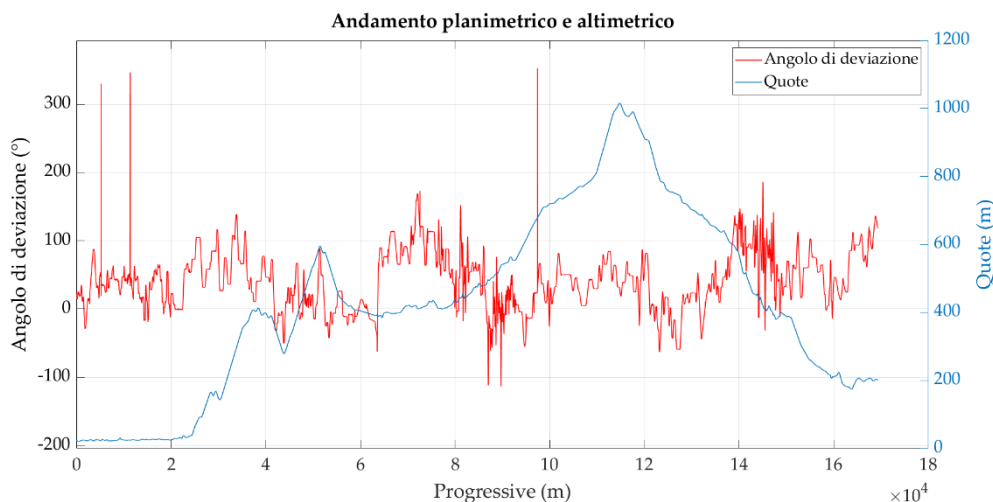


Figura 14 - Andamento dell'angolo di deviazione e delle quote lungo il tracciato dell'S.S.4

Successivamente, è stato applicato un filtro “passa basso” all'andamento dell'angolo di deviazione, per approssimare il segnale attraverso una tecnica di *smoothing* dei dati in grado di ridurre l'apporto del rumore. Il filtro utilizzato, denominato Savitzky-Golay, è un filtro digitale applicato con lo scopo di rendere più fluido l'andamento dei dati; in altre parole serve ad aumentare la precisione dei dati senza distorcere la tendenza del segnale. Ciò si ottiene mediando i valori di sottoinsiemi successivi di dati adiacenti con un polinomio di basso grado, di cui si riporta un esempio in Figura 15,

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

mediante il metodo dei minimi quadrati lineari in un processo noto come convoluzione.

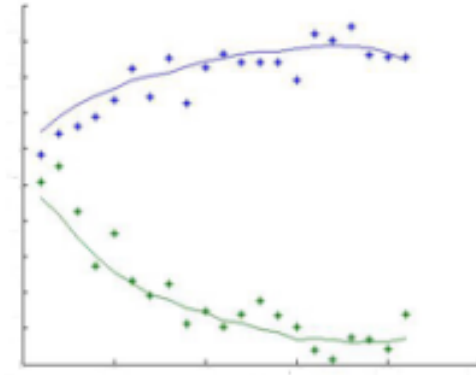


Figura 15 - Esempio di tecnica di smoothing ottenuta per mezzo dell'applicazione di un filtro "passa basso"

Si riportano i risultati di tale processo di filtering in Figura 16, dalla progressiva al km 40+000 alla progressiva al km 55+000.

In seguito, sempre per mezzo del codice Matlab, è stato messo a punto un metodo per determinare i punti di inizio e fine dei rettifili attraverso l'analisi dell'angolo di deviazione. Se si considera che a un rettifilo, comunque disposto nel piano, corrisponde un valore dell'azimut costante dei segmenti che lo compongono, l'individuazione di tali punti corrisponde all'inizio e alla fine dei vari tratti orizzontali del grafico Progressive-Angolo di deviazione. Gli archi di circonferenza, invece, sono rappresentati da una variazione lineare dell'angolo di deviazione; a pendenza positiva (intendendo la pendenza del segmento orientato nel piano progressive - angolo di deviazione) corrispondono curve destrorse, negativa sinistrorse.

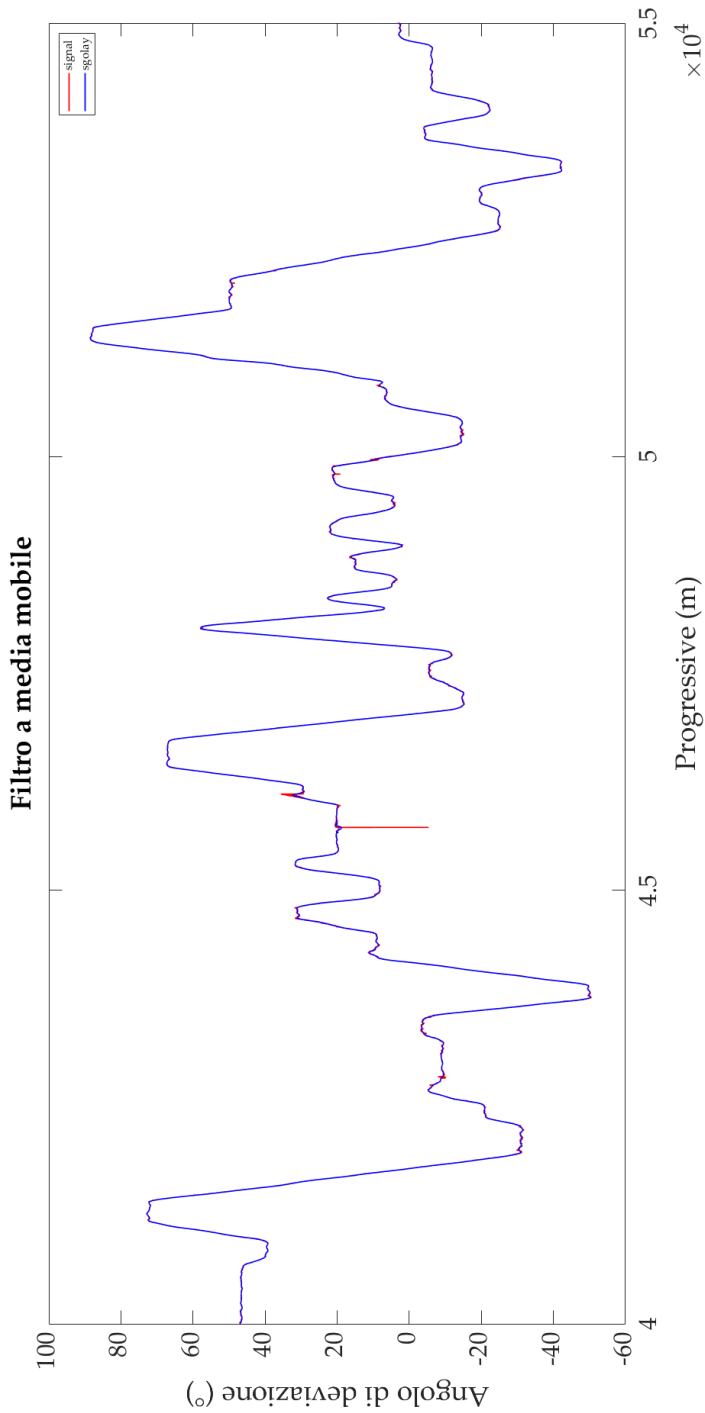


Figura 16 - Andamento dell'angolo di deviazione lungo le progressive, rispetto al filtro a media mobile di tipo sgolayfilt della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

Quando si presentano variazioni lineari con pendenza positiva seguite immediatamente da variazioni a pendenza negativa, o viceversa, in cui non viene interposto alcun tratto a pendenza nulla, in corrispondenza dei vertici delle cuspidi si identificano i punti di flesso del tracciato.

Sono stati esclusi dall'analisi tratti con sviluppi degli elementi curvi al di sotto dei 45 m circa, che risultano essere eccessivamente brevi e potrebbero rappresentare variazioni eccessive del segnale, non smussate con l'applicazione del filtro precedente.

Si riporta in Figura 17, tra la progressiva 40+000 km e la 55+000 km, l'individuazione dei punti di inizio dei rettifili in rosso, di fine in verde e dei punti di flesso in ciano.

Una volta identificate le coordinate dei punti di inizio e fine dei tratti di rettifilo, sono stati definiti anche i punti di inizio e fine dei tratti di circonferenza, dividendo il tratto a deviazione angolare lineare in 5 parti uguali. La ricerca delle caratteristiche –raggi e coordinate dei centri- degli archi di circonferenza è stata effettuata tramite l'analisi dei soli vertici ricadenti nei 3/5 centrali dei diversi tratti. La zona a cavallo fra i rettifili e gli archi di circonferenza, o fra 2 circonferenze successive, non è stata trattata nella ricerca dei parametri geometrici caratteristici né dei rettifili né delle curve, ipotizzando una possibile presenza di archi clotoidici all'interno del tracciato.

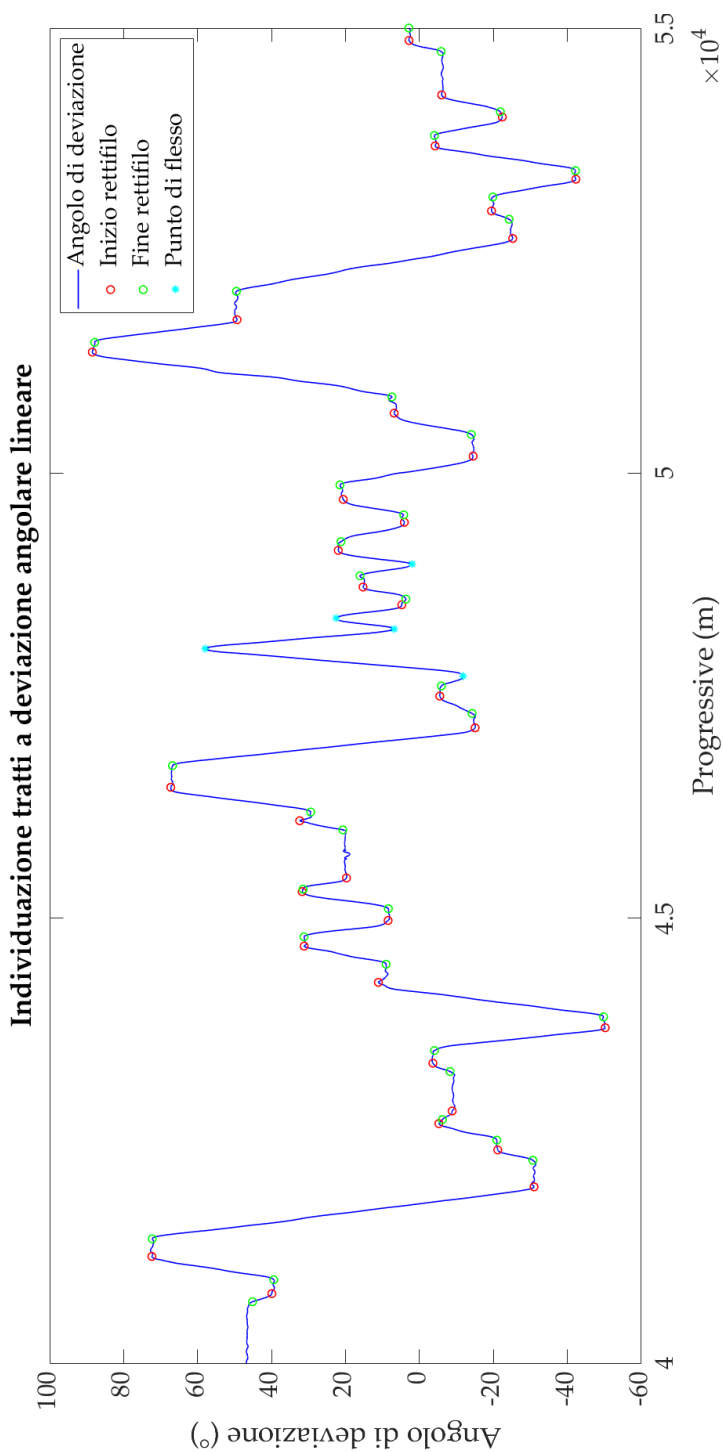


Figura 17 - Individuazione dei punti di inizio e fine dei tratti di rettifilo e dei punti di flesso della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km

Analisi dell'andamento geometrico delle strade esistenti

Analizzando più attentamente le zone di separazione fra valori di azimut costanti e lineari si notano, infatti, andamenti degli angoli di deviazione curvilinei; queste zone rientrano mediamente in una distanza che è circa pari a 1/5 della lunghezza del tratto a deviazione lineare.

Noti i vertici del grafo appartenenti a ciascun elemento geometrico, per i rettili sono stati definiti la lunghezza, il valor medio dell'angolo azimutale e lo scarto di tutti i segmenti componenti il tratto, i punti di inizio e di fine in coordinate Est e Nord (Tabella 3):

	L (m)	$\bar{\alpha}$ (°)	σ (m)	E_i (m)	N_i (m)	E_f (m)	N_f (m)
Rett. 1	205.52	19.17	0.58	2313937.5	4651583.2	2313870.0	4651389.1
Rett. 2	68.64	25.65	0.59	2313998.1	4651718.7	2313968.6	4651656.8
Rett. 3	79.56	27.58	0.53	2314072.8	4651861.9	2314036.0	4651791.4
Rett. 4	259.91	23.39	0.38	2314209.1	4652169.7	2314105.9	4651931.2
Rett. 5	20.36	38.45	0.09	2314311.8	4652333.7	2314299.1	4652317.8
Rett. 6	105.43	15.86	0.44	2314403.7	4652552.1	2314374.9	4652450.7
Rett. 7	12.95	22.07	0.01	2314448.1	4652676.4	2314443.3	4652664.4
Rett. 8	119.66	-24.32	0.2	2314382.7	4653143.4	2314432.0	4653034.3
Rett. 9	340.07	18.06	0.85	2314476.8	4653938.4	2314371.3	4653615.2
Rett. 10	218.78	91.24	0.24	2315295.8	4654341.2	2315077.1	4654345.9

Tabella 3 - Indicazioni relative ai rettili

Per i vertici del grafo che si trovano all'interno dei punti di inizio e fine di un arco di circonferenza, questi sono stati usati per calcolare centro e raggio delle circonferenze con un codice di *circle fitting* ai minimi quadrati, descritto in Appendice B. Si riportano in Tabella 4 le

Capitolo 3

coordinate Est e Nord del centro e il valore del raggio delle circonferenze, gli scarti, le coordinate Est e Nord dei punti di inizio e fine, lo sviluppo dell'arco e il valore dell'angolo al centro:

	E_c	N_c	R	σ	E_i	N_i
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Circ. 1	2314485.9	4651399.3	578.3	0.04	2313943	4651598.5
Circ. 2	2313038.2	4652397.5	1165	0.1	2314079.7	4651875.5
Circ. 3	2314581.2	4652045.8	389.5	0.26	2314223.7	4652201.1
Circ. 4	2314143.7	4652503.7	236.6	0.39	2314330.1	4652357.9
Circ. 5	2315098.3	4652369.9	717.6	0.15	2314411.2	4652577.3
Circ. 6	2314120.3	4652837.3	364.3	0.25	2314473	4652746.9
Circ. 7	2314926.2	4653387.6	596.8	0.33	2314349.3	4653235.8
Circ. 8	2315049.6	4653733.4	611.5	0.81	2314547.7	4654083.5

	E_f	N_f	S_v	α
	(m)	(m)	(m)	(rad)
Circ. 1	2313961.1	4651642.2	47.3	0.08
Circ. 2	2314099.2	4651916.5	45.39	0.04
Circ. 3	2314278.3	4652290.9	105.34	0.27
Circ. 4	2314367.8	4652427.3	79.33	0.34
Circ. 5	2314435.5	4652644.9	71.88	0.10
Circ. 6	2314460.6	4652967.5	224.53	0.62
Circ. 7	2314345.5	4653526.4	293.57	0.49
Circ. 8	2314923.2	4654331	460.79	0.75

Tabella 4 - Indicazioni relative alle circonferenze

Come riportato in Figura 18, è stata geometrizzata completamente la S.S. 4 e sono state importate in ambiente CAD tutte le circonferenze derivanti dall'analisi dei vertici del grafo tramite il codice Matlab.

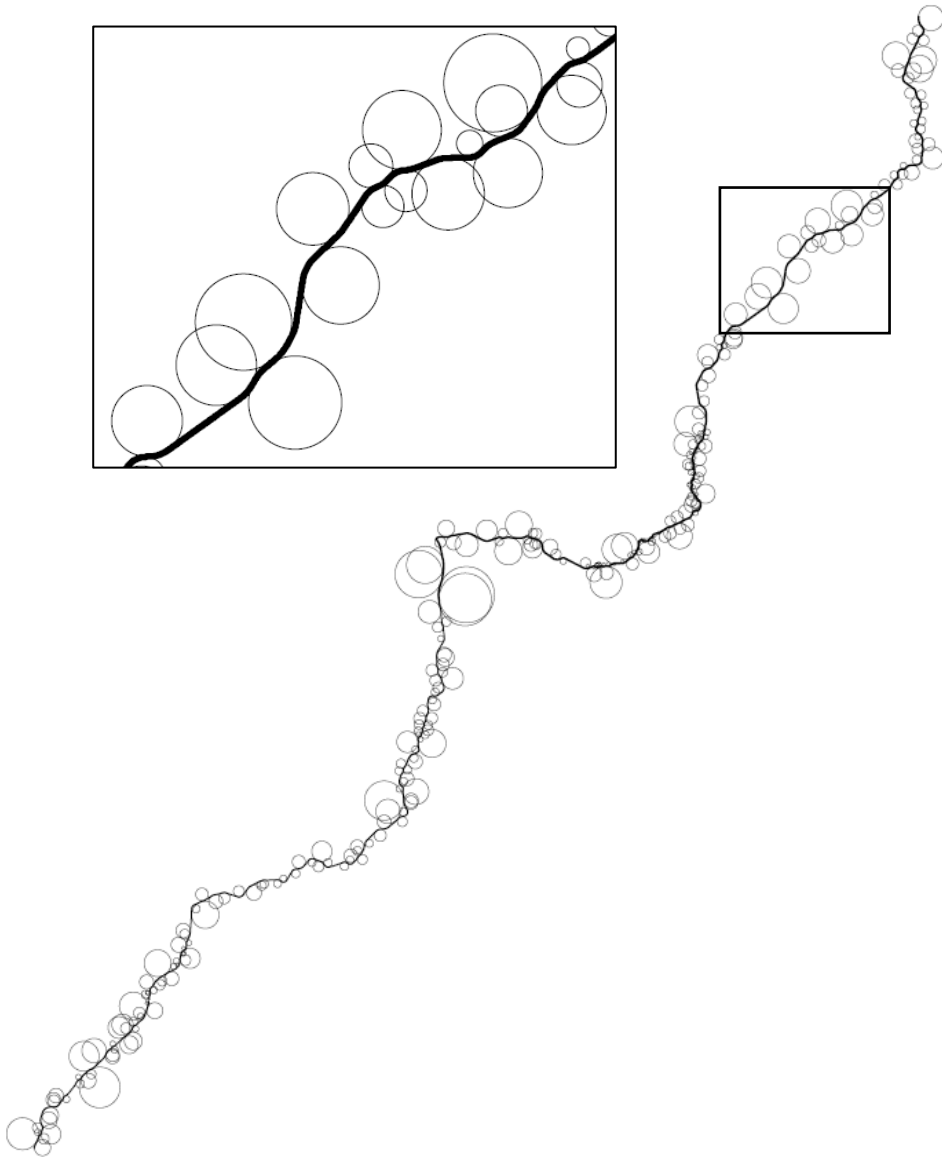


Figura 18 - Circonferenze degli archi di curva appartenenti alla S.S.4

In Figura 19 si riporta un esempio di circonferenza desunta tramite *circle fitting* in cui si rappresentano in rosso i punti che sono stati utilizzati per la valutazione ai minimi quadrati dei valori delle

coordinate del centro e del raggio tabellati e in nero la curva della circonferenza:

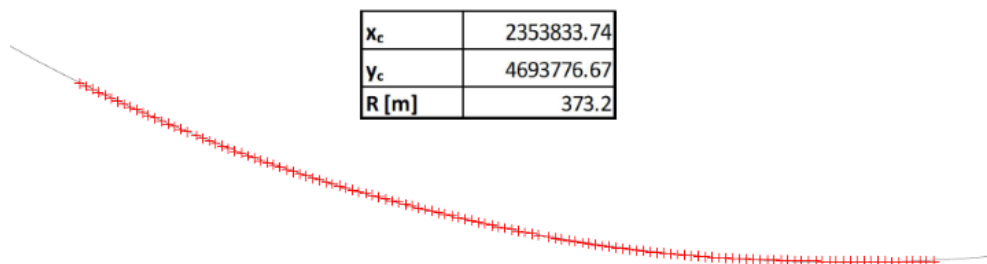


Figura 19 - Esempio di circle fitting ai minimi quadrati per il calcolo di centro e raggio di una circonferenza

3.2 Costruzione del diagramma delle curvature

Terminato il calcolo dei parametri descrittivi dei diversi elementi planimetrici, è stato successivamente costruito il diagramma delle curvature dell'intero tracciato stradale. Si è assunto come valore positivo convenzionale il verso delle curve destrorse nella direzione da A a B e negativo quello delle curve sinistrorse. Le zone grigie non appartenenti né ai rettifili né agli archi di curva sono state trattate come elementi a curvatura variabile che servono da elementi di transizione per collegare curvature differenti.

In Figura 20 viene riportato l'andamento delle curvature, dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km:

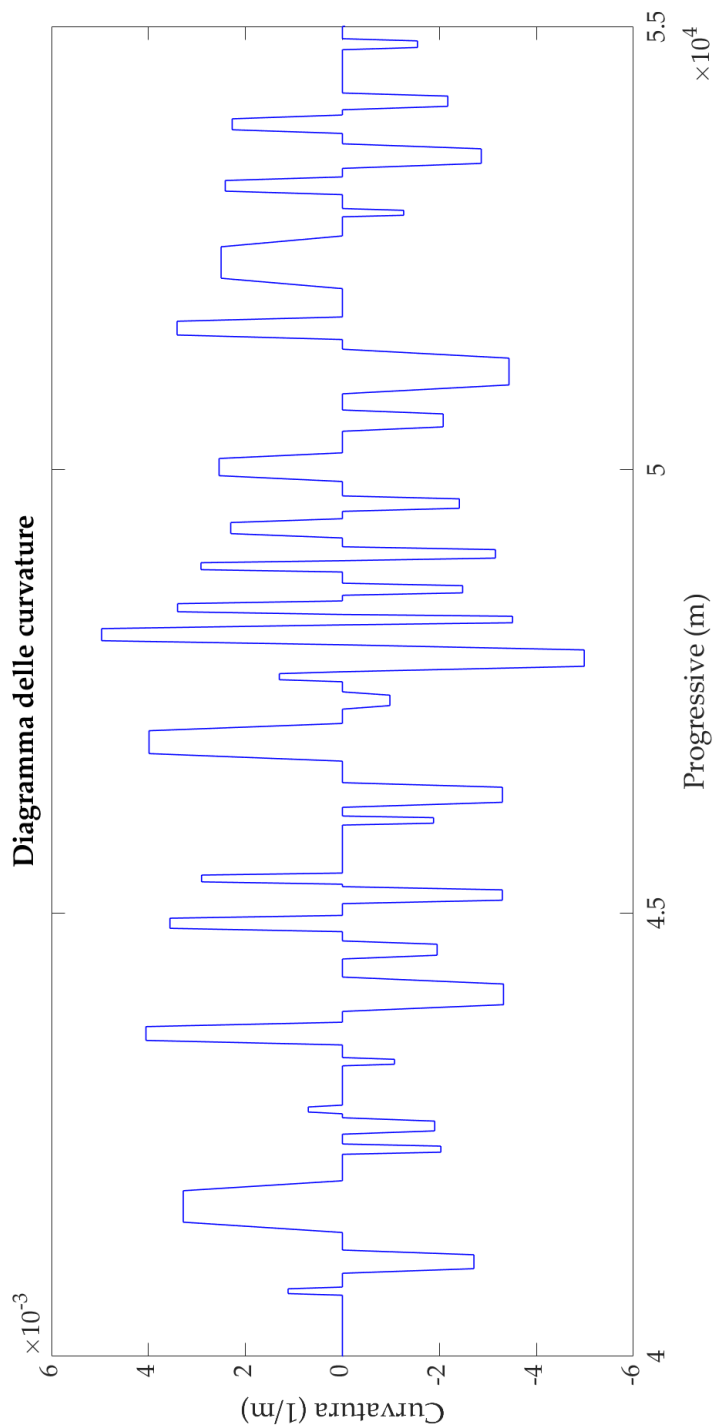


Figura 20 - Diagramma delle curvature della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km

3.3 Costruzione del diagramma delle velocità

Definito il diagramma delle curvature, è stato implementato un ulteriore codice per calcolare il diagramma delle velocità teorico. Esso si riporta in Figura 21. Tale calcolo segue le indicazioni del DM 2001 [1] secondo le quali:

- *“la velocità è costante lungo tutto lo sviluppo delle curve con raggio inferiore a $R_{2,5}$, e si determina dagli abachi 5.2.4.a e 5.2.4.b;*
- *in rettilineo, sugli archi di cerchio con raggio non inferiore a $R_{2,5}$ e nelle clotoidi, la velocità di progetto tende al limite superiore dell’intervallo; gli spazi di accelerazione conseguenti all’uscita da una curva circolare, e quelli di decelerazione per l’ingresso a detta curva, ricadono soltanto negli elementi considerati (rettilineo, curve ampie con $R > R_{2,5}$ e clotoidi);*
- *i valori dell’accelerazione e della decelerazione restano determinati in 0.8 m/s^2 ;*
- *si assume che le pendenze longitudinali non influenzino la velocità di progetto.”*

“La lunghezza di transizione DT è la lunghezza in cui la velocità, conformemente al modello teorico ammesso, passa dal valore V_{p1} a quello V_{p2} , competenti a due elementi che si succedono. DT (in metri) è dato dalla seguente espressione:

$$DT = \frac{\Delta V * V_m}{12.96 * a}$$

$\Delta V =$ differenza di velocità ($V_{p1} - V_{p2}$) [km/h]

$V_m =$ velocità media tra due elementi [km/h]”

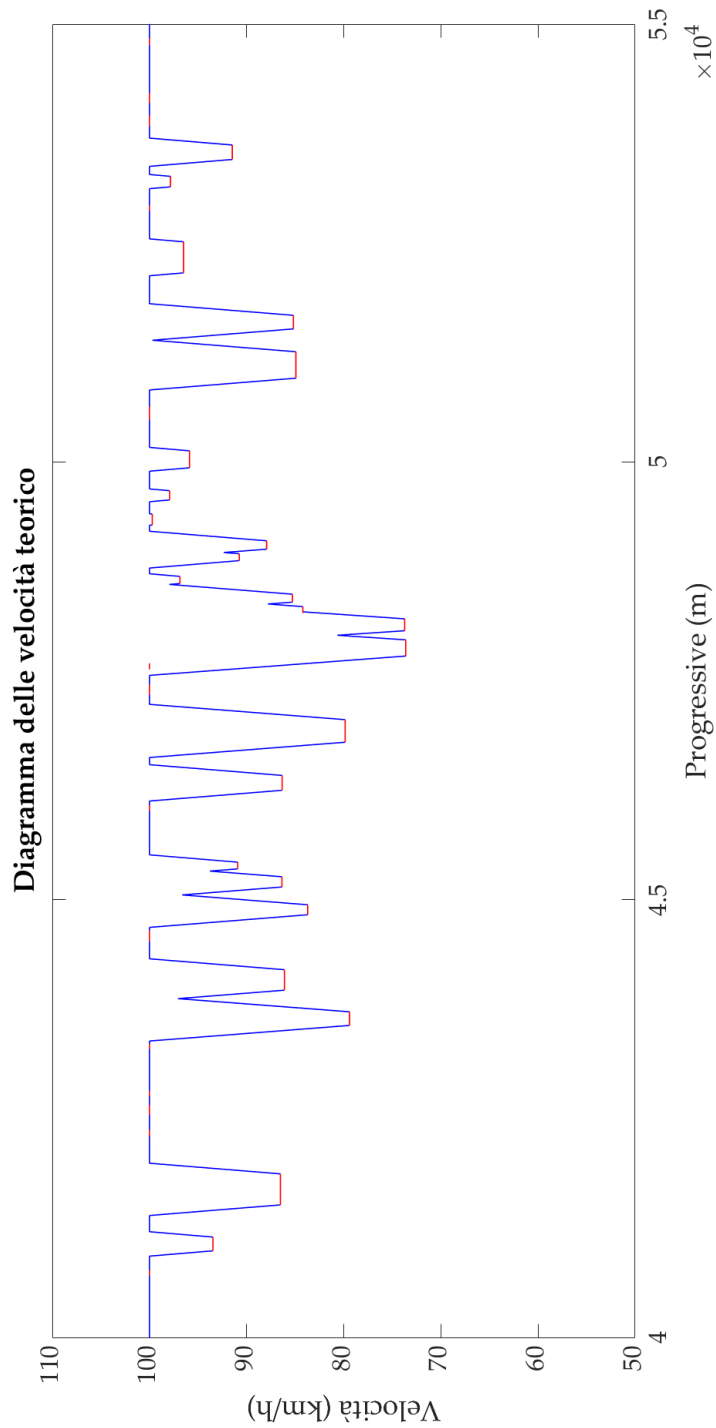


Figura 21 - Diagramma delle velocità della S.S.4 dalla progressiva 40+000 km alla progressiva 55+000 km

4 Analisi dei dati di velocità di percorrenza

Definito l'andamento orizzontale del tracciato in esame, è interessante comprendere il comportamento di guida degli utenti lungo tale tronco, tramite lo studio delle velocità da essi attuate.

Come risulta dall'analisi della letteratura, la raccolta dei dati di velocità, fino ad oggi, è sempre stata condotta con strumentazioni fisse quali circuiti a induzione, radar o telecamere in grado di registrare le velocità realmente assunte dai guidatori solo in alcune specifiche sezioni stradali. Altre apparecchiature utilizzate sono state veicoli sonda con strumenti montati a bordo, in grado di registrare le velocità in continuo lungo la strada. Il limite di tale modalità di raccolta delle informazioni risiede nel fatto che il guidatore è a conoscenza dell'installazione della strumentazione a bordo del veicolo e potrebbe allontanarsi dalla sua spontanea condotta di guida. Inoltre, con la predetta modalità di acquisizione dati è soprattutto difficile ottenere un campione statisticamente significativo di misure, in quanto la popolazione di utenti che si riescono a far viaggiare su tali veicoli è limitata.

In questo contesto, ottenere una raccolta di informazioni di dati di velocità di una popolazione di utenti molto varia, lungo l'intero sviluppo del tracciato in esame, si presenta come un tema avanzato da esplorare.

Analisi dei dati di velocità di percorrenza

Allo stato, è possibile ottenere queste informazioni mediante l'estrapolazione e l'analisi dei Floating Car Data (FCD), che sono dati provenienti da veicoli sonda dotati di scatole nere installate per fini assicurativi, geolocalizzati attraverso la tecnologia GPS. Questi dispositivi registrano informazioni come posizione, velocità e direzione di viaggio, che poi vengono inviate in forma anonima ad un centro di elaborazione dati.

A differenza dei circuiti a induzione, che catturano l'intera flotta veicolare, i dati mobili tendono a coinvolgerne solo una percentuale relativamente piccola, a seconda del fornitore di dati. Quando su un tracciato circola un flusso veicolare basso, il campione diventa più piccolo e meno affidabile, il che significa che i dati hanno la virtù di essere più affidabili su strade trafficate, dove in genere è anche più urgente la necessità di intervenire nella gestione del traffico. Con questa nuova tecnologia sarà impossibile monitorare la totalità del traffico veicolare, ma anche con una dimensione del campione nell'ordine del 2-5% si possono fare valutazioni accurate e fornire buone stime dei tempi di viaggio e delle modalità di circolazione.

Riconosciuta l'importanza dei FCD, per ottenere tali informazioni nel corso della ricerca qui presentata ci si è rivolti alla Vem Solutions, società controllata al 100% da Viasat Group, che grazie alla sua consolidata attività nel mercato LBS (Local Based Services), ha maturato negli anni un'importante esperienza nell'ambito della

Capitolo 4

gestione di un database telematico tra i più rilevanti e consistenti a livello europeo, alimentato da sistemi informativi per la raccolta in tempo reale dei dati di mobilità, rilevati e trasmessi da appositi “*on board unit*”. La Vem Solutions dispone di una mole molto grande di dati anonimi che conserva nel pieno rispetto della privacy dei suoi clienti e che di anno in anno aumenta a livello esponenziale, vista la rapida crescita del parco veicoli su cui vengono installate le black box e il crescente numero di dati storici da immagazzinare.

La suddetta società gestisce ogni anno in Italia **12 miliardi di posizioni** sui tracciati, percorsi da oltre **30000 veicoli pesanti** e oltre **500000 veicoli leggeri**, e rappresenta oggi circa il **2% del parco vetture circolante in Italia** (secondo i dati ACI e ANIA 2017).

Tutte queste informazioni, opportunatamente salvate ed elaborate, consentono di generare servizi potenzialmente in grado di incidere significativamente sulla sicurezza di coloro che si mettono alla guida.

Se si osserva più da vicino il mondo dei Big Data, è previsto che nel 2021 ci saranno circa 380 milioni di veicoli connessi che genereranno circa 25 GB/ora di dati di diversa tipologia, dai dati di diagnostica ai dati di localizzazione del veicolo, dalla comunicazione V2X ai dati per le polizze telematiche. La sfida, a quel punto, sarà l’immagazzinamento di tutte queste informazioni all’interno di banche dati sufficientemente potenti in grado di memorizzare e organizzare

Analisi dei dati di velocità di percorrenza

enormi dataset non strutturati o semi-strutturati e allo stesso tempo garantire la loro disponibilità e la capacità di interazione con essi in modo affidabile, veloce e sicuro.

Tornando allo studio effettuato, relativamente alle velocità effettivamente assunte dagli utenti, non è necessario analizzare dati in tempo reale (procedura che risulterebbe più onerosa da mettere in pratica a livello computazionale e anche meno soddisfacente da un punto di vista della quantità di dati ottenibili). Sono stati perciò richiesti, e successivamente analizzati, gli Historical Car Data (HCD) di Viasat, forniti all'interno del software MySQL Workbench (programma sviluppato da Oracle che consente di amministrare a distanza i database dal computer).

I dati ottenuti da Anas S.p.A., dalla società assicurativa risalgono al periodo temporale compreso fra agosto 2016 e febbraio 2017 e sono localizzati in un quadrilatero comprendente tutta la regione Lazio, parte delle Marche, dell'Abruzzo e dell'Umbria (Figura 22).

Le informazioni derivanti da tali dati concernono riassuntivamente quanto segue: Identificativo del veicolo; Identificativo Viasat; Tipo di veicolo (con 3 si identificano le autovetture, unica tipologia di veicolo di cui sono stati forniti i dati); Identificativo dell'apparecchio; Data e ora di accensione del veicolo; Data e ora di emissione del segnale; Longitudine (in coordinate WGS

Capitolo 4

84); Latitudine (in coordinate WGS 84); Qualità del segnale: 1, 2 o 3 a seconda della precisione con cui è stato emesso; Velocità; Direzione; Odometro (v. Tabella 5).

id	id_viasat	tipo_veicolo	id_device	ts_quadro_on	ts_campione	lon	lat	qualita	velocita	direzione	odometro	tpo_posizione
14683348641	10612091212	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:47:35	12.3748750000	41.7892220000	3	58	244	21900	2
14683348651	10612091214	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:48:35	12.3649550000	41.7858080000	3	54	250	22800	2
14683348661	10612091216	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:49:35	12.3593290000	41.7861590000	3	58	334	23500	2
14683348671	10612091218	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:50:35	12.3569780000	41.7885320000	3	41	246	24100	2
14683348681	10612091220	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:51:35	12.3542470000	41.7854340000	3	43	156	24700	2
14683348691	10612091222	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:52:35	12.3469010000	41.7837400000	3	52	274	25400	2
14683348701	10612091224	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:53:35	12.3463920000	41.7883030000	3	8	338	26000	2
14683348711	10612091226	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:54:35	12.3467640000	41.7890540000	3	48	32	26100	2
14683348721	10612091228	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:55:35	12.3476940000	41.7883790000	3	0	0	26400	2
14683348731	10612091310	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:56:35	12.3476640000	41.7883560000	3	0	0	26400	2
14683348741	10612091312	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:57:35	12.3475150000	41.7883260000	3	0	0	26400	2
14683348751	10612091314	3	5342443155	2016-12-31 22:28:35	2016-12-31 22:57:52	12.3476680000	41.7883030000	3	0	0	26400	3
14683348761	10612091480	3	0324828515	2016-12-31 22:51:58	2016-12-31 22:57:58	12.4656810000	41.9463760000	3	42	94	1600	2
14683348771	10612091680	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:44:48	12.4975520000	41.8951530000	1	0	0	0	1
14683348781	10612091682	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:45:56	12.4976240000	41.8952670000	3	1	0	0	2
14683348791	10612091684	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:46:56	12.4935980000	41.8948510000	3	2	0	300	2
14683348801	10612091686	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:47:56	12.4953800000	41.8967590000	3	48	34	600	2
14683348811	10612091688	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:48:56	12.4917720000	41.8978150000	3	38	318	1000	2
14683348821	10612091690	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:49:56	12.4904060000	41.8987150000	3	7	320	1100	2
14683348831	10612091692	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:50:56	12.4949550000	41.9019270000	3	0	0	1600	2
14683348841	10612091694	3	7134048515	2016-12-31 22:44:48	2016-12-31 22:51:56	12.4965440000	41.9027360000	3	23	6	1800	2

Tabella 5 - Esempio di informazioni derivanti da un campione di HCD



Figura 22 - Esempio di 50000 HCD risalenti a gennaio 2017

Analisi dei dati di velocità di percorrenza

Il numero totale del campione è di più di 600 milioni di dati così distribuiti (Tabella 6):

agosto 2016	84118269
settembre 2016	91010561
ottobre 2016	100465702
novembre 2016	89270373
dicembre 2016	91729139
gennaio 2017	79893798
febbraio 2017	77692483
Tot FCD	614180325

Tabella 6 - Distribuzione nei mesi di indagine della numerosità del campione HCD

4.1 Map matching

Una volta definito il campione di dati a disposizione è stata intrapresa una procedura di map matching per abbinare le coordinate geografiche dei dati veicolari al grafo di ciascuna strada. Si riporta in Appendice C il codice implementato su Matlab e, a titolo esemplificativo, si descrive la procedura utilizzata per l'analisi degli HCD lungo la Via Salaria (S.S. 4).

In primo luogo, per diminuire quanto più possibile i tempi di elaborazione al calcolatore per la ricerca dei punti associabili al tracciato di interesse, è stato costruito in ambiente QGIS un poligono realizzato a una distanza di circa 20 m per lato dalla linea d'asse del tracciato (Figura 23); questa distanza, molto più grande della semicarreggiata minima indicata nel DM 2001, è stata scelta in quanto

Capitolo 4

la posizione indicata dal GPS dei veicoli potrebbe essere affetta da errori intrinseci e accidentali dovuti, ad esempio, alle imprecisioni dei segnali di clock dei satelliti o agli effetti atmosferici sulla velocità di propagazione del segnale, che possono portare posizionamenti dei veicoli errati anche di qualche metro; per evitare la perdita di tali dati si è allargato il campo di ricerca del campione.



Figura 23 - Poligono approssimante la linea d'asse del tracciato S.S.4

Analisi dei dati di velocità di percorrenza

Successivamente, sono stati estrapolati un totale di 2499060 HCD ricadenti all'interno del poligono chiuso sopra descritto, tramite interrogazione della banca dati in MySQL, avvenuta tramite il seguente codice, in cui con (x_i, y_i) si rappresentano le coordinate dei vertici del poligono contenente il grafo:

```
USE viasat201701;
SET @zone = st_GeomFromText ('Polygon ((xi,yi))');
SELECT * FROM viasat201701.fvd_veicoloviasat_2017_1
WHERE ST_CONTAINS (@zone, POINT (lon, lat))
INTO OUTFILE 'C:/ProgramData/MySQL/MySQL Server
5.7/Uploads/ fvd_veicoloviasat_2017_01_SS4new.csv'
FIELDS OPTIONALLY ENCLOSED BY '"'
TERMINATED BY ';'
LINES TERMINATED BY '\n'.
```

Per associare i veicoli al tracciato stradale, secondo quanto descritto nel codice sviluppato (e riportato in Appendice C), è stata creata una griglia composta da maglie di 1000 m ciascuna, formante un quadrilatero contenente tutto il tracciato in esame (Figura 24). In seguito, è stata avviata la ricerca degli HCD all'interno di ogni maglia, scartando di volta in volta i quadrati non contenenti alcun punto. Identificato un quadrato al cui interno risultano dati veicolari, è stato

considerato un quadrato più grande composto da 3 maglie per lato, al cui centro è situato quello in esame ed è stato preso in considerazione tutto il tratto di strada ricadente nel quadrato 3x3.

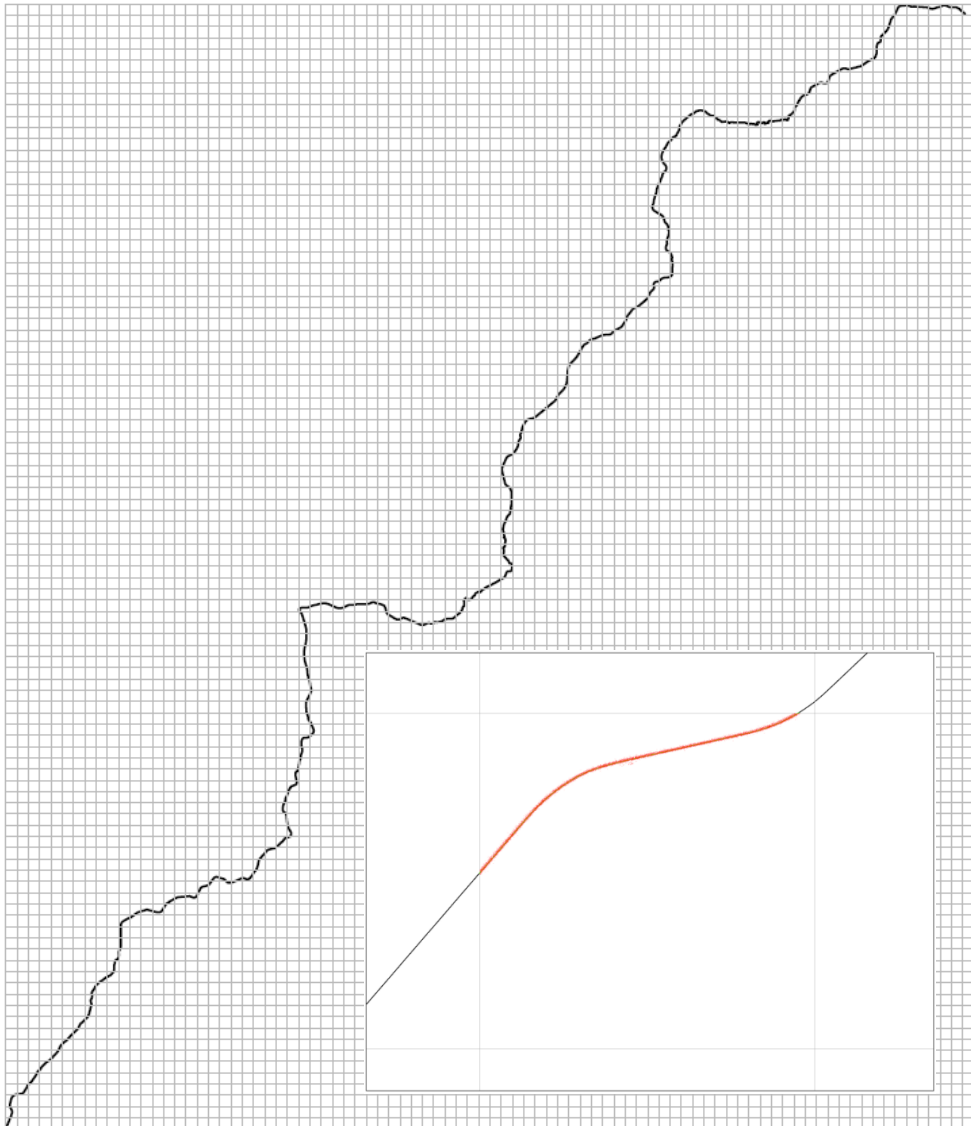


Figura 24 - Quadrilatero a maglie per il processo di map matching sulla S.S.4

Analisi dei dati di velocità di percorrenza

Ormai noti i segmenti della strada in esame e gli HCD situati nel loro intorno, è stato avviato il processo di map matching con la relativa proiezione degli HCD lungo il grafo.

È stato utilizzato il metodo “*point-to-curve*”: il punto è proiettato ortogonalmente sul segmento (link) che gli è più vicino, come riportato in Figura 25:

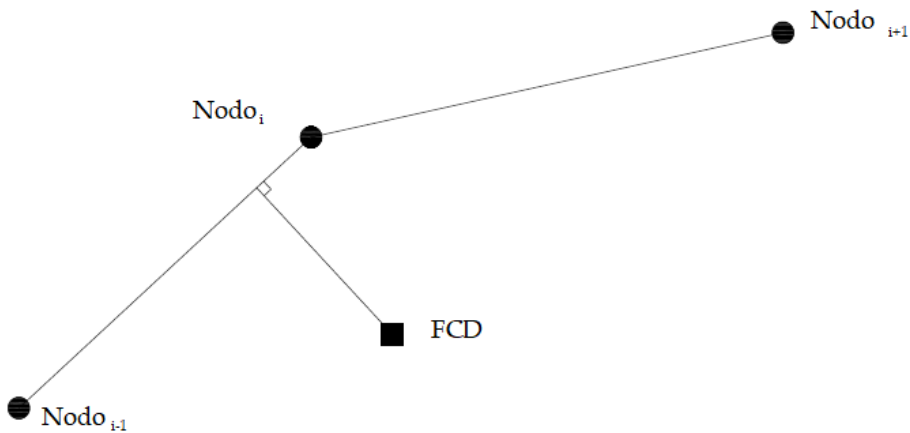


Figura 25 - Rappresentazione esemplificativa del metodo point-to-curve

L'altro metodo utilizzabile nell'ambito del map matching è quello “*point-to-point*”, che associa il punto al nodo della strada più vicino. Questo metodo è stato scartato in quanto non permette una corretta rappresentazione delle velocità lungo tutto il tracciato, limitando la collocazione dei dati solo ai nodi.

Sono state dapprima eliminate le registrazioni con direzione e velocità contemporaneamente nulle, segnale che il veicolo ha inviato dati errati, probabilmente dovuti a una scarsa potenza del segnale GPS;

Capitolo 4

in un secondo momento, sono stati esclusi gli HCD a distanza maggiore di 15 m dall'asse stradale.

I dati geolocalizzati residuali (rappresentati con i cerchi rossi in Figura 26) sono stati proiettati sul segmento più vicino (raffigurati in Figura 26 con i simboli verdi):

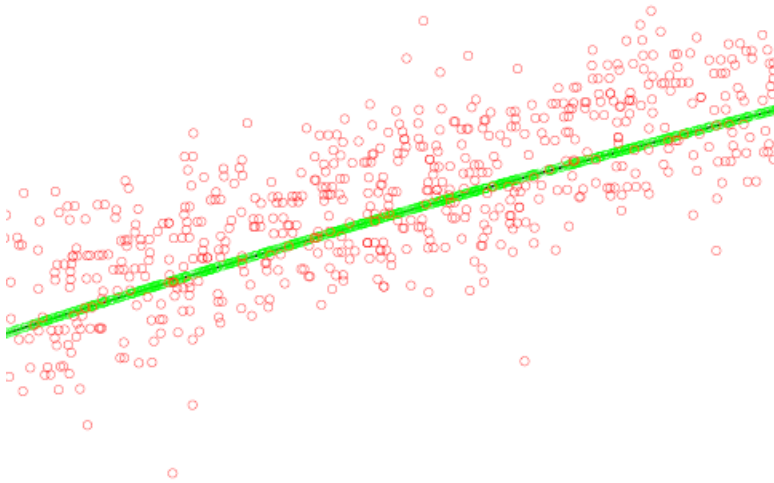


Figura 26 - Rappresentazione di un campione limitato dei dati proiettati sul grafo

Inoltre, poiché è nota la direzione veicolare, si è potuto confrontarla con la direzione del segmento di strada su cui l'HCD è stato proiettato e, quindi, è stato possibile suddividere i dati in base al verso di percorrenza del tracciato: direzione AB e direzione BA. Gli HCD aventi direzione in totale disaccordo con l'andamento planimetrico della strada ($|\alpha_{segmento} - \alpha_{HCD}| > 20^\circ$) sono stati eliminati in quanto, presumibilmente, registrati in corrispondenza di intersezioni, sottopassi, sovrappassi o accessi.

Analisi dei dati di velocità di percorrenza

Si riporta di seguito, in Figura 27, un ingrandimento di alcuni segmenti della S.S. 4 in cui si rappresentano gli HCD nelle due direzioni di marcia (in blu e in rosso) e quelli appartenenti a svincoli, a zone di sosta o ad altre strade intersecanti (in arancione).

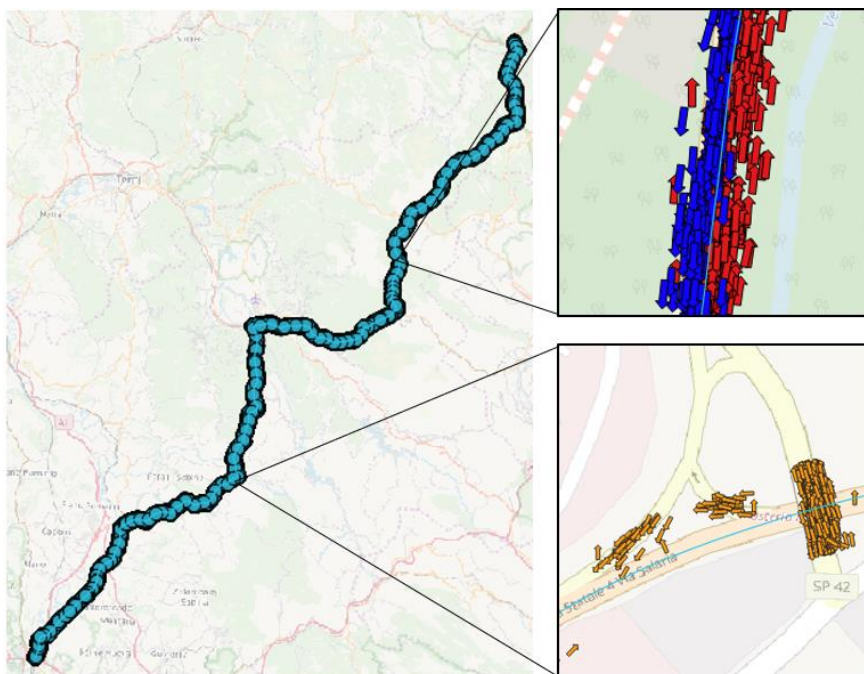


Figura 27 - Suddivisione degli HCD in direzione AB, BA e NO dir. sulla S.S.4

Riassumendo i risultati ottenuti a seguito della suddivisione degli HCD in base al filtraggio appena descritto, si ottiene la seguente Tabella 7 riassuntiva:

Tutti i dati	2499060
Senza V=0, dir=0	2223050
Senza doppi	1901491
dirAB	785615
dirBA	757987
Nodir	71711

Tabella 7 - Numerosità del campione HCD in base alla direzione di marcia

Capitolo 4

Sono stati, in seguito, diagrammati gli HCD proiettati sull'intero tracciato stradale in esame nel piano Progressive-Velocità, divisi nelle 2 direzioni di marcia (Figura 28 e Figura 29) e raffrontati con il diagramma delle velocità teorico calcolato precedentemente:

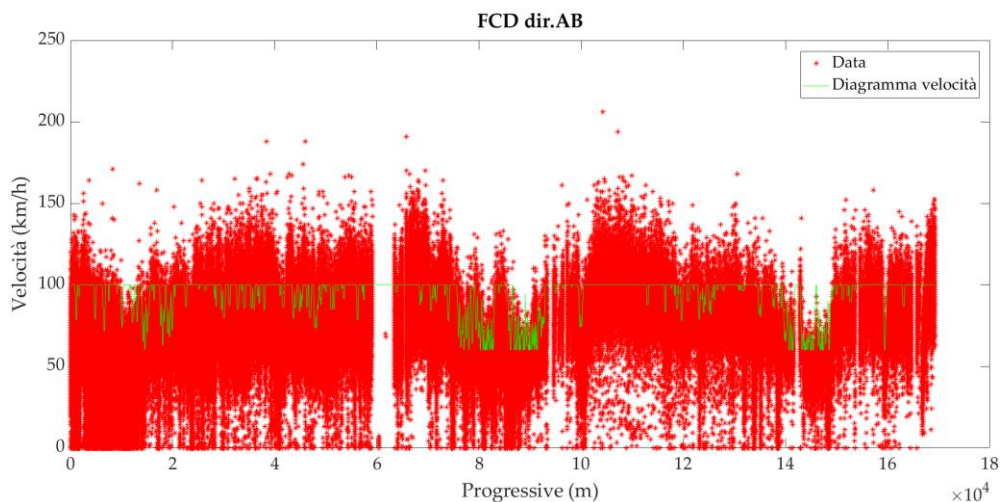


Figura 28 - Esempio di confronto fra HCD e diagramma delle velocità per la S.S.4 in direzione AB

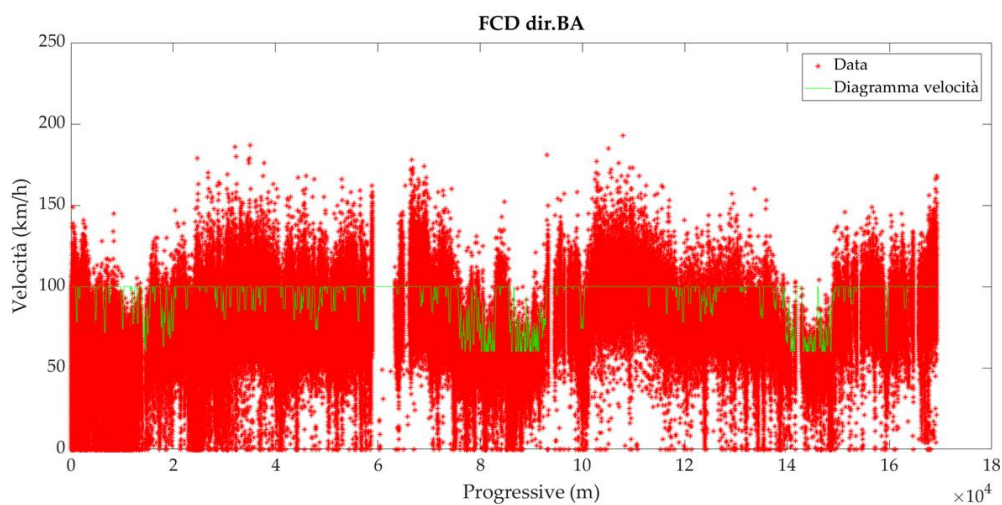


Figura 29 - Esempio di confronto fra HCD e diagramma delle velocità per la S.S.4 in direzione BA

4.2 Filtraggio dei dati

Avendo deciso di studiare il comportamento degli utenti su strade extraurbane secondarie, è risultato fondamentale eliminare i dati in corrispondenza di:

- tratti di strada che passano all'interno dei centri abitati, in cui lo stile di guida si modifica sensibilmente, le velocità diminuiscono e si annullano in corrispondenza di attraversamenti pedonali o impianti semaforici;
- gallerie, in cui il segnale GPS è scarso o addirittura assente e le informazioni contenute nei dati registrati possono differire anche di molto dalla realtà, sia in termini di velocità che di direzioni di marcia, oltre al fatto che le condizioni di visibilità sono nettamente diverse da quelle in ambiente aperto;
- tratti di strada a carreggiate separate, in cui aumenta il livello di sicurezza e la geometria della strada è meno vincolata.

Innanzitutto, è stata condotta la ricerca dei centri abitati a partire dalle informazioni presenti sul sito dell'ANAS S.p.A., che definisce i criteri di caratterizzazione delle strade interne ai centri abitati, secondo quanto segue:

“La delimitazione del centro abitato è effettuata dal Comune, che individua lungo le strade statali, con il Compartimento della viabilità Anas, i

Capitolo 4

tratti interni. I tratti di strade statali interni ai centri abitati con popolazione superiore ai 10.000 abitanti sono a tutti gli effetti strade comunali. Il dato popolazione dovrà riferirsi al solo centro abitato e non all'intero territorio comunale ed essere certificato con una dichiarazione del Sindaco.

Le strade statali che attraversano centri abitati con popolazione non superiore ai 10.000 abitanti sono a tutti gli effetti statali, l'Anas conserva esclusivamente la gestione e la manutenzione del piano viabile".

La società fornisce in forma tabellare le progressive di inizio e fine dei centri abitati, l'estensione e la numerosità della popolazione per ciascuna strada di interesse. Si riporta di seguito la Tabella 8 presente sul sito per la S.S. 4:

Centro Abitato	Dal Km	Al Km	Estesa	10.000 abitanti
Monterotondo	22,013	26,017	4,004	Superiore
Terme Di Cotilia (Castel Sant'angelo)	89,050	89,800	0,750	Inferiore
Vasche (Castel Sant'angelo)	90,050	90,900	0,850	Inferiore
Canetra (Castel Sant'angelo)	92,300	93,220	0,920	Inferiore
Antrodoco	97,880	98,650	0,770	Inferiore

Tabella 8 - Informazioni sui centri abitati disponibili sul sito Anas

A partire dalle progressive fornite, sono state ricavate le coordinate Est e Nord dei centri abitati e sono stati importati i punti di inizio e fine dei centri abitati su Google Earth (Figura 30). A seguito di attenta analisi si è notata una discordanza fra la posizione della cartellonistica stradale identificativa dell'inizio e della fine dei centri abitati e la rielaborazione tramite codice di calcolo delle chilometriche

Analisi dei dati di velocità di percorrenza

dichiarate sul sito ANAS sotto forma di coordinate Est e Nord. Tale differenza è dovuta alla non corrispondenza effettiva fra le chilometriche calcolate e quelle dichiarate tramite cippi amministrativi; per questo motivo le posizioni dei punti sono state ridefinite manualmente.



Figura 30 - Comune di Monterotondo attraversato dalla S.S.4

Successivamente, sono state acquisite le coordinate di inizio e fine delle gallerie da un elenco fornito dalla società ANAS contenente tutte le gallerie del Lazio.

Le informazioni a disposizione comprendono la Regione, il nome dell'opera, il lato della piattaforma su cui si trova, la Provincia, il Comune, il codice della strada, la progressiva di inizio e quella di fine della galleria, l'anno di apertura, la lunghezza, la tipologia (naturale o artificiale), le quote nei punti iniziale e finale, le latitudini e le

Capitolo 4

longitudini dei punti iniziale e finale, la presenza di illuminazione e ventilazione artificiale (sì o no) all'interno delle stesse.

Si riporta un esempio di indicazioni fornite relativo alla Strada Statale 4 nella Tabella 9 seguente:

COMP	NOME OPERA	LATO	PROV.	COMUNE	COD	PROGi	PROGf
LAZIO	Colle Giardino	Entrambi	Rieti	RIETI	SS4	70900	75320
LAZIO	S. Antonio	Entrambi	Rieti	RIETI	SS4	76800	77456
LAZIO	Gola del Velino	Entrambi	Rieti	POSTA	SS4	105091	105919
LAZIO	S. Pietro	Entrambi	Rieti	POSTA	SS4	107668	108116
LAZIO	Sigillo	Entrambi	Rieti	POSTA	SS4	108269	109000
LAZIO	Casali	Entrambi	Rieti	POSTA	SS4	109648	109875
LAZIO	Briglione	Entrambi	Rieti	POSTA	SS4	109954	110119
LAZIO	S. Giovanni	Entrambi	Rieti	POSTA	SS4	110179	110311
LAZIO	S. Rufina	Entrambi	Rieti	POSTA	SS4	113786	113894
LAZIO	San Giorgio	Entrambi	Rieti	AMATRICE	SS4	130630	130734

Tabella 9 - Dati forniti da ANAS S.p.A. relativi alle gallerie presenti sulla S.S.4

In Figura 31 viene rappresentata la galleria Colle Giardino che presenta anche un tratto a carreggiate separate:



Figura 31 - Strada Statale 4 Via Salaria - galleria Colle Giardino, nel comune di Rieti - imbocco nord della canna in direzione sud (Roma)

Infine, sono stati ricavati direttamente dal grafo i tratti di strada a carreggiate separate, ricercando le zone in cui il grafo si biforca in due assi pressoché paralleli.

Sono stati, quindi, eliminati questi tratti per non considerare quegli elementi stradali su cui si osserverebbe un comportamento diverso dell'utente, che quindi potrebbe portare a risultati dell'analisi poco attendibili.

Sono state, quindi, esportate le informazioni geografiche di ogni punto di inizio e fine dei tratti da non considerare e sono state rappresentate su QGIS, come si vede in Figura 32.

Capitolo 4

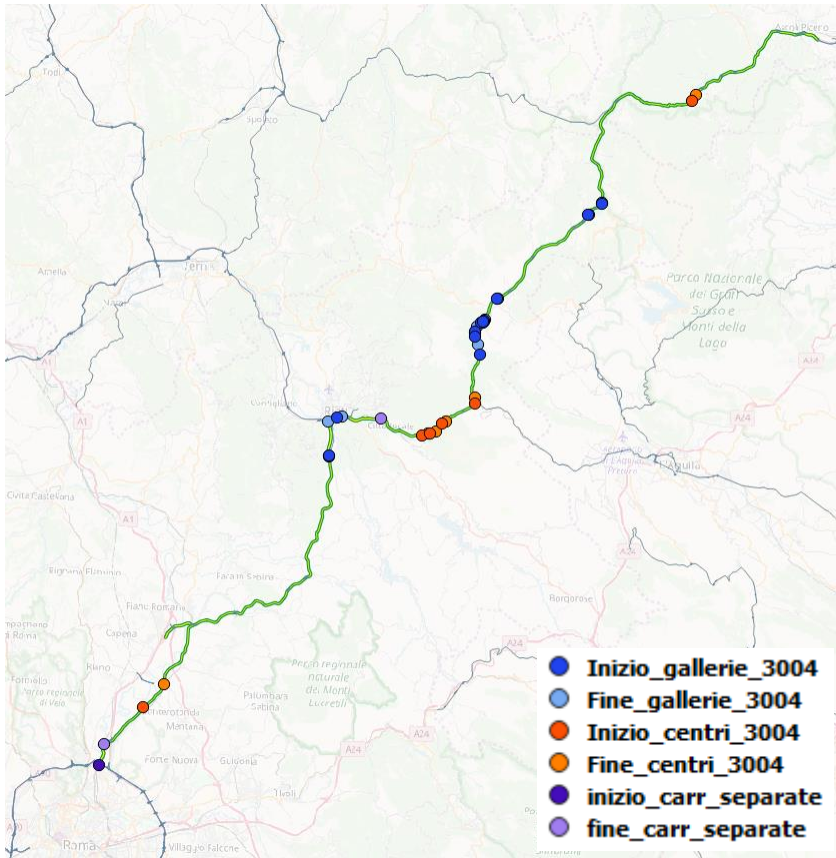


Figura 32 - Rappresentazione su QGIS di tutti i punti di inizio e fine delle gallerie, dei centri abitati e dei tratti di strada a carreggiate separate

5 Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

Note le caratteristiche geometriche degli elementi planimetrici di progetto delle diverse strade studiate e la dislocazione dei dati di velocità puntuali forniti dagli HCD lungo l'ascissa curvilinea di ciascuna infrastruttura, lo studio si è concentrato sull'analisi delle velocità attuate dagli utenti su strada secondo due diversi approcci.

Da un lato è risultato interessante filtrare gli HCD riducendo il campione di dati in funzione delle cosiddette condizioni ideali: flusso libero e condizioni metereologiche favorevoli. Questo per mettere a confronto successivamente l'85esimo percentile delle velocità attuate, non condizionate dalla presenza di altri utenti sulla strada o da precipitazioni significative, con le velocità teoriche desunte dalla ricostruzione del diagramma delle velocità sulla base dell'andamento planimetrico del tracciato.

Dall'altro lato si è cercato un modo per interpretare i dati proiettati non più unicamente in termini di percentili calcolati per ogni elemento di rettifilo o arco di curva, ma in continuo: a partire da dati discreti di tipo puntuale è stata cioè ricercata un'informazione di velocità distribuita nello spazio con caratteri di continuità. Questo per definire un andamento delle velocità lungo gli elementi compositivi dei tracciati in esame, utilizzando algoritmi di regressione spaziale che

consentono uno studio dei dati campionati sia per la loro disposizione nello spazio che per il loro contenuto informativo.

5.1 Ricerca delle condizioni ideali

Filtrare i dati di velocità attuate, per ottenere un set di dati in condizioni ideali metereologiche e di flusso, ha fatto sì che si potessero calcolare le velocità operative, come 85esimo percentile di tali velocità, su ciascun tratto di strada (rettifilo o curva) e per ogni tracciato esaminato. Queste sono state, in seguito, confrontate con le velocità teoriche.

5.1.1 èèFlusso libero

Le condizioni di flusso libero si definiscono come quelle condizioni in cui l'utente viaggia alla velocità desiderata non essendo vincolato dalla presenza di altri veicoli o da dispositivi utili per la regolazione del traffico, quali semafori, rotatorie o segnali di stop. Poiché la conoscenza delle informazioni provenienti dagli HCD non è idonea per determinare i volumi di traffico, è stato necessario richiedere altri dati all'Osservatorio del Traffico di ANAS S.p.A.

L'Osservatorio è una struttura che la società utilizza principalmente per fornire informazioni agli utenti rispetto alle condizioni di traffico che si verificano lungo la rete stradale e autostradale di propria competenza, tramite pubblicazione online di bollettini mensili e report periodici, riepilogativi dei dati di traffico

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

raccolti. Una rete di sensori posizionati su oltre 1150 sezioni di rilevamento (Figura 33) ha permesso, a partire dall'anno 2012, la raccolta dei dati di traffico su tutta la rete nazionale gestita da ANAS; si tratta di sensori a microonde e spire induttive che registrano le informazioni e a intervalli di 5 minuti le inviano alla centrale PANAMA (Piattaforma ANAs Per il Monitoraggio e l'Analisi), che effettua un doppio controllo circa la veridicità del dato ricevuto.



Figura 33 - Localizzazione dei sensori sul territorio nazionale - ANAS S.p.A.

Capitolo 5

Una prima fase consiste nel rendere inutilizzabile il file ricevuto, qualora contenente errori di coerenza, impossibili da correggere; una seconda fase, che non elimina il file, valuta l'affidabilità dei dati aggregati escludendo periodi implausibili, di malfunzionamento o di mancanza copertura. Un successivo esame sull'attendibilità del dato ricevuto viene fatto a campione dal personale ANAS, che valuta la realtà effettivamente in transito comparando registrazioni *in situ* (effettuate sulla sezione di interesse) con i dati registrati. Tali comparazioni riguardano la dimensione del campione registrato, la velocità media calcolata sui 5 minuti e la composizione della flotta veicolare (veicoli leggeri e veicoli pesanti).

Il sistema di monitoraggio centralizzato PANAMA si occupa di classificare, verificare e organizzare i dati delle misure raccolte e rendere disponibili:

1. i dati di traffico aggiornati ogni 5 minuti per le Sale Operative e per la pubblicazione sul sistema VAI (Viabilità Anas Integrata), una piattaforma informatica web che fornisce in tempo reale la situazione della circolazione sulla rete ANAS;
2. la situazione di monitoraggio complessiva nazionale degli impianti installati;
3. le statistiche sul traffico periodiche, che vengono pubblicate sul Portale, o quelle specifiche che vengono richieste da strutture interne o da enti esterni.

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

Nel caso in esame, per la Strada Statale 4 sono stati forniti dati di traffico relativi alle seguenti centraline (Figura 36), su portale o a lato della strada:

- Stazione 64 – Strada: S.S. 4, chilometro: 35.451, Comune: Passo Corese, Provincia: Rieti, Regione: Lazio;
- Stazione 66 - Strada: S.S. 4, chilometro: 86.027, Comune: Cittaducale, Provincia: Rieti, Regione: Lazio (Figura 34);



Figura 34 - Stazione 66 – Centralina esterna alla carreggiata (S.S.4)

- Stazione 67 - Strada: S.S. 4, chilometro: 96.528, Comune: Borgo Velino, Provincia: Rieti, Regione: Lazio;
- Stazione 68 - Strada: S.S. 4, chilometro: 133.400, Comune: Amatrice, Provincia: Rieti, Regione: Lazio;
- Stazione 1046 - Strada: S.S. 4, chilometro: 18.207, Comune: Roma, Provincia: Roma, Regione: Lazio (Figura 35);



Figura 35 - Stazione 1046 – Centraline su portale (S.S.4)

- Stazione 2350 - Strada: S.S. 4, chilometro: 57.893, Comune: Poggio San Lorenzo, Provincia: Rieti, Regione: Lazio;
- Stazione 10046 - Strada: S.S. 4, chilometro: 110.209, Comune: Posta, Provincia: Rieti, Regione: Lazio.

I dati ricevuti, di cui si riporta un esempio in Tabella 10, forniscono le seguenti informazioni:

- data e ora di inizio e fine registrazione: ogni 5 minuti;
- corsia alla quale si riferisce la registrazione;
- verso di percorrenza dei veicoli (ascendente (A) se i veicoli procedono nel verso delle chilometriche crescenti, discendente (D) in caso contrario);
- dimensione del campione;
- velocità media dei veicoli;
- scarto quadratico medio della velocità;
- tipo di veicolo;

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

- lunghezza media dei veicoli;
- distanza media tra i veicoli.

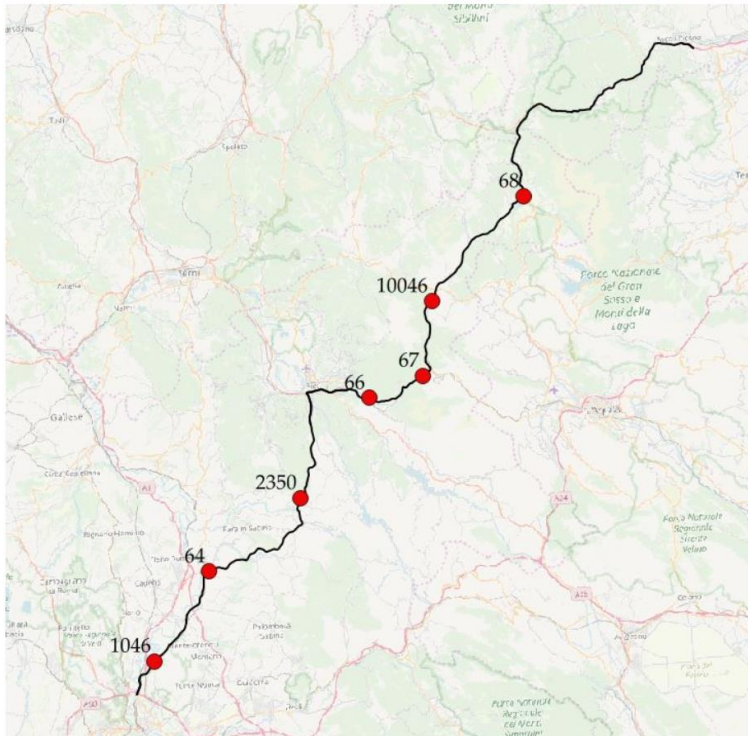


Figura 36 - Localizzazione delle centraline lungo la S.S.4

Riferimento temporale	Fine Periodo di Aggregazione	Corsia	Direzione	Passaggi Totali	Velocita' Media [Km/h]
01/01/2017 00:25	01/01/2017 00:30	1	D	11	72.09
01/01/2017 00:25	01/01/2017 00:30	1	A	0	
01/01/2017 00:25	01/01/2017 00:30	2	D	0	
01/01/2017 00:25	01/01/2017 00:30	2	A	6	68
01/01/2017 00:30	01/01/2017 00:35	1	D	14	69.64
01/01/2017 00:30	01/01/2017 00:35	1	A	0	
01/01/2017 00:30	01/01/2017 00:35	2	D	0	
01/01/2017 00:30	01/01/2017 00:35	2	A	25	75.68

Tabella 10 - Esempio di dati di traffico provenienti da una centralina ANAS sulla S.S.4

Capitolo 5

Tramite implementazione di un codice Matlab, riportato in Appendice D, sono stati innanzitutto divisi i flussi registrati dalle centraline nei due versi di percorrenza. In seguito, sono stati filtrati i dati veicolari rappresentativi di situazioni di sorpasso, identificabili in registrazioni relative a una direzione di marcia associate a corsie destinate all'altro verso di percorrenza.

Per ognuna delle centraline sopra menzionate sono state diagrammate le velocità medie veicolari registrate nei 5 minuti in funzione del numero di passaggi totali nello stesso intervallo di tempo, per entrambe le direzioni di marcia, nel piano (N,v) e, successivamente, sono stati studiati gli andamenti del numero dei veicoli nel tempo (t,N) .

A titolo di esempio, si riportano nel diagramma rappresentato in Figura 37 (cosiddetto "diagramma fondamentale", in relazione alle variabili osservate) i risultati delle analisi della centralina 1046, vicino il GRA, lungo la S.S. 4 in dir. AB:

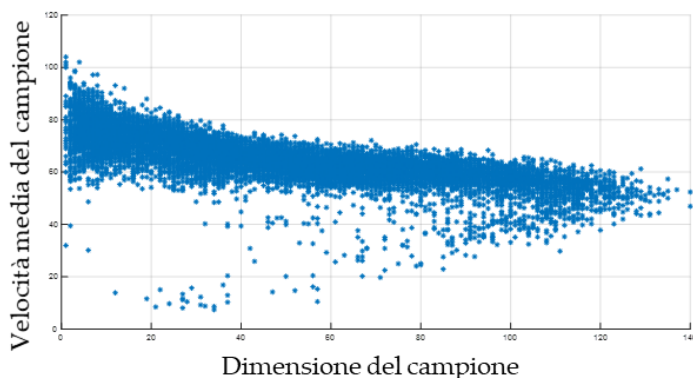


Figura 37 - Diagramma fondamentale della centralina 1046 dir. AB gennaio-febbraio

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

Nel piano (t,N) è stato diagrammato il numero dei veicoli registrati ogni 5 minuti nelle 24h per ciascuno dei 7 mesi compresi fra agosto 2016 e febbraio 2017, e l'andamento dei flussi è risultato diverso a seconda del giorno, se feriale (Figura 38) o festivo (Figura 39): per individuare delle fasce orarie di flusso libero appropriate i giorni infrasettimanali e i fine settimana sono stati, quindi, analizzati separatamente.

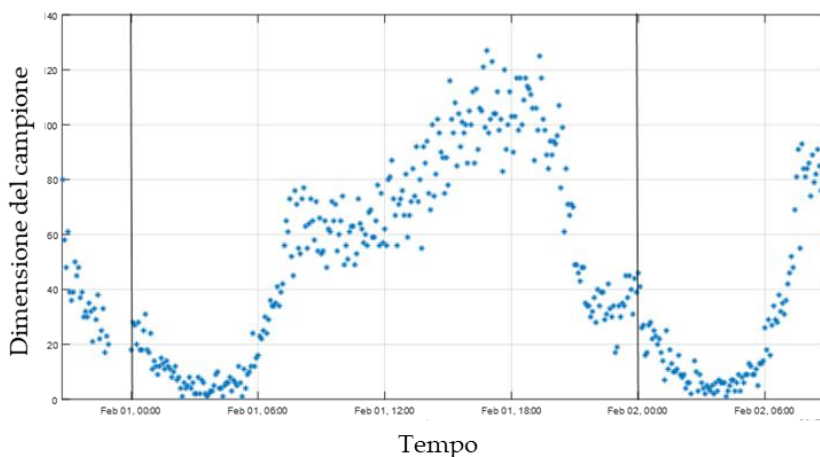


Figura 38 - Giorno feriale tipo della S.S.4 in direzione AB

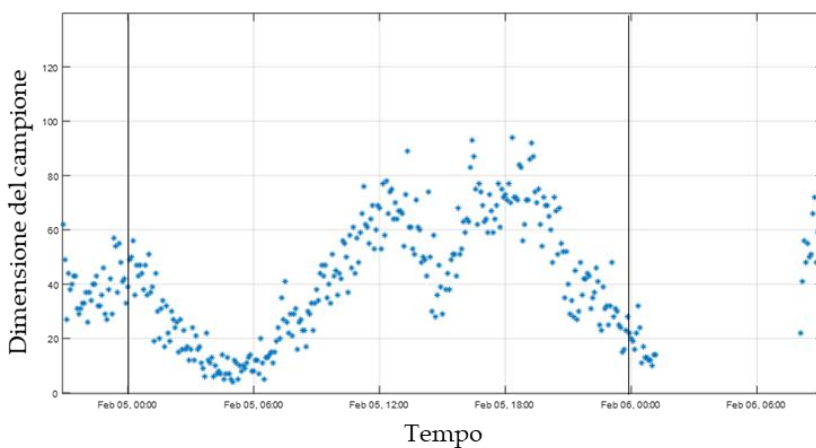


Figura 39 - Giorno festivo tipo della S.S.4 in direzione AB

Capitolo 5

I picchi di flusso dovrebbero corrispondere alle fasce orarie in cui il traffico risulta essere maggiormente congestionato e di conseguenza le velocità di percorrenza dovrebbero essere minori; per confermare questa ipotesi è stato studiato il diagramma (N,v) , al fine di suddividere i dati di velocità in flusso libero e condizionato. È stato, inizialmente, individuato l'involuppo del ramo stabile dei dati diagrammati, corrispondente al limite superiore della nuvola di punti, per mezzo di una funzione cubica ed è stato, successivamente, determinato il punto di flesso della curva.

Conoscendo, quindi, le coordinate del punto di flesso, a quello stesso punto è stata associata la densità veicolare critica ($d^* = Q^*/V^*$) di separazione fra i due comportamenti –flusso condizionato e non condizionato-.

I punti che si trovano a sinistra del segmento congiungente l'origine del diagramma al punto d^* sono stati considerati in *Free Flow Speed* (FFS) –rappresentati in Figura 40 con dei simboli arancioni- contrariamente a quelli che si trovano sulla destra del segmento che rappresentano situazioni di flusso condizionato –rappresentati in Figura 40 con dei simboli blu-.

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

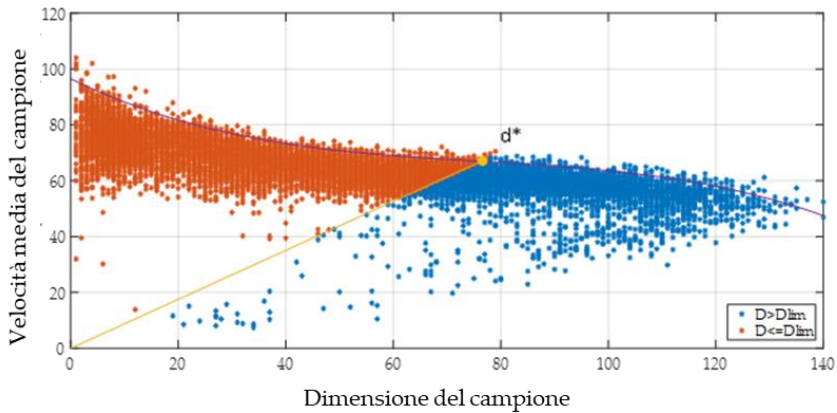


Figura 40 - Distinzione tra flussi liberi e congestionati dir. AB gennaio-febbraio centralina 1046

Riportando i risultati ottenuti da tale separazione nel piano (t, N) , in cui ai punti colorati in arancione è associata una condizione di flusso libero, mentre ai punti colorati di blu una condizione di flusso condizionato, sono state confermate le ipotesi iniziali secondo cui ai picchi di flusso è associata una densità veicolare superiore alla densità critica. A titolo di esempio, si riportano in Figura 41 alcuni giorni del mese di febbraio in direzione AB della S.S. 4.

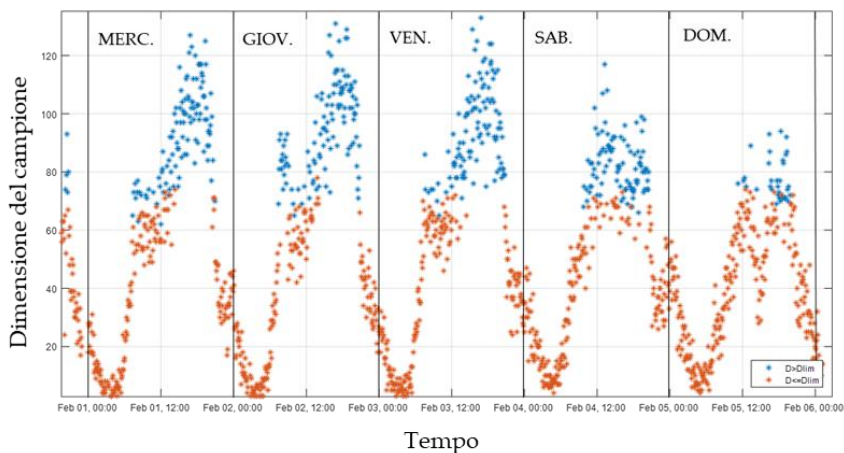


Figura 41 - Dimensione del campione nel tempo – Flussi liberi e congestionati

Capitolo 5

Sono state quindi individuate le fasce orarie in FFS determinando gli intervalli temporali in cui risulta $d < d^*$ per ogni mese a seconda dei giorni feriali o festivi.

Analizzando più nel dettaglio la dimensione del campione nel tempo, è stato notato che per tutte le centraline poste sulla Via Salaria i flussi risultavano essere molto diversi da mese a mese: per questo motivo i dati sono stati suddivisi in tre sottogruppi temporali che presentavano un numero di veicoli registrati simile (gennaio-febbraio, ottobre-novembre, settembre-dicembre) e sono stati studiati separatamente.

Si sottolinea, ad ogni modo, che nonostante la differenza registrata nei valori dei flussi, le fasce orarie di congestione del traffico sono risultate essere uguali per tutti i sottogruppi.

Riassumendo quanto dedotto dallo studio delle fasce orarie congestionate lungo tutta la S.S. 4, sono state individuate delle condizioni di elevati valori di flusso esclusivamente nei tratti in prossimità di Roma; le centraline più distanti, infatti, non hanno mai registrato valori eccessivi del numero dei veicoli nel tempo.

Si riportano, dunque, in Tabella 11 gli intervalli temporali che sono stati esclusi dalle analisi di velocità successive per i tratti situati a cavallo delle centraline individuate, al fine di considerare esclusivamente i comportamenti in flusso libero:

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

Centralina	Salaria			
	Feriali		Festivi	
	dir. AB	dir. BA	dir. AB	dir. BA
1046	14:00-20:30	6:00-9:00	11.30-14.00 18.00-20.00	-
64	-	6:30-8:30	-	15:00-19:30

Tabella 11 - Fasce orarie di congestione del traffico della S.S.4

Si osserva che nei giorni feriali, procedendo verso Roma, la congestione si manifesta la mattina, mentre in senso contrario si registra nel pomeriggio; si tratta di un comportamento prevedibile dato il fenomeno del pendolarismo. Nei giorni festivi, invece, i flussi sono distribuiti più uniformemente e non si notano andamenti ricorrenti durante la giornata.

Al fine di validare il campione di Historical Car Data, è stato effettuato un confronto fra le velocità registrate dalle centraline ANAS e i valori di velocità registrati dagli HCD transitanti in prossimità delle centraline nel medesimo intervallo temporale; è stato possibile definire come attendibile il risultato ottenuto da tale comparazione perché ha presentato effettivamente scarti molto piccoli tra le velocità, al più nell'ordine del 7.2%.

5.1.2 Condizioni metereologiche favorevoli: analisi della piovosità

Al fine di eliminare dall'analisi delle velocità operative anche i dati registrati in condizioni metereologiche avverse, è stata effettuata

Capitolo 5

un'indagine della piovosità, andando a esaminare i dati dei pluviometri ricadenti nelle vicinanze delle strade in esame. Per ognuno dei pluviometri esaminati sono stati individuati i giorni che presentavano una precipitazione intensa, definita tramite l'indice R10 (Tabella 12) dalla *Commission for Climatology*:

ID	Nome dell'indice	Definizione	Unità
RX1day	Precipitazione massima giornaliera	Valore massimo di precipitazione in 1 giorno	mm
Rx5day	Precipitazione massima in 5-giorni	Valore massimo di precipitazione in 5 giorni consecutivi	mm
SDII	Intensità giornaliera di precipitazione	Totale annuale di precipitazione diviso per il numero di giorni piovosi nell'anno (definiti come giorni con Prec \geq 1 mm)	mm/giorno
R10	N. giorni con precipitazione intensa	Numero di giorni nell'anno con Prec \geq 10mm	giorni
R20	N. giorni con precipitazione molto intensa	Numero di giorni nell'anno con Prec \geq 20mm	giorni
R95p	Precipitazione nei giorni molto piovosi	Somma nell'anno delle precipitazioni giornaliere superiori al 95o percentile della distribuzione dei valori normali	mm

Tabella 12 - Indici di estremi-Precipitazione / WMO-Commission for Climatology

Per ottenere dei risultati più precisi si sarebbero dovute analizzare le precipitazioni orarie che, però, non sono rese disponibili gratuitamente dagli enti che curano la raccolta dei dati.

A titolo di esempio, si riporta l'elenco (v. Tabella 13) e la localizzazione dei pluviometri (v. Figura 42) presi in considerazione per lo studio della piovosità lungo la S.S. 4:

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

Pluviometri		
Regione	Numero	Luogo
Lazio	1	Monterotondo
	2	Fiano Romano
	3	Nerola
	4	Rieti Idro
	5	Cittaducale
	6	Sorgenti Peschiera
	7	Antrodoco
	8	Micigliano
	9	Posta
	10	Cittareale

Tabella 13 - Elenco dei pluviometri disponibili per la S.S.4

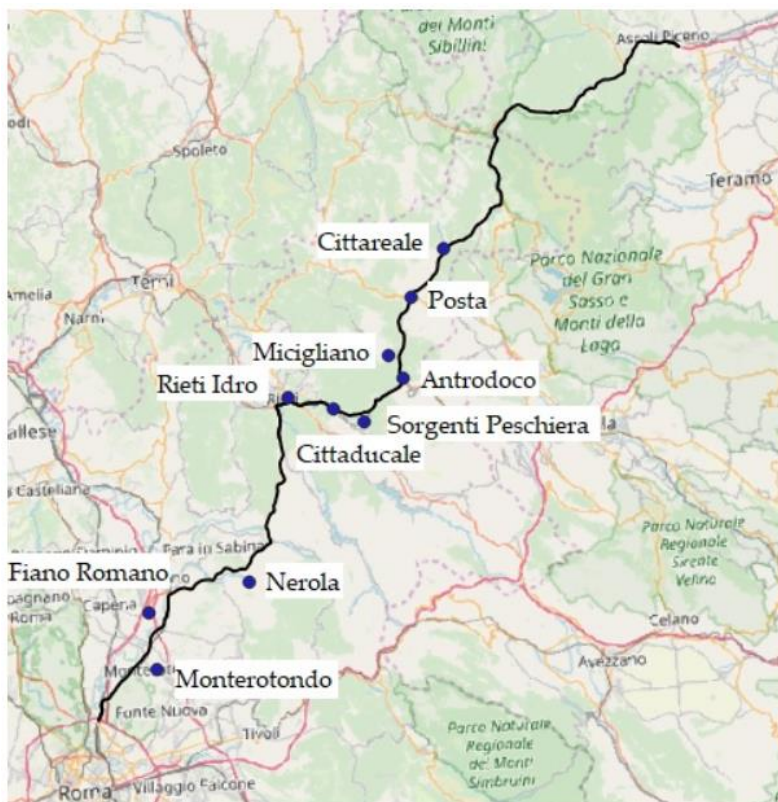
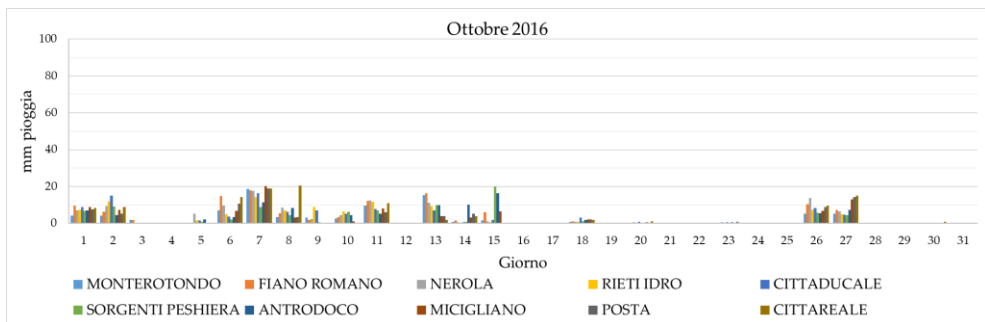
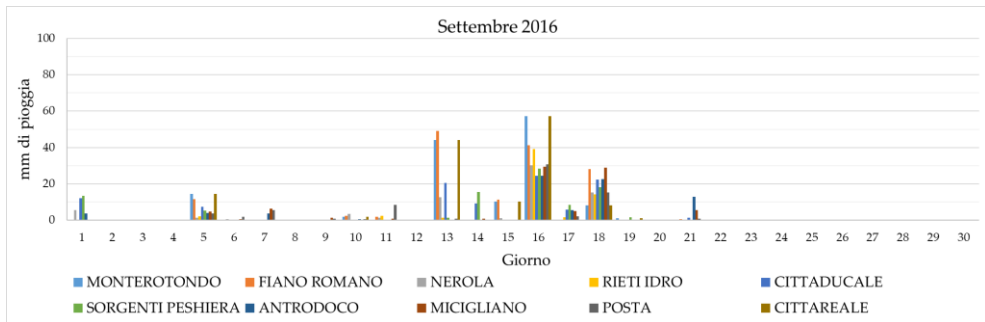
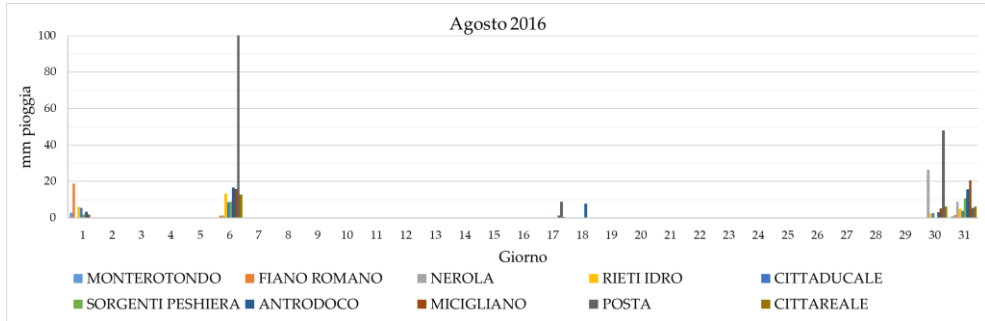


Figura 42 - Localizzazione dei pluviometri disponibili per la S.S.4

Capitolo 5

I dati, reperibili sul sito <http://www.idrografico.regione.lazio.it> sono stati scaricati e rappresentati graficamente per il periodo compreso fra i mesi di agosto 2016 e febbraio 2017 (Figura 43):



Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

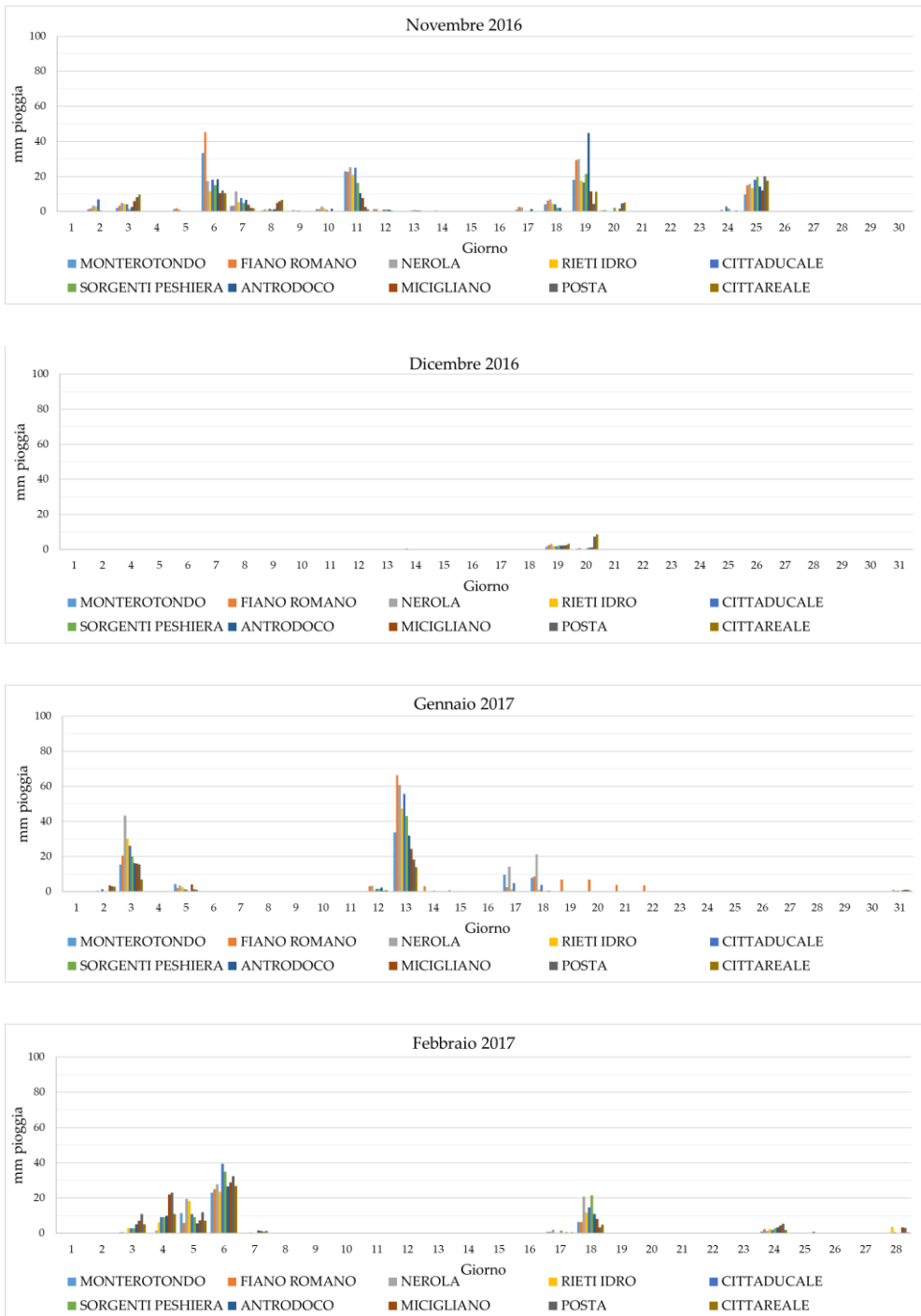


Figura 43 - Piovosità (mm/giorno) nei mesi compresi fra agosto 2016 e febbraio 2017 nelle stazioni pluviometriche adiacenti la S.S.4

I risultati ottenuti dallo studio della piovosità sono stati utilizzati per filtrare gli HCD dei dati di velocità registrati durante i giorni molto piovosi, che pertanto sono stati esclusi dal campione dei dati utilizzato per le successive analisi.

5.2 Definizione dell'andamento delle velocità lungo gli elementi compositivi un tracciato

Data la gran quantità di dati proiettati lungo il tracciato, ossia associati all'ascissa curvilinea dell'asse stradale, si è deciso di intraprendere un'analisi dei dati non più considerandoli come puntuali, ma cercando di ricostruire un profilo continuo di velocità, tramite l'utilizzo delle "smoothing cubic spline"; lo studio è stato affrontato per mezzo di un codice Matlab riportato in Appendice E.

Le "smoothing cubic spline" risultano un efficace strumento di modellazione quando si ha a che fare con dati molto rumorosi e rappresentano un caso speciale di regressione. A differenza delle regressioni polinomiali, infatti, che utilizzano un unico polinomio per descrivere l'andamento dei dati originari su tutto l'intervallo di definizione, queste funzioni sono ottenute suddividendo l'intervallo in più sotto-intervalli $h_i = (x_i - x_{i-1})$ con $i=1, \dots, n$, scegliendo per ciascuno di essi una regressione polinomiale di grado d , in questo caso di terzo grado (v. Figura 45).

Non si tratta di funzioni interpolanti, in quanto la “*smoothing spline*” non passa per tutti i punti dati (v. Figura 44), ma effettua un *fitting* ai minimi quadrati cercando di minimizzare l’errore che si ottiene -in termini di distanza- tra i dati e la *spline* stessa.

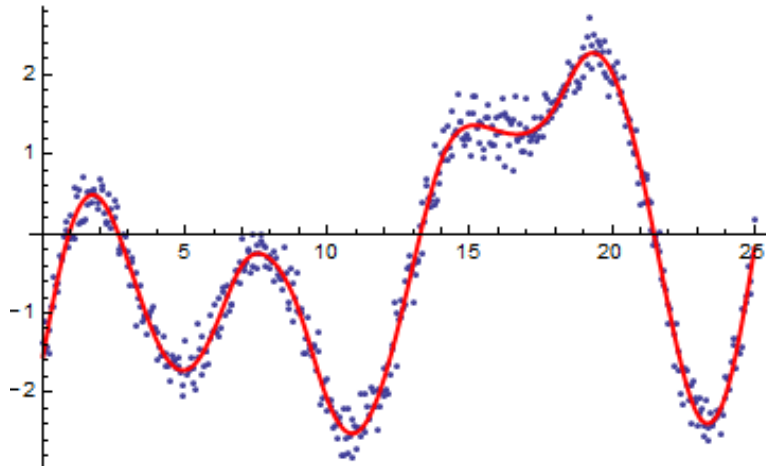


Figura 44 - Esempio di smoothing spline

Sono stati definiti come estremi dei sotto-intervalli h_i i punti di inizio e fine degli elementi caratteristici del tracciato planimetrico (rettifili e archi di curva).

Su di essi sono state imposte le condizioni al contorno per cui due polinomi successivi si uniscono assicurando la continuità delle prime $d-1$ derivate.

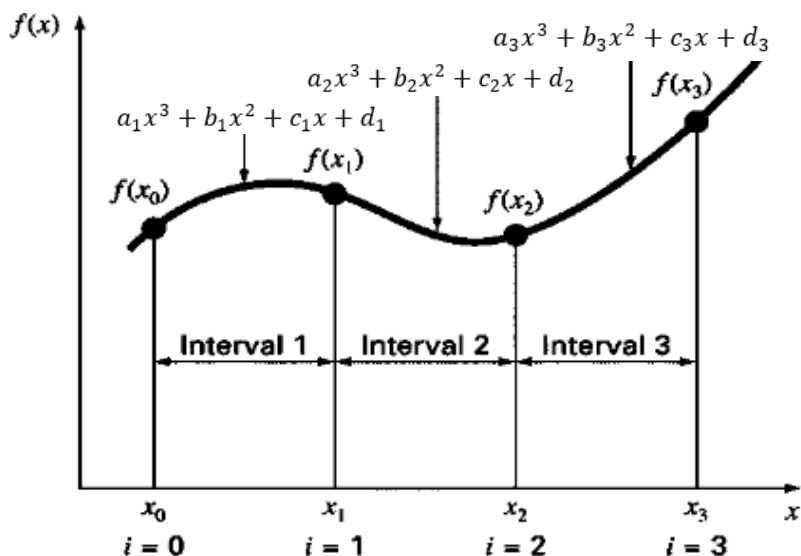


Figura 45 - Esempio di interpolazione cubic spline

Dato un insieme di $n+1$ punti dati (x_i, y_i) in cui non esistono due x_i uguali e $x_0 < x_1 < \dots < x_{i-1} < x_i < x_{i+1} < \dots < x_n$, la spline $S(x)$, in Figura 45, è una funzione che soddisfa:

1. $S(x) \in C^2 [x_0; x_n]$;
2. In ciascun sotto-intervallo $(x_i - x_{i-1})$, $S(x)$ è un polinomio di 3 grado con $i=1, \dots, n$;
3. $S(x_i) = y_i$, per ogni $i=0, \dots, n$.

Supponiamo che:

$$S(x) = \begin{cases} f_1(x), & x_0 \leq x \leq x_1 \\ \dots \\ f_i(x), & x_{i-1} \leq x \leq x_i \\ \dots \\ f_n(x), & x_{n-1} \leq x \leq x_n \end{cases}$$

Metodi di analisi delle velocità praticate sui tracciati

dove $f_i(x) = a_i(x - x_{i-1})^3 + b_i(x - x_{i-1})^2 + c_i(x - x_{i-1}) + d_i$ è una funzione di terzo grado, con $a_i \neq 0 \forall i = 1, \dots, n$.

Per determinare questa spline cubica $S(x)$, si devono determinare i coefficienti a_i, b_i, c_i, d_i per ogni i , imponendo le seguenti condizioni al contorno:

1. $f_i(x_{i-1}) = y_{i-1}$ e $f_i(x_i) = y_i$, con $i=1, \dots, n$;
2. $f'_i(x_i) = f'_{i+1}(x_i)$, con $i=1, \dots, n-1$;
3. $f''_i(x_i) = f''_{i+1}(x_i)$, con $i=1, \dots, n-1$;

Si può notare che ci sono $n + n + (n-1) + (n-1) = 4n-2$ condizioni, ma si devono determinare $4n$ coefficienti, quindi di solito si aggiungono due condizioni al contorno per risolvere questo problema. In questo studio si presumono nulle le derivate seconde agli estremi dell'intervallo $f''_1(x_0) = f''_n(x_n) = 0$. I coefficienti che si ottengono sono i seguenti:

$$a_i = h_{i+1}$$

$$b_i = 2(h_i + h_{i+1})$$

$$c_i = h_i$$

$$d_i = 3 \frac{f_{i+1} - f_i}{h_{i+1}} h_i + 3 \frac{f_i - f_{i-1}}{h_i} h_{i+1}$$

All'interno di ciascun elemento planimetrico è stato studiato l'andamento delle velocità praticate dagli utenti lungo lo sviluppo, al fine di capire il reale comportamento degli utenti nel percorrere rettili e archi di curva con sviluppi differenti.

6 Risultati e analisi dei risultati

6.1 Confronto fra velocità operative v_{85} e velocità di progetto v_p

Nel capitolo precedente è stato descritto il metodo utilizzato all'interno di questo lavoro per ricercare le condizioni ideali di guida, in termini di flusso libero e condizioni metereologiche favorevoli. Gli HCD (Historical Car Data) sono stati quindi filtrati, eliminando dal set di dati quelli ricadenti in prossimità dell'area urbana di Roma nelle fasce orarie congestionate (riconosciute per mezzo dei dati dedotti dalle vicine centraline fisse), e quelli registrati durante le giornate a forte piovosità.

Successivamente, tramite implementazione di un codice Matlab riportato in Appendice F, è stata calcolata la velocità operativa – l'85esimo %ile delle velocità praticate- per ogni elemento del tracciato in condizioni ideali. Il risultato ottenuto è stato, quindi, confrontato con le velocità teoriche desunte dal diagramma delle velocità, realizzato secondo i modelli teorici adottati anche dalla norma per la progettazione delle nuove strade (DM 2001 [1]), per entrambe le direzioni di marcia. Si riportano i grafici ottenuti dal confronto fra velocità operative e di progetto per la S.S. 4 in direzione AB (Figura 46) e BA (Figura 47):

Risultati e analisi dei risultati

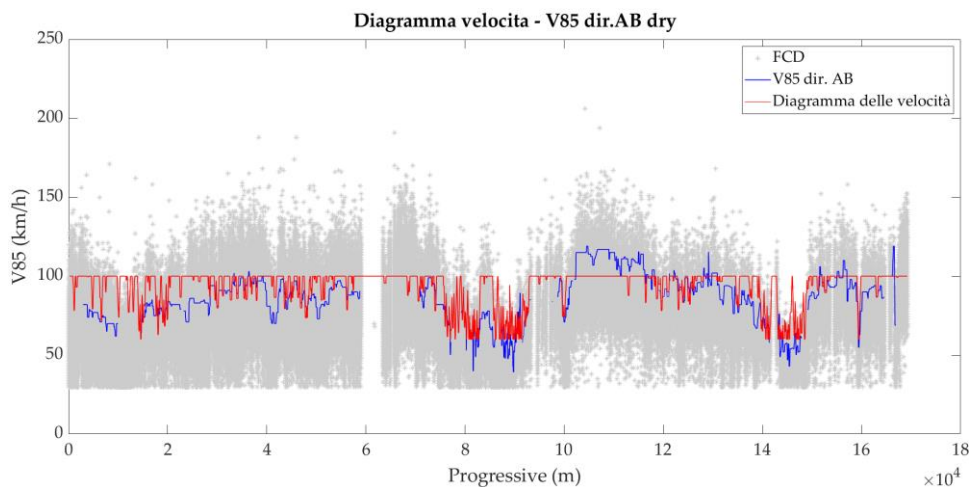


Figura 46 - Confronto V_{85} (FFS+dry) - velocità teoriche per la S.S.4 in dir. AB

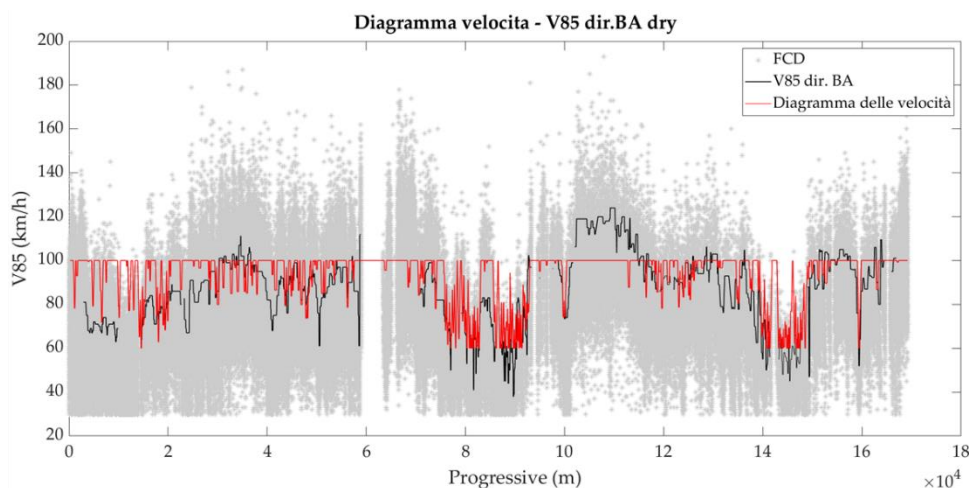


Figura 47 - Confronto V_{85} (FFS+dry) - velocità teoriche per la S.S.4 in dir. BA

Dall'analisi del confronto si evidenzia un andamento dei valori di velocità, operativa e di progetto, molto simile, ad eccezione dei tratti più vicini all'area urbana, in cui le velocità praticate risultano essere fortemente influenzate dalle condizioni locali.

Capitolo 6

Al contrario, tra la progressiva 100+000 km e 120+000 km si può notare che le v_{85} risultano essere nettamente maggiori delle v_p , con differenze di valori nell'ordine dei 20 km/h. Si tratta di un tratto stradale la cui composizione planimetrica risulta formata da una successione di elementi geometrici poco vincolanti, con lunghi tratti di rettilineo e raggi di curva molto elevati.

In seguito, sono state calcolate le velocità operative esclusivamente in condizioni di flusso libero (v_{85} in FFS) in qualsiasi condizione meteorologica e sono state confrontate con le velocità operative calcolate precedentemente, in assenza di traffico e di precipitazioni (v_{85} in FFS + dry), per comprendere quanto la pioggia o la strada bagnata possano influire sui valori di velocità praticata.

A titolo di esempio si riportano i confronti effettuati per la S.S. 4 dalla chilometrica 40+000 alla chilometrica 55+000 in entrambe le direzioni di marcia (v. Figura 48 e Figura 49).

Dal confronto si evidenzia che la velocità operativa su pavimentazione asciutta risulta, nella maggior parte dei casi, maggiore che su pavimentazione bagnata; tale differenza è però pressoché trascurabile, risultando quasi sempre entro un range di valori di circa 1-2 km/h.

Risultati e analisi dei risultati

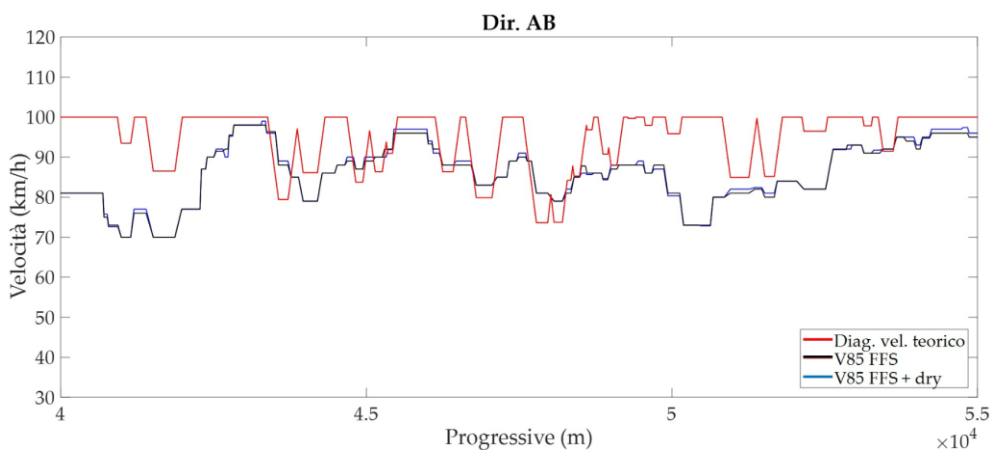


Figura 48 - Confronto V_{85} FFS / V_{85} FFS+dry S.S.4 dir. AB

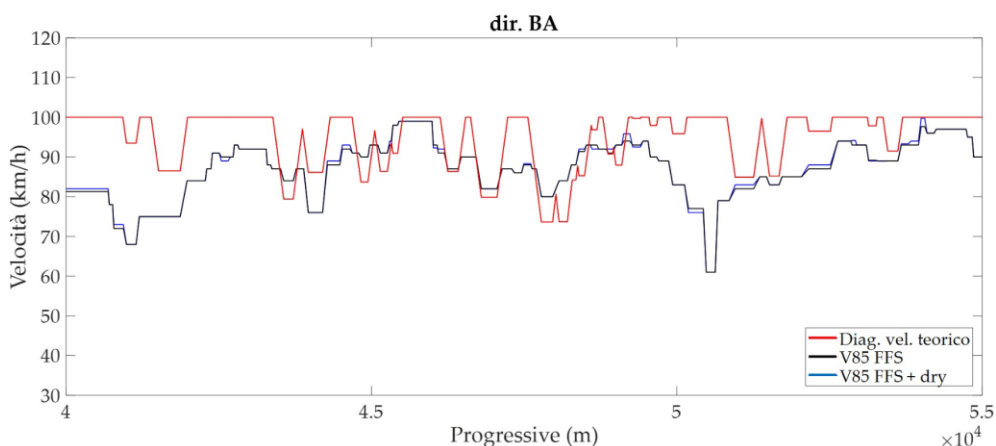


Figura 49 - Confronto V_{85} FFS / V_{85} FFS+dry S.S.4 dir. BA

Una volta indagate le velocità dell'85esimo percentile, è stata esaminata la dispersione delle velocità registrate lungo lo sviluppo dell'intero tracciato nell'intorno del valor medio.

Si riportano, di seguito, alcune informazioni riguardanti elementi di curva e rettifili posti in successione sulla S.S. 4, tra cui si individuano le velocità medie, minime e massime, le v_{85} , gli scarti

Capitolo 6

quadratici medi e numero di registrazioni di HCD (Tabella 14) per ciascun elemento considerato:

P_i (m)	P_f (m)	L_{rett} (m)	E_i (m)	N_i (m)	E_f (m)	N_f (m)	R (m)	S_v (m)	α (rad)	i (%)
43295.00	43350.00	0.00	815775.52	4681960.05	815770.53	4682015.02	931.80	55.20	0.06	-4.5
43370.00	43512.00	141.97	815760.30	4682176.65	815769.16	4682034.96	0.00	0.00	0.00	-4.5
43564.00	43719.00	0.00	815755.40	4682227.61	815689.02	4682365.67	246.77	155.75	0.63	-4.5
43769.00	43890.00	121.79	815559.23	4682477.16	815652.32	4682398.62	0.00	0.00	0.00	0.0
43966.00	44200.00	0.00	815504.87	4682529.87	815439.55	4682747.96	301.10	233.57	0.78	0.0
44278.00	44482.00	203.78	815485.03	4683026.31	815452.09	4682825.23	0.00	0.00	0.00	4.4

V_{media} (km/h)	V_{min} (km/h)	V_{max} (km/h)	V_{85} (km/h)	σ (km/h)	N	$V_{media} + \sigma$ (km/h)	$V_{media} - \sigma$ (km/h)
83.00	40.00	132.00	99.00	15.50	299	98.88	67.88
83.00	33.00	134.00	96.00	14.16	795	96.66	68.34
76.00	38.00	136.00	89.00	12.90	956	88.83	63.03
70.00	30.00	116.00	85.00	14.11	792	84.31	56.10
64.00	30.00	116.00	79.00	14.32	1581	78.62	49.98
73.00	34.00	140.00	86.00	12.54	1120	85.79	60.71

Tabella 14 - Informazioni sulle velocità di alcuni elementi planimetrici delle S.S.4

Dato che la dispersione dei valori di velocità praticata nell'intorno della velocità media, calcolata per ciascun elemento, risulta molto elevata, ne consegue che il fuso individuato dallo scarto quadratico medio è ampio. Graficamente, il risultato che si ottiene confrontando gli HCD, le velocità medie e il fuso individuato dalle σ per la S.S. 4 nelle 2 direzioni di marcia è riportato in Figura 50 (dir. AB) e in Figura 51 (dir. BA):

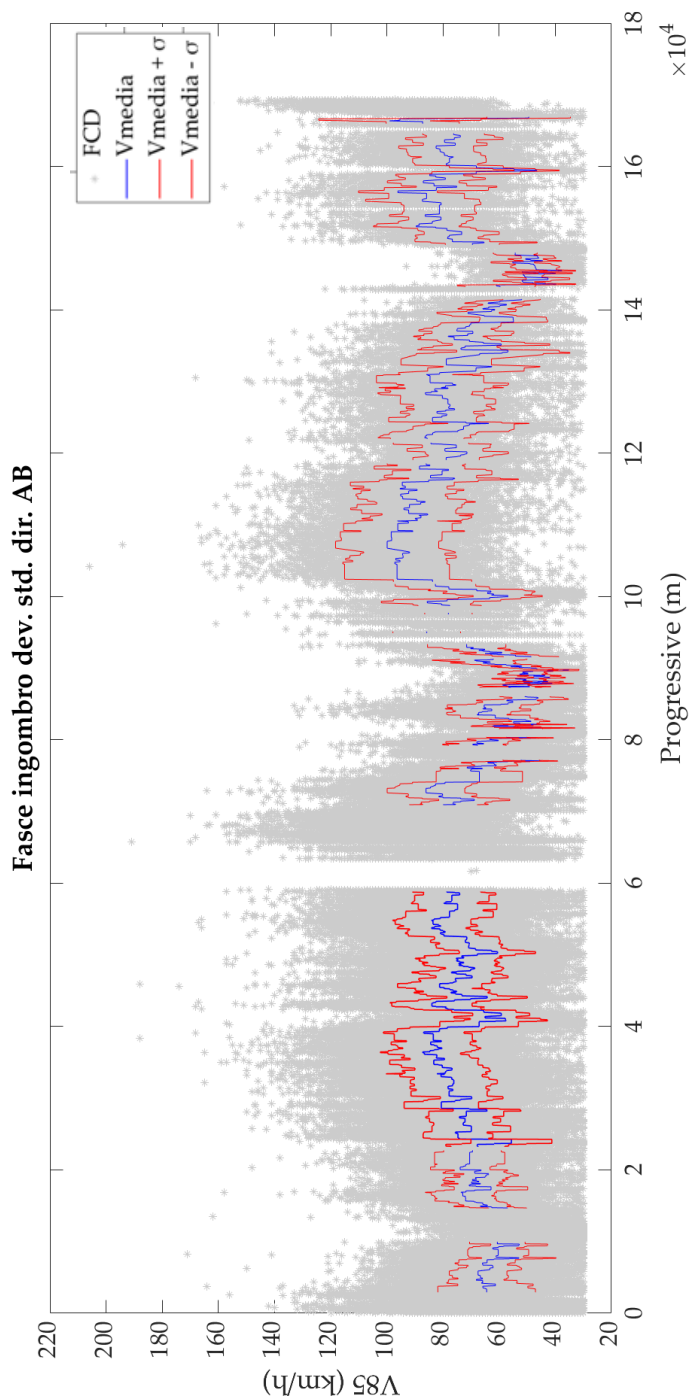


Figura 50 - Confronto fra HCD, vmedia e fuso dato dagli scarti sulla S.S.4 in dir. AB

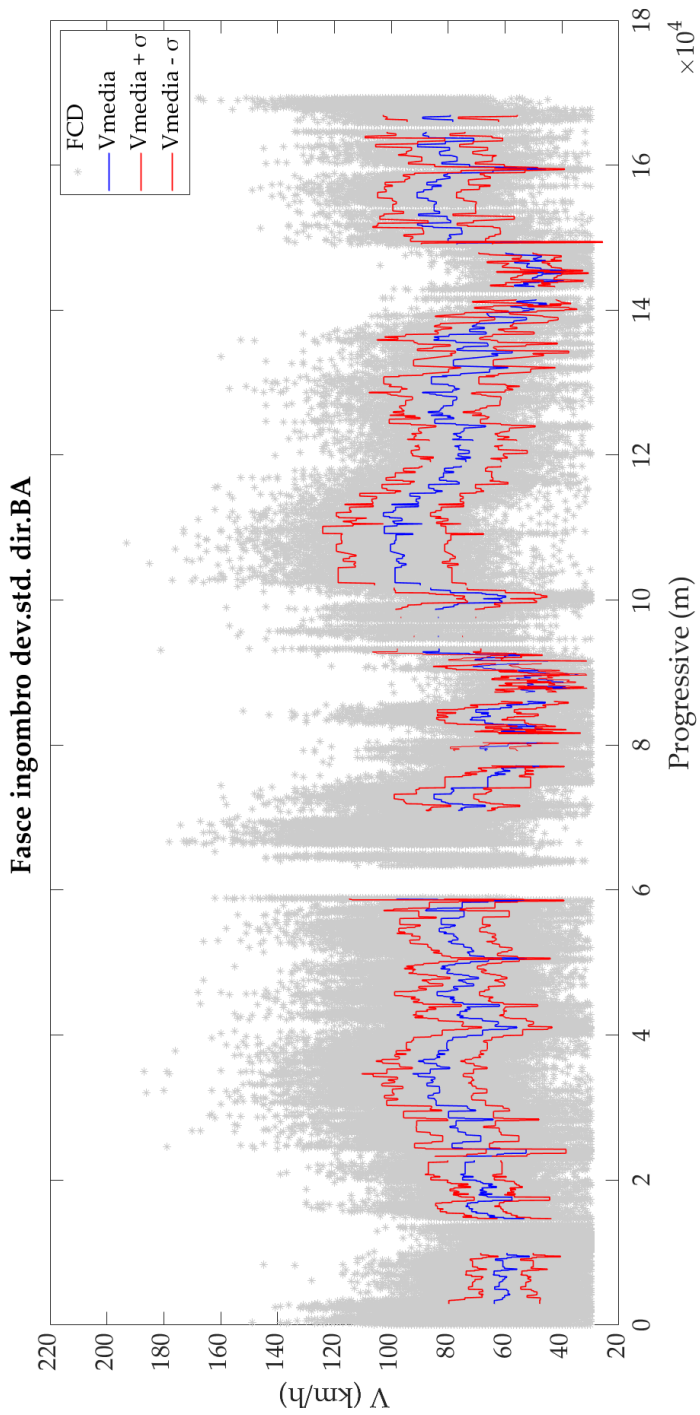


Figura 51 - Confronto fra HCD, vmedia e fuso dato dagli scarti sulla S.S.4 in dir. B

Dal risultato ottenuto si può concludere che è poco realistico definire un comportamento standard degli utenti che percorrono l'infrastruttura, pur se in condizioni di traffico e ambientali simili: infatti, anche se l'andamento del profilo di velocità può risultare affine (nel confronto tra diversi utenti), i valori sovente risultano fortemente differenti.

Tramite la comparazione fra velocità operative -derivanti dal comportamento e dalle interazioni degli utenti stradali fra di loro- e velocità teoriche di progetto -calcolate sulla base della conformazione geometrica dei tracciati- si è cercato di capire come poter individuare i tronchi stradali critici per definire dei criteri di sicurezza preventiva di un'infrastruttura.

Sono stati perciò individuati come tronchi critici quei tratti stradali in cui la differenza in valore assoluto tra velocità teorica e velocità operativa è risultata particolarmente evidente, con l'obiettivo di poterli porre a confronto con i tratti a elevata concentrazione di incidenti, e infine classificare la prestazione di sicurezza dei tronchi appartenenti alla rete stradale in esame.

6.1.1 Incidentalità

I dati di incidentalità - ad oggi disponibili gratuitamente fino al 2017 - derivano dai Rapporti ACI-ISTAT e sono consultabili al seguente link: <http://www.lis.aci.it/it/dati/#/strade/>.

Capitolo 6

Si riporta in Figura 52, a titolo di esempio, la serie storica degli incidenti verificatisi lungo i primi 10 chilometri della S.S. 4 nell'ultimo quinquennio (2013-217):

Regione	Provincia	Estesa									
		Da Km	A Km	2RUOTE	VCI	SF	SFLL	T	P	FS	Altro
Lazio	Roma	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Lazio	Roma	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Lazio	Roma	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Lazio	Roma	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Lazio	Roma	4	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Lazio	Roma	5	6	0	0	0	1	1	0	0	0
Lazio	Roma	6	7	0	0	0	0	3	0	0	0
Lazio	Roma	7	8	2	0	0	1	2	0	0	0
Lazio	Roma	8	9	1	0	0	0	3	0	0	1
Lazio	Roma	9	10	1	0	0	1	1	0	0	1
Totale localizzati				29	16	10	34	53	5	13	16

Figura 52 - Dati di incidentalità forniti da ISTAT

ISTAT fornisce il numero di incidenti, non suddivisi per direzione di marcia, secondo le chilometriche dei cippi amministrativi. I dati sono suddivisi per Regione, Provincia, dal km al km e sono differenziati in base al tipo di incidente (scontro frontale, scontro frontale-laterale o laterale, tamponamento, investimento di pedone e fuoriuscita/sbandamento) e ai veicoli coinvolti (veicoli a 2 ruote o veicoli commerciali e industriali).

Noti i dati di incidentalità, questi possono essere riportati su una mappa per identificare visivamente le zone, lungo i vari tracciati, caratterizzate da un elevato numero di incidenti stradali. Allo stesso modo possono essere riportati su una mappa i tratti con un'elevata differenza tra velocità praticate e di progetto. Il confronto delle due

rappresentazioni sarebbe utile per capire se esiste una correlazione tra incidentalità e comportamenti di guida scorretti, definiti da velocità praticate molto diverse da quelle teoriche, e identificare, in seguito, le cause di un elevato tasso di incidentalità.

6.1.2 Modelli di velocità operativa per i rettifili

Una volta calcolate le velocità operative in tutti gli elementi di un tracciato planimetrico, è utile costruire modelli predittivi di velocità operativa su strada extraurbana, sia per i rettifili che per le curve circolari, utilizzando le caratteristiche proprie dell'elemento considerato e degli elementi che lo precedono e lo seguono. Dato che in letteratura esistono numerosi studi che affrontano la costruzione di modelli predittivi per il caso degli elementi curvilinei, è stato ricercato un modello predittivo di velocità operativa per i rettifili, utilizzando i dati provenienti da 16 strade extraurbane situate nel centro Italia.

In assenza di indicazioni univoche presenti in letteratura, riguardo alle variabili principali da considerare per la realizzazione del modello predittivo, è stata portata avanti un'analisi esplorativa di alcune grandezze -quali lunghezza del rettifilo, il raggio e lo sviluppo della curva precedente, la v_{85} della curva precedente, il rapporto fra i valori dei raggi delle curve precedenti e successive- in modo da considerarne l'influenza ai fini della determinazione del valore di velocità teorico.

Capitolo 6

Il metodo utilizzato è stato quello del *clustering*, per cui gli elementi geometrici sono stati suddivisi in gruppi con caratteristiche omogenee e su ognuno di questi è stata effettuata una regressione lineare univariata o multivariata.

Le analisi sono state condotte utilizzando, in un primo momento, tutti i dati a disposizione, successivamente solamente i dati registrati in condizioni di flusso libero e, infine, in flusso libero e con pavimentazione asciutta.

Confrontando i risultati ottenuti nei tre diversi casi è emerso che nelle condizioni di flusso libero la correlazione tra i dati aumenta, in quanto vengono filtrate le velocità più basse generalmente dovute a fenomeni di congestione; quando la pavimentazione è anche asciutta, invece, l'utente risulta più libero nella scelta della velocità da assumere, per cui il divario nei comportamenti tra i vari utenti aumenta e la correlazione, in genere, diminuisce.

Per quanto riguarda, invece, la valutazione delle velocità operative nei rettifili, si è notato che tenere in conto la geometria degli elementi del tracciato è necessario, ma non sufficiente, in quanto l'utente ha memoria del percorso effettuato in precedenza e tende a comportarsi di conseguenza.

Piuttosto, valutando il contesto ambientale in cui si colloca il tracciato e utilizzando una clusterizzazione dei dati basata anche sui limiti di velocità esposti lungo il tracciato, i risultati migliorano

Risultati e analisi dei risultati

notevolmente, segno che questi hanno effettivamente influenza sul comportamento del guidatore. Per questo motivo, è risultato sensato considerare l'elemento geometrico precedente al rettilo non per mezzo di un'identificazione geometrica, bensì tramite la velocità dell'85esimo percentile registrata. Sono state così ottenute delle regressioni con coefficienti di correlazione tra il 70% ed il 93%.

In sintesi, dal quadro rappresentato a seguito delle analisi svolte emerge che le variabili che condizionano maggiormente il comportamento dell'utente sono la v_{85} della curva precedente (v_{85Cp}) e la lunghezza del rettilo (L) che l'utente sta percorrendo, anche se ulteriori miglioramenti sui risultati delle regressioni potrebbero essere conseguiti considerando l'esperienza e l'età dei guidatori, nonché le distanze di visibilità a disposizione degli utenti, necessarie per eseguire manovre di arresto in sicurezza. Si riportano i risultati ottenuti per i modelli predittivi di velocità operativa, differenziati in base ai limiti di velocità caratteristici di ciascun tronco stradale, con i relativi coefficienti di determinazione:

1. $v_{85}=13.433+0.859 v_{85Cp}+0.0017L$, con $R^2 = 0.829$ ($v_{lim} = 50 \text{ km/h}$)
2. $v_{85}=23.311+0.739 v_{85Cp} + 0.0008L$, con $R^2 = 0.691$ ($v_{lim} = 60 \text{ km/h}$)
3. $v_{85}=15.287+0.845 v_{85Cp}+0.0044L$, con $R^2 = 0.846$ ($v_{lim} = 70 \text{ km/h}$)
4. $v_{85}=17.843+0.81 v_{85Cp}+0.0062L$, con $R^2 = 0.944$ ($v_{lim} = 90 \text{ km/h}$)

A quanto sopra si aggiunga che la presenza di livellette aventi pendenza maggiore del 3%, all'interno del profilo longitudinale fa

aumentare, anche se non di molto, la correlazione dei risultati; probabilmente questo scarso aumento della correlazione deriva dal fatto che i veicoli considerati nell'analisi sono tutti veicoli leggeri che non risentono in maniera sensibile della presenza di pendenze longitudinali di tale entità.

Infine, è stata valutata l'influenza della larghezza della sezione trasversale, distinguendo le sezioni stradali in elementi che presentano o meno banchine laterali, ma, data la non uniformità dei riscontri ottenuti e le differenze nella numerosità dei campioni, i risultati non sono stati ritenuti significativi.

Saranno necessari, quindi, ulteriori studi per formulare una valutazione più dettagliata e precisa di quali caratteristiche geometriche delle strade in esame possono influire significativamente sui valori predittivi di velocità operativa, sia in rettilineo che in curva. Quanto ottenuto nel corso della presente ricerca, peraltro, potrà costituire un'utile base conoscitiva per poter impostare i futuri approfondimenti.

6.1.3 Limiti di velocità

Un altro tema di studio è costituito dalla possibilità di ricostruire l'andamento dei limiti di velocità, per ciascuna direzione di marcia, lungo i tracciati esaminati e confrontarlo sia con il diagramma delle velocità teorico fornito dalla normativa sia con le velocità operative praticate dagli utenti.

Risultati e analisi dei risultati

Anche se la segnaletica stradale non è prevista dal DM n. 1/6/2001- Catasto Strade [119], con campagna RAR del 2008 è stata comunque rilevata ed è stata inserita nella banca dati ARIA di ANAS S.p.A.. Ad ogni modo, va sottolineato che nel corso degli anni il catasto della segnaletica stradale non è stato mai oggetto di verifiche (anche dato il numero di elementi presenti: > 700.000 impianti e > 1.100.000 cartelli) ad esclusione di alcuni tratti che invece sono stati aggiornati; molte volte, inoltre, la struttura del *database* prevede che sia possibile leggere l'informazione riguardante il valore del limite di velocità solo consultando direttamente il cartello stradale.

I dati sono stati forniti secondo le indicazioni riportate in Tabella 15, di cui si osserva parte della S.S. 4:

COD STRA	PROG.	COORDZ	LAT.	LONG.	ARTICOLO FIGURA	LIMITE VEL
SS4	39562	138.501	42.16277	12.696214	Art.116-50	70
SS4	40066	159.72	42.16505	12.701691	Art.116-50	70
SS4	40410	165.596	42.16618	12.705492	Art.116-50	70
SS4	51796	399.16	42.20199	12.811643	Art.116-50	60
SS4	52394	389.617	42.20511	12.817548	Art.116-50	60
SS4	52930	386.687	42.20837	12.822265	Art.116-50	60
SS4	55319	296.566	42.226	12.826273	Art.116-50	50

Tabella 15 - Indicazioni del catasto della segnaletica verticale indicante i limiti di velocità per la S.S.4

Dopo un'attenta analisi dei *file* forniti dalla società ANAS è stato, quindi, possibile mettere a confronto - tramite ricerca manuale della localizzazione del cartello e del valore del limite riportato - il diagramma delle velocità teorico, le velocità operative espresse come

85esimo percentile delle velocità registrate e i limiti di velocità per le diverse strade analizzate, di cui si riporta un esempio per la S.S. 4 in Figura 53:

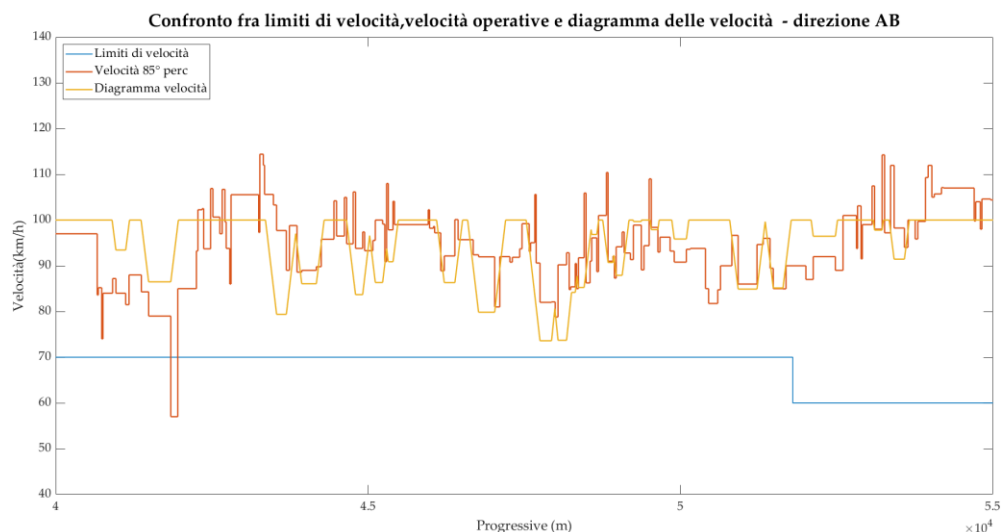


Figura 53 - Confronto limiti di velocità, velocità operative e diagramma teorico

Dal confronto rappresentato emerge in modo evidente che i limiti di velocità del tratto stradale esaminato sono molto più bassi rispetto alle velocità di progetto derivanti dalle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura. Rappresentando il limite di velocità la velocità massima di guida imposta dalle amministrazioni sulla rete di propria gestione, se ne deduce che per una buona progettazione dovrebbe risultare $v_{85} \leq v_{lim} \leq v_p$.

Purtroppo, questo criterio di progettazione non risulta mai rispettato nelle strade studiate.

6.2 Analisi dell'andamento delle velocità lungo il tracciato

Come era da attendersi, osservando nel dettaglio i risultati ottenuti dallo studio dei dati di velocità effettuato per mezzo delle regressioni tramite cubic splines, si evince immediatamente che il comportamento dei guidatori si modifica in base allo sviluppo dell'elemento che sta percorrendo e alle caratteristiche geometriche dell'elemento che lo precede e lo segue, soprattutto nel caso dei rettifili, come si evince dalle Figura 54 e Figura 55.

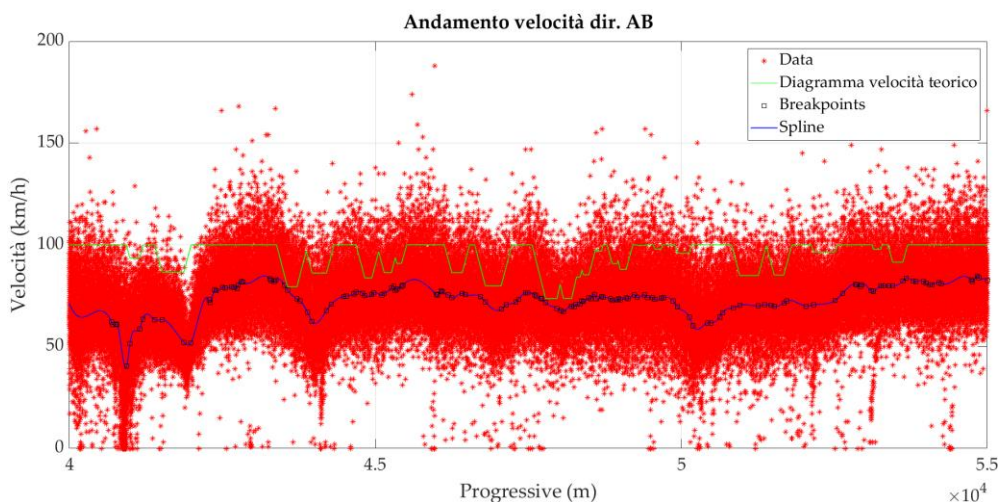


Figura 54 - Andamento delle velocità con cubic spline per la S.S.4 in dir. AB

Capitolo 6

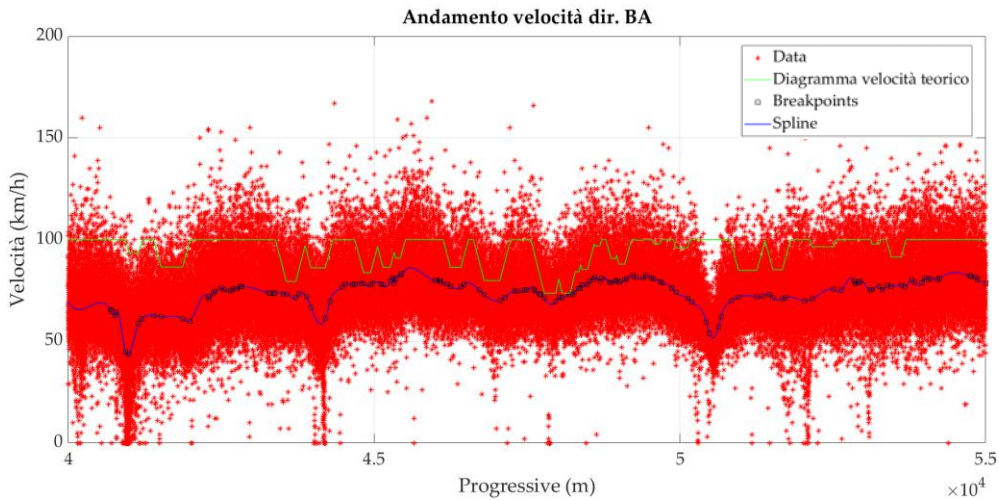


Figura 55 - Andamento delle velocità con cubic spline per la S.S.4 in dir. BA

Infatti, specialmente nei tratti di strada rettilinei di lunga estensione, si osservano andamenti delle velocità non costanti, con accelerazioni che avvengono nel primo terzo dell'intero sviluppo, in corrispondenza del quale si raggiungono i valori di velocità più elevati, seguiti da tratti percorsi in decelerazione, così da raggiungere velocità coerenti con le caratteristiche geometriche delle curve successive.

Questo tipo di regressione risulta utile per la comprensione dello stile di guida degli utenti che percorrono determinati tracciati stradali, ma non restituisce valori di velocità confrontabili con le velocità all'85esimo percentile, bensì con le velocità medie.

Come si nota dall'esempio riportato in Figura 56, in cui sono state messe a confronto le velocità medie registrate su ciascun tratto con gli andamenti delle velocità interpolate ai minimi quadrati tramite polinomio di terzo grado, la velocità non risulta essere costante

Risultati e analisi dei risultati

all'interno del singolo elemento a curvatura costante, ma presenta degli andamenti di accelerazione e decelerazione tanto più marcati quanto più è lungo il tratto esaminato.

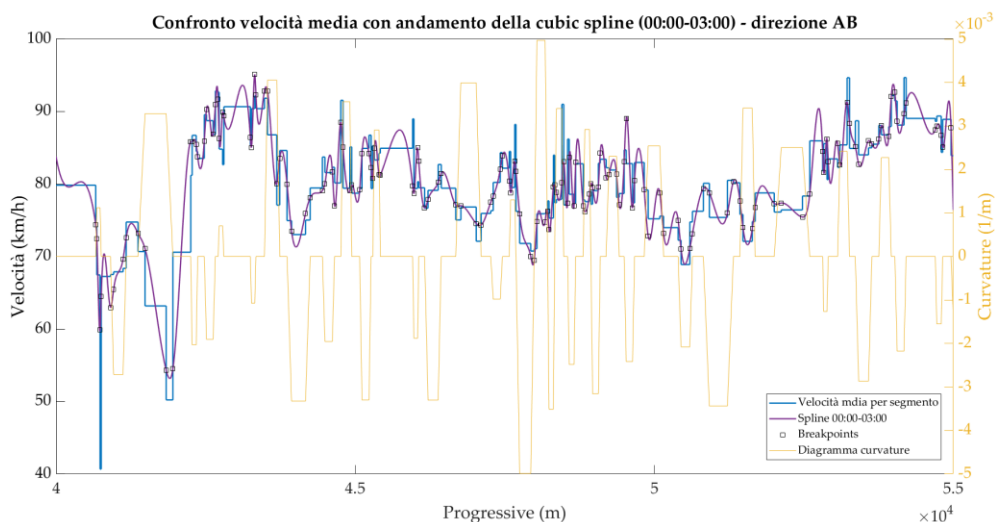


Figura 56 - Comparazione fra V_{media} e andamento delle velocità tramite cubic spline sulla S.S.4

Da tali comparazioni si deduce che l'impostazione della normativa di progettazione attuale, che considera costanti le velocità di progetto sugli elementi a curvatura costante e variabili lungo le curve di transizione (con valori di accelerazione e decelerazione costanti pari a $0.8 \frac{m}{s^2}$), risulta alquanto lontana dalla descrizione reale dell'andamento delle velocità effettivamente adottate dagli utenti stradali.

7 Conclusioni

Lo studio effettuato durante questo lavoro di ricerca si è posto l'obiettivo di valutare le condizioni di sicurezza delle strade in esercizio, al fine di identificarne le caratteristiche tecniche, geometriche e funzionali che possono indurre problemi nella circolazione stradale e contribuire al verificarsi di condizioni critiche pre-incidentali. Un tale approfondimento potrà risultare utile, in prospettiva, a definire gli interventi più idonei di riqualificazione della viabilità stradale.

La valutazione è stata effettuata attraverso l'analisi della *road consistency* dei tronchi stradali esaminati, ossia la "consistenza" (o coerenza) dei tracciati, che rappresenta in un certo senso la corrispondenza dell'infrastruttura alle aspettative dell'utente. La coerenza, infatti, assicura che gli elementi geometrici posti in successione lungo un tracciato risultino opportunamente coordinati, così da favorire prestazioni di guida del conducente armoniose e omogenee ed evitare modifiche inaspettate o improvvise dell'andamento della marcia veicolare. Spesso, infatti, le caratteristiche dell'infrastruttura svolgono un ruolo chiave affinché si determinino comportamenti di guida scorretti, inducendo nei guidatori errori di percezione dell'ambiente stradale o amplificando gli effetti di lievi distrazioni durante la guida.

Conclusioni

L'analisi è stata sviluppata mediante una comparazione, sia quantitativa sia qualitativa, tra le velocità di marcia praticate dagli utenti (condizione sperimentale) e le velocità convenzionali dedotte dalla ricostruzione delle caratteristiche geometriche delle strade esaminate e dalla successiva applicazione del modello normativo per la costruzione del diagramma delle velocità (modello teorico).

Il lavoro svolto per il presente studio è iniziato, dunque, con l'identificazione della geometria orizzontale di alcune strade esistenti, localizzate nel centro Italia, avvenuta grazie all'utilizzo delle informazioni derivanti dal catasto stradale fornito dalla società ANAS S.p.A.

A causa della mancanza di informazioni progettuali sulla composizione geometrica dei tracciati delle strade esistenti, è necessario ricorrere ad algoritmi in grado di identificare, in maniera più o meno automatizzata, i raggi e gli sviluppi degli archi di curva circolare e la direzione e la lunghezza dei tratti di rettilineo. In questo caso, utilizzando i vertici dei grafi stradali costituenti il catasto di ANAS -geolocalizzati e tridimensionali- è stato implementato un codice di *fitting* su software Matlab. Tramite questo codice è stato possibile identificare i parametri fondamentali caratteristici di ciascun elemento compositivo i tracciati stradali e, quindi, ricostruire l'andamento (per assimilazione) degli assi di tracciamento.

Capitolo 7

Successivamente è stato, altresì, possibile ricostruire i diagrammi delle curvature e i diagrammi delle velocità teorici, secondo le indicazioni del DM del 2001 ([1]).

Una volta conosciuta la geometria orizzontale delle strade in esame, sono stati cercati dei metodi per l'acquisizione, la raccolta e l'analisi di dati di velocità allo scopo di valutare il reale andamento delle velocità praticate degli utenti su tali infrastrutture.

In passato e ancora oggi, la raccolta dei dati di velocità è stata condotta per la maggior parte con strumentazioni fisse, quali sensori a induzioni, centraline, pistole laser o videocamere.

Risulta perciò molto innovativo e promettente l'utilizzo delle informazioni derivanti dai *Floating Car Data* (FCD), dati provenienti da veicoli sonda dotati di scatole nere installate per fini assicurativi, geolocalizzati attraverso la tecnologia GPS. In questo modo si è riusciti a ottenere una raccolta di informazioni di dati di velocità di una popolazione di utenti molto varia, lungo l'intero sviluppo del tracciato in esame, utile nel processo di monitoraggio della mobilità. La suddetta tipologia di dati permette di ottenere le velocità assunte dai veicoli circolanti -pur sempre puntuali e non in continuo, data la frequenza di registrazione non molto elevata- ma comunque lungo tutto l'arco stradale di interesse e non localizzate solo in alcune sezioni. Il valore dei FCD sta nell'ottenere una nuvola densa di punti geolocalizzati statisticamente significativi, che si riesce agevolmente a

Conclusioni

ottenere quando ci si disinteressa del comportamento di guida in tempo reale; con un campione molto ampio di dati storici (*Historical Car Data*) si riescono così a conoscere e comprendere molte più informazioni sui comportamenti di guida degli utenti. Questi dati contengono informazioni quali data e ora della registrazione, direzione di marcia, velocità puntuale, tipologia di veicolo e bontà del segnale, e forniscono quindi indicazioni inerenti le condizioni operative dei veicoli all'interno dei diversi flussi di traffico in determinati periodi temporali.

Grazie alla disponibilità di Anas S.p.A., gli HCD necessari per questo studio sono stati ottenuti dalla compagnia Viasat S.p.A. ed è stato analizzato un campione di dati di 7 mesi (da agosto 2016 a febbraio 2017) localizzato anch'esso nel centro Italia.

Il metodo messo a punto per realizzare il match dei dati con il grafo stradale di riferimento è stato implementato su un altro codice Matlab: è stato studiato un algoritmo in grado di associare e, successivamente, proiettare la nuvola di punti sui tracciati stradali precedentemente ricostruiti come successione di rettili e archi di circonferenza.

È stato così possibile ricostruire un andamento delle velocità in continuo, interpolando i dati proiettati tramite *cubic splines*. Sono stati presi come nodi degli intervalli delle funzioni interpolanti i punti di inizio e fine degli elementi a curvatura costante ed è stata assicurata

Capitolo 7

una continuità di 2° ordine agli estremi di ciascun intervallo. In questo modo è stato analizzato il reale comportamento di guida su rettili e curve, valutando l'andamento delle velocità all'interno di ogni segmento.

Successivamente, è stato integrato il dato puntuale proveniente dai singoli veicoli in marcia con i dati registrati dai sensori fissi presenti sulla rete, ancora forniti da ANAS S.p.A., al fine di integrare i dati relativi alle velocità con quelli riguardanti i volumi di traffico. Infatti, la sola conoscenza degli HCD non fornisce alcuna indicazione sul flusso di traffico nel quale il campione è immerso e l'unico modo per avere un'informazione più completa e attendibile risiede nel mettere insieme le indicazioni provenienti dai due campioni.

Una volta noti i flussi di traffico sulle diverse strade analizzate, sono state ricercate le condizioni di *Free Flow Speed*, velocità di flusso libero, per ricondursi alle ipotesi di guida in condizioni ideali proposte dal D.M. del 2001 [1]. La valutazione delle velocità operative degli utenti, infatti, andrebbe condotta su volumi di traffico medio-bassi, quando la presenza degli altri veicoli sulla strada non vincola il comportamento di guida del singolo utente. Tramite lo studio dei diagrammi fondamentali (variabili N-v: numero passaggi/velocità) ottenuti dall'analisi delle informazioni dei sensori ANAS, sono state individuate le fasce orarie di congestione del traffico e, quindi, il

Conclusioni

campione HCD è stato successivamente depurato escludendo tali intervalli temporali.

In seguito, si è riflettuto anche sulle condizioni metereologiche avverse (ad esempio, pavimentazione bagnata) come una delle possibili cause che allontanano il comportamento degli utenti dalle condizioni ideali e possono, quindi, risultare tra le cause che maggiormente ne modificano lo stile di guida.

È stato dunque acquisito un ulteriore set di dati, relativi alle registrazioni pluviometriche, utile all'individuazione dei giorni caratterizzati da elevata piovosità; anche in questo caso gli HCD sono stati depurati mantenendo esclusivamente quelli relativi ai giorni privi di precipitazioni (ovvero a condizioni di pavimentazione asciutta) per poter effettuare l'analisi delle velocità operative in condizioni ideali.

Una volta ottenute tali velocità operative per un adeguato campione di strade esistenti, esse sono state confrontate con le velocità teoriche, allo scopo di comprendere quanto le velocità effettivamente raggiunte dagli utenti si distacchino dalle condizioni ideali di progetto.

I risultati ottenuti dall'analisi dei tracciati stradali riguardano, principalmente, due differenti aspetti delle velocità praticate dagli utenti:

- lo studio del comportamento tipico degli utenti lungo i tracciati in esame, in termini di andamento delle velocità all'interno dei diversi elementi compositivi, ottenuto per mezzo di interpolazione alle

cubic spline dei dati di velocità proiettati lungo le ascisse curvilinee dei tracciati studiati;

- il confronto fra le velocità operative (85esimo percentile delle velocità praticate in condizioni ideali) e le velocità teoriche desunte dal diagramma delle velocità.

Da tali comparazioni si è evidenziato che le velocità non risultano sempre costanti all'interno degli elementi a curvatura costante, bensì presentano andamenti in accelerazione e decelerazione, e che esistono diverse situazioni in cui le differenze di velocità (sia fra velocità teoriche e velocità operative, sia nell'andamento delle velocità operative fra elementi geometrici posti in successione), sono molto evidenti: tali zone possono essere perciò classificate, in termini di priorità, al fine di pianificare in maniera ordinata ed efficiente le ispezioni sul campo necessarie per le attività di analisi della sicurezza delle infrastrutture e guidare le conseguenti attività di riqualificazione della viabilità.

Conclusivamente, si ritiene pertanto che il presente studio possa costituire un esempio di metodologia per l'impostazione dell'analisi della rete finalizzata a esigenze di sicurezza, e che i risultati ottenuti evidenzino alcune specifiche situazioni, nelle quali le corrette condizioni di interazione tra infrastruttura e utenza stradale possono risultare alterate o compromesse.

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
%% Importare dati strada

data_g = xlsread('Vertici_SS3.xlsx');
for k=1:size(data_g,1)
    g(k)=data_g(k,1)+data_g(k,2);
end

[~,u]=unique(g,'stable'); % Elimina i punti doppi
data=data_g(u,:);

% Discretizzare la strada a passo più o meno costante

Parziali=zeros(size(data,1),1);
for i=1:size(data,1)
    if i==size(data,1)
        Parziali(i)=0;
    else
        Parziali(i)=((data(i,1)-data(i+1,1))^2+(data(i,2)-
            data(i+1,2))^2)^0.5;
    end
end

Progressive_1=[];
for i=1:size(data,1)
    if i==1
        Progressive_1(i)=0;
    else
        Progressive_1(i)=((data(i,1)-data(i-1,1))^2
            +(data(i,2)-data(i-1,2))^2)^0.5
            +Progressive_1(i-1);
    end
end

X=[];
Y=[];
Z=[];

% Infittimento della discretizzazione

for t=1:size(Parziali,1)-1
    if Parziali(t)<6
        X=[X;data(t,1)];
        Y=[Y;data(t,2)];
        Z=[Z;data(t,3)];
    end
end
```

APPENDICE A

```
else
    Dz=data(t+1,3)-data(t,3);
    Dy=data(t+1,2)-data(t,2);
    Dx=data(t+1,1)-data(t,1);
    w=round(Parziali(t)/3);
    appoggio_X=[];
    appoggio_Y=[];
    appoggio_Z=[];
    for k=1:w-1
        if Dx>=0 && Dy>0
            appoggio_X(k)= data(t,1)+abs(Dx)/w*k;
            appoggio_Y(k)= data(t,2)+abs(Dy)/w*k;
            if Dz<0
                appoggio_Z(k)=data(t,3)+k*abs(Dz)/w;
            else
                appoggio_Z(k)=data(t,3)-k*abs(Dz)/w;
            end
        elseif Dx>=0 && Dy<0
            appoggio_X(k)= data(t,1)+abs(Dx)/w*k;
            appoggio_Y(k)= data(t,2)-abs(Dy)/w*k;
            if Dz<0
                appoggio_Z(k)=data(t,3)+k*abs(Dz)/w;
            else
                appoggio_Z(k)=data(t,3)-k*abs(Dz)/w;
            end
        elseif Dx<0 && Dy<=0
            appoggio_X(k)= data(t,1)-abs(Dx)/w*k;
            appoggio_Y(k)= data(t,2)-abs(Dy)/w*k;
            if Dz<0
                appoggio_Z(k)=data(t,3)+k*abs(Dz)/w;
            else
                appoggio_Z(k)=data(t,3)-k*abs(Dz)/w;
            end
        elseif Dx<0 && Dy>=0
            appoggio_X(k)= data(t,1)-abs(Dx)/w*k;
            appoggio_Y(k)= data(t,2)+abs(Dy)/w*k;
            if Dz<0
                appoggio_Z(k)=data(t,3)+k*abs(Dz)/w;
            else
                appoggio_Z(k)=data(t,3)-k*abs(Dz)/w;
            end
        end
    end
    X=[X;data(t,1);appoggio_X'];
    Y=[Y;data(t,2);appoggio_Y'];
    Z=[Z;data(t,3);appoggio_Z'];
end
end
```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
X=[X;data(end,1)];
Y=[Y;data(end,2)];
Z=[Z;data(end,3)];

pos=arrayfun(@(x) find(X==x,1),data(:,1)); % Trovare la
posizione dei punti iniziali nell'array X

data_2=X+Y;
[~,b]=unique(data_2,'stable');
outX=X(b,:);
outY=Y(b,:);
outZ=Z(b,:);
data_1=[outX outY];
data_1(:,3)=zeros;
for i=1:size(data_1,1)
    if i==size(data_1,1)
        data_1(i,3)=i-1;
    else
        data_1(i,3)=i;
    end
end

data_1(:,4)=zeros;
for i=1:size(data_1,1)
    if i==size(data_1,1)
        data_1(i,4)=data_1(i-1,4);
    else
        Delta_x(i)=(data_1(i,1)-data_1(i+1,1));
        Delta_y(i)=(data_1(i,2)-data_1(i+1,2));
        if Delta_x(i)<=0 && Delta_y(i)<0
            data_1(i,4)=atan(abs(Delta_x(i))/
                abs(Delta_y(i)))*180/pi;
        elseif Delta_x(i)<0 && Delta_y(i)>=0
            data_1(i,4)=atan(abs(Delta_y(i))/
                abs(Delta_x(i)))*180/pi+90;
        elseif Delta_x(i)>=0 && Delta_y(i)>0
            data_1(i,4)=atan(abs(Delta_x(i))/
                abs(Delta_y(i)))*180/pi+180;
        elseif Delta_x(i)>0 && Delta_y(i)<=0
            data_1(i,4)=atan(abs(Delta_y(i))/
                abs(Delta_x(i)))*180/pi+270;
        end
    end
end
```

APPENDICE A

```
data_1(:,5)=zeros;
for i=1:size(data_1,1)
    if i==size(data_1,1)
        data_1(i,5)=data_1(i-1,5);
    else
        data_1(i,5)=(data_1(i+1,2)-
                    data_1(i,2))/(data_1(i+1,1)-data_1(i,1));
    end
end
```

```
data_1(:,6)=zeros;
for i=1:size(data_1,1)
    if i==size(data_1,1)
        data_1(i,6)=data_1(i-1,6);
    else
        data_1(i,6)=data_1(i,2)-((data_1(i+1,2)-
                                data_1(i,2))/(data_1(i+1,1)-
                                data_1(i,1))*data_1(i,1));
    end
end
```

```
data_1(:,7)=zeros;
for i=1:size(data_1,1)
    if i==size(data_1,1)
        data_1(i,7)=0;
    else
        data_1(i,7)=((data_1(i,1)-
                    data_1(i+1,1))^2+(data_1(i,2)-
                    data_1(i+1,2))^2)^0.5;
    end
end
```

```
data_1(:,8)=zeros;
for i=1:size(data_1,1)
    if i==1
        data_1(i,8)=0;
    else
        data_1(i,8)=data_1(i-1,8)+data_1(i-1,7);
    end
end
```

```
data_1(:,9)=outZ;
```

```
Angolo=data_1(:,4);
Lunghezze=data_1(:,7);
Progressive=data_1(:,8);
Est=data_1(:,1);
Nord=data_1(:,2);
Angolo_new=zeros(size(Angolo));
```


APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
for i=1:size(Angolo_new)
    if i==1
        Angolo_new(i)=Angolo(i);
    else
        if abs(Angolo(i)-Angolo_new(i-1))>330 &
            Angolo(i)<Angolo_new(i-1)
            Angolo_new(i)=Angolo(i)+360;
        elseif abs(Angolo(i)-Angolo_new(i-1))>330 &
            Angolo(i)>Angolo_new(i-1)
            Angolo_new(i)=Angolo(i)-360;
        else
            Angolo_new(i)=Angolo(i);
        end
    end
end

%% Linea approssimante

Prompt = {'Ordine filtro','Lunghezza del frame'};
def = {'3','81'};
sgf = sgolayfilt(Angolo_new,order,framelen);

ba=zeros(length(sgf),1);
for i=1:length(sgf)
    if i==length(sgf)
        ba(i)=ba(i-1);
    else
        ba(i)=sgf(i+1)-sgf(i);
    end
end

m=1;
inizio_DevCost=m;
fine_DevCost=0;
mm=0;
while m<length(Progressive)
    count=10;
    if m+count==length(Progressive)
        break
    else
        end
    media=mean(sgf(m:m+count));
    stand_dev=std(sgf(m:m+count));
    while stand_dev<0.8
        count=count+1;
        if m+count==length(Progressive)
            break
        else
            end
        end
    end
end
```

APPENDICE A

```
        media=mean(sgf(m:m+count));
        stand_dev=std(sgf(m:m+count));
    end
    if count>50 % Identificare i tratti di rettifilo di una
        certa "lunghezza", gli altri li scarta
        inizio_DevCost=[inizio_DevCost;m];
        fine_DevCost=[fine_DevCost;m+count];
        mm=[mm;media];
    else
    end
    m=m+count+1;
end

primo_pto=inizio_DevCost(2:end);
secondo_pto=fine_DevCost(2:end);
xx=Progressive(inizio_DevCost(2:end));
yy=sgf(inizio_DevCost(2:end));
xx2=Progressive(fine_DevCost(2:end));
yy2=sgf(fine_DevCost(2:end));

%% Ricerca dei flessi

flesso_x=[];
flesso_y=[];
flessi_x=[];
flessi_y=[];

% Cercare flessi prima del primo rettifilo

aa=find(Progressive>=Progressive(1) & Progressive<=xx(1));
for j=1:length(aa)
    b=ba(aa)>0; % Restituisce con 1 tutte le curve destrorse,
    con 0 tutte le curve sinistrorse
end

if length(b)<71 % Sviluppo minimo all'interno del quale
cercare un flesso
else
    for k=11:length(b)-10
        if b(k)~= b(k+1) && sum(b(k+1:k+5))>=3 && sum(b(k-
            9:k))<=3 %decescente/crescente
            flessi_x=[flessi_x;Progressive(aa(k-9:k+5))];
            flessi_y=[flessi_y;sgf(aa(k-9:k+5))];
            f=find(flessi_y == min(flessi_y(:)));
            flesso_x=[flesso_x;flessi_x(f)];
            flesso_y=[flesso_y;flessi_y(f)];
            flessi_x=[];
            flessi_y=[];
        end
    end
end
```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```

elseif b(k)~= b(k+1) && sum(b(k+1:k+10))<=3 &&
    sum(b(k-4:k))>=3 %crescente/decescente
    flessi_x=[flessi_x;Progressive(aa(k-4:k+10))];
    flessi_y=[flessi_y;sgf(aa(k-4:k+10))];
    f=find(flessi_y == max(flessi_y(:)));
    flesso_x=[flesso_x;flessi_x(f)];
    flesso_y=[flesso_y;flessi_y(f)];
    flessi_x=[];
    flessi_y=[];
end
end
end

% Cercare flessi in tutto l'arco stradale considerato

for i=1:length(xx)-1
aa=find(Progressive>=xx2(i) & Progressive<=xx(i+1)); %
    Cercare solo nei tratti a deviazione lineare (curve)
for j=1:length(aa)
    b=ba(aa)>0; % Restituisce con 1 tutte le curve
        destrorse, con 0 tutte le curve sinistrorse
end
if length(b)<71 % Sviluppo minimo all'interno del quale
    cercare un flesso
else
    for k=11:length(b)-10
        if b(k)~= b(k+1) && sum(b(k+1:k+5))>=3 &&
            sum(b(k-9:k))<=3 %decescente/crescente
            flessi_x=[flessi_x;Progressive(aa(k-9:k+5))];
            flessi_y=[flessi_y;sgf(aa(k-9:k+5))];
            f=find(flessi_y == min(flessi_y(:)));
            flesso_x=[flesso_x;flessi_x(f)];
            flesso_y=[flesso_y;flessi_y(f)];
            flessi_x=[];
            flessi_y=[];
        elseif b(k)~= b(k+1) && sum(b(k+1:k+10))<=3 &&
            sum(b(k-4:k))>=3 %crescente/decescente
            flessi_x=[flessi_x;Progressive(aa(k-
                4:k+10))];
            flessi_y=[flessi_y;sgf(aa(k-4:k+10))];
            f=find(flessi_y == max(flessi_y(:)));
            flesso_x=[flesso_x;flessi_x(f)];
            flesso_y=[flesso_y;flessi_y(f)];
            flessi_x=[];
            flessi_y=[];
        end
    end
end
end
end
end

```

APPENDICE A

```
% Cercare flessi dopo l'ultimo rettifilo

aa=find(Progressive>xx2(end) & Progressive<Progressive(end));
for j=1:length(aa)
    b=ba(aa)>0; % Restituisce con 1 tutte le curve destrorse,
               con 0 tutte le curve sinistrorse
end

if length(b)<71 % Sviluppo minimo all'interno del quale
               cercare un flesso
else
    for k=11:length(b)-10
        if b(k)~= b(k+1) && sum(b(k+1:k+5))>=3 && sum(b(k-
            9:k))<=3 %decescente/crescente
            flessi_x=[flessi_x;Progressive(aa(k-9:k+5))];
            flessi_y=[flessi_y;sgf(aa(k-9:k+5))];
            f=find(flessi_y == min(flessi_y(:)));
            flesso_x=[flesso_x;flessi_x(f)];
            flesso_y=[flesso_y;flessi_y(f)];
            flessi_x=[];
            flessi_y=[];
        elseif b(k)~= b(k+1) && sum(b(k+1:k+10))<=3 &&
            sum(b(k-4:k))>=3 %crescente/decescente
            flessi_x=[flessi_x;Progressive(aa(k-4:k+10))];
            flessi_y=[flessi_y;sgf(aa(k-4:k+10))];
            f=find(flessi_y == max(flessi_y(:)));
            flesso_x=[flesso_x;flessi_x(f)];
            flesso_y=[flesso_y;flessi_y(f)];
            flessi_x=[];
            flessi_y=[];
        end
    end
end

flesso_x=unique(flesso_x,'stable');
flesso_y=unique(flesso_y,'stable');

%% Spostare i punti

x_punti= sort([xx;xx2;flesso_x]);

for j=1:length(x_punti)
    aa(j)=find(x_punti(j)==Progressive);
    y_punti(j)=sgf(aa(j));
end

y_punti=[y_punti'];
```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```

x_punti_1=zeros(size(x_punti));
y_punti_1=zeros(size(y_punti));
s=30; % Valore di riferimento
for i=1:length(x_punti)
    if i==length(x_punti)
        y_punti_1(length(x_punti))=y_punti(length(x_punti));
        x_punti_1(length(x_punti))=x_punti(length(x_punti));
    elseif i==1
        y_punti_1(1)=y_punti(1);
        x_punti_1(1)=x_punti(1);
    else
        if ismember(x_punti(i),xx2) &&
            y_punti(i)>y_punti(i+1) % Inizio deviazione lineare
            - curva 1
            t=find(sgf==y_punti(i) & Progressive==x_punti(i));
            b=0;
            for j=t-s:t
                b=[b;sgf(j)];
                b(b==0)=[];
                k=find(b==max(b));
                if length(k)~=1
                    for p=1:length(k)
                        c(p)=length(b)/2-k(p);
                    end
                    k=find(min(c));
                else
                    end
            end
            y_punti_1(i)=sgf(t-s+k-1);
            x_punti_1(i)=Progressive(t-s+k-1);
        elseif ismember(x_punti(i),xx2) &&
            y_punti(i)<y_punti(i+1) % Inizio deviazione
            lineare - curva 2
            t=find(sgf==y_punti(i) & Progressive==x_punti(i));
            b=0;
            for j=t-s:t
                b=[b;sgf(j)];
                b(b==0)=[];
                k=find(b==min(b));
                if length(k)~=1
                    for p=1:length(k)
                        c(p)=length(b)/2-k(p);
                    end
                    k=find(min(c));
                else
                    end
            end
            y_punti_1(i)=sgf(t-s+k-1);
            x_punti_1(i)=Progressive(t-s+k-1);
        end
    end
end

```

APPENDICE A

```

elseif ismember(x_punti(i),xx) &&
    y_punti(i)<y_punti(i-1) % Fine deviazione
    lineare - curva 1
    t=find(sgf==y_punti(i) & Progressive==x_punti(i));
    b=0;
    for j=t:t+s
        b=[b;sgf(j)];
        b(b==0)=[];
        k=find(b==min(b));
        if length(k)~=1
            for p=1:length(k)
                c(p)=length(b)/2-k(p);
            end
            k=find(min(c));
        else
            end
        end
    y_punti_1(i)=sgf(t+k-1);
    x_punti_1(i)=Progressive(t+k-1);
elseif ismember(x_punti(i),xx) &&
    y_punti(i)>y_punti(i-1) % Fine deviazione
    lineare - curva 2
    t=find(sgf==y_punti(i) & Progressive==x_punti(i));
    b=0;
    for j=t:t+s
        b=[b;sgf(j)];
        b(b==0)=[];
        k=find(b==max(b));
        if length(k)~=1
            for p=1:length(k)
                c(p)=length(b)/2-k(p);
            end
            k=find(min(c));
        else
            end
        end
    y_punti_1(i)=sgf(t+k-1);
    x_punti_1(i)=Progressive(t+k-1);
else
    y_punti_1(i)=y_punti(i);
    x_punti_1(i)=x_punti(i);
end
end
end

idx_xx=find(ismember(x_punti,xx,'rows'));
for f=1:length(idx_xx)
    xx_n(f)=x_punti_1(idx_xx(f));
end

```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
idx_xx2=find(ismember(x_punti,xx2,'rows'));
for f=1:length(idx_xx2)
    xx2_n(f)=x_punti_1(idx_xx2(f));
end

idy_yy=find(ismember(y_punti,yy,'rows'));
for f=1:length(idy_yy)
    yy_n(f)=y_punti_1(idy_yy(f));
end

idy_yy2=find(ismember(y_punti,yy2,'rows'));
for f=1:length(idy_yy2)
    yy2_n(f)=y_punti_1(idy_yy2(f));
end

% Eliminare i punti che portano a sviluppi troppo brevi dei
diversi elementi geometrici

xx_ok=xx_n;
xx2_ok=xx2_n;
yy_ok=yy_n;
yy2_ok=yy2_n;

for t=2:length(xx_n)
    if xx_n(t)-xx2_n(t-1)<75 % Curve con sviluppo inferiore a
        45 m (3/5 dello sviluppo del tratto a deviazione lineare)
        xx_ok(t)=1;
        yy_ok(t)=1;
        xx2_ok(t-1)=1;
        yy2_ok(t-1)=1;
    else
        end
end

xx_ok(xx_ok==1)=[];
xx_ok=xx_ok';
xx2_ok(xx2_ok==1)=[];
xx2_ok=xx2_ok';
yy_ok(yy_ok==1)=[];
yy_ok=yy_ok';
yy2_ok(yy2_ok==1)=[];
yy2_ok=yy2_ok';

% Ordinamento coordinate PUNTI NOTEVOLI

punti_notevoli_x=[Progressive(1);xx_ok;xx2_ok;flesso_x;Progre
    ssive(end)];
```

APPENDICE A

```
% Ordinare un vettore dal più piccolo elemento in su

x_punti_ok=sort(punti_notevoli_x);
x_punti_ok=unique(x_punti_ok,'rows');
for j=1:length(x_punti_ok)
    aa(j)=find(x_punti_ok(j)==Progressive);
    y_punti_ok(j)=sgf(aa(j));
    y_punti_ok_new(j)=Angolo_new(aa(j));
end

y_punti_ok=[y_punti_ok'];
y_punti_ok_new=[y_punti_ok_new'];

%% Curve troppo vicine/piccole da eliminare

for i=1:length(xx_ok)-1
    cc=find(x_punti_ok>=xx2_ok(i) & x_punti_ok<=xx_ok(i+1)); %
    Cercare solo nei tratti a deviazione lineare (curve)
    for j=2:length(cc)
        var(j)=x_punti_ok(cc(j))-x_punti_ok(cc(j-1));
        if var(j)<60 && sum(ismember(x_punti_ok(cc(j-1)),flesso_x))==1 &&
            sum(ismember(x_punti_ok(cc(j)),xx_ok))==1
            xx_ok(i+1)=x_punti_ok(cc(j-1));
            yy_ok(i+1)=y_punti_ok(cc(j-1));
            flesso_x(flesso_x==x_punti_ok(cc(j-1)))=1;
            flesso_y(flesso_y==y_punti_ok(cc(j-1)))=1;
            flesso_x(flesso_x==1)=[];
            flesso_y(flesso_y==1)=[];
        elseif var(j)<60 && sum(ismember(x_punti_ok(cc(j-1)),xx2_ok))==1 &&
            sum(ismember(x_punti_ok(cc(j)),flesso_x))==1
            xx2_ok(i)=x_punti_ok(cc(j));
            yy2_ok(i)=y_punti_ok(cc(j));
            flesso_x(flesso_x==x_punti_ok(cc(j)))=1;
            flesso_y(flesso_y==y_punti_ok(cc(j)))=1;
            flesso_x(flesso_x==1)=[];
            flesso_y(flesso_y==1)=[];
        else
        end
    end
end

x_punti_ok=sort([Progressive(1);xx_ok;xx2_ok;flesso_x;Progressive(end)]);
y_punti_ok=[];
y_punti_ok_new=[];
for j=1:length(x_punti_ok)
    aa(j)=find(x_punti_ok(j)==Progressive);
```


APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
y_punti_ok(j)=sgf(aa(j));
y_punti_ok_new(j)=Angolo_new(aa(j));
end

y_punti_ok=[y_punti_ok'];
y_punti_ok_new=[y_punti_ok_new'];

%% Curve troppo vicine/piccole da eliminare tra i punti di
flesso

m=1;
inizio=flesso_x(1);
while m<length(flesso_x)
    count=1;
    if m+count==length(flesso_x)
        break
    else
    end
    var=flesso_x(m+count)-flesso_x(m);
    while var<60
        count=count+1;
        if m+count==length(flesso_x)
            break
        else
        end
        var=flesso_x(m+count)-flesso_x(m);
    end
    inizio=[inizio;flesso_x(m+count)];
    m=m+count;
end

flesso_x_ok=[inizio;flesso_x(end)];
flesso_x_ok=unique(flesso_x_ok,'rows');
flesso_y_ok=[];
for j=1:length(flesso_x_ok)
    aa(j)=find(flesso_x_ok(j)==flesso_x);
    flesso_y_ok(j)=flesso_y(aa(j));
end

flesso_y_ok=[flesso_y_ok'];

%% Passaggio per le coordinate Est e Nord dei punti di inizio
e fine dei tratti a deviazione lineare

for j=1:length(xx2_ok)
    m=xx2_ok(j);
    k=find(Progressive==m);
    coord_pix(j)=Est(k);
```

APPENDICE A

```
    coord_piy(j)=Nord(k);
end

coord_pi=[coord_pix' coord_piy'];

for i=1:length(xx_ok)
    n=xx_ok(i);
    l=find(Progressive==n);
    coord_pfx(i)=Est(l);
    coord_pfy(i)=Nord(l);
end

coord_pf=[coord_pfx' coord_pfy'];

%% Passaggio per le coordinate Est e Nord dei punti di flesso

for j=2:length(flesso_x_ok)
    m=flesso_x_ok(j);
    k=find(Progressive==m);
    coord_pflx(j)=Est(k);
    coord_pfly(j)=Nord(k);
end

coord_pfl=[coord_pflx' coord_pfly'];

%% Ricerca dei Rettifili e delle Curve

% Rettifili ok: Calcolo lunghezza, media e scarto

Rettifili=[];
lunghezza_rettifili=zeros(size(xx_ok));
media_sgf_rettifili=zeros(size(xx_ok));
scarto_sgf_rettifili=zeros(size(xx_ok));
media_Angolo_rettifili=zeros(size(xx_ok));
scarto_Angolo_rettifili=zeros(size(xx_ok));
Pi_rett_x=zeros(size(xx_ok));
Pf_rett_x=zeros(size(xx_ok));
Pi_rett_y=zeros(size(xx_ok));
Pf_rett_y=zeros(size(xx_ok));
for p=1:length(xx_ok)
    lunghezza_rettifili(p)=xx2_ok(p)-xx_ok(p);
    if lunghezza_rettifili(p)<=0
        lunghezza_rettifili(p)=0;
        continue
    else intervallo=find(sgf==yy_ok(p)):find(sgf==yy2_ok(p));
        media_sgf_rettifili(p)=mean(sgf(intervallo));
        scarto_sgf_rettifili(p)=std(sgf(intervallo));
    end
end
```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
media_Angolo_rettifili(p)=mean(Angolo_new
                               (intervallo));
scarto_Angolo_rettifili(p)=std(Angolo_new
                                (intervallo));
Pi_rett_x(p)=Est(find(Progressive==xx2_ok(p)));
Pf_rett_x(p)=Est(find(Progressive==xx_ok(p)));
Pi_rett_y(p)=Nord(find(Progressive==xx2_ok(p)));
Pf_rett_y(p)=Nord(find(Progressive==xx_ok(p)));
end
end

Rettifili=[lunghezza_rettifili media_sgf_rettifili
           scarto_sgf_rettifili media_Angolo_rettifili
           scarto_Angolo_rettifili Pi_rett_x Pi_rett_y
           Pf_rett_x Pf_rett_y];
Rettifili(~any(Rettifili,2),:)=[]; % Eliminare i tratti di
rettifilo con lunghezza nulla o negativa

Centro_x_new=[];
Centro_y_new=[];
Raggio_new=[];
scarto_new=[];
Pi_circ_x_new=[];
Pf_circ_x_new=[];
Pi_circ_y_new=[];
Pf_circ_y_new=[];
Sviluppo_new=[];
Angolo_centro_new=[];
Ascissa=0;
Curvatura_new=0;
x_punti_si=sort([Progressive(1);xx_ok;xx2_ok;flesso_x_ok;
                 Progressive(end)]);
x_punti_si=unique(x_punti_si);

y_punti_si=[];
y_punti_si_new=[];
for j=1:length(x_punti_si)
    aa(j)=find(x_punti_si(j)==Progressive);
    y_punti_si(j)=sgf(aa(j));
    y_punti_si_new(j)=Angolo_new(aa(j));
end

y_punti_si=[y_punti_si'];
y_punti_si_new=[y_punti_si_new'];
for i=1:length(x_punti_si)-1
    if ismember(x_punti_si(i),xx2_ok)==1 ||
       ismember(x_punti_si(i),flesso_x_ok)==1
        aa=find(Progressive>=x_punti_si(i)&
               Progressive<=x_punti_si(i+1));
```

APPENDICE A

```

if length(aa)<5
    i_i=aa(1);
    i_f=aa(end);
    gg=aa;
else
    i_i=aa(1)+round(length(aa)/5);
    i_f=i_i+3*round(length(aa)/5);
    bb=aa>=i_i& aa<=i_f;
    gg=aa(find(bb));
end
coord_fitting=[Est(gg) Nord(gg)];
X=Est(gg)';
Y=Nord(gg)';
[x_centre,y_centre,r]=circFit([X; Y]);
Raggio=r;
if Raggio>2187 || Raggio<15
else
    Centro_x=x_centre;
    Centro_y=y_centre;
    scarto=(1/length(coord_fitting(:,1))).*
        sum(abs(Raggio-((Centro_x-
            coord_fitting(:,1)).^2+(Centro_y-
            coord_fitting(:,2)).^2).^0.5)).^0.5;
    Pi_circ_x=Est(gg(1));
    Pf_circ_x=Est(gg(end));
    Pi_circ_y=Nord(gg(1));
    Pf_circ_y=Nord(gg(end));
    Sviluppo=Progressive(gg(end))-Progressive(gg(1));
    Angolo_centro=Sviluppo/Raggio;
    Centro_x_new=[Centro_x_new;Centro_x];
    Centro_y_new=[Centro_y_new;Centro_y];
    Raggio_new=[Raggio_new;Raggio];
    scarto_new=[scarto_new;scarto];
    Pi_circ_x_new=[Pi_circ_x_new;Pi_circ_x];
    Pf_circ_x_new=[Pf_circ_x_new;Pf_circ_x];
    Pi_circ_y_new=[Pi_circ_y_new;Pi_circ_y];
    Pf_circ_y_new=[Pf_circ_y_new;Pf_circ_y];
    Sviluppo_new=[Sviluppo_new;Sviluppo];
    Angolo_centro_new=[Angolo_centro_new;
        Angolo_centro];

    Ascissa=[Ascissa;Progressive(aa(1));
        Progressive(i_i);Progressive(i_f);Progres
        sive(aa(end))];
    if y_punti_si(i)>y_punti_si(i+1)
        Curvatura=1/Raggio;
    else
        Curvatura=-1/Raggio;
    end
end

```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```

        Curvatura_new=[Curvatura_new;0;Curvatura;
                        Curvatura;0];
    end
else
end
end

Ascissa=[Ascissa;Progressive(end)];
Curvatura_new=[Curvatura_new;0];
Curvatura_new(Ascissa==0)=[];
Ascissa(Ascissa==0)=[];
Circonferenze=[Centro_x_new Centro_y_new Raggio_new
scarto_new Pi_circ_x_new Pi_circ_y_new Pf_circ_x_new
Pf_circ_y_new Sviluppo_new Angolo_centro_new];
Diagramma_curvature=[Ascissa Curvatura_new];

%% Diagramma delle velocità

% Prima fase

R_ft=[118 178 252 339 437 667; 0.17 0.15 0.13 0.12 0.11 0.10;
      60 70 80 90 100 120];
R=Raggio_new;
V_finale=[];
ft_finale=[];
for i=1:length(R)
    V=[];
    V_1=[];
    ft=[];
    if R(i)<118
        V_finale(i)=60;
        ft_finale(i)=0.17;
    elseif R(i)>=118 && R(i)<178
        V(1)=(127*R(i)*(0.07+R_ft(2,1)))^0.5;
        ft(1)=(V-R_ft(3,2))/(R_ft(3,1)-R_ft(3,2))*(R_ft(2,1)-
            R_ft(2,2))+R_ft(2,2);
        for j=2:20
            V_1(j)=V(j-1);
            ft(j)=(V_1(j)-R_ft(3,2))/(R_ft(3,1)-
                R_ft(3,2))*(R_ft(2,1)-R_ft(2,2))+R_ft(2,2);
            V(j)=(127*R(i)*(0.07+ft(j)))^0.5;
            if V(j)-V(j-1)<0.01
                V_finale(i)=V(j);
                ft_finale(i)=ft(j);
            else
            end
        end
    end
    elseif R(i)>=178 && R(i)<252

```

APPENDICE A

```

V(1)=(127*R(i)*(0.07+R_ft(2,2)))^0.5;
ft(1)=(V-R_ft(3,2))/(R_ft(3,2)-R_ft(3,3))*(R_ft(2,2)-
    R_ft(2,2))+R_ft(2,2);
for j=2:20
    V_1(j)=V(j-1);
    ft(j)=(V_1(j)-R_ft(3,3))/(R_ft(3,2)-
        R_ft(3,3))*(R_ft(2,2)-R_ft(2,3))+R_ft(2,3);
    V(j)=(127*R(i)*(0.07+ft(j)))^0.5;
    if V(j)-V(j-1)<0.01
        V_finale(i)=V(j);
        ft_finale(i)=ft(j);
    else
    end
end
elseif R(i)>=252 && R(i)<339
V(1)=(127*R(i)*(0.07+R_ft(2,3)))^0.5;
ft(1)=(V-R_ft(3,3))/(R_ft(3,3)-R_ft(3,4))*(R_ft(2,3)-
    R_ft(2,3))+R_ft(2,3);
for j=2:20
    V_1(j)=V(j-1);
    ft(j)=(V_1(j)-R_ft(3,4))/(R_ft(3,3)-
        R_ft(3,4))*(R_ft(2,3)-R_ft(2,4))+R_ft(2,4);
    V(j)=(127*R(i)*(0.07+ft(j)))^0.5;
    if V(j)-V(j-1)<0.01
        V_finale(i)=V(j);
        ft_finale(i)=ft(j);
    else
    end
end
elseif R(i)>=339 && R(i)<=437
V(1)=(127*R(i)*(0.07+R_ft(2,4)))^0.5;
ft(1)=(V-R_ft(3,4))/(R_ft(3,4)-R_ft(3,5))*(R_ft(2,4)-
    R_ft(2,4))+R_ft(2,4);
for j=2:20
    V_1(j)=V(j-1);
    ft(j)=(V_1(j)-R_ft(3,5))/(R_ft(3,4)-
        R_ft(3,5))*(R_ft(2,4)-R_ft(2,5))+R_ft(2,5);
    V(j)=(127*R(i)*(0.07+ft(j)))^0.5;
    if V(j)-V(j-1)<0.01
        V_finale(i)=V(j);
        ft_finale(i)=ft(j);
    else
    end
end
else
V_finale(i)=100; % V_max
ft_finale(i)=0.11; % ft associato a V_max
end
end
end

```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
Circonferenze=[Circonferenze V_finale'];

X1=[];
for j=1:size(Circonferenze(:,1))
    X1=[X1;Progressive(find(ismember(Est,Circonferenze(j,5),
        'rows') & ismember(Nord,Circonferenze(j,6), 'rows')))]];
end

X1=X1';

X2=[];
for j=1:size(Circonferenze(:,1))
    X2=[X2;Progressive(find(ismember(Est,Circonferenze(j,7),
        'rows') & ismember(Nord,Circonferenze(j,8), 'rows')))]];
end

X2=X2';

Y1=[];
for j=1:size(Circonferenze(:,1))
    Y1=[Y1;Circonferenze(j,11)];
end

Y1=Y1';

Y2=[];
for j=1:size(Circonferenze(:,1))
    Y2=[Y2;Circonferenze(j,11)];
End

Y2=Y2';

for t=1:length(Circonferenze)
    Circonferenze(t,12)=find(Circonferenze(t,5)==data_1(:,1) &
        Circonferenze(t,6)==data_1(:,2));
    Circonferenze(t,13)=find(Circonferenze(t,7)==data_1(:,1) &
        Circonferenze(t,8)==data_1(:,2))-1;
end
```

APPENDICE A

```

% Seconda fase

V_max=100; % Cambiare di volta in volta a seconda della
categoria di strada
A_a=[];
V_v=[];
Ascissa_new=[X1 X2];
Vel=[Y1 Y2];
[Ascissa_new,order]=sort(Ascissa_new);
Vel=Vel(order);
s2=zeros(length(Vel),1);
count=0;
for s=1:length(Vel)-1
    count=count;
    if count==0
        d=s;
        c=s+1;
        % Tutto dipende da questo valore, se è uguale o diverso
        da uno!
        if s2(s)~=1
            s2(s)=s;
            if Vel(d)==Vel(c) && Vel(d)~=V_max && Vel(c)~=V_max
                && mod(d,2)==1 || Vel(d)==Vel(c) && Vel(d)==V_max
                && Vel(c)==V_max % mod(s,2)=1 significa che s è
                un numero dispari --> inizio di arco di
                circonferenza
                    A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
                    V_v=[V_v;Vel(d)];
                    s=s+1;
                    count=0;
            elseif Vel(d)==Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
                Vel(c)~=V_max && mod(d,2)==0
                a=0.8;
                A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
                V_v=[V_v;Vel(d)];
                Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
                Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
                    (Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a)));
                Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2abs(a)*Sa)^0.5*3.6;
                if Vel_Sa<=V_max
                    A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
                    V_v=[V_v;Vel_Sa];
                elseif Vel_Sa>V_max
                    Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
                    Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*(-a));
                    Vel_Dta=V_max;
                    Vel_Dtb=V_max;
                    A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
                        Ascissa_new(c)-Dtb];
            end
        end
    end
end

```


APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```
        V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
    end
    s=s+1;
    count=0;
elseif Vel(d)>Vel(c)  && Vel(d)==V_max
    a=-0.8;
    Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
    Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
    b=Ascissa_new(c)-Dt;
    if Dist>=Dt  && b>Ascissa_new(d)
        A_a=[A_a;b];
        V_v=[V_v;Vel(d)];
        s=s+1;
        count=0;
    elseif Dist<Dt  && b>A_a(end)
        A_a=[A_a;b];
        V_v=[V_v;Vel(d)];
        s=s+1;
        count=0;
    elseif Dist<Dt  && b<A_a(end)
        A_a(end)=1;
        V_v(end)=1;
        count=1;
        if s-count==0
            break
        else
            end
        end
elseif Vel(d)<Vel(c)  && Vel(c)==V_max
    A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
    V_v=[V_v;Vel(d)];
    a=0.8;
    Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
    Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
    b=Ascissa_new(d)+Dt;
    if Dist>=Dt  && b<Ascissa_new(c)
        A_a=[A_a;b];
        V_v=[V_v;Vel(c)];
        s2(c)=1;
        s=s+1;
        count=0;
    elseif Dist<Dt  && b<Ascissa_new(c+1)
        A_a=[A_a;b];
        V_v=[V_v;Vel(c)];
        s2(c)=1;
        s=s+1;
        count=0;
    elseif Dist<Dt  && b>Ascissa_new(c+1)
        s2(c)=1;
        s2(c+1)=1;
```

APPENDICE A

```

        count=2;
        if s+count==length(Vel)
            break
        else
            end
        end
elseif Vel(d)>=Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
    Vel(c)~=V_max
    a=-0.8;
    Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
    Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
    b=Ascissa_new(c)-Dt;
    if Dist>=Dt && b>Ascissa_new(d)
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
        V_v=[V_v;Vel(d)];
        Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
            (Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a)));
        Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2
            +2*abs(a)*Sa)^0.5)*3.6;
        if Vel_Sa<=V_max
            A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
            V_v=[V_v;Vel_Sa];
        elseif Vel_Sa>V_max
            Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*(-a));
            Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*a);
            Vel_Dta=V_max;
            Vel_Dtb=V_max;
            A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
                Ascissa_new(c)-Dtb];
            V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
        end
        s=s+1;
        count=0;
    elseif Dist<Dt && b>A_a(end)
        A_a=[A_a;b];
        V_v=[V_v;Vel(d)];
        s=s+1;
        count=0;
    elseif Dist<Dt && b<A_a(end)
        A_a(end)=1;
        V_v(end)=1;
        count=1;
        if s-count==0
            break
        else
            end
        end
    end
elseif Vel(d)<Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
    Vel(c)~=V_max
    a=0.8;

```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```

Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
V_v=[V_v;Vel(d)];
b=Ascissa_new(d)+Dt;
if Dist>=Dt && b<Ascissa_new(c)
    Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
        (Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a)));
    Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2*abs(a)*Sa)^0.5
        *3.6;
    if Vel_Sa<=V_max
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
        V_v=[V_v;Vel_Sa];
    elseif Vel_Sa>V_max
        Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
        Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*(-a));
        Vel_Dta=V_max;
        Vel_Dtb=V_max;
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
            Ascissa_new(c)-Dtb];
        V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
    end
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b<Ascissa_new(c+1)
    A_a=[A_a;b];
    V_v=[V_v;Vel(c)];
    s2(c)=1;
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b>Ascissa_new(c+1)
    s2(c)=1;
    s2(c+1)=1;
    count=2;
    if s+count==length(Vel)
        break
    else
        end
    end
end
end
else
end
A_a(A_a==1)=[];
V_v(V_v==1)=[];
else
end
while count~=0
    if mod(count,2)==0
        d=s;
        c=s+count+1;

```

APPENDICE A

```
% Tutto dipende da questo valore, se è uguale o
diverso da uno!
if s2(s)~=1
    s2(s)=s;
    if Vel(d)==Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
        Vel(c)~=V_max && mod(d,2)==0
        a=0.8;
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
        V_v=[V_v;Vel(d)];
        Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
        Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
            (Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a)));
        Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2*abs(a)*Sa)^0.5
            *3.6;
        if Vel_Sa<=V_max
            A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
            V_v=[V_v;Vel_Sa];
        elseif Vel_Sa>V_max
            Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
            Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*(-a));
            Vel_Dta=V_max;
            Vel_Dtb=V_max;
            A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
                Ascissa_new(c)-Dtb];
            V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
        end
        s=s+1;
        count=0;
    elseif Vel(d)<Vel(c) && Vel(c)==V_max
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
        V_v=[V_v;Vel(d)];
        a=0.8;
        Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
        Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
        b=Ascissa_new(d)+Dt;
        if Dist>=Dt && b<Ascissa_new(c)
            A_a=[A_a;b];
            V_v=[V_v;Vel(c)];
            s2(c)=1;
            s=s+1;
            count=0;
        elseif Dist<Dt && b<Ascissa_new(c+1)
            A_a=[A_a;b];
            V_v=[V_v;Vel(c)];
            s2(c)=1;
            s=s+1;
            count=0;
        elseif Dist<Dt && b>Ascissa_new(c+1)
            s2(c)=1;
            s2(c+1)=1;
        end
    end
end
```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```

        count=count+2;
        if s+count==length(Vel)
            break
        else
            end
        end
elseif Vel(d)>Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
Vel(c)~=V_max
a=-0.8;
Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
b=Ascissa_new(c)-Dt;
if Dist>=Dt && b>Ascissa_new(d)
    A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];
    V_v=[V_v;Vel(d)];
    Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
        Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a));
    Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2*abs(a)*Sa)
        ^0.5)*3.6;
    if Vel_Sa<=V_max
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
        V_v=[V_v;Vel_Sa];
    elseif Vel_Sa>V_max
        Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*
            (-a));
        Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*a);
        Vel_Dta=V_max;
        Vel_Dtb=V_max;
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+
            Dta;Ascissa_new(c)-Dtb];
        V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
    end
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b>A_a(end)
    A_a=[A_a;b];
    V_v=[V_v;Vel(d)];
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b<A_a(end)
    A_a(end)=1;
    V_v(end)=1;
    break
end
elseif Vel(d)<Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
Vel(c)~=V_max
a=0.8;
Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
A_a=[A_a;Ascissa_new(d)];

```

APPENDICE A

```

V_v=[V_v;Vel(d)];
b=Ascissa_new(d)+Dt;
if Dist>=Dt && b<Ascissa_new(c)
    Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
        Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a));
    Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2*abs(a)*Sa)
        ^0.5)*3.6;
    if Vel_Sa<=V_max
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
        V_v=[V_v;Vel_Sa];
    elseif Vel_Sa>V_max
        Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
        Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*
            (-a));
        Vel_Dta=V_max;
        Vel_Dtb=V_max;
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
            Ascissa_new(c)-Dtb];
        V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
    end
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b<Ascissa_new(c+1)
    A_a=[A_a;b];
    V_v=[V_v;Vel(c)];
    s2(c)=1;
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b>Ascissa_new(c+1)
    s2(c)=1;
    s2(c+1)=1;
    count=count+2;
    if s+count==length(Vel)
        break
    else
        end
    end
end
end
else
end
elseif mod(count,2)==1
    d=s-count-1;
    c=s+1;
    % Tutto dipende da questo valore, se è uguale o
    % diverso da uno!
    if s2(s)~=1
        s2(s)=s;
        if Vel(d)==Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
            Vel(c)~=V_max && mod(d,2)==0
            a=0.8;

```

APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```

Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
(Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a)));
Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2*abs(a)*Sa)^0.5
*3.6;
if Vel_Sa<=V_max
    A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
    V_v=[V_v;Vel_Sa];
elseif Vel_Sa>V_max
    Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
    Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*(-a));
    Vel_Dta=V_max;
    Vel_Dtb=V_max;
    A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
        Ascissa_new(c)-Dtb];
    V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
end
s=s+1;
count=0;
elseif Vel(d)>Vel(c) && Vel(d)==V_max
a=-0.8;
Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
b=Ascissa_new(c)-Dt;
A_a(end)=1;
V_v(end)=1;
if Dist>=Dt && b>Ascissa_new(d)
    A_a=[A_a;b];
    V_v=[V_v;Vel(d)];
    s=s+1;
    count=0;
    A_a(A_a==1)=[];
    V_v(V_v==1)=[];
elseif Dist<Dt && b>A_a(end-1)
    A_a=[A_a;b];
    V_v=[V_v;Vel(d)];
    s=s+1;
    count=0;
    A_a(A_a==1)=[];
    V_v(V_v==1)=[];
elseif Dist<Dt && b<A_a(end-1)
    A_a(end-1)=1;
    V_v(end-1)=1;
    count=2+count;
    if s-count==0
        break
    else
    end
    A_a(A_a==1)=[];
    V_v(V_v==1)=[];

```

APPENDICE A

```

end
elseif Vel(d)>Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&
Vel(c)~=V_max
a=-0.8;
Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
b=Ascissa_new(c)-Dt;
if Dist>=Dt && b>Ascissa_new(d)
Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
(Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a)));
Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2*abs(a)*Sa)
^0.5)*3.6;
if Vel_Sa<=V_max
A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
V_v=[V_v;Vel_Sa];
elseif Vel_Sa>V_max
Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*
(-a));
Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*a);
Vel_Dta=V_max;
Vel_Dtb=V_max;
A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
Ascissa_new(c)-Dtb];
V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
end
s=s+1;
count=0;
elseif Dist<Dt && b>A_a(end-1)
A_a(end)=1;
V_v(end)=1;
A_a=[A_a;b];
V_v=[V_v;Vel(d)];
s=s+1;
count=0;
A_a(A_a==1)=[];
V_v(V_v==1)=[];
elseif Dist<Dt && b<A_a(end-1)
A_a(end)=1;
V_v(end)=1;
A_a(end-1)=1;
V_v(end-1)=1;
count=2+count;
if s-count==0
break
else
end
A_a(A_a==1)=[];
V_v(V_v==1)=[];
end
elseif Vel(d)<Vel(c) && Vel(d)~=V_max &&

```


APPENDICE A-Curvature e velocità teoriche

```

Vel(c)~=V_max
a=0.8;
Dt=(Vel(c)^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
Dist=Ascissa_new(c)-Ascissa_new(d);
b=Ascissa_new(d)+Dt;
if Dist>=Dt && b<Ascissa_new(c)
    Sa=0.5*(Dist+((Vel(c)/3.6)^2-
        Vel(d)/3.6)^2)/(2*abs(a));
    Vel_Sa=((Vel(d)/3.6)^2+2*abs(a)*Sa
        ^0.5)*3.6;
    if Vel_Sa<=V_max
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Sa];
        V_v=[V_v;Vel_Sa];
    elseif Vel_Sa>V_max
        Dta=(V_max^2-Vel(d)^2)/(25.92*a);
        Dtb=(Vel(c)^2-V_max^2)/(25.92*
            (-a));
        Vel_Dta=V_max;
        Vel_Dtb=V_max;
        A_a=[A_a;Ascissa_new(d)+Dta;
            Ascissa_new(c)-Dtb];
        V_v=[V_v;Vel_Dta;Vel_Dtb];
    end
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b<Ascissa_new(c+1)
    A_a=[A_a;b];
    V_v=[V_v;Vel(c)];
    s2(c)=1;
    s=s+1;
    count=0;
elseif Dist<Dt && b>Ascissa_new(c+1)
    s2(c)=1;
    s2(c+1)=1;
    break
end
end
end
end
end
end
end

A_a=[A_a;Ascissa_new(end)];
V_v=[V_v;Vel(end)];
A_a(A_a==1)=[];
V_v(V_v==1)=[];
A=A_a(1);
V=V_v(1);

```

APPENDICE A

```
for j=2:length(A_a)
    if A_a(j)==A_a(j-1) && V_v(j)==V_v(j-1)
        A(j)=1;
        V(j)=1;
    else
        A(j)=A_a(j);
        V(j)=V_v(j);
    end
end

A(A==1)=[];
V(V==1)=[];
A=A';
V=V';
Diagramma_velocita=[A V];
```

APPENDICE B-Circle fitting

```
function [x, y, r, sq_error] = circFit ( P )
%# CIRCFIT fits a circle to a set of points using least squares
%# P is a 2 x n matrix of points to be fitted

per_error = 0.1/100; % i.e. 0.1%

%# initial estimates
X = mean(P, 2)';
r = sqrt(mean(sum(( repmat(X', [1, length(P)]) - P).^2)));

v_cen2points = zeros(size(P));
niter = 0;

%# looping until convergence
while niter < 1 || per_diff > per_error

    %# vector from centre to each point
    v_cen2points(1, :) = P(1, :) - X(1);
    v_cen2points(2, :) = P(2, :) - X(2);

    %# distacnes from centre to each point
    centre2points = sqrt(sum(v_cen2points.^2));

    %# distances from edge of circle to each point
    d = centre2points - r;

    %# computing 3x3 jacobian matrix J, and solvign matrix eqn.
    R = (v_cen2points ./ [centre2points; centre2points])';
    J = [ -ones(length(R), 1), -R ];
    D_rXY = -J\d';

    %# updating centre and radius
    r_old = r;    X_old = X;
    r = r + D_rXY(1);
    X = X + D_rXY(2:3)';

    %# calculating maximum percentage change in values
    per_diff = max(abs( [(r_old - r) / r, (X_old - X) ./ X ]))
* 100;

    %# prevent endless looping
    niter = niter + 1;
    if niter > 1000
        error('Convergence not met in 1000 iterations!')
    end
end
```

APPENDICE B

```
end
```

```
x = X(1);
```

```
y = X(2);
```

```
sq_error = sum(d.^2);
```

APPENDICE C-Map Matching

```
%% Importare dati strada
```

```
load('data_1.mat')
```

```
% Creazione del poligono entro cui ricercare i dati FCD
```

```
min_x=min(data_1(:,1));  
max_x=max(data_1(:,1));  
min_y=min(data_1(:,2));  
max_y=max(data_1(:,2));  
poligono=[min_x min_y;max_x min_y;max_x max_y;min_x max_y;  
          min_x min_y];
```

```
%% Caricare i dati fcd
```

```
xlfiles=dir('*.xlsx'); % You are in the folder of xls files  
Nfiles=length(xlfiles) ; % Number of xls files  
punti=[];  
for i=1:Nfiles  
    fname=xlfiles(i).name ; % File name  
    [vector,dateTimeFixArray]=xlsread(fname); % Read the file  
    idx=cellfun(@(x) isempty(regexp(x, ':')), dateFixArray);  
    dateFixArray(idx)=cellfun(@(x) {[x ' 00:00:00']},  
                              dateFixArray(idx));  
    formatIn='dd/mm/yyyy HH:MM:SS';  
    a=datevec(dateFixArray(:,1),formatIn);  
    b=datevec(dateFixArray(:,2),formatIn);  
    punti=[punti;vector(:,1:4) a b vector(:,7:15)];  
end  
  
% Eliminare elementi con direzione e velocità nulla  
  
for k=1:size(punti,1)  
    if punti(k,20)==0 && punti(k,21)==0  
        punti_1(k)=0;  
    else  
        punti_1(k)=k;  
    end  
end  
  
indices=find(punti_1==0);  
punti(indices,:)=[];
```

APPENDICE C

```
% Eliminare elementi doppi nella tabella FCD

for i=1:size(punti,1)
    punti(i,26)=sum(punti(i,3:25));
end

[~,T]=unique(punti(:,26));
num_1=punti(T,:);
num=num_1(:,1:25);

% Associare gli FCD ai segmenti della strada e dividerli per
verso di percorrenza

delta=max(data_1)-min(data_1);
delta_nor=ceil(delta./1000);
P_1=zeros(1,2);
P_1(1,1)=min(data_1(:,1))-25;
P_1(1,2)=min(data_1(:,2))-25;
P_2=zeros(1,2);
P_2(1,1)=P_1(1,1)+delta_nor(1,1)*1000;
P_2(1,2)=P_1(1,2)+delta_nor(1,2)*1000;

for i=(P_1(1,1)-1000):1000:P_2(1,1)
    xv=[i i i+1000 i+1000 i];
    for j=(P_1(1,2)-1000):1000:P_2(1,2)
        yv=[j j+1000 j+1000 j j];
        in_num=inpolygon(num(:,24),num(:,25),xv,yv);
        if sum(in_num)==0
            else
                I=find(in_num==1); % FCD ricadenti nel quadrato
                A=num(in_num,24); % Coordinata x dei punti
                    ricadenti nel quadrato
                B=num(in_num,25); % Coordinata y dei punti
                    ricadenti nel quadrato
                C=[A B];
                xv1=[i-1000 i+2000 i+2000 i-1000 i-1000];
                yv1=[j-1000 j-1000 j+2000 j+2000 j-1000];
                in_data_1=inpolygon(data_1(:,1),data_1(:,2),
                    xv1,yv1); % Segmenti della spezzata
                    ricadenti nel quadrato più grande
                D=data_1(in_data_1,1); %Coordinata x dei segmenti
                E=data_1(in_data_1,2); %Coordinata y dei segmenti
                F=data_1(in_data_1,3); %ID dei segmenti
                G=data_1(in_data_1,4); %Ang. di dev. dei segmenti
                M=data_1(in_data_1,5); %Coeff. ang. dei segmenti
                L=data_1(in_data_1,6); %Termine noto dei segmenti
                H=[D E F G M L];
                % Analizzo tutti i punti nel quadrato
                raggio=15; % Distanza dall'asse
```

APPENDICE C-Map Matching

```
for k=1:size(C,1) % Num di FCD nel riquadro
    indici=(H(:,1)-C(k,1)).^2+(H(:,2)-C(k,2)).^2
    <=raggio^2; % Distanza che ogni FCD ha
    rispetto a tutti i segmenti della strada
    if sum(indici)==0 % Il punto è troppo lontano
    dalla strada e lo scarto
        num(I(k),26)=0;
        num(I(k),27)=0;
        num(I(k),28)=0;
    else
        appoggio=find(indici==1); % Segmenti
        della strada che presentano d(P,r)<15
        if appoggio(1)==1 % Primo segmento
            appoggio=[appoggio;appoggio(end)+1];
        elseif appoggio(end)==length(H(:,1))
            % Ultimo segmento
            appoggio=[appoggio(1)-1;appoggio];
        else
            appoggio=[appoggio(1)-1;appoggio;
                appoggio(end)+1]; % Estende
                la ricerca al segmento
                subito prima e subito dopo
        end
        dist=((H(appoggio,1)-C(k,1)).^2
            +(H(appoggio,2)-C(k,2)).^2).^0.5;
        punti_strada_x=H(appoggio,1);
        punti_strada_y=H(appoggio,2);
        n_segmento=H(appoggio,3);
        direzione=H(appoggio,4);
        coeff_ang=H(appoggio,5);
        term_noto=H(appoggio,6);
        num(I(k),26)=min(dist); % Distanza minima
        tra le varie distanze che il punto ha con
        i segmenti della strada
        if isinf(coeff_ang(find(dist==
            min(dist))))~=0
            xk=H(appoggio(find(dist==min(dist)),
                1));
            yk=C(k,2);
            if
                punti_strada_x(find(dist==min(dist)))==data_1(1,1) &
                punti_strada_y(find(dist==min(dist)))==data_1(1,2) &
                xk>=data_1(1,1) & xk<=data_1(2,1) & yk>=data_1(1,2) &
                yk<=data_1(2,2) % Attenzione al verso del primo segmento
                della strada
                    num(I(k),27)=data_1(1,3);
                    num(I(k),28)=data_1(1,4);
                    num(I(k),29)=xk;
                    num(I(k),30)=yk;
```

APPENDICE C

```
elseif
punti_strada_x(find(dist==min(dist)))==data_1(end,1) &
punti_strada_y(find(dist==min(dist)))==data_1(end,2) &
xk>=data_1(end-1,1) & xk<=data_1(end,1) & yk>=data_1(end-1,2)
& yk<=data_1(end,2) % Attenzione al verso dell'ultimo
segmento della strada
                                num(I(k),27)=data_1(end,3);
                                num(I(k),28)=data_1(end,4);
                                num(I(k),29)=xk;
                                num(I(k),30)=yk;
else
    if
((punti_strada_x(find(dist==min(dist))))-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1))).^2+(punti_strada_y
(find(dist==min(dist))))-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1))).^2).^0.5>((xk-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1))).^2+(yk-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1))).^2).^0.5
                                num(I(k),27)=n_segmento(find
                                (dist==min(dist)));
                                num(I(k),28)=direzione(find
                                (dist==min(dist)));
                                num(I(k),29)=xk;
                                num(I(k),30)=yk;
        elseif
((punti_strada_x(find(dist==min(dist))))-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1))).^2+(punti_strada_y
(find(dist==min(dist))))-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1))).^2).^0.5<((xk-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1))).^2+(yk-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1))).^2).^0.5 &
coeff_ang(find(dist==min(dist))-1)~=Inf
                                xk=(yk-term_noto(find(dist==
                                min(dist))-1))/coeff_ang
                                (find(dist==min(dist))-1);
                                num(I(k),27)=n_segmento
                                (find(dist==min(dist))-1);
                                num(I(k),28)=direzione
                                (find(dist==min(dist))-1);
                                num(I(k),29)=xk;
                                num(I(k),30)=yk;
        elseif
((punti_strada_x(find(dist==min(dist))))-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1))).^2+(punti_strada_y
(find(dist==min(dist))))-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1))).^2).^0.5<((xk-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1))).^2+(yk-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1))).^2).^0.5 &
coeff_ang(find(dist==min(dist))-1)==Inf
                                num(I(k),27)=n_segmento(find
```


APPENDICE C-Map Matching

```

                                (dist==min(dist))-1);
                                num(I(k),28)=direzione(find
                                (dist==min(dist))-1);
                                num(I(k),29)=xk;
                                num(I(k),30)=yk;
                                end
                                end
                                else
                                if
                                punti_strada_x(find(dist==min(dist)))==data_1(1,1) &
                                punti_strada_y(find(dist==min(dist)))==data_1(1,2)

                                xk=(C(k,1)+coeff_ang(find(dist==min(dist)))*C(k,2)-
                                coeff_ang(find(dist==min(dist)))*term_noto(find(dist==min(dis
                                t))))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))))^2+1);

                                yk=coeff_ang(find(dist==min(dist)))*(C(k,1)+coeff_ang(find(di
                                st==min(dist)))*C(k,2)-
                                coeff_ang(find(dist==min(dist)))*term_noto(find(dist==min(dis
                                t))))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))))^2+1)+term_noto(find
                                (dist==min(dist)));

                                if xk>=data_1(1,1) &
                                xk<=data_1(2,1) & yk>=data_1(1,2) & yk<=data_1(2,2) %
                                Attenzione al verso del primo segmento della strada
                                num(I(k),27)=data_1(1,3);
                                num(I(k),28)=data_1(1,4);
                                num(I(k),29)=xk;
                                num(I(k),30)=yk;
                                else
                                end
                                elseif
                                punti_strada_x(find(dist==min(dist)))==data_1(end,1) &
                                punti_strada_y(find(dist==min(dist)))==data_1(end,2)

                                xk=(C(k,1)+coeff_ang(find(dist==min(dist)))*C(k,2)-
                                coeff_ang(find(dist==min(dist)))*term_noto(find(dist==min(dis
                                t))))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))))^2+1);

                                yk=coeff_ang(find(dist==min(dist)))*(C(k,1)+coeff_ang(find(di
                                st==min(dist)))*C(k,2)-
                                coeff_ang(find(dist==min(dist)))*term_noto(find(dist==min(dis
                                t))))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))))^2+1)+term_noto(find
                                (dist==min(dist)));

                                if xk>=data_1(end-1,1) &
                                xk<=data_1(end,1) & yk>=data_1(end-1,2) & yk<=data_1(end,2) %
                                Attenzione al verso dell'ultimo segmento della strada
                                num(I(k),27)=data_1(end,3);
                                num(I(k),28)=data_1(end,4);
                                num(I(k),29)=xk;
                                num(I(k),30)=yk;

```

APPENDICE C

```

else
end
else
    % Punto di intersezione fra il
punto e il segmento su cui è proiettato

xk=(C(k,1)+coeff_ang(find(dist==min(dist)))*C(k,2)-
coeff_ang(find(dist==min(dist)))*term_noto(find(dist==min(dis
t))))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))))^2+1);

yk=coeff_ang(find(dist==min(dist)))*(C(k,1)+coeff_ang(find(di
st==min(dist)))*C(k,2)-
coeff_ang(find(dist==min(dist)))*term_noto(find(dist==min(dis
t))))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))))^2+1)+term_noto(find
(dist==min(dist)));

    if
((punti_strada_x(find(dist==min(dist)))-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1)))^2+(punti_strada_y
(find(dist==min(dist)))-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1)))^2).^0.5>((xk-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1)))^2+(yk-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1)))^2).^0.5
        num(I(k),27)=n_segmento
            (find(dist==min(dist)));
        num(I(k),28)=direzione
            (find(dist==min(dist)));
        num(I(k),29)=xk;
        num(I(k),30)=yk;
    else
        if
coeff_ang(find(dist==min(dist))-1)~=Inf

xk=(C(k,1)+coeff_ang(find(dist==min(dist))-1)*C(k,2)-
coeff_ang(find(dist==min(dist))-
1)*term_noto(find(dist==min(dist))-
1))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))-1))^2+1);

yk=coeff_ang(find(dist==min(dist))-
1)*(C(k,1)+coeff_ang(find(dist==min(dist))-1)*C(k,2)-
coeff_ang(find(dist==min(dist))-
1)*term_noto(find(dist==min(dist))-
1))/((coeff_ang(find(dist==min(dist))-
1))^2+1)+term_noto(find(dist==min(dist))-1);
        if
((punti_strada_x(find(dist==min(dist)))-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))-
1)))^2+(punti_strada_y(find(dist==min(dist)))-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))-1)))^2).^0.5>((xk-
(punti_strada_x(find(dist==min(dist))-1)))^2+(yk-
(punti_strada_y(find(dist==min(dist))-1)))^2).^0.5

```

APPENDICE C-Map Matching

```

num(I(k),27)=n_segmento(find(dist==min(dist))-1);

num(I(k),28)=direzione(find(dist==min(dist))-1);
                                num(I(k),29)=xk;
                                num(I(k),30)=yk;
                                else
                                    if
C(k,2)>punti_strada_y(find(dist==min(dist))-1) &
C(k,2)<punti_strada_y(find(dist==min(dist))) |
C(k,2)>punti_strada_y(find(dist==min(dist))) &
C(k,2)<punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1)
                                yk=C(k,2);
                                if
yk>punti_strada_y(find(dist==min(dist))-1) &
yk<punti_strada_y(find(dist==min(dist)))
                                xk=(yk-
term_noto(find(dist==min(dist))-
1)/coeff_ang(find(dist==min(dist))-1);

num(I(k),27)=n_segmento(find(dist==min(dist))-1);

num(I(k),28)=direzione(find(dist==min(dist))-1);

num(I(k),29)=xk;

num(I(k),30)=yk;
                                elseif
yk>punti_strada_y(find(dist==min(dist))) &
yk<punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1)
                                xk=(yk-
term_noto(find(dist==min(dist))))/coeff_ang(find(dist==min(di
st)));

num(I(k),27)=n_segmento(find(dist==min(dist)));

num(I(k),28)=direzione(find(dist==min(dist)));

num(I(k),29)=xk;

num(I(k),30)=yk;
                                end
                                elseif
C(k,1)>punti_strada_x(find(dist==min(dist))-1) &
C(k,1)<punti_strada_x(find(dist==min(dist))) |
C(k,1)>punti_strada_x(find(dist==min(dist))) &
C(k,1)<punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1)
                                xk=C(k,1);

```

APPENDICE C

```

                                                                    if
xk>punti_strada_x(find(dist==min(dist))-1) &
xk<punti_strada_x(find(dist==min(dist)))

yk=coeff_ang(find(dist==min(dist))-
1)*xk+term_noto(find(dist==min(dist))-1);

num(I(k),27)=n_segmento(find(dist==min(dist))-1);

num(I(k),28)=direzione(find(dist==min(dist))-1);

num(I(k),29)=xk;

num(I(k),30)=yk;

                                                                    elseif
xk>punti_strada_x(find(dist==min(dist))) &
xk<punti_strada_x(find(dist==min(dist))+1)

yk=coeff_ang(find(dist==min(dist)))*xk+term_noto(find(dist==m
in(dist)));

num(I(k),27)=n_segmento(find(dist==min(dist)));

num(I(k),28)=direzione(find(dist==min(dist)));

num(I(k),29)=xk;

num(I(k),30)=yk;

                                                                    end
                                                                    end
                                                                    end
                                                                    elseif
coeff_ang(find(dist==min(dist))-1)==Inf
                                                                    yk=C(k,2);
                                                                    if
xk>punti_strada_y(find(dist==min(dist))) &
xk<punti_strada_y(find(dist==min(dist))+1)
                                                                    xk=(yk-
term_noto(find(dist==min(dist)))/coeff_ang(find(dist==min(di
st))));

num(I(k),27)=n_segmento(find(dist==min(dist)));

num(I(k),28)=direzione(find(dist==min(dist)));
                                                                    num(I(k),29)=xk;
                                                                    num(I(k),30)=yk;
                                                                    elseif
xk>punti_strada_y(find(dist==min(dist))-1) &
xk<punti_strada_y(find(dist==min(dist)))

```


APPENDICE D-Analisi delle centraline

```
%% Caricare i dati delle stazioni fisse dal folder dei dati

xlfiles = dir('*.xlsx');
Nfiles = length(xlfiles);
traffico=[];
datetimearray=[];
for i=1:Nfiles
    fname=xlfiles(i).name;
    [vector,dateTimeFixArray]=xlsread(fname);
    idx=cellfun(@x isempty(regexp(x,':')),
        dateTimeFixArray);
    dateTimeFixArray(idx)=cellfun(@x {[x ' 00:00:00']},
        dateTimeFixArray(idx));
    formatIn='dd/mm/yyyy HH:MM:SS';
    a=datevec(dateTimeFixArray(:,1),formatIn);
    b=datevec(dateTimeFixArray(:,2),formatIn);
    traffico=[traffico;a b vector(:,1:end)];
    datetimearray=[datetimearray;dateTimeFixArray];
end

traffico(isnan(traffico))=0; % Replace NaN values with 0

% Eliminare i casi in cui direzione e corsia sono contrari
(es. sorpasso)

for j=1:size(traffico,1)
    indtraffico_1=find(traffico(:,13)==2 & traffico(:,14)==10
        | traffico(:,13)==1 & traffico(:,14)==-10);
end
traffico_1=traffico(indtraffico_1,:);

% Dividere i dati nelle due direzioni

dir1=traffico_1(find(traffico_1(:,13)==1),:); % Discendente
dir2=traffico_1(find(traffico_1(:,13)==2),:); % Ascendente

%% Analizzare prima la direzione discendente, dividendo
l'analisi dei dati di traffico delle centraline in 3 gruppi,
ciascuno composto di 2 mesi

dir1_1=[];
dir1_2=[];
dir1_3=[];
```

APPENDICE D-Analisi delle centraline

```
for i=1:size(dir1,1)
    if dir1(i,2)==9 || dir1(i,2)==12 %Settembre e Dicembre
        dir1_1=[dir1_1;dir1(i,:)];
    elseif dir1(i,2)==10 || dir1(i,2)==11 %Ottobre e Novembre
        dir1_2=[dir1_2;dir1(i,:)];
    elseif dir1(i,2)==1 || dir1(i,2)==2 %Gennaio e Febbraio
        dir1_3=[dir1_3;dir1(i,:)];
    end
end

date1_1=datetime(dir1_1(:,1:6));
date1_2=datetime(dir1_2(:,1:6));
date1_3=datetime(dir1_3(:,1:6));

% dir1_1

dir1_1=sortrows(dir1_1,15);
b=[];
for i=1:max(dir1_1(:,15))
    if i<=125 % Di volta in volta decidere dove bloccare la
        ricerca dei 5 punti di massimo
        a=dir1_1(find(dir1_1(:,15)==i),:);
        A=a(:,16);
        B=maxk(A,5);
        B=unique(B);
        for j=1:size(B,1)
            b=[b;a(find(a(:,16)==B(j)),:)]];
        end
    else
        a=dir1_1(find(dir1_1(:,15)==i),:);
        A=a(:,16);
        B=maxk(A,2);
        B=unique(B);
        for j=1:size(B,1)
            b=[b;a(find(a(:,16)==B(j)),:)]];
        end
    end
end

% Tools-Basic fitting-cubic - Salvataggio dell'equazione nel
workspace (divisione fra FFS e velocità vincolate)

c=[fit.coeff(1,1)*6 fit.coeff(1,2)*2];
Q_lim=-c(1,2)/c(1,1);
v_lim=fit.coeff(1,1)*Q_lim^3+fit.coeff(1,2)*Q_lim^2+fit.coeff
(1,3)*Q_lim+fit.coeff(1,4);
D_lim=Q_lim/v_lim;
m_lim=1/D_lim;

fit_x=0:2:max(dir1_1(:,15));
```

APPENDICE D

```
fit_y=fit.coeff(1,1)*fit_x.^3+fit.coeff(1,2)*fit_x.^2  
      +fit.coeff(1,3)*fit_x+fit.coeff(1,4);
```

```
dir1_1_down=[];  
dir1_1_up=[];
```

```
for k=1:size(dir1_1,1)  
    if m_lim*dir1_1(k,15)-dir1_1(k,16)>0  
        dir1_1_down=[dir1_1_down;dir1_1(k,:)];  
    elseif m_lim*dir1_1(k,15)-dir1_1(k,16)<=0  
        dir1_1_up=[dir1_1_up;dir1_1(k,:)];  
    end  
end
```

```
date1_1_down=datetime(dir1_1_down(:,1:6));  
date1_1_up=datetime(dir1_1_up(:,1:6));
```

```
% dir1_2 e dir1_3
```

Si segue lo stesso procedimento appena illustrato per dir1_1 anche per gli altri 4 mesi suddivisi nei 2 gruppi.

%% Analizzare prima la direzione ascendente, dividendo l'analisi dei dati di traffico delle centraline in 3 gruppi, ciascuno composto di 2 mesi

Si segue lo stesso procedimento appena illustrato per l'altra direzione.

APPENDICE E-Analisi FCD

```
%% Caricamento dati
```

```
load('dirAB_3004.mat')
load('dirBA_3004.mat')
load('data_1')
load('Diagramma_velocita')
load('Diagramma_curvature.mat')
```

```
%% Ordinare le matrici in base all'andamento dei link crescenti
```

```
[~,idx]=sort(dirAB(:,27));
AB=dirAB(idx,:);
```

```
[~,idx]=sort(dirBA(:,27));
BA=dirBA(idx,:);
```

```
% Eliminare i punti sul primo link che ricadono al di fuori del grafo
```

```
for i=1:length(AB)
    if sum(AB(i,29:30))==0
        a(i)=0;
    else
        a(i)=i;
    end
end
```

```
a(a==0)=[];
a=a';
AB=AB(a,:);
```

```
for i=1:length(BA)
    if sum(BA(i,29:30))==0
        b(i)=0;
    else
        b(i)=i;
    end
end
```

```
b(b==0)=[];
b=b';
BA=BA(b,:);
```

APPENDICE E

```
% Proiezione degli FCD lungo l'ascissa curvilinea
(Progressiva) e associazione del giorno della settimana

for j=1:length(AB)
    AB(j,32)=data_1(find(data_1(1:end-1,3)==AB(j,27)),8)
        +((data_1(find(data_1(1:end-1,3)==AB(j,27)),1)-
            AB(j,29)).^2+(data_1(find(data_1(1:end-1,3)==
                AB(j,27)),2)-AB(j,30)).^2).^0.5;
    AB(j,33)=weekday(datetime(AB(j,11),AB(j,12),AB(j,13)));
end

for j=1:length(BA)
    BA(j,32)=data_1(find(data_1(1:end-1,3)==BA(j,27)),8)
        +((data_1(find(data_1(1:end-1,3)==BA(j,27)),1)-
            BA(j,29)).^2+(data_1(find(data_1(1:end-1,3)==
                BA(j,27)),2)-BA(j,30)).^2).^0.5;
    BA(j,33)=weekday(datetime(BA(j,11),BA(j,12),BA(j,13)));
end

% Ordinare le matrici in base alle proiezioni lungo l'ascissa
curvilinea

[~,ids]=sort(AB(:,32));
AB=AB(ids,:);

[~,ids]=sort(BA(:,32));
BA=BA(ids,:);

%% Importare dati nodi notevoli da scartare

load('Elementi_3.mat')

%% Cubic spline per descrivere l'andamento delle velocità -
dir. AB

filtro30=AB(:,20)>=30;
x_AB=AB(filtro30,32);
y_AB=AB(filtro30,20);

c=Diagramma_curvature(:,1);
c=unique(c);

sp_AB=spline(c,y_AB(:)'/spline(c,eye(length(c)),x_AB(:)'));
xplot_AB=linspace(min(x_AB),max(x_AB),(max(x_AB)-
    min(x_AB))*0.3);
yplot_AB=ppval(sp_AB,xplot_AB);
spb_AB=ppval(sp_AB,c);

Elementi_4=[data_1(1,8);Elementi_3(:,5);data_1(end,8)];
Elementi_4=unique(Elementi_4);
```

APPENDICE E-Analisi FCD

```

figure
if Elementi_4(1,1)==Elementi_3(1,5)
    for i=1:size(Elementi_4,1)
        if mod(i,2)==1
            continue
        elseif mod(i,2)==0
            a_AB=xplot_AB(find(xplot_AB(1,:)>=Elementi_4(i,1)
                & xplot_AB(1,:)<=Elementi_4(i+1,1)));
            b_AB=ppval(sp_AB,a_AB);
            d_AB=c(find(c>=Elementi_4(i,1) &
                c<=Elementi_4(i+1,1)));
            e_AB=ppval(sp_AB,d_AB);
            plot(a_AB,b_AB,'b-',d_AB,e_AB,'ks',
                Diagramma_velocita(:,1),Diagramma_velocita(:,2),
                'g',x_AB,y_AB,'r*')
            hold on
        end
    end
else
    for i=1:size(Elementi_4,1)
        if mod(i,2)==0
            continue
        elseif mod(i,2)==1
            a_AB=xplot_AB(find(xplot_AB(1,:)>=Elementi_4(i,1)
                & xplot_AB(1,:)<=Elementi_4(i+1,1)));
            b_AB=ppval(sp_AB,a_AB);
            d_AB=c(find(c>=Elementi_4(i,1) &
                c<=Elementi_4(i+1,1)));
            e_AB=ppval(sp_AB,d_AB);
            plot(a_AB,b_AB,'b-',d_AB,e_AB,'ks',
                Diagramma_velocita(:,1),Diagramma_velocita(:,2),
                'g',x_AB,y_AB,'r*')
            hold on
        end
    end
end
hold off

%% Cubic spline per descrivere l'andamento delle velocità -
dir. BA

filtro30=BA(:,20)>=30;
x_BA=BA(filtro30,32);
y_BA=BA(filtro30,20);

c=Diagramma_curvature(:,1);
c=unique(c);

sp_BA=spline(c,y_BA(:)'/spline(c,eye(length(c)),x_BA(:)'));
xplot_BA=linspace(min(x_BA),max(x_BA),(max(x_BA)-

```

APPENDICE E

```
        min(x_BA))*0.3);
yplot_BA=ppval(sp_BA,xplot_BA);
spb_BA=ppval(sp_BA,c);

Elementi_4=[data_1(1,8);Elementi_3(:,5);data_1(end,8)];
Elementi_4=unique(Elementi_4);

figure
if Elementi_4(1,1)==Elementi_3(1,5)
    for i=1:size(Elementi_4,1)
        if mod(i,2)==1
            continue
        elseif mod(i,2)==0
            a_BA=xplot_BA(find(xplot_BA(1,:)>=Elementi_4(i,1)
                & xplot_BA(1,:)<=Elementi_4(i+1,1)));
            b_BA=ppval(sp_BA,a_BA);
            d_BA=c(find(c>=Elementi_4(i,1) &
                c<=Elementi_4(i+1,1)));
            e_BA=ppval(sp_BA,d_BA);
            plot(a_BA,b_BA,'b-',d_BA,e_BA,'ks',
                Diagramma_velocita(:,1),Diagramma_velocita(:,2),
                'g',x_BA,y_BA,'r*')
            hold on
        end
    end
else
    for i=1:size(Elementi_4,1)
        if mod(i,2)==0
            continue
        elseif mod(i,2)==1
            a_BA=xplot_BA(find(xplot_BA(1,:)>=Elementi_4(i,1)
                & xplot_BA(1,:)<=Elementi_4(i+1,1)));
            b_BA=ppval(sp_BA,a_BA);
            d_BA=c(find(c>=Elementi_4(i,1) &
                c<=Elementi_4(i+1,1)));
            e_BA=ppval(sp_BA,d_BA);
            plot(a_BA,b_BA,'b-',d_BA,e_BA,'ks',
                Diagramma_velocita(:,1),Diagramma_velocita(:,2),
                'g',x_BA,y_BA,'r*')
            hold on
        end
    end
end
hold off
```

APPENDICE F-Analisi delle velocità

```
%% Ricava gli elementi della strada con le velocità minima,
massima, V85

% Progressive elementi

Prog_Ci=[];
for j=1:size(Pi_circ_x_new,1) % Coordinate fine circonferenze
    Prog_Ci=[Prog_Ci;data_1(find(Pi_circ_x_new(j,1)==
        data_1(:,1) & Pi_circ_y_new(j,1)==data_1(:,2)),8)];
end

Prog_Cf=[];
for j=1:size(Pf_circ_x_new,1) % Coordinate fine circonferenze
    Prog_Cf=[Prog_Cf;data_1(find(Pf_circ_x_new(j,1)==
        data_1(:,1) & Pf_circ_y_new(j,1)==data_1(:,2)),8)];
end

Circ_info=Circonferenze(:,[5:8 3 9:10]); % Prendere
coordinate inizio e fine, raggio, sviluppo, angolo al centro
Zero_1=zeros(length(Circonferenze),1);
Prog_C=[Prog_Ci Prog_Cf Zero_1 Circ_info];

Prog_Ri=[];
for j=1:size(Rettifili,1) % Progressive inizio rettifili
    Prog_Ri=[Prog_Ri; data_1(find(Rettifili(j,6)==
        data_1(:,1) & Rettifili(j,7)==data_1(:,2)),8)];
end

Prog_Rf=[];
for j=1:size(Rettifili,1) % Progressive inizio rettifili
    Prog_Rf=[Prog_Rf; data_1(find(Rettifili(j,8)==
        data_1(:,1) & Rettifili(j,9)==data_1(:,2)),8)];
end

Lunghezze=Rettifili(:,[1 6:9]); % Prendere la lunghezza e le
progressive di inizio e fine
Zero_2=zeros(length(Rettifili),3);
Prog_R=[Prog_Rf Prog_Ri Lunghezze Zero_2]; % Si chiamano
inizio e fine, ma sono invertite

% Unire le progressive di circonferenze e rettifili e
ordinarle in senso crescente

Prog_tutte=[Prog_C; Prog_R]; % Pi, Pf, L, Ei, Ni, Ef, Nf, R, Sv, alpha
Prog_tutte_ordinate_SS4=sortrows(Prog_tutte,1);
```

APPENDICE F

```
% Altimetria: livellette i>= 3%

for i=1:size(Prog_tutte_ordinate_SS4,1)
    a=find(Prog_tutte_ordinate_SS4(i,1)>=SS4_Altimetria(:,1)
        & Prog_tutte_ordinate_SS4(i,2)<=SS4_Altimetria(:,2));
    if a~=0
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,11)=SS4_Altimetria(find
            Prog_tutte_ordinate_SS4(i,1)>=
            SS4_Altimetria(:,1) & Prog_tutte_ordinate_SS4
            (i,2)<=SS4_Altimetria(:,2)),7);
    else
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,11)=0;
    end
end

%% Analisi delle velocità per singola geometria dir AB

filtro30=AB(:,20)>=30;
AB=AB(filtro30,:);

for i=1:size(Prog_tutte_ordinate_SS4,1)
    a=find(data_AB(:,8)>=Prog_tutte_ordinate_SS4(i,1) &
        data_AB(:,8)<=Prog_tutte_ordinate_SS4(i,2));
    b=find(AB(:,27)>=a(1) & AB(:,27)<=a(end));
    if sum(b)==0
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,12)=0;
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,13)=0;
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,14)=0;
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,15)=0;
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,16)=0;
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,17)=0;
    else
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,12)=mean(AB(b,20));
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,13)=min(AB(b,20));
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,14)=max(AB(b,20));
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,15)=prctile(AB(b,20),85);
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,16)=std(AB(b,20));
        Prog_tutte_ordinate_SS4(i,17)=length(b);
    end
end

Velocita_AB_SS4=Prog_tutte_ordinate_SS4;

Elementi_4=[data_AB(1,8);Elementi_3(:,5);data_AB(end,8)];
Elementi_4=unique(Elementi_4);
```

APPENDICE F-Analisi delle velocità

```

if Elementi_4(1,1)==Elementi_3(1,5)
    for i=1:size(Elementi_4,1)-1
        if mod(i,2)==0
            continue
        elseif mod(i,2)==1
            for j=1:size(Velocita_AB_SS4,1)
                if Velocita_AB_SS4(j,1)>=Elementi_4(i,1) &&
                    Velocita_AB_SS4(j,2)<=Elementi_4(i+1,1)
                    Velocita_AB_SS4(j,:)=0;
                else
                    end
            end
        end
    end
end
else
    for i=1:size(Elementi_4,1)-1
        if mod(i,2)==1
            continue
        elseif mod(i,2)==0
            for j=1:size(Velocita_AB_SS4,1)
                if Velocita_AB_SS4(j,1)>=Elementi_4(i,1) &&
                    Velocita_AB_SS4(j,2)<=Elementi_4(i+1,1)
                    Velocita_AB_SS4(j,:)=0;
                else
                    end
            end
        end
    end
end
end

Velocita_AB_SS4(~any(Velocita_AB_SS4,2),:)=[];
Velocita_AB_SS4(Velocita_AB_SS4==0)=NaN;

prog_AB=[Velocita_AB_SS4(:,1) Velocita_AB_SS4(:,15);
         Velocita_AB_SS4(:,2) Velocita_AB_SS4(:,15)];
prog_AB=sortrows(prog_AB,1);

% Immagine per il confronto tra diagramma delle velocità e
V85

figure
if Elementi_4(1,1)==Elementi_3(1,5)
    for i=1:size(Elementi_4,1)-1
        if mod(i,2)==1
            continue
        elseif mod(i,2)==0
            prog_ok_AB=prog_AB(find(prog_AB(:,1)>=
                Elementi_4(i,1) & prog_AB(:,1)<=
                Elementi_4(i+1,1)),1);
            vel_ok_AB=prog_AB(find(prog_AB(:,1)>=

```

APPENDICE F

```

        Elementi_4(i,1) & prog_AB(:,1)<=
        Elementi_4(i+1,1)),2);
    plot(prog_ok_AB,vel_ok_AB,'b-',
    Diagramma_velocita(:,1),Diagramma_velocita(:,2),'r'),
    hold on
end
end
else
    for i=1:size(Elementi_4,1)-1
        if mod(i,2)==0
            continue
        elseif mod(i,2)==1
            prog_ok_AB=prog_AB(find(prog_AB(:,1)>=
            Elementi_4(i,1) & prog_AB(:,1)<=
            Elementi_4(i+1,1)),1);
            vel_ok_AB=prog_AB(find(prog_AB(:,1)>=
            Elementi_4(i,1) & prog_AB(:,1)<=
            Elementi_4(i+1,1)),2);
            plot(prog_ok_AB,vel_ok_AB,'b-',
            Diagramma_velocita(:,1),Diagramma_velocita(:,2),'r'),
            hold on
        end
    end
end
hold off

%% Analisi delle velocità per singola geometria dir BA -
Il procedimento rimane identico al precedente, ma nell'altra
direzione
```


Bibliografia

- [1] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade*, Gazzetta Ufficiale, 2001.
- [2] Ministero dei lavori pubblici, *Circolare 8 giugno 2001 n.3699*, 2001.
- [3] Parlamento europeo e Consiglio, *Direttiva 2008/96/CE*, Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea, 2008.
- [4] Presidente della Repubblica, *D. Lgs n.35*, Gazzetta Ufficiale, 2001.
- [5] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Linee guida per la gestione della sicurezza delle infrastrutture stradali ai sensi dell'art. 8 del decreto legislativo 15 marzo 2011, n. 35*, 2012.
- [6] C. WANG, M. A. QUDDUS e S. G. ISON, «The effect of traffic and road characteristics on road safety: A review and future research direction,» *Safety science*, pp. 57: 264-275, 2013.
- [7] S. OTHMAN e R. THOMSON, «Influence of road characteristics on traffic safety,» *Proc. the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV), Paper.*, pp. 18-21, 2007.
- [8] P. VAYALAMKUZHI e V. AMIRTHALINGAM, «Influence of geometric design characteristics on safety under heterogeneous traffic flow,» *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, pp. 3.6: 559-570, 2016.
- [9] G. KANELLAIDIS e S. VARDAKI, «Integrating safety and human factor issues into road geometric design guidelines,» *4th International Symposium on Highway Geometric Design Polytechnic University of Valencia Transportation Research Board*, 2010.
- [10] S. CANALE, S. LEONARDI e F. NICOSIA, «Definition of an index of performance in order to characterize the level of dangerousness of road infrastructures».

Bibliografia

- [11] Ministero dei lavori pubblici, «Scheda 24: Influenza dell'ambiente stradale sul comportamento degli utenti,» 2000.
- [12] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, *Nuovo Codice della Strada*, Gazzetta Ufficiale, 1992.
- [13] A. POLUS, C. POE e J. MASON, «Transportation research circular,» *Review of international design speed practices in roadway geometric design*, pp. E-C003: 5: 1-8, 1998.
- [14] K. FITZPATRICK e al., «Speed prediction for two-lane rural highways,» *United States. Federal Highway Administration*, 2000.
- [15] A. M. F. MEDINA e A. P. TARKO, «Speed factors on two-lane rural highways in free-flow conditions,» *Transportation Research Record*, pp. 1912.1: 39-46, 2005.
- [16] R. MILSTEAD e al., «Procedures for setting advisory speeds on curves,» *Federal Highway Administration*, 2011.
- [17] R. A. KRAMES e al., «Horizontal alignment design consistency for rural two-lane highways,» *Federal Highway Administration*, 1995.
- [18] L. G. MORCILLO e al, «Measurement of road consistency on two-lane rural highways in Granada (Spain),» *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, pp. 162: 237-242, 2014.
- [19] K. FITZPATRICK e al., «Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways,» *FHWA-RD*, pp. 99-172, 2000.
- [20] K. FITZPATRICK, R. A. KRAMES e D. B. FAMBRO, «Design speed, operating speed and posted speed relationships,» *Institute of Transportation Engineers. ITE Journal* , p. 67.2: 52, 1997.
- [21] S. OTHMAN, R. THOMSON e G. LANNÉR, «Identifying critical road geometry parameters affecting crash rate and crash type,» *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference. Association for the Advancement of Automotive Medicine*, p. 155, 2009.

Bibliografia

- [22] G. CANTISANI e G. LOPRENCIPE, «Reference trajectories of vehicles for road alignment design,» *Transport Infrastructure and Systems: Proceedings of the AIIT International Congress on Transport Infrastructure and Systems (Rome, Italy, 10-12 April 2017)*, 2017.
- [23] E. J. FITZSIMMONS e et al., «Analyses of vehicle trajectories and speed profiles along horizontal curves,» *Journal of Transportation Safety & Security*, pp. 5.3: 187-207, 2013.
- [24] E. J. FITZSIMMONS, «Development and analysis of vehicle trajectories and speed profiles along horizontal curves,» 2011.
- [25] K. A. S. ISMAIL, «Probabilistic calibration of highway geometric design: theoretical issues and applications,» *PhD Thesis. University of British Columbia*, 2006.
- [26] H. R. AL-MASAEID, K. HAMMORY e B. AL-OMARI, «Consistency of horizontal alignment under adverse weather conditions,» *Road & Transport Research*, p. 8.3: 55, 1999.
- [27] A. THEOFILATOS e G. YANNIS, «A review of the effect of traffic and weather characteristics on road safety. Accident Analysis & Prevention,» pp. 72: 244-256, 2014.
- [28] M. KYTE e al., «Effect of environmental factors on free-flow speed,» *US National Academy of Sciences Transportation Research Board*, pp. 18.1: 10-25, 2000.
- [29] R. BILLOT, N.-E. EL FAOUZI e F. DE VUYST, «Multilevel assessment of the impact of rain on drivers' behavior: standardized methodology and empirical analysis,» *Transportation research record*, pp. 2107.1: 134-142, 2009.
- [30] J. EDQUIST, C. RUDIN-BROWN e M. G. LENNE, «Road design factors and their interactions with speed and speed limits,» *Monash University Accident Research Centre*, p. 30: 24, 2009.
- [31] S. LEONARDI, «Sicurezza stradale e leggibilità dell'insieme strada/paesaggio. Analisi di casi studio relativi a tracciati appartenenti alla viabilità extraurbana».

Bibliografia

- [32] Z. LI e al., «Automated identification and extraction of horizontal curve information from geographic information system roadway maps,» *Transportation Research Record*, pp. 2291.1: 80-92, 2012.
- [33] P. WATTERS e M. O'MAHONY, «The relationship between geometric design consistency and safety on rural single carriageways in Ireland,» *Proc., European Transport Conference*, 2007.
- [34] G. FUSCO, M. BENCO e L. COMELLI, «Documento di analisi del grafo con i criteri per la creazione dei livelli di aggregazione richiesti,» *Jump Traffic Jam2014*, 2014.
- [35] R. ANDRÁŠIK e M. BÍL, «Efficient road geometry identification from digital vector data,» *Journal of Geographical Systems*, pp. 18.3: 249-264, 2016.
- [36] P. DI MASCIÒ e al., «Analisi di sensibilità dei metodi di calcolo per la determinazione della geometria stradale».
- [37] W. LUO, L. LI e K. C. WANG, «Automated pavement horizontal curve measurement methods based on inertial measurement unit and 3D profiling data,» *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* , pp. 3.2: 137-145, 2016.
- [38] G. MARINELLI e al., «Mobile mapping systems and spatial data collection strategies assessment in the identification of horizontal alignment of highways,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp. 79: 257-273, 2017.
- [39] I. PUENTE e al., «Review of mobile mapping and surveying technologies,» *Measurement*, pp. 46.7: 2127-2145., 2013.
- [40] C. AI e Y. TSAI, «Automatic horizontal curve identification and measurement method using GPS data,» *Journal of Transportation Engineering*, 2014.
- [41] M. CASTRO e al., «Geometric modelling of highways using global positioning system (GPS) data and spline

Bibliografia

- approximation,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp. 14.4: 233-243, 2006.
- [42] D. BEN-ARIEH e al., «Geometric modeling of highways using global positioning system data and B-spline approximation,» *Journal of Transportation Engineering*, pp. 130.5: 632-636, 2004.
- [43] P. DI MASCIO e al., «Procedure to determine the geometry of road alignment using GPS data,» *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, pp. 53: 1202-1215, 2012.
- [44] B. CRISMAN e A. ROBBA, «Safety evaluation: practical use of collected data vehicle to obtain geometric information of existing roadway,» *Società Italiana Infrastrutture Viarie SIIV*, pp. 1-21, 2005.
- [45] S. ZHANG, M. WON e S. H. SON, «Low-Cost Realtime Horizontal Curve Detection Using Inertial Sensors of a Smartphone,» *2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pp. 1-5, 2016.
- [46] I. KÁSA, «A circle fitting procedure and its error analysis,» *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, pp. 1: 8-14, 1976.
- [47] S. CIROI, «I minimi quadrati,» *Università degli studi di Padova..*
- [48] L. MAISONOBE, «Finding the circle that best fits a set of points,» 25 October 2007.
- [49] M. BASSANI, G. MARINELLI e M. PIRAS, «Identification of horizontal circular arc from spatial data sources,» *Journal of Surveying Engineering*, 2016.
- [50] W. GANDER, G. H. GOLUB e R. STREBEL, «Least-squares fitting of circles and ellipses,» *BIT Numerical Mathematics*, pp. 34.4: 558-578, 1994.
- [51] G. PRODI, S. ANGELLOTTI e W. NESCI, «Metodo di stima del raggio di curvatura del percorso di un veicolo – Brevetto per invenzione industriale».

Bibliografia

- [52] W. LUO, L. LI e K. C. WANG, «Automatic horizontal curve identification and measurement using mobile mapping system,» *Journal of Surveying Engineering*, p. 144.4: 04018007, 2018.
- [53] D. J. WALTON e D. S. MEEK, «A controlled clothoid spline,» *Computers & Graphics*, pp. 29.3: 353-363, 2005.
- [54] G. CANTISANI e al., «Spline curves for geometric modeling of highway design,» *Proc., II Convegno Internazionale, SIV: New Technologies and Modeling Tools For Road Applications to Design and Management*, 2004.
- [55] G. DELL'ACQUA, «European speed environment model for highway design-consistency,» *Modern Applied Science*, p. 6.9: 1, 2012.
- [56] A. POLUS, K. FITZPATRICK e D. B. FAMBRO, «Predicting operating speeds on tangent sections of two-lane rural highways,» *Transportation Research Record*, pp. 1737.1: 50-57, 2000.
- [57] Y. HASSAN e M. SARHAN, «Modeling Operating Speed: Synthesis Report. Chapter 1: Introduction,» *Transportation Research Circular*, pp. E-C151, 2011.
- [58] M. DE LUCA, R. LAMBERTI e G. DELL'ACQUA, «Freeway free flow speed: a case study in Italy,» *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, pp. 54: 628-636, 2012.
- [59] I. H. HASHIM, «Analysis of speed characteristics for rural two-lane roads: A field study from Minoufiya Governorate, Egypt.,» *Ain Shams Engineering Journal*, pp. 2.1: 43-52, 2011.
- [60] A. LOBO, C. RODRIGUES e A. COUTO, «Free-flow speed model based on portuguese roadway design features for two-lane highways,» *Transportation Research Record*, pp. 2348.1: 12-18, 2013.
- [61] J. L. OTTESEN e R. A. KRAMMES, «Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States,» *Transportation Research Record*, pp. 1701.1: 76-85, 2000.

Bibliografia

- [62] M. BASSANI e al., «Random effect models to predict operating speed distribution on rural two-lane highways,» *Journal of transportation engineering*, p. 142.6: 04016019, 2016.
- [63] R. LAMM, E. M. CHOUEIRI e T. MAILAENDER, «Comparison of operating speeds on dry and wet pavements of two-lane rural highways,» *Transportation research record*, pp. 1280.8: 199-207., 1990.
- [64] S. CAFISO, A. DI GRAZIANO e G. LA CAVA, «Actual driving data analysis for design consistency evaluation,» *Transportation research record*, pp. 1912.1: 19-30, 2005.
- [65] S. CAFISO e G. CERNI, «New approach to defining continuous speed profile models for two-lane rural roads,» *Transportation research record*, pp. 2309.1: 157-167., 2012.
- [66] V. FABRIZI e R. RAGONA, «A pattern matching approach to speed forecasting of traffic networks,» *European Transport Research Review*, pp. 6.3: 333-342, 2014.
- [67] R. ALMEIDA, L. VASCONCELOS e A. B. SILVA, «A speed model for curves of two-lane rural highways based on continuous speed data,» *Transport Infrastructure and Systems: Proceedings of the AIIT International Congress on Transport Infrastructure and Systems (Rome, Italy, 10-12 April 2017)*, p. 177, 2017.
- [68] F. J. CAMACHO-TORREGROSA e al., «New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation,» *Accident Analysis & Prevention*, pp. 61: 33-42, 2013.
- [69] A. M. PEREZ ZURIAGA e al., «Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with global positioning system data,» *Transportation Research Record*, pp. 2171: 11-20, 2010.
- [70] I. H. HASHIM, T. A. ABDEL-WAHED e Y. MOUSTAFA, «Toward an operating speed profile model for rural two-lane

Bibliografija

- roads in Egypt,» *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*, pp. 3.1: 82-88, 2016.
- [71] D. CVITANIĆ e B. MALJKOVIĆ, «Operating speed models of two-lane rural state roads developed on continuous speed data,» *Tehnički vjesnik: znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku*, p. 24.6: 1915, 2017.
- [72] L. EBOLI e al., «Experimental relationships between operating speeds of successive road design elements in two-lane rural highwaysExperimental relationships between operating speeds of successive road design elements in two-lane rural highways,» *Transport*, pp. 32.2: 138-145, 2017.
- [73] M. CASTRO e al., «Automated GIS-based system for speed estimation and highway safety evaluation,» *Journal of Computing in Civil Engineering*, pp. 22.5: 325-331, 2008.
- [74] T. ERDELIĆ, S. VRBANČIĆ e L. ROŠIĆ, «A model of speed profiles for urban road networks using g-means clustering,» *38th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, 2015.
- [75] A. M. SEMEIDA, «Impact of highway geometry and posted speed on operating speed at multi-lane highways in Egypt,» *Journal of advanced research*, pp. 4.6: 515-523, 2013.
- [76] A. LOBO e al., «Modelling the Operating Speed in Segments of Two-Lane Highways from Probe Vehicle Data: A Stochastic Frontier Approach,» *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 2018.
- [77] F. RUSSO, S. ANTONIO BIANCARDO e M. BUSIELLO, «Operating speed as a key factor in studying the driver behaviour in a rural context,» *Transport*, pp. 31.2: 260-270, 2016.
- [78] B. CRISMAN e al., «Operating speed prediction model for two-lane rural roads,» *3rd International Symposium on Highway Geometric Design*, 2005.
- [79] J. AMBROS e V. VALENTOVÁ, «Identification of Road Horizontal Alignment Inconsistencies–A Pilot Study from the

Bibliografia

- Czech Republic,» *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, pp. 11.1: 62-69, 2016.
- [80] R. MAURO e M. CORRADINI, *I diagrammi di velocità e le verifiche di tracciato: una sintesi a fini operativi*, 2007.
- [81] F. G. PRATICO e M. GIUNTA, «Quantifying the effect of present, past and oncoming alignment on the operating speeds of a two-lane rural road,» *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, pp. 7.3: 181-190, 2012.
- [82] S. HIMES, «Speed Prediction Models for Multilane Highways,» *PhD Thesis. Pennsylvania State University.*, 2007.
- [83] A. D'ANDREA e al., «The most influential variables in the determination of V85 speed,» *Procedia-social and behavioral sciences*, pp. 53: 633-644, 2012.
- [84] A. M. ODHAMS e D. J. COLE, «Models of driver speed choice in curves,» *Proceedings of the 7th International Symposium on Advanced Vehicle Control. Citeseer*, 2004.
- [85] F. BELLA, «Driving simulator for speed research on two-lane rural roads,» *Accident Analysis & Prevention*, pp. 40.3: 1078-1087, 2008.
- [86] N. STAMATIADIS e H. GONG, «Analysis of Inconsistencies Related to Design Speed, Operating Speed, and Speed Limits,» 2004.
- [87] D. LLOPIS-CASTELLÓ e &. al., «New consistency model based on inertial operating speed profiles for road safety evaluation.,» *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2018.
- [88] K. S. SCHURR e al., «Relationship of design, operating, and posted speeds on horizontal curves of rural two-lane highways in Nebraska,» *Transportation Research Record*, pp. 1796.1: 60-71, 2002.
- [89] L. ÅBERG e al., «Observed vehicle speed and drivers' perceived speed of others,» *Applied Psychology*, pp. 46.3: 287-302., 1997.

Bibliografia

- [90] R. ELVIK, «The Power Model of the relationship between speed and road safety: update and new analyses,» 2009.
- [91] J. KONONOV e al., «Relationship between traffic density, speed, and safety and its implications for setting variable speed limits on freeways,» *Transportation Research Record* , pp. 2280.1: 1-9, 2012.
- [92] B. CRISMAN e al., «Modello di previsione delle velocità praticate dagli utenti attraverso la definizione di una velocità ambientale,» *XIII CONVEGNO SIIV-PADOVA. UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA*, pp. p. A08/1-A08/13, 2003.
- [93] G. VALENTI, C. LIBERATO e P. MASTROIANNI, «L'importanza dei big data sulla mobilità urbana,» *Energia, ambiente e innovazione*, pp. 42-47, 2016.
- [94] X. WU e al., «Data mining with big data,» *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, pp. 26.1: 97-107, 2013.
- [95] J. GRENGS, X. WANG e L. KOSTYNIUK, «Using GPS data to understand driving behavior,» *Journal of urban technology*, pp. 15.2: 33-53, 2008.
- [96] G. LEDUC e al., «Road traffic data: Collection methods and applications,» *Working Papers on Energy, Transport and Climate Change*, p. 1.55, 2008.
- [97] M. HOUBRAKEN e al., «Examining the potential of floating car data for dynamic traffic management,» *IET Intelligent Transport Systems*, pp. 12.5: 335-344, 2018.
- [98] W. VANDENBERGHE e al., «Feasibility of expanding traffic monitoring systems with floating car data technology,» *IET Intelligent Transport Systems*, pp. 6.4: 347-354, 2012.
- [99] W. HUBER, M. LÄDKE e R. OGGER, «Extended floating-car data for the acquisition of traffic information,» *Proceedings of the 6th World congress on intelligent transport systems*, pp. 1-9, 1999.

Bibliografia

- [100] A. SOHR, E. BROCKFELD e S. KRIEG, «QUALITY OF FLOATING CAR DATA,» *12th WCTR*, 2012.
- [101] P. WAGNER, «How many Floating Car Data (FCD) are needed for Traffic Management?».
- [102] G. FUSCO, *L'incidentalità sulla rete stradale ASTRAL - linee guida per la redazione dei dossier strada*, 2016.
- [103] M. HOUBRAKEN e al., «Real-time traffic monitoring by fusing floating car data with stationary detector data,» *2015 International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, pp. 127-131, 2015.
- [104] W. CHO e E. CHOI, «A GPS trajectory map-matching mechanism with DTG big data on the HBase system,» *Proceedings of the 2015 International Conference on Big Data Applications and Services. ACM*, pp. 22-29, 2015.
- [105] S. B. MCLAUGHLIN e J. M. HANKEY, «Matching GPS records to digital map data: algorithm overview and application,» *National Surface Transportation Safety Center for Excellence*, 2015.
- [106] F. CHEN, M. SHEN e Y. TANG, «Local path searching based map matching algorithm for floating car data,» *Procedia Environmental Sciences*, pp. 10: 576-582, 2011.
- [107] T. MIWA e .. al., «Development of map matching algorithm for low frequency probe data,» *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, pp. 22: 132-145, 2012.
- [108] M. A. QUDDUS, W. Y. OCHIENG e R. B. NOLAND, «Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions,» *Transportation research part c: Emerging technologies*, pp. 15.5: 312-328., 2007.
- [109] L. XI e al., «Map matching algorithm and its application,» *International Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering 2007. Atlantis Press*, 2007.

Bibliografia

- [110] B. Y. CHEN e al., «Map-matching algorithm for large-scale low-frequency floating car data,» *International Journal of Geographical Information Science*, pp. 28.1: 22-38, 2014.
- [111] C. DE FABRITIIS, R. RAGONA e G. VALENTI, «Traffic estimation and prediction based on real time floating car data,» *2008 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 197-203, 2008.
- [112] S. TURKSMA, «The various uses of floating car data,» 2000.
- [113] J. BROUWER, «Measuring real-time traffic data quality based on Floating Car Data,» *ATEC ITS France Congress, Paris, France*, 2014.
- [114] M. NIGRO, E. CIPRIANI e A. DEL GIUDICE, «Exploiting floating car data for time-dependent origin–destination matrices estimation,» *Journal of Intelligent Transportation Systems*, pp. 22.2: 159-174, 2018.
- [115] M. MANCINI e M. P. VALENTINI, «Impiego di floating car data per il monitoraggio sistematico della mobilità individuale motorizzata,» 2015.
- [116] Z. CONSTANTINESCU, C. MARINOIU e M. VLADOIU, «Driving style analysis using data mining techniques,» *International Journal of Computers Communications & Control*, pp. 5.5: 654-663, 2010.
- [117] C. JUREWICZ e al., «Validation and applicability of floating car speed data for road safety,» *Submitted to 2017 Australasian Road Safety Conference*, 2017.
- [118] C. S. ANDERSEN, K. H. REINAU e N. AGERHOLM, «The relationship between road characteristics and speed collected from floating car data,» *17th International Conference Road Safety On Five Continents (RS5C 2016)*, p. 10, 2016.
- [119] Ministero dei lavori pubblici, *DM 1 giugno 2001, Gazzetta Ufficiale*, 2001.

Bibliografia

- [120] A. OSEI-ASAMOAHA e al., «Development of the ConnDOT horizontal curve classification software,» *Connecticut. Dept. of Transportation*, 2014.
- [121] I. DIMITROPOULOS e G. KANELLAIDIS, «Highway geometric design: The issue of driving behavior variability,» *International Symposium on Highway Geometric Design Practices. Transportation Research Board*, p. p. 41, 1998.
- [122] G. MARINELLI, «Road geometry identification with mobile mapping techniques,» *Tesi di dottorato - Politecnico di Torino - Porto Institutional Repository*, 2015.
- [123] G. CANTISANI e G. LOPRENCIPE, «A statistics based approach for defining reference trajectories on road sections,» *Modern Applied Science*, p. 7.9: 32, 2013.
- [124] A. CALVI, «Analisi degli effetti indotti dalla funzionalità stradale sulla sicurezza dell'esercizio viario,» *Tesi di dottorato - Università degli studi ROMA TRE*, 2009.
- [125] ACI, «Dotazione di infrastrutture stradali sul territorio italiano,» 2011.
- [126] Istituto Nazionale di Statistica, «INCIDENTI STRADALI - Anno 2017,» 2018.
- [127] «ANAS Gruppo FS Italiane,» [Online]. Available: <https://www.stradeanas.it/it/le-strade/anas-regione>.

Ringraziamenti

Finire un capitolo, mettere un punto, girare pagina ed essere pronta a cominciarne uno nuovo. È qui che mi ritrovo in questo momento, in bilico su di una pagina che va necessariamente voltata, tra la fine di un'esperienza ricca di insegnamenti e l'inizio di un nuovo percorso.

In questi tre anni e poco più sono stata accolta all'interno di una piccola famiglia, con le sue regole, le sue abitudini, i suoi ritmi. Una seconda casa dove ho trascorso gran parte del mio tempo e delle mie giornate a contatto con persone che ho imparato a conoscere piano piano. Vorrei ringraziarle tutte, una per una, perché ognuna di loro mi ha aiutata a crescere. Grazie professor Cantisani, per essermi stato accanto in questo percorso, cercando di sostenermi nei momenti più bui e aiutarmi nelle scelte lavorative e non. Grazie per i suoi insegnamenti, li porto con me, sempre. È stato fondamentale per me averla accanto in questo cammino, è stato per me un punto fermo e una guida. Grazie professor Loprencipe per i suoi consigli e incitamenti arrivati sempre al momento giusto e per la sua simpatia, essenziale nelle giornate più tristi. Grazie professoressa Di Mascio per essere stata una seconda mamma, comprensiva, attenta, con cui discutere di argomenti di "alta televisione". Grazie Antonella per tutto, per l'aiuto essenziale che mi hai dato, per il sostegno e le raccomandazioni, a volte fin troppo dirette, per le merende insieme che mi mancano tantissimo e per le risate. Grazie Pablo, Lorenzo, Antonio perché mi avete fatta sentire una di voi anche se ho rotto l'incantesimo dei soli uomini in stanza, grazie perché mi avete aiutata e sostenuta sempre, fin dal primo momento. Grazie Raffaella per aver portato una ventata di allegria nel nostro piccolo mondo, per esserci stata sempre col sorriso e per avermi trasmesso positività ed entusiasmo. Grazie Laura e Nicola per gli spuntini delle 11.00 e per avermi regalato sorrisi. In ultimo, ma non per importanza, grazie Giulia perché senza di te parte di questo lavoro non avrebbe

avuto senso, perché mi sei stata vicina e perché hai saputo darmi la forza di arrivare fino in fondo.

Un ringraziamento particolare vorrei farlo alla Direzione Operation e Coordinamento Territoriale – Pianificazione Trasportistica – Aggiornamento e Classificazione Rete di ANAS S.p.A. per i dati forniti, fondamentali per lo sviluppo di questa ricerca. Vorrei ringraziare, in particolar modo, l'ingegner Maurizio Mancinetti per la grande gentilezza e disponibilità dimostrata sin dal primo momento. Grazie anche agli ingegneri Ilaria Coppa, Pier Paolo Cartolano, Domenico Fernandez e Barbara Bianchini, che si sono adoperati per rendermi disponibili, di volta in volta, i dati richiesti.

Un grazie speciale va alla mia famiglia. Ai miei genitori che hanno accettato questa scelta e l'hanno supportata. Avete saputo starmi accanto senza essere invadenti, mai. Avete rispettato le mie scelte e vi ho sentito vicino. Un grazie di cuore a mia sorella Barbara e a mia cugina Carlotta, due angeli. Vi voglio bene come a poche altre persone nella mia vita, siete irrinunciabili e parte di me. Un grazie al mio piccolo ometto Ricky, senza di te zia sarebbe una donna molto più triste e vuota; grazie per essere arrivato nella mia vita.

Grazie ai miei amici, tutti quanti. A Martina, Francesco, Carmen, Chiara, Ilenia, Ardit, Federica. A tutte le persone che oggi ci sono e a tutte quelle che non fanno più parte della mia vita, ma sono state preziose durante questo cammino.

Grazie Orazio per essere, oggi, la persona giusta al momento giusto. Spero davvero tanto che continuerai ad esserlo. *Tutto comincia in un attimo, in un giorno qualunque della vita, quando meno te lo aspetti. –Romano Battaglia-*

GRAZIE! È stato bello condividere con tutti voi questo percorso.