UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

PRESTAZIONI TERMOFISICHE DELLA SEGNALETICA STRADALE ORIZZONTALE

Relatore: ***Ch.mo Prof. Ing. Marco Pasetto***

Laureando: ***Federico Meneghin***

Anno Accademico 2014-2015

Sommario

1. LA SEGNALETICA STRADALE 7
1.1 INTRODUZIONE ALLA SEGNALETICA STRADALE 7
1.2 CLASSIFICAZIONE DELLA SEGNALETICA ORIZZONTALE 9
1.3 REQUISITI E PRESTAZIONI DELLA SEGNALETICA ORIZZONTALE 16
1.3.1 RIFLESSIONE ALLA LUCE 17
1.3.2 RETRORIFLESSIONE 18
1.3.3 COLORE 21
1.3.4 RESISTENZA AL DERAPAGGIO 23
1.4 I PRODOTTI E LE MATERIE PRIME 24
1.5 COMPOSIZIONE DELLA SEGNALETICA 26

2. TERMOGRAFIA 29
2.1 INTRODUZIONE ALLA TERMOGRAFIA 29
2.1.1. COS'È LA TERMOGRAFIA 29
2.1.2 LE ORIGINI: DALL'INFRAROSSO ALLE TERMOCAMERE 31
2.2 PRINCIPI FISICI 37
2.2.1 TEORIA DELLA TERMOGRAFIA 37
2.2.2 LA TRAMISSIONE DEL CALORE 39
2.3. MISURAZIONE: FONTI DI ERRORE 44
2.3.1 VALUTAZIONE DELL'EMISSIVITÀ DELL'OGGETTO DI MISURA 44
2.3.2 AREA DI MISURA 46
2.4 TERMOCAMERA 47

3. ANALISI SPERIMENTALE 49
3.1 SCOPO DELL'ANALISI 49
3.2 MODALITA' DI RILEVAZIONE 49
3.3 IDENTIFICAZIONE CANTIERI 55
3.3.1 LOCALIZZAZIONE 55
3.3.2 CARATTERISTICHE CANTIERI 55

3.3 ANALISI DATI 61
3.3.1 LINEA DI MEZZERIA 61
3.3.2 LINEA LATERALE 66
3.3.3 ATTRAVERSAMENTO PEDONALE 72
3.3.4 SEGNALE DI PRECEDENZA..... 75
3.3.5 SEGNALE DI STOP 78
3.4 TERMOGRAMMI 81

4. CONCLUSIONI..... 91

BIBLIOGRAFIA 95

1. LA SEGNALETICA STRADALE

1.1 INTRODUZIONE ALLA SEGNALETICA STRADALE

La segnaletica è il linguaggio che disciplina la circolazione stradale.

Esso accomuna quasi interamente l'umanità non essendoci grandi discordanze nei vari paesi del mondo e deve essere obbligatoriamente imparato per poter ottenere il permesso di guida.

La segnaletica stradale si può dire che sia nata già con la costruzione delle prime strade; nell'impero, infatti, romano ai bordi delle strade venivano apposte delle pietre che indicavano la distanza percorsa dalla città precedente. Successivamente anche nel medioevo venne introdotto l'utilizzo di cartelli di legno con le indicazioni per raggiungere le varie destinazioni.

Fig. 1

Solo con l'avvento delle automobili, però, si ritenne necessario dover creare un sistema organizzato di segnali per poter permettere a tutti gli utenti di circolare in sicurezza. In Italia, nonostante i segnali stradali esistessero già da tempo, il primo vero codice della strada venne promulgato nel 1959. Con esso vennero stabilite nuove regole per quanto riguarda la forma, la dimensione e il colore dei vari segnali stradali, così come ne furono introdotte delle classificazioni.

Le norme contenute in questo codice, e quindi anche i segnali stradali in esso contenuti, rimasero in vigore fino alla promulgazione del «Nuovo codice della strada» (d. lgs. nº 285 del 1992), che è quello ancor oggi in vigore anche se è stato più volte riveduto e modificato.

Attualmente i segnali stradali possono essere divisi in quattro macrocategorie che comprendono: segnaletica luminosa, segnaletica complementare, segnaletica verticale e segnaletica orizzontale che verrà trattata nei prossimi paragrafi.

Come cita il Codice della Strada all'art. 40 commi 1 e 2: 1) "*I segnali orizzontali, tracciati sulla strada, servono per regolare la circolazione, per guidare gli utenti e per fornire prescrizioni od utili indicazioni per particolari comportamenti da seguire*".

2) "I segnali orizzontali si dividono in: a) strisce longitudinali; b) strisce trasversali; c) attraversamenti pedonali o ciclabili; d) frecce direzionali; e) iscrizioni e simboli; f) strisce di delimitazione degli stalli di sosta o per la sosta riservata; g) isole di traffico o di presegnalamento di ostacoli entro la carreggiata; h) strisce di delimitazione della fermata dei veicoli in servizio di trasporto pubblico di linea; i) altri segnali stabiliti dal regolamento".

La segnaletica orizzontale è il sistema utilizzato per rendere visibile agli automobilisti il percorso stradale nei diversi momenti della giornata e in condizioni climatiche diverse. Tramite le delineazioni dei margini laterali della carreggiata e la linea di mezzeria che delimita la corsia, infatti, viene indicato all'automobilista il percorso in cui mantenere il veicolo.

Lo scopo primario di questa segnaletica è, quindi, quello di dare informazioni ai conducenti dei veicoli ed è uno strumento di fondamentale importanza per garantire a tutti un adeguato livello di sicurezza.

L'automobilista deve avere, infatti, sotto costante controllo il movimento del mezzo, la velocità e il percorso da seguire; ciò sarà possibile se vengono rispettare le regole stabilite dal codice della strada quando si è alla guida. L'attività di guida implica l'utilizzo di gran parte del sistema percettivo di ogni conducente, quindi, per rendere più facile tale compito, è necessario avere un buon sistema di riferimenti esterni.

Studi condotti negli Stati Uniti e in Gran Bretagna hanno dimostrato che, la realizzazione delle strisce di mezzeria e di margine ha contribuito a ridurre notevolmente gli incidenti stradali, soprattutto in condizioni atmosferiche non ottimali.

Per questo motivo i gestori dei diversi tratti stradali hanno il compito di supervisionare la deperibilità della segnaletica e di curarne il buon funzionamento.

La segnaletica orizzontale, infatti, è particolarmente soggetta ad usura, poiché il continuo passaggio di mezzi sul manto stradale porta ad una repentina diminuzione della visibilità dei segnali. Oltre a questo la visibilità è ridotta anche dalle intemperie e dall'ingrigimento delle strisce causato dallo sporco e dalle tracce dei pneumatici.

1.2 CLASSIFICAZIONE DELLA SEGNALETICA ORIZZONTALE

I segnali orizzontali hanno la funzione di regolare la circolazione stradale, guidare gli utenti, fornire prescrizioni e dare utili indicazioni, consigliando particolari comportamenti da seguire.

Le principali suddivisioni della segnaletica orizzontale sono:

· strisce longitudinali;

· strisce trasversali;

· attraversamenti pedonali o ciclabili;

· frecce direzionali;

· isole di traffico o di presegnalamento di ostacoli entro la carreggiata.

Fig. 2 Segnaletica stradale.

● **STRISCE LONGITUDINALI:** Le strisce servono per separare i sensi di marcia o le corsie di marcia e per delimitare la carreggiata ovvero, per incanalare i veicoli verso determinate direzioni.

Possono essere continue o discontinue. Quelle continue indicano il limite invalicabile di una corsia o della carreggiata (escluse quelle che delimitano le “corsie di emergenza”) e non devono essere oltrepassate; quelle discontinue invece, delimitano le corsie di marcia o la carreggiata e possono essere oltrepassate (sempre che siano rispettate tutte le altre norme di circolazione).

Le strisce longitudinali si suddividono in:

1. strisce di separazione dei sensi di marcia;
2. strisce di corsia;
3. strisce di margine della carreggiata;
4. strisce di raccordo;
5. strisce di guida sulle intersezioni.

La larghezza minima delle strisce longitudinali, escluse quelle di margine, è di 15 cm per le autostrade e per le strade extraurbane principali, mentre per tutte le altre strade è di 12 cm. Per quanto riguarda la lunghezza dei tratti e degli intervalli delle strisce discontinue nei rettilinei si riporta la seguente tabella:

Tipo di striscia	Tratto (m)	Intervallo (m)	Ambito di applicazione
a	4.5	7.5	Per separazione dei sensi di marcia e delle corsie di marcia nei tratti con v di progetto maggiore di 110 Km/h
b	3.0	4.5	Per separazione dei sensi di marcia e delle corsie di marcia nei tratti con v di progetto tra 50 e 110 Km/h
c	3.0	3.0	Per separazione dei sensi di marcia e delle corsie di marcia nei tratti con v di progetto non superiore a 50 Km/h
d	4.5	1.5	Per strisce di preavviso dell'approssimarsi di una striscia continua
e	3.0	3.0	Per delimitare le corsie di accelerazione e decelerazione
f	1.0	1.0	Per strisce di margine per interruzione di linee continue in corrispondenza di accessi laterali o di passi carrabili
g	1.0	1.5	Per strisce di guida sulle intersezioni
h	4.5	3.0	Per strisce di separazione delle corsie reversibili

Tab. 1

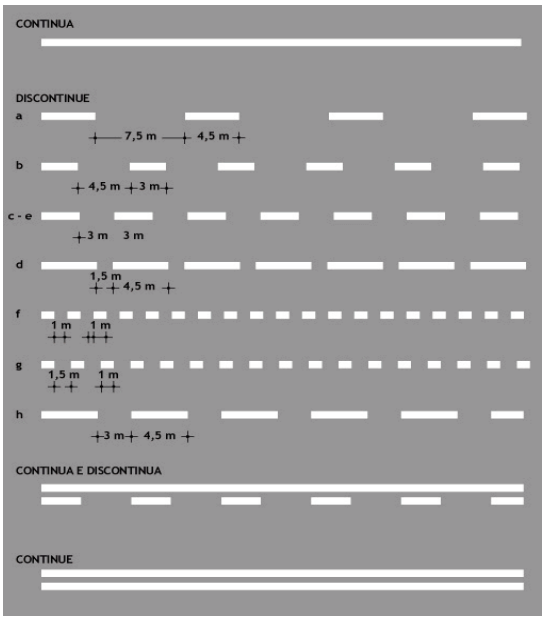

Fig. 3 Strisce longitudinali secondo il codice della strada.

1. Strisce di separazione dei sensi di marcia: devono essere continue: sulle carreggiate a due corsie di marcia, quando non si voglia consentire l'occupazione, anche se momentanea, della corsia adiacente per il sorpasso; in prossimità delle intersezioni a raso; in prossimità degli attraversamenti pedonali e di quelli ciclabili; in prossimità di tratti stradali in cui la visibilità è ridotta, come nelle curve e sui dossi; in prossimità dei passaggi ferroviari a livello e in prossimità delle strettoie.

Lungo le curve, sui dossi e nelle strettoie, non disciplinate con senso unico alternato, la striscia continua di separazione dei sensi di marcia deve avere lunghezza tale da impedire l'occupazione della corsia adiacente, per tutto il tratto in cui la visibilità non è sufficiente.

Due strisce affiancate, di cui una continua ed una discontinua, devono essere impiegate allorché uno dei due sensi di marcia dispone di una distanza di visibilità ridotta, ovvero per consentire la possibilità di sorpasso ai veicoli in uscita dalle aree di intersezione.

Due strisce affiancate continue devono essere tracciate per separare i sensi di marcia nelle strade a carreggiata unica a due o più corsie per senso di marcia, quando due o più corsie nello stesso senso di marcia sono delimitate da strisce continue, quando la separazione dei sensi di marcia non coincide con l'asse della carreggiata, quando si predispone uno spartitraffico, anche senza apposito manufatto, per conferire maggiore sicurezza alla circolazione distanziando i due sensi di marcia.vIn tutti gli altri casi non previsti dall' articolo 40 del Regolamento di esecuzione del Codice della Strada, le strisce di separazione dei sensi di marcia devono essere discontinue.

2. Strisce di corsia: la distanza tra gli assi delle strisce che delimitano la corsia, dipende dalla sua destinazione, dal tipo di strada, dal tipo di veicoli in transito e dalla sua regolazione; la larghezza della corsia deve essere uno di questi valori: 2.75, 3, 3.25, 3.5, 3.75 m; mentre per le corsie di emergenza tra 2 e 3.5 m.

La larghezza delle corsie di marcia lungo le strade deve essere mantenuta il più possibile costante, salvo che in prossimità delle intersezioni o in corrispondenza dei

salvagenti posti sulle fermate dei tram; in curva deve essere realizzato idoneo allargamento in funzione del tipo di veicoli in transito e del raggio di curvatura.

3. Strisce di margine della carreggiata: Le strisce di margine sono continue in corrispondenza delle corsie di emergenza e delle banchine; esse possono essere realizzate nei tratti di strada in cui vige il divieto di sosta.

Le strisce di margine sono discontinue in corrispondenza di una strada con obbligo di precedenza, di diramazioni, di corsie di accelerazione e decelerazione, di piazzole o zone di sosta e di passi carrabili.

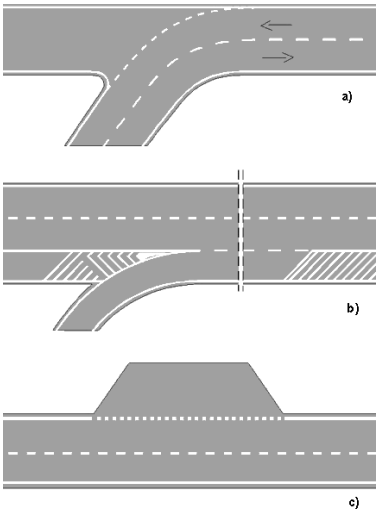

Fig. 4 Strisce di margine della carreggiata.

4. Strisce di raccordo: Le strisce di raccordo sono strisce continue oblique (inclinazione max 5% per strade urbane di quartiere e strade locali e 2% per tutti altri tipi di strade) di colore bianco e vanno usate in dipendenza di variazioni della larghezza della carreggiata utilizzabile dal traffico, o delle corsie.

5. Strisce di guida sulle intersezioni: Le strisce di guida sulle intersezioni sono del tipo “g” (vedi Fig.3).

Sono curve, discontinue, di colore bianco e possono essere tracciate nelle aree di intersezione per guidare i veicoli in manovra secondo una corretta traiettoria.

● **STRISCE TRASVERSALI:** le strisce trasversali, o linee di arresto, sono continue o discontinue e di colore bianco.

1. Continue: hanno larghezza minima di 50 cm e indicano il limite prima del quale il conducente ha l'obbligo di arrestare il veicolo per rispettare le prescrizioni semaforiche o il segnale di "fermarsi e dare precedenza" o il segnale di "passaggio a livello".

2. Discontinue: indicano il limite prima del quale il conducente ha l'obbligo di arrestare il veicolo "se necessario" per rispettare il segnale "dare precedenza".

Devono essere tracciate parallelamente all'asse della strada principale, sulla soglia dell'intersezione, in posizione tale da consentire agevolmente le manovre di svolta; devono essere tracciate, inoltre, in posizione tale che il conducente possa, se necessario, fermarsi in tempo utile prima di tali linee ed avere la visuale più ampia possibile sui rami della intersezione, tenuto conto delle esigenze di movimento degli altri veicoli e dei pedoni. La linea di arresto, in presenza del segnale "dare precedenza", è costituita da una serie di triangoli bianchi tracciati con la punta rivolta verso il conducente obbligato a dare la precedenza; tali triangoli hanno una base compresa tra 40 e 60 cm ed un'altezza compresa tra 60 e 70 cm.

● **ATTRAVERSAMENTI PEDONALI E CICLABILI:** un attraversamento pedonale/ciclabile è una parte della carreggiata di una strada dedicata al transito dei pedoni/biciclette in attraversamento delle corsie. La funzione è quella di "raggruppare" i pedoni/biciclette in luoghi ben riconoscibili da parte del guidatore, il quale deve sempre dare la precedenza a coloro che si trovano a transitare in dette aree della carreggiata stradale. Tutto ciò ovviamente per aumentare la sicurezza stradale sia della persona a piedi o in bicicletta sia per colui che viaggia su un veicolo.

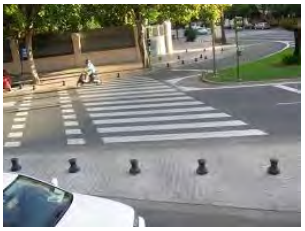

Fig. 5 Attraversamento pedonale e ciclabile.

● **FRECCE DIREZIONALI:** nelle strade in cui sono presenti corsie di preselezione in prossimità di una intersezione, si provvede ad indicare, nelle corsie di manovra, frecce direzionali di colore bianco.

Le frecce direzionali sono:

• freccia destra per le corsie specializzate per la svolta a destra;

• freccia diritta per le corsie specializzate per l'attraversamento diretto dell'intersezione e per confermare il senso di marcia sulle strade a senso unico;

• freccia a sinistra per le corsie specializzate per la svolta a sinistra;

• freccia a destra abbinata a freccia diritta per le corsie specializzate per la svolta a destra e l'attraversamento diretto dell'intersezione;

• freccia a sinistra abbinata a freccia diritta per le corsie specializzate per la svolta a sinistra e l'attraversamento diretto dell'intersezione;

• freccia di rientro.

Le dimensioni delle frecce variano in funzione del tipo di strada su cui vengono applicate.

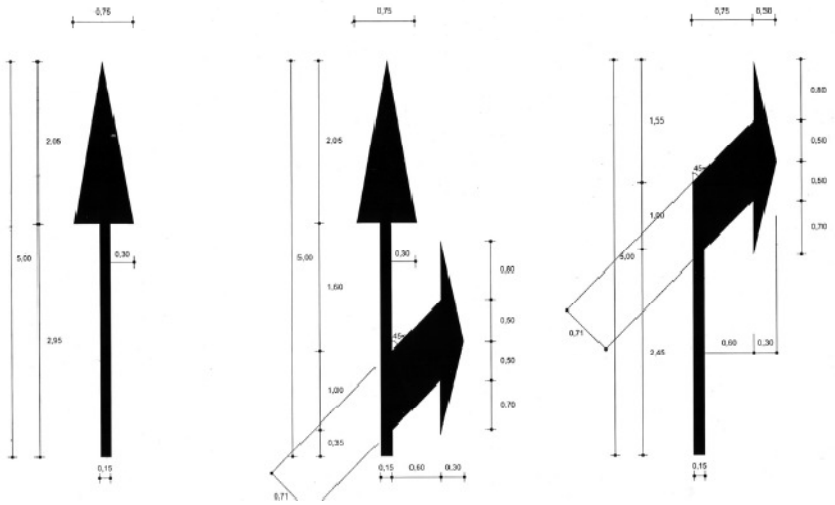

Fig. 6 Frecce direzionali.

● **ISOLE DI TRAFFICO O DI PRESEGNALAMENTO DI OSTACOLI ENTRO LA CARREGGIATA:** le isole di traffico a raso sulla pavimentazione ed i triangoli di presegnalamento delle isole di traffico in rilievo devono essere evidenziati mediante zebrature poste entro le strisce di raccordo per l'incanalamento dei veicoli o tra queste ed il bordo della carreggiata. Le strisce delle zebrature devono essere di colore bianco, inclinate di almeno 45° rispetto alla corsia di marcia e di larghezza non inferiore a 30 cm; gli intervalli tra le strisce sono di larghezza doppia rispetto alle strisce.

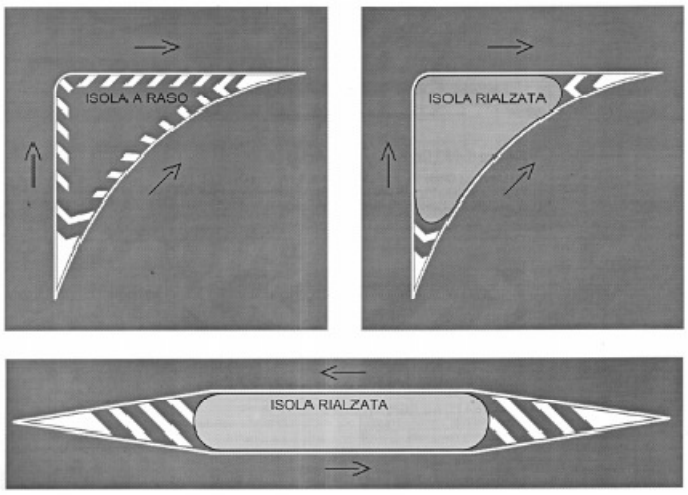

Fig. 7 Segnalazione orizzontale per isole di traffico.

1.3 REQUISITI E PRESTAZIONI DELLA SEGNALETICA ORIZZONTALE

La segnaletica orizzontale deve essere efficiente in termini di visibilità, ma deve anche avere un valore di aderenza confrontabile con quello della pavimentazione circostante, evitando così situazioni di pericolo (minore aderenza). Per questo motivo la normativa UNI EN 1436/2004 "*Prestazioni della segnaletica orizzontale per gli utenti della strada"* fissa dei requisiti prestazionali minimi che la segnaletica orizzontale deve soddisfare per l'intera vita utile.

In tale norma le prestazioni che la segnaletica orizzontale deve possedere, al fine di garantire la sicurezza degli utenti, sono individuate da diversi parametri organizzati in classi crescenti e relativi alla visibilità diurna e notturna. In essa, sono presenti, inoltre, le prove e i metodi di misurazione finalizzati alla verifica delle soglie individuate, anche su strada in fase di collaudo, poiché altrimenti non si riuscirebbe a garantire l'efficienza della segnaletica dopo la sua posa in opera.

Le prestazioni previste dalla norma UNI EN 1436/2004 sono quattro, le prime tre finalizzate al conseguimento di una corretta visibilità mentre la quarta riguarda le prestazioni di aderenza:

- Riflessione alla luce: definita dal coefficiente di luminanza in condizioni di illuminazione diffusa Qd [$mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$], che influenza la visibilità diurna;
- Retroriflessione: definita dal coefficiente di luminanza R_L [$mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$], che influenza la visibilità notturna in tre diverse condizioni meteorologiche: segnaletica asciutta, bagnata ed in presenza di pioggia;
- Colore: definito attraverso il fattore di luminanza β e le coordinate di cromaticità X e Y;
- Resistenza al derapaggio: determinabile con lo Skid Resistance Tester ed espressa in unità SRT (convertibili in BPN).

1.3.1 RIFLESSIONE ALLA LUCE

Rappresenta la riflessione, espressa in valori, per gli utenti della strada, della segnaletica orizzontale bianca e gialla in condizioni di luce diurna e di illuminazione artificiale.

Per quantificare la riflessione si deve utilizzare il coefficiente di luminanza in condizioni di illuminazione diffusa, Qd [$mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$] che è definito come quel coefficiente che caratterizza la visibilità diurna e rappresenta la luminosità di un segnale orizzontale, come percepita dai conducenti dei veicoli alla luce del giorno media, o in presenza di illuminazione stradale.

Questa grandezza fotometrica viene misurata mediante retroriflettometri e rilevatori di luminanza che rispettano una predeterminata geometria in termini di distanza visiva simulata (distanza tra il veicolo ed il punto di misura sulla pavimentazione) e di angolo di osservazione del conducente.

In condizioni di superficie stradale asciutta, la segnaletica orizzontale deve essere conforme alla tabella 1 della normativa UNI EN 1436/2004:

Classi di Qd per segnaletica orizzontale asciutta

Colore del segnale orizzontale	Tipo di manto stradale	Classe	Coefficiente di luminanza minimo in condizioni di illuminazione diffusa Qd $mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$
Bianco	Asfalto	Q0	Nessun requisito
		Q2	Qd ≥ 100
		Q3	Qd ≥ 130
		Q4	Qd ≥ 160
	Cemento	Q0	Nessun requisito
		Q3	Qd ≥ 130
		Q4	Qd ≥ 160
		Q5	Qd ≥ 200
Giallo		Q0	Nessun requisito
		Q1	Qd ≥ 80
		Q2	Qd ≥ 100
		Q3	Qd ≥ 130

Nota - La classe Q0 si applica quando la visibilità diurna si ottiene attraverso il valore del fattore di luminanza β, vedere 4.4.

Tab. 2: TABELLA 1 della normativa UNI EN 1436/04.

1.3.2 RETRORIFLESSIONE

Rappresenta la riflessione espressa in valori, per gli utenti della strada, della segnaletica orizzontale bianca e gialla in condizioni di illuminazione con i proiettori dei veicoli.

Per quantificare la retroriflessione in condizioni di illuminazione con i proiettori dei veicoli si deve utilizzare il coefficiente di luminanza retroriflessa R_L [$mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$], definito come quel coefficiente che rappresenta la luminosità di un segnale orizzontale come percepita dai conducenti quando l'illuminazione avviene mediante i proiettori dei propri veicoli. Così come coefficiente di illuminazione diffusa, anche il coefficiente di luminanza retro riflessa può essere determinato con un retroriflettometro o con un rilevatore di luminanza. Le apparecchiature utilizzate simulano una distanza di 30 m dall'area di misura con l'occhio dell'osservatore posto a 1.2 m dal piano stradale e la sorgente luminosa, il faro del veicolo, posto a 0,65 m rispetto alla pavimentazione. La geometria prevista per l'osservatore, in condizioni d'illuminazione radente e con la segnaletica asciutta, umida o bagnata, è un angolo d'osservazione di 2,29° e un angolo d'illuminazione di 1,24° (geometria europea). In condizioni di superficie stradale asciutta, la segnaletica orizzontale deve essere conforme alla tabella 2 della normativa UNI EN 1436/2004, mentre, in condizioni di bagnato, deve essere conforme alla tabella 3 e, in condizioni di pioggia, alla tabella 4.

Tabella 2:

Classi di R_L per segnaletica orizzontale asciutta

Tipo e colore del segnale orizzontale		Classe	Coefficiente minimo di luminanza retroriflessa R_L $mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$
Permanente	Bianco	R0	Nessun requisito
		R2[a)]	$R_L \geq 100$
		R3[a)]	$R_L \geq 150$
		R4[a)]	$R_L \geq 200$
		R5[a)]	$R_L \geq 300$
	Giallo	R0	Nessun requisito
		R1[a)]	$R_L \geq 80$
		R3[a)]	$R_L \geq 150$
		R4[a)]	$R_L \geq 200$
Provvisorio		R0	Nessun requisito
		R3[a)]	$R_L \geq 150$
		R5[a)]	$R_L \geq 300$

Nota- La classe R0 si applica quando la visibilità della segnaletica orizzontale è ottenuta senza retroriflessione in condizioni di illuminazione con i proiettori dei veicoli.

a) In alcuni Paesi queste classi non possono essere mantenute per un limitato periodo dell'anno durante il quale la probabilità di prestazioni inferiori della segnaletica orizzontale è alta a causa della presenza di acqua, polvere, fango, ecc.

Tab. 3: TABELLA 2 della normativa UNI EN 1436/04.

Tabella 3:

Classi di R_L per segnaletica orizzontale in condizioni di bagnato

Condizioni di bagnato	Classe	Coefficiente minimo di luminanza retroriflessa R_L $mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$
Come si presenta 1 min dopo l'inondazione della superficie con acqua conformemente a B.6	RW0	Nessun requisito
	RW1	$R_L \geq 25$
	RW2	$R_L \geq 35$
	RW3	$R_L \geq 50$
	RW4	$R_L \geq 75$

Nota - La classe RW0 riguarda situazioni in cui questo tipo di retroriflessione non è richiesta per ragioni economiche o tecnologiche.

Tab. 4: TABELLA 3 della normativa UNI EN 1436/04.

Tabella 4:

Classi di R_L per segnaletica orizzontale in condizioni di pioggia

Condizioni di pioggia	Classe	Coefficiente minimo di luminanza retroriflessa R_L $mcd \cdot m^{-2} \cdot lx^{-1}$
Come si presenta dopo almeno 5 min di esposizione conformemente a B.7 durante una precipitazione uniforme di 20 mm/h	RR0	Nessun requisito
	RR1	$R_L \geq 25$
	RR2	$R_L \geq 35$
	RR3	$R_L \geq 50$
	RR4	$R_L \geq 75$
Nota - La classe RR0 riguarda situazioni in cui questo tipo di retroriflessione non è richiesta per ragioni economiche o tecnologiche.		

Tab. 5: TABELLA 4 della normativa UNI EN 1436/04.

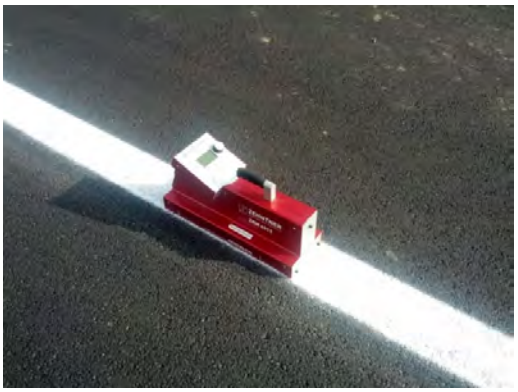

Fig. 8 Retroriflettometro.

1.3.3 COLORE

I colori dei segnali orizzontali sono i seguenti:

- bianco;
- giallo;
- azzurro;
- giallo alternato con il nero.

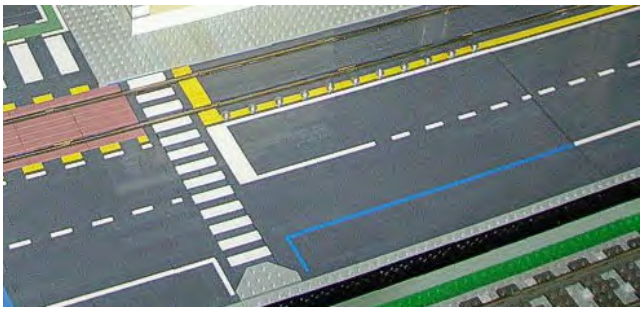

Fig. 9 Colori segnaletica.

Parlando del requisito della segnaletica orizzontale, riguardo al colore si intende la consistenza della cromaticità che la segnaletica orizzontale deve possedere in condizioni normali. Tale consistenza si definisce con il fattore di luminanza β che è il rapporto tra l'intensità luminosa apparente della superficie campione, rispetto alla luminanza di riferimento (superficie bianca perfettamente diffondente) e definisce la chiarezza del colore. Tale fattore deve essere conforme alla Tabella 5 della normativa UNI EN 1436/2004.

Tabella 5:

Classi del fattore di luminanza β per segnaletica orizzontale asciutta

Colore del segnale orizzontale	Tipo di manto stradale	Classe	Fattore minimo di luminanza β
Bianco	Asfalto	B0	Nessun requisito
		B2[1)]	β ≥ 0,30
		B3[1)]	β ≥ 0,40
		B4[1)]	β ≥ 0,50
		B5[1)]	β ≥ 0,60
	Cemento	B0	Nessun requisito
		B3[1)]	β ≥ 0,40
		B4[1)]	β ≥ 0,50
		B5[1)]	β ≥ 0,60
Giallo		B0	Nessun requisito
		B1[1)]	β ≥ 0,20
		B2[1)]	β ≥ 0,30
		B3[1)]	β ≥ 0,40

1) In alcuni Paesi queste classi non possono essere mantenute per un limitato periodo dell'anno durante il quale la probabilità di prestazioni inferiori della segnaletica orizzontale è alta a causa della presenza di acqua, polvere, fango, ecc.

Nota - La classe B0 si applica quando la visibilità di giorno si ottiene attraverso il valore del coefficiente di luminanza in condizioni di illuminazione diffusa Qd.

Tab. 6: TABELLA 5 della normativa UNI EN 1436/04.

Le coordinate di cromaticità x, y per segnaletica orizzontale asciutta devono trovarsi all'interno delle regioni definite dai vertici forniti nella tabella 6:

Vertici delle regioni di cromaticità per segnaletica orizzontale bianca e gialla

Vertici		1	2	3	4
Segnaletica orizzontale bianca	x	0,355	0,305	0,285	0,335
	y	0,355	0,305	0,325	0,375
Segnaletica orizzontale gialla classe Y1	x	0,443	0,545	0,465	0,389
	y	0,399	0,455	0,535	0,431
Segnaletica orizzontale gialla classe Y2	x	0,494	0,545	0,465	0,427
	y	0,427	0,455	0,535	0,483

Nota - Le classi Y1 e Y2 di segnaletica orizzontale gialla si riferiscono rispettivamente alla segnaletica orizzontale permanente e a quella provvisoria.

Tab. 7: TABELLA 6 della normativa UNI EN 1436/04.

1.3.4 RESISTENZA AL DERAPAGGIO

Oltre ai parametri fotometrici, la norma UNI EN 1436/2004 prevede la valutazione della resistenza al derapaggio in condizioni di superficie stradale bagnata, ovvero del grado di aderenza tra pneumatico e segnaletica stradale orizzontale.

La segnaletica orizzontale, oltre ad essere efficiente in termini di visibilità, deve, infatti, avere anche un valore di aderenza confrontabile con quello della pavimentazione circostante per evitare situazioni di pericolo.

Per misurare tale parametro si usa un'apparecchiatura portatile da campo per determinazioni puntuali. L'apparecchio, costituito essenzialmente da un braccio oscillante e da un supporto per un pattino di gomma, naturale o sintetica, avente caratteristiche prefissate, misura l'attrito in unità convenzionali, definite unità SRT (Skid Resistance Tester Value).

La resistenza al derapaggio è correlata con l'altezza raggiunta dal dispositivo oscillante che, se non ci fosse attrito si muoverebbe liberamente descrivendo una traiettoria semicircolare; esso, durante la risalita, dopo aver strisciato sulla pavimentazione, possiede un ago indicatore mobile (indice) che si ferma al termine dell'oscillazione. A seconda dell'ampiezza dell'oscillazione dell'ago si ha una resistenza allo slittamento, misurata in unità SRT da 0 a 150 con un intervallo di 5 punti.

Fig. 10 Strumento per la misura dello Skid Resistance Test.

1.4 I PRODOTTI E LE MATERIE PRIME

I prodotti utilizzati nella realizzazione della segnaletica orizzontale permanente (strisce di colore bianco) e temporanea (strisce di colore giallo), differiscono fra loro, più che per le materie prime costituenti il prodotto stesso, per la modalità d'applicazione e per gli spessori realizzati.

I prodotti segnaletici sono generalmente composti dalle seguenti materie prime:

- una parte inorganica o minerale costituita da:

  - **pigmenti**: biossido di titanio per il colore bianco e cromato di piombo per il colore giallo. Il pigmento giallo realizzato con un metallo pesante quale il piombo e anche l'analogo pigmento realizzato con il cromo, sono soggetti a restrizioni da parte delle norme Comunitarie, ad iniziare dalla Direttiva 76/769/CEE, e dalle leggi nazionali che le hanno recepite. Queste ultime considerano il cromato di piombo una sostanza tossica per la riproduzione, pericolosa per l'ambiente e sospetta d'attività cancerogena per l'uomo e per gli animali. Attualmente l'uso di tali sostanze, pur non essendo espressamente proibito, è lasciato all'autonoma discrezione degli enti gestori, in relazione alla disponibilità di prodotti che abbiano analoghe caratteristiche con i menzionati pigmenti e che non siano tossici per l'ambiente;

  - **cariche** (extender): carbonato di calcio, carbonato di magnesio, talco, caolino, farina fossile, quarzite, solfato di bario, ecc.;

- una parte inorganica aggiuntiva, importante per la funzionalità del prodotto una volta steso su strada, composta da:

  - **perline di vetro**: i cosiddetti prodotti vernicianti con perline premiscelate o postspruzzate;

  - **granulati antiscivolo**: cristobaliti (ciottoli di mare macinati e calcinati), corindone, quarzo, grani di vetro;

- una parte organica costituita da:

  - **resine** (legante o polimero): alchidiche, clorocaucciù, viniliche, fenoliche, acriliche, acriliche termoplastiche; ecc.;

  - **solventi**: toluolo, cloruro di metilene, eptano, esano, tricloroetilene, acetone, ecc.;

- una parte costituita da composti di natura chimica diversificata, distinti in classi secondo la loro funzione; essa ha il compito di correggere i difetti dei prodotti:

  - **additivi**: antipelle, antingiallenti, antiossidanti, antisedimentanti, stabilizzanti, plastificanti, ecc.;

Nel contesto della composizione dei prodotti segnaletici:

- La parte minerale contribuisce:
  - al colore;
  - alla resistenza meccanica;
  - alla resistenza alla corrosione;
  - alla resistenza all'abrasione;
  - alla resistenza agli agenti atmosferici;
  - all'antiscivolosità.
- Le cariche, in particolare nel caso delle pitture, regolano i tempi d'evaporazione dei solventi e contrastano la risalita in superficie dei pigmenti.
- Le perline, oltre ad assicurare la visibilità notturna, sono l'armatura dello strato di prodotto segnaletico applicato.

La parte organica contribuisce:

- alla facilità d'applicazione del prodotto;
- all'essiccamento;
- a veicolare e inglobare nella massa tutte le materie prime;
- alla resistenza all'usura;
- all'adesione al supporto.

1.5 COMPOSIZIONE DELLA SEGNALETICA

I prodotti disponibili per la realizzazione della segnaletica sono le pitture (a solvente della serie alifatica e all'acqua), i prodotti plastici applicabili a freddo (bicomponenti o multicomponenti), i prodotti plastici applicabili a caldo (termoplastici distinti secondo le modalità applicative in termocolati e termospruzzati) e i prodotti stradali preformati (incollati, applicati a caldo, in rilievo o incassati).

La formazione della pellicola nelle **pitture** spartitraffico ha inizio con l'evaporazione del solvente, cioè la parte fisica del processo. Il fenomeno è evidente in quanto si ha una riduzione del volume e dello spessore dello strato steso.

Contemporaneamente si ha l'attivazione dei processi di natura chimica che portano all'indurimento del film con la formazione della pellicola che avviene, nel caso delle resine alchidiche, attraverso l'assorbimento dell'ossigeno atmosferico da parte degli oli siccativi presenti nel legante, essi si appropriano dell'ossigeno per fissarlo nella struttura anche con l'aiuto d'opportuni catalizzatori (prodotti che favoriscono nello stesso tempo la polimerizzazione). Il processo d'indurimento, in genere molto lento, è accelerato con l'introduzione di una miscela di solventi con diversi gradi d'evaporabilità che permettono un'abbreviazione del fenomeno.

Molto più rapidi sono i tempi d'essiccamento dei composti con resine acriliche che filmano per semplice evaporazione dei solventi.

Nelle pitture spartitraffico usuali (Anas) è utilizzata una resina alchidica associata ad una resina dura come il clorocaucciù. Le pitture che utilizzano con solvente acquoso e resina acrilica, sono meno tossiche rispetto a quelle ottenute con le miscele di solventi utilizzati nei prodotti tradizionali, essi però hanno il difetto d'avere dei tempi d'essiccazione più lunghi che si dilatano ulteriormente se è presente, durante la stesa, una forte umidità ambientale.

Lo spessore secco delle pitture a solvente è in genere inferiore ai 400 micron.

L'aumento del tempo d'essiccamento oltre ai rischi di risalita del legante bituminoso del substrato, con la conseguente modificazione del colore del prodotto segnaletico, causa enormi disagi alla circolazione stradale.

Per tale motivo sono stati messi a punto dei prodotti che consentono l'apertura della strada al traffico immediatamente dopo la stesa e garantiscono una maggiore durata in servizio.

Simili per aspetto alle pitture, ma diversi nel comportamento, sono i **prodotti plastici a freddo**, normalmente formati da due componenti: una base e un indurente. Quest'ultimo componente svolge la funzione di catalizzatore e può presentarsi sia allo stato liquido che in polvere. L'indurimento del film, che avviene in assenza di solventi, è quasi immediato, infatti l'indurente agisce da catalizzatore del processo di polimerizzazione del composto liberando calore nell'ambiente circostante. Anche in questo caso la presenza di una forte umidità può ridurre i tempi d'essiccamento dello strato steso.

Nei prodotti plastici a freddo lo spessore della striscia è compresa tra 1 e 3 mm.

I prodotti plastici a freddo e quelli a caldo, questi ultimi chiamati usualmente **termoplastici**, hanno la caratteristica che lo spessore dello strato steso e lo spessore dello strato risultante una volta che il prodotto si è essiccato, corrisponde allo spessore iniziale di stesa.

I termoplastici sono applicati con due metodi diversi che sono in funzione dello strato di prodotto che si vuole ottenere e dalla velocità di posa in opera: l'applicazione a spruzzo consente di ottenere degli strati tra 1 e 2 mm e una velocità media di 20 km/h; con l'applicazione per estrusione si hanno spessori tra i 2 e i 3 mm e una velocità media di 5 km/h. L'estrusione è stata la prima tecnica d'applicazione del prodotto ad essere stata sviluppata.

Nel termocolato, rispetto al termospruzzato si ha una maggiore presenza di pigmenti e cariche e una minore percentuale di legante, inoltre la tecnica presenta l'inconveniente di richiedere una gran quantità di prodotto e il "difetto", nei casi di pavimentazioni aperte, di ostruire il sistema drenante, annullando così la macrorugosità e impedire il regolare deflusso trasversale dell'acqua.

La temperatura d'applicazione è fondamentale per la riuscita della delineazione orizzontale. Considerando che la messa in opera avviene con temperature comprese tra i 150 e i 220 °C, secondo il tipo di resine utilizzate, il controllo delle

stesse è determinante: una temperatura troppo alta rischia di bruciare il prodotto, mentre una temperatura troppo bassa compromette l'adesione del prodotto al substrato.

La scelta dei prodotti termoplastici da parte di molti enti gestori, in particolare quelli che amministrano autostrade o strade extraurbane di primaria importanza, è legata alla superiore durabilità e ai risparmi a lungo termine che si conseguono rispetto ai tradizionali prodotti a solvente. Infatti, se applicata a regola d'arte, la striscia in materiale termoplastico costituisce la tecnica segnaletica più eccellente e duratura.

In alternativa all'uso di complesse apparecchiature per la stesa e con l'obiettivo di ridurre i tempi d'esecuzione, i produttori di segnaletica per la delineazione orizzontale, hanno messo a disposizione degli enti gestori i **nastri stradali preformati** o bande prefabbricate.

I materiali con cui è realizzato il nastro sono analoghi a quelli utilizzati per i termoplastici e la composizione in peso è simile. Il vantaggio di questo sistema è la semplicità della posa in opera, la velocità d'applicazione e l'alta durabilità.

L'uso prevalente dei preformati è limitato al contesto urbano, anche se recentemente i nastri preformati da incasso iniziano ad essere utilizzati in ambito autostradale. Normalmente sono usati per realizzare passaggi pedonali, lettere, simboli, frecce, ecc..

Per la posa in opera dei segnali preformati, bisogna valutare attentamente lo stato della superficie della pavimentazione stradale, la sua macrorugosità e, in particolare, la tenuta del legante bituminoso superficiale.

2. TERMOGRAFIA

2.1 INTRODUZIONE ALLA TERMOGRAFIA

2.1.1. COS'È LA TERMOGRAFIA

I controlli termici comprendono tutti i metodi in cui vengono utilizzati dispositivi per il rilevamento di calore al fine di misurare la variazione di temperatura in componenti, strutture, sistemi o processi fisici.

Uno di questi metodi è la TERMOGRAFIA: una tecnica di telerilevamento, effettuata tramite l'acquisizione di immagini nel campo dell'infrarosso.

Più precisamente questa tecnica permette di misurare l'energia nell'infrarosso emessa da corpi a temperatura diversa dallo zero assoluto, mediante opportuni sensori, e di correlarla alla temperatura superficiale del corpo stesso.

Questa procedura, che si conclude con la conversione dell'energia emessa in segnale video, risulta particolarmente utile in diversi ambiti: dall'industria siderurgica e dei processi termici all'impiantistica civile, dall'industria elettronica all'impiantistica industriale, ma viene anche applicata nel campo della prevenzione e della diagnosi medica.

Attraverso l'utilizzo di una termocamera, strumento che esegue controlli di tipo termografico, è perciò possibile risalire alla mappa termica della "scena" inquadrata mediante l'interpretazione della radiazione percepita dall'elemento sensibile della termocamera stessa. Oggigiorno la termografia è una tecnica che viene sempre più utilizzata perché:

- Permette di analizzare la temperatura di qualsiasi corpo senza entrarvi in contatto, cioè in modo non invasivo, permettendo la ripetizione delle misure nel tempo;
- Può valutare differenze di temperatura (ΔT) dell'ordine dei centesimi di grado;
- Permette il rilevamento dei dati in un campo di misura molto esteso;

- Aumenta le probabilità di individuare in modo preciso il guasto o gli elementi difettosi, anche qualora non fossero ancora critici;
- Non richiede il fermo degli impianti, anzi va fatta con impianti a regime e possibilmente in condizioni di massima sollecitazione;
- Consente interventi mirati e preventivi, quindi con riduzione dei costi di manutenzione;
- Può ridurre il pericolo di eventi catastrofici come incendi o blocchi produttivi improvvisi.

Le limitazioni all'uso della termografia invece sono legate all'alto costo dell'apparecchiatura, alla necessità di un operatore qualificato e ad alcuni impedimenti di tipo tecnico: la difficoltà di ottenere dati precisi e veritieri per materiali con bassa emissività, la necessità in alcuni casi di schermare la termocamera dalle emissioni ambientali e l'influenza delle condizioni climatiche nel caso di utilizzo in ambito edile architettonico.

2.1.2 LE ORIGINI: DALL'INFRAROSSO ALLE TERMOCAMERE

Sia la luce che il calore sono due forme di energia che si propagano attraverso onde elettromagnetiche. L'insieme delle onde elettromagnetiche, caratterizzate da una **lunghezza d'onda** (**λ**) e dalla **frequenza** (**f**), può essere rappresentato attraverso lo **spettro elettromagnetico**. La lunghezza d'onda è generalmente espressa in **micrometri** (**µm**, 1 µm = 10^{-6} metri), anche se, nella regione dell'infrarosso, è possibile utilizzare anche altre unità di misura: **nanometri** (**nm**, 1 nm = 10^{-9} m) o **angstrom** (**Å**, 1 Å = 0.1 nm = 10^{-4} µm = 10^{-10} m).

La radiazione infrarossa è una frazione dello spettro elettromagnetico con lunghezza d'onda maggiore (e frequenza inferiore) rispetto a quella che caratterizza i raggi di luce visibile, ma inferiore a quella delle onde radio. Tale radiazione è un tipo di onda elettromagnetica non percepibile dall'occhio umano (non facendo parte della parte del visibile dello spettro elettromagnetico), ma deducibile dal cambiamento di temperatura.

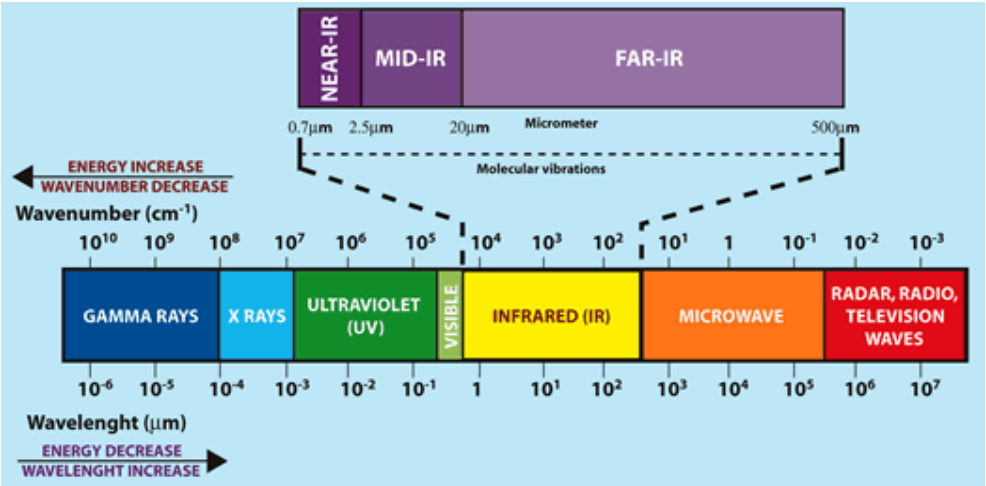

Fig. 11 Spettro elettromagnetico.

Lo spettro elettromagnetico è suddiviso in un certo numero di regioni classificate in base alla lunghezza d'onda. Queste regioni sono denominate **bande** (*banda dei raggi X*, *banda dell'ultravioletto*, *banda della luce visibile*, *banda dell'infrarosso*, etc.). Non esiste alcuna differenza sostanziale tra le diverse bande dal punto di vista

delle leggi fisiche che le governano e differiscono solo per le diverse lunghezze d'onda che le caratterizzano. Si parla d'infrarossi proprio perché la frequenza di queste onde è inferiore (infra = sotto) a quella che caratterizza il rosso. La banda dell'infrarosso, spesso, viene ulteriormente suddivisa in bande più piccole; nella fattispecie quattro:

- **Infrarosso vicino** (0,75 – 3 µm);
- **Infrarosso medio** (3 – 6 µm);
- **Infrarosso lontano** (6 – 15 µm);
- **Infrarosso estremo** (15 – 100 µm).

Fig. 12 Sir William Herschel.

La scoperta della radiazione infrarosso, fu quasi accidentale ed avvenne all'inizio del 1800 per mano di un famoso astronomo **Sir William Herschel** (1738-1822). Herschel era alla ricerca di un nuovo filtro ottico da montare su telescopi e in grado di ridurre la luminosità durante le osservazioni del sole. Utilizzando diverse tipologie di vetri colorati si accorse che taluni filtravano quantità ridotte di calore del sole. Decise, quindi, di riprendere l'esperimento di **Newton** condotto nel 1670: scomporre la luce solare nei sette colori che ne compongono lo spettro, attraverso un prisma di vetro. A questo punto, utilizzando un termometro con bulbo annerito, si accorse che a ogni colore corrispondeva una temperatura differente. Inoltre, notò che la

temperatura superiore non si raggiungeva in corrispondenza del rosso, bensì oltre questa zona. Herschel denominò questa nuova porzione dello spettro elettromagnetico come "***spettro termometrico***", e grazie a questo suo esperimento si rese inoltre conto del fatto che il vetro non era trasparente all'infrarosso e, al contrario di quello che si poteva pensare, vi era un'attenuazione, seppur minima, al passaggio di calore.

Fig. 13 Macedonio Melloni.

Nel 1830 l'italiano **Macedonio Melloni** (1798-1854) scoprì che cristalli di salgemma sufficientemente grandi erano trasparenti alla radiazione infrarosso e, successivamente, riuscì a realizzare la prima **termopila** collegando in serie differenti **termocoppie** (rispetto ai precedenti termometri raggiungono una precisione che si avvicina al centesimo di grado) inventate qualche anno prima (1829) ad opera di **Leopoldo Nobili** (1784-1835).

Attraverso la termopila (primo sistema di rilevazione di calore a distanza) Melloni fu in grado di rilevare il calore di una persona a circa tre metri di distanza.

Fig. 14 Leopoldo Nobili.

La "*prima immagine del calore*" fu opera del figlio di Sir William Herschel, **Sir John Herschel** (1792–1871), che fu in grado di ottenere la prima vera immagine termica, visibile solo in luce riflessa, attraverso l'evaporazione dell'olio racchiuso in una particolare pellicola. Qualche anno dopo riuscì a produrre anche la prima immagine termica su carta. A questo evento viene fatta coincidere la nascita della **termografia**.

Le moderne termocamere montano sensori la cui realizzazione parte dal "**bolometro**" (1878) invenzione di **Samuel Langley** (1834-1906).

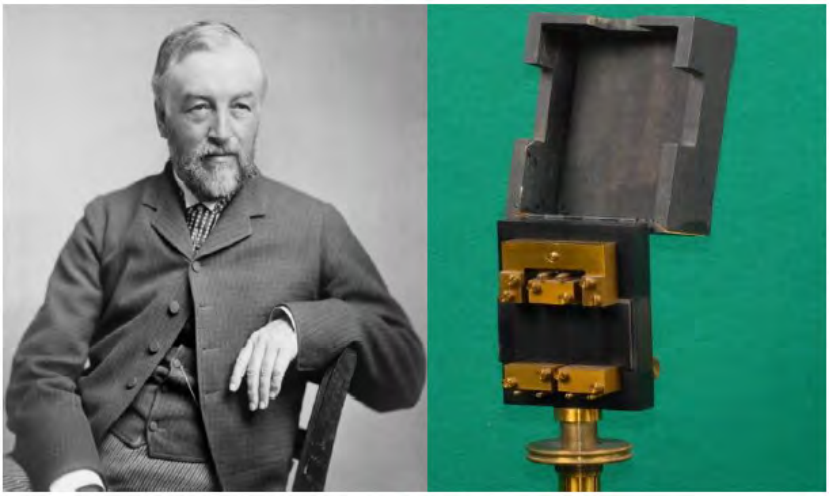

Fig. 15 Samuel Langley e bolometro.

Il bolometro è uno strumento molto sensibile, in grado si misurare l'energia radiante della radiazione elettromagnetica, indipendentemente dalla lunghezza d'onda considerata. Al suo interno è posizionata una lamina sottile di metallo rivestita di nero-fumo; il tutto viene poi inserito in un circuito elettrico. Quando la lamina è esposta alla radiazione elettromagnetica, si comporta come un **corpo nero**: assorbe tutta l'energia radiante, si riscalda e, conseguentemente, varia la sua resistenza elettrica. Misurando tale variazione di resistenza si risale all'energia assorbita.

Nel bolometro di Langley la lamina di metallo è costituita da una sottile lamina di platino. Utilizzando tale strumento in un esperimento, Langley, riuscì a rilevare una mucca a circa quattrocento metri di distanza.

Un'altra importante invenzione che ha caratterizzato ed ha reso possibile il mercato degli apparecchi termografici è il **vaso di Dewar** (1892) inventato dall'inglese **Sir James Dewar**. Questa invenzione rappresentò una vera e propria svolta in campo termografico, in quanto, tutti gli apparecchi termografici (fino al 1997) necessitavano di un sistema di raffreddamento in grado di raffreddare il sensore in modo tale da poter misurare la radiazione infrarossa.

Il sensore veniva raffreddato fino ad una temperatura di -196 °C mediante l'uso di azoto liquido contenuto, appunto, in un vaso di Dewar.

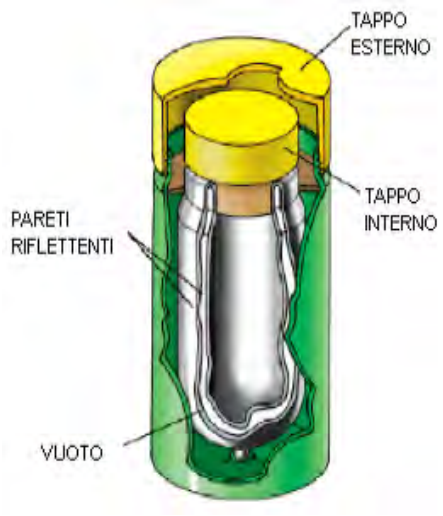

Fig. 16 Schema del vaso di Dewar.

Un'importante svolta in ambito militare si ebbe intorno ai primi decenni del '900, quando furono sviluppati i primi strumenti che resero possibile la visione notturna (primi **convertitori di immagine**).

Costituiti da un **illuminatore a luce infrarossa** e da un corrispondente **rilevatore**, permettevano di individuare un oggetto, un nemico o il campo di battaglia, senza la presenza di luce visibile. Questa strategia fu abbandonata poco dopo in quanto l'illuminatore all'infrarosso era facilmente individuabile dai possibili nemici, mediante l'uso del solo rilevatore. Negli anni successivi è stata sviluppata una tecnologia apposita per strumenti privi di raggio di ricerca.

Tale tecnologia è stata protetta da brevetti militari fino agli anni ‘60. Successivamente, nel 1964, compaiono le prime strumentazioni a scopo civile, tutt’ora ampiamente diffuse, quali ad esempio telecamere con ricevitore e illuminatore a luce infrarossa.

Fig. 17 Telecamera per video sorveglianza notturna.

2.2 PRINCIPI FISICI

2.2.1 TEORIA DELLA TERMOGRAFIA

Alla base della teoria della termografia vi sono la definizione di **corpo nero**: "*corpo in grado di assorbire tutte le radiazioni che lo colpiscono a qualsiasi lunghezza d'onda*", e la **legge di Kirchhoff** (**G. R**. **Kirchhoff** 1824-1887), la quale afferma che "*un corpo in grado di assorbire tutte le radiazioni a una lunghezza d'onda qualsiasi è ugualmente in grado di emettere radiazioni*". La costruzione di una sorgente di radiazione di un corpo nero è in linea di principio abbastanza semplice: si pensi ad una scatola nascosta alla luce (perfettamente chiusa) ad eccezione di un piccolo foro praticato su uno dei lati. Qualsiasi radiazione che entri all'interno del foro viene assorbita e diffusa attraverso diverse **riflessioni**, in modo che solo una parte infinitesimale della radiazione possa uscire. Se la cavità è riscaldata uniformemente e in maniera adeguata, questa diventa un **radiatore a cavità**, generando così la radiazione di un corpo nero, le cui caratteristiche sono stabilite in relazione alla temperatura della cavità stessa. Tali radiatori sono utilizzati per la **calibrazione** degli strumenti termografici nelle prove di laboratorio perché servono come sorgenti di radiazioni standard (rappresentano un riferimento di temperatura). Se la temperatura del corpo nero aumenta fino a un valore maggiore o uguale a 525 °C la sorgente comincia ad entrare nella banda spettrale del visibile e, quindi, non risulta più essere nera. Possiamo, quindi, definire la **temperatura di colore** di un oggetto come la temperatura che un corpo nero dovrebbe avere per essere come l'oggetto considerato. La radiazione emessa da un corpo nero è descritta attraverso tre espressioni:

1. **Legge di Planck**;
2. **Legge di spostamento di Wien**;
3. **Legge di Stefan-Boltzmann**.

La prima, la legge di Planck (**Max Planck** 1858-1947) descrive la **distribuzione spettrale della radiazione emessa da un corpo nero**:

$$W_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)} \times 10^{-6} \text{ [Watt / m}^2\text{, µm]} \text{ (legge di Planck)}$$

$W_{\lambda b}$	**Emittanza spettrale energetica del corpo nero alla lunghezza d'onda λ**
c	Velocità della luce = 3 x 10^8 m/s
h	Costante di Planck = 6,6 x 10^{-34} Joule sec
k	Costante di Boltzmann = 1,4 x 10^{-23} Joule / Kelvin
T	Temperatura assoluta (Kelvin) di un corpo nero
Λ	Lunghezze d'onda µm

Tab. 8 Legge di Planck.

Tale legge, rappresentata graficamente a diverse temperature, genera una famiglia di curve, per ognuna delle quali si ha che, quando λ=0 l'emittanza spettrale è zero; poi essa cresce rapidamente fino ad arrivare al massimo pari a λmax e, dopo averlo raggiunto, decresce nuovamente avvicinandosi fino a valori prossimi allo zero per valori elevati della lunghezza d'onda.

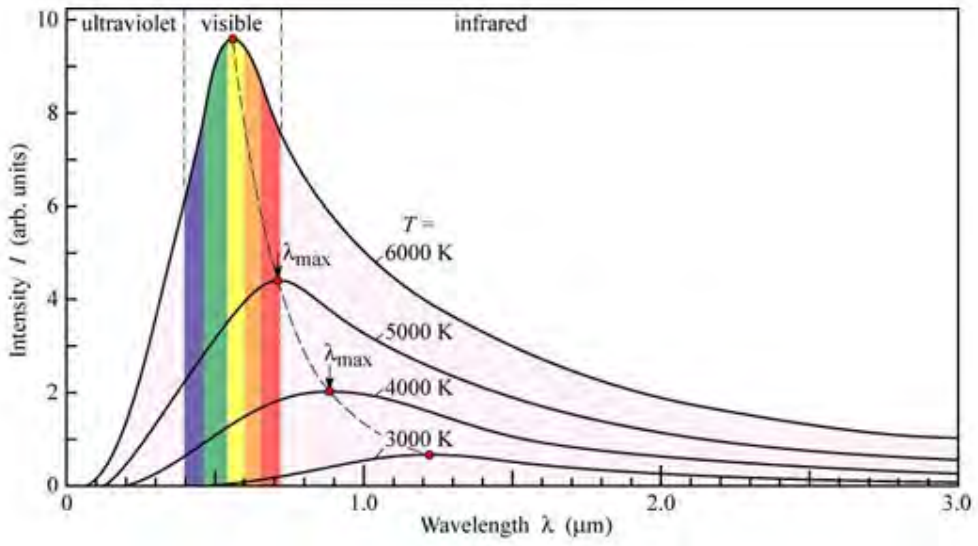

Fig. 18 Rappresentazione grafica legge di Planck (y=emittanza energetica spettrale, x=lughezza d'onda).

Differenziando la formula di Planck rispetto a λ e identificando il massimo (λmax) otteniamo:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \ [\mu m]$$

Nota come **formula di Wien** (**Wilhelm Wien** 1864-1928), la relazione rappresenta matematicamente il fenomeno in base al quale i colori variano dal rosso al giallo con l'aumentare della temperatura. La lunghezza d'onda del colore considerato sarà pari a λmax; una buona approssimazione per tale valore, prendendo in considerazione una determinata temperatura del corpo nero, si ottiene applicando la formula approssimata 3000⁄T [μm].

Integrando la formula di Planck tra gli estremi λ=0 a λ=∞, otteniamo l'***emittanza radiante totale*** (Wb):

$$W_b = \sigma T^4 \ [\text{Watt} / \text{m}^2] \ \textbf{(legge di Stefan-Boltzmann)}$$

dalla quale si evince che la quantità totale di energia emessa da un corpo nero (Wb) è direttamente proporzionale alla temperatura elevata alla quarta ed identifica l'area sottesa dalla curva di Planck relativa alla temperatura considerata.

2.2.2 LA TRAMISSIONE DEL CALORE

La trasmissione di calore tra due corpi avviene spontaneamente quando si ha una differenza di temperatura tra loro, con passaggio di calore dall'oggetto più caldo a quello più freddo fino al raggiungimento di un equilibrio termico tra i due, come asserisce il secondo principio della termodinamica: "*l'entropia di un sistema isolato lontano dall'equilibrio termico tende a salire nel tempo, finché l'equilibrio non è raggiunto*". Il corpo caldo trasmette a quello freddo parte della sua energia termica aumentandone l'agitazione molecolare: la differenza di temperatura tra i due corpi rappresenta la causa del trasferimento di calore.

Il calore si propaga mediante tre diverse modalità:

- Conduzione;
- Convezione;
- Irraggiamento.

CONDUZIONE

La conduzione avviene quando due corpi a differenti temperature si trovano a contatto diretto; il corpo più caldo riscalda il corpo più freddo mediante cessione di parte della propria energia termica.

L'energia termica del corpo più caldo, che a livello microscopico s'identifica in energia cinetica vibrazionale molecolare, è trasmessa al corpo a più freddo con una velocità direttamente proporzionale alla **conducibilità termica del materiale** (**k**). Quindi l'energia trasmessa per conduzione da un corpo più caldo a uno più freddo, potrà essere calcolata mediante la **legge di Fourier**:

$$q = \left(\frac{k}{s}\right) A(T_1 - T_2)$$

q	**Energia trasmessa [W]**
k	Conducibilità termica del materiale in cui avviene il passaggio di calore [W/mK]
s	Spessore della sezione attraversata dal calore [m]
A	Area della sezione considerata [m^2]
T_1	Temperatura del corpo più caldo [K o °C]
T_2	Temperatura del corpo più freddo [K o °C]

Tab. 9 Legge di Fourier.

CONVEZIONE

Può essere definita come una particolare modalità di conduzione: il corpo caldo riscalda quello più freddo, senza che vi sia alcun tipo di contatto diretto tra i due corpi, ma grazie alla presenza di un "**fluido termovettore**" che si riscalda per conduzione a contatto con il corpo caldo e, successivamente, cede calore quando viene a contatto con il corpo più freddo.

Questo secondo tipo di trasmissione di calore è descritto dalla **legge di Newton**:

$$q_c = h\, A_s \left(T_1 - T_f\right) \text{ ([1])}$$

q_c	Calore ceduto per convezione [W]
A_s	Area della superficie del corpo più caldo [m^2]
h	Coefficiente di convezione termica[11] [W/m^2K]
T_1	Temperatura della superficie del corpo più caldo [K o °C]
T_f	Temperatura del fluido termovettore [K o °C]

Tab. 10 Legge di Newton.

IRRAGGIAMENTO

L'irraggiamento consiste in un meccanismo completamente indipendente da qualsiasi forma di contatto, anche quello legato alla presenza di un fluido termovettore (può avvenire anche nel vuoto).

Il passaggio di calore avviene mediante emissione e assorbimento di radiazioni elettromagnetiche da parte dei corpi in esame. Qualsiasi corpo a temperatura superiore allo zero assoluto (0 K o -273.15 °C) emette radiazioni elettromagnetiche. L'emissione dipende dell'agitazione molecolare delle particelle che costituiscono il corpo esaminato. Avremo inoltre una dipendenza diretta tra emissione di radiazioni, agitazione molecolare e temperatura: maggiore è l'energia cinetica molecolare, maggiore sarà la temperatura e, di conseguenza, maggiore sarà l'emissione di radiazioni.

LEGGE DI KIRCHHOFF

Gli oggetti reali non si comportano come corpi neri e, quindi, non rispettano quasi mai le leggi sopra illustrate, anche se, alcuni, in casi specifici si possono comportare in maniera simile. I fenomeni che inducono un oggetto reale a non comportarsi come un corpo nero sono tre: una parte (**α**) della radiazione incidente sarà **assorbita**, un'altra frazione (**ρ**) sarà invece **riflessa** e la restante parte (**τ**) verrà **trasmessa**, cioè attraversa il corpo (legge di Kirchhoff).

Si definiscono quindi:

- **Coefficiente di assorbimento spettrale α_λ** = rapporto tra flusso energetico spettrale assorbito e quello incidente;
- **Coefficiente di riflessione spettrale ρ_λ** = rapporto tra flusso energetico spettrale riflesso e quello incidente;
- **Coefficiente di trasmissione spettrale τ_λ** = rapporto tra flusso energetico spettrale trasmesso e quello incidente.

La loro somma è sempre unitaria $\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$.

Per i **materiali opachi $\tau_\lambda=0$** e quindi l'espressione si semplifica in $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$.

Altro termine importante, denominato **emissività ε**, è il rapporto tra il flusso emesso da un oggetto e quello emesso da un corpo nero alla stessa temperatura e lunghezza d'onda.

Tale fattore descrive la frazione ε dell'emittanza radiante di un corpo nero prodotta da un oggetto reale a una data temperatura e ci permette di definire il coefficiente:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{W_{\lambda o}}{W_{\lambda b}} \text{ (emissività spettrale)}$$

In generale possiamo distinguere tre tipi di sorgenti di radiazione:

1. **Corpo nero $\varepsilon_\lambda = \varepsilon = 1$**;
2. **Corpo grigio $\varepsilon_\lambda = \varepsilon$** = costante inferiore a 1;
3. **Radiatore selettivo** per cui varia in base alla lunghezza d'onda.

Secondo la legge di Kirchhoff, per ogni materiale, avremo che l'emissività è pari all'assorbimento, quindi: $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$ per qualsiasi temperatura e lunghezza d'onda. Di conseguenza per un **corpo opaco**, poiché $\alpha_\lambda + \rho_\lambda = 1$, otteniamo $\varepsilon_\lambda + \rho_\lambda = 1$.

Per **materiali** estremamente **lucidi** ε_λ tende a zero (**$\varepsilon_\lambda \rightarrow 0$**), mentre per **materiali** perfettamente **riflettenti** avremo **$\varepsilon_\lambda = 0$** e quindi **$\rho_\lambda = 1$** (es.: specchio).

La legge di Stefan-Boltzmann per un corpo nero ($W_b = \sigma T^4$) diventa, invece, per un corpo grigio:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \ [\mathrm{Watt} / \mathrm{m}^2]$$

Si può facilmente osservare come il potere emissivo totale di un corpo grigio sia uguale a quello di un corpo nero alla stessa temperatura moltiplicato per il valore dell'emissività ε del corpo grigio (costante inferiore a uno).

Esistono, inoltre, materiali non metallici che risultano essere semitrasparenti agli infrarossi, come ad esempio una spessa lastra di plastica. Per questo tipo di materiale avremo un'emissività effettiva che è pari a:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{(1-\rho_\lambda)(1-\tau_\lambda)}{1-(\rho_\lambda \tau_\lambda)}$$

mentre quando la lastra è opaca:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$$

2.3. MISURAZIONE: FONTI DI ERRORE

Riassumendo, la radiazione registrata dalla termocamera è composta da raggi emessi, riflessi e trasmessi, provenienti dagli oggetti all'interno del campo visivo dello strumento.

I raggi infrarossi registrati dalla termocamera sono quindi composti:

- dalla *radiazione emessa dall'oggetto* di misura;
- dalla *riflessione della temperatura* ambiente;
- dalla trasmissione della radiazione da parte dell'oggetto di misura.

Poiché la trasmissione ai fini pratici risulta spesso irrilevante, si assume $\varepsilon + \rho = 1$.

Per la termografia questo significa che quanto minore è l'emissività, tanto maggiore è la quota di raggi infrarossi riflessi, tanto è più difficile effettuare una misura precisa della temperatura e tanto più importante è che la compensazione della temperatura riflessa (RTC), parametro regolabile sullo strumento, sia impostata correttamente.

Gli oggetti di misura con **emissività elevata** (**$\varepsilon \geq 0.8$**): hanno un fattore di riflessione basso → la loro temperatura può essere misurata molto facilmente con la termocamera.

Gli oggetti di misura con **emissività media** (**$0.8 < \varepsilon < 0.6$**): hanno un fattore di riflessione medio → la loro temperatura può essere misurata con la termocamera.

Gli oggetti di misura con **emissività bassa** (**$\varepsilon \leq 0.6$**): hanno un fattore di riflessione elevato → la loro temperatura può essere misurata con la termocamera ma i risultati devono essere esaminati molto attentamente, tenendo conto nel calcolo della T della compensazione della temperatura riflessa (RTC).

2.3.1 VALUTAZIONE DELL'EMISSIVITÀ DELL'OGGETTO DI MISURA

Come accennato, la valutazione dell'emissività dell'oggetto è una procedura fondamentale per poter effettuare un'indagine termografica. Assicurarsi che l'impostazione dell'emissività sia corretta è particolarmente importante se vi sono

grandi differenze di temperatura tra l'oggetto di misura e l'ambiente di misura. Se infatti la temperatura dell'oggetto di misura è superiore alla temperatura ambiente, impostazioni di emissività eccessivamente alte determinano letture della temperatura eccessivamente basse e viceversa; se la temperatura dell'oggetto di misura è inferiore alla temperatura ambiente, impostazioni di emissività eccessivamente alte determinano letture della temperatura eccessivamente alte e viceversa.

La termocamera deve quindi, in ogni momento, conoscere la tipologia dell' oggetto sta rilevando per poter fornire la temperatura dell'oggetto stesso, avvicinandosi il più possibile a quella reale. Qualora ci si trovasse a dover analizzare un oggetto la cui emissività non è nota, si può effettuare la stima dell'emissività dell'oggetto mediante l'utilizzo di una targhetta ad emissività nota. La procedura consiste nel posizionare sull'oggetto da indagare un target, solitamente nastro isolante nero per elettricisti, per poi procedere a innalzare la temperatura dell'oggetto di misura e, utilizzando il puntatore della termocamera, misurare la temperatura sul target impostando l'emissività di quest'ultimo a 0,97 (valore noto). L'operatore andrà poi a fissare un punto di misura sull'oggetto ad emissività non nota e modificherà il dato dell'emissività in termocamera fino ad ottenere la stessa temperatura rilevata sul target; a questo punto è possibile stimare l'emissività dell'oggetto da rilevare.

Una procedura analoga consiste nell'utilizzo di un termometro a contatto: l'operatore andrà a misurare la temperatura reale dell'oggetto da rilevare, per poi posizionare un punto di misura con la termocamera sull'oggetto stesso e modificherà il valore dell'emissività della termocamera fino ad ottenere la temperatura rilevata col termometro a contatto. Se invece tale operazione non è possibile, si ricorre alle tabelle di emissività.

È da precisare che questo tipo di procedure vengono ignorate in alcune applicazioni nelle quali ciò che importa è la differenza di temperatura rilevata tra due zone, non la precisione del dato in un punto.

2.3.2 AREA DI MISURA

Per evitare banali errori legati all'area di misura è necessario introdurre le definizioni di FOV (field of view) e di IFOV (istantaneous field of view).

FOV: Campo visivo.

È una piramide a base rettangolare che ha per vertice la matrice che costituisce il sensore della termocamera, e per base il campo visivo della termocamera (Horizontal-FOV x Vertical-FOV).

E' espresso in gradi, e rappresenta l'area che la termocamera è in grado di vedere in funzione della distanza.

IFOV: Campo visivo istantaneo.

Un sensore è costituito da una matrice di tanti elementi, o pixel, che danno luogo all'immagine completa; per esempio, un sensore da 320X240 cellette ha in totale 76.800 pixels.

L'IFOV viene definito come un angolo solido, una piramide con base rettangolare il cui vertice corrisponde ad un pixel del sensore, mentre la base costituisce la grandezza del pixel ad una certa distanza.

Essendo un angolo solido, viene espresso in milliradianti e rappresenta in pratica la porzione di campo visivo che corrisponde ad ogni singolo pixel (nell'esempio considerato, 1/76.800 del campo visivo totale).

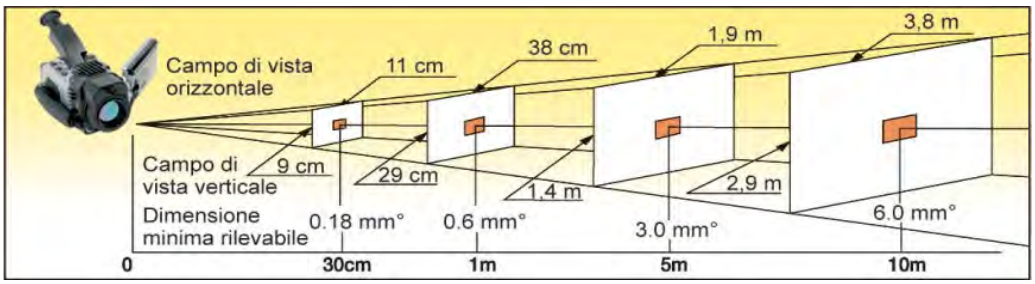

Fig. 19

Tali indicatori sono in relazione stretta alla caratteristica dell'obbiettivo e alla dimensione della matrice. E' fondamentale che l'IFOV sia molto più piccolo della superficie del soggetto proiettata sul sensore. E' quindi importante scegliere l'obbiettivo e la risoluzione adeguati al soggetto di ripresa per non incorrere in immagini termografiche assolutamente scadenti e non interpretabili.

2.4 TERMOCAMERA

Per effettuare le rilevazioni è stata utilizzata la termocamera **NEC H2640** del Laboratorio Stradale del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli studi di Padova.

La termocamera ha un sensore con risoluzione pari a 640x480 pixel ed è capace di rilevare differenze termiche fino ad un massimo di 0.03 °C. Essa è dotata di una fotocamera con sensore pari a 1.3 Mega Pixel con 1 Lux di sensibilità che integra la funzione di sovrapposizione visibile/infrarosso.

Inoltre, la funzione MULTIFOCUS NEC permette l'acquisizione di termogrammi con la corretta messa a fuoco di tutti i soggetti presenti nella visuale.

Fig. 20 Termocamera NEC H2640.

DATI TECNICI	
Range di misura **Range 1** **Range 2** **Range 3** **Range 4 opzionale**	 Da -20 a 60 °C Da -40 a 120 °C Da 0 a 500 °C Da 200 a 2000 °C (opzione visualizzazione da 0 °C a 2000 °C)
Risoluzione	≤ 0,06°C (30HZ), fino a ≤ 0,03°C (∑ 64)
Precisione	±2 °C o ±2% della lettura
Sensore	640 x 480 pixels Microbolometro non raffreddato radiometrico
Range spettrale	Da 8 a 13µm

I.F.O.V	0,6mrad (0,6mm^2 a 1mt di distanza)
Distanza di fuoco	Da 30cm all'infinito
Campo di vista	21.7°(H) x 16.4°(V)
Frequenza di acquisizione	30 Hz (frames al secondo)
Display	Oculare & Monitor LCD 5.6" orientabile e removibile
Risoluzione A/D	14 bits
Funzioni di visualizzazione	Continua / Fermo immagine Infrarosso / Visibile
Messa a fuoco	Automatica ottica e termica (livello e sensibilità) o manuale
Correzione remissività	Da 0.10 a 1.00 (con passi di 0.01) tabella remissività materiali a bordo
Correzione param. ambiente	Temperatura ambiente; umidità; distanza oggetto; Temperatura background
Funzioni di visualizzazione immagine	Visualizzazione scala di temperature graduata Colore/monocromatico, positivo/negativo Livelli colore: 16, 32, 64, 128, 256 Scala colori selezionabili: 6 Visualizzazione livello batteria Fusione immagine infrarosso/visibile/Fusione IR/Visibile
Funzioni elaborazione immagine	Visualizzazione temperatura/emissività: 10 spot Visualizzazione temperatura aree: 5 box Visualizzazione Δt Visualizzazione temperatura Max e Min Allarme: sonoro e fermo-immagine su schermo intero o su area definita Zoom: 2x; 4x; 8x Isoterme: 4 Profilo termico su assi X e Y Funzione annotazione testuale e vocale 30sec Multi-Focus con 16/32 frames di elaborazione Sharpness filtro; Median filtro; Average filtro Rotazione Immagine di 180°
Miglioramento termico	∑ 2; 8; 16; 32; 64 frames
Memoria di registrazione	Compact flash memory card Memoria RAM interna per funzione real-time (832 frames a 30Hz) Formati registrazione: .Six .Bmp .Jpeg
Interfaccia	IEEE 1394; RS 232C; USB 2.0; Uscita Video RCA PAL/NTSC; S-Video
Fotocamera	Integrata; sensore 1280 x 1024 pixels; auto esposizione; sensibilità 1 lux; illuminatore
Temperatura e umidità operativa	Da –15 a 50°C, max 90% Umidità relativa
Temperatura e umidità di conservazione	Da –40 a 70°C, max 90% Umidità relativa

Tab. 11 Dati tecnici termocamera.

3. ANALISI SPERIMENTALE

3.1 SCOPO DELL'ANALISI

L'idea di partenza di questo elaborato era quella di valutare la possibile differenza di temperatura tra il manto stradale e la pavimentazione munita di segnaletica, in funzione della sua localizzazione, la modalità di verniciatura (ripasso o stesura di nuova segnaletica) e le condizioni meteorologiche.

Successivamente si è provveduto a di collegare i dati delle rilevazioni anche alle caratteristiche di MACRORUGOSITA' e RESISTENZA AL DERAPAGGIO del manto stradale.

3.2 MODALITA' DI RILEVAZIONE

La rilevazione è stata eseguita grazie all'utilizzo della termo camera.

Questo strumento ha permesso la rilevazione della temperatura sullo strato superficiale del manto stradale e della segnaletica orizzontale.

Le rilevazioni sono state fatte nei cantieri dove erano presenti ditte specializzate nella realizzazione di segnaletica orizzontale.

La parte pratica della misurazione consisteva nel sistemare la termocamera sul supporto e raccogliere immagini termiche ad intervalli regolari (1,5,10,15,20,30,45,60 minuti).

La segnaletica interessata dal rilevamento è quella orizzontale ed in particolare:

- le linee laterali (Figure 21-23),

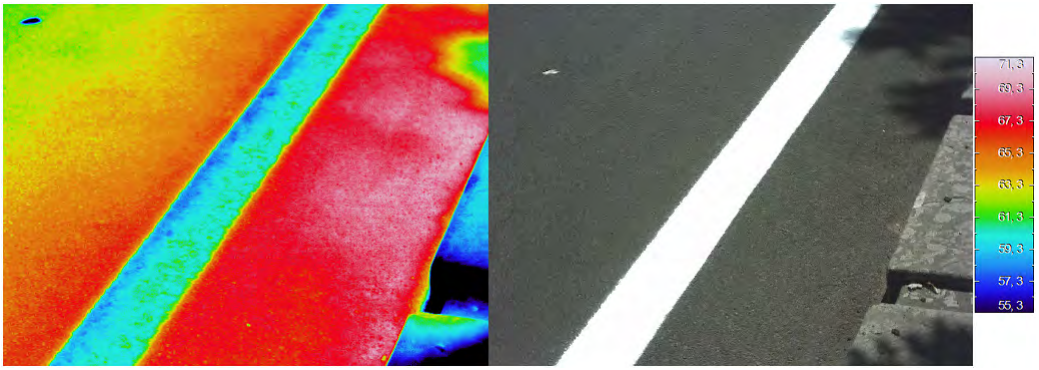

Fig. 21

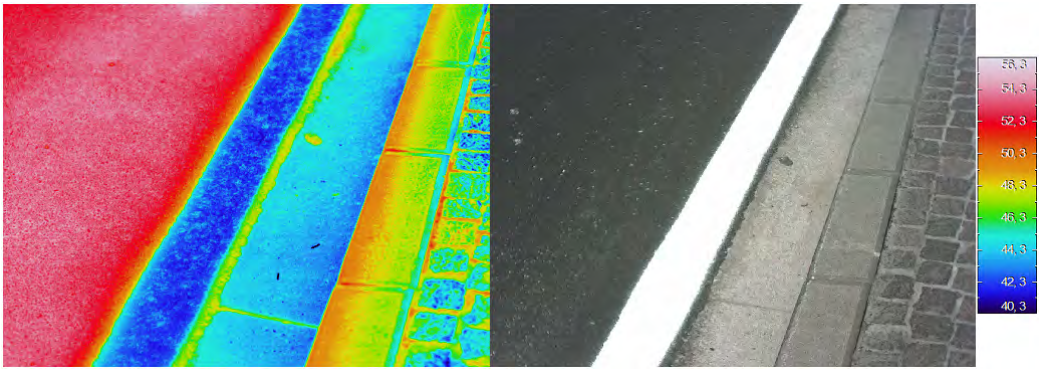

Fig. 22

Fig. 23

- le linee di mezzeria (Figure 24-26),

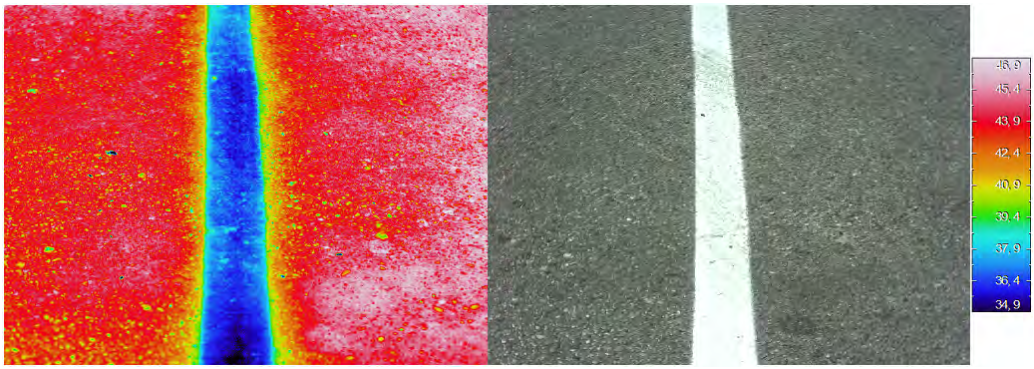

Fig. 24

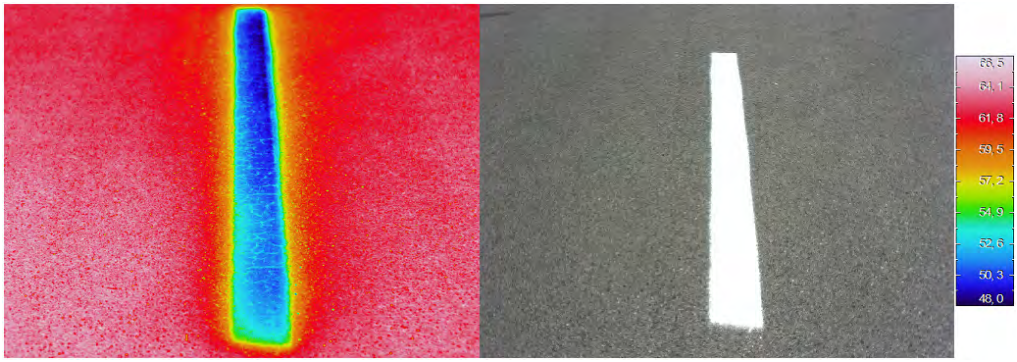

Fig. 25

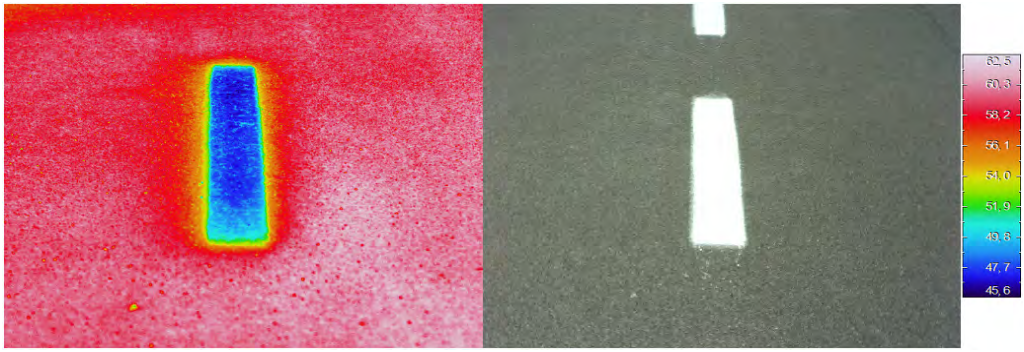

Fig. 26

- i segnali di precedenza (Figure 27-29),

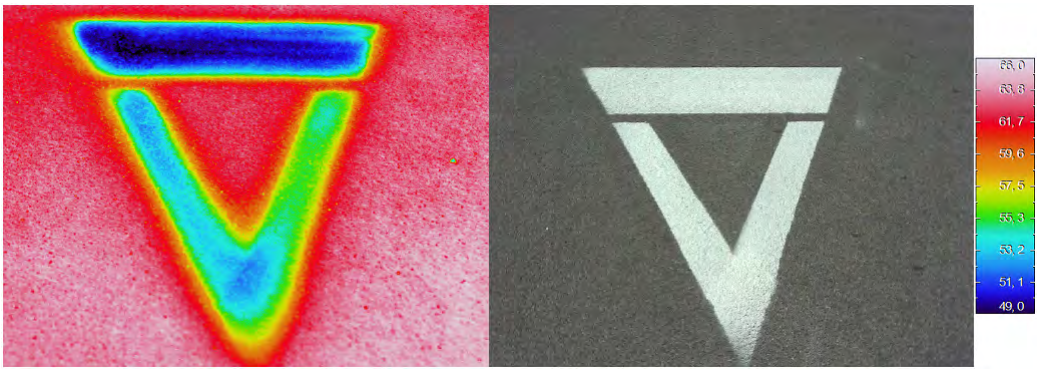

Fig. 27

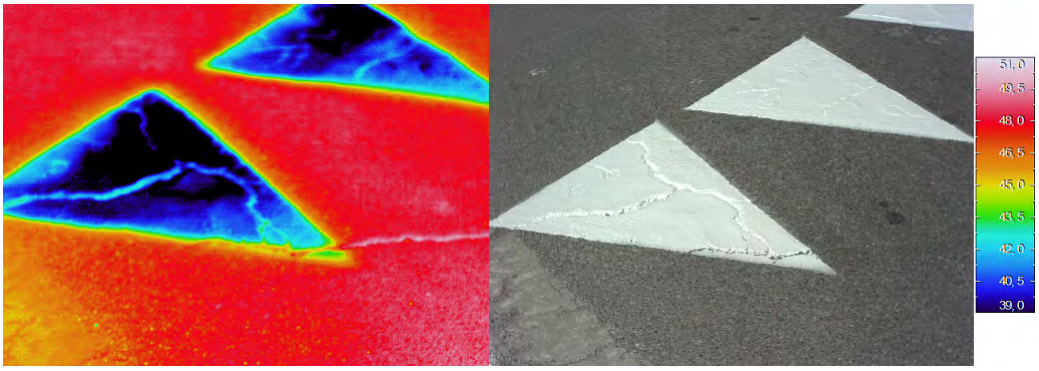

Fig. 28

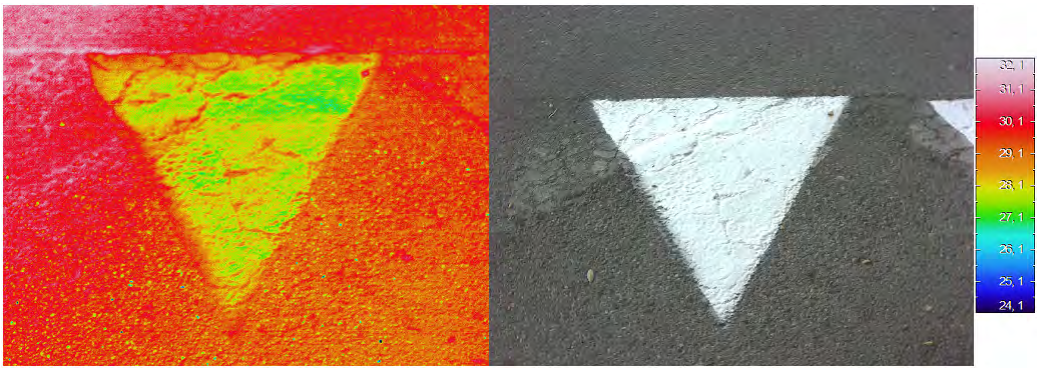

Fig. 29

- i segnali di stop (Figure 30-33),

Fig. 30

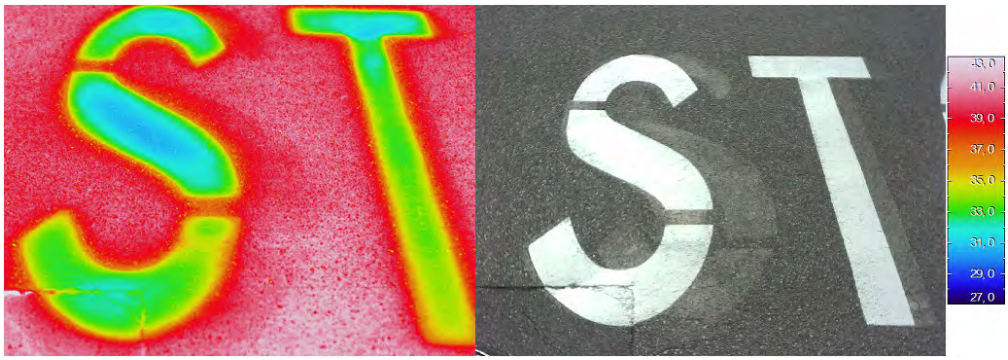

Fig. 31

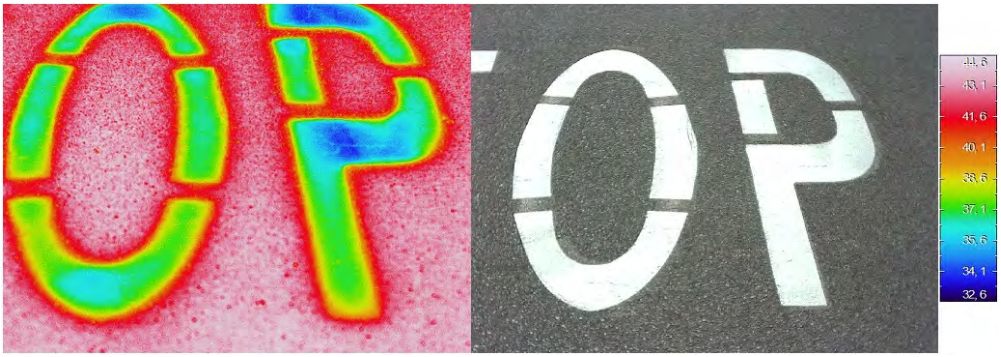

Fig. 32

- gli attraversamenti pedonali (Figure 33-35).

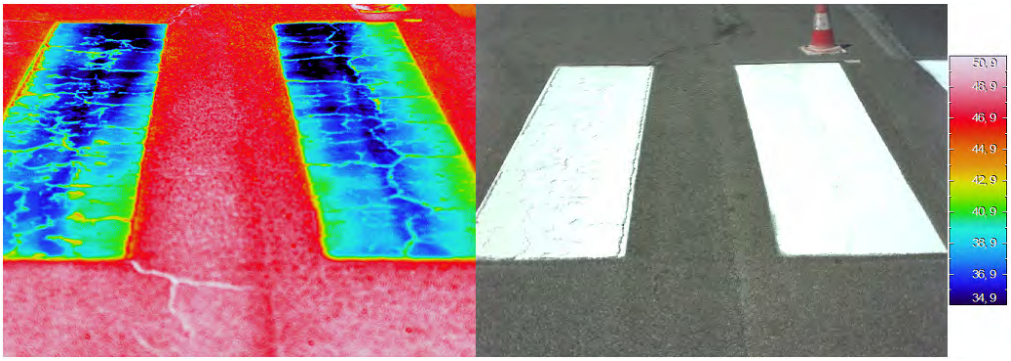

Fig. 33

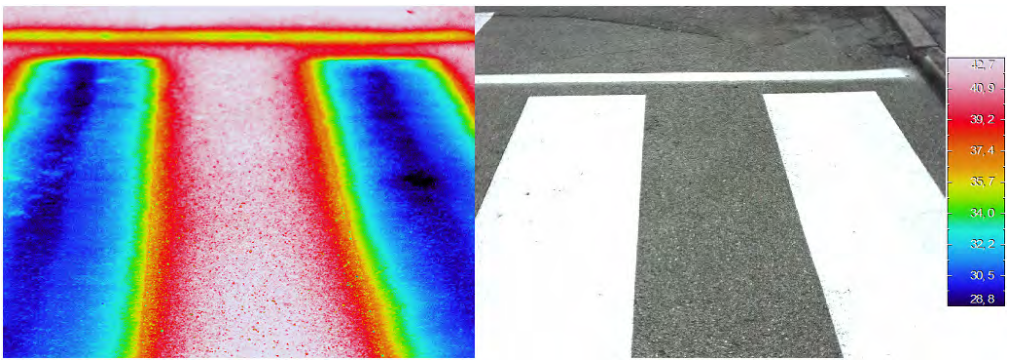

Fig. 34

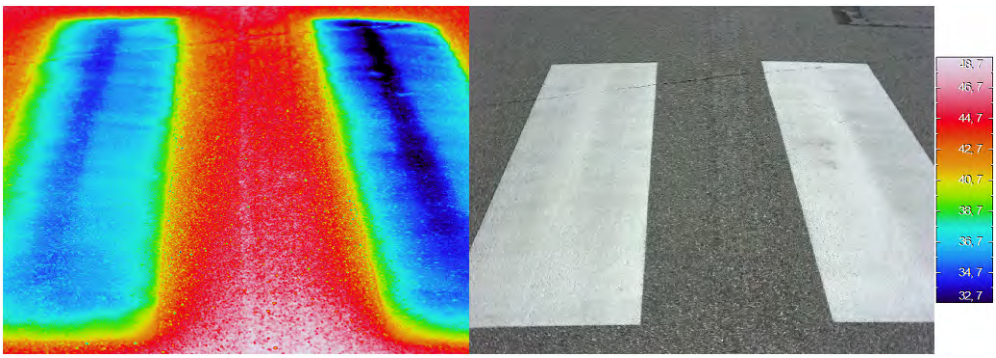

Fig. 35

3.3 IDENTIFICAZIONE CANTIERI

3.3.1 LOCALIZZAZIONE

Le misurazioni sono state effettuate in quattro cantieri, precisamente a:

- CADONEGHE (PD), Via Alberto Mario;
- TREVISO (TV), Via delle Medaglie D'oro;
- CAORLE (VE), Corso Chiggiato;
- CONEGLIANO (TV), Corso Giuseppe Mazzini.

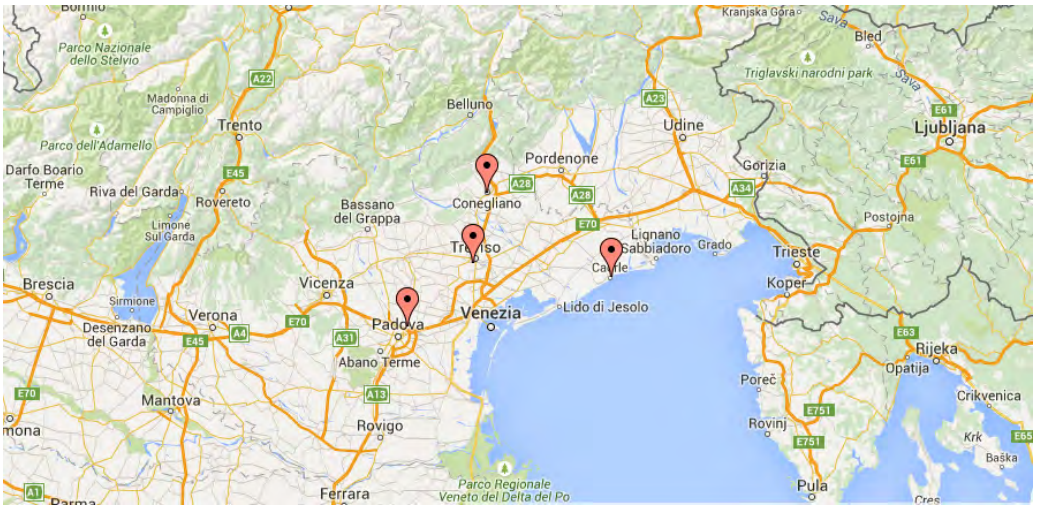

Fig. 36 Localizzazione cantieri.

3.3.2 CARATTERISTICHE CANTIERI

Le rilevazioni eseguite presso i cantieri hanno permesso di determinare le caratteristiche generali della pavimentazione, utilizzando due tipologie di prove.

MISURAZIONE DELLA PROFONDITA' DELLA MACROTESSITURA DELLA SUPERFICIE DELLA PAVIMENTAZIONE TRAMITE TECNICA VOLUMETRICA AD IMPRONTA (UNI EN 13036-1)

Il metodo volumetrico permette di determinare la profondità media della macrotessitura della superficie stradale.

Per definizione la macrorugosità di una pavimentazione è la rugosità dovuta all'insieme delle asperità superficiali intergranulari e si distingue dalla microrugosità che è dovuta alla scabrezza dei singoli elementi lapidei.

La prova consiste nello stendere sulla pavimentazione un volume noto (25000 mm^3) di sfere di vetro aventi diametro compreso tra 0,25 mm e 0,18 mm. Dalla misura del diametro dell'impronta circolare che si è venuta a formare, si calcola la profondità media della tessitura (Mean Texture Depth – MTD) come rapporto tra il volume e l'area dell'impronta.

Questo metodo di prova è comunemente denominato "metodo dell'altezza in sabbia", perché inizialmente veniva utilizzata la sabbia, in seguito sostituita con sfere di vetro che presentano una forma più uniforme rispetto ai grani di sabbia.

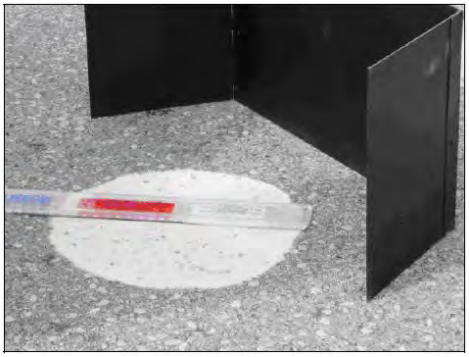

Fig. 37 Metodo volumetrico.

Descrizione dell'attrezzatura:

- ***Parabrezza portatile:*** Strumento idoneo da posizionare sulla superficie della pavimentazione per proteggere l'area di prova dal vento e dalle turbolenze prodotte dal traffico.
- ***Strumento per la distribuzione del materiale:*** disco rigido con dimensioni e caratteristiche normalizzate utilizzato per distribuire le sferette di vetro.
- ***Spazzola:*** La superficie della pavimentazione deve essere pulita accuratamente prima dell'esecuzione della prova con una spazzola.
- ***Contenitore:*** Un contenitore cilindrico, di volume noto, è utilizzato per valutare il volume di sferette di vetro distribuite sulla pavimentazione.
- ***Riga:*** Una riga viene utilizzata per determinare i diametri dell'impronta.

$$MTD = HS = 4V/\pi D^2$$

Il valore ottenuto determina le caratteristiche di macrorugosità del manto stradale:

Altezza media in sabbia (HS) [mm]	**Macrorugosità superficiale**
HS ≤ 0,20	molto fina
0,20 < HS ≤ 0,40	fina
0,40 < HS ≤ 0,80	media
0,80 < HS ≤ 1,20	grossa
HS > 1,20	molto grossa

Tab. 12

Nel cantiere di **Cadoneghe**:

Per tutte le pavimentazioni prese in esame, un valore del diametro medio dell'area ricoperta di 210 mm determina un valore di HS pari a 0.72; tale valore indica una macrorugosità superficiale MEDIA.

A **Treviso**:

Nella strada principale abbiamo un diametro medio di 240 mm corrispondente ad un HS di 0.55 che identifica una macrorugosità superficiale MEDIA.

Nella strada secondaria invece 190 mm di diametro medio, HS di 0.90 e quindi una macrorugosità superficiale GROSSA.

A **Caorle**:

Anche in questo cantiere le strade prese in considerazione presentano le medesime caratteristiche: con un diametro medio di 215 mm abbiamo un valore di HS di 0.69 che corrisponde ad una macrorugosità superficiale MEDIA.

A **Conegliano**:

La strada principale ha un diametro medio di 290 mm pari ad un HS di 0.38 che indica una macrorugosità superficiale FINA.

La strada secondaria, invece, ha macrorugosità superficiale MEDIA dovuta ad una valore di HS di 0.51 derivato da un diametro medio di 250 mm.

METODO PER LA MISURAZIONE DELLA RESISTENZA ALL SLITTAMENTO/DERAPAGGIO DI UNA SUPERFICIE METODO DEL PENDOLO (UNI EN 13036-4)

L'apparecchio portatile a pendolo misura la resistenza di attrito radente delle pavimentazioni stradali fornendo l'indice BPN (British Portable Number). Le modalità sperimentali sono descritte dal B.U. CNR 105/1985 e nella successiva UNI EN 13036-4;2003.

La prova consiste nel lasciar cadere il pendolo da una altezza normalizzata in modo da far strisciare sulla pavimentazione, per un tratto di almeno 125,5 mm, il pattino di gomma posto alla sua estremità libera. La lettura che si effettua sulla scala graduata, nel punto più alto raggiunto dal pendolo dopo lo strisciamento, consente di misurare la perdita di energia subita dal pattino a causa dell'attrito con la superficie stradale. Il test viene ripetuto 5 volte per ogni postazione di misura ed il valore rappresentativo si ottiene mediando i risultati di ciascuna determinazione. Durante la prova viene registrata inoltre la temperatura superficiale della pavimentazione in modo da apportare le dovute correzioni al BPN misurato.

Fig. 38 Skid Resistance Tester.

Descrizione dell'attrezzatura:

- ***Apparecchio portatile:*** L'apparecchio consiste in un pendolo alla cui estremità è montato, attraverso apposito supporto, un pattino. Ogni componente ha le dimensioni e peso normalizzati. L'apparecchio è fornito di

opportuni strumenti di regolazione dell'assetto in modo da assicurare la corretta traiettoria e superficie di contatto del pattino.

- ***Pattino:*** Il pattino, avente dimensioni normalizzate, consiste in un sopporto in alluminio al quale è fissata una striscia di gomma con specifiche caratteristiche meccanico-compositive.
- ***Regolo:*** Un regolo viene utilizzato per la misura della lunghezza di strisciamento del pattino sulla pavimentazione.
- ***Strumentazione termometrica:*** La temperatura della superficie della pavimentazione stradale viene misurata mediante un termometro digitale con una precisione ±0,2°C e risoluzione di 0,1°C.

Categoria	Indice BPN	Classificazione del manto
A	BPN > 65	Manto antisdrucciolevole per eccellenza
B	55 < BPN < 65	Manto abbastanza antisdrucciolevole
C	45 < BPN < 55	Manto soddisfacente in condizioni favorevoli
D	BPN < 45	Manto sdrucciolevole

Tab. 13

Con le rispettive correzioni da fare:

T [°C]	5 - 7	8 - 10	11 - 13	14 - 16	17 - 20	21 - 24	25 - 29	30 - 40
BPN	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4

Tab. 14

Cadoneghe:

Pavimentazione: manto antisdrucciolevole per eccellenza.

Il test è stato effettuato anche sulla segnaletica, evidenziando un manto abbastanza antisdrucciolevole.

Treviso:

Pavimentazione: manto antisdrucciolevole per eccellenza.

Segnaletica con manto abbastanza antisdrucciolevole.

Caorle:

Pavimentazione: manto antisdrucciolevole per eccellenza.

Segnaletica caratterizzata da un manto abbastanza antisdrucciolevole.

Conegliano:

Pavimentazione: manto antisdrucciolevole per eccellenza.

Segnaletica: Abbastanza antisdrucciolevole.

3.3 ANALISI DATI

I dati raccolti nelle rilevazioni sono stati elaborati tramite il software della termocamera che ha permesso di estrarre la media delle temperature superficiali della pavimentazione e della segnaletica stradale.

Questi valori sono stati poi inseriti in un foglio di calcolo per confrontarli per tipologia di segnaletica stradale (linea di mezzeria, linea laterale, attraversamento pedonale, segnale di precedenza e segnale di STOP); in un secondo momento è stato fatto il confronto incrociando i dati dei vari cantieri.

Nel primo grafico di ogni cantiere viene riportato l'andamento nel tempo della temperatura superficiale della pavimentazione e della segnaletica stradale orizzontale.

Nel secondo, invece, viene messo in risalto il valore della differenza di temperatura (ΔT) tra pavimentazione e segnaletica.

3.3.1 LINEA DI MEZZERIA

Di seguito la prima serie di dati, ottenuti confrontando la linea di mezzeria.

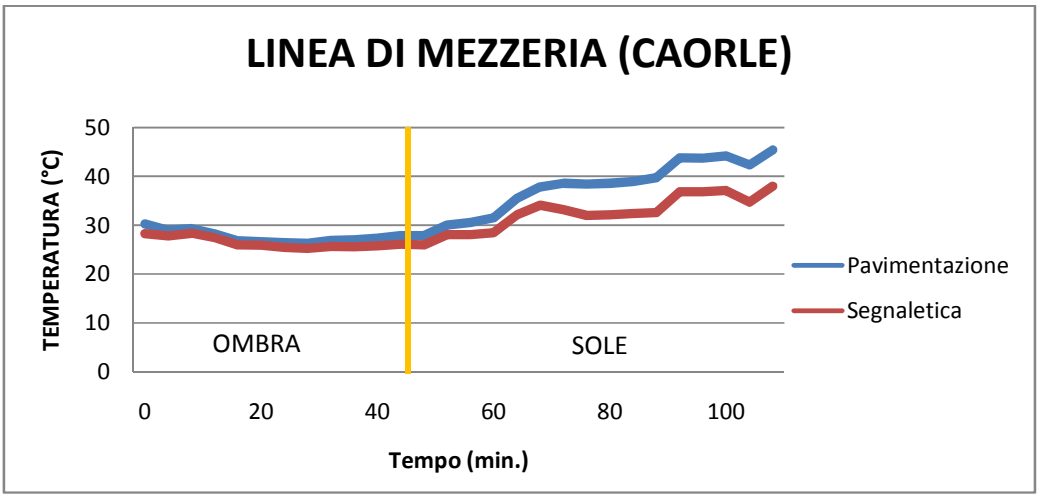

Fig. 39

Variazione di temperatura influenzata da una prima fase d'ombra seguita da una fase di completa esposizione solare.

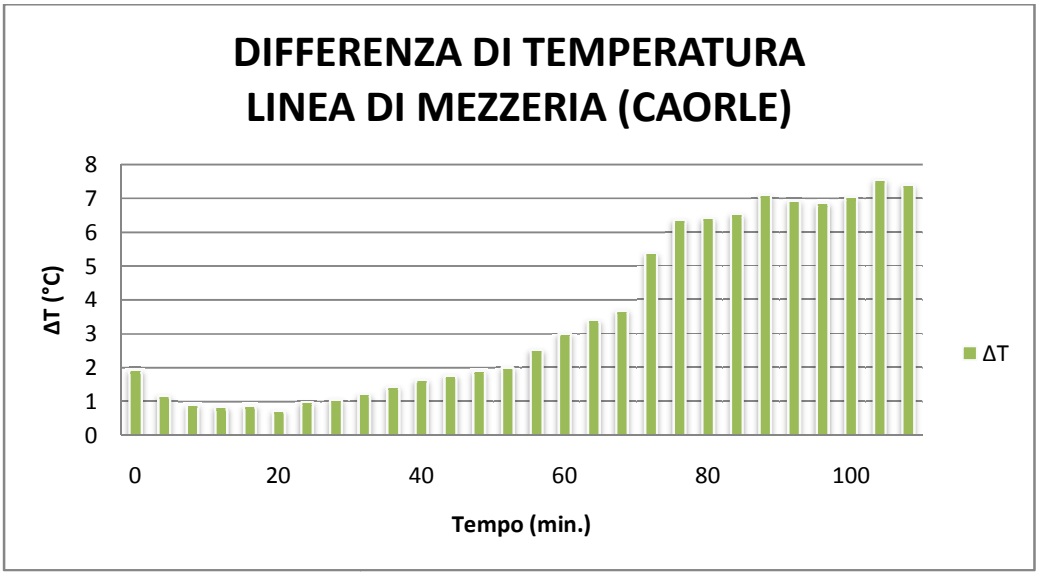
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
LINEA DI MEZZERIA (CAORLE)
ΔT (°C)
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
20
40
60
80
100
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 40

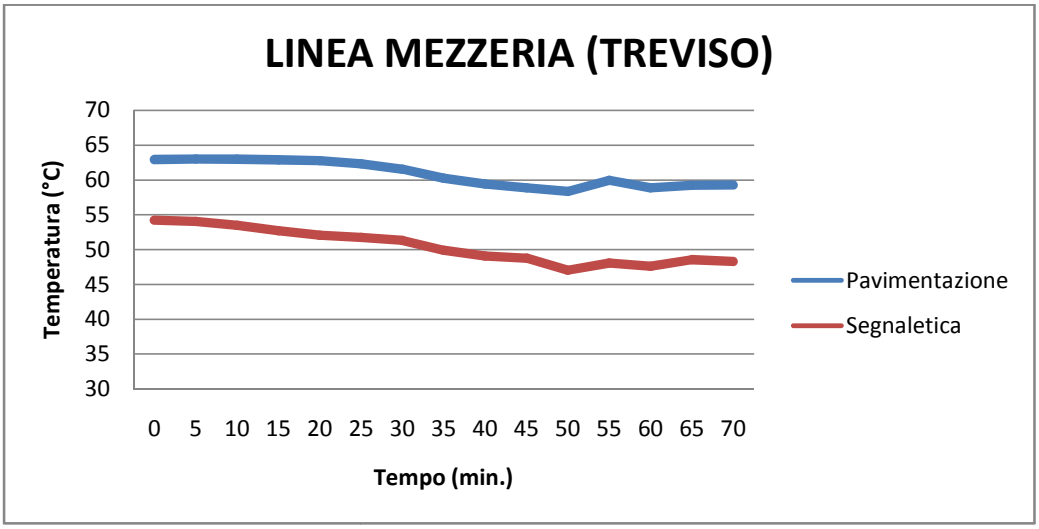
LINEA MEZZERIA (TREVISO)
Temperatura (°C)
70
65
60
55
50
45
40
35
30
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 41

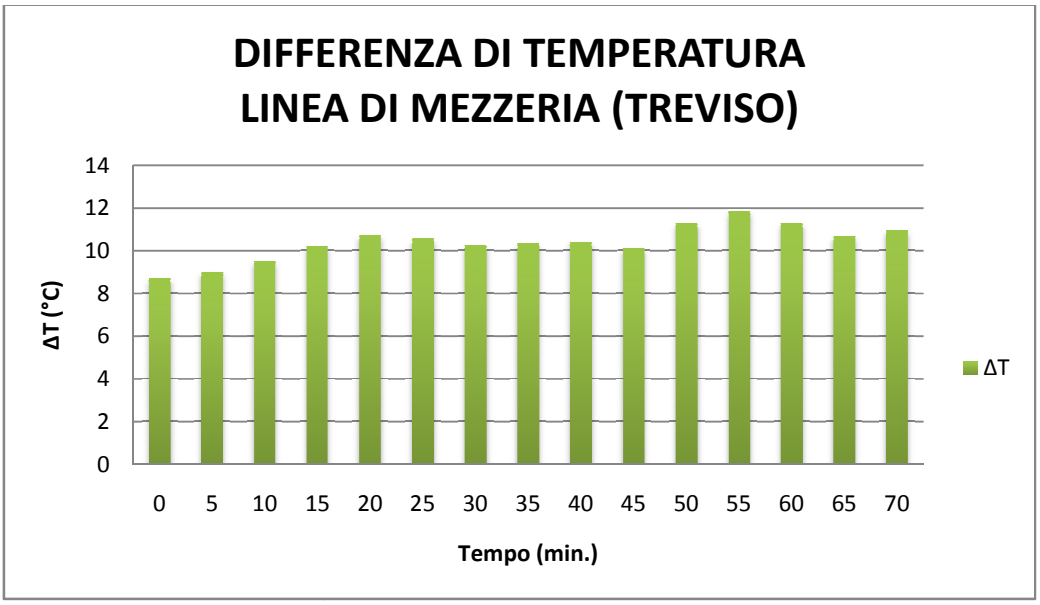
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
LINEA DI MEZZERIA (TREVISO)
ΔT (°C)
14
12
10
8
6
4
2
0
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 42

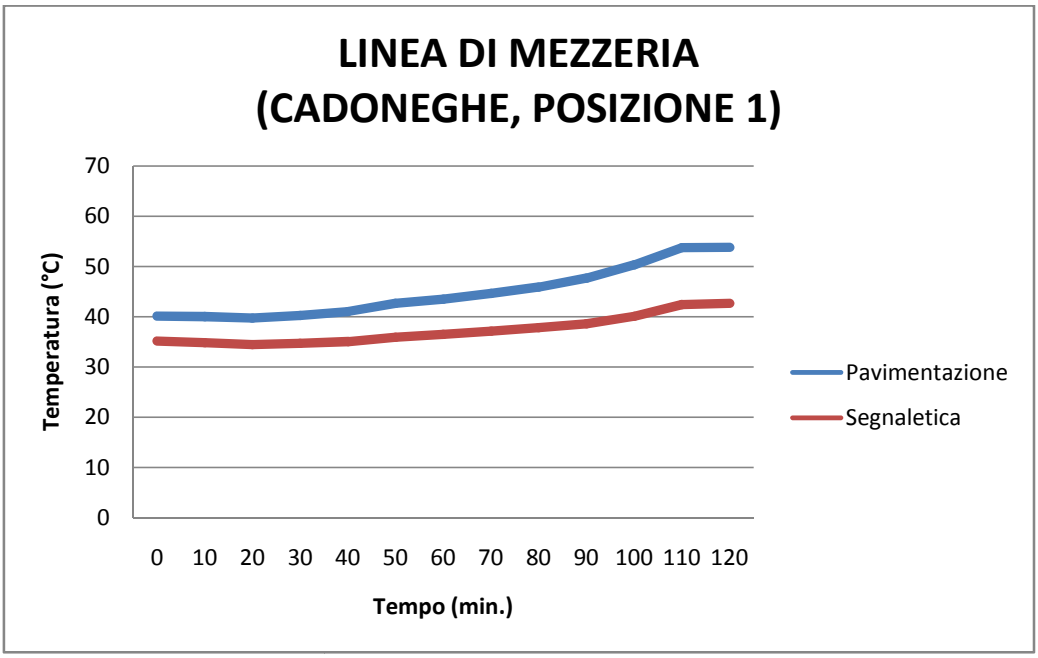
LINEA DI MEZZERIA
(CADONEGHE, POSIZIONE 1)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 43

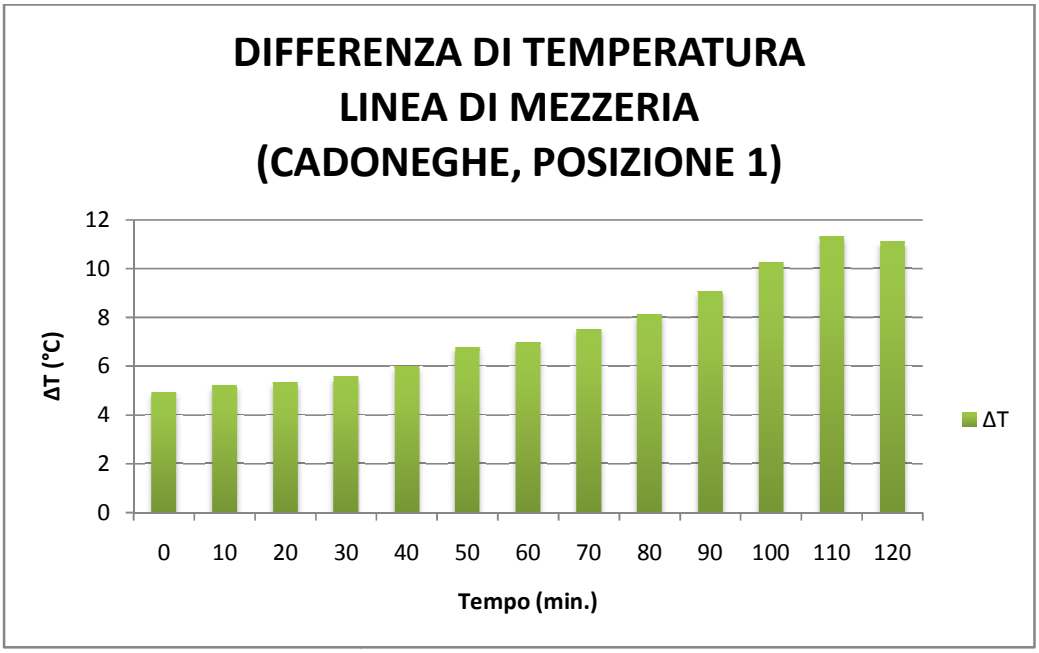
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
LINEA DI MEZZERIA
(CADONEGHE, POSIZIONE 1)
ΔT (°C)
12
10
8
6
4
2
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 44

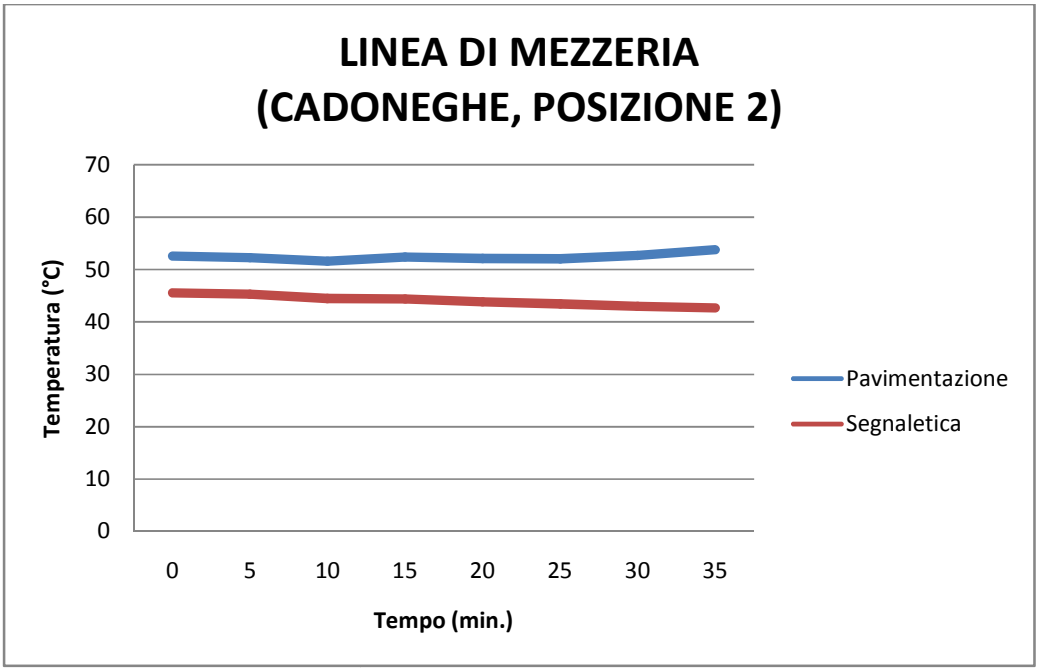
LINEA DI MEZZERIA
(CADONEGHE, POSIZIONE 2)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 45

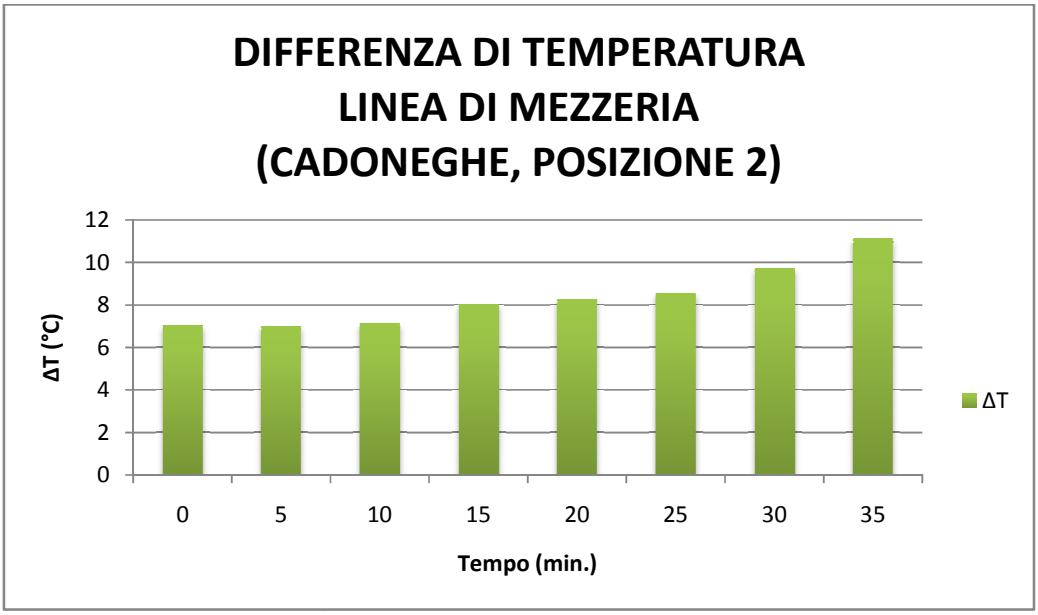

Fig. 46

Confrontando gli andamenti delle differenze di temperatura (ΔT) nei primi 30 minuti, si può notare che è il medesimo.

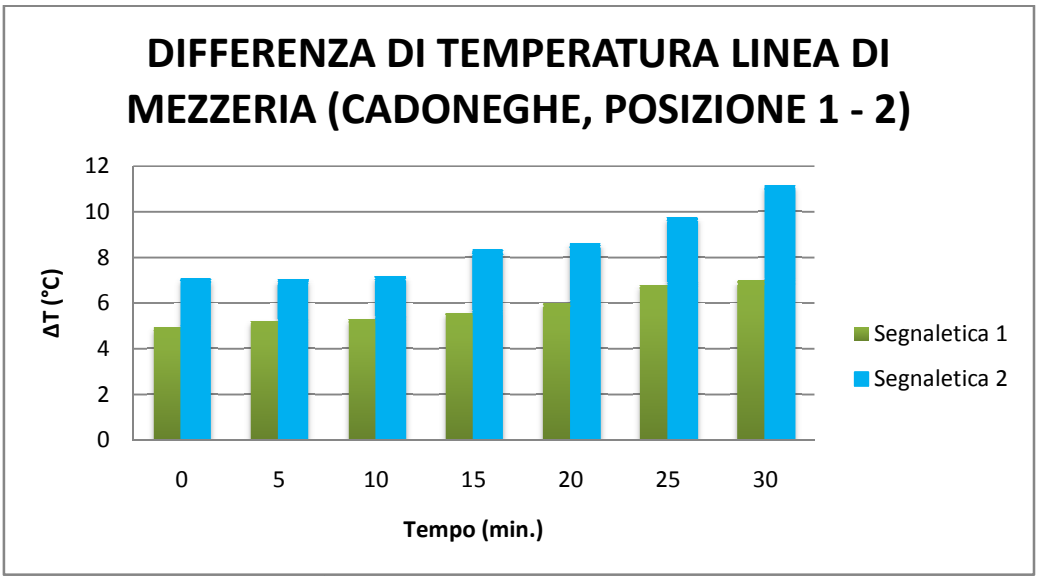

Fig. 47

La differenza di temperatura (ΔT) tra le due postazioni è dovuta al diverso orario di rilevazione.

Infatti, si nota che le temperature della seconda posizione sono maggiori rispetto alla prima.

3.3.2 LINEA LATERALE

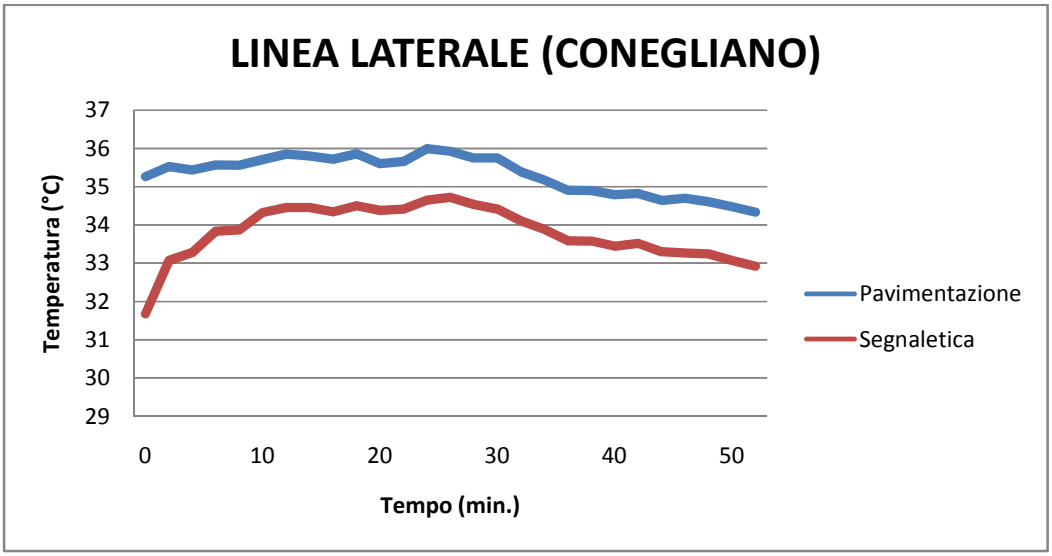

Fig. 48

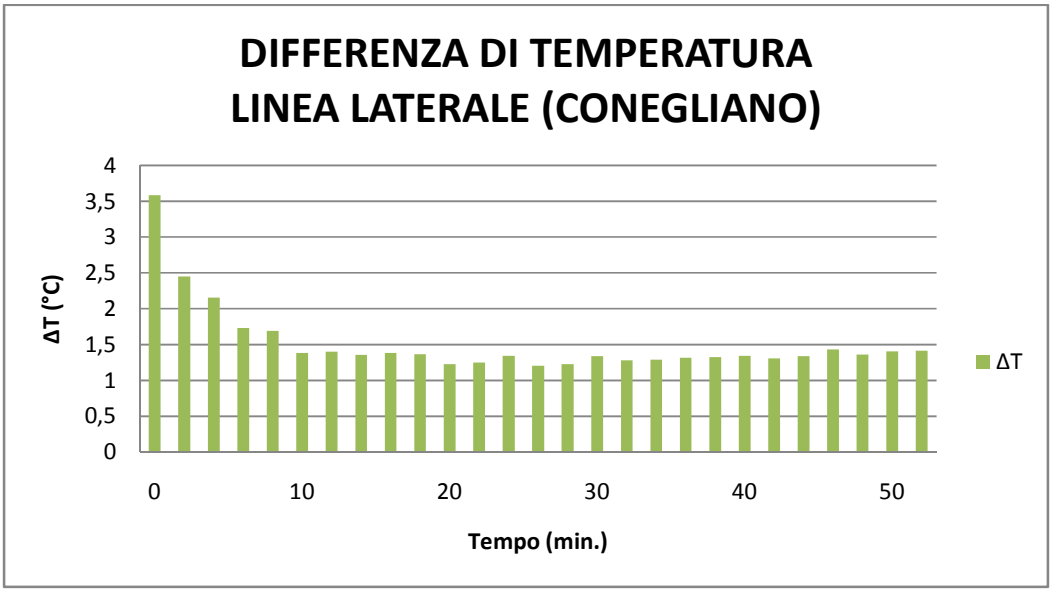

Fig. 49

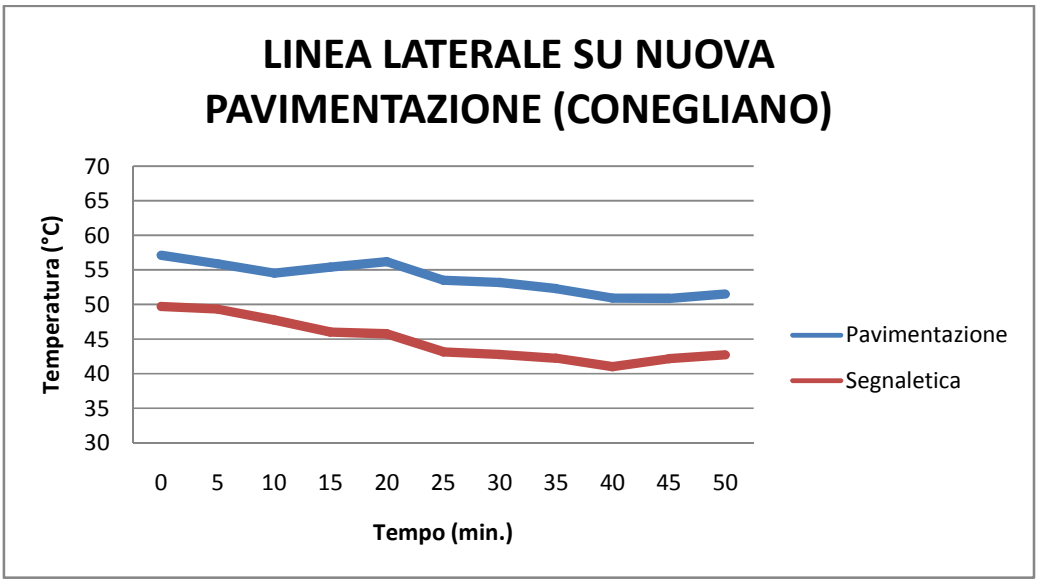
LINEA LATERALE SU NUOVA PAVIMENTAZIONE (CONEGLIANO)
Temperatura (°C)
70
65
60
55
50
45
40
35
30
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 50

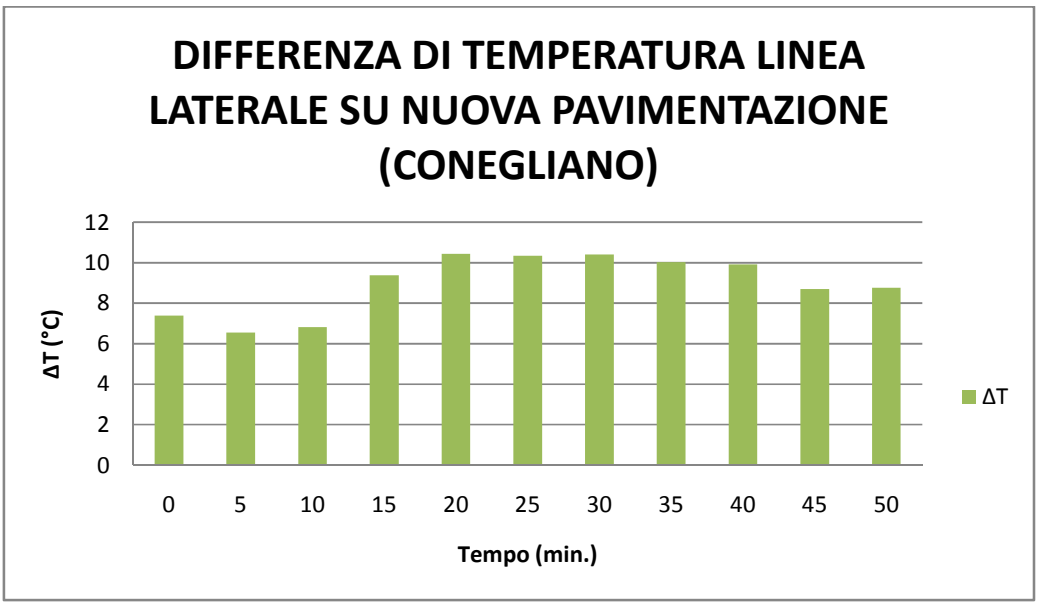
DIFFERENZA DI TEMPERATURA LINEA LATERALE SU NUOVA PAVIMENTAZIONE (CONEGLIANO)
ΔT (°C)
12
10
8
6
4
2
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 51

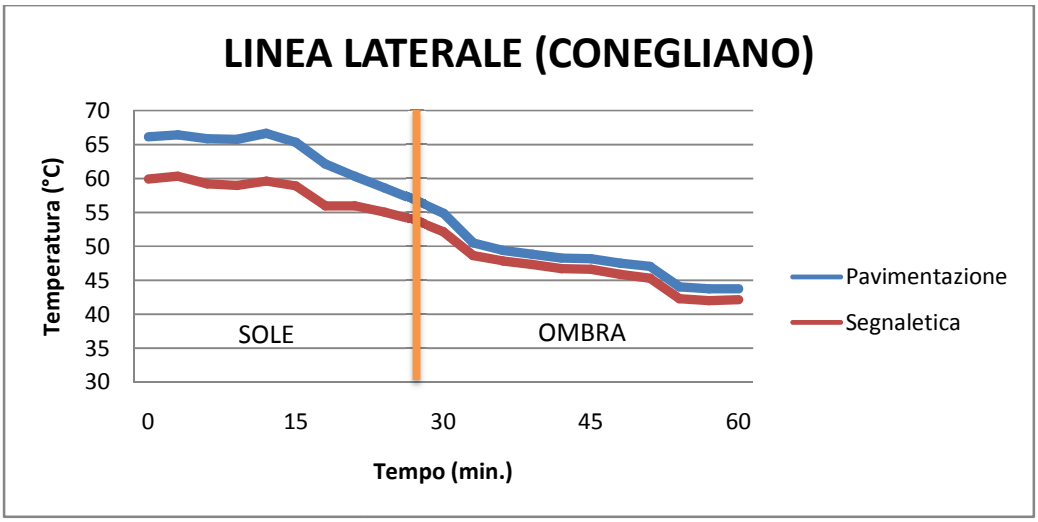
LINEA LATERALE (CONEGLIANO)
Temperatura (°C)
70
65
60
55
50
45
40
35
30
SOLE
OMBRA
0
15
30
45
60
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 52

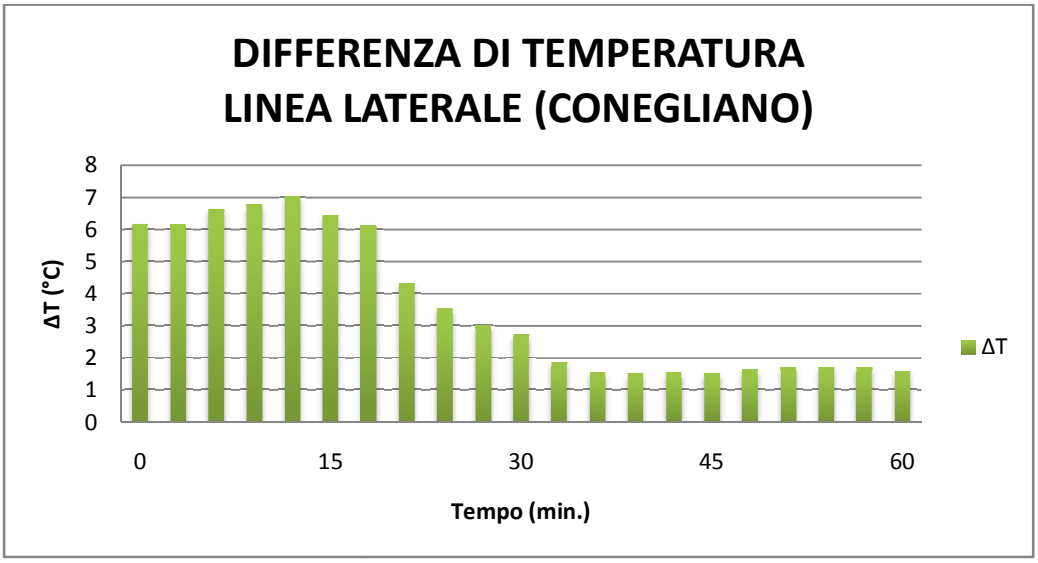
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
LINEA LATERALE (CONEGLIANO)
ΔT (°C)
8
7
6
5
4
3
2
1
0
0
15
30
45
60
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 53

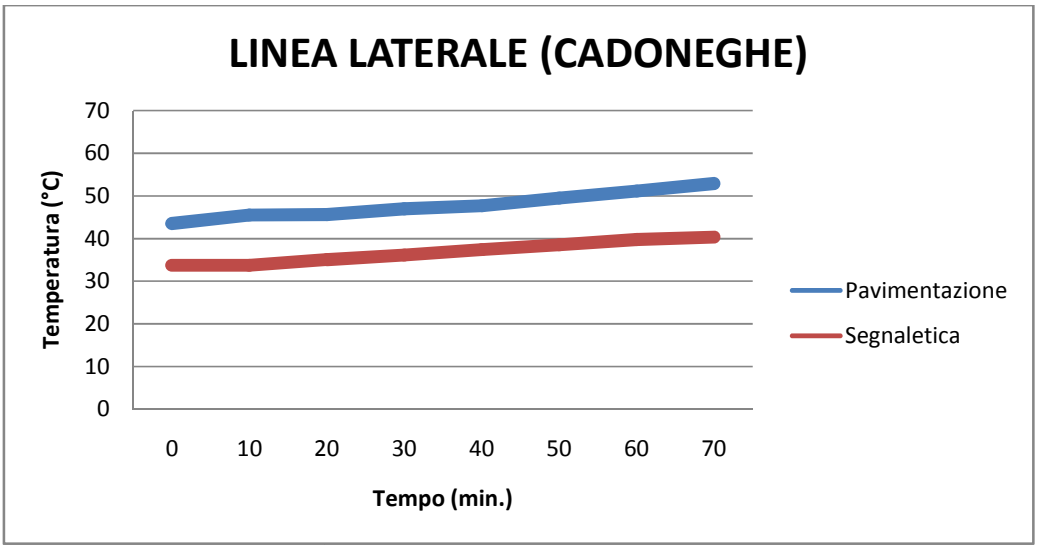
LINEA LATERALE (CADONEGHE)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 54

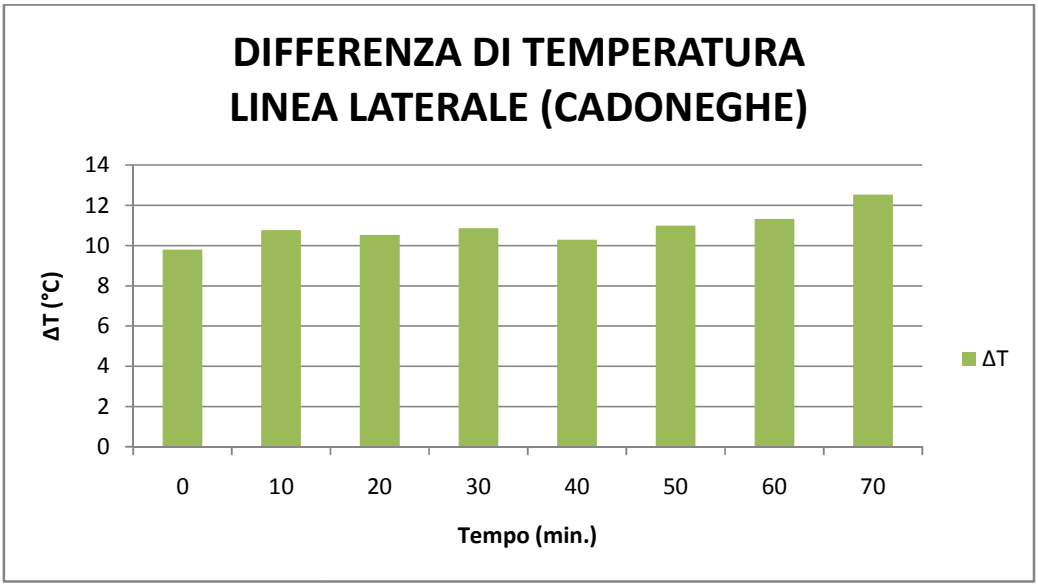
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
LINEA LATERALE (CADONEGHE)
ΔT (°C)
14
12
10
8
6
4
2
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 55

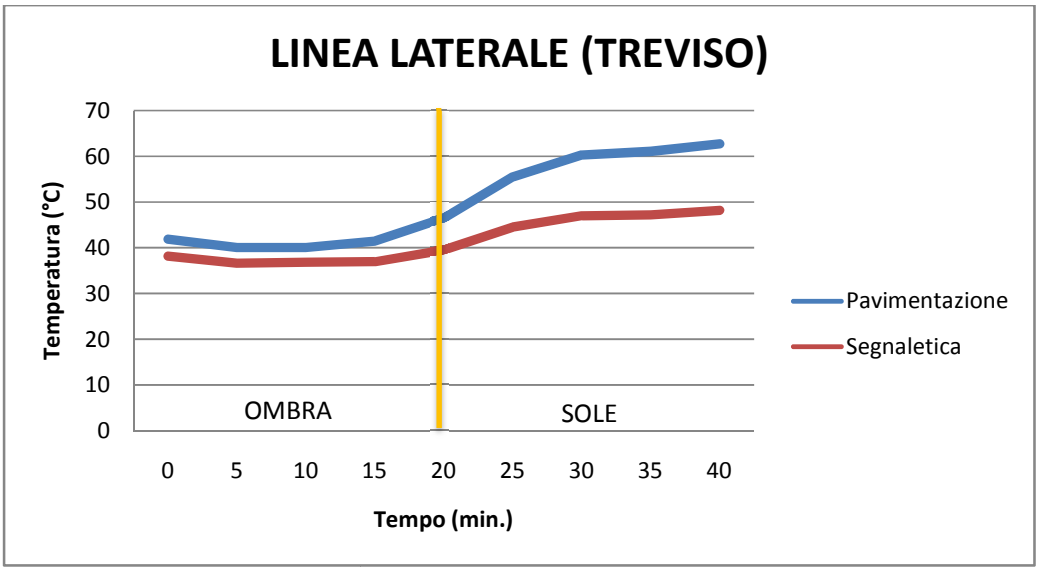
LINEA LATERALE (TREVISO)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
OMBRA
SOLE
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 56

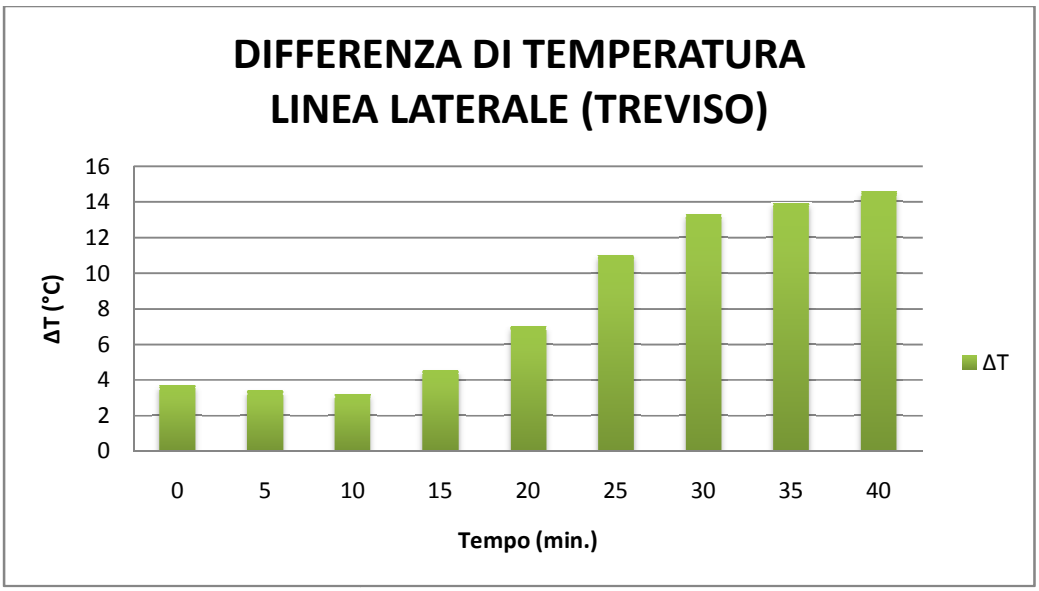
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
LINEA LATERALE (TREVISO)
ΔT (°C)
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 57

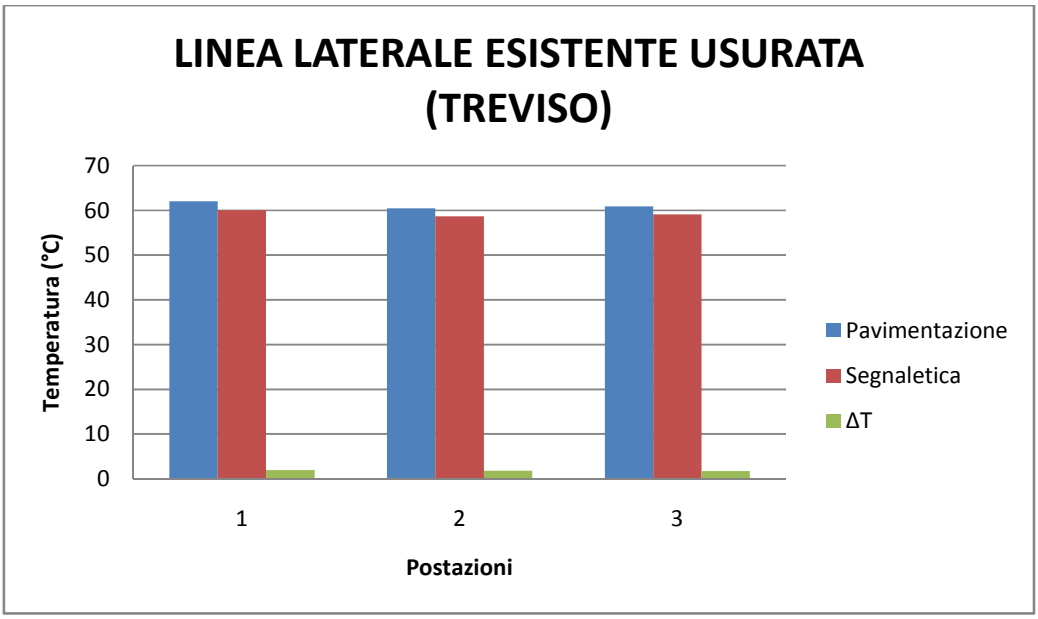
LINEA LATERALE ESISTENTE USURATA (TREVISO)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
Postazioni
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 58

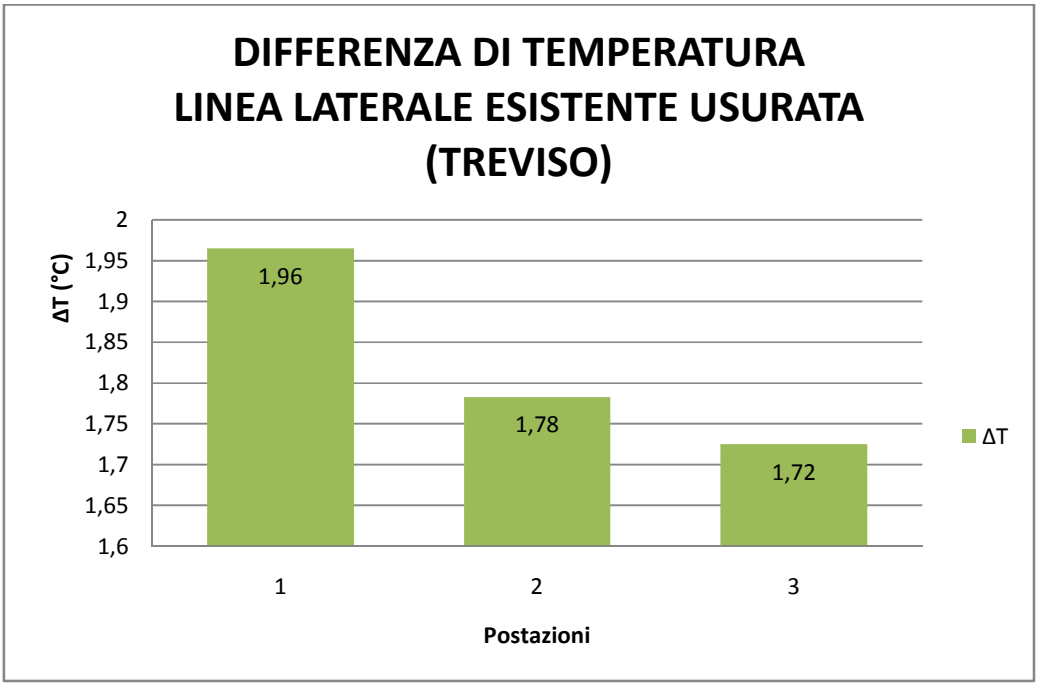
DIFFERENZA DI TEMPERATURA LINEA LATERALE ESISTENTE USURATA (TREVISO)
ΔT (°C)
2
1,95
1,9
1,85
1,8
1,75
1,7
1,65
1,6
1,96
1,78
1,72
1
2
3
Postazioni
ΔT

Fig. 59

3.3.3 ATTRAVERSAMENTO PEDONALE

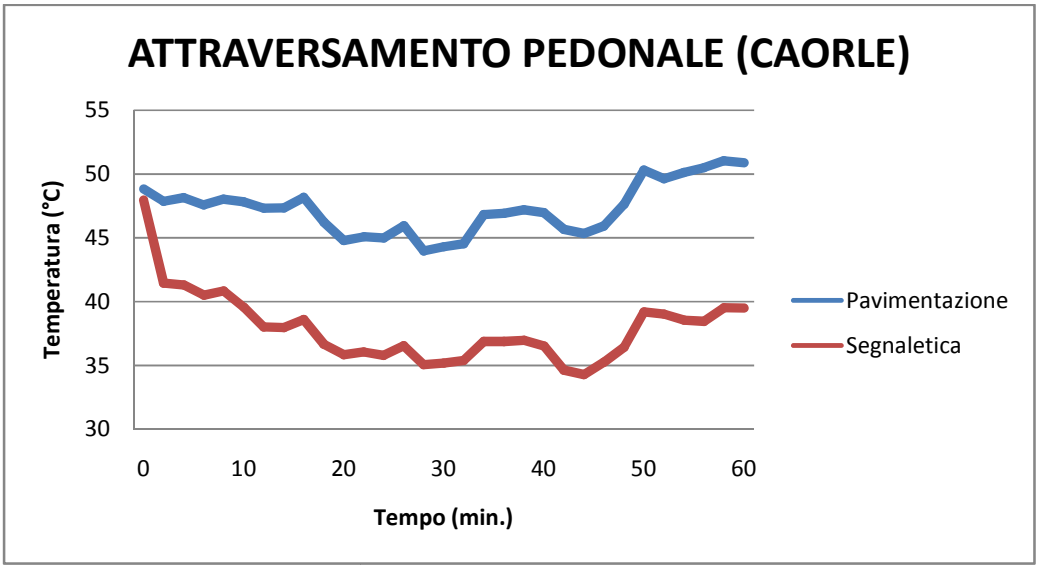

Fig. 60

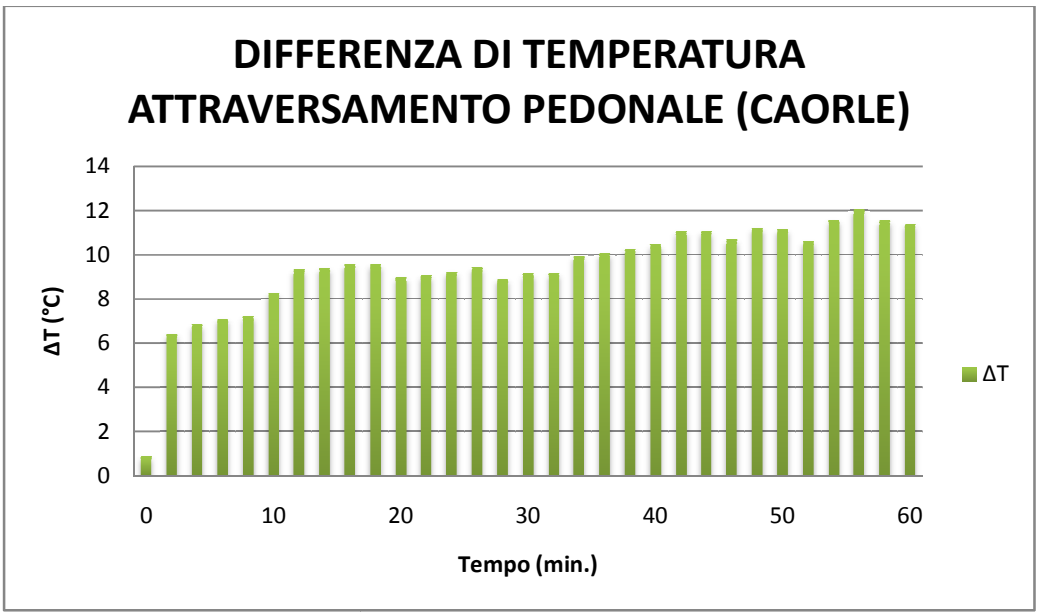

Fig. 61

Come si può notare dai precedenti grafici, si rileva una forte variazione di temperatura (ΔT) fra area coperta e scoperta dalla segnaletica ed essa possiede un andamento particolare. Tale andamento è dovuto ad una rilevazione eseguita sulla segnaletica esistente prima della stesura di quella nuova e ad una rilevazione nell'istante immediatamente successivo.

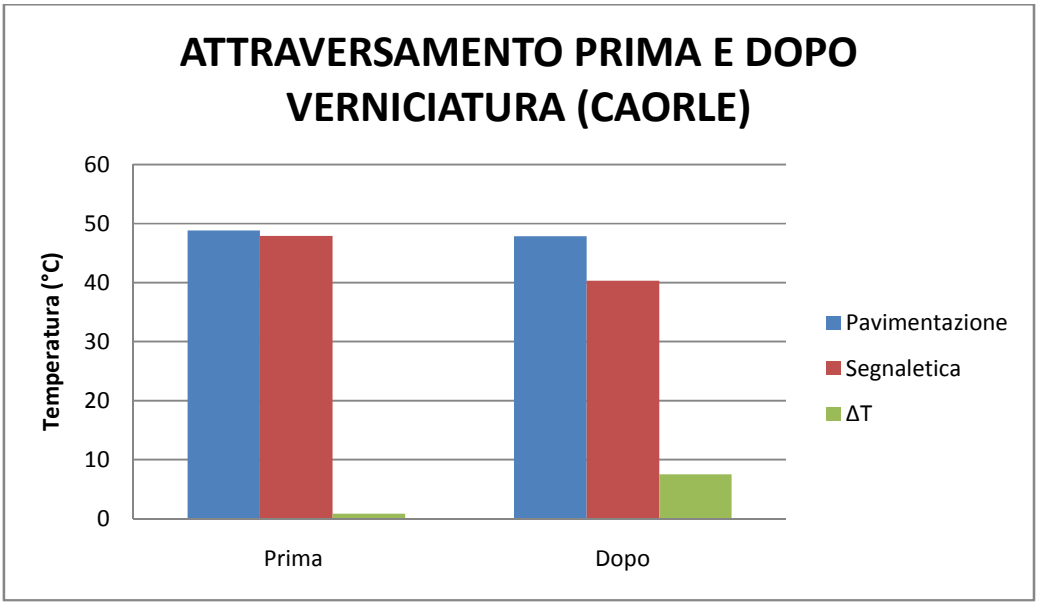
ATTRAVERSAMENTO PRIMA E DOPO VERNICIATURA (CAORLE)
Temperatura (°C)
60
50
40
30
20
10
0
Prima
Dopo
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 62

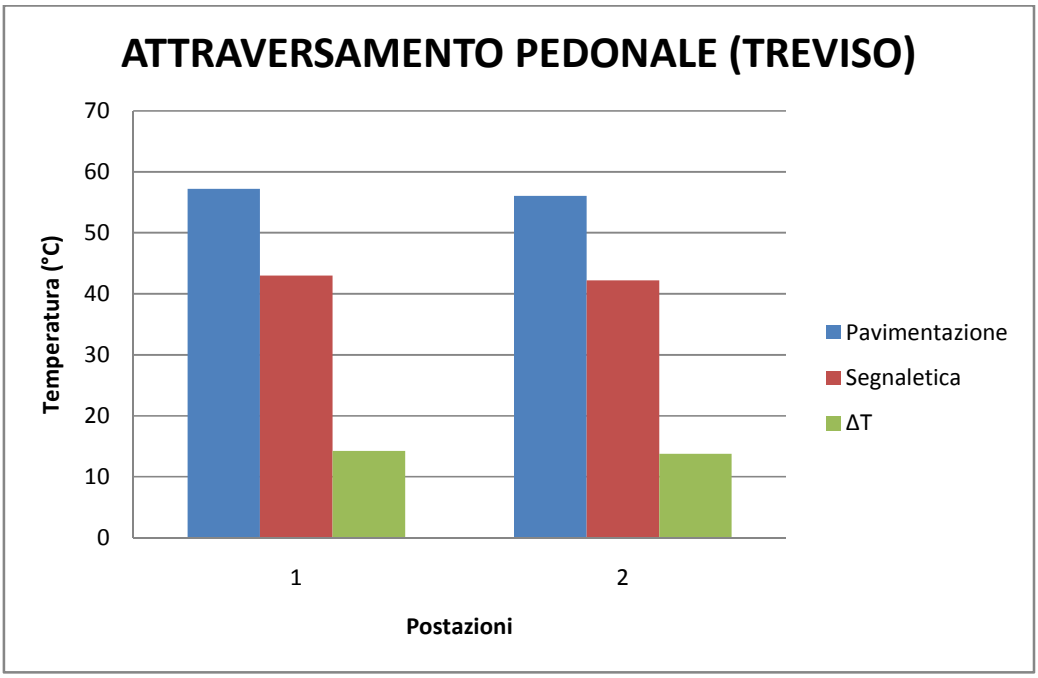
ATTRAVERSAMENTO PEDONALE (TREVISO)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
Postazioni
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 63

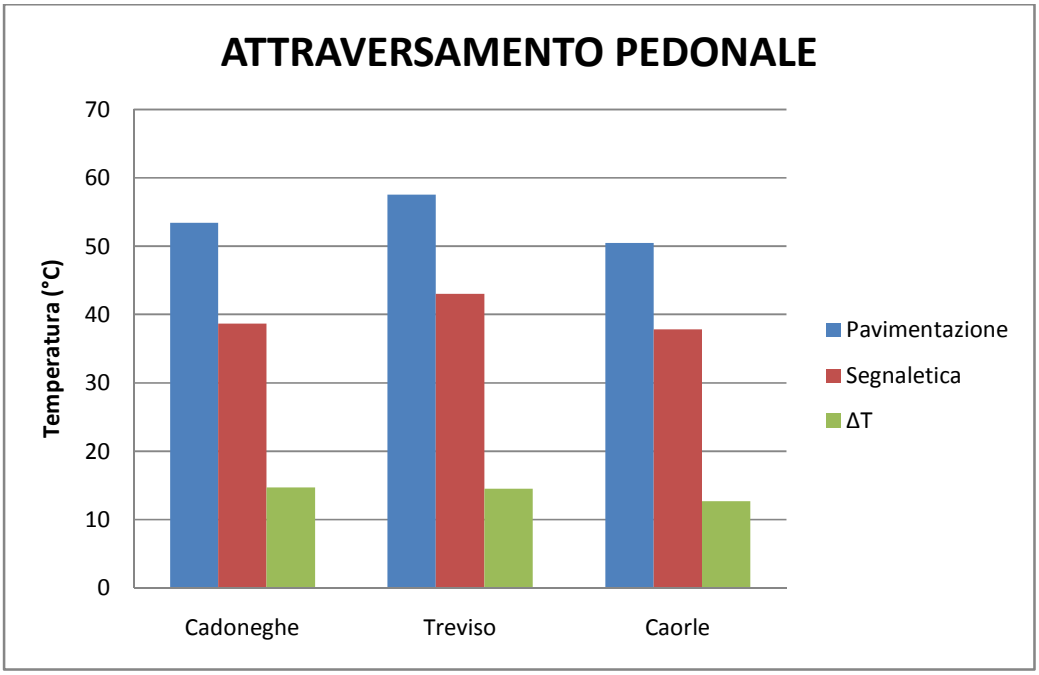
ATTRAVERSAMENTO PEDONALE
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
Cadoneghe
Treviso
Caorle
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 64

3.3.4 SEGNALE DI PRECEDENZA

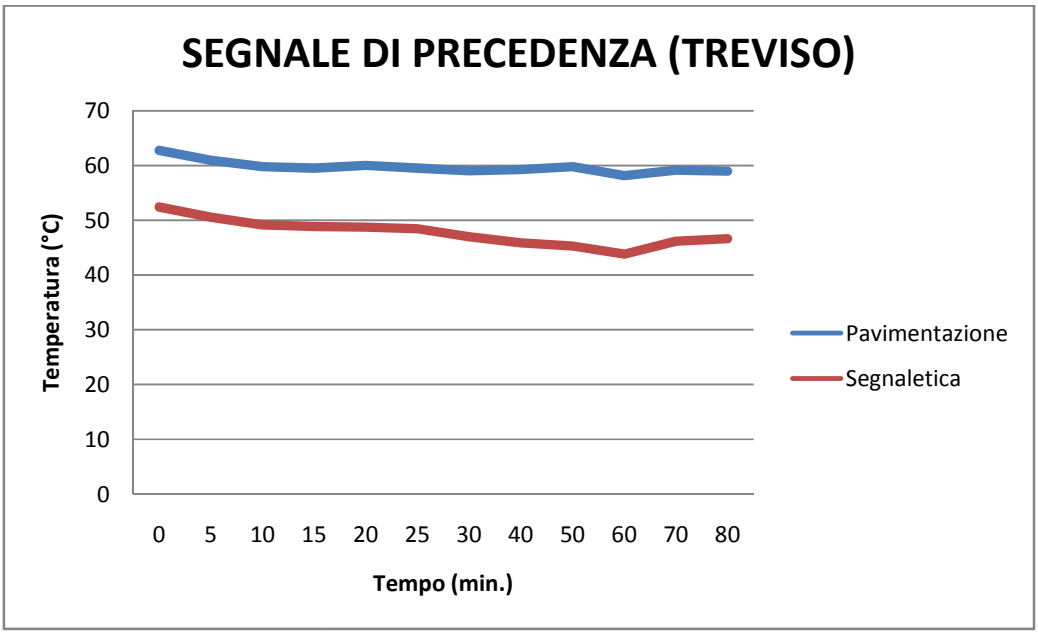

Fig. 65

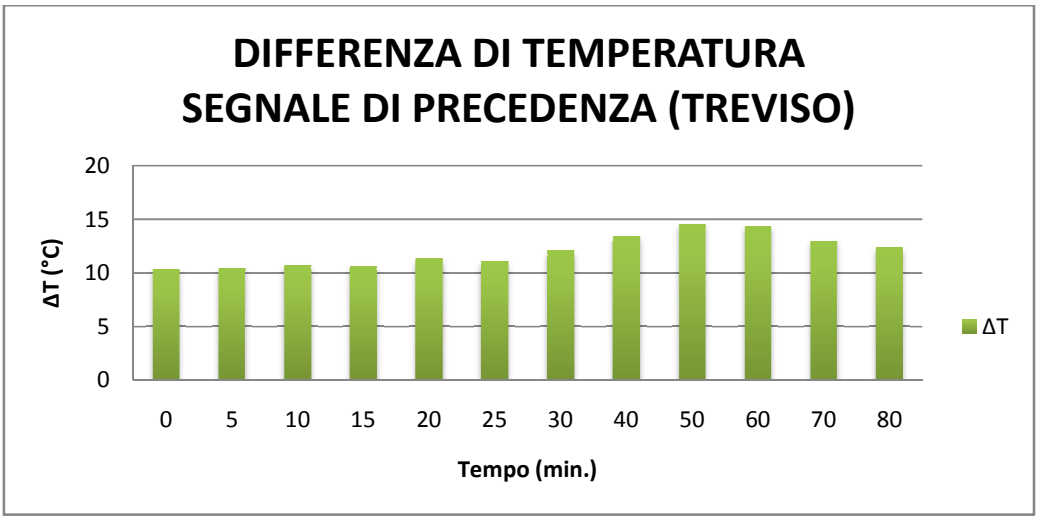

Fig. 66

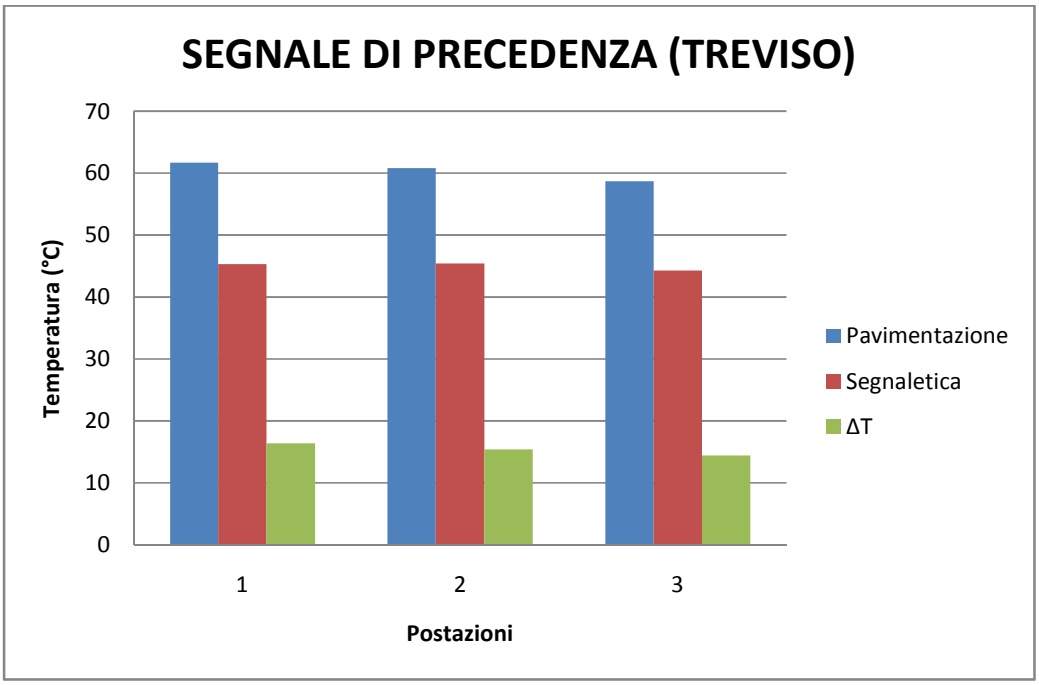
SEGNALE DI PRECEDENZA (TREVISO)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
Postazioni
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 67

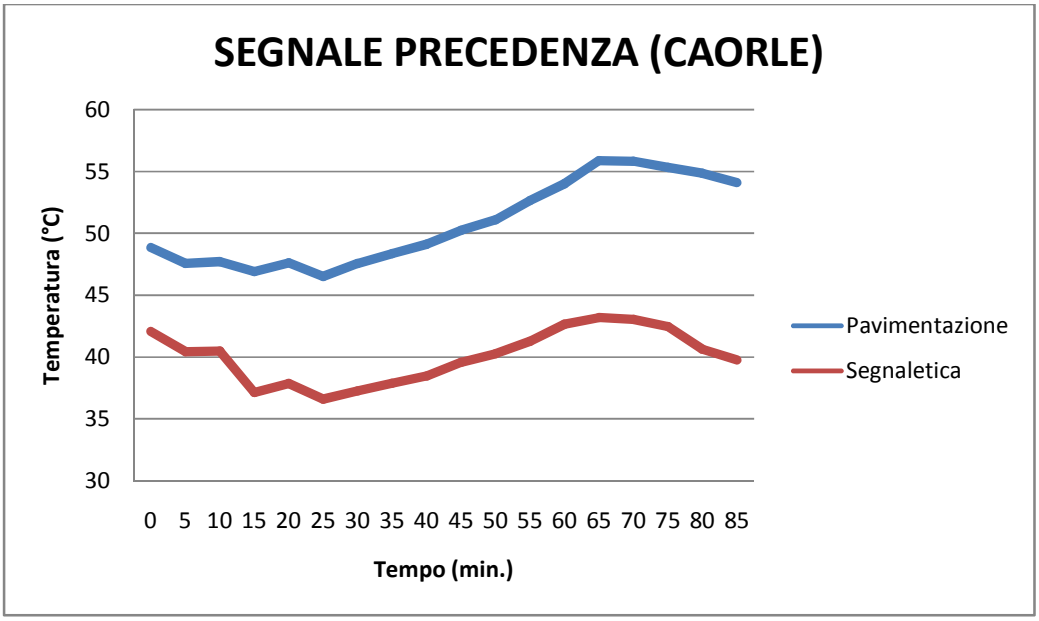
SEGNALE PRECEDENZA (CAORLE)
Temperatura (°C)
60
55
50
45
40
35
30
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica

Fig. 68

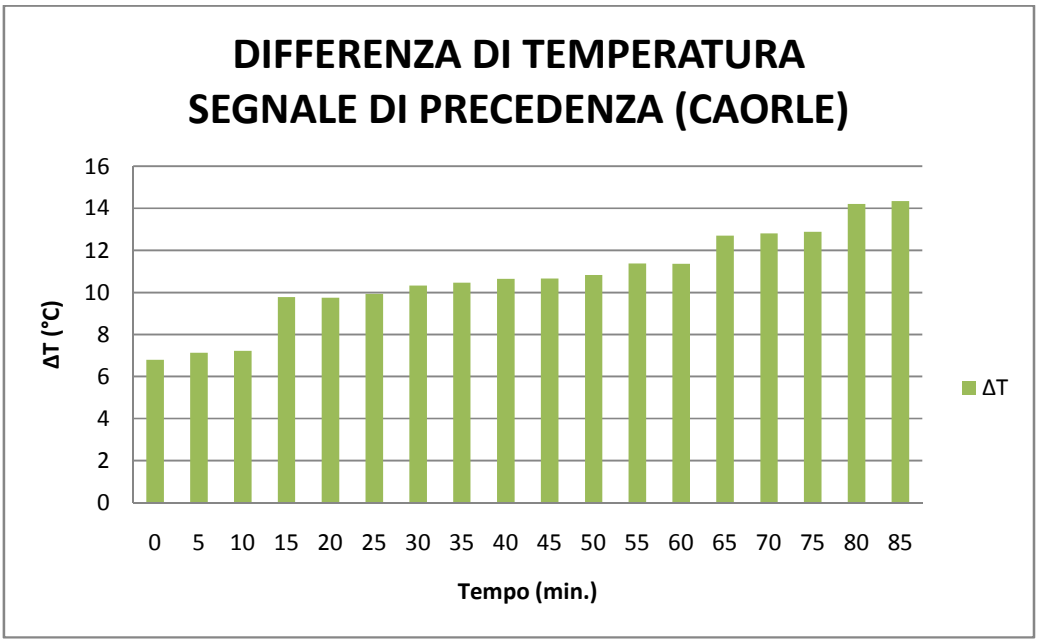
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
SEGNALE DI PRECEDENZA (CAORLE)
ΔT (°C)
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 69

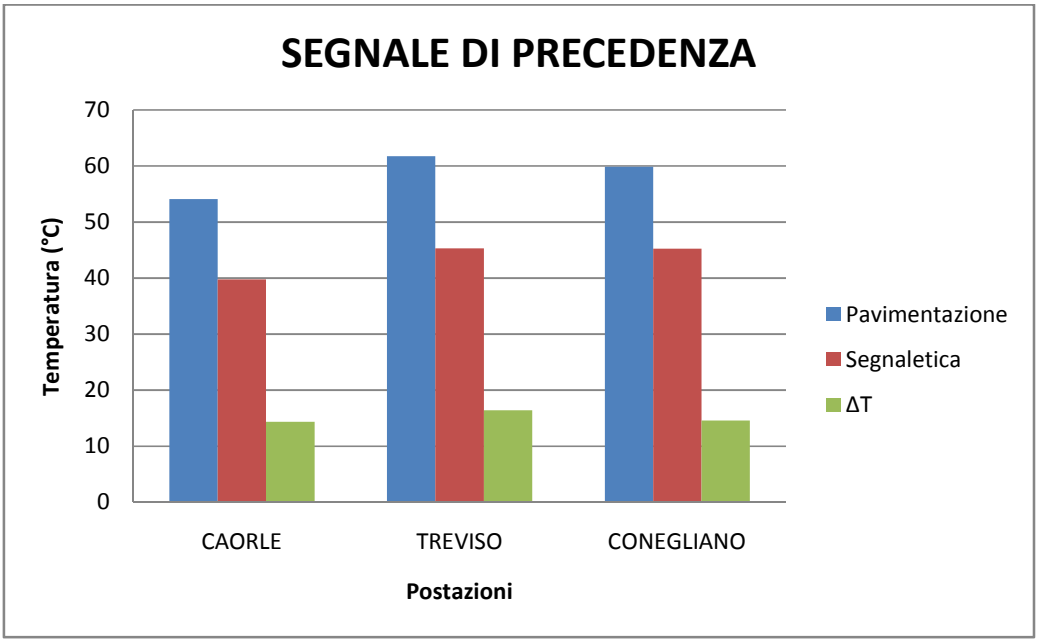
SEGNALE DI PRECEDENZA
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
CAORLE
TREVISO
CONEGLIANO
Postazioni
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 70

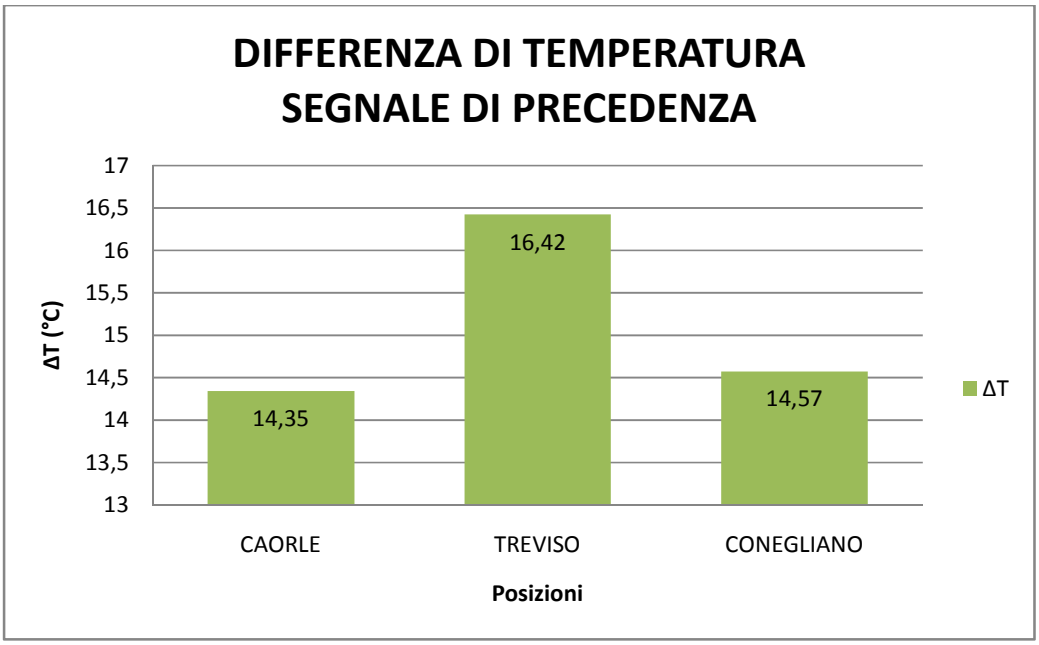

Fig. 71

3.3.5 SEGNALE DI STOP

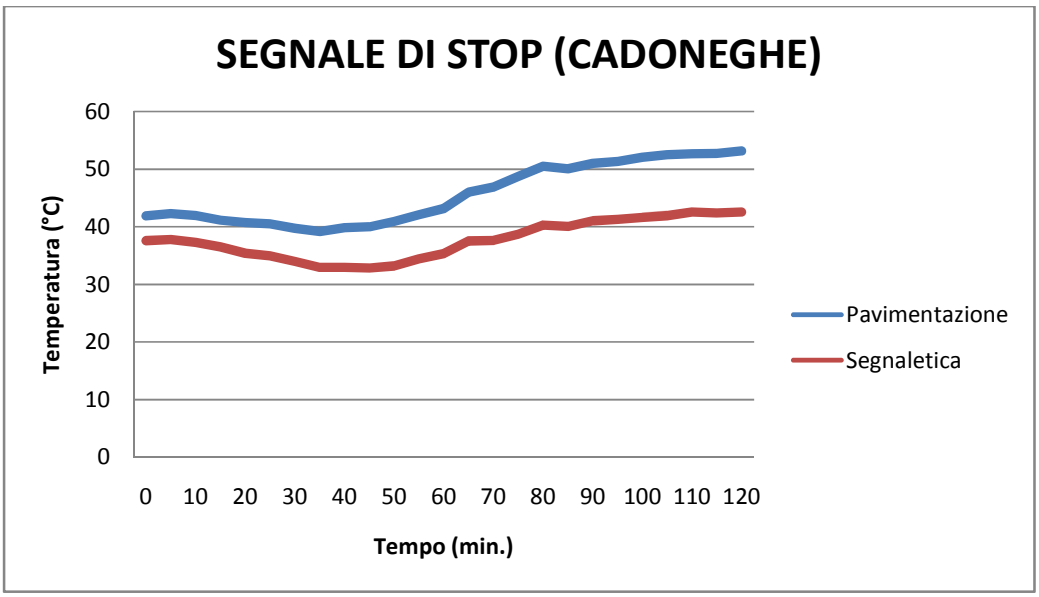

Fig. 72

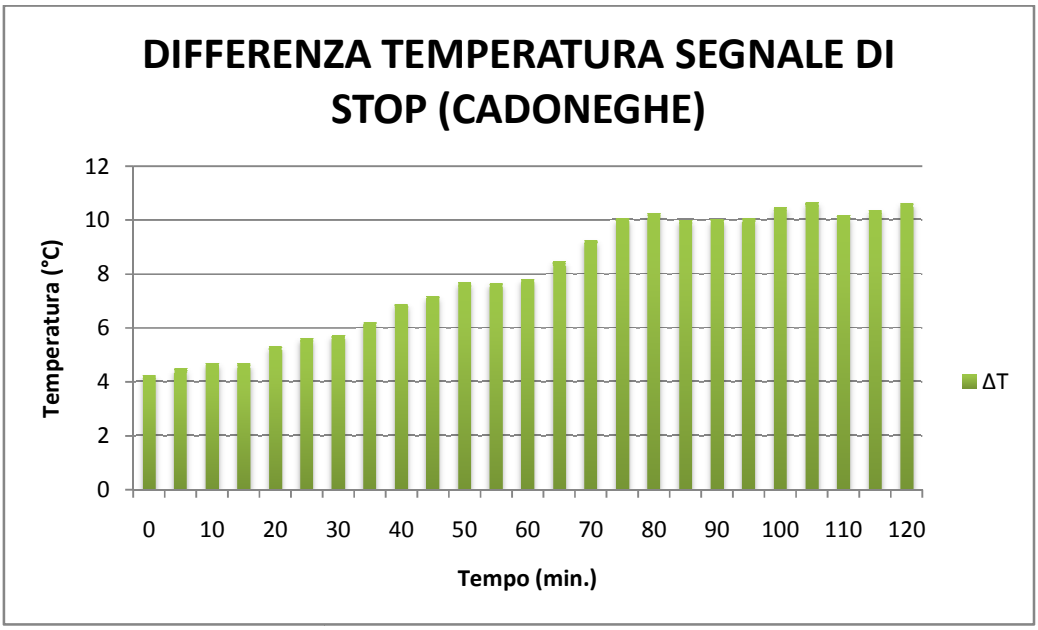
DIFFERENZA TEMPERATURA SEGNALE DI STOP (CADONEGHE)
Temperatura (°C)
0
2
4
6
8
10
12
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Tempo (min.)
ΔT

Fig. 73

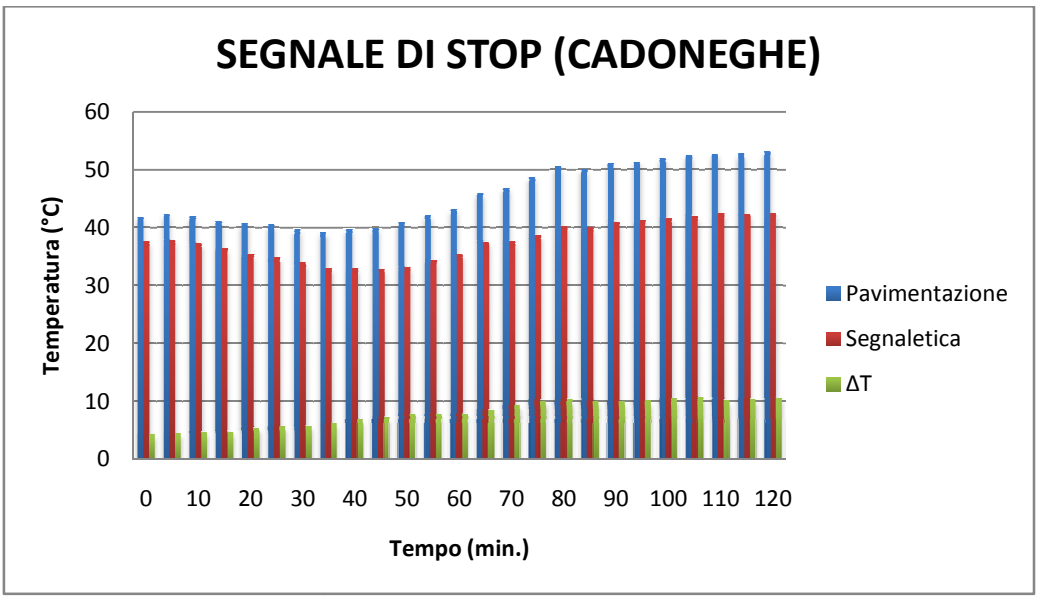
SEGNALE DI STOP (CADONEGHE)
Temperatura (°C)
0
10
20
30
40
50
60
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
110
120
Tempo (min.)
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 74

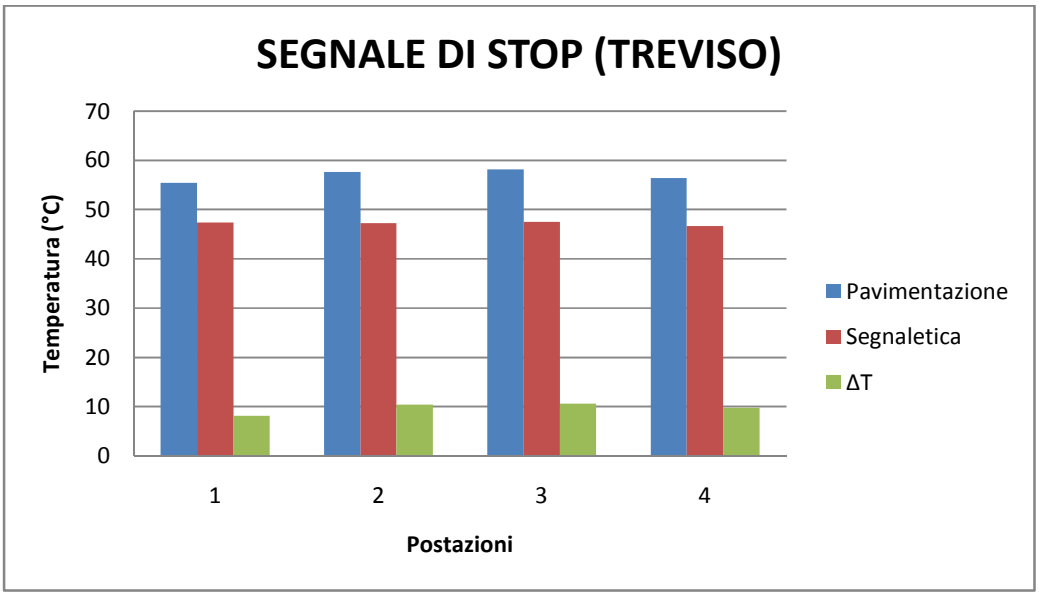
SEGNALE DI STOP (TREVISO)
Temperatura (°C)
70
60
50
40
30
20
10
0
1
2
3
4
Postazioni
Pavimentazione
Segnaletica
ΔT

Fig. 75

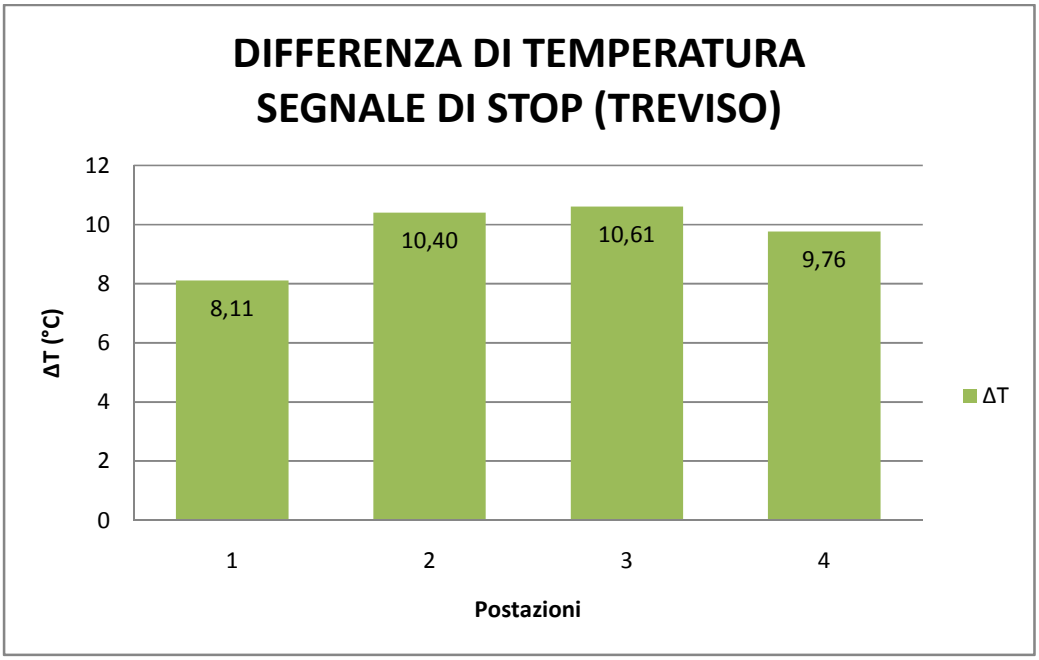
DIFFERENZA DI TEMPERATURA
SEGNALE DI STOP (TREVISO)
ΔT (°C)
12
10
8
6
4
2
0
8,11
10,40
10,61
9,76
1
2
3
4
Postazioni
ΔT

Fig. 76

3.4 TERMOGRAMMI

Di seguito vengono riportati alcuni dei termogrammi utilizzati per l'analisi, nei primi tre oltre all'immagine termica si associa anche l'immagine visibile.

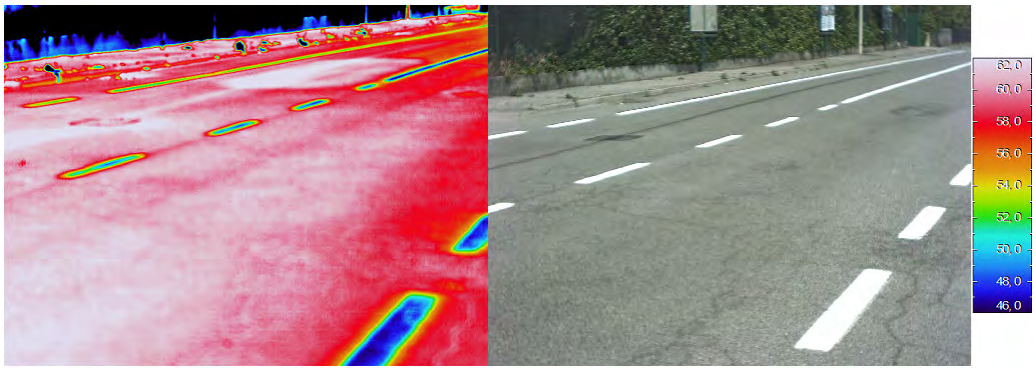

Fig. 77

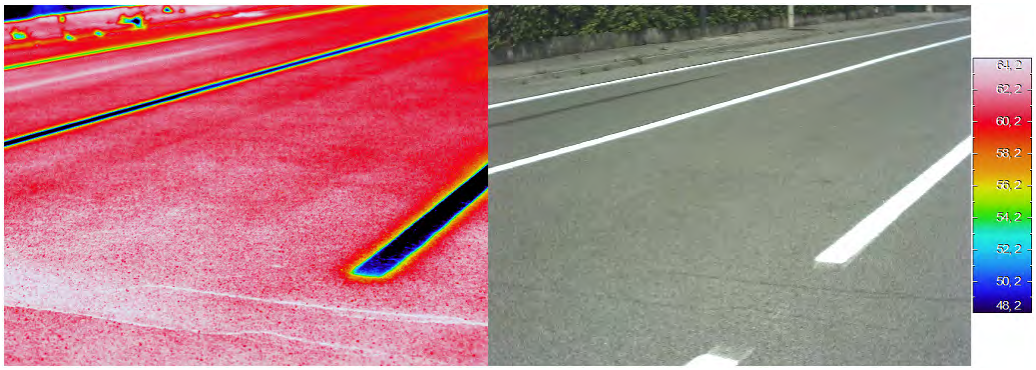

Fig. 78

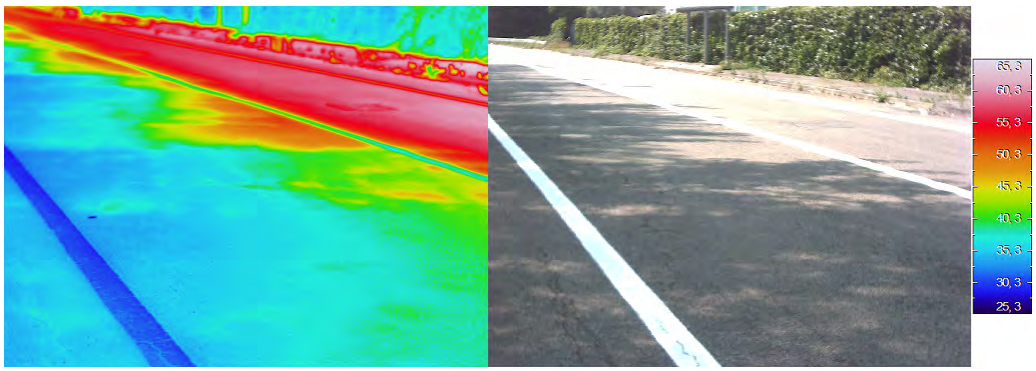

Fig. 79

Immagini termiche che mostrano il passaggio dalla condizione di zona d'ombra alla completa esposizione solare:

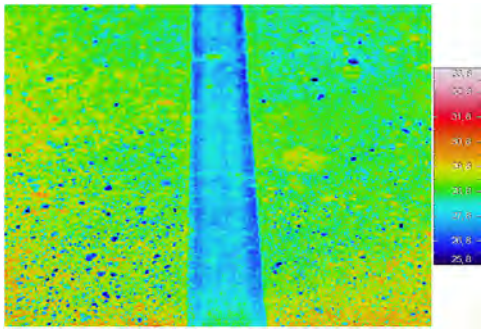

Fig. 80

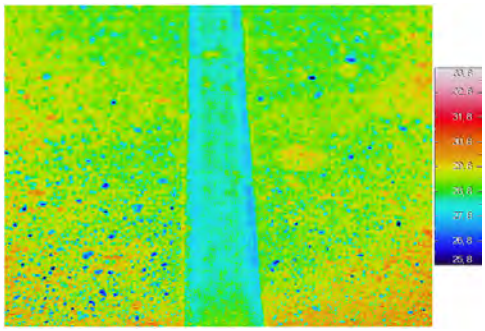

Fig. 81

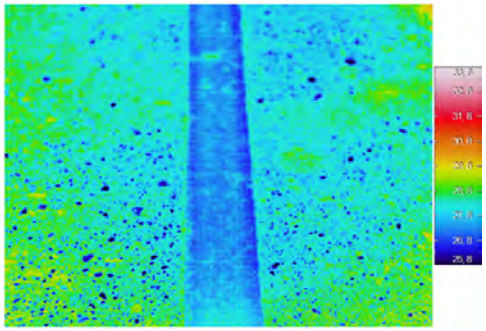

Fig. 82

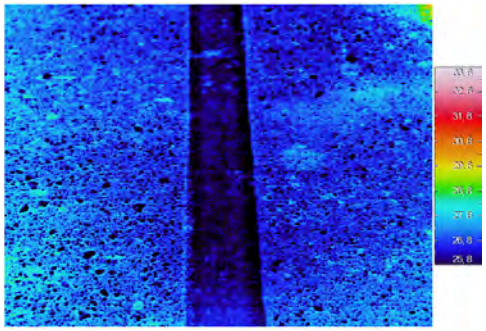

Fig. 83

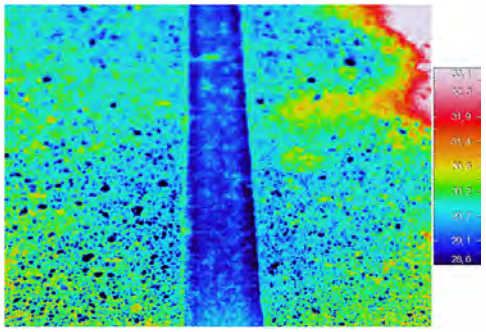

Fig. 84

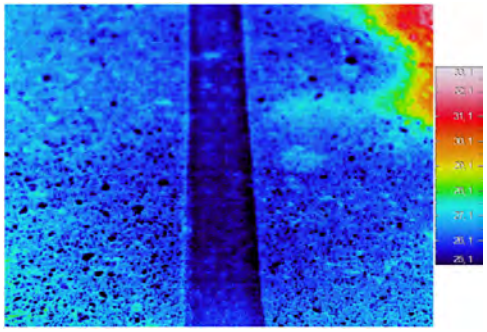

Fig. 85

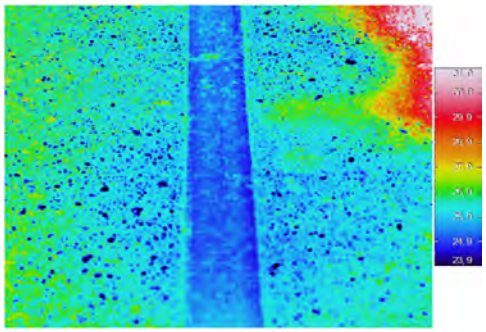

Fig. 86

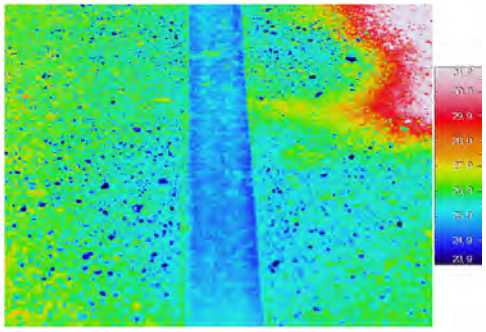

Fig. 87

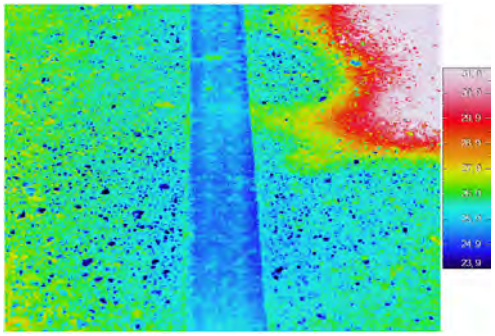

Fig. 88

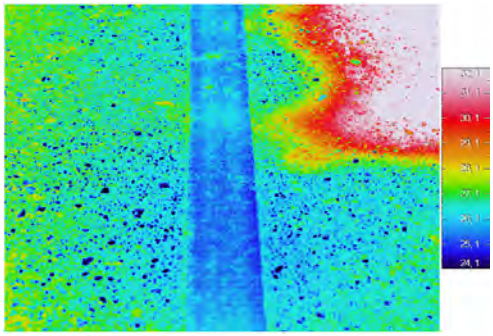

Fig. 89

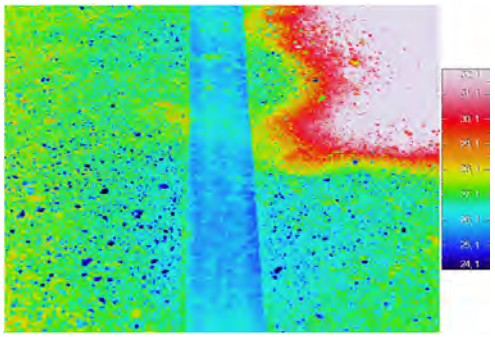

Fig. 90

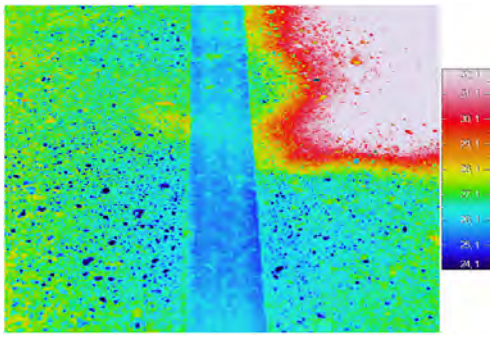

Fig. 91

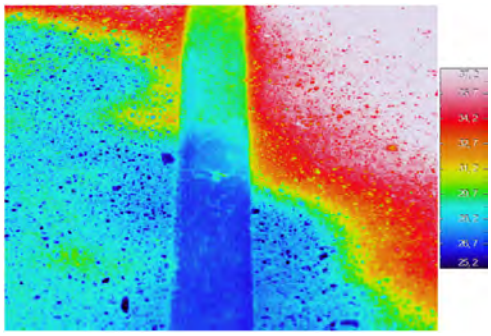

Fig. 92

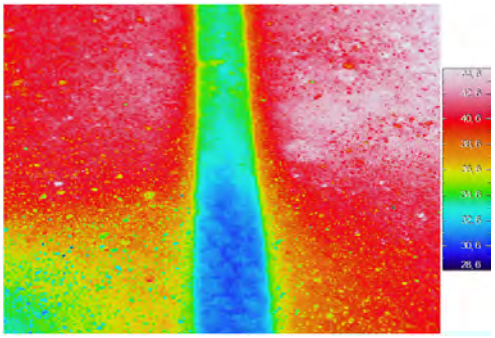

Fig. 93

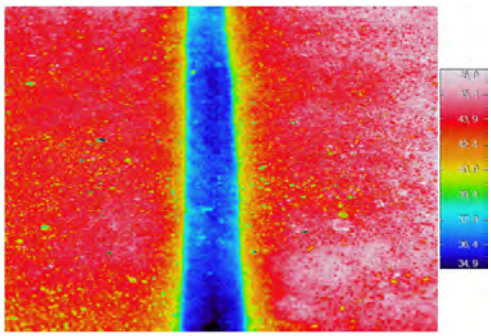

Fig. 94

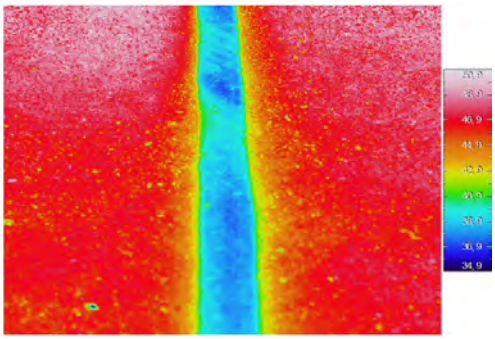

Fig. 95

Linea laterale su nuova pavimentazione:

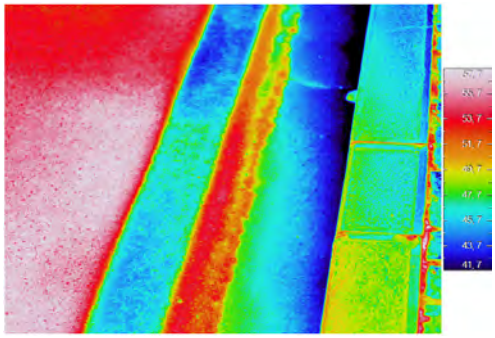

Fig. 96

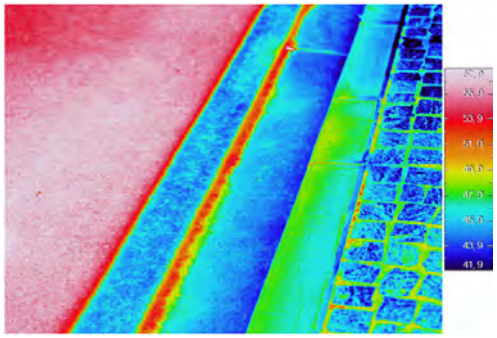

Fig. 97

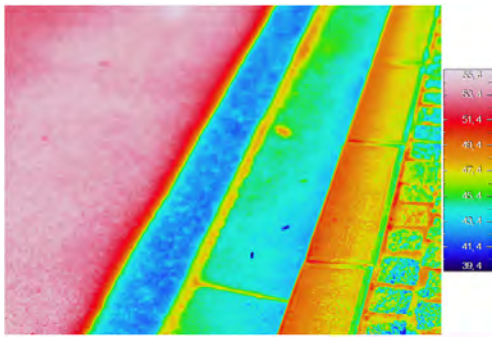

Fig. 98

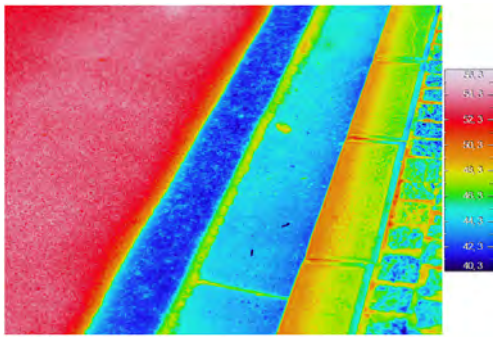

Fig. 99

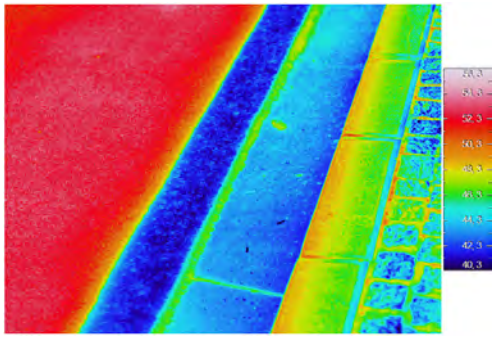

Fig. 100

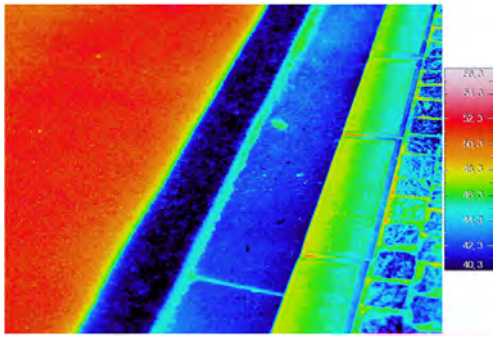

Fig. 101

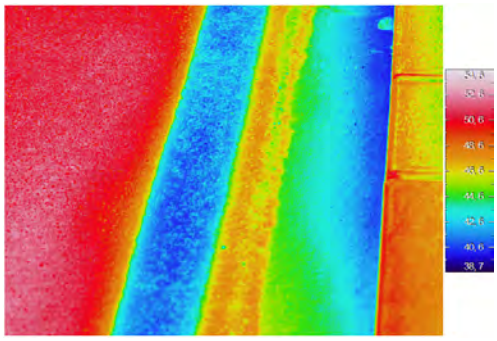

Fig. 102

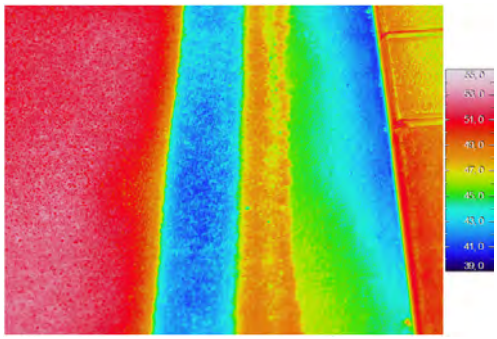

Fig. 103

Segnale di STOP:

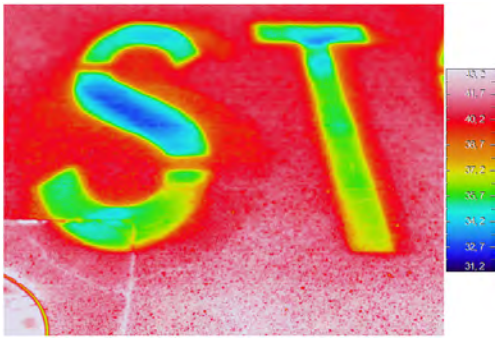

Fig. 104

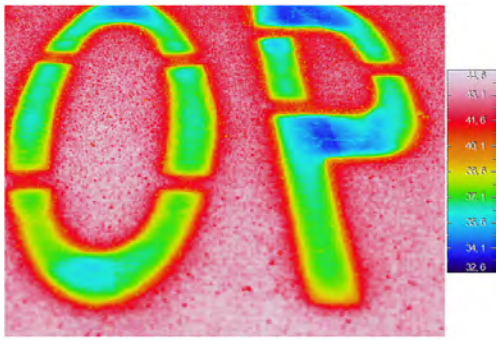

Fig. 105

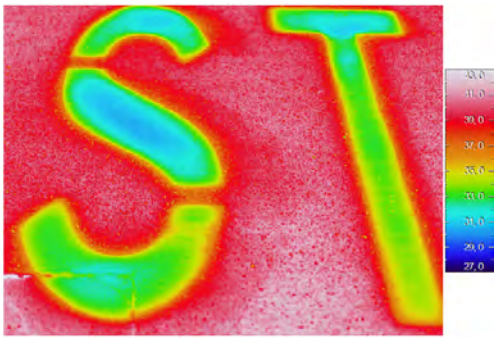

Fig. 106

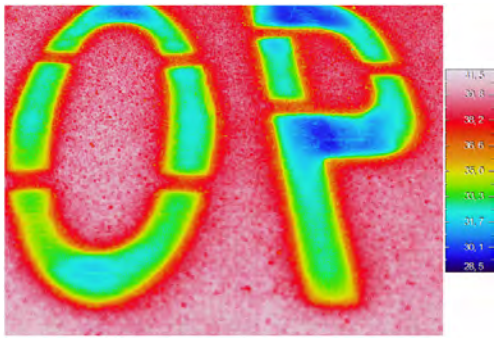

Fig. 107

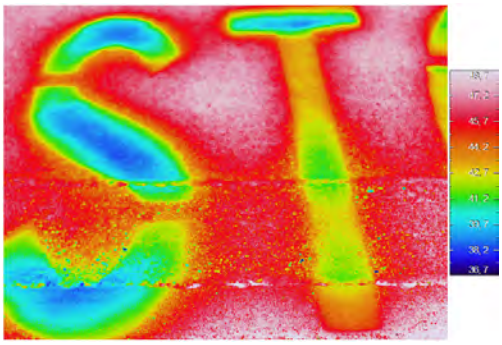

Fig. 108

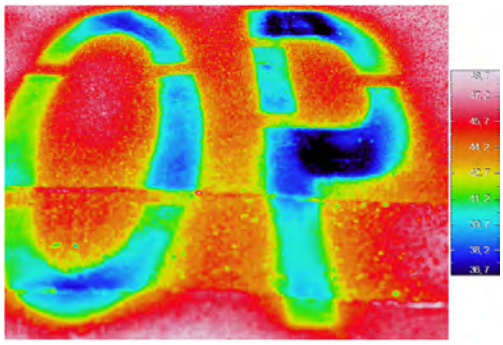

Fig. 109

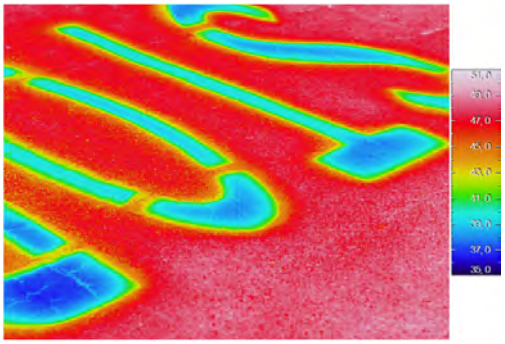

Fig. 110

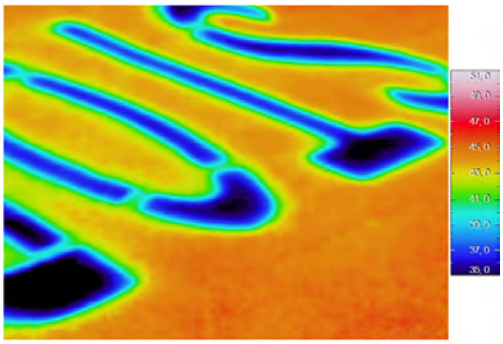

Fig. 111

Attraversamento pedonale:

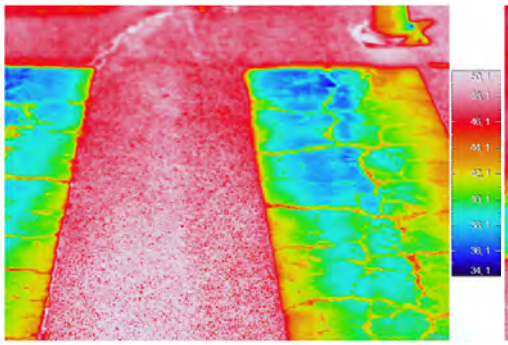

Fig. 112

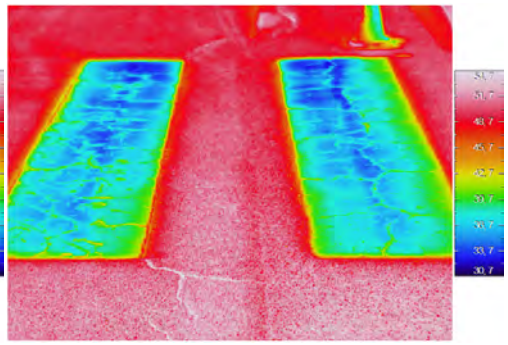

Fig. 113

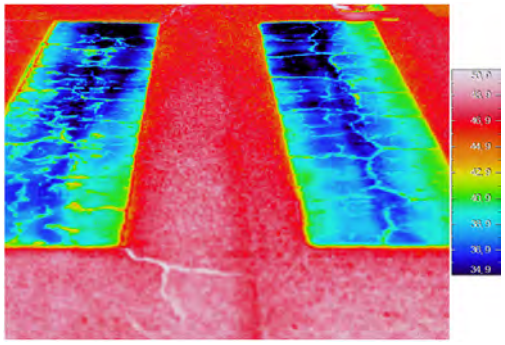

Fig. 114

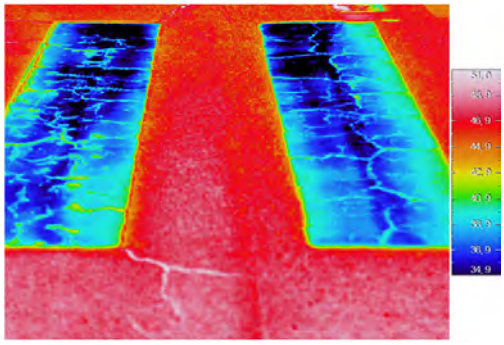

Fig. 115

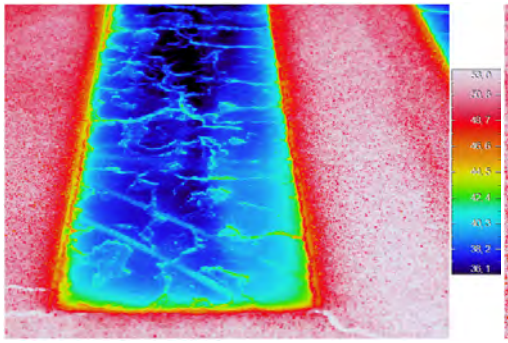

Fig. 116

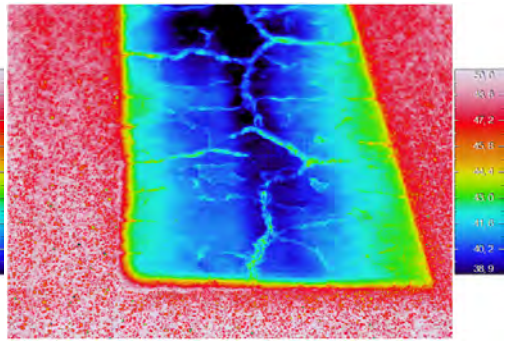

Fig. 117

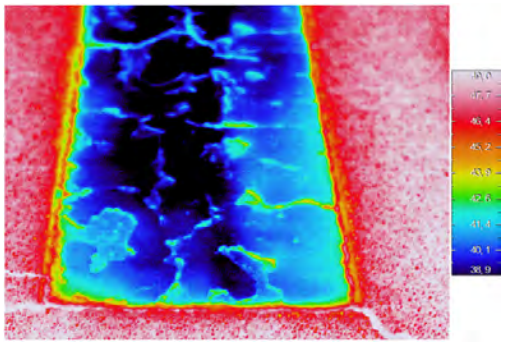

Fig. 118

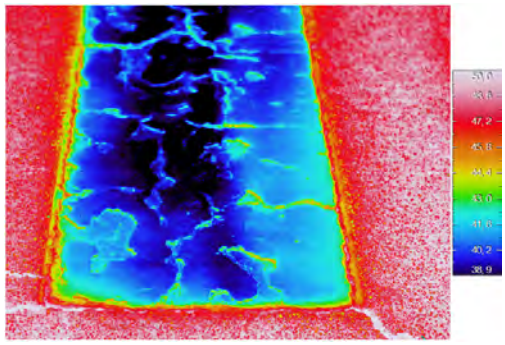

Fig. 119

Segnale di precedenza:

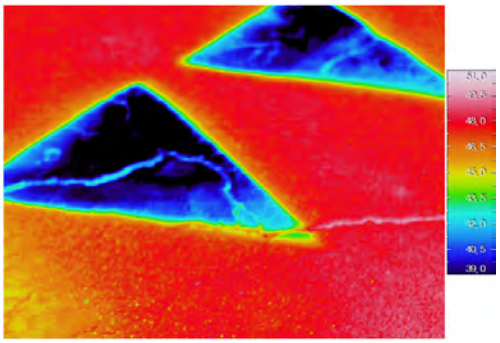

Fig. 120

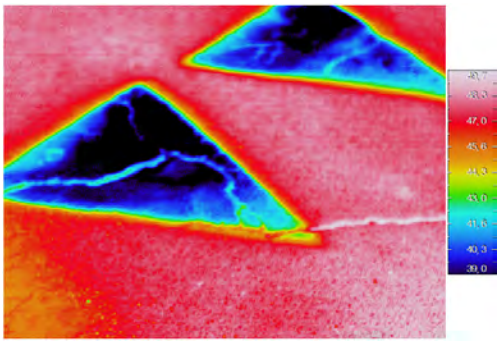

Fig. 121

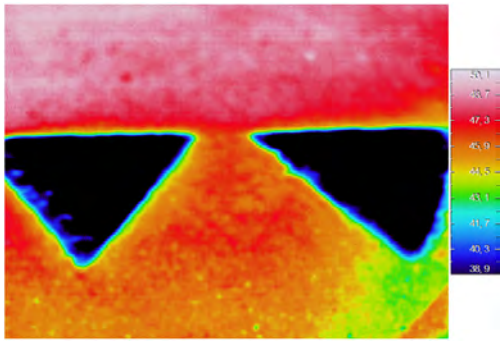

Fig. 122

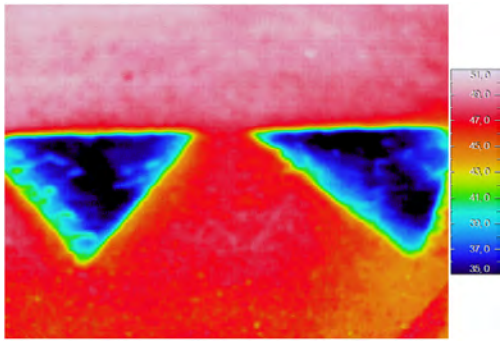

Fig. 123

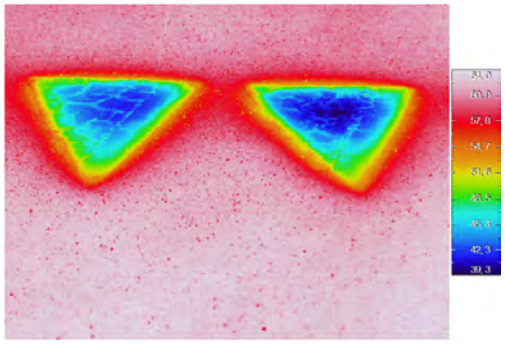

Fig. 124

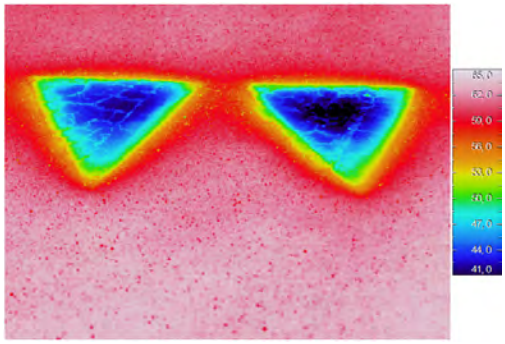

Fig. 125

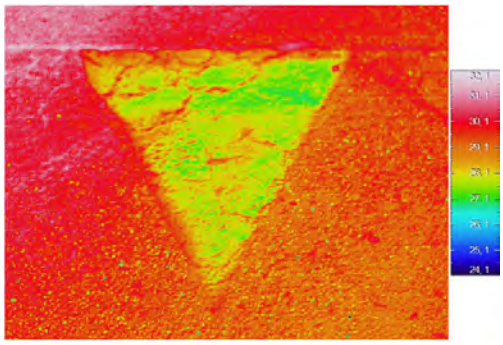

Fig. 126

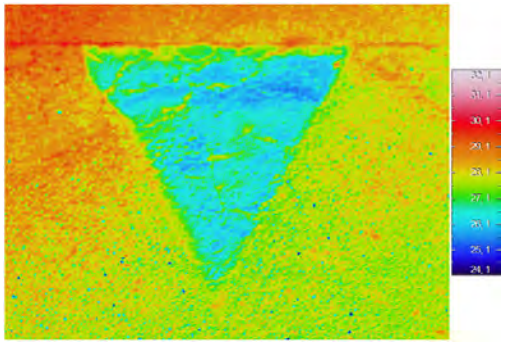

Fig. 127

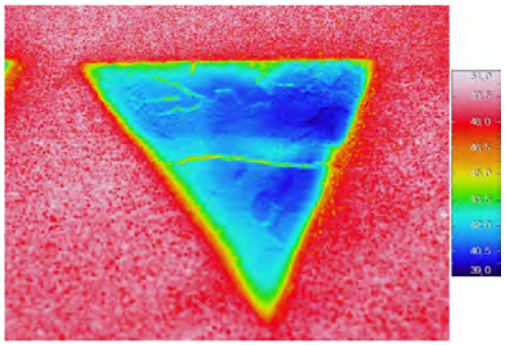

Fig. 128

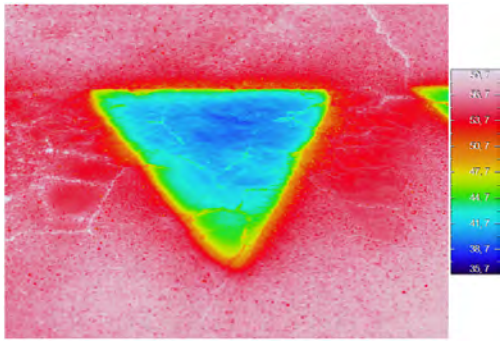

Fig. 129

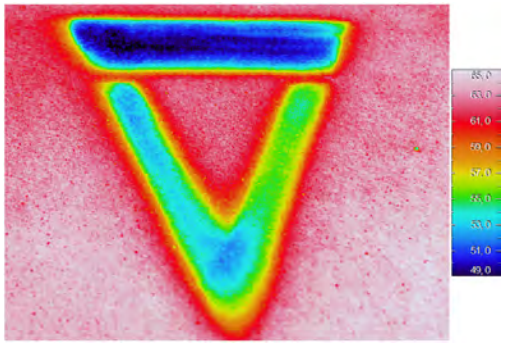

Fig. 130

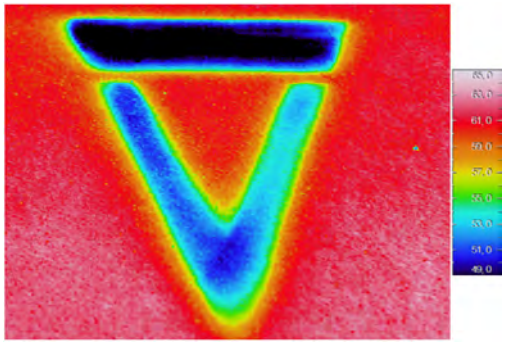

Fig. 131

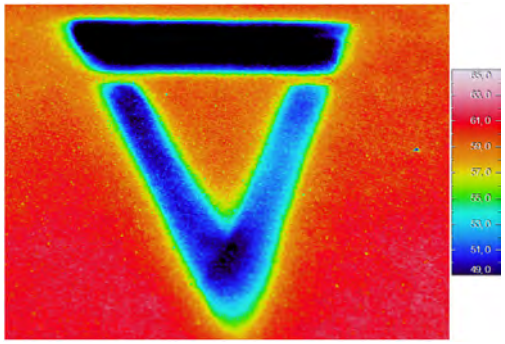

Fig. 132

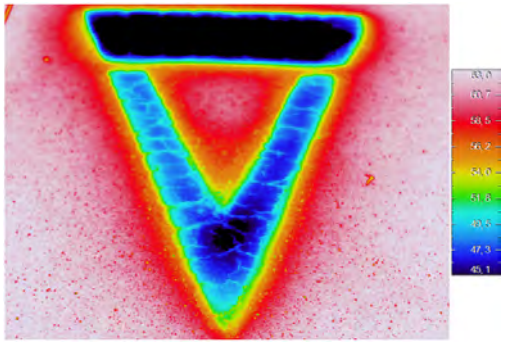

Fig. 133

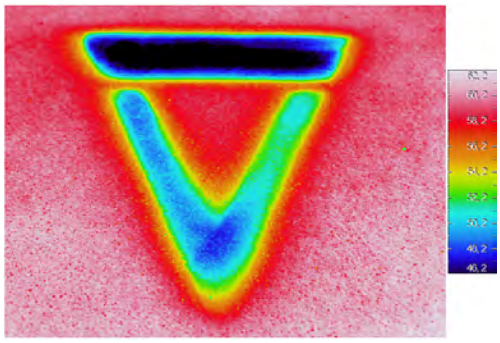

Fig. 134

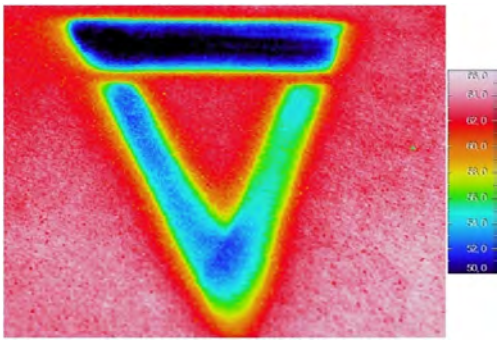

Fig. 135

Linea di mezzeria:

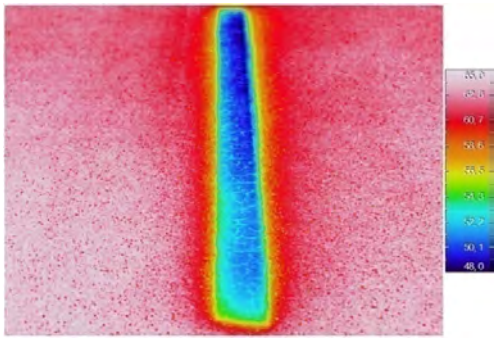

Fig. 136

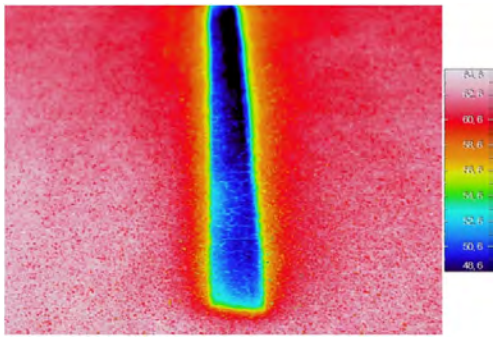

Fig. 137

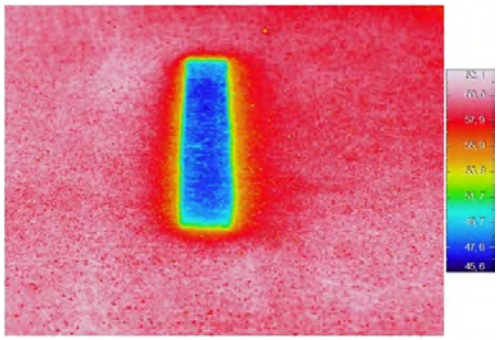

Fig. 138

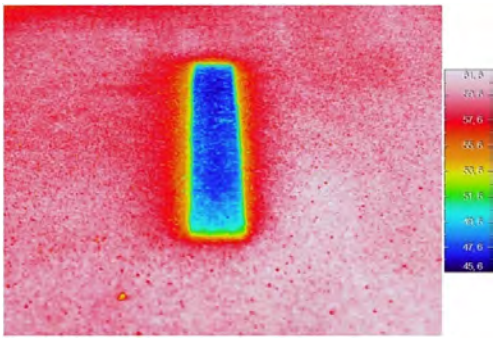

Fig. 139

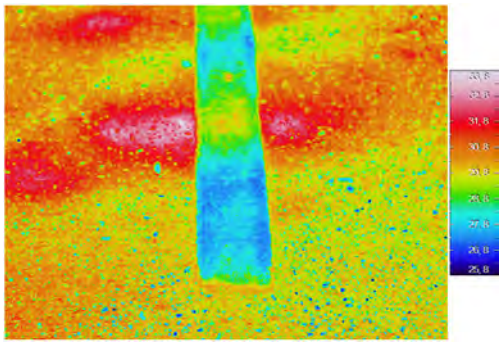

Fig. 140

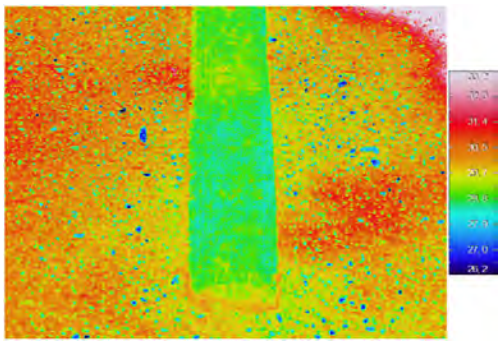

Fig. 141

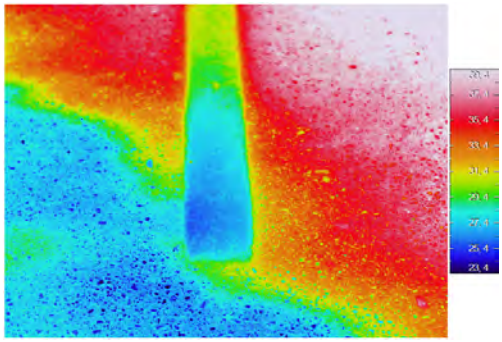

Fig. 142

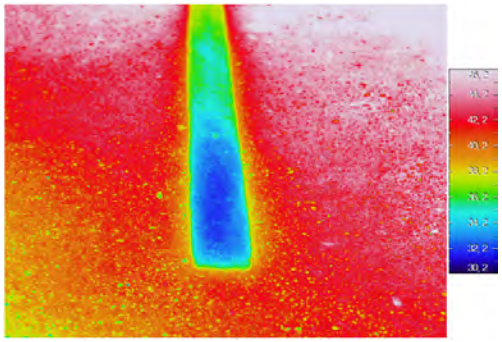

Fig. 143

4. CONCLUSIONI

Con il presente lavoro di tesi si è analizzato il rapporto tra la temperatura della segnaletica orizzontale e quella della attigua pavimentazione stradale.

L'analisi dei dati ha evidenziato la presenza di una differenza di temperatura che non può passare inosservata, anche se, spesso, questo tipo di valutazione non viene effettuato, perché messo erroneamente in secondo piano.

Uno dei primi aspetti che si rileva dalla lettura dei grafici è la variazione della differenza, ed il conseguente andamento nel tempo, tra la condizione di completo irraggiamento solare e quella opposta di zona d'ombra. E' interessante notare che le temperature misurate presentano valori diversi.

Nel primo caso, infatti, sia la sovrastruttura che la segnaletica hanno valori di temperatura che tendono ad aumentare nel tempo, mentre ciò che varia è il loro rapporto. Le misurazioni effettuate nei cantieri hanno evidenziato una differenza iniziale di circa 5°C che aumenta nel tempo sino a valori superiori i 10°C, con un massimo di 16°C nelle ore più calde della giornata.

Nella situazione contraria, in zona d'ombra, c'è sempre la presenza di un ΔT però con caratteristiche decisamente inferiori. Si parte da valori iniziali di 5°C per poi diminuire nel tempo e assestarsi su valori di 1-2 °C. Questa differenza che può sembrare relativamente piccola risulta invece significativa se consideriamo che la temperatura della strada e quella atmosferica sono simili, circa a 30°C.

Altro aspetto importante da sottolineare è la variazione del ΔT misurato prima e dopo la stesura della vernice. Prima possiamo notare una differenza di 1-2°C tra la sovrastruttura e la segnaletica mentre dopo il ΔT aumenta fino a raggiungere un valore superiore ai 10 °C.

Le ditte del settore utilizzano una vernice spartitraffico a base di resine alchiliche e clorocaucciù, contente il 14% minimo di biossido di titanio (vernice spartitraffico bianca rifrangente ANAS 14%).

E' importante sottolineare che l'andamento nel tempo della temperatura della segnaletica è influenzato dal tempo di essiccamento della vernice (25-30 minuti a 25°C); nei primi 20-30 minuti delle rilevazioni, che corrispondono al tempo necessario all'asciugatura della vernice, infatti, l'andamento crescente-decrescente della differenza di temperatura è più marcato per poi stabilizzarsi. Questo fenomeno è meno evidente nelle condizioni di completa esposizione al sole, dove la temperatura più alta determina un tempo minore di asciugatura della vernice.

Dopo questa analisi, che mette in luce una sostanziale differenza di temperatura tra il manto stradale e la segnaletica orizzontale, possiamo suggerire alcuni possibili sviluppi che ci permettono di sfruttare gli aspetti positivi di questo fenomeno.

Una prima osservazione riguarda i mezzi pesanti e la loro posizione laterale nella carreggiata.

Tir, camion e simili, normalmente viaggiano a cavallo della linea di margine destra, poiché il guidatore sfrutta la segnaletica orizzontale come riferimento ottico per ragioni di sicurezza.

Di conseguenza il traffico pesante tende ad insistere su una porzione di pavimentazione che in genere è più debole perché dove finisce la linea laterale di solito si interrompe anche la sovrastruttura, punto particolarmente critico in quanto composto da materiali diversi.

La presenza di segnaletica orizzontale in questa zona può contribuire a diminuire la temperatura di questa porzione di manto stradale; caratteristica questa che influisce positivamente sulle proprietà e sul comportamento della pavimentazione poiché ne aumenta la durata nel tempo e ne riduce il rischio di deformazioni permanenti.

L'altra osservazione che si può fare riguarda l'adozione di pavimentazioni stradali particolari, quelle cioè trattate con vernici, da utilizzare nei centri urbani per migliorarne l'aspetto architettonico.

Un problema delle città, infatti, è l'elevata temperatura della pavimentazione stradale che causa l'effetto isola di calore. Verniciando completamente la sovrastruttura si può ottenere lo stesso effetto di abbassamento delle temperature

di esercizio notato analizzando piccole porzioni di segnaletica del manto stradale. Inoltre, riducendo la temperatura della pavimentazione stradale è possibile migliorare le condizioni di comfort nelle aree urbane, quali zone pedonali o zone a traffico limitato, dove i benefici possono essere percepiti anche dall'uomo e non solo dalla sovrastruttura.

BIBLIOGRAFIA

DL 285-92 – "Nuovo Codice della strada" e DPR 16 Dicembre 1992 n. 495 - "*Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada*";

Figure, tabelle e modelli allegati al "*Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada*";

"*Lavori di Manutenzione Ordinaria di segnaletica verticale, orizzontale e complementare*", 2006 Progetto Definitivo, Città di Torino;

"*Verifica prestazionale di materiali impiegati per la realizzazione di segnaletiche orizzontali*", Felice A. Santagata, Francesco Canestrari, Gilda Ferretti, 2006;

UNI EN 1436/2004 - *"Prestazioni della segnaletica orizzontale per gli utenti della strada";*

www.elletipi.it "*Segnaletica stradale orizzontale*", Articolo tratto da ANAS SpA - Compartimento della Viabilità per l'Emilia-Romagna "*Capitolato Speciale d'Appalto*";

"I rivestimenti in resina: immagine e sostanza", Alessandro Villa, 2006

www.vesmaco.com, Vesmaco®: leader internazionale nella produzione di pavimentazioni in resina per usi sportivi e civili;

"Il calcestruzzo colorato.", W. Europe Standard Time, 2007

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Capitolato speciale d'appalto tipo per lavori stradali, ART. 2, ART.10

PREDISPOSIZIONE DELLE LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE ED IL CONTROLLO DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI PER LA VIABILITÀ ORDINARIA, Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile

Guido Roche, 2012, *La termografia per l'edilizia e l'industria. Manuale operativo per le verifiche termografiche*, Maggioli Editore

Testo Spa, Settembre 2008, *Guida Tascabile Sulla Termografia*

Politecnico di Milano, "Termografia all'infrarosso", Ing. Emanuele Zappa

Università degli studi di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DIMECA), slide dell'ing. Massimiliano Pau

www.autovie.it Norme tecniche della segnaletica stradale - Autovie Venete

www.stradeanas.it

www.associazionetermografia.it

www.testo.it

www.diagnositermografiche.it

www.associazionetermografia.it