

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

**NUOVE TECNOLOGIE PER LA  
DINAMICA PEDONALE A VENEZIA:  
COLLAUDO DEI SENSORI E  
FUNDAMENTAL DIAGRAMS**

**Relatore:**  
**Prof. Armando Bazzani**

**Presentata da:**  
**Piero Birello**

**Correlatore:**  
**Prof. Alessandro Fabbri**

# Indice

<b>1</b>	<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>L'approccio macroscopico per lo studio della dinamica pedonale</b>	<b>4</b>
3.1	Modelli microscopici e macroscopici . . . . .	4
3.2	Fundamental Diagrams . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Il progetto veneziano</b>	<b>9</b>
4.1	Strumentazione e località di interesse . . . . .	9
4.2	Database . . . . .	12
4.3	Analisi preliminari per il collaudo dei sensori di flusso . . . . .	18
4.4	Ricostruzione dei conteggi a partire dai dati di flusso . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Analisi storica dei dati e Fundamental Diagrams</b>	<b>29</b>
5.1	Analisi storica dei dati . . . . .	29
5.2	Fundamental Diagrams per il ponte Maddalena . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>39</b>

# 1 Abstract

L'elaborato che si discuterà rappresenta un contributo a un ambizioso progetto avviato nei primi mesi dell'anno in corso. Obiettivo del progetto è lo sviluppo di un modello simulativo per i traffici pedonali nella città di Venezia, capace anche di fornire previsioni riguardo l'andamento dei flussi pedonali e l'eventuale formazione di congestioni. La diffusione del virus COVID-19 e l'emanazione da parte dello stato italiano di leggi volte alla tutela di una distanza interpersonale di sicurezza accrescono l'importanza e l'urgenza del progetto nel suo complesso. Esso rappresenterà, una volta ultimato, anche uno strumento di controllo e stima delle condizioni di distanza reciproca previste dalla legge.

Lo scopo dell'elaborato presente è, più nello specifico, quello di fornire le basi per lo sviluppo del progetto. Nel corso di questo documento si descriveranno anzitutto l'apparato strumentale a disposizione e i dati che da esso si ricavano. Si verificherà la disponibilità di tali dati nei periodi successivi all'installazione della strumentazione. Si testerà poi il corretto funzionamento degli strumenti per mezzo di alcune analisi di collaudo. Per ultimo, si forniranno un'analisi storica dei dati e uno studio delle relazioni esistenti tra alcune delle grandezze che descrivono un insieme di pedoni.

## 2 Introduzione

Il cammino costituisce il più naturale e imprescindibile metodo di spostamento e qualsivoglia viaggio comprende spostamenti a piedi. La via della pedonalizzazione delle zone centrali delle grandi città è avviata da anni, con l'obiettivo di riportare la città a misura d'uomo e ridurre le emissioni dovute ai mezzi di trasporto sui quali facciamo affidamento. Operazioni di questo tipo, inoltre, accrescono l'attrattiva turistica di una città e riducono i pericoli ai quali il cittadino e il visitatore sono esposti. Ciò nonostante, sino a oggi, ci si è concentrati prevalentemente sullo studio del traffico veicolare. I motivi sono molteplici. La gestione del traffico veicolare prevede la costruzione di infrastrutture dai costi ingenti e spesso di significativo impatto ambientale e urbanistico, nonché visivo. Minori sono di certo il costo e l'impatto delle infrastrutture dedite alla gestione del traffico pedonale. Il problema del traffico veicolare, poi, è strettamente legato a quello dell'inquinamento ambientale: il rallentamento della circolazione implica oltre all'aumento dei tempi di percorrenza una maggiore quantità di emissioni. La regolazione del traffico veicolare dispone di una più vasta gamma di soluzioni applicabili (si pensi alla segnaletica verticale e orizzontale e alle restrizioni che un autista deve osservare). Per ultimo, il fatto che i flussi veicolari siano unidirezionali (seguono la direzione della carreggiata) rende la loro modellizzazione piuttosto semplice.

Il risultato è che la dinamica dei pedoni rappresenta oggi un campo di studio solo in parte esplorato e quanto mai attuale. L'affollamento di infrastrutture come aeroporti, stazioni di treno e metro nonché delle vie delle grandi città è un problema quotidiano e l'applicazione di misure risolutive che possano migliorare l'efficienza e la sicurezza del traffico pedonale non può che passare per una sua modellizzazione e simulazione. Questo progetto si concentra in particolare sulla città di Venezia, per la quale la questione del traffico pedonale è centrale: gli afflussi turistici cui essa è sottoposta sono ingenti (10 milioni di presenze annue, dati ISTAT), con picchi in corrispondenza dei grandi eventi che hanno luogo nella città, quali il carnevale, la biennale del cinema e il capodanno. Gli unici mezzi capaci di circolare sono i così detti *vaporetti* e le imbarcazioni private. Numerose destinazioni sono raggiungibili solo percorrendo via terra la complessa e caotica rete delle vie veneziane, ricca di punti nevralgici: strette vie che permettono il passaggio di poche persone per volta, ponti di sezione spesso inferiore a quella delle strade che vi si immettono e intersezioni di vario tipo. Proprio un ponte sarà l'oggetto di studio di questo elaborato.

L'intenzione è, dapprima, quella di inquadrare il problema fornendo una panoramica dei dati disponibili e descrivendone le caratteristiche. Si svolgeranno, in secondo luogo, alcune operazioni di collaudo dei sensori che forniscono i dati. Si fornirà uno storico descrittivo del traffico pedonale medio presso la postazione studiata sotto diverse condizioni e per diversi intervalli temporali. Si cercherà, per ultimo, di individuare un rapporto tra le più importanti grandezze che caratterizzano il comportamento di una folla. Il lavoro nel suo complesso pone le basi per un progetto più grande il cui obiettivo ultimo è quello di costruire un modello predittivo per il traffico pedonale, per mezzo del quale sia possibile prevenire condizioni di congestione e stimare l'effetto di eventuali azioni risolutive.

## 3 L'approccio macroscopico per lo studio della dinamica pedonale

### 3.1 Modelli microscopici e macroscopici

La dinamica pedonale rappresenta uno tra i più recenti campi di studio della fisica dei sistemi complessi, motivo per cui un unico inquadramento teorico ancora non è stato capace di affermarsi sugli altri. Il suo obiettivo generale è quello di fornire una descrizione quanto più esaustiva possibile del comportamento di una folla, di modo da potere eseguire proiezioni a breve o lungo termine e prevenire situazioni di congestione e, eventualmente, rischio. Tale scopo è stato perseguito negli ultimi anni per mezzo di due diverse categorie di modelli: modelli di approccio microscopico e modelli di approccio macroscopico.

I modelli microscopici descrivono una folla come un sistema complesso il cui comportamento è risultato dell'interazione dei tanti singoli che lo compongono. Tali individui sono dotati ciascuno di potere decisionale e sono inclini a rispondere in maniera diversificata a quelle che sono le condizioni dell'ambiente esterno. Essi stessi influenzano l'ambiente in maniera differente a seconda delle proprie caratteristiche fisiche e comportamentali. In termini fisici, le leggi dei modelli microscopici regolano singolarmente il comportamento degli individui. Questa macrocategoria si suddivide a sua volta in approcci di vario tipo, tra i quali i più noti sono l'approccio *CellularAutomata*, quello *AgentBased*, quello ispirato alla teoria dei giochi e i così detti modelli *ForceBased* [1] [2].

La seconda tipologia, quella su cui si concentra lo studio presente per esigenze legate alle caratteristiche dei dati disponibili, è quella dei modelli macroscopici. I modelli macroscopici descrivono una folla come un tutt'uno caratterizzato da alcune fondamentali grandezze medie. In particolare, questi modelli fanno riferimento alle leggi della fluidodinamica e considerano un insieme di pedoni come un fluido incompressibile soggetto alla equazione di continuità

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \mathbf{f} = 0,$$

dove  $\rho$  rappresenta la densità,  $t$  il tempo e  $\mathbf{f} = \rho \mathbf{v}(\rho)$  il flusso medio, dato dal prodotto tra densità e velocità media. L'estensione dei concetti fluidodinamici di densità e velocità media è controversa nel caso dei modelli microscopici e numerosi sono i metodi adottati negli esperimenti degli ultimi anni [3] [4] [5]. Risulta invece immediato definire queste grandezze una volta considerata una folla come un mezzo fluidodinamico continuo occupante un'area definita.

In ogni caso, l'assunzione di questo modello è che la velocità media degli elementi che costituiscono una folla sia una funzione empiricamente ricavabile della densità. Si comprende allora che le informazioni più rilevanti per lo sviluppo di un modello macroscopico di dinamica pedonale siano racchiuse in quello che viene chiamato *Fundamental Diagram* (FD), vale a dire la curva che mostra l'andamento del flusso (o della velocità media dei pedoni) in funzione della densità. Una funzione di questo tipo può essere ricostruita in scenari differenti ma uno di particolare interesse è quello dei corridoi, aree allungate all'interno delle quali i pedoni formano flussi bidirezionali.

I corridoi rappresentano in generale uno scenario ad alto rischio di congestione. Si chiamano le curve che descrivono la dipendenza del flusso medio e della velocità media dalla densità in un corridoio *Bi-directional Fundamental Diagrams* (BFD).

### 3.2 Fundamental Diagrams

Il Fundamental Diagram per lo studio della dinamica pedonale viene presentato solitamente in due forme. La prima è quella di una relazione tra la velocità media della folla studiata e la densità di pedoni. La seconda descrive l'andamento del modulo del flusso medio  $f = \rho v$  al variare, di nuovo, della densità. Per quanto riguarda la prima forma del Fundamental Diagram, i risultati ad oggi trovati individuano un andamento ricorrente. Si mostra in Fig.1 un compendio dei risultati ottenuti da alcuni dei più importanti esperimenti e simulazioni svolti negli anni [6].

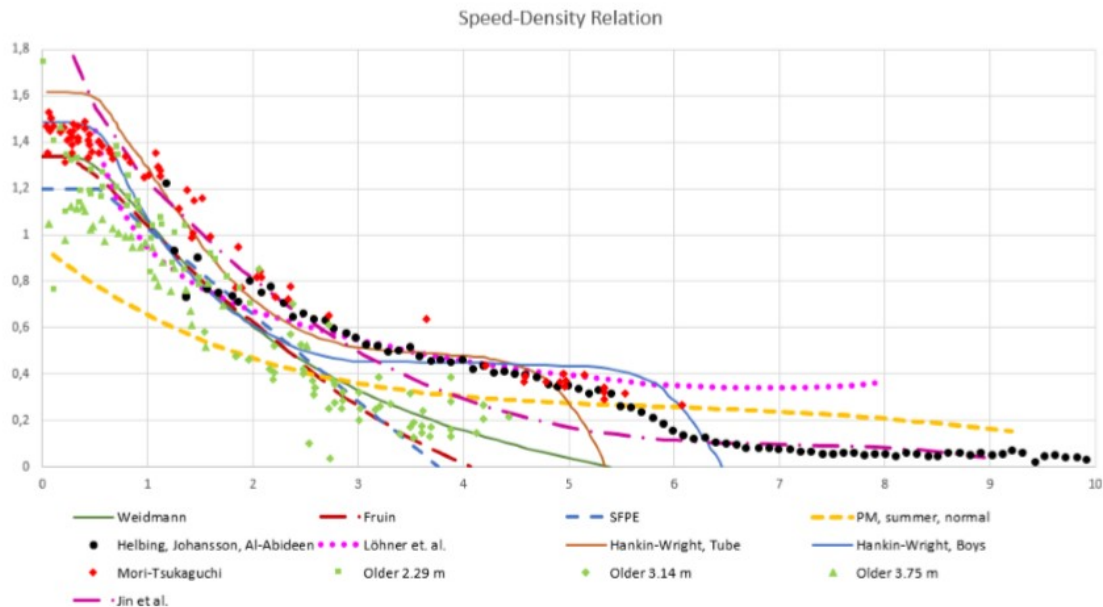


Figura 1: Relazione tra velocità e densità in alcuni esperimenti condotti tra il 1958 e il 2017. I valori in ordinata sono velocità con unità di misura  $m/s$ , i valori in ascissa densità con unità di misura  $1/m^2$ . [6]

Gli esperimenti riportati differiscono in maniera significativa per strumentazioni e livello di avanzamento della ricerca in materia. Basti pensare che la prima relazione velocità-densità ricavata è quella di Hanking e Wright [7], che condussero due diversi esperimenti nel 1958 (in arancione e in azzurro in Fig.1). Il primo coinvolse un gruppo di studenti incaricati di percorrere un anello circolare, il secondo consistette nell'analisi di dati relativi a una stazione metropolitana. Sorprendentemente, i risultati ottenuti furono molto simili nonostante la diversa composizione della folla e la diversa geometria dei luoghi. Si intuì potesse esistere una relazione universale, o comunque applicabile a una vasta gamma di scenari. Gli anni avrebbero confermato questa ipotesi. Il più recente esperimento riportato è quello di Cheng-Jie Jin, Rui Jiang, S.C. Wong, Dawei Li, Ning Guo e Wei Wang [8] (linea tratteggiata magenta

in Fig.1). Anche questo gruppo di studiosi scelse un anello circolare e analizzò per primo un flusso unidirezionale (tutti i partecipanti vennero fatti camminare nel medesimo verso, orario o antiorario), poi uno bidirezionale. Ancora una volta i risultati dei due esperimenti si discostarono di poco. Le curve graficate da Older (1968) [9] sono le ultime tra quelle riportate ottenute per un corridoio. In particolare, egli scelse tre corridoi di diversa larghezza (2.29 m, 3.14 m e 3.75 m, come riportato in Fig.1). Le altre curve sono frutto di esperimenti di diverso tipo e includono incroci, spazi aperti e spazi chiusi di varie tipologie.

Nel complesso, la velocità assume un valore detto *freespeed* compreso tra 0.91 m/s (Vitaly Predtechenskii and Anatolii Milinskii, indicati con PM) e 2.00 m/s (Cheng-Jie Jin, Rui Jiang, S.C. Wong, Dawei Li, Ning Guo e Wei Wang) per densità molto ridotte. Aumentando la densità la velocità decresce rapidamente fino al raggiungimento di un nuovo regime stazionario. Alle alte densità i comportamenti delle curve si diversificano, talvolta raggiungendo un valore di affollamento massimo in corrispondenza del quale la velocità diviene nulla. Si chiamano la densità in corrispondenza della quale la decrescita si arresta *densityatcapacity* e i corrispondenti velocità e flusso *speedatcapacity* e *capacityflow* rispettivamente. Si riportano in Tab.1 i valori dei parametri appena citati secondo i diversi esperimenti. La variazione maggiore riguarda la *densityatcapacity*, gli altri parametri sono più simili tra loro nei diversi casi.

	Capacity flow [1/(m · s)]	Density at capacity [1/m <sup>2</sup> ]	Speed at capacity [m/s]	Free speed [m/s]
Weidmann	1.22	1.75	0.7	1.34
Fruin	1.25	1.97	0.64	1.34
SFPE	1.32	1.9	0.69	1.20
PM	1.69	7.5	0.23	0.91
Helbing et al.	1.83	3.99	0.46	1.22
Lohner et al.	2.91	8.0	0.36	1.45
HW commuters	1.99	4.37	0.46	1.62
HW boys	2.28	5.38	0.42	1.49
MT	2.32	3.65	0.64	1.47
Older	1.31	2.51	0.52	
Jin et al.	1.63	2.13	0.77	2.00

Tabella 1: *Capacityflow*, *densityatcapacity*, *speedatcapacity* e *freespeed* caratteristici dei Fundamental Diagrams mostrati in Fig.1 e Fig.1). [6]

La seconda forma di Fundamental Diagram in uso nella trattazione della dinamica pedonale è quella di una relazione tra flusso e densità. Si mostrano in Fig.2 i FD di questa tipologia secondo gli stessi studi della Fig.1.

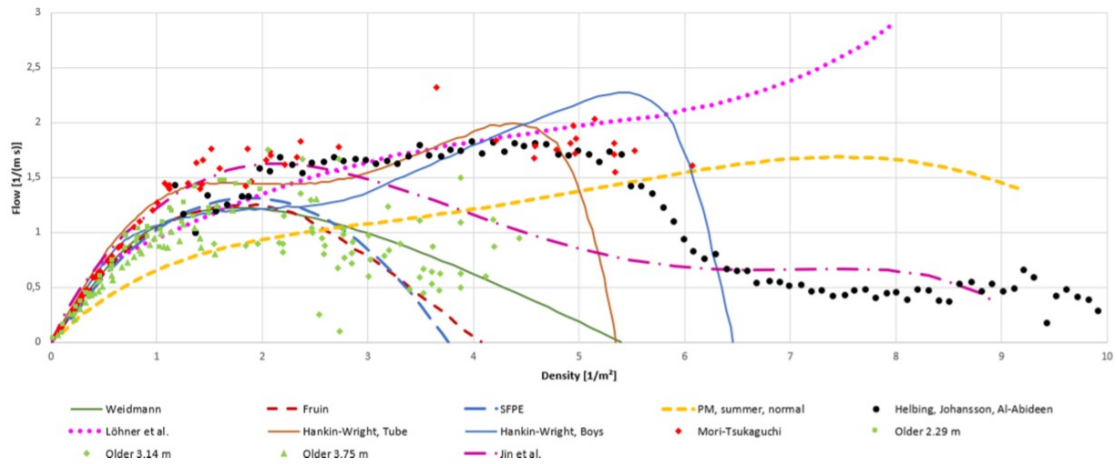


Figura 2: Relazione tra flusso medio e densità in alcuni esperimenti condotti tra il 1958 e il 2017. [6]

Le curve in Fig.2 si differenziano maggiormente rispetto a quelle viste in precedenza. È possibile riconoscere tre diverse categorie di FD. La prima, nella quale rientrano i FD di Weidmann, Fruin, SFPE e Older, presenta le seguenti caratteristiche:

- una densità massima  $\rho_{max} < 6/m^2$  in corrispondenza della quale la velocità è nulla;
- un flusso massimo  $f_{max} < 1.5/(m \cdot s)$ ;
- la curva pende in generale verso sinistra, e con ciò si intende che la *densityatcapacity* è inferiore alla metà della densità massima  $\rho_{max}$ ;
- non è presente alcun flesso e la derivata seconda  $d^2 f/d\rho^2 < 0$  per ogni valore della densità.

Una seconda categoria, cui appartengono i FD di Predtechenskii e Milinskii, Lohner e Hankin-Wright si presenta invece come segue:

- una densità massima superiore alle precedenti;
- valori alti del flusso massimo  $f_{max}$ , in alcuni casi vicini a  $3/(m \cdot s)$ ;
- la curva pende in generale verso destra, e con ciò si intende che la *densityatcapacity* è superiore alla metà della densità massima  $\rho_{max}$ ;
- sono presenti due punti di flesso e la derivata seconda cambia di segno.

All'ultima tipologia appartengono i FD di Helbing, Mori-Tsukaguchi e Jin-Jiang-Wong-Li-Guo-Wang. Le proprietà distintive sono:

- una densità massima  $\rho_{max} \approx 10/m^2$ ;



- flusso massimo  $f_{max} \approx 1.7/(m \cdot s)$ ;
- pendenza a sinistra, ossia la *densityatcapacity* è inferiore alla metà della densità massima  $\rho_{max}$ ;
- le curve presentano un massimo locale appena visibile a valori alti della densità e dunque successivo al massimo assoluto.

Nel complesso, le forme funzionali note per questa seconda tipologia di FD sono varie. In particolare è alle alte densità che le differenze tra le relazioni velocità-densità ricavate dagli studiosi citati hanno le maggiori ripercussioni sulle curve in Fig.2. Tra gli obiettivi di questa tesi vi è quello di ricostruire i Fundamental Diagrams per una delle località monitorate nella città di Venezia e collocarli nel panorama appena descritto.

## 4 Il progetto veneziano

### 4.1 Strumentazione e località di interesse

Il progetto a cui questa ricerca contribuisce mira a uno studio quanto più completo dei traffici pedonali che interessano il centro della città di Venezia. La strumentazione a disposizione è composta da sensori di rilevamento disposti in 33 distinte località (Fig.3) e capaci, riconoscendo oggetti le cui dimensioni e la cui altezza rispetto al suolo sono compatibili con quelle della testa di un pedone, di tracciare le traiettorie dei singoli passanti.

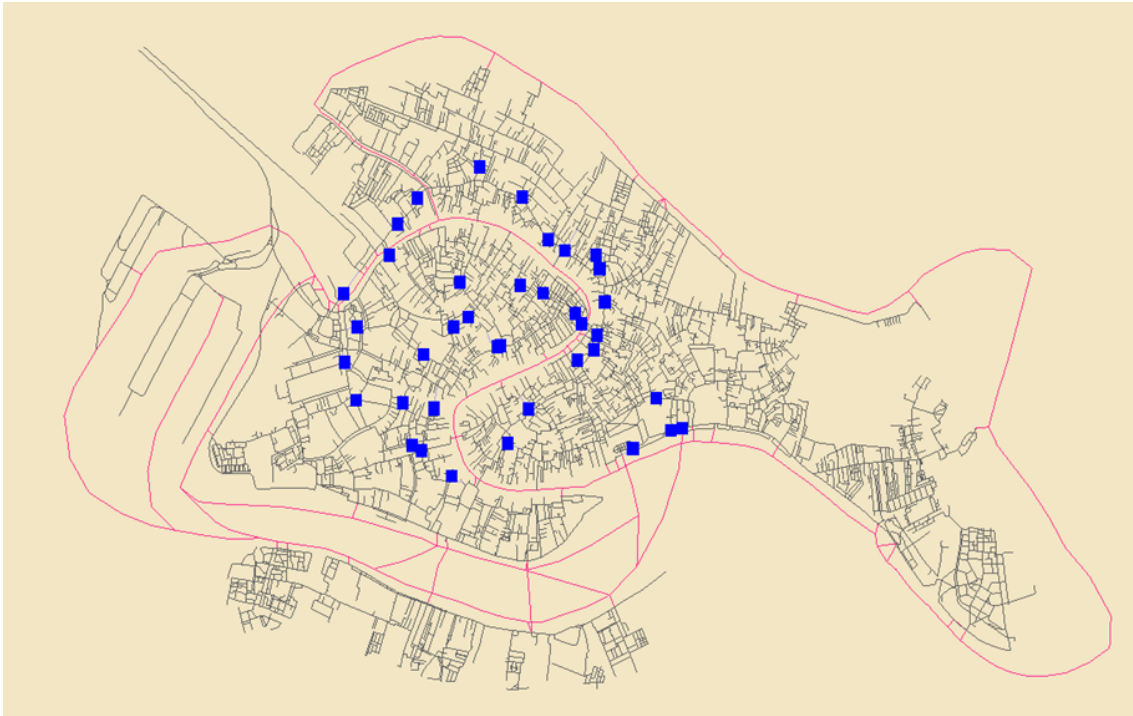


Figura 3: Mappa delle postazioni presso le quali i sensori di cui l'esperimento si serve sono localizzati.

I sensori appartengono, più nello specifico, alla linea *PC* dell'azienda *Xovis* (si mostra in Fig.4 un esempio). Il modello dei sensori in dotazione non è unico, il funzionamento è però comune e con esso le modalità di installazione: essi sono posizionati sugli edifici presenti nelle postazioni studiate a un'altezza compresa tra  $2.2m$  e  $6m$ . Il numero di sensori che monitorano ciascuna località dipende dalla geometria della stessa: un corridoio, e con ciò intendiamo una strada con traffico bidirezionale, richiede un numero di sensori inferiori rispetto a situazioni più complesse, quali incroci a tre o quattro ingressi.



Figura 4: Esempio di sensore appartenente alla linea PC della marca *Xovis*. Quello mostrato in figura, in particolare, è un sensore di modello PC2S.

Tre sono le diverse tipologie di dati numerici costruiti a partire dalle traiettorie individuate. La prima è un conteggio puro del numero di pedoni che attraversano un preciso segmento in due direzioni, etichettate come IN e OUT. Tali segmenti rappresentano tipicamente la trasversale a quella che ci si aspetta essere la direzione principale del moto dei pedoni. Ci si riferirà a questi segmenti col nome di *barriera*. Da questo primo dato si ottiene allora una stima del numero di persone che percorrono la strada considerata nelle due direzioni possibili, nel caso di un corridoio, e una stima del numero di persone che si immettono e che escono da un incrocio, quando questa è la situazione osservata. La risoluzione disponibile per i conteggi presso le barriere è di un dato IN e un dato OUT al minuto.

La seconda tipologia di dati disponibile è più complessa. Trattasi di otto distinte velocità  $v_k$  e otto distinti conteggi  $n_k$  attribuiti alle diverse direzioni spaziali (nord, nordest, est, sudest, sud, sudovest, ovest e nordovest). Quel che questi valori rappresentano è rispettivamente il modulo del campo di velocità ricostruito nelle singole direzioni a partire dalle traiettorie rilevate e il numero di pedoni che in un determinato intervallo temporale sono stati attribuiti alle direzioni del campo. Non si devono confondere i conteggi presso le barriere e gli ora citati conteggi nelle otto direzioni spaziali: questi ultimi rappresentano il numero stimato dei pedoni che hanno contribuito a un preciso campo di velocità e non un conteggio reale del numero dei passanti. Sarà materia di studio la correlazione e la consistenza di questi due diversi valori e in generale delle tre tipologie di dato disponibili. La risoluzione disponibile per velocità e conteggi nelle otto direzioni, a cui ci si riferirà complessivamente con l'appellativo di dati di flusso, è di 5 secondi. Questo significa che è su intervalli di 5 secondi che il campo di velocità è costruito a partire dalle traiettorie rilevate dai sensori.

L'ultima tipologia di dato, alla quale ci si riferirà col nome di dati di presenza, rappresenta il numero totale di pedoni attribuiti dal campo di velocità alle otto direzioni spaziali nell'intervallo di risoluzione  $\Delta t = 5sec$ . Questo dato rappresenta evidentemente un complemento ai dati di flusso utile per una verifica del corretto funzionamento dei sensori.

In generale, non è noto alcun tipo di errore associato ai dati. Per questo motivo risulta difficile fornire delle incertezze per le misure e le grandezze che si studieranno. Neppure è certa la correttezza dell'ordine di grandezza e dell'unità di misura delle

misure di velocità note. Si ritiene difatti che il calcolo della velocità da parte del software installato nei sensori possa risentire di errori di risoluzione dei pixel nel corso dell'elaborazione delle traiettorie registrate. Si discuterà in seguito di questo.

Si comprende che la mole complessiva di dati disponibili è ingente. Considerati gli otto campi di velocità e il numero variabile di barriere associate a ciascuna postazione, l'elenco delle misure acquisite conta 370 elementi. Le analisi che si discuteranno sono state eseguite per questo motivo principalmente sui dati relativi alla sola postazione del ponte della Maddalena. È chiaro che sia semplice estendere ad altre situazioni simili per geometria quanto si mostrerà. La schematizzazione applicabile al ponte della Maddalena è quella più semplice, vale a dire esso può essere descritto come un corridoio interessato da un flusso bidirezionale. Per questo motivo una barriera trasversale alla direzione di percorrenza del ponte è stata reputata sufficiente per lo studio dei suoi attraversamenti. Si mostra in Fig.5 una fotografia scattata dall'alto su cui è stata disegnata la barriera e in Fig.6 una streetview del ponte ottenuta da Google Maps.

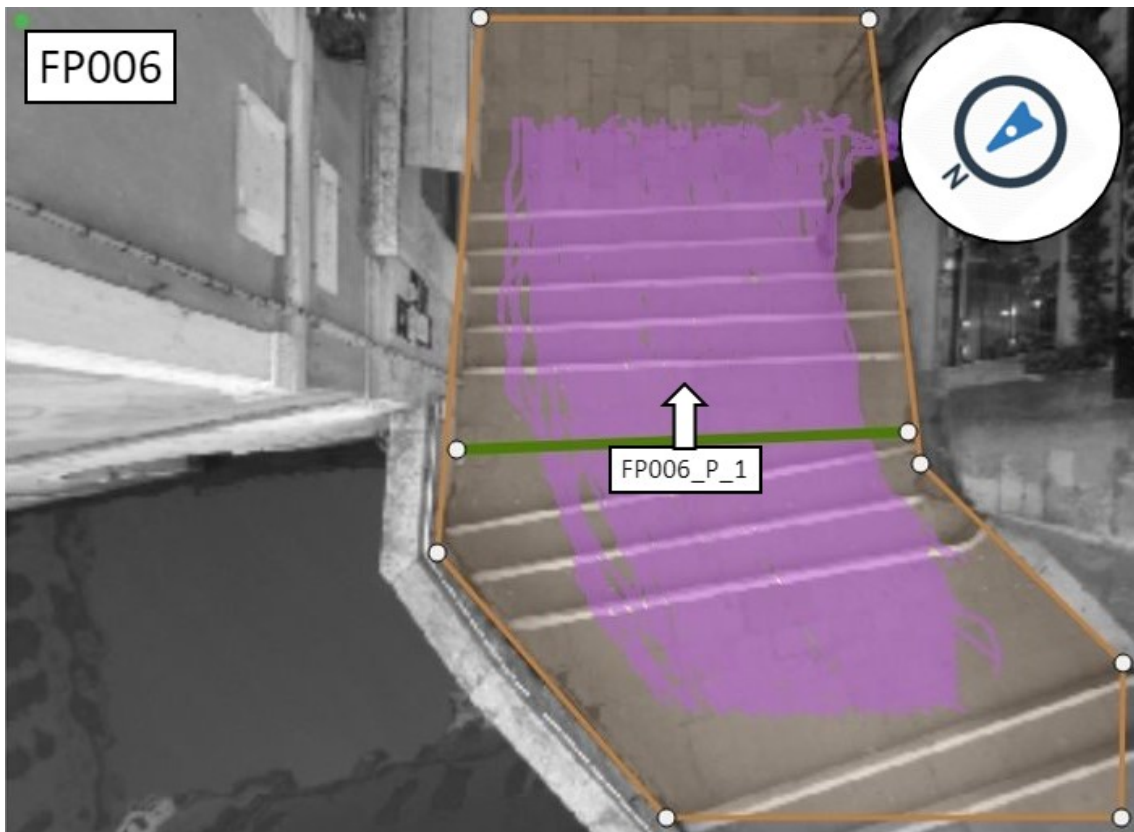


Figura 5: Fotografia dall'alto del Ponte della Maddalena (codice di riconoscimento attribuito FP006). Sono evidenziate con una spezzata arancione l'area osservata dai sensori e con un segmento verde la barriera presso la quale avviene il conteggio dei passanti nelle direzioni IN e OUT. La freccia indica la direzione IN, la direzione OUT è quella opposta. Nella parte destra dell'immagine è presente una bussola per il riconoscimento delle direzioni. Per ultimo, sono tratteggiate in viola alcune traiettorie esemplificative rilevate dai sensori.



Figura 6: Streetview del ponte della Maddalena, Google Maps.

L'area coperta dai sensori non corrisponde all'intera superficie del ponte e anzi si ritiene sia inferiore a quella indicata dalla spezzata arancione in Fig.5. Si è tentato di fornire una stima di tale area, che si considererà essere di  $3m$  di larghezza e poco oltre  $3m$  di lunghezza, per un totale di  $960dm^2$  approssimativamente. La stima del valore  $A \approx 960dm^2$  deriva dalla possibilità di variare il parametro corrispondente all'area in alcuni dei test eseguiti. I pedoni che percorrono il ponte in direzione SE saranno in discesa, quelli che si muovono in direzione NO in salita.

## 4.2 Database

I dati dei quali si sono sinora delineate le caratteristiche principali sono memorizzati in un due database gemelli, i cui nomi sono *release* (codice 10001) e *dev* (codice 1002). La prima operazione che si è deciso di svolgere è quella di una verifica della corretta acquisizione dei dati da parte dei due database. Si sono quindi esplorati file di dati provenienti dai distinti database con l'intento di riconoscere gli intervalli temporali durante i quali esistono dati leggibili e quelli durante i quali la disponibilità è nulla. Si sono graficati separatamente per i tre mesi di marzo, aprile e maggio i risultati ottenuti. L'esigenza di rappresentare tre diverse variabili ha portato alla scelta delle così dette *colormaps*, nelle quali al numero di dati disponibili per una singola postazione in una singola giornata è associata una gamma continua di colori. Il numero massimo di dati giornalieri è, nel caso dei conteggi presso una barriera, 1440 (un dato al minuto per 24 ore) mentre quello minimo è 0. Si riportano per brevità i soli plot relativi ai dati di conteggio presso una selezione di ventisette barriere (Fig.7, Fig.8, Fig.9, Fig.10, Fig.11). Non si mostra la colormap per il database *dev* nel mese di marzo, in quanto non è disponibile alcun dato.

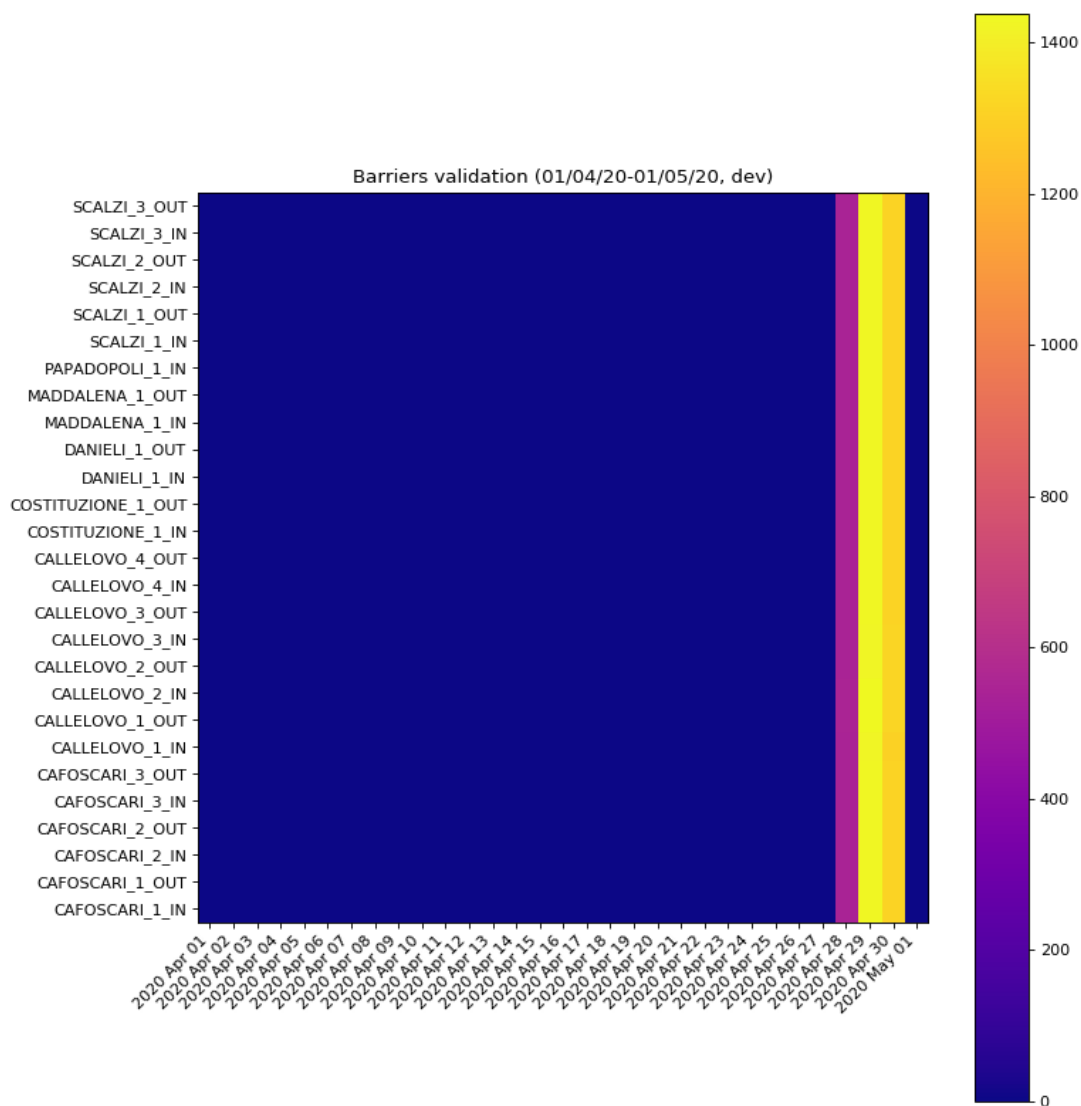


Figura 7: Dati disponibili nel mese di aprile per le ventisette barriere scelte, database *dev*. Al numero di dati disponibili per una singola postazione in una singola giornata è associata una gamma continua di colori. Il numero massimo di dati giornalieri è, nel caso dei conteggi presso una barriera, 1440 (un dato al minuto per 24 ore) mentre quello minimo è 0. Per il mese di aprile l'acquisizione di dati da parte del database è molto limitata: non sono presenti dati precedenti a martedì 28.

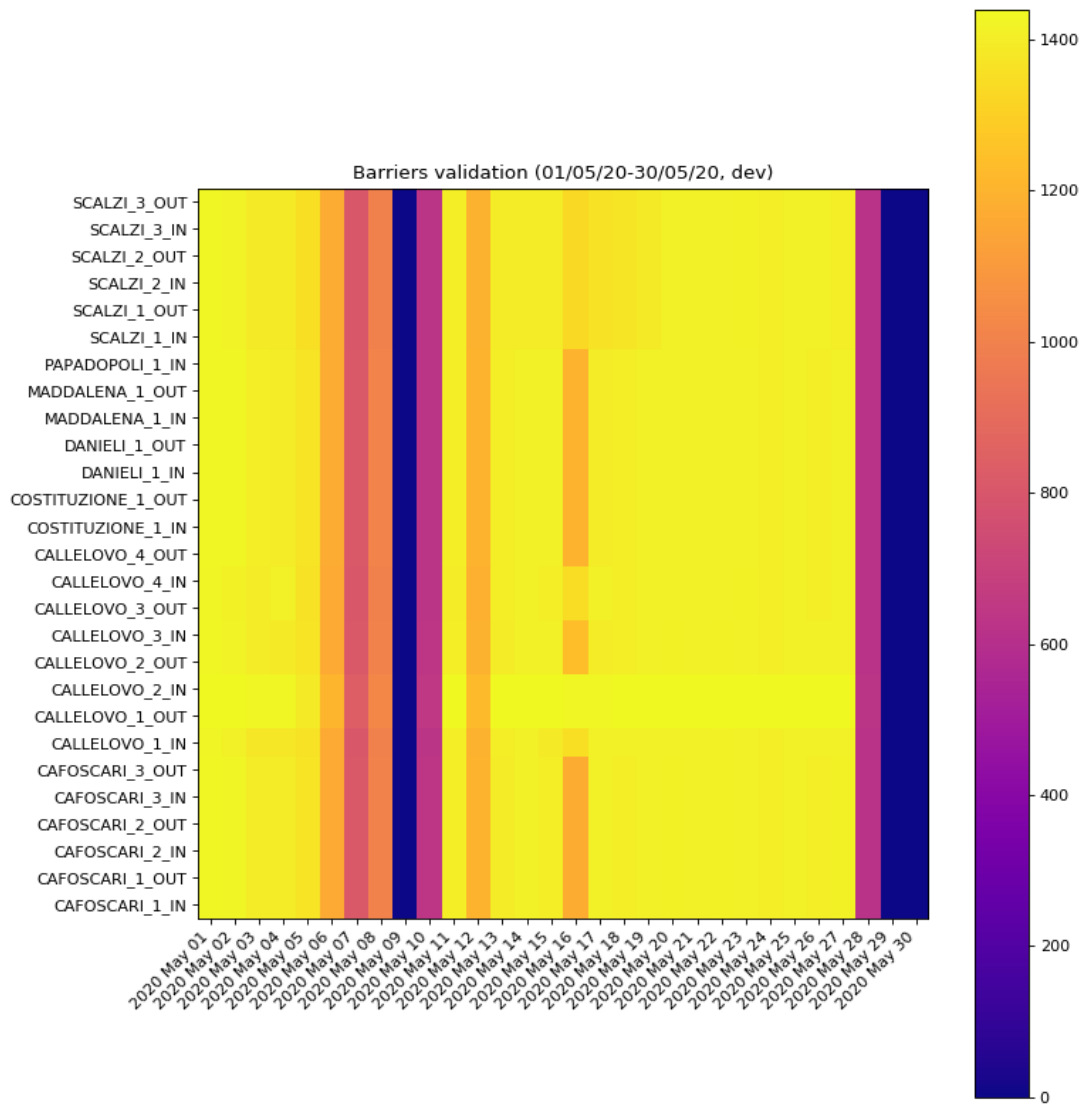


Figura 8: Dati disponibili nel mese di maggio per le ventisette barriere scelte, database *dev*. Il numero di dati disponibile è in questo caso consistente.



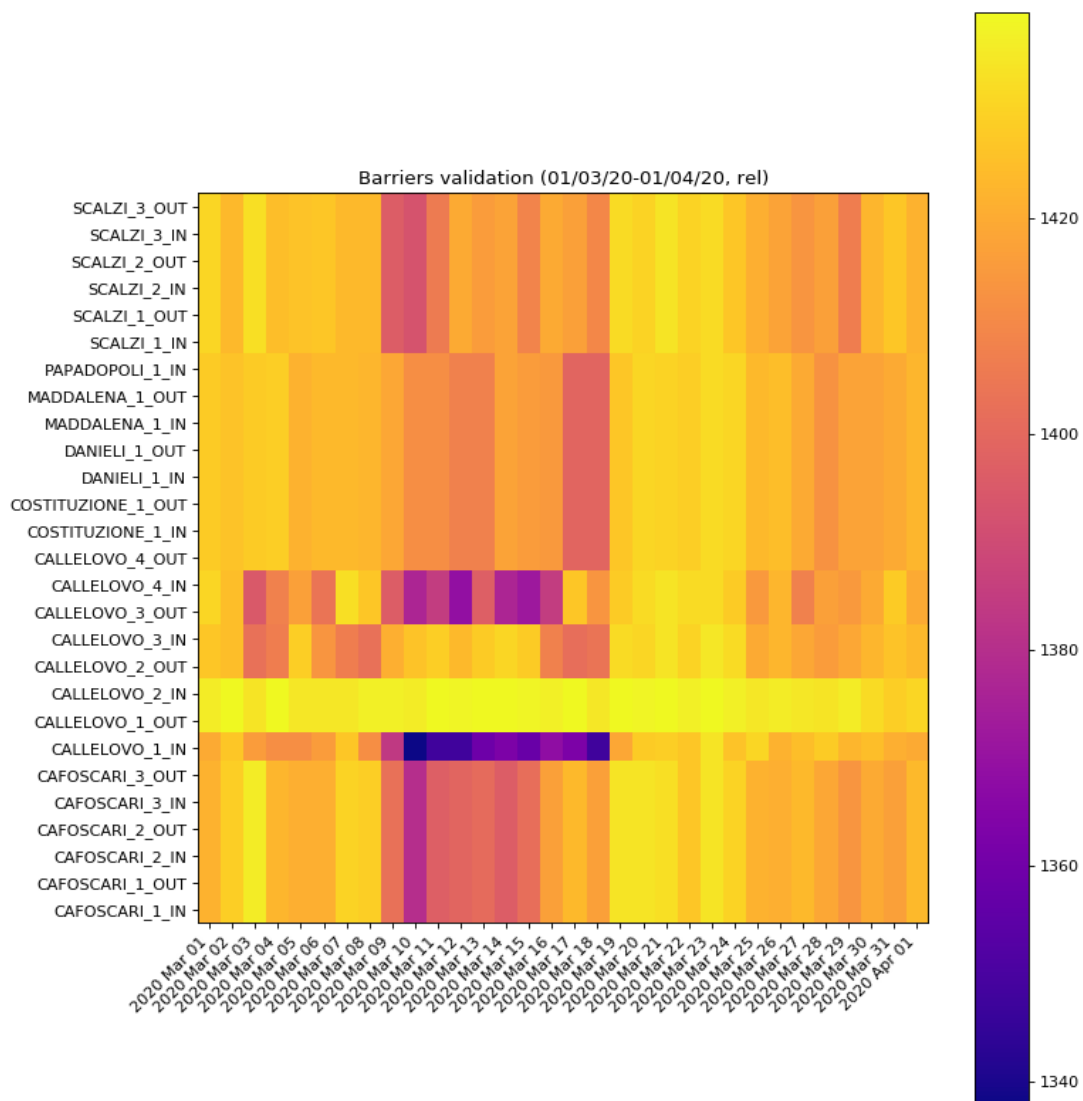


Figura 9: Dati disponibili nel mese di marzo per le ventisette barriere scelte, database *release*. Il database *release* non è vuoto in questo mese, a differenza del suo database gemello.



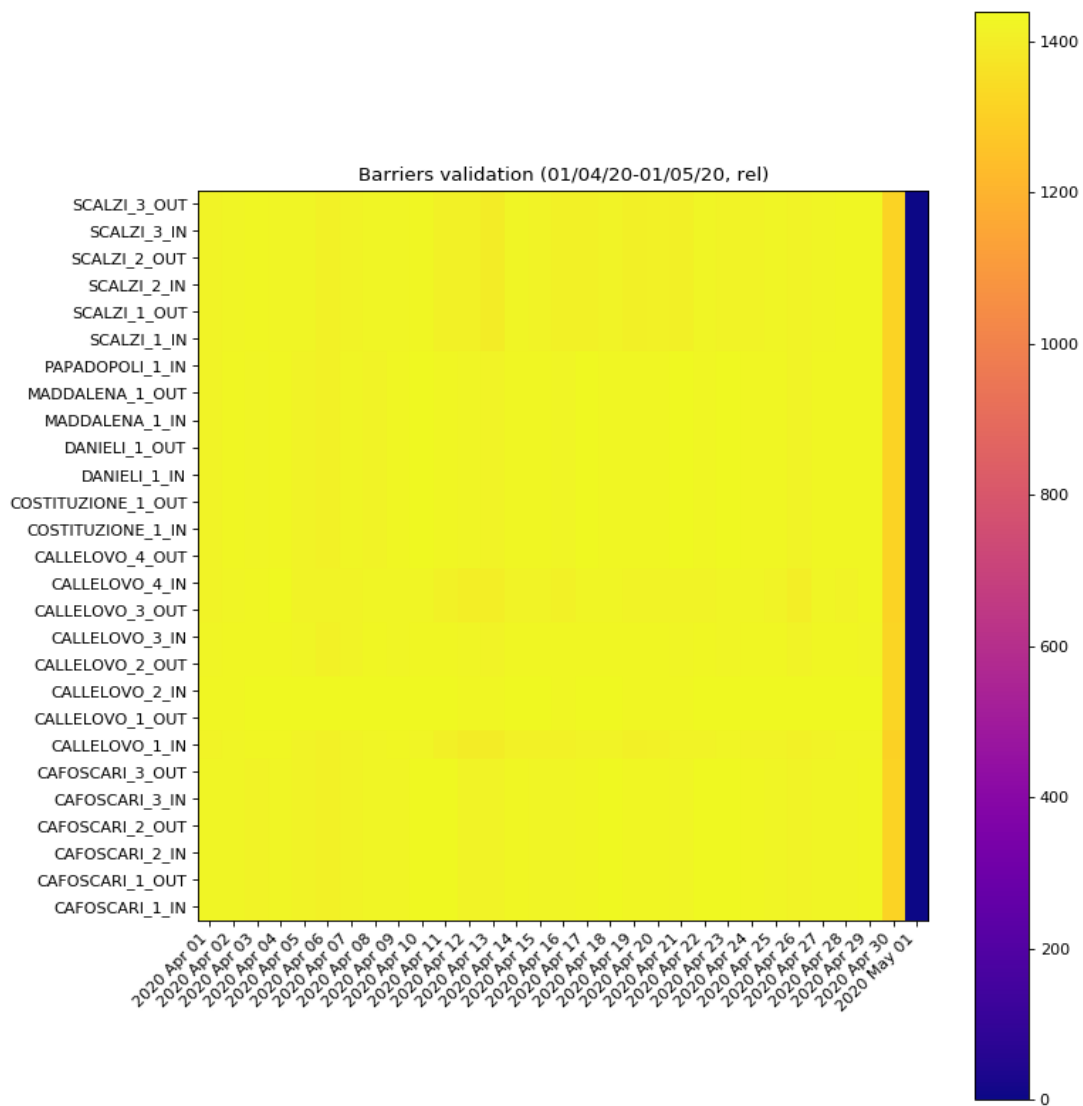


Figura 10: Dati disponibili nel mese di aprile per le ventisette barriere scelte, database *release*. Anche in questo caso la disponibilità è maggiore rispetto al database *dev*.

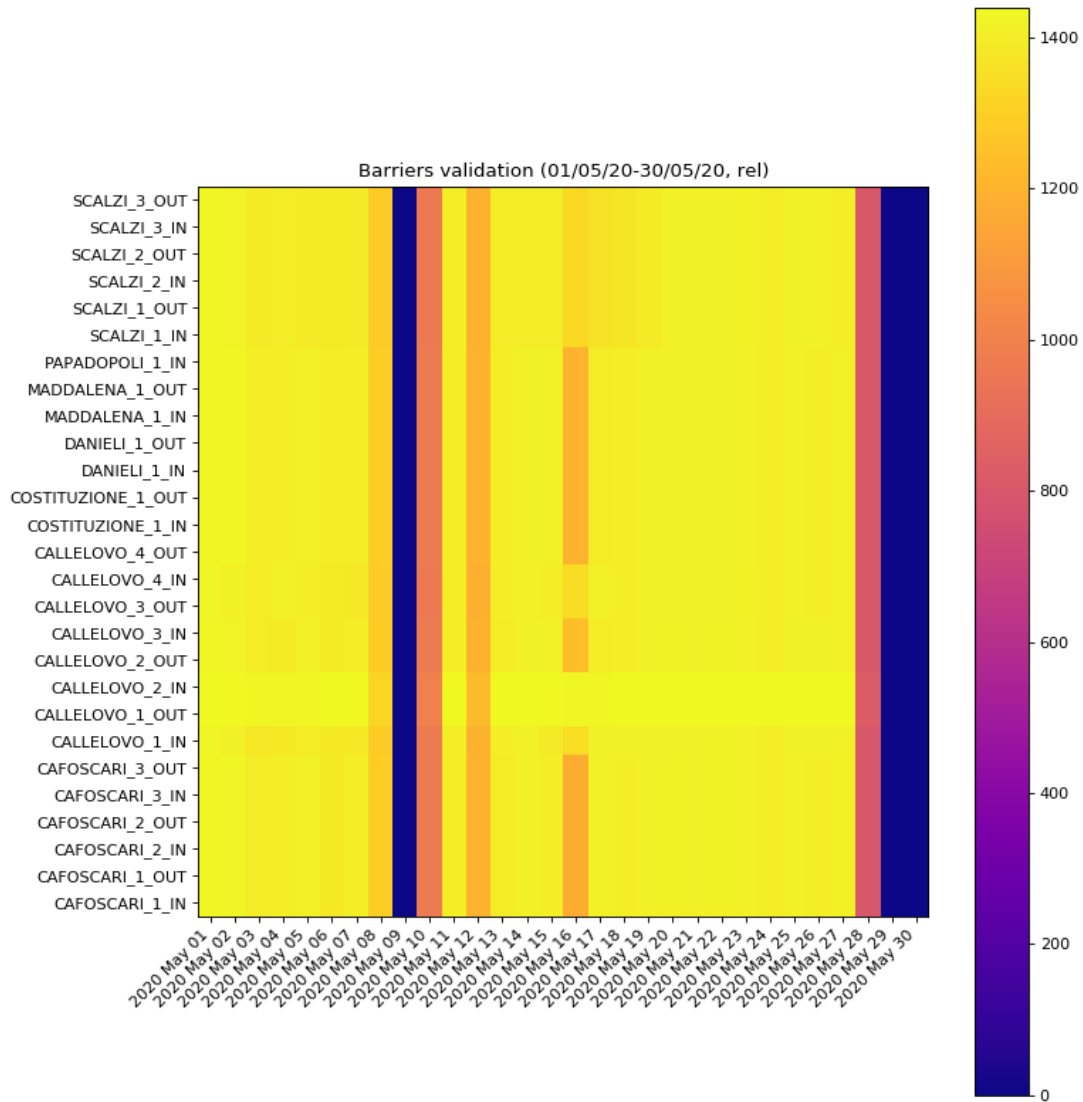


Figura 11: Dati disponibili nel mese di maggio per le ventisette barriere scelte, database *release*. L'acquisizione dei dati di conteggio nel mese di maggio è molto simile nei due database, come visibile da un confronto con la Fig.8.

È necessaria una precisazione riguardo i grafici appena mostrati. Essi conteggiano come dati acquisiti eventuali valori nulli dei conteggi presso le barriere. Per mancata acquisizione del dato si intende la situazione in cui nei file contenenti i dati siano presenti celle vuote, nelle quali non sia stato scritto alcun valore numerico. Chiarito questo fatto, si notano dai grafici alcune giornate del tutto prive di valori registrati e altre solo in parte carenti. I motivi non sono noti con certezza ma si può immaginare possano essere molteplici: i sensori possono essere stati spenti in alcune giornate per lavori di manutenzione; le condizioni metereologiche, un'interruzione di segnale o altro possono avere occasionalmente inficiato il funzionamento dei sensori; alcuni dati potrebbero essere stati elaborati ma non memorizzati nei database. Si riconoscono, inoltre, significative differenze tra i due database, gestiti evidentemente in maniera differente. In generale, tuttavia, i risultati mostrati da questi plot devono

essere considerati temporanei. I database *release* e *dev* da cui i dati che sono stati forniti a chi ha contribuito a questa ricerca provengono sono in continua evoluzione e non è da escludere che le lacune mostrate possano essere colmate in futuro. Le macro prodotte per il controllo della disponibilità dei dati potranno essere in ogni momento utilizzate per una verifica dei progressi dei due database.

La seconda operazione compiuta è quella di un test di compatibilità dei due database. Ci si chiede, nei casi in cui i dati di conteggi e flussi siano presenti in entrambi i database, se questi coincidono come atteso. La maniera più semplice per eseguire un test di questo genere è quella di graficare dati provenienti dai due database e relativi a giornate e postazioni qualsiasi. Si riporta a titolo esemplificativo un plot dei conteggi IN e OUT presso il Ponte della Maddalena nelle date di sabato 2 e domenica 3 maggio (Fig.12) in cui i conteggi sono stati cumulati su intervalli di un'ora. Non è questa l'unica risoluzione studiata ma ogni test ha condotto allo stesso risultato. La scelta di mostrare questo grafico è dettata dalla sua utilità per confronti futuri. È evidente la sovrapposizione delle due curve e dunque l'esatta corrispondenza dei dati provenienti dai due database, effettivamente gemelli. Si utilizzeranno d'ora in poi solamente i dati provenienti dal database *release*, più numerosi rispetto a quelli del database *dev*.

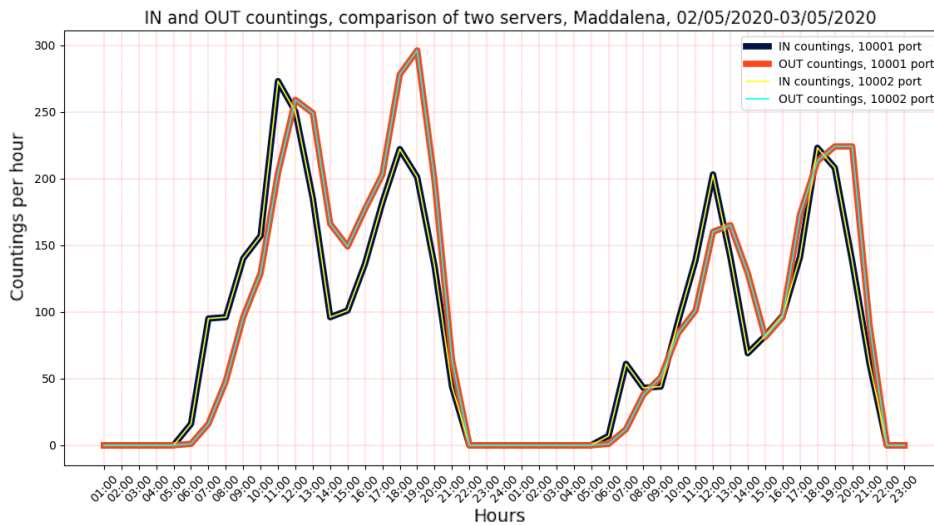


Figura 12: Confronto dei conteggi IN e OUT registrati dai due database presso la barriera del Ponte della Maddalena, 02/05/2020-03/05/2020. Le curve IN dei due database e quelle OUT coincidono: i due database sono gemelli.

### 4.3 Analisi preliminari per il collaudo dei sensori di flusso

Comprese le caratteristiche dei dati disponibili, verificata la disponibilità degli stessi e confrontati i due database si è proseguito eseguendo alcuni test di consistenza volti a testare il corretto funzionamento dei sensori di flusso. I dati di conteggio devono essere considerati corretti, in quanto già testati in un momento precedente all'inizio del lavoro che si discute. Le operazioni di collaudo riguarderanno dunque

i sensori di flusso e sfrutteranno la possibilità di un confronto con i conteggi presso le barriere.

Si è graficato inizialmente il numero cumulativo di pedoni che attraversano la barriera in un'ora nelle due direzioni nel corso di una giornata qualsiasi (Fig.13). L'intenzione di questa prima analisi è semplicemente quella di osservare gli andamenti qualitativi dei conteggi in una giornata di modo da inquadrare la situazione del traffico pedonale presso il ponte Maddalena e valutare se gli orari di massima attività sono quelli che ci si attenderebbe.

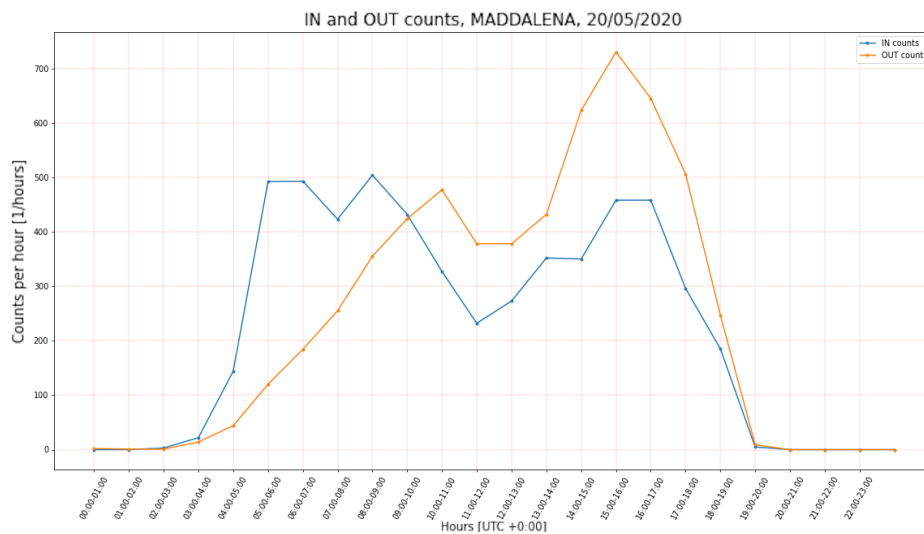


Figura 13: Conteggi IN e OUT cumulati su intervalli di un'ora, 20/05/2020. Il numero di conteggi all'ora è circa doppio rispetto alla Fig.12 a causa della ripresa delle attività successiva al decreto del 04/05/2020.

Una precisazione è necessaria per la comprensione del grafico in Fig.13 e di quelli che seguiranno. I sensori riportano i dati di conteggio e di flusso secondo il fuso orario UTC +0:00. Il fuso orario corretto per la città di Venezia è UTC +2:00 nel periodo compreso tra il 29 marzo e il 25 ottobre di ciascun anno, UTC +1:00 nel periodo restante. I grafici che si mostreranno sono riferiti al solo mese di maggio, motivo per cui si dovrà sempre considerare uno spostamento in avanti di due ore (ad esempio, l'orario indicato come 00:00 corrisponde in realtà alle 02:00). Per chiarezza, si indicherà su ogni grafico il fuso orario di riferimento. Nel corso della trattazione, invece, ove non indicato ci si riferirà al fuso orario italiano convenzionale.

La prima informazione interessante emerge da un confronto con il grafico in Fig.12. In generale, il numero di conteggi all'ora in data 20/05 è circa raddoppiato rispetto al 02/05. Il motivo è legato alla ripresa di alcune delle attività lavorative nelle quali i cittadini veneziani sono impegnati quotidianamente in seguito all'emanazione del decreto del 04/05, riguardante un'attenuazione delle misure di sicurezza adottate al fine di ridurre la diffusione del virus COVID-19. Quel che accomuna la Fig.12 e la Fig.13 è invece un andamento ragionevole dei conteggi nel corso della giornata. Il primo dato non nullo è registrato nella fascia oraria tra le 5:00 e le 6:00 e solo a partire dalle 6:00 il numero dei conteggi diviene consistente. Si può

immaginare che questi dati corrispondano ai primi lavoratori del mattino. I conteggi crescono, indicativamente, sino all'ora di pranzo per poi diminuire in corrispondenza della stessa. Passate le 14:00 si assiste a una nuova crescita dei conteggi che culmina in un picco nel tardo pomeriggio. Segue un'ultima rapida decrescita. Non deve stupire la totale assenza di conteggi a partire dalle ore 21:00: i sensori addetti al monitoraggio dei passaggi attraverso le barriere sono impostati di modo da non registrare dati negli orari serali. Il motivo riguarda probabilmente la scarsa affidabilità delle traiettorie rilevate in assenza o carenza di luce. Una scelta diversa è stata compiuta per i dati di flusso che, come si vedrà, vengono in ogni caso acquisiti e salvati nei database. Si notano poi alcune differenze tra i conteggi nelle due direzioni. La percorrenza in direzione IN è maggiore nel corso della mattina e quella in direzione OUT nel pomeriggio. Si può ipotizzare siano presenti attività di diversa attrattiva nelle vicinanze del ponte della Maddalena, così come è possibile che la diversa domanda di mobilità tra mattina e pomeriggio porti alla scelta di percorsi diversi tra i tanti possibili nella rete delle vie veneziane.

Si affronta ora una seconda analisi preliminare, riguardante in questo caso direttamente i dati di flusso. Si è realizzato un istogramma raffigurante il numero cumulativo di pedoni che il campo di velocità attribuisce alle otto direzioni spaziali in una giornata (Fig.14).

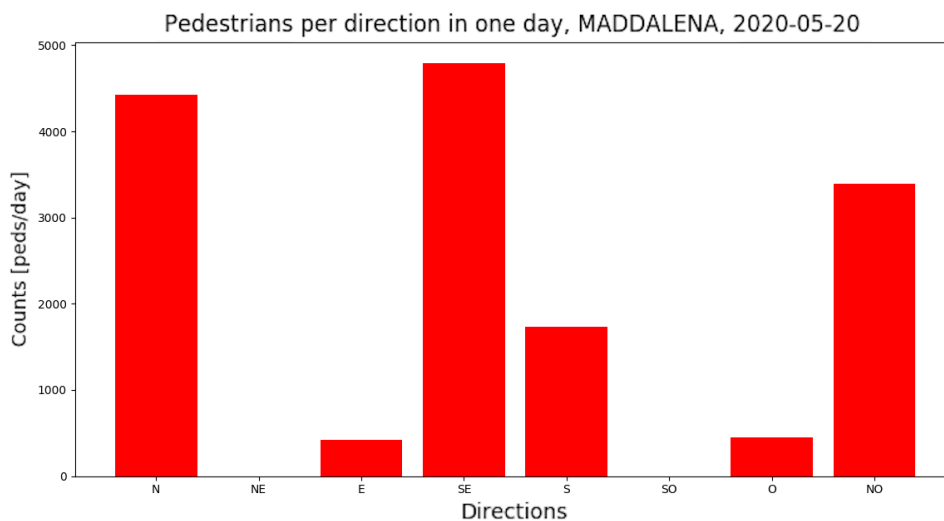


Figura 14: Numero di pedoni attribuiti alle otto direzioni spaziali nel corso di una giornata, 20/05/2020, ponte della Maddalena. Il grafico deve essere analizzato alla luce di quanto noto dalla Fig.5.

La figura riporta alcune importanti informazioni. Anzitutto, due delle otto direzioni, NE e SO, non presentano conteggi. Esse rappresentano approssimativamente le due direzioni perpendicolari alla direzione di percorrenza del ponte, come chiaro dalla Fig.5. Ancora, le direzioni E e O presentano un numero molto basso di conteggi. La questione è in questo caso più complessa: nonostante queste due direzioni possano sembrare plausibili per l'attraversamento di un generico segmento trasversale al ponte Maddalena, esse raramente risultano dal calcolo della direzione

del campo di velocità costruito dai sensori. Tale calcolo viene eseguito su di un intervallo temporale di 5 secondi, circa corrispondente al tempo di attraversamento del ponte, e rappresenta una misura media e non un valore istantaneo attribuibile a un pedone localizzato in un qualsiasi punto del ponte. Le direzioni dominanti che risultano da questo conto sono intermedie alle quattro non ancora citate: tra N e NO la prima e tra S e SE la seconda. Da un confronto qualitativo con la Fig.5 non emergono incongruenze.

La terza analisi preliminare eseguita consiste in una istogramma rappresentante il modulo medio della velocità nelle otto direzioni spaziali. Anche in questo caso la media è eseguita su una intera giornata (Fig.15).

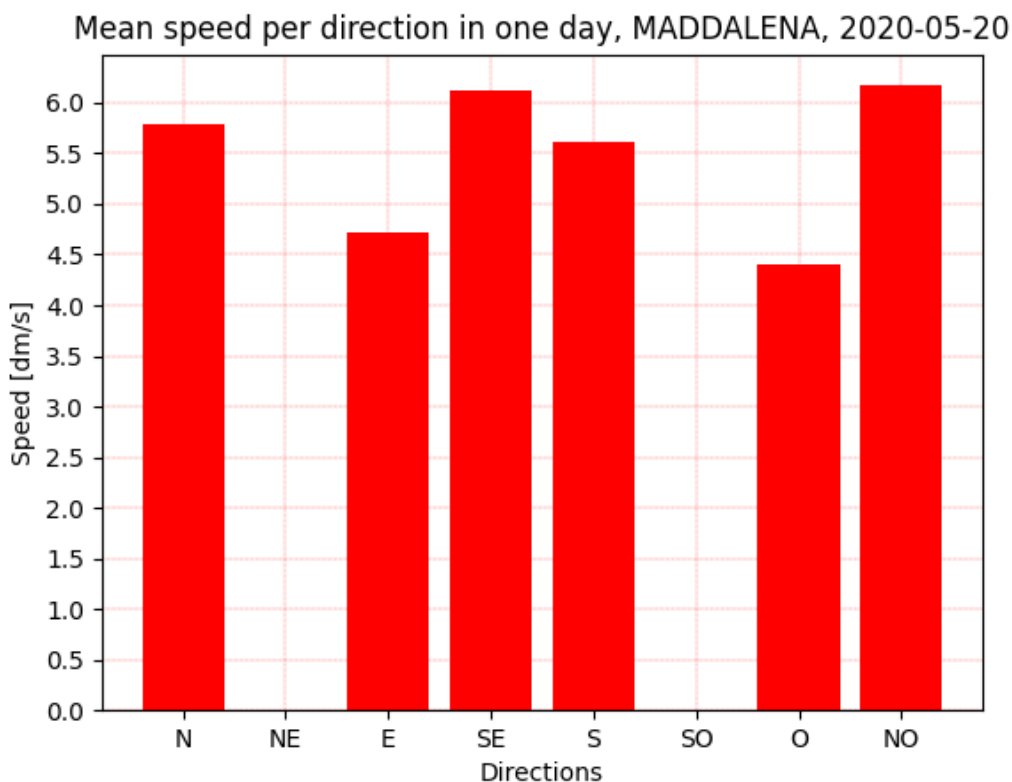


Figura 15: Modulo della velocità medio nelle otto direzioni spaziali nel corso di una giornata, 20/05/2020. L'unità di misura associata alle misure di velocità disponibili non è, come detto, del tutto attendibile. Si riporta tuttavia quella che è l'unità stimata,  $dm/s$ .

Non esistendo dati corrispondenti alle direzioni E e O, il modulo medio della velocità per queste due colonne è nullo. Negli altri casi si nota invece una maggiore velocità media quando i pedoni percorrono le direzioni individuate come principali, una di poco inferiore nelle altre direzioni. Si può ipotizzare che un pedone che si muove in direzione E e O (le due minoritarie) stia compiendo una deviazione rispetto al percorso ideale desiderato, con conseguente lieve rallentamento.

L'ultimo grafico che si propone in questa sezione rappresenta una prima modalità di confronto delle tre tipologie di dato disponibile. In Fig.16 sono mostrate tre

curve: quella blu rappresenta la somma dei conteggi IN e OUT cumulati su intervalli di 5 minuti; quella arancione la somma, ancora di 5 minuti in 5 minuti, dei dati di presenza complessiva nell'area del ponte ricostruiti dal campo di velocità; la curva verde deriva dalla somma dei conteggi attribuiti dal campo di velocità alle otto direzioni spaziali. Le due curve derivate dal campo di velocità si sovrappongono quasi totalmente, come atteso. I dati di conteggio, pur non corrispondendo esattamente, seguono lo stesso andamento. Non deve stupire il fatto che i risultati non siano esattamente combacianti: il grafico appena discusso è quello a risoluzione temporale più piccola tra quelli sinora mostrati. Se per intervalli temporali ampi le differenze di comportamento dei sensori sono meno visibili a causa di effetti di compensazione di diverso tipo, sul breve periodo alcune incongruenze non sembrano essere eliminabili. Si discuteranno a breve ulteriori evidenze.

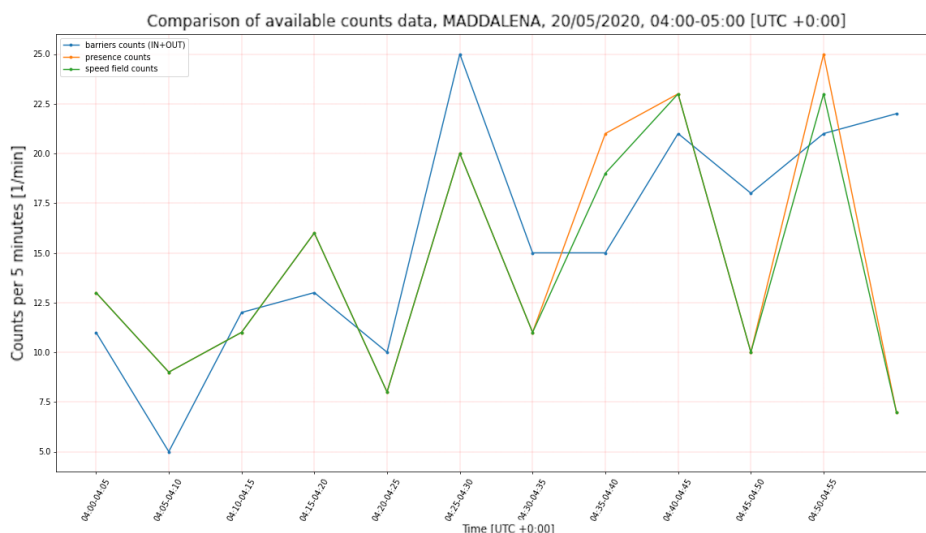


Figura 16: Confronto tra conteggi presso le barriere (IN+OUT), dati di presenza e pedoni attribuiti dal campo di velocità alle direzioni spaziali, 20/05/2020 04:00-05:00 UTC +0:00.

#### 4.4 Ricostruzione dei conteggi a partire dai dati di flusso

In questa sezione si svolgerà un ulteriore e più approfondito test di consistenza dei dati. Si cercherà, in particolare, di ricostruire i dati di conteggio attraverso la barriera del ponte Maddalena a partire dai dati di flusso. I dati di flusso, si ricorda, corrispondono alle componenti del campo di velocità  $v_k$  lungo le otto direzioni spaziali  $\hat{e}_k$  in un intervallo di tempo  $t \rightarrow t + \Delta t$  e al numero supposto di pedoni  $n_k$  che hanno contribuito al campo di velocità nelle singole direzioni in quello stesso intervallo.  $\Delta t = 5s$  rappresenta l'intervallo temporale di risoluzione dei dati. Siano poi  $A \approx 960dm^2$  l'area coperta dai sensori,  $l \approx 3m$  la lunghezza della barriera e  $\hat{v}_{IN}$  e  $\hat{v}_{OUT}$  i versori normali alla barriera nelle direzioni IN e OUT. Quali siano esattamente le direzioni normali può essere compreso dalla Fig.14. Le direzioni dell'ottante che maggiormente contribuiscono al flusso IN e OUT sono la S e SE e la N e NO rispettivamente. Si sono allora calcolati due vettori intermedi a tali coppie

per mezzo di una media che considerasse come pesi il numero di pedoni conteggiati per ciascuna. Il calcolo è stato ripetuto di volta in volta a seconda degli  $n_k$  registrati all'orario studiato. Ad esempio tra le 04:00 e le 05:00 UTC +0:00 del 20/05/2020, l'orario sul quale ci si soffermerà maggiormente, il versore  $\hat{v}_{IN}$  forma un angolo di  $144^\circ$  in senso orario con la direzione N e  $\hat{v}_{OUT}$  un angolo di  $332^\circ$  sempre rispetto a N.

Si procede allora al calcolo dei flussi nell'intervallo di tempo compreso tra  $t$  e  $t + \Delta t$  nel modo seguente:

$$\phi_{IN}(t) = \sum_{k=1}^8 \theta(v_k(t)\hat{e}_k \cdot \hat{v}_{IN})n_k(t),$$

$$\phi_{OUT}(t) = \sum_{k=1}^8 \theta(v_k(t)\hat{e}_k \cdot \hat{v}_{OUT})n_k(t).$$

La funzione  $\theta(x)$  è tale che  $\theta(x) = x$  se  $x \geq 0$  e  $\theta(x) = 0$  se  $x \leq 0$ . Essa permette di distinguere i contributi ai flussi nelle due direzioni a seconda del segno del prodotto scalare tra  $\hat{e}_k$  e la direzione scelta tra  $\hat{v}_{IN}$  e  $\hat{v}_{OUT}$ . Le grandezze ottenute rappresentano il flusso totale all'interno dell'area considerata nell'intervallo di tempo  $\Delta t$ . Il flussi veri e propri sono dati da  $\phi_{IN}(t)/A$  e  $\phi_{OUT}(t)/A$ . Noto il flusso, il numero di pedoni che attraversano la barriera nei due versi per unità di tempo  $\Delta t$  è dato da:

$$\Phi_{IN}(t) = \phi_{IN}(t) \frac{l}{A},$$

$$\Phi_{OUT}(t) = \phi_{OUT}(t) \frac{l}{A}.$$

Si ottiene a questo punto il numero di pedoni che attraversano la barriera in un generico intervallo temporale  $T$  come:

$$C(T)_{IN} \simeq \int_{t_i}^{t_i+T} \Phi_{IN}(t) dt = \sum_{j=1}^N \Phi_{IN}(t_i + j\Delta t) \Delta t,$$

$$C(T)_{OUT} \simeq \int_{t_i}^{t_i+T} \Phi_{OUT}(t) dt = \sum_{j=1}^N \Phi_{OUT}(t_i + j\Delta t) \Delta t,$$

dove  $N = T/\Delta t$ .

Si riportano in Fig.17 e Fig.18 i risultati ottenuti considerando intervalli temporali  $T$  pari a un'ora nella giornata del 20/05/2020. Si mostreranno poi risultati cumulati su intervalli minori.



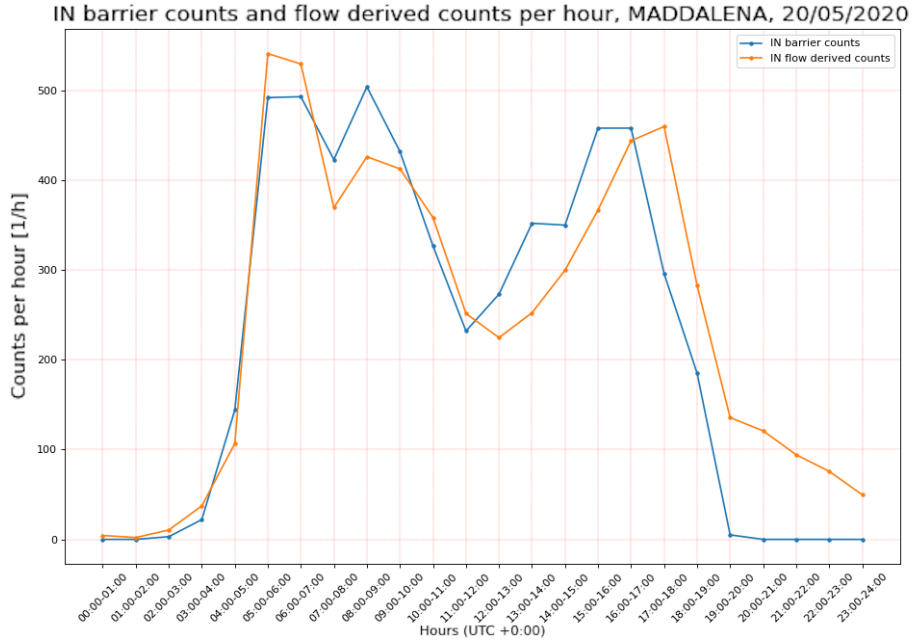


Figura 17: Confronto tra conteggi IN rilevati presso le barriere e conteggi IN ricostruiti secondo il procedimento illustrato. La giornata considerata è il 20/05/2020, l'intervallo temporale  $T$  sul quale i conteggi sono cumulati è di un'ora.

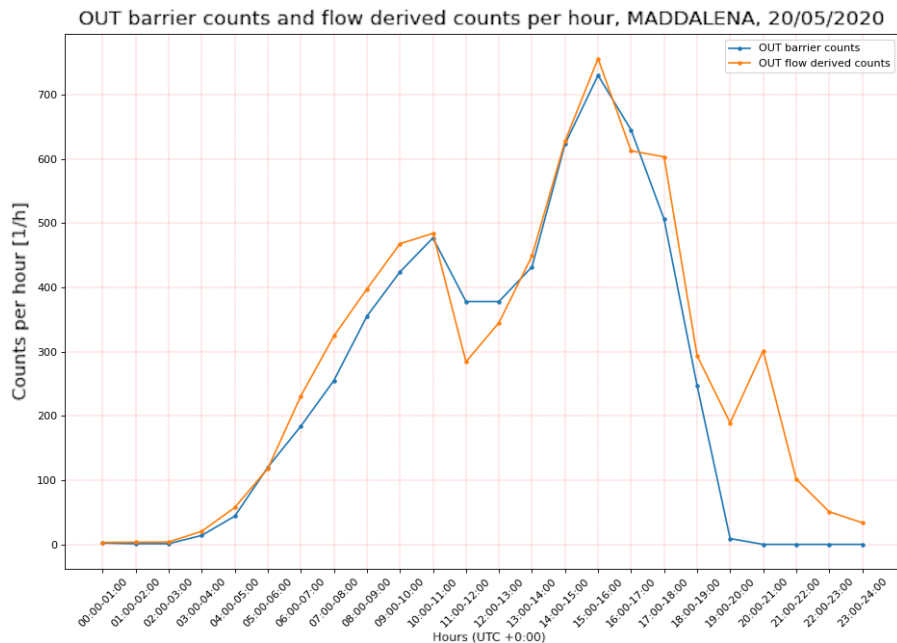


Figura 18: Confronto tra conteggi OUT rilevati presso le barriere e conteggi OUT ricostruiti secondo il procedimento illustrato. La giornata considerata è il 20/05/2020, l'intervallo temporale  $T$  sul quale i conteggi sono cumulati è di un'ora.

Da una analisi qualitativa delle quattro curve graficate i conteggi ricostruiti riproducono in maniera corretta i dati di attraversamento delle barriere, pur con alcune imprecisioni. In particolare, le curve OUT combaciano per alcune ore e divergono in maniera significativa passate le ore 20:00. La problematica è legata alle diverse impostazioni dei sensori in merito all'elaborazione dei dati di conteggio e di flusso nelle ore serali. Per le curve IN l'accordo è meno preciso pur somigliandosi i due andamenti. Si nota in particolare quello che sembra un ritardo nell'acquisizione dei dati di flusso rispetto a quelli delle barriere. Le incongruenze che già ora emergono non potranno che amplificarsi studiando intervalli temporali  $T$  più ristretti. Si riportano di seguito i grafici ottenuti scegliendo un intervallo  $T = 1min$  e considerando i 60 minuti compresi tra le 04:00 e le 05:00 UTC +0:00 del 20/05/2020 (Fig.19 e Fig.20). La scelta di questo orario, corrispondente alle 06:00-07:00 di mattina, è legata al desiderio di operare il confronto illustrato in una casistica in cui il numero di conteggi sia basso. Sarà così più semplice visualizzare le differenze e risalire alle loro cause. D'altra parte non insorgono problematiche legate all'assenza di luce, come visibile dai plot raffiguranti l'intera giornata.

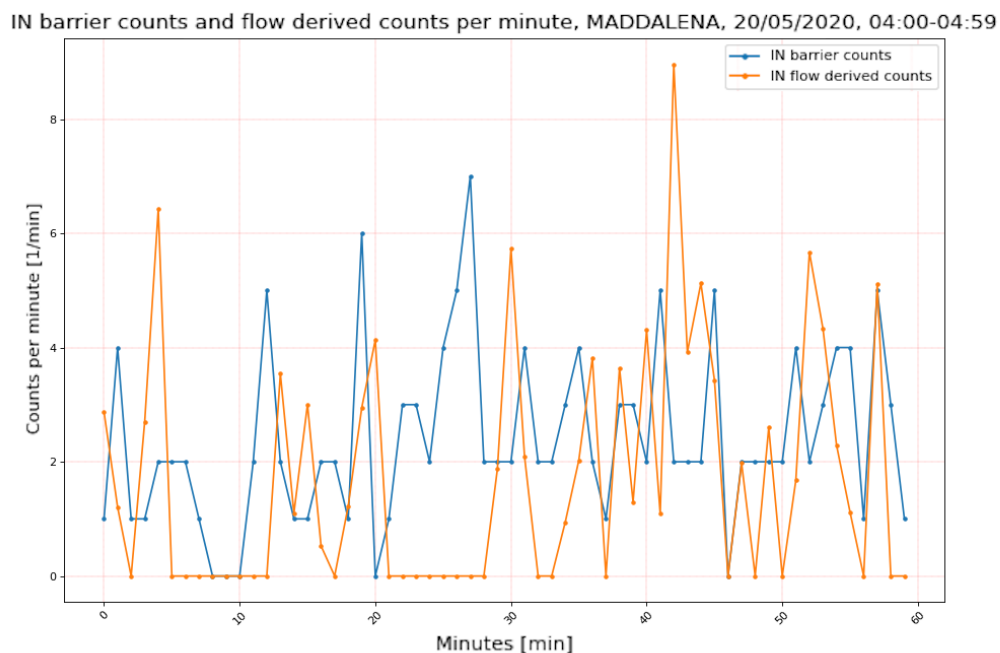


Figura 19: Confronto tra conteggi IN rilevati presso le barriere e conteggi IN ricostruiti secondo il procedimento illustrato. La giornata considerata è il 20/05/2020, la fascia oraria quella tra le 04:00 e le 05:00 UTC +0:00, l'intervallo temporale  $T$  sul quale i conteggi sono cumulati è di un minuto.

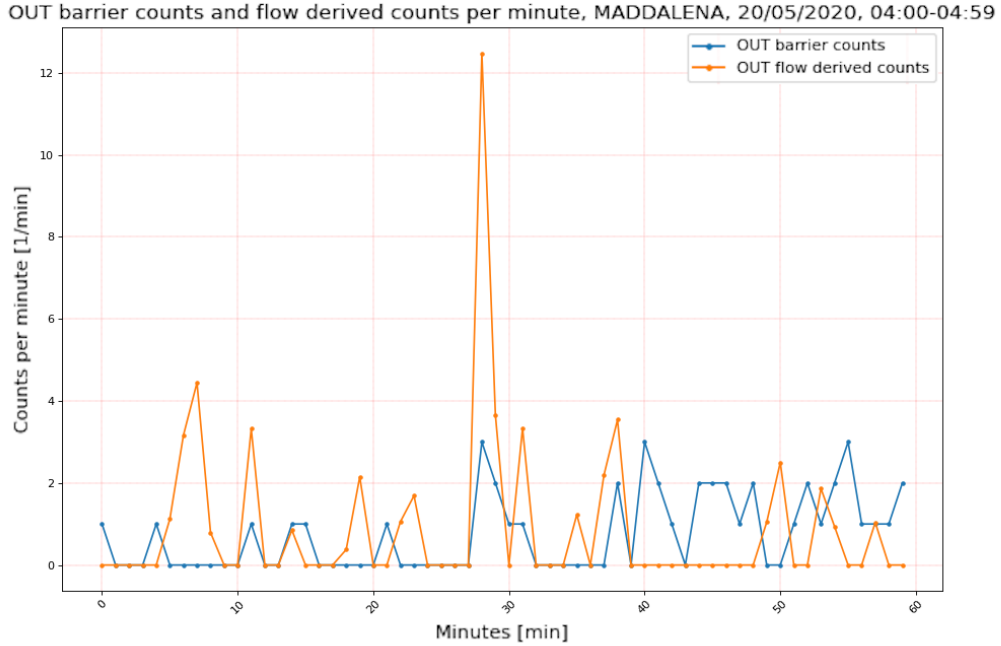


Figura 20: Confronto tra conteggi OUT rilevati presso le barriere e conteggi OUT ricostruiti secondo il procedimento illustrato. La giornata considerata è il 20/05/2020, la fascia oraria quella tra le 04:00 e le 05:00 UTC +0:00, l'intervallo temporale  $T$  sul quale i conteggi sono cumulati è di un minuto.

Le problematiche evidenziate da queste figure sono numerose. L'ordine di grandezza dei conteggi presso le barriere e quello dei conteggi ricostruiti sono gli stessi e questo giustifica la quasi sovrapposizione delle curve in Fig.19 e Fig.20. Le fluttuazioni sul breve periodo tuttavia non sembrano corrispondere in alcun modo. Le problematiche riscontrate non rappresentano un'eccezione, come confermato dai risultati ottenuti ripetendo il test per altre fasce orarie (Fig.21 e Fig.22). Le ipotesi avanzate per la comprensione del problema sono state diverse. Una prima problematica potrebbe essere legata all'individuazione delle direzioni contribuenti ai flussi IN e OUT. Ovvero, la stima delle direzioni IN e OUT potrebbe non essere corretta o la funzione  $\theta(v_k(t)\hat{e}_k \cdot \hat{v}_{IN(OUT)})$  potrebbe essere inadatta alla descrizione del problema. I versori  $\hat{v}_{IN(OUT)}$  rientrano tuttavia in uno stesso range considerando le distribuzioni degli  $n_k$  nelle otto direzioni spaziali a diversi orari e in diverse giornate. La scelta della funzione  $\theta(x)$  pare per i motivi già illustrati ragionevole. Si è allora deciso di analizzare più nel dettaglio un intervallo temporale ristretto che risultasse particolarmente critico, quello compreso tra le 04:20 e le 04:30 UTC +0:00. Da una lettura dei dati di flusso risultano pedoni sporadici dotati di velocità non nulla nell'intervallo 04:20-04:23. Nell'intervallo 04:24-04:28 non è presente alcun pedone. Tra le 04:29 e le 04:30 il flusso pedonale aumenta considerevolmente, producendo i picchi visibili in Fig.20 alle ore 04:29 e in Fig.19 alle ore 04:30. Per quanto riguarda invece i dati di attraversamento delle barriere, essi sono in generale non nulli (in particolare i conteggi IN sono considerevoli). Si comprende allora che i sensori di flusso presentano alcuni difetti di funzionamento non sistematici, ossia variabili, le-

gati al tempismo di scrittura del dato e, eventualmente, anche all'attribuzione della corretta direzione alla traiettoria dei pedoni. Se così fosse, il picco di conteggi OUT ricostruiti alle 04:29 potrebbe contenere i pedoni IN e OUT erroneamente non attribuiti ai minuti precedenti. Non solo: un ritardo di scrittura dell'ordine dei minuti risulterebbe visibile solo in minima parte su intervalli temporali più lunghi, come effettivamente accade. La Fig.16 mostra che i primi effetti di compensazione delle fluttuazioni incongruenti delle due tipologie di dato disponibile sono già visibili addizionando i conteggi su intervalli di 5 minuti. Quelle avanzate sono, in ogni caso, ipotesi non verificabili. L'importante risultato raggiunto è quello di aver riconosciuto un problema di acquisizione da parte dei sensori, visibile su intervalli temporali piccoli, e avere segnalato la problematica sfruttando il materiale di prova prodotto.

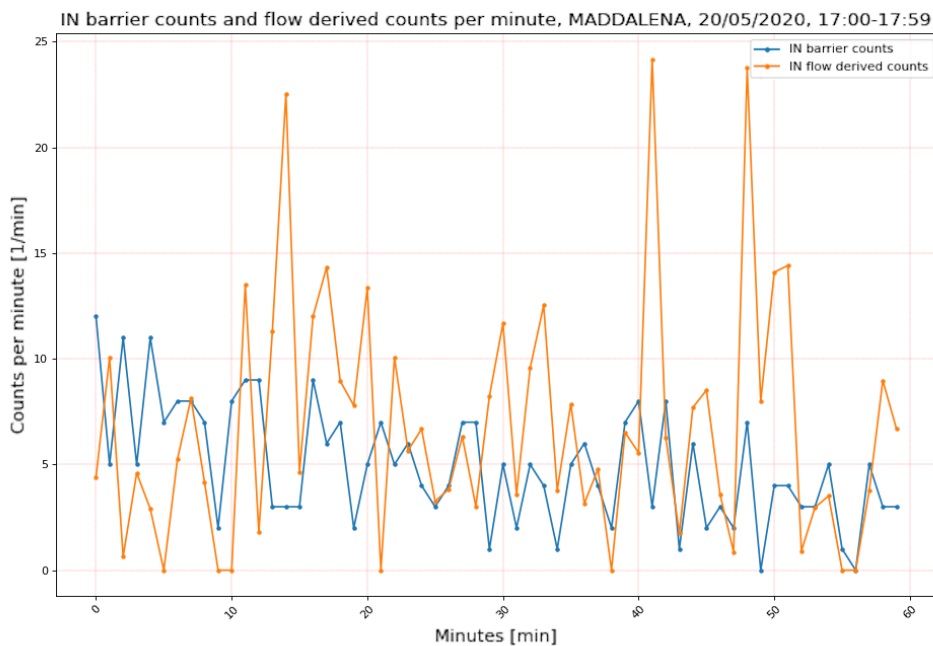


Figura 21: Confronto tra conteggi IN rilevati presso le barriere e conteggi IN ricostruiti secondo il procedimento illustrato. La giornata considerata è il 20/05/2020, la fascia oraria quella tra le 17:00 e le 18:00 UTC +0:00, l'intervallo temporale  $T$  sul quale i conteggi sono cumulati è di un minuto. Si nota in questo grafico un problema di sovrastima dei conteggi ricavati dai flussi rispetto a quelli delle barriere. L'effetto complessivo sull'ora di riferimento è visibile in Fig.17. Si può pensare che si sia verificato in questo caso un ritardo di trasmissione dei dati di flusso superiore a quelli precedenti.

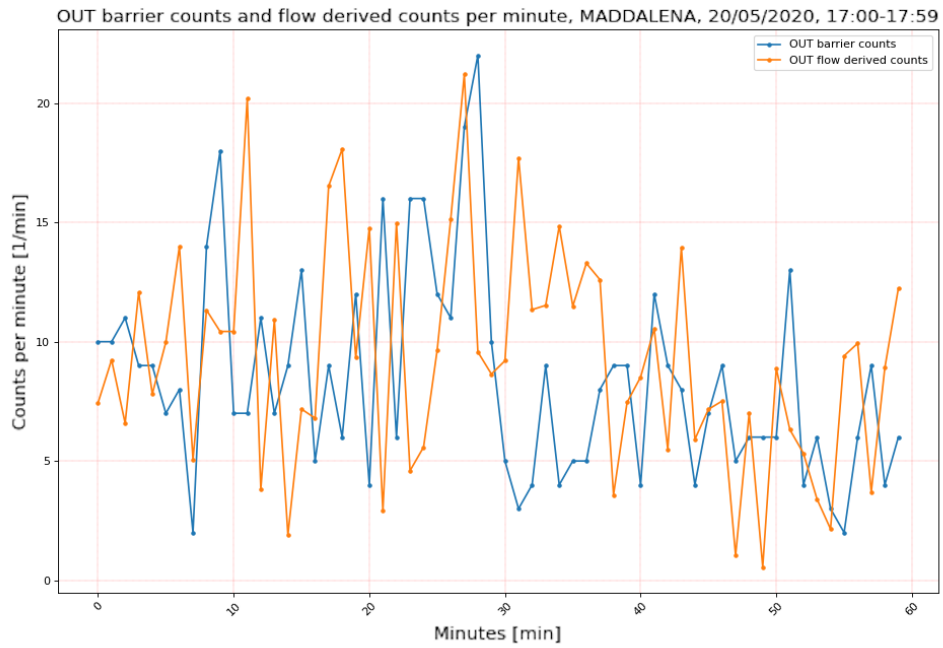


Figura 22: Confronto tra conteggi OUT rilevati presso le barriere e conteggi OUT ricostruiti secondo il procedimento illustrato. La giornata considerata è il 20/05/2020, la fascia oraria quella tra le 17:00 e le 18:00 UTC +0:00, l'intervallo temporale  $T$  sul quale i conteggi sono cumulati è di un minuto.

## 5 Analisi storica dei dati e Fundamental Diagrams

### 5.1 Analisi storica dei dati

Lo sviluppo di un modello predittivo, capace dunque di fornire una stima degli andamenti futuri di determinate grandezze nel breve o lungo periodo, non può prescindere da una attenta analisi dell'andamento passato delle grandezze in questione. Per questo motivo si è deciso di studiare gli andamenti medi dei flussi pedonali che interessano le postazioni che il progetto veneziano monitora al variare di alcuni parametri. Una prima macro di possibile utilità per il proseguire del progetto ha permesso di graficare l'andamento medio dei conteggi IN e OUT presso una barriera al passare delle ore (Fig.23). Otteniamo in questo modo la ricostruzione di una giornata tipo.

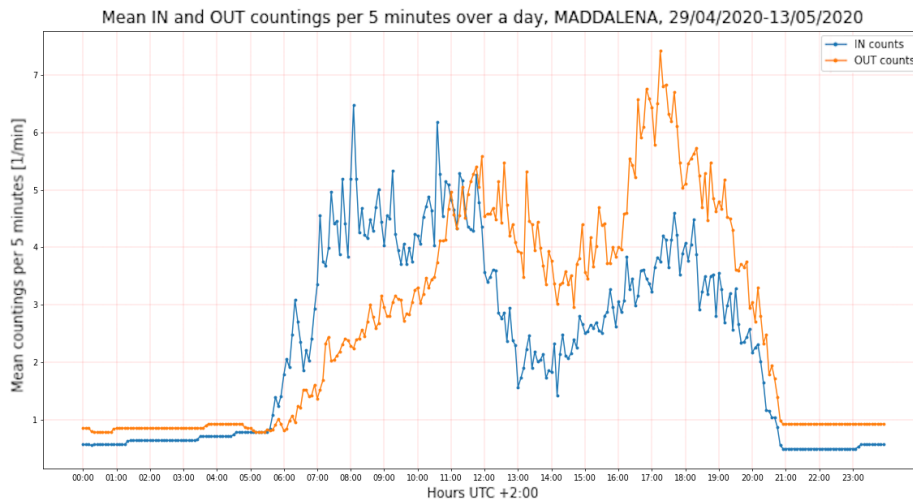


Figura 23: Andamento medio dei conteggi IN e OUT nel corso di una giornata. I punti del grafico corrispondono al numero cumulato su 5 minuti dei conteggi. Le deviazioni standard associate a ciascun punto, comprese in generale tra 0.5 e 2 conteggi, non sono riportate per agevolare la lettura del grafico. I valori sono stati calcolati a partire dai dati relativi alle due settimane comprese tra il 29/04 e il 13/05.

Le caratteristiche qualitative della curva media costruita non si scostano da quelle evidenziate in precedenza e l'andamento nel corso della giornata rientra nelle più ragionevoli previsioni. La deviazione standard associata a ciascun punto è compresa tra gli 0.5 e i 2 conteggi ogni 5 minuti. Una stima dell'incertezza associata alle misure mostrate risulta essere di fondamentale importanza nell'ottica dello sviluppo di un modello predittivo: è da tale incertezza che dipenderà l'affidabilità delle previsioni fornite dal modello.

Una più accurata analisi storica dei flussi pedonali nella città di Venezia non può tuttavia prescindere da alcune differenziazioni, prima tra tutte quella tra i diversi giorni della settimana. Si è allora prodotta una macro capace di ricavare per ciascuna delle postazioni i dati relativi all'andamento medio dei conteggi in funzione dell'ora

del giorno e del giorno della settimana. Ci si è serviti di una colormap per visualizzare queste informazioni. Si riportano lo storico dei conteggi IN e lo storico dei conteggi OUT per la postazione del ponte Maddalena in Fig.24 e Fig.25 rispettivamente.

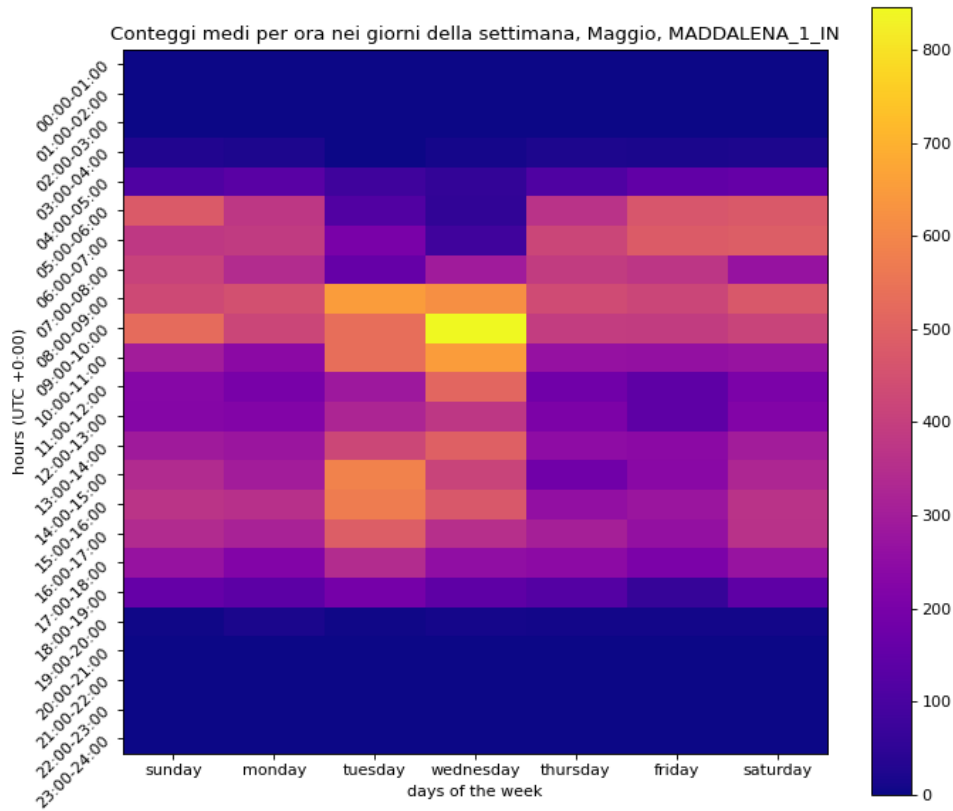


Figura 24: Numero medio di conteggi per ora nei diversi giorni della settimana, direzione IN di attraversamento della barriera. Il calcolo è stato eseguito considerando tutti i dati disponibili per il mese di maggio.

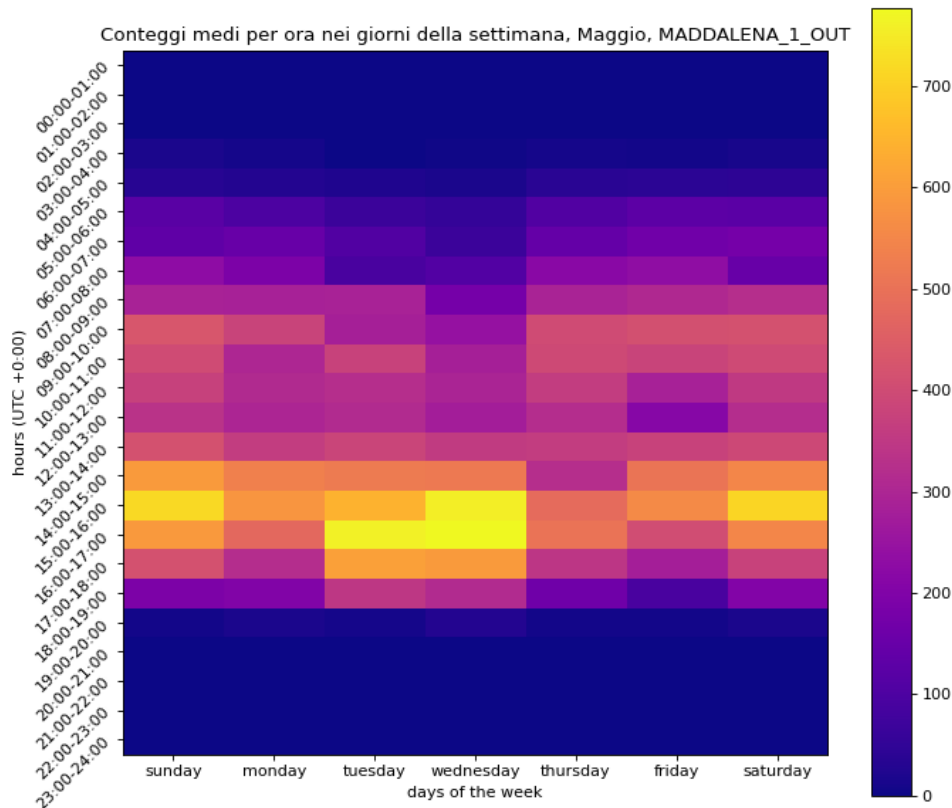


Figura 25: Numero medio di conteggi per ora nei diversi giorni della settimana, direzione OUT di attraversamento della barriera. Il calcolo è stato eseguito considerando tutti i dati disponibili per il mese di maggio.

Ancora una volta, i primi conteggi vengono registrati in entrambi i casi alle ore 06:00, gli ultimi alle 21:00. I flussi pedonali risentono di una ricaduta all'ora del pranzo e i valori più alti si registrano per i conteggi in direzione IN nel corso della mattinata e per quelli in direzione OUT nel pomeriggio, come già evidenziato. I giorni con maggiore traffico sono quelli centrali della settimana, il martedì e il mercoledì. La differenza è maggiormente visibile nel caso dei conteggi in direzione IN, che hanno valori molto bassi nel weekend. Il numero dei conteggi OUT è invece consistente anche nel weekend (quasi eguaglia il martedì e il mercoledì). In particolare, nella fascia oraria compresa tra le 18:00 e le 20:00 si notano di sabato e domenica un numero di conteggi OUT maggiore che nel resto della settimana, fatta esclusione per i due giorni che abbiamo individuato come quelli di massimo affollamento. Possiamo ipotizzare, considerata la tendenza di attraversamento OUT negli orari pomeridiani e serali nonché il numero elevato di conteggi nei giorni non lavorativi, la presenza di una zona di ristorazione o di uno o più bar in quella direzione oltre il ponte. Una ricerca su Google Maps ha confermato le previsioni fatte: un bar e un'osteria si tro-



vano subito attraversato il ponte. Non si esclude poi che un importante contributo ai dati analizzati sia dato da pedoni intenzionati a raggiungere mete più lontane, che è tuttavia difficile individuare.

Quale sarà l'utilizzo delle informazioni ricavate dall'analisi storica svolta ancora non è noto. Si fornisce tuttavia ora un primo spunto per un semplice modello predittivo che si basi soltanto sulle curve medie mostrate. Noti in tempo reale i dati relativi alle ultime ore (l'intervallo di tempo non è in realtà vincolante, potrebbe essere più piccolo, solo si deve tenere conto delle ripercussioni che questa scelta ha sulla precisione della previsione) è possibile fornire una stima di quelli futuri riscalando la curva media. Si intende, si individua la curva media corrispondente alla situazione studiata, ovvero si scelgono il corretto giorno della settimana e la corretta fascia oraria. Si moltiplicano poi i valori di conteggio medi per un fattore  $\lambda$  di modo da ottenere una curva coincidente entro gli errori con quella relativa alle ultime ore. I valori riscalati successivi all'ultimo orario disponibile, l'istante presente per chi sta producendo la stima di andamento futuro, rappresentano la previsione cercata. Trattasi, certamente, di un metodo elementare. La sua semplicità e rapidità potrebbero tuttavia renderlo un buono strumento per una prima stima dell'ordine di grandezza dei flussi pedonali nel breve periodo.

## 5.2 Fundamental Diagrams per il ponte Maddalena

Le più importanti informazioni utili allo sviluppo di un modello macroscopico per lo studio della dinamica dei pedoni sono racchiuse, come visto, in quello che si è soliti chiamare Fundamental Diagram. In particolare, da uno studio dell'andamento della velocità media e del flusso medio generato dai pedoni che occupano un'area in funzione della densità di occupazione della stessa è possibile distinguere regimi di diverso tipo e densità critiche. Nel caso presente si è deciso di graficare per primo il modulo medio della velocità dei pedoni che percorrono il ponte in funzione del numero di pedoni simultaneamente presenti sul ponte. Il modulo medio della velocità  $v_M$  nell'intervallo di tempo  $t \rightarrow t + \Delta t$  con  $\Delta t = 5s$  intervallo di risoluzione minima dei dati di flusso si calcola come:

$$v_M(t) = \frac{\sum_{k=1}^8 v_k(t) n_k(t)}{\sum_{k=1}^8 n_k(t)}$$

con  $v_k$  velocità nella direzione spaziale  $\hat{e}_k$  e  $n_k$  relativi conteggi. La necessità di una media pesata è legata al fatto che, nel caso in cui per la direzione  $\hat{e}_k$  si abbia  $n_k > 1$ ,  $v_k$  rappresenta già un valore medio. Moltiplicando tale valore per  $n_k$  si attribuisce questa stessa velocità agli  $n_k$  pedoni che si muovono in direzione  $\hat{e}_k$ . Si noti la scelta di utilizzare come conteggi quelli nelle otto direzioni riportati nei file di flusso: sarebbe incoerente operare diversamente, data la provata incongruenza su intervalli temporali ridotti dei dati presso le barriere e dei dati di flusso. Per quanto riguarda invece il numero di pedoni che simultaneamente si trovano sul ponte, si è stimato che il tempo di attraversamento dello stesso sia dell'ordine di grandezza della risoluzione minima dei dati, cioè 5s. Si tratta in realtà di un tempo variabile con la velocità dei pedoni. Nei casi in cui esso risulta inferiore a 5s, tuttavia, la risoluzione del dato non permetterebbe miglie. Quando poi a causa di un

rallentamento il tempo di percorrenza dovesse essere compreso tra i 5 e i 10 secondi, la risoluzione del dato imporrebbe la scelta di uno di questi due valori discreti. Per evitare di introdurre discontinuità nella curva che si mostrerà, si è deciso di mantenere costante il tempo di percorrenza e dunque il tempo durante il quale i pedoni registrati vengono considerati come simultaneamente presenti sul ponte. Come ultima precisazione, si è ritenuto non necessario dividere il numero di pedoni per il valore costante  $A \approx 960dm^2$  di modo da ottenere dimensionalmente una densità. Si mostra in Fig.26 il risultato ottenuto.

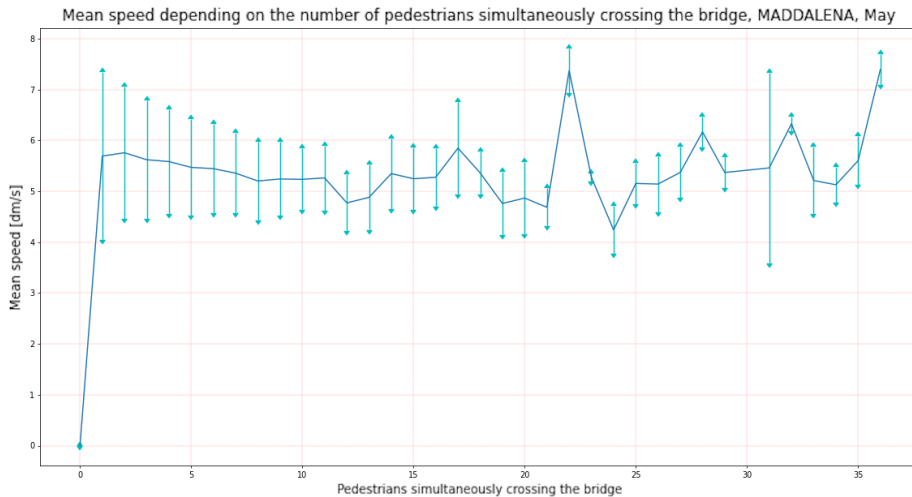


Figura 26: Modulo medio della velocità in funzione del numero di pedoni simultaneamente presenti sul ponte Maddalena. L’ordinata di ciascun punto rappresenta una media dei valori  $v_M$  relativi a intervalli temporali in cui il numero di pedoni presenti sul ponte corrisponda all’ascissa del punto. Resta non nota con certezza l’unità di misura delle velocità, che si stima tuttavia essere  $dm/s$ , come indicato. Si riporta in azzurro la deviazione standard associata a ciascun valore della velocità. Il campione utilizzato è quello dei dati del mese di maggio.

L’ordinata di ciascun punto visibile nel grafico rappresenta una media dei valori  $v_M$  relativi a intervalli temporali in cui il numero  $N$  di pedoni presenti sul ponte corrisponda all’ascissa del punto. Le occorrenze per valori di  $N$  superiori agli ultimi riportati in figura sono ridotte, si è dunque deciso di non riportare i relativi punti.

Il risultato riportato dai sensori è, nel complesso, anomalo rispetto a quelli mostrati in Fig.1. Il modulo medio della velocità ha un valore costante per densità basse, compreso tra  $0.5m/s$  e  $0.6m/s$ . Si è analizzata in particolare la distribuzione delle velocità nel caso  $N = 1$  (Fig.27). Risulta una distribuzione non gaussiana caratterizzata da due distinti picchi, uno inferiore a  $1dm/s$  e uno dell’ordine dei  $7dm/s$ . Si può ipotizzare che il secondo picco corrisponda all’effettivo valore maggiormente ricorrente della velocità dei pedoni che percorrono il ponte e il primo sia dovuto a individui che sostano sul ponte o che compiono piccoli spostamenti rilevabili dalle telecamere. I valori più alti, rari ma presenti sino a un massimo di  $29dm/s$ , devono essere riferiti a corridori.

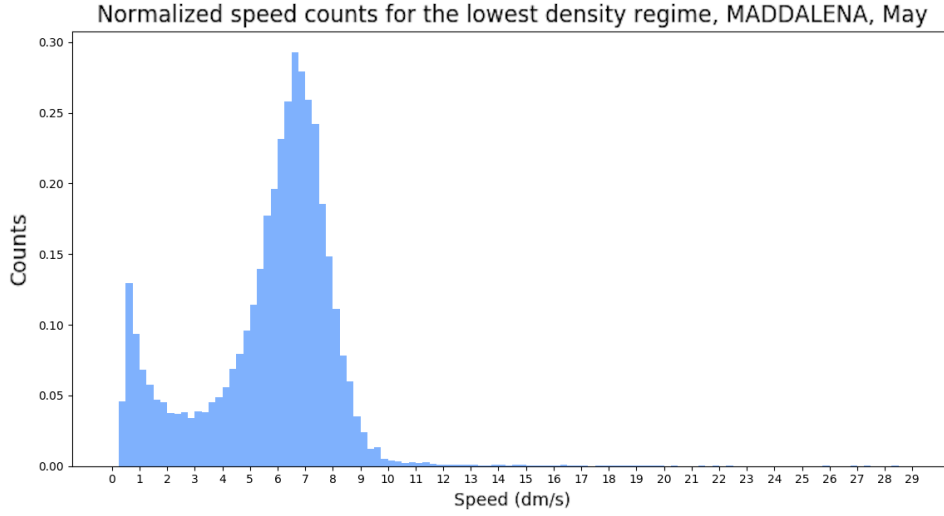


Figura 27: Occorrenze normalizzate a 1 dei valori di velocità per il regime di minima densità, quello corrispondente a un solo pedone presente sul ponte. La distribuzione è non gaussiana e presenta due distinti picchi. Il secondo descrive probabilmente la più frequente velocità dei pedoni che attraversano il ponte, il primo picco è dovuto a coloro che sostano su di esso o compiono spostamenti minimi.

Tornando al confronto con la letteratura, la *freespeed* più bassa tra quelle riportate in Tab.1 è quella registrata da Older, pari a  $0.91m/s$  e dunque maggiore di quella ottenuta per il ponte Maddalena anche eliminando il contributo dei pedoni fermi. È probabile allora che i dubbi riguardo la corretta unità di misura della velocità nei dati di flusso siano giustificati. Successivamente, non si osserva una decrescita netta della velocità media di percorrenza all'aumentare del numero di pedoni presenti sul ponte. Tutte le curve mostrate in Fig.1 hanno una prima decrescita per un valore della densità pari al più a  $\rho_{dec} = 1/m^2$ . Una densità di questo tipo corrisponde nel caso del ponte della Maddalena a un numero di pedoni  $N_{dec} \approx \rho_{dec}A \approx 10$ . Per quanto riguarda invece la *densityatcapacity*, il valore massimo tra quelli riportati in Tab.1 è quello di Lohner, pari a  $\rho_{capacity} = 8.0/m^2$ . Il numero di pedoni corrispondente per il ponte della Maddalena è  $N_{capacity} \approx \rho A \approx 80$ . È allora possibile che neppure in corrispondenza del numero di pedoni massimo graficato il ponte raggiunga il proprio limite capacitivo.

Risulta difficile spiegare i risultati. Potrebbe essere errata la stima del tempo di percorrenza del ponte, anche a causa del fatto che l'unità di misura per le velocità è probabilmente non corretta. Se si ipotizzasse una *freespeed* superiore rispetto a quella ottenuta, dell'ordine  $v \sim 10dm/s$ , concorde con i valori noti in letteratura, il tempo di percorrenza del ponte sarebbe pari a  $t \sim l/v \simeq 3sec$ , con  $l$  lunghezza del ponte Maddalena. Non è possibile, data la risoluzione minima dei dati di flusso di  $\Delta t = 5sec$ , ripetere il test considerando questo tempo di percorrenza. Resta il fatto che nella casistica in cui il numero di pedoni che attraversano il ponte in un intervallo di  $5sec$  è superiore a 20, restringendo a un intervallo di  $3sec$  in media oltre 10 di questi individui devono ancora essere considerati come simultaneamente presenti sul ponte. Eppure, nemmeno per  $N \geq 20$  si osserva in Fig.1 una decrescita

della velocità. Non è da escludere l'ipotesi di scarsa affidabilità dei sensori, viste anche le anomalie già riscontrate.

Si propone ora il FD presso il ponte della Maddalena nella sua seconda forma. Si grafica, al variare del numero N di pedoni simultaneamente presenti sul ponte, il prodotto tra il modulo medio della velocità nelle otto direzioni e N. La grandezza in ordinata non rappresenta propriamente un flusso: essa è ricavata per estensione della definizione  $\phi = \rho v(\rho)$  con  $v(\rho)$  velocità media della folla studiata. Si è sostituita la densità con il numero di pedoni N presenti nell'area di rilevamento di modo da evitare di inserire l'incertezza dovuta alla stima dell'area. Si riporta in Fig.28 il risultato ottenuto.

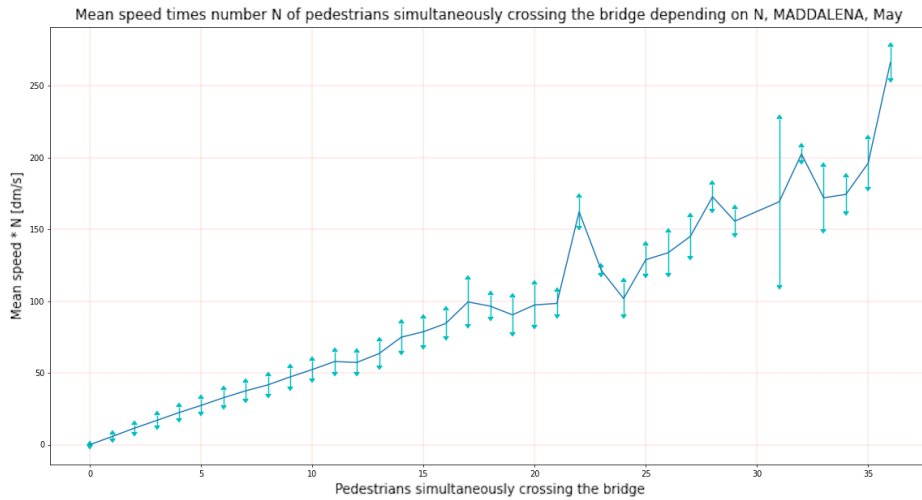


Figura 28: Modulo medio della velocità moltiplicato per il numero N di pedoni simultaneamente presenti sul ponte Maddalena in funzione di N. L'ordinata di ciascun punto rappresenta una media dei valori  $v_M$  relativi a intervalli temporali in cui il numero di pedoni presenti sul ponte corrisponda all'ascissa del punto, moltiplicata per N. Resta non nota con certezza l'unità di misura delle velocità e conseguentemente del flusso ricavato. Si riporta in azzurro la deviazione standard associata a ciascun punto. Il campione utilizzato è quello dei dati del mese di maggio.

Non è possibile individuare un numero di pedoni critico tale per cui la crescita del flusso con il numero di pedoni subisca un arresto. D'altronde mantenendosi la velocità costante, la grandezza graficata non può che avere un andamento lineare con N, non concorde con i risultati degli esperimenti considerati(Fig.2). Le considerazioni che possono essere fatte sono le stesse illustrate in precedenza.

Si è proceduto a un calcolo alternativo del flusso all'interno dell'area studiata. La modalità è simile a quella già affrontata in occasione del test di collaudo dei sensori. Si calcolano separatamente i flussi totali (ossia moltiplicati per l'area) IN e OUT relativi a un intervallo di tempo  $t \rightarrow t + \Delta t$  come segue:

$$\phi_{IN}(t) = \sum_{k=1}^8 \theta(v_k(t) \hat{e}_k \cdot \hat{v}_{IN}) n_k(t),$$

$$\phi_{OUT}(t) = \sum_{k=1}^8 \theta(v_k(t) \hat{e}_k \cdot \hat{v}_{OUT}) n_k(t).$$

La funzione  $\theta(x)$  è tale che  $\theta(x) = x$  se  $x \geq 0$  e  $\theta(x) = 0$  se  $x \leq 0$ . Essa permette di distinguere i contributi ai flussi nelle due direzioni a seconda del segno del prodotto scalare tra  $\hat{e}_k$  e la direzione scelta tra  $\hat{v}_{IN}$  e  $\hat{v}_{OUT}$ . Il valore medio dei flussi  $\phi_{IN,mean}(N)$  e  $\phi_{OUT,mean}(N)$  negli intervalli di tempo nei quali il numero di pedoni simultaneamente presenti sul ponte è  $N$  è dato da

$$\phi_{IN,mean}(N) = \frac{\sum_{i=1}^O \phi_{IN,i}(N)}{O(N)},$$

$$\phi_{OUT,mean}(N) = \frac{\sum_{i=1}^O \phi_{OUT,i}(N)}{O(N)},$$

con  $O(N)$  occorrenze del numero totale di pedoni  $N$ . Si riporta di seguito l'andamento del flusso complessivo medio  $\phi_{tot,mean}(N) = \phi_{IN,mean}(N) + \phi_{OUT,mean}(N)$  in funzione di  $N$  (Fig.29).

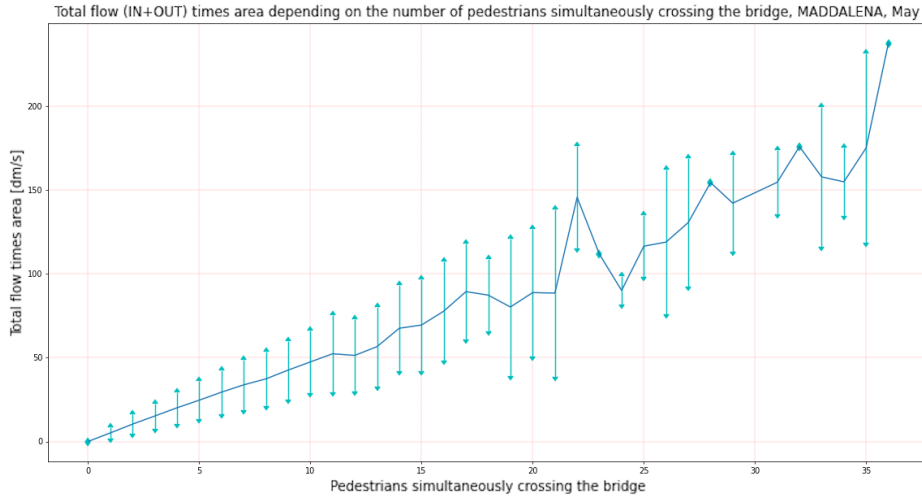


Figura 29: Flusso totale all'interno dell'area di rilevamento del sensore ottenuto come somma dei contributi IN e OUT in funzione di  $N$ . L'ordinata di ciascun punto rappresenta una media dei valori  $\phi_{tot,i}(N) = \phi_{IN,i}(N) + \phi_{OUT,i}(N)$  relativi a intervalli temporali in cui il numero di pedoni presenti sul ponte sia  $N$ . Si riporta in azzurro la deviazione standard associata a ciascun valore. Il campione utilizzato è quello dei dati del mese di maggio.

Il risultato ottenuto è consistente con il precedente (Fig.28). I valori del flusso totale medio sono simili per ciascuno degli  $N$  in ascissa, con la differenza che la funzione  $\theta(x) = x$  fa sì che siano inclusi nel calcolo solo i contributi alle due direzioni di percorrenza del ponte e alle prime vicine. Per questo motivo si ottengono valori di poco minori in Fig.29. Restano l'andamento lineare e l'incongruenza con le curve in

Fig.2. Risulta difficile categorizzare il FD ottenuto per il ponte Maddalena secondo i criteri illustrati nella sezione 3.2.

Il calcolo svolto permette a questo punto di osservare indipendentemente i contributi al flusso nelle due direzioni. Si riportano in Fig.30 e Fig.31 i grafici relativi all'andamento del flusso IN medio e del flusso OUT medio al variare di N.

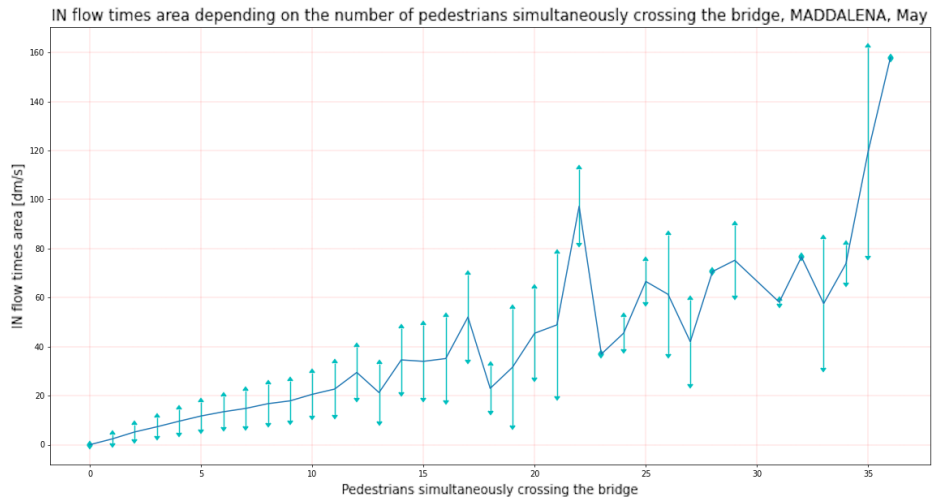


Figura 30: Flusso IN all'interno dell'area di rilevamento in funzione del numero totale N di pedoni registrati. L'ordinata di ciascun punto rappresenta una media dei valori  $\phi_{IN,i}(N)$  relativi a intervalli temporali in cui il numero di pedoni presenti sul ponte sia N. Si riporta in azzurro la deviazione standard associata a ciascun valore. Il campione utilizzato è quello dei dati del mese di maggio.

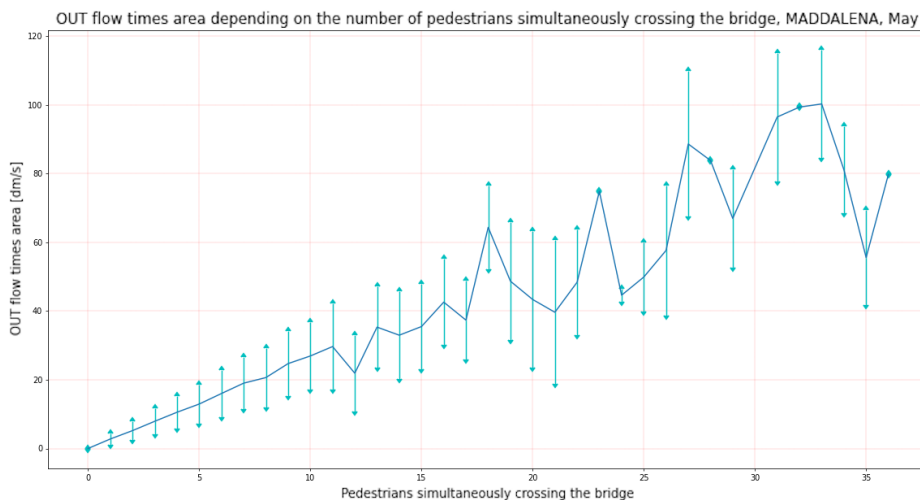


Figura 31: Flusso OUT all'interno dell'area di rilevamento in funzione del numero totale  $N$  di pedoni registrati. L'ordinata di ciascun punto rappresenta una media dei valori  $\phi_{OUT,i}(N)$  relativi a intervalli temporali in cui il numero di pedoni presenti sul ponte sia  $N$ . Si riporta in azzurro la deviazione standard associata a ciascun valore. Il campione utilizzato è quello dei dati del mese di maggio.

L'andamento complessivo dei flussi nelle due direzioni è coerente con quello del flusso totale e non si notano differenze sostanziali di comportamento tra il verso IN e quello OUT, se non per alcuni valori alti della densità. Il numero dei punti per i quali le differenze sono visibili è tuttavia troppo ridotto per potere trarre conclusioni di alcun genere. Dunque, escludendo questi ultimi punti, i due versi di percorrenza possono essere considerati equivalenti da un punto di vista dinamico, come d'altronde riscontrato in tutte le analisi svolte.

## 6 Conclusioni

L'elaborato discusso rappresenta un importante contributo per lo sviluppo del progetto in avvio presso la città di Venezia. Sono stati prodotti programmi informatici di utilità immediata e futura. In particolare, sono state prodotte le macro utili a sondare la presenza di dati nei due database disponibili. Si è verificato che, quando i dati sono presenti in entrambi i database, essi coincidono, secondo quanto dichiarato da chi ha creato tali banche dati. Gli andamenti dei dati di conteggio dei pedoni che attraversano le barriere nella postazione osservata rispettano le più ragionevoli attese, nonostante i sensori siano impostati di modo da non salvare alcun dato nelle ore serali e notturne. Si è potuto ricavare a partire da questi dati uno storico descrittivo delle variazioni delle presenze pedonali nei diversi giorni della settimane e nei diversi orari. Non del tutto positivo è risultato invece il collaudo dei sensori di flusso. Le distribuzioni spaziali del numero di pedoni e delle velocità sono conformi alla geometria della postazione studiata. Le fluttuazioni di questi dati sui brevi periodi di tempo non corrispondono tuttavia a quelle dei dati di conteggio. Su periodi più lunghi gli effetti responsabili degli errori osservati si compensano, così che per intervalli temporali superiori ai 5 minuti le differenze di comportamento tra i due tipi di dato sono visibili ma ridotte. Neppure sembra che i dati di flusso siano capaci di riprodurre i comportamenti noti in letteratura: non si osservano variazioni significative della velocità di percorrenza del ponte Maddalena al crescere del numero di pedoni su di esso presenti in simultanea e i Fundamental Diagrams ricavati presentano andamenti anomali. Le imprecisioni e i malfunzionamenti che questo lavoro ha messo in luce sono stati segnalati, ai fini di una quanto più rapida risoluzione dei problemi.



## Riferimenti bibliografici

- [1] Fredrik Johansson, Microscopic modeling and simulation of pedestrian traffic, Linköping University Department of Science and Technology, 2013.
- [2] Bin Yu et al., Field based model for pedestrian dynamics, Journal of Statistical Mechanics, 2018.
- [3] Serge P. Hoogendorm, Winnie Daamen, Victor L. Knoop, Jeroen Steenbakkers, Majid Sarvi, Macroscopic Fundamental Diagram for pedestrian networks: theory and applications, Delft University of Technology, The University of Melbourne, 2017.
- [4] Shuchao Cao et al., Fundamental Diagrams for multidirectional pedestrian flows, Journal of Statistical Mechanics, 2017.
- [5] Sebastien Motsch et al., Modeling crowd dynamics through coarse-grained data analysis, Mathematical biosciences and engineering, Volume 15, Number 6, 2018.
- [6] Tobias Kretz, An overview of Fundamental Diagrams of pedestrian dynamics, ResearchGate, 2019.
- [7] B. D. Hankin and R. A. Wright, Passenger flow in subways, Journal of the Operational Research Society 9 no. 2, 1958.
- [8] C.-J. Jin, R. Jiang, S. Wong, D. Li, N. Guo, and W. Wang, Large-scale pedestrian flow experiments under high-density conditions, arXiv, 2017.
- [9] S. J. Older, Movement of pedestrians on footways in shopping streets, Traffic engineering and control 10 no. 4, 1968.