



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Proprietà ottiche e termiche dei manti stradali e condizioni di
applicazione nell'illuminotecnica e nell'analisi dell'isola di calore
urbana

Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA

PROPRIETÀ OTTICHE E TERMICHE DEI MANTI STRADALI E CONDIZIONI DI APPLICAZIONE
NELL'ILLUMINOTECNICA E NELL'ANALISI DELL'ISOLA DI CALORE URBANA

Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi (INRIM)

Settembre 2010

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi Finali

Tema: Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto, in particolare nella stagione estiva e per uso terziario e abitativo e loro razionalizzazione. Interazione condizionamento e illuminazione

Responsabile Tema: Gaetano Fasano, ENEA.

Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi

PROPRIETÀ OTTICHE E TERMICHE DEI MANTI STRADALI

Contratto di ricerca

**Proprietà ottiche e termiche dei manti stradali e condizioni di
applicazione nell'illuminotecnica e nell'analisi dell'isola di calore urbana**

ENEA Agenzia Nazionale Per Le Nuove Tecnologie

Paola Iacomussi

Giuseppe Rossi

RIASSUNTO

Nell'ambito del contratto di ricerca "Proprietà ottiche e termiche dei manti stradali e condizioni di applicazione nell'illuminotecnica e nell'analisi dell'isola di calore urbana" attivato con contratto ENEA, l'INRIM ha svolto una serie di misurazioni sulle caratteristiche fotometriche e radiometriche di diverse tipologie di manto stradale al fine di valutare l'impatto in ambito illuminotecnico e ambientale dell'adozione di manti con tali caratteristiche in ambito urbano.

1. INTRODUZIONE

1.1. Obbiettivo della ricerca

Gli obbiettivi della ricerca sono:

- Definire le condizioni di geometriche di misura per la caratterizzazione ottica dei manti stradali a fini pre-normativi per applicazioni in ambito di illuminazione stradale e di studio del bilancio energetico e del microclima in ambito cittadino;
- determinare le proprietà ottiche di un campione di manti stradali nelle tre tipologie normale, drenante e con trattamento al biossido di titanio;
- verificare mediante simulazione e misure sul campo gli impatti energetici ottenibili con i diversi asfalti.

1.2. Condizioni di caratterizzazione dei manti stradali

La normativa per gli impianti di illuminazione prevede una caratterizzazione delle proprietà ottiche dei manti stradali pensando unicamente al traffico motorizzato e prevedendo un numero ridotto di angoli di misura in particolari condizioni di osservazione.

In questa prima fase si valutano e definiscono le condizioni di caratterizzazione più idonee, ai fini della ricerca proposta, pensando sia alla quota di radiazione ridistribuita durante il giorno verso gli edifici sia alle ricadute normative in ambito illuminotecnico.

Si dovranno pertanto stabilire dei campi di misura sia spettrali (visibile e infrarosso) sia direzionali (condizioni di illuminazione e di osservazione) per il caso di traffico motorizzato e di traffico pedonale in condizione di illuminazione notturna e per lo studio della ripartizione dell'energia raggiante in condizioni di illuminazione con luce naturale.

1.3. Caratterizzazione dei manti stradali

Un campione (carota) di manto stradale per ognuna delle tre tipologie normale, drenante e trattato con biossido di titanio viene misurato in laboratorio secondo le modalità e condizioni definite precedentemente.

I risultati vengono confrontati al fine di individuare le peculiarità delle diverse tipologie e, considerando i valori presenti in bibliografia per le applicazioni illuminotecniche, valutare la necessità di misurazioni su un numero esteso di campioni.

1.4. Simulazioni delle condizioni applicative

Su alcuni scenari tipici dell'illuminazione stradale (rettilineo, incrocio) e di ambienti cittadini (via stretta o corso con palazzi) vengono eseguite delle simulazioni illuminotecniche ed energetiche al fine di valutare vantaggi e svantaggi applicativi dei diversi materiali, limitatamente al loro comportamento ottico.

In particolare vengono definite:

- le caratteristiche in termini di risparmio energetico di impianti di illuminazione di pari caratteristiche normative prestazionali,
- la quota di energia dispersa verso l'alto e verso gli edifici in condizioni diurne e notturne, limitatamente al campo del visibile.

1.5. Misure sul campo

Misure campione sono realizzate presso la sede dell'INRIM su un tratto di strada con manto normale e su uno trattato al biossido di titanio al fine di avere una verifica sperimentale dei parametri più significativi calcolati con le simulazioni descritte al punto precedente.

Le misure considereranno l'aspetto dovuto alla radiazione visibile e avranno anche lo scopo di verificare l'uniformità delle prestazioni su un'area relativamente estesa.

2. NORMATIVA RIFERITA ALL'ILLUMINAZIONE STRADALE

2.1. Riferimenti normativi italiani ed europei

Fino al settembre 2004 erano due, se si esclude il caso delle gallerie [1], le norme che si occupavano degli aspetti illuminotecnici degli impianti di illuminazione stradale:

- la UNI 10439 "Requisiti Illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato" [2] per l'individuazione dei requisiti prestazionali dell'impianto, in base alla classificazione della strada, e per il loro calcolo;
- la UNI 10819 "Requisiti per la limitazione della dispersione verso l'alto del flusso luminoso" [3] per l'individuazione degli impianti che devono soddisfare ulteriori limiti, al fine di ridurre il cosiddetto inquinamento luminoso, in base alla loro vicinanza con osservatori astronomici.

Nel settembre 2004 la UNI 10439 è stata ritirata attivando un processo di revisione in due passi successivi:

- il recepimento delle tre norme europee UNI EN 13201 riguardanti i "Requisiti Prestazionali" (13201-2 [4]), il "Calcolo delle Prestazioni" (13201-3 [5]) e i "Metodi di Misurazione delle Prestazioni Fotometriche" (13201-4 [6]) degli impianti di illuminazione stradale,
- la pubblicazione della norma UNI 11248 [7] relativa alla selezione delle categorie illuminotecniche.

Secondo la normativa in vigore la completa gestione del progetto illuminotecnico di un impianto di illuminazione avviene con i seguenti passi:

- Mediante la UNI 11248 il progettista, noto il tipo di strada e individuati un certo numero di parametri di influenza, determina una o più condizioni di illuminazione per il tramite di categorie illuminotecniche, ossia di insiemi di parametri (ad esempio luminanza media, uniformità, incremento di soglia) e dei loro valori, coerenti per una data condizione della strada e del traffico.
- Note le categorie illuminotecniche, la UNI EN 13201-2 fornisce i requisiti prestazionali mantenuti, ossia il valore estremo dei parametri illuminotecnici che l'impianto deve sempre garantire. Permette quindi il suo dimensionamento e condiziona le scelte progettuali operative. Tali requisiti sono essenzialmente di tipo empirico, frutto dell'esperienza maturata nei vari paesi europei e quindi sostanzialmente allineati a quelli proposti dalla CIE (Commission Internazionale de l'Eclairage) [8], ente scientifico di riferimento per la fotometria e l'illuminotecnica.
- La EN 13201-3 impone un modello matematico dell'ambiente illuminato, descrivendo in dettaglio gli algoritmi per il calcolo dei parametri individuati della categoria illuminotecnica. Il modello introduce una serie di convenzioni semplificative (strada piana, non influenza di sorgenti di luce estranee a quelle dell'impianto) e specifica una serie di griglie, nei punti delle quali devono essere calcolati i parametri e soddisfatti i valori richiesti.
- Infine la EN 13201-4 fornisce le prescrizioni e le condizioni per la caratterizzazione illuminotecnica sul campo dell'impianto.

Il “pacchetto” normativo amplia lo scopo della UNI 10439, comprendendo, oltre al traffico motorizzato, anche quello misto e pedonale, e, pertanto, introduce anche prescrizioni in termini di illuminamento verticale nelle zone non adibite strettamente al traffico veicolare (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

La UNI 11248 si basa, per gli aspetti scientifici, sul rapporto tecnico CIE 115 [8] e segue, riadattandolo alle esigenze e all'esperienza nazionale, il rapporto tecnico europeo TR13201-1 [9]. Attraverso una valutazione delle reali condizioni ed esigenze del traffico, il progettista è chiamato a concepire un impianto in grado di soddisfare i requisiti di sicurezza e contemporaneamente ridurre il flusso luminoso, complessivamente emesso. Quest'ultima condizione è particolarmente importante dal punto di vista ambientale per la riduzione sia dei consumi energetici sia dell'inquinamento luminoso (Figura 1).



Figura 1 Nella valutazione dell'inquinamento luminoso occorre distinguere tra gli apparecchi che vengono comunque schermati dagli edifici (centro storico a destra) e quelli non schermati che possono irradiare direttamente verso il cielo (zone periferiche, piazze) [10].

La norma introduce tre livelli di categorie illuminotecniche:

- la categoria di riferimento, definita in base alla classificazione delle strade secondo il Codice della Strada;
- la categoria di progetto, derivata da quella di riferimento valutando i parametri di influenza nella situazione peggiore, ossia quella che richiede le condizioni di illuminazione più gravose. Pertanto la categoria di progetto specifica le prestazioni più elevate che l'impianto deve essere in grado di produrre;
- una o più categorie di esercizio con requisiti prestazionali pari o inferiori a quella di progetto, ottenute valutando i parametri di influenza variabili nel tempo (ad esempio flusso di traffico). Le categorie di esercizio specificano quindi tutte le possibili condizioni operative “istantanee” dell'impianto.

Per individuare le categorie illuminotecniche, il progettista deve suddividere la strada in zone di studio, con condizioni omogenee dei parametri di influenza, e per ognuna di queste zone individuare le categorie illuminotecniche previste, attraverso una valutazione del rischio, che considera, con i dovuti pesi, i parametri che si ritiene possano influenzare

le condizioni di visione, di guida e/o le necessità per il traffico motorizzato e pedonale.

Un ulteriore importante aspetto riguarda le verifiche illuminotecniche. Essendo i parametri prestazionali indicati come “valori mantenuti”, devono essere verificati durante l'esercizio per garantire, in qualsiasi momento, il superamento dei requisiti previsti nelle categorie illuminotecniche di esercizio. La nuova norma si allinea alla scelta adottata dal Ministero delle Infrastrutture per gli impianti di illuminazione in galleria [11] prevedendo misurazioni in tre diverse situazioni:

- all'atto del collaudo dell'impianto di illuminazione;
- durante l'esercizio dell'impianto ai fini di verifica del superamento dei requisiti normativi;
- durante l'esercizio dell'impianto ai fini di acquisire informazioni per la manutenzione.

Nel primo caso, per svincolare i risultati dalle condizioni del manto stradale, qualora la categoria illuminotecnica preveda prestazioni in termini di luminanza della superficie della carreggiata, deve essere considerato l'illuminamento, negli stessi punti della griglia di calcolo. A tal fine il progettista dovrà fornire anche i valori di illuminamento, per ogni punto della griglia. Questa scelta operativa è senza alternative per la necessità di separare le caratteristiche dell'impianto (di pertinenza del progettista e dell'installatore) dai requisiti illuminotecnici, per il tratto di strada considerato (di responsabilità dell'ente concessionario).

La norma copre tutte le situazioni di interesse per l'ente gestore dell'impianto. Al termine della fase di collaudo, se positiva, questi riceve un impianto sicuramente conforme al progetto illuminotecnico; ma, durante l'esercizio, deve assicurare il mantenimento dei valori richiesti dalla normativa, operando attraverso opportune procedure di manutenzione, già previste in sede di progetto.

La disponibilità di tecniche di misura “ad alto rendimento” rende fattibile ed economicamente conveniente eseguire misurazioni nelle tre situazioni evidenziate [12].

2.2. Requisiti prestazionali degli impianti

I requisiti prestazionali per gli impianti sono definiti nella norma UNI EN 13201-2 [4] attraverso la definizione di serie di categorie illuminotecniche che raggruppano parametri prestazionali congruenti e i relativi requisiti quantitativi.

Per quanto riguarda le caratteristiche dell'asfalto sono di interesse le sole prescrizioni in termini di luminanza del manto stradale riassunte nella Tabella 1 e relative al traffico motorizzato.

I valori di luminanza previsti variano da $0,3 \text{ cd m}^{-2}$ a 2 cd m^{-2} .

Per il calcolo degli impianti di illuminazione stradale per il traffico motorizzato risulta pertanto indispensabile la conoscenza delle caratteristiche in riflessione del manto stesso per gli angoli di visione e illuminazione previsti.

La CIE specifica grandezze e condizioni di misura e introduce una serie di “asfalti normalizzati” [13] e condizioni di asfalto asciutto e bagnato. La norma italiana [7] considera solo due tipi di questi asfalti come meglio specificato al §4.

Considerando asfalti con le caratteristiche ottiche previste dalla norma italiana e le caratteristiche tipiche per gli impianti (apparecchi e installazione) il CEN sta considerando di imporre dei limiti massimi sull'assorbimento energetico degli impianti.

A tal fine è stato proposto il parametro SLEEC-L (Street Lighting Energy Efficiency Criterion Luminance based of a lighting installation) come rapporto tra la potenza elettrica effettivamente assorbita dall'impianto e la superficie che deve essere illuminata e il valore

nominale della luminanza prescritta.

Un parametro di questo tipo non tiene però conto delle reali caratteristiche dell'asfalto e pertanto eventuali valori limite dovranno essere relativamente alti (ad esempio SLEEC-L = $1 \text{ W (cd m}^{-2})^{-1} \text{ m}^{-2}$) perdendo di efficacia nella riduzione dei consumi energetici.

Un parametro che meglio descrive la situazione energetica è il coefficiente di luminanza dell'impianto di illuminazione:

$$Q_i = \frac{L_R}{E_R}$$

ove L_r e E_r sono rispettivamente la luminanza media e l'illuminamento medio sul manto stradale.

Poiché questi valori dipendono dalle caratteristiche fotometriche del manto stradale possono essere normalizzati dividendoli per Q_0 (vedere il §4.1) ottenendo il fattore q_i (fattore di qualità dell'impianto) che dipende esclusivamente dalle caratteristiche dell'impianto:

$$q_i = \frac{L_R}{Q_0 E_R} = \frac{Q_i}{Q_0}$$

Allo stato attuale della tecnologia q_i è compreso tra 0,80 e 1,20 [20] con una differenza del 50 % tra l'illuminamento medio richiesto a parità di luminanza e quindi con un pari divario sulla potenza installata.

Tabella 1

Categorie illuminotecniche, tipo di strada e parametro prestazionale di riferimento. Per l'associazione categoria – tipo di strada si è considerata la categoria illuminotecnica di riferimento come precisato nella norma [7]. Le categorie per le quali non sono indicate strade di riferimento possono essere selezionate dal progettista attraverso l'analisi dei rischi prevista dalla norma citata.

Categoria illuminotecnica	Tipo di strada	Parametro prestazionale
		Luminanza valore medio minimo mantenuto
		L_m
		[cd m ⁻²]
ME1	Autostrade extraurbane	2,00
	Autostrade urbane	
ME2		1,50
ME3a	Strade di servizio alle autostrade	1,00
	Strade di servizio alle autostrade urbane	
	Strade extraurbane principali	
	Strade extraurbane secondarie (tipi C1 e C2)	
	Strade extraurbane secondarie con limiti particolari	
	Strade urbane di scorrimento veloce	
	Strade locali extraurbane (tipi F1 e F2)	
ME3b		1,00
ME3c	Strade urbane interquartiere	1,00
	Strade urbane di quartiere	
ME4a	Strade di servizio alle strade extraurbane principali	0,75
ME4b	Strade extraurbane secondarie	0,75
	Strade locali extraurbane (max 50 km/h)	
	Strade locali urbane (tipi F1 e F2)	
ME5		0,50
ME6		0,30

3. IMPATTO AMBIENTALE

3.1. Metodologie innovative di progetto legate alle condizioni di visione di ostacoli

3.1.1. Premessa

I requisiti normativi prestazionali sugli impianti di illuminazione sono individuati mediante la categoria illuminotecnica ossia un insieme congruente dei valori di determinati parametri (valore medio della luminanza del manto stradale, uniformità, ecc.) in genere indicati come parametri di qualità.

Questi requisiti sono stati determinati in modo euristico e confermati sul campo da sperimentazioni e dalla lunga pratica illuminotecnica.

Esiste però l'interesse di legare i parametri prestazionali alle reali condizioni di visione al fine di pervenire all'ottimizzazione degli impianti con la speranza di ridurre i consumi energetici e l'impatto ambientale degli stessi.

Con questa strategia i limiti prestazionali vengono definiti attraverso un modello matematico della visione applicato a un ambiente illuminato e osservato convenzionalmente definito.

Il metodo STV (Small Target Visibility) è un algoritmo per quantificare la capacità di un impianto di illuminazione di rendere visibile una serie di ostacoli normalizzati, opportunamente distribuiti sulla strada.

Originariamente è stato proposto come metodo progettuale alternativo a quello usuale, basato, come precedentemente specificato, sul raggiungimento di valori minimi di luminanza media e uniformità, ma può essere utile per confrontare progetti, altrimenti equivalenti dal punto di vista normativo, permettendo di scegliere quello che potrebbe assicurare le migliori condizioni di sicurezza alla circolazione e il minor impatto ambientale.

Con quest'ultima finalità è allo studio una norma UNI basata su una riformulazione semplificata del metodo originale.

3.1.2. I compiti visivi del guidatore

Lo scopo principale dell'illuminazione pubblica di strade adibite al traffico motorizzato consiste nel garantire, per quanto possibile, condizioni di sicurezza paragonabili a quelle diurne.

Dato per scontato che, con le attuali tecnologie, la guida su strada è una "navigazione a vista", tre sono le tecniche per renderla possibile di notte:

- l'uso di dispositivi di segnalazione ed illuminazione (proiettori) a bordo del veicolo;
- l'impiego di segnaletica verticale e orizzontale del tipo a riflessione catadiottrica o attiva;
- la realizzazione di sistemi di illuminazione pubblica.

Poiché i proiettori automobilistici, per la necessità di ridurre l'abbagliamento dei veicoli incrociati e per ovvie limitazioni sulla potenza delle lampade, perdono la loro efficacia all'aumentare della velocità, del numero di veicoli presenti sulla strada e della complessità dello scenario illuminato, risulta evidente la necessità, in un elevato numero di situazioni, di potenziare le condizioni di illuminazione con l'impiego di impianti di illuminazione pubblica.

Occorre quindi individuare dei parametri per definire le caratteristiche che deve possedere l'impianto di illuminazione per raggiungere l'obiettivo prefissato.

Il compito visivo svolto dal guidatore può essere diviso in tre sottocompiti contemporanei:

- di posizione: adeguamento della velocità e della posizione del veicolo per mantenerlo nella corretta corsia della carreggiata, alla velocità desiderata;
- di situazione: variazioni di velocità, direzione, posizione sulla carreggiata richieste da un cambiamento della geometria della strada, da un improvviso ostacolo, dalla presenza e dal comportamento degli altri veicoli;
- di navigazione : scelta della corretta strada per portare a termine il viaggio.

Ognuno di questi compiti, per essere svolto correttamente e con sicurezza, richiede particolari tipi di informazioni visive e adeguati livelli di illuminazione sulla carreggiata. Anche le condizioni di illuminazione dell'ambiente, che circonda la strada, e l'effetto "guida visiva", prodotto dall'impianto e dalla segnaletica orizzontale, influenzano notevolmente la facilità, il grado di sicurezza e di stress con cui vengono eseguiti i compiti di guida.

Considerata la complessità del compito visivo è necessario procedere cercando di considerare separatamente i diversi aspetti e individuando modelli matematici semplici, per essere applicati nella pratica, ma, contemporaneamente, sufficientemente completi per dare risposte congruenti con le necessità.

Nel caso stradale si ritiene che l'individuazione di un ostacolo sulla strada in tempo utile per applicare manovre correttive sia il compito essenziale per garantire la sicurezza. Il metodo STV si concentra su questo aspetto.

3.1.3. Basi teoriche

La visibilità di un oggetto dipende dai seguenti parametri:

- il contrasto tra la luminanza della superficie dell'oggetto e la luminanza dello sfondo;
- le condizioni di adattamento dell'occhio riferite all'osservazione dell'oggetto compresi gli eventuali effetti transitori dovuti a disuniformità nello sfondo;
- il livello dell'abbagliamento disabilitante;
- la complessità visiva dello sfondo;
- l'effetto dinamico dovuto al moto del guidatore;
- l'effetto dinamico dovuto al moto dell'oggetto;
- il colore, la forma e le dimensioni dell'oggetto;
- l'età e le capacità visive del guidatore.

Considerando il caso acromatico, un oggetto viene visto per la differenza tra la sua luminanza L_t e quella dello sfondo L_b (Figura 2):

$$\Delta L = L_t - L_b$$

Il valore minimo di questa differenza che rende percepibile l'oggetto con una data probabilità p si chiama differenza di soglia della luminanza ΔL_{th} . Normalmente si considerano valori per $p=50\%$ o $p=99,9\%$.

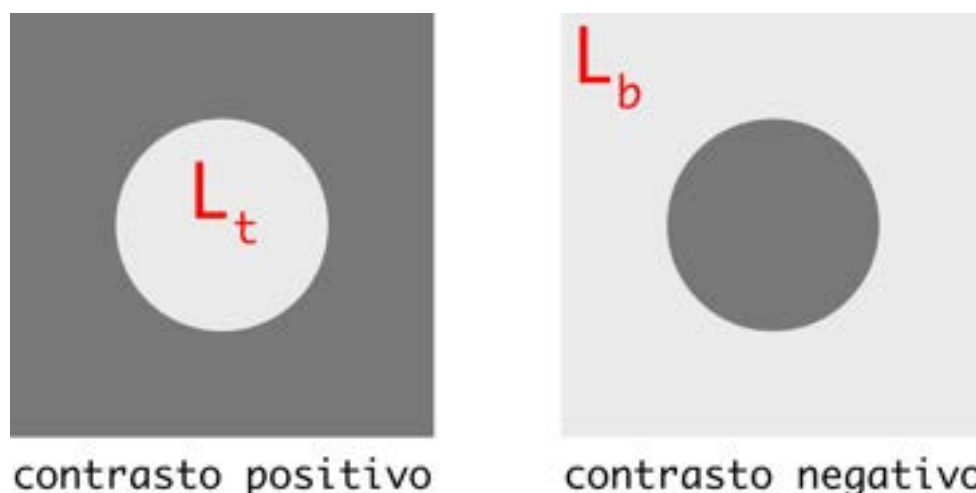


Figura 2 Condizioni di visione di un oggetto: il contrasto è positivo se la luminanza L_t dell'oggetto è superiore a quella L_b dello sfondo, il contrasto è negativo nella situazione opposta.

Per evidenziare che l'oggetto può essere più chiaro o più scuro rispetto allo sfondo, si introduce il concetto di contrasto, definito dall'equazione:

$$C = \frac{\Delta L}{L_b}$$

Il contrasto può essere positivo o negativo (Figura 2). Nel caso di oggetto con luminanza nulla il contrasto vale -1; con oggetto e sfondo della stessa luminanza vale 0 e quindi l'oggetto non risulta percepibile rispetto allo sfondo. Il contrasto positivo non ha un limite superiore e vale 1 quando la luminanza dell'oggetto è doppia rispetto a quella dello sfondo.

Il sistema di illuminazione deve quindi assicurare un livello di luminanza del manto stradale (lo sfondo) adeguato per la visione di oggetti anche con ridotti valori di contrasto: la luminanza media L_m della carreggiata è il parametro illuminotecnico che quantifica questa condizione.

Nel caso stradale è stata verificata sperimentalmente una condizione asintotica, per la quale, oltre un valore di soglia della luminanza media, non si registrano significativi miglioramenti sulle condizioni di visione degli ostacoli. Questa evidenza sperimentale ha permesso di introdurre dei requisiti minimi sulla luminanza media e sulla sua uniformità [8], recepiti in ambito normativo [4].

La situazione è soddisfacente ma può essere migliorata in almeno due direzioni.

- Una elevata uniformità non è sinonimo di maggior probabilità di visione dell'ostacolo. Nel caso limite di illuminazione perfettamente uniforme, se il contrasto dell'oggetto è al di sotto della soglia, questi non potrà mai essere visto; invece in caso di disuniformità aumenta la probabilità che, per le dimensioni dell'oggetto, alcune parti diventino visibili. Pertanto una disuniformità "controllata" potrebbe migliorare le condizioni di visione e permettere riduzioni del valore di luminanza media.
- Due impianti formalmente simili dal punto di vista normativo possono presentare, sul campo, caratteristiche notevolmente diverse nella capacità di rendere visibili oggetti sulla strada. Infatti entrano in gioco parametri non considerati a livello normativo (in termini prestazionali), quali l'interdistanza tra le sorgenti e la ripartizione dell'intensità

luminosa degli apparecchi di illuminazione, in grado di influenzare le modalità di illuminazione della superficie visibile dell'ostacolo e quindi la sua luminanza.

Il modello STV cerca, partendo da queste osservazioni, di quantificare numericamente le reali condizioni di visibilità, introducendo un parametro numerico per misurare la visibilità, un metodo per calcolare la differenza di soglia della luminanza ΔL_{th} e delle regole per posizionare un dato numero di oggetti, anch'essi normalizzati, sulla carreggiata e per valutare, con un unico valore, la loro visibilità.

3.1.4. Il modello di visibilità

Le reali condizioni di visibilità dell'ostacolo possono essere quantificate calcolando il rapporto tra il contrasto reale dell'oggetto e il contrasto di soglia nelle stesse condizioni di visione. Questo rapporto è detto livello di visibilità:

$$VL = \frac{\Delta L}{\Delta L_{th}}$$

Il livello di visibilità è pertanto una grandezza con dimensione 1.

Il numeratore è calcolato (con qualche problema come evidenziato nel prossimo paragrafo) o misurato. Il calcolo della differenza di soglia della luminanza si basa su un modello sviluppato sulla fine degli anni 80 da Adrian [14]. Il modello considera la somma geometrica di due leggi della visione:

- la legge di Ricco secondo la quale il prodotto a parità di L_b :

$$\Delta L_{th} \propto \alpha^2$$

è, per piccoli oggetti, costante (α è l'angolo secondo il quale è visto l'oggetto, espresso in minuti di arco);

- la legge di Weber che afferma che per grandi oggetti ΔL_{th} è costante.

Secondo Adrian la differenza di soglia della luminanza vale:

$$\Delta L_{th} = k \left(\frac{\Phi^{\frac{1}{2}}}{\alpha} + L^{\frac{1}{2}} \right)^2$$

ove

- se $L_b \geq 0,6 \text{ cd m}^{-2}$

$$\Phi^{\frac{1}{2}} = \text{Log}(4,1925 L_b^{0,1536}) + 0,1684 L_b^{0,5867}$$

$$L^{\frac{1}{2}} = 0,05946 L_b^{0,466}$$

- se $L_b \leq 0,00418 \text{ cd m}^{-2}$

$$\text{Log} \left(\Phi^{\frac{1}{2}} \right) = 0,028 + 0,173 \text{ Log}(L_b)$$

$$\text{Log} \left(L^{\frac{1}{2}} \right) = -0,891 + 0,5275 \text{Log}(L_b) + 0,0227 (\text{Log}(L_b))^2$$

- se $0,00418 \leq L_b \leq 0,6 \text{ cd m}^{-2}$

$$\text{Log} \left(\Phi^{\frac{1}{2}} \right) = -0,072 + 0,3372 \text{Log}(L_b) + 0,0866 (\text{Log}(L_b))^2$$

$$\text{Log} \left(L^{\frac{1}{2}} \right) = -1,256 + 0,319 \text{Log}(L_b)$$

k è una costante che determina la provabilità di individuare l'ostacolo: se $k = 2,6$ la probabilità vale 99,9%, se $k = 1$ la probabilità vale 50%..

Sul modello base occorre applicare delle correzioni per renderlo più aderente alle reali condizioni stradali.

La prima correzione riguarda il tempo di osservazione e viene valutata mediante il fattore di tempo TF. Il modello base si riferisce a tempi superiori a 2 s, ma al diminuire del tempo di osservazione aumenta ΔL_{th} . In genere nelle applicazioni stradali si considera adeguato un tempo di osservazione $t = 0,2$ s, corrispondente a 5 m percorsi quando si viaggia a 90 km h⁻¹. L'espressione generale del fattore di correzione è:

$$TF = \frac{a(\alpha, L_b) + t}{t}$$

ove i parametri valgono:

$$a(\alpha, L_b) = \frac{(a(\alpha)^2 + a(L_b)^2)^{\frac{1}{2}}}{2,1}$$

$$a(\alpha) = 0,36 - 0,0972 \frac{(\text{Log}(\alpha) + 0,523)^2}{(\text{Log}(\alpha) + 0,523)^2 - 2,513 (\text{Log}(\alpha) + 0,523) + 2,7895}$$

$$a(L_b) = 0,355 - 0,1217 \frac{(\text{Log}(L_b) + 6)^2}{(\text{Log}(L_b) + 6)^2 - 10,4 (\text{Log}(L_b) + 6) + 52,28}$$

La seconda correzione riguarda il tipo di contrasto e viene attuata mediante il fattore di contrasto F_{CP} . La formula base è valida per contrasti positivi, pertanto in questo caso:

$$F_{CP} = 1$$

Per contrasti negativi:

$$F_{CP} = 1 - \frac{m \alpha^{-\beta}}{2,4 \Delta L_{pos}}$$

ove

ΔL_{pos} è la differenza di soglia della luminanza calcolata con la formula base ossia per contrasti positivi e tempi di osservazione di 2 s;

β vale:

$$\beta = 0,6 L_b^{-0,1488}$$

e se $L_b \geq 0,1 \text{ cd m}^{-2}$:

$$m = 10^{-10}^{-\left(0,125 (\log(L_b) + 1)^2 - 0,0245\right)}$$

se $0,01 > L_b > 0,1 \text{ cd m}^{-2}$:

$$m = 10^{-10}^{-\left(0,075 (\log(L_b) + 1)^2 - 0,0245\right)}$$

L'ultimo fattore di correzione considerato riguarda l'età dell'osservatore A (in anni), infatti con l'età ΔL_{th} aumenta per via della diminuzione del fattore di trasmissione del bulbo oculare:

$$AF = \frac{(A - a)^2}{b} + c$$

ove:

- se $23 < A < 64$:

$$a = 19 \quad b = 2160 \quad c = 0,99$$

- se $75 < A \leq 64$:

$$a = 56,6 \quad b = 116,3 \quad c = 1,43$$

La formula finale del modello completo può essere scritta come:

$$\Delta L_{th} = k \left(\frac{\Phi^{\frac{1}{2}}}{\alpha} + L^{\frac{1}{2}} \right)^2 TF F_{CP} AF$$

Ricordiamo che nel modello di Adrian L_b comprende anche l'influenza delle sorgenti di luce osservate in visione periferia (luminanza di velo).

3.1.5. Il modello STV

Mentre a livello internazionale c'è completo accordo sul modello di Adrian le differenze risultano palesi quando occorre scegliere il tipo di ostacolo e la loro disposizione sulla carreggiata (Figura 3).

In USA, dopo una serie di indagini preliminari [15], a livello normativo [16] è stato adottato un ostacolo piano quadrato di 18 cm e con fattore di riflessione pari a 0,5. L'ostacolo è posto a 83 m dall'osservatore (angolo di osservazione rispetto al piano stradale di 1°).

Studi francesi privilegiano l'uso di ostacoli sferici [17]: aumenta la complessità dei calcoli,

ma l'effetto di volume rende più facilmente visibili gli ostacoli, anche in condizioni critiche, e i risultati potrebbero essere maggiormente aderenti alla realtà.

Un altro punto di discussione riguarda il calcolo della luminanza dell'ostacolo. L'algoritmo americano trascura completamente le riflessioni del manto stradale verso l'ostacolo. Il considerare solo il contributo diretto è stato un vincolo pesante, imposto quanto il metodo è stato originariamente proposto, per mancanza di dati sulle proprietà di riflessione degli asfalti, ad angoli diversi da 1° . Oggi questa limitazione potrebbe essere superata senza grosse difficoltà.

Inoltre questo vincolo rende impossibile il confronto tra valori calcolati e valori misurati di STV, in quanto questi ultimi considerano necessariamente tutte le riflessioni.

Una ulteriore critica riguarda il contributo dei proiettori automobilistici. I nuovi fasci, associati a sorgenti luminose con flusso elevato, possono illuminare la superficie frontale degli ostacoli in modo non trascurabile e modificare radicalmente la mappa delle situazioni di visibilità.

Per ultimo anche il calcolo finale del valore di STV, che considera il valore medio dei livelli di visibilità di ogni ostacolo, può lasciare perplessi, in quanto il contributo di un ostacolo posto in un punto ove risulta poco visibile non può essere compensato dal contributo di un ostacolo eccezionalmente visibile.



Figura 3 Esempio di valutazione dell'STV.

3.2. Inquinamento luminoso

Per inquinamento luminoso, termine non prettamente corretto dal punto di vista fisico ma entrato nell'uso comune, si intende il deprezzamenti della capacità di visione della volta

celeste dovuto alla luce, generata artificialmente e diffusa dall'atmosfera.

In effetti questa luce crea una luminanza aggiuntiva che si sovrappone a quella naturale della volta celeste e alla radiazione dei corpi celesti. Il risultato è una riduzione della magnitudo limite con conseguente riduzione del numero di corpi celesti che può essere visto a occhio nudo o con strumenti ottici.

3.2.1. Diffusione della radiazione luminosa

La quantità di flusso luminoso disperso verso l'alto da un impianto di illuminazione e, più in generale, da una città, non è una grandezza valutabile direttamente in base alla sola diminuzione della soglia di visibilità delle stelle, poiché questa diminuzione dipende da diversi fattori, con l'evidente preponderanza della diffusione della luce ad opera delle particelle in sospensione nell'atmosfera e dell'atmosfera stessa. Se non vi fossero questi fenomeni, aggravati dall'inquinamento atmosferico, la luce emessa dalle sorgenti si propagherebbe nello spazio esterno senza alcuna conseguenza sulla visibilità della volta celeste.

La valutazione diretta dell'influenza di uno o più impianti di illuminazione sulla diminuzione della soglia di visibilità delle stelle può essere eseguita solo con misure di tipo differenziale ossia confrontando tra loro le misure eseguite con impianto interamente funzionante con quelle eseguite con impianto spento. Questa metodologia non è, evidentemente, praticabile nei casi in cui il flusso luminoso emesso dall'impianto rappresenta una frazione minima del flusso luminoso disperso complessivamente, ad esempio da una città.

Occorre perciò procedere sviluppando un modello matematico, che descriva in modo sufficientemente accurato l'interazione apparecchi di illuminazione – superfici illuminate per definire la quota di flusso luminoso dispersa verso l'alto.

Non è altresì possibile, per le evidenti interazioni dovute alla co-presenza di molti apparecchi all'interno di un'area urbanizzata, ragionare in termini di singolo apparecchio, dato che, fisicamente, tutti gli apparecchi e tutte le superfici a qualsiasi titolo illuminate concorrono a fornire i due principali contributi al valore del flusso luminoso disperso verso l'alto:

- quello emesso direttamente verso l'alto dagli apparecchi di illuminazione, sia per le caratteristiche costruttive sia per il particolare orientamento di installazione;
- quello dovuto alla riflessione verso l'alto della radiazione incidente sulle superfici illuminate (manto stradale, pareti degli edifici, oggetti presenti sulla strada).

Nel caso urbano, particolarmente significativa appare l'influenza delle case. La situazione è evidenziata nella Figura 4 ove è illustrato un apparecchio di illuminazione installato in un corso cittadino. La radiazione emessa verso l'alto dall'apparecchio (raggio A) viene intercettata dagli edifici. La radiazione emessa verso il basso viene riflessa dal manto stradale e diffusa verso l'alto direttamente (raggio B) o attraverso più riflessioni (raggi C e D). Ovviamente sono possibili ulteriori casi di riflessione, non esemplificati nella figura per semplicità, come quello del flusso luminoso emesso dall'apparecchio direttamente verso gli edifici e che non riesce a raggiungere la volta celeste. La figura richiama inoltre il caso di un tipico apparecchio stradale con emissione di flusso luminoso insignificante oltre i 20° (rispetto all'orizzonte).

Diverso è il caso di un apparecchio isolato (impianto di illuminazione rurale o periferico). La mancanza di edifici che agiscono come schermi della luce rende, con sufficiente approssimazione, ipotizzabile una descrizione con soli due contributi:

- la radiazione emessa direttamente verso l'alto dall'apparecchio;

- quella riflessa dalle superfici orizzontali, ipotizzabili, considerate anche le condizioni geometriche, come diffusori lambertiani, ossia con luminanza costante rispetto alla direzione di osservazione.

Altri contributi al flusso luminoso diretto verso l'alto, in genere di minor importanza quantitativa, ma in alcune situazioni non trascurabili sono, ad esempio, la luce proveniente da impianti esterni non adibiti all'illuminazione stradale (aree di lavoro, impianti sportivi, ecc.), da impianti privati, sia esterni sia interni (in presenza di finestre), da impianti per l'illuminazione pubblicitaria o di monumenti.

Dalle considerazioni precedenti risulta chiaro che la ripartizione dell'intensità luminosa dell'apparecchio di illuminazione usato in un impianto sia solo uno degli aspetti, importante ma non unico, per giudicare la capacità dell'impianto stesso nel limitare l'impatto ambientale della luce emessa. Il giudizio deve e può essere emesso solo considerando l'impianto nel suo insieme e la sua interazione con l'ambiente.

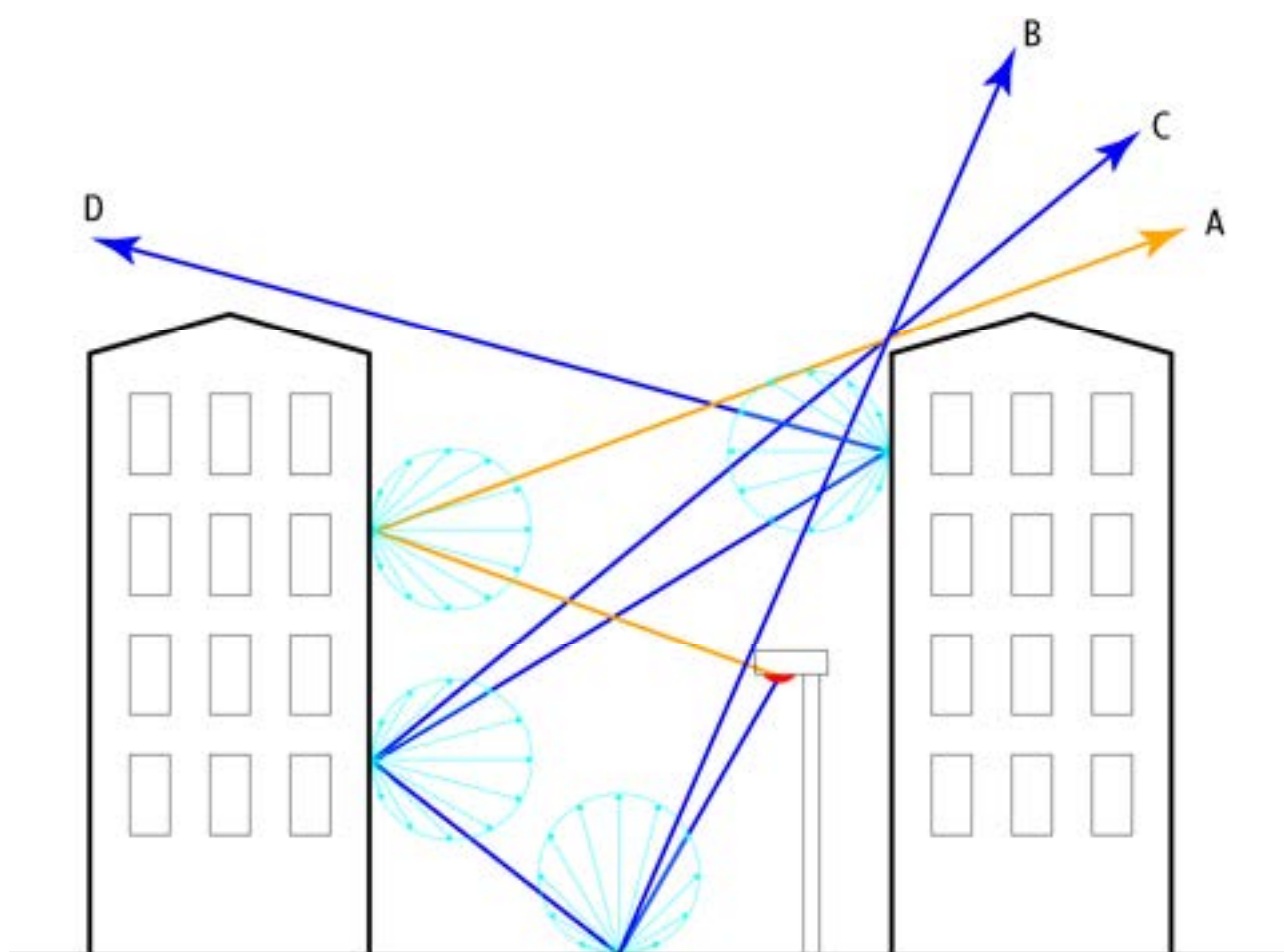


Figura 4 Casi tipici delle riflessioni della luce emessa da un apparecchio di illuminazione in ambito cittadino. A) raggio emesso verso l'alto; B) raggio riflesso verso l'alto dal manto stradale; C) raggio riflesso verso l'alto dopo una doppia riflessione (manto stradale e parete di edificio); D) raggio riflesso verso l'alto dopo riflessioni multiple.

A tale scopo, rivestono una importanza essenziale, e devono essere considerati nella progettazione di nuovi impianti, parametri quali:

- la capacità di sfruttare al meglio le proprietà in riflessione dell'asfalto, riducendo, a parità di categoria illuminotecnica della strada illuminata, il flusso luminoso totale installato;
- la disposizione degli apparecchi, la loro inclinazione rispetto all'orizzontale e interdistanza;
- la capacità di illuminare le sole zone di effettivo interesse e nei limiti normativi;
- la presenza di strutture schermati sia naturali sia artificiali;
- la definizione da parte del progettista di una o più categorie di esercizio che considerino, attraverso una valutazione del rischio, una variazione delle prestazioni dell'impianto in base alle reali esigenze (flusso del traffico, presenza di intersezioni, ecc.);
- la presenza di sistemi di regolazione del flusso luminoso emesso, in modo da mantenere l'impianto ai limiti della categoria illuminotecnica di esercizio prevista dal progettista, considerando le condizioni di manutenzione e l'invecchiamento delle lampade;
- le proprietà in riflessione di tutte le superfici illuminate.

Le caratteristiche in riflessione dell'asfalto rivestono, in questo contesto, un ruolo di primaria importanza, in particolare sarebbe opportuno disporre di un asfalto:

- con elevata riflessione per l'angolo di osservazione ($\alpha = 1^\circ$) previsto dalla normativa, al fine di ottenere la luminanza prescritta, minimizzando l'illuminamento sul manto stradale e quindi il flusso luminoso installato.
- Con un fattore di riflessione basso per le altre direzioni al fine di minimizzare il flusso luminoso diffuso verso l'alto.

3.2.2. Situazione normativa

Dal punto di vista normativo nel progettare o nel valutare le caratteristiche di un impianto di illuminazione occorre considerare anche gli effetti dovuti alla dispersione della luce verso l'alto, tema trattato nella norma UNI10819 [18] e, in molte regioni, da apposita legislazione che, spesso, prescrive vincoli di tipo diverso, non sempre giustificabili dal solo punto di vista tecnico o del risparmio energetico.

La norma introduce un parametro, il rapporto medio di emissione superiore R_n , come indicatore della condizione di inquinamento luminoso generato dagli impianti di un territorio comunale o di una determinata zona.

R_n è definito da:

$$R_n = 100 \frac{\sum_{i=1}^n \Phi_{i,\theta,\psi}}{\sum_{i=1}^n \Phi_{i,t}} [\%]$$

ove:

n numero di apparecchi di illuminazione degli impianti considerati;

$\Phi_{n,t}$ flusso luminoso totale emesso dall'i-esimo apparecchio di illuminazione;

$\Phi_{n,\theta,\psi}$ flusso luminoso emesso dall'i-esimo apparecchio di illuminazione nell'emisfero superiore nelle condizioni nominali di installazione, specificate dagli angoli θ e ψ .

Per individuare valori limite di R_n la norma classifica gli impianti di illuminazione in 5 tipi in

base alle loro utilizzazione e importanza (Tabella 2) e divide il territorio comunale in zone in base alla distanza dagli osservatori astronomici o astrofisici e dall'importanza scientifica di questi (Tabella 3).

Gli impianti di tipo E sono ammessi solo nella zona 3 o nella 2 solo se soggetti a orario regolamentato. Per gli altri tipi di impianto il valore massimo di R_n può passare dall' 1% (zona 1) al 10 % (zona 3).

Il principale vantaggio, sia di metodo sia procedurale, della proposta UNI risiede nel fatto che tutti gli impianti del territorio comunale, o di una singola zona, sono valutati contemporaneamente e pertanto la presenza di alcuni impianti molto inquinanti può essere compensata da quelli con valore R_n inferiore alle richieste medie. Di contro soluzioni più complesse, attualmente in discussione all'interno del TC 4-21 della CIE, prevedono un maggior dettaglio nella classificazione degli apparecchi di illuminazione e la stima del flusso riflesso verso l'alto dalle superfici illuminate [19].

Tabella 2 Classificazione degli impianti di illuminazione ai fini dell'inquinamento luminoso.

Tipo Impianto	Descrizione
A	Impianti dove la sicurezza è a carattere prioritario
B	Impianti sportivi, centri commerciali e ricreativi, giardini e parchi privati
C	Impianti di interesse ambientale e monumentale
D	Impianti pubblicitari realizzati con apparecchi di illuminazione
E	Impianti a carattere temporaneo ed ornamentale

Tabella 3 Zone del territorio comunale ai fini della valutazione degli impianti.

Zona	Descrizione	Dimensione
1	Zona altamente protetta (osservatori di importanza internazionale) ad illuminazione limitata	raggio dal centro di osservazione pari a 5 km
2	Zona protetta intorno alla zona 1 o intorno a osservatori a carattere nazionale e/o divulgativo	raggio dal centro di osservazione compreso tra 25 e 5 km
3	Il resto del territorio	

3.2.3. Leggi regionali

Indipendentemente dalla norma UNI, descritta nel precedente paragrafo, molte regioni hanno emanato leggi specifiche sull'inquinamento luminoso con requisiti aggiuntivi per gli impianti di illuminazione.

Non vi è quindi una legislazione uniforme sul territorio nazionale, ma piuttosto una variabilità ampia con prescrizioni specifiche sia sui tipi di apparecchi di illuminazione (ad esempio a vetro piano), sulle modalità di installazione (inclinazione e interdistanza) e sul tipo di sorgenti luminose utilizzabili.

In ogni caso le caratteristiche foto-radiometriche dell'asfalto in riflessione non sono considerate, anche se, come evidenziato precedentemente, rivestono una particolare importanza ai fini della riduzione del flusso luminoso installato e disperso, in modo indiretto, verso l'alto.

4. CARATTERIZZAZIONE DEL MANTO STRADALE PER L'ILLUMINOTECNICA

4.1. Grandezze normative per la caratterizzazione delle proprietà in riflessione

A livello normativo, le proprietà fotometriche delle pavimentazioni stradali sono individuate dalla ripartizione spaziale del coefficiente di luminanza q .

Con riferimento alla Figura 5 il coefficiente di luminanza $q(P, \varepsilon, \beta, \sigma)$ della generica area infinitesima, individuata dal punto P , è valutato quando la superficie viene osservata dalla posizione 3, appartenente all'asse inclinato di 1° rispetto al piano stradale ($\sigma = 1^\circ$) e giacente in un piano verticale parallelo all'asse stradale, al variare della posizione di una sorgente di luce (1) individuata dagli angoli β e ε . I valori angolari da considerare sono elencati nel prospetto 2 della UNI EN 13201-3.

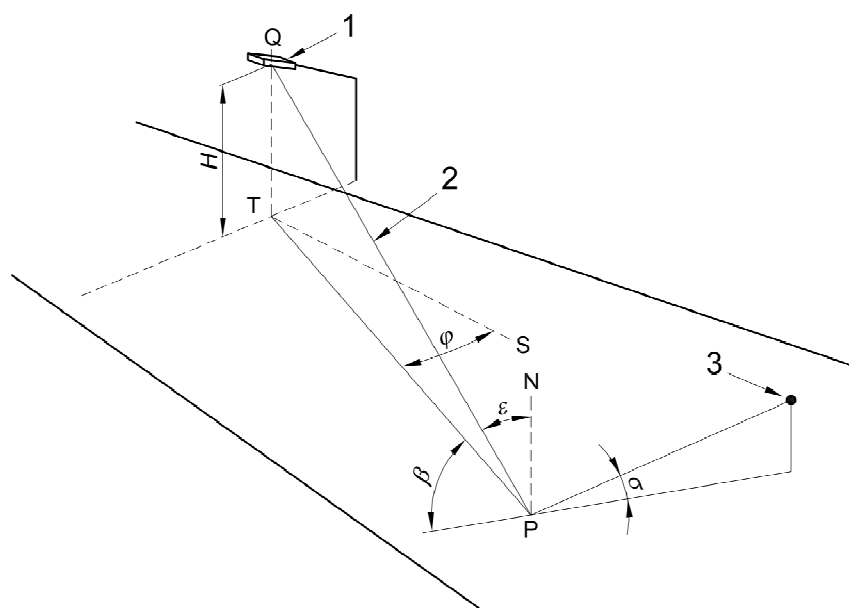


Figura 5 Convenzioni geometriche e angolari per la misurazione del coefficiente di luminanza q dei manti stradali. (H: altezza di montaggio dell'apparecchio di illuminazione, PN: perpendicolare N in P sul manto stradale, Q: centro fotometrico dell'apparecchio di illuminazione, QT: asse fotometrico primario dell'apparecchio di illuminazione, ST: direzione longitudinale, β : angolo supplementare, ε : angolo di incidenza, σ : angolo di osservazione, φ : azimuth di installazione, 1: apparecchio di illuminazione, 2: direzione del raggio di luce, 3: osservatore.

Per gli scopi illuminotecnici si preferisce considerare la ripartizione del coefficiente ridotto di luminanza, calcolabile dal coefficiente di luminanza q mediante la formula:

$$r(P, \varepsilon, \beta, \alpha) = q(P, \varepsilon, \beta, \alpha) \cos^3 \varepsilon$$

Le grandezze r e q sono considerate indipendenti dal punto P, per tratti omogenei della superficie stradale, ed essendo misurate per $\sigma = 1^\circ$ sono generalmente indicate come dipendenti esclusivamente dagli angoli β e ε .

Per convenienza vengono definiti 3 parametri globali che possono essere misurati direttamente, con apposita strumentazione, o calcolati nota la ripartizione del coefficiente ridotto di luminanza.

Il coefficiente medio di luminanza Q_0 :

$$Q_0 = \frac{\int_{\Omega_1} q(\beta, \varepsilon) d\Omega}{\Omega_1} = \frac{\int_{\Omega_1} \frac{r(\beta, \varepsilon)}{\cos^3 \varepsilon} d\Omega}{\Omega_1}$$

dove:

Ω_1 è l'angolo solido, in steradiani, misurato dall'elemento di superficie stradale considerato e contenente tutte le direzioni di provenienza della luce in grado di contribuire in modo apprezzabile alla luminanza dell'elemento stesso.

Convenzionalmente corrisponde all'angolo sotteso da un'area parallela al suolo e posta

all'altezza H da quest'ultimo, che si estende per 3 H, a destra e a sinistra dell'elemento di superficie, e per 4 H e 12 H, rispettivamente verso la posizione dell'osservatore e nella direzione opposta

Il coefficiente medio di luminanza Q_d in condizioni di illuminazione diffusa è stato introdotto dalla CIE -144 [13] essenzialmente per la maggior facilità di misura:

$$Q_d = \frac{\int_{\Omega_2} q(\beta, \varepsilon) \cos \gamma d\Omega}{\pi} = \frac{\int_{\Omega_2} \frac{r(\beta, \varepsilon)}{\cos^3 \varepsilon} \cos \gamma d\Omega}{\pi}$$

dove:

Ω_2 è l'angolo solido, in steradiani, di tutto l'emisfero sulla superficie della superficie stradale.

Il fattore di specularità S_1 evidenzia il comportamento speculare dell'asfalto considerando due direzioni di illuminazione con l'osservatore allineato all'asse della strada:

$$S_1 = \frac{r(0,2)}{r(0,0)}$$

dove:

$r(0, 2)$ è il coefficienti ridotto di luminanza per gli angoli $\beta = 0$, $\text{tg } \varepsilon = 2$ ($\varepsilon = 63,4^\circ$),

$r(0, 0)$ è il coefficienti ridotto di luminanza per gli angoli $\beta = 0$, $\text{tg } \varepsilon = 0$ ($\varepsilon = 0^\circ$).

Considerata la complessità della misura completa di r in loco o in laboratorio (mediante delle carote) il genere la procedura adottata e suggerita dalla norma italiana [7] è il seguente:

- si misura il fattore di specularità S_1 e in base al valore ottenuto si individua una classe normalizzata di manto stradale ossia una tabella di valori di r ;
- si misura Q_0 o Q_d e si moltiplicano i valori del coefficiente ridotto di luminanza della classe selezionata per il rapporto tra il coefficiente medio di luminanza Q_0 misurato e quello normalizzato.

La norma italiana [7] considera due classi normalizzate di pavimentazione stradale asciutta (C1 per il calcestruzzo e C2 per l'asfalto).

4.2. Condizioni angolari di misura

Come evidenziato precedentemente, la normativa prevede condizioni angolari di illuminazione e osservazione tipiche del traffico motorizzato e adatte alla progettazione degli impianti con requisiti prestazionali in termini di luminanza media del manto stradale.

L'illuminotecnica moderna richiede però informazioni aggiuntive per permettere una valutazione completa degli impianti. Si possono evidenziare i seguenti parametri:

- fattore di riflessione in condizioni d/d, per definire il comportamento in presenza di luce diurna diffusa e con condizioni di osservazione tipiche del traffico pedonale,
- fattore di riflessione in condizioni d/1, per definire il comportamento in presenza di luce diurna diffusa e con condizioni di osservazione tipiche del traffico motorizzato,
- fattore di riflessione in condizioni 8/d o 45/0, per definire il comportamento in presenza di luce diurna direzionale e con condizioni di osservazione tipiche del traffico pedonale,

- q (o r) ad angoli di osservazione elevati ($\sigma = 90^\circ, 45^\circ, 30^\circ, 20^\circ$) per la valutazione dell'inquinamento luminoso causato dalla luce riflessa e per il traffico pedonale in condizioni notturne,
- completa ripartizione di q (o r) per migliorare l'attendibilità del metodo STV (§3.1.5) considerando anche la riflessione del manto stradale sulla superficie dell'ostacolo.

Un ulteriore problema è dato dalla variabilità locale del manto e al suo invecchiamento.

Con l'uso infatti le caratteristiche chimico-fisiche superficiali del manto cambiano sostanzialmente nei primi mesi per poi stabilizzarsi per un periodo più o meno lungo in dipendenza del volume e tipologia del traffico. Infine presentano nuovamente forti variazioni dovute all'usura. Generalmente questo punto non è raggiunto in quanto il manto viene rifatto, per motivi di sicurezza e di aderenza, prima del raggiungimento di questo stadio.

Le misure delle caratteristiche fotometriche del manto possono essere eseguite in loco o in laboratorio. Quest'ultima soluzione presenta maggior flessibilità operativa (specialmente nel caso di caratterizzazione goniofotometrica completa) ma richiede l'uso di carote. In questo caso le operazioni di prelievo e di trasporto possono modificare meccanicamente la superficie e quindi variare in modo sostanziale le proprietà direzionali. Inoltre per la scarsa uniformità locale delle caratteristiche fotometriche è necessario fornire dati mediati su superfici relativamente grandi (da 0,1 a 0,25 m²) che quindi risultano di difficile trasporto e manovrabilità.

Le misure sul campo risolvono questi problemi e permettono un'analisi delle disuniformità tra varie zone della carreggiata. Per contro richiedono la chiusura al traffico del tratto di strada e non permettono una esaustiva misura della ripartizione di q .

5. CARATTERIZZAZIONE DEI CAMPIONI

5.1. Campioni e condizioni sperimentali delle misure in laboratorio

Sono stati selezionati delle carote cilindriche alte circa 10 cm e con diametro di 15 cm, con asfalti diversi come granulometria dei componenti e come legante e due diversi tipi di vernici al biossido di titanio diverse come colore.

Al termine delle misure sulle carote, le vernici sono state stese su parte della loro superficie e su un supporto in legno per uno spessore di circa 3 mm. Questi ultimi campioni sono stati usati essenzialmente per avere dati riferiti alla vernice, non influenzati dalla granulometria del supporto.

Le vernici sono state ottenute mischiando acqua alla polvere fornita dal costruttore, nella proporzione indicata dallo stesso, e stese mediante spatola in gomma rigida.

Prima delle misure i campioni sono stati lasciati asciugare a 25 °C per 72 h.

I campioni considerati in laboratorio sono elencati in Tabella 4, ove per campione di asfalto si intende la carota e per campione di vernice la sua stesura su supporto in legno.

Sono stati misurati, con la strumentazione elencata in Tabella 5:

- il fattore spettrale di riflessione nel campo del visibile e dell'infrarosso con geometria 8/d;
- il fattore di riflessione nel visibile con geometria 45/0;
- il fattore di riflessione nel visibile con geometria 8/d.

Per alcuni angoli previsti dalla normativa è stato misurato il coefficiente di luminanza q e

calcolato il coefficiente ridotto di luminanza r delle due carote non trattate, usando il goniofotometro INRIM.

Tabella 4 Elenco dei campioni caratterizzati in laboratorio.

Elenco dei campioni caratterizzati in laboratorio	
Nome campione	Caratteristiche
Sample_1_road	Campione di asfalto non trattato
Sample_2_road	Campione di asfalto non trattato
Sample_1_grey	Campione di vernice al Biossido di titanio grigia
Sample_2_grey	Campione di asfalto Sample_1_road trattato con vernice al Biossido di titanio grigia
Sample_3_grey	Campione di asfalto Sample_2_road trattato con vernice al Biossido di titanio grigia
Sample_1_white	Campione di vernice al Biossido di titanio bianco
Sample_2_white	Campione di asfalto Sample_1_road trattato con vernice al Biossido di titanio bianco
Sample_3_white	Campione di asfalto Sample_2_road trattato con vernice al Biossido di titanio bianco

Tabella 5 Elenco degli strumenti usati per le misure in laboratorio, precedentemente tarata secondo i campioni e le procedure INRIM.

Strumentazione per la caratterizzazione dei campioni in laboratorio				
Strumento	Marca	Modello	Modalit di misura	Range di misurazione
Spettrografo doppio fascio	Perkin Elmer	Lambda 900	8/d	300 - 2500 nm
Spettrografo	Hunter Lab		45/0	380 - 780 nm
Sfera integratrice per caratterizzazione materiali	LMT	-	8/d	corretto $\forall(\lambda)$



Figura 6 Carota numero 1 con asfalto originale (sample_1_road), asfalto con rivestimento in biossido di titanio grigio (sample_2_grey), asfalto con rivestimento in biossido di titanio bianco (sample_2_white).



Figura 7 Carota numero 2 con asfalto originale (sample_2_road), asfalto originale, asfalto con rivestimento in biossido di titanio grigio (sample_3_grey), asfalto con rivestimento in biossido di titanio bianco (sample_3_white).

5.2. Sito sperimentale

Una strada interna dell'INRIM è stata chiusa al traffico e usata come sito sperimentale per le prove in esterno.

Sono state individuate, sulla carreggiata, quattro zone limitrofe (Figura 8), la prima di 10 x 4 m rappresenta l'asfalto non trattato (Figura 9), la seconda di 10 x 4 m è stata trattata con vernice grigia (Figura 10), la terza di 4 x 4 m è stata trattata con vernice bianca (Figura 11). La quarta zona separa la zona con vernice grigia da quella con vernice bianca e ha dimensioni 1 x 4 m.

La ditta fornitrice della vernice ha effettuato la stesura manualmente, mediante spatole in gomma rigida, la vernice grigia e bianca ottenute mischiando acqua alla polvere, nella

proporzione indicata dal costruttore.

La metodologia adottata e le caratteristiche dell'asfalto presente non hanno permesso una stesura con elevata uniformità, come sarebbe stato possibile usando macchine apposite. La Figura 12, eseguita con luce radente, evidenzia questo problema. Inoltre sulla vernice bianca è rimasta visibile una macchia gialla presente nell'asfalto preesistente. Per queste ragioni non è stato possibile usare il metodo sviluppato da INRM per la misura di q , ma si è proceduto con misure manuali, limitatamente alle direzioni angolari lungo l'asse della carreggiata.

La caratterizzazione è avvenuta su più punti, spaziatissimi di circa 1 m, al fine di valutare le differenze di uniformità che si possono trovare su realizzazioni reali su strada. Ogni punto corrisponde a un campione come elencato in



Figura 8 Sito sperimentale con dall'alto, asfalto originale, asfalto con rivestimento in biossido di titanio grigio, asfalto con rivestimento in biossido di titanio bianco.



Figura 9 Sito sperimentale: particolare dell'asfalto non trattato.



Figura 10 Sito sperimentale: particolare dell'asfalto trattato con rivestimento in biossido di titanio grigio.



Figura 11 Sito sperimentale: particolare dell'asfalto trattato con rivestimento in biossido di titanio bianco.



Figura 12 Sito sperimentale osservato con luce radente nella direzione della riflessione speculare con dall'alto, asfalto con rivestimento in biossido di titanio bianco, asfalto con rivestimento in biossido di titanio grigio.

Tabella 6 Elenco dei campioni caratterizzati in situ.

Elenco dei campioni caratterizzati in situ	
Nome campione	Caratteristiche
Sample_1_road	Tratto di manto stradale non trattato
Sample_2_road	Tratto di manto stradale non trattato
Sample_3_road	Tratto di manto stradale non trattato
Sample_4_grey	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio grigio
Sample_5_grey	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio grigio
Sample_6_grey	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio grigio
Sample_7_grey	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio grigio
Sample_8_grey	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio grigio
Sample_9_grey	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio grigio
Sample_4_white	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio bianco
Sample_5_white	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio bianco
Sample_6_white	Tratto di manto stradale trattato con vernice al Biossido di titanio bianco

5.3. Misure spettrali

Tutte le misure spettrali sono state eseguite in laboratorio.

I risultati della prima carota sono diagrammati nel grafico di Figura 13 (campo solare), di Figura 14 (visibile) e di Figura 15 (infrarosso).

Mentre l'asfalto si comporta in modo sostanzialmente uniforme, la vernice bianca presenta un netto calo del fattore di riflessione oltre i 1800 nm. La vernice grigia ha un comportamento simile alla bianca oltre i 1800 nm, mentre presenta valori intermedi nella zona del visibile.

I risultati della seconda carota e dei campioni di vernice su legno sono riportati rispettivamente in Figura 16 e Figura 17.

Le differenze che si riscontrano non sono tecnicamente significative ed è possibile affermare che, dal punto di vista spettrale, la sola caratterizzazione della vernice è sufficiente per i calcoli che richiedono la conoscenza del fattore spettrale di riflessione.

Per esempio seguendo la metodologia riportata nella norma UNI EN 410 [21] è possibile calcolare il fattore di riflessione dell'energia solare diretta, dato da:

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{\lambda = 2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \rho(\lambda) \Delta\lambda}{\sum_{\lambda = 300 \text{ nm}}^{\lambda = 2500 \text{ nm}} S_{\lambda} \Delta\lambda}$$

ove:

S_{λ} è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare (vedere prospetto 2);

$\rho(\lambda)$ è il fattore di riflessione spettrale delle vetrate;

$\Delta\lambda$ è l'intervallo di lunghezze d'onda.

I risultati sono riportati in Tabella 7. È evidente il divario tra le diverse superfici, simile a quello riscontrabile considerando il fattore di riflessione nel visibile (§5.4).

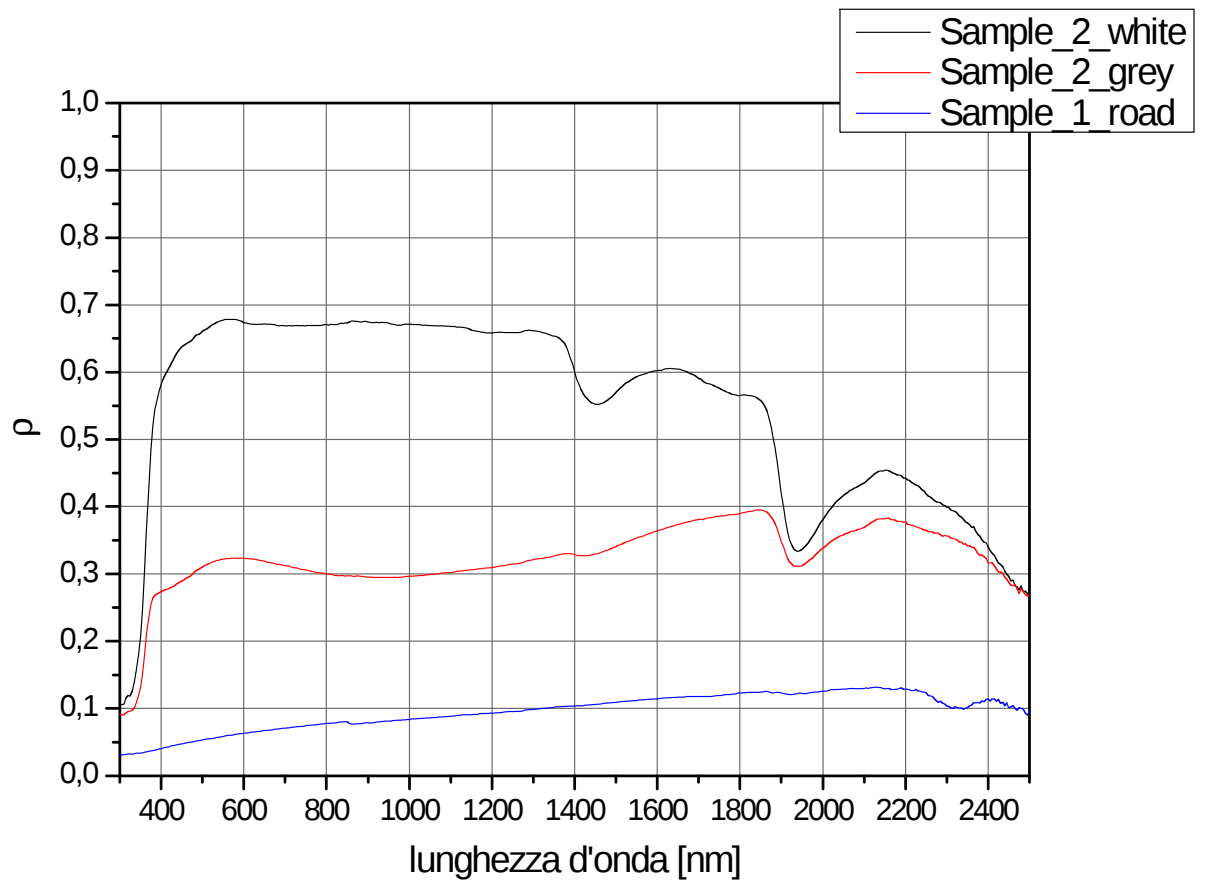


Figura 13 Misura del fattore spettrale di riflessione nel campo solare da 300 a 2500 nm, della carota numero 1, trattata e non trattata con vernice al biossido di titanio bianco e grigio.

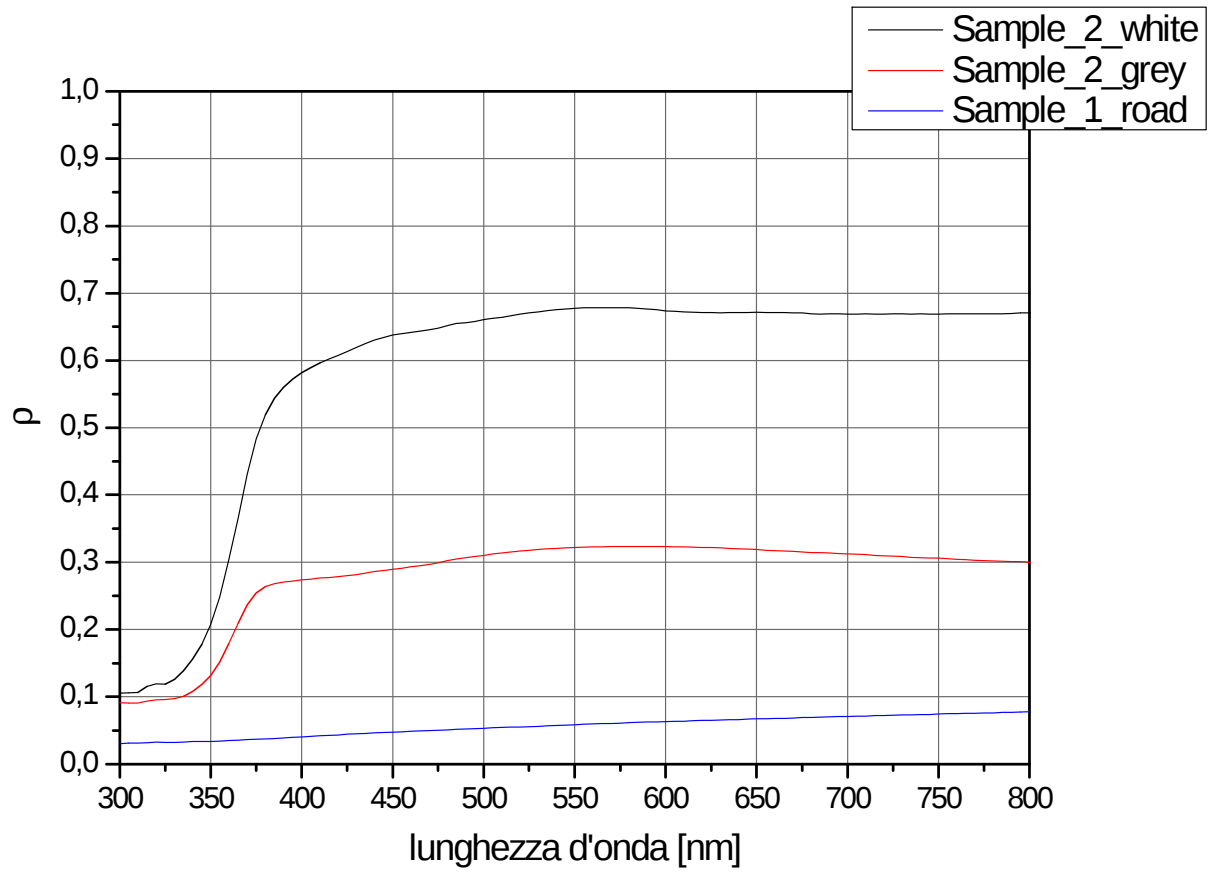


Figura 14 Misura del fattore spettrale di riflessione nel campo del visibile da 300 a 800 nm, della carota numero 1, trattata e non trattata con vernice al biossido di titanio bianco e grigio.

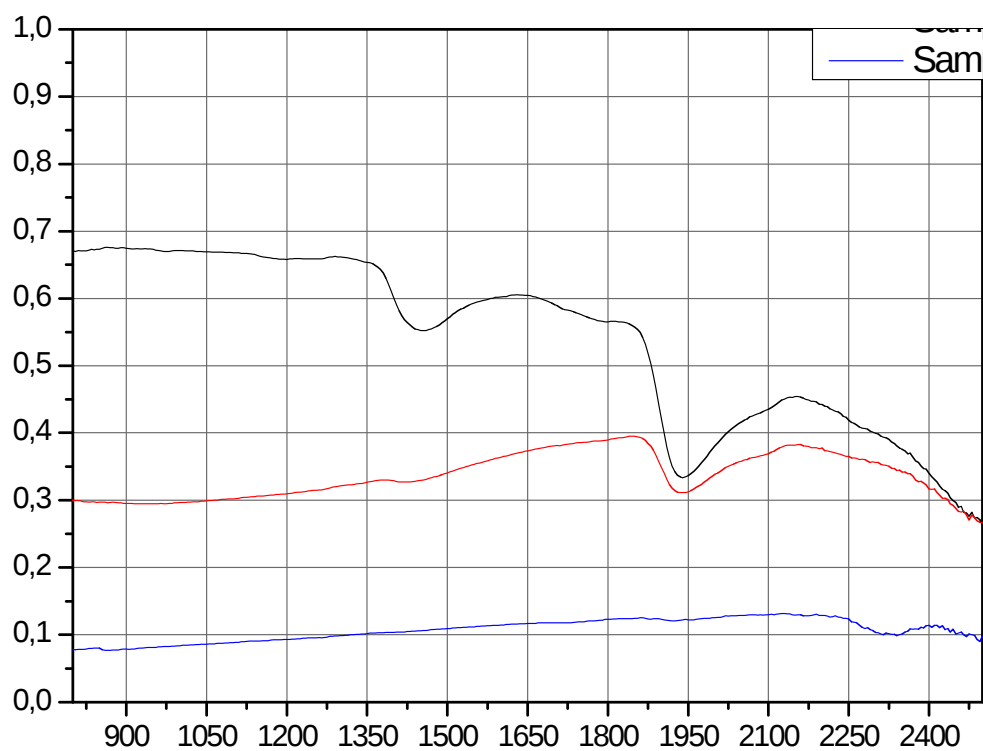


Figura 15 Misura del fattore spettrale di riflessione nel campo dell'infrarosso da 800 a 2500 nm, della carota numero 1, trattata e non trattata con vernice al biossido di titanio bianco e grigio.

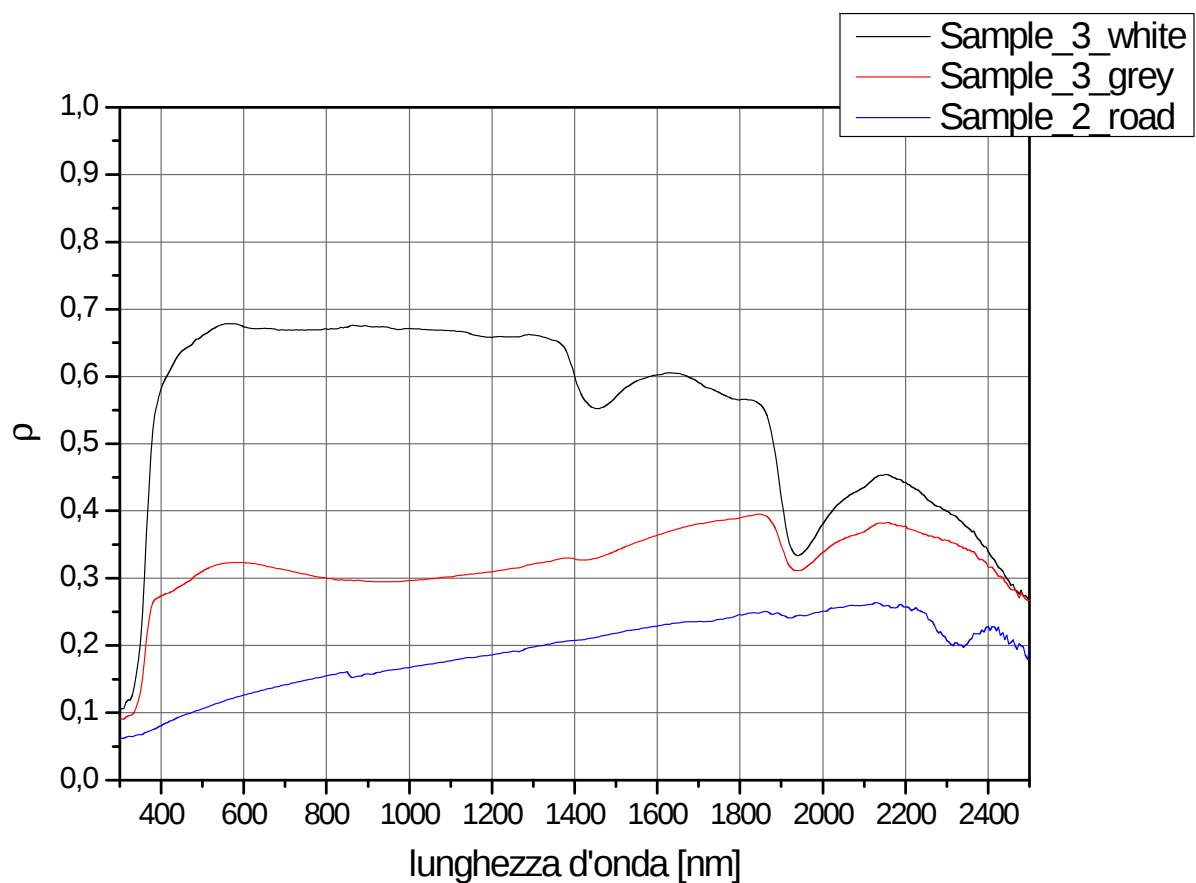


Figura 16 Misura del fattore spettrale di riflessione nel campo solare da 300 a 2500 nm, della carota numero 2, trattata e non trattata con vernice al biossido di titanio bianco e grigio.

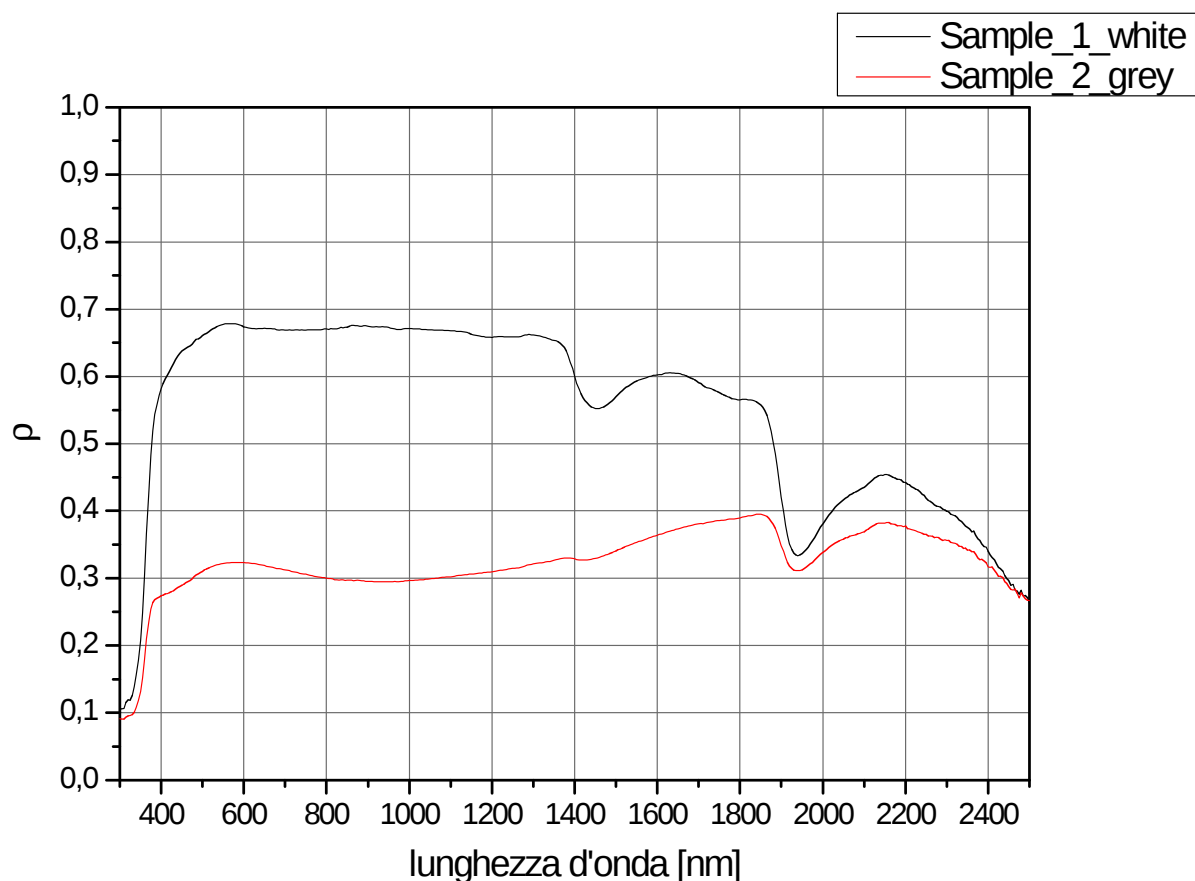


Figura 17 Misura del fattore spettrale di riflessione nel campo solare da 300 a 2500 nm, dei campioni di vernice su supporto in legno.

Tabella 7 Fattore di riflessione dell'energia solare diretta calcolato secondo la norma UNI EN 410 [21].

Fattore di riflessione solare diretta		
[-]		
Sample_2_white	Sample_2_grey	Sample_1_road
0,628	0,305	0,072

5.4. Misure globali in riflessione

Le misure globali in riflessione sono state eseguite sui campioni in laboratorio e in situ con la strumentazione indicata al §5.1.

Per le carote non trattate i risultati sono riassunti in Tabella 8. Si nota l'elevata variazione tra i due asfalti già evidenziata dalle misure spettrali.

Per le carote trattate i risultati sono riassunti in Tabella 9 (vernice grigia) e Tabella 10 (vernice bianca). Il comportamento colorimetrico delle due vernici è simile. Il fattore di riflessione della vernice bianca è circa il doppio rispetto a quella grigia.

Per le misure in situ i risultati sono riportati nelle tabelle da Tabella 11 a Tabella 13.

Per gli angoli non direttamente correlati con le direzioni di osservazione tipiche del traffico motorizzato e stabilite dalla normativa, è importante poter considerare il manto stradale come superficie con riflessione praticamente lambertiana. I dati misurati confermano questa ipotesi per le applicazioni illuminotecniche, nelle quali l'ipotesi non solo semplifica i calcoli, ma permette anche di individuare condizioni normative di riferimento per il traffico pedonale e l'inquinamento luminoso.

Si è pertanto ritenuto opportuno eseguire ulteriori misure ruotando i campioni a passi di 90° e cercando di misurare la stessa superficie, in modo da evitare effetti di texture. I risultati sono riassunti in Tabella 14.

Tabella 8 Fattore di riflessione e coordinate tricromatiche di colore per diverse condizioni di incidenza - osservazione misurate in laboratorio sulle carote non trattate.

Misure globali in riflessione							
Campione	Condizione geometrica di misura		Fattore di riflessione	Coordinate tricromatiche			
	Incidenza	Osservazione	p	Illuminante CIE Standard A		Illuminante CIE Standard D65	
	[°]	[°]	[-]	x	y	x	y
Sample_1_road	45	0	0,07	0,470	0,413	0,340	0,353
Sample_2_road	45	0	0,14	0,463	0,412	0,331	0,346
Sample_1_road	8	d	0,10	-	-	-	-

Tabella 9 Fattore di riflessione e coordinate tricromatiche di colore per diverse condizioni di incidenza - osservazione misurate in laboratorio sulle carote trattate con vernice grigia.

Misure globali in riflessione							
Campione	Condizione geometrica di misura		Fattore di riflessione	Coordinate tricromatiche			
	Incidenza	Osservazione	p	Illuminante CIE Standard A		Illuminante CIE Standard D65	
	[°]	[°]	[-]	x	y	x	y
Sample_1_grey	45	0	0,30	0,460	0,415	0,329	0,350
Sample_2_grey	45	0	0,32	0,454	0,413	0,322	0,342
Sample_3_grey	45	0	0,30	0,456	0,413	0,324	0,344
Sample_2_grey	8	d	0,38	-	-	-	-

Tabella 10 Fattore di riflessione e coordinate tricromatiche di colore per diverse condizioni di incidenza - osservazione misurate in laboratorio sulle carote trattate con vernice bianca.

Misure globali in riflessione							
Campione	Condizione geometrica di misura		Fattore di riflessione	Coordinate tricromatiche			
	Incidenza	Osservazione	ρ	Illuminante CIE Standard A		Illuminante CIE Standard D65	
	[]	[]	[-]	x	y	x	y
Sample_1_white	0	45	0,76	0,453	0,413	0,322	0,343
Sample_2_white	0	45	0,69	0,452	0,411	0,319	0,338
Sample_3_white	0	45	0,69	0,451	0,411	0,318	0,337
Sample_2_white	8	d	0,74	-	-	-	-

Tabella 11 Fattore di riflessione e coordinate tricromatiche di colore per diverse condizioni di incidenza - osservazione misurate in situ sull'asfalto non trattato.

Misure globali in riflessione							
Campione	Condizione geometrica di misura		Fattore di riflessione	Coordinate tricromatiche			
	Incidenza	Osservazione	ρ	Illuminante CIE Standard A		Illuminante CIE Standard D65	
	[]	[]	[-]	x	y	x	y
Sample_3_road	45	0	0,11	0,474	0,416	0,347	0,360
Sample_4_road	45	0	0,11	0,466	0,414	0,336	0,351
Sample_5_road	45	0	0,13	0,464	0,415	0,333	0,351
Media	45	0	0,12	0,468	0,415	0,339	0,354
Deviazione standard	45	0	0,01	0,006	0,001	0,006	0,004

Tabella 12 Fattore di riflessione e coordinate tricromatiche di colore per diverse condizioni di incidenza - osservazione misurate in situ sull'asfalto trattato con vernice al biossido di titanio grigia.

Misure globali in riflessione							
Campione	Condizione geometrica di misura		Fattore di riflessione	Coordinate tricromatiche			
	Incidenza	Osservazione	ρ	Illuminante CIE Standard A		Illuminante CIE Standard D65	
	[°]	[°]	[-]	x	y	x	y
Sample_4_grey	45	0	0,32	0,474	0,416	0,347	0,360
Sample_5_grey	45	0	0,33	0,466	0,414	0,336	0,351
Sample_6_grey	45	0	0,33	0,464	0,415	0,333	0,351
Sample_7_grey	45	0	0,31	0,455	0,413	0,322	0,342
Sample_8_grey	45	0	0,31	0,453	0,412	0,321	0,341
Sample_9_grey	45	0	0,39	0,451	0,411	0,318	0,336
Media	45	0	0,33	0,461	0,414	0,329	0,347
Deviazione standard	45	0	0,03	0,009	0,002	0,010	0,008

Tabella 13 Fattore di riflessione e coordinate tricromatiche di colore per diverse condizioni di incidenza - osservazione misurate in situ sull'asfalto trattato con vernice al biossido di titanio bianca.

Misure globali in riflessione							
Campione	Condizione geometrica di misura		Fattore di riflessione	Coordinate tricromatiche			
	Incidenza	Osservazione	ρ	Illuminante CIE Standard A		Illuminante CIE Standard D65	
	[°]	[°]	[-]	x	y	x	y
Sample_4_white	45	0	0,65	0,455	0,413	0,323	0,343
Sample_5_white	45	0	0,65	0,452	0,411	0,319	0,338
Sample_6_white	45	0	0,63	0,452	0,412	0,319	0,339
Media	45	0	0,64	0,453	0,412	0,320	0,340
Deviazione standard	45	0	0,01	0,002	0,001	0,002	0,002

Tabella 14 Variazioni del fattore di riflessione con l'angolo azimutale di incidenza. L'effetto texture è evidente nel caso di asfalto non trattato.

Sensibilità direzionale campione Sample_1_road				Sensibilità direzionale campione Sample_2_grey				Sensibilità direzionale campione Sample_2_white			
Condizione geometrica di misura			Differenza percentuale del fattore di riflessione	Condizione geometrica di misura			Differenza percentuale del fattore di riflessione	Condizione geometrica di misura			Differenza percentuale del fattore di riflessione
Semipiano	Incidenza	Osservazione	-	Semipiano	Incidenza	Osservazione	-	Semipiano	Incidenza	Osservazione	-
[°]	[°]	[°]	[%]	[°]	[°]	[°]	[%]	[°]	[°]	[°]	[%]
0	45	0	0	0	45	0	0	0	0	45	0
90			-1,4	90			-1,2	90			0,8
180			5,0	180			-0,2	180			-1,1
270			3,0	270			-0,1	270			-0,6

5.5. Misure direzionali

Le misure direzionali sono state eseguite in laboratorio sulle due carote prive di vernice e sul campo.

Sono stati misurati alcuni angoli di incidenza su un solo piano di incidenza, considerando le condizioni geometriche previste dalla normativa, in quanto gli asfalti disponibili non presentavano anisotropie dovute alla direzione del traffico.

Questi risultati sono riassunti in Tabella 15.

I risultati evidenziano che sul sito era presente un asfalto particolarmente chiaro. Malgrado questa condizioni la superficie bianca presenta sempre indubbi vantaggi illuminotecnici.

La superficie grigia è invece in molti casi simile all'asfalto di riferimento.

Le carote hanno caratteristiche simili a quelle indicate nella normativa italiana (classi C₁ e C₂).

Inoltre, sul sito sperimentale, sono state eseguite misure ad angoli di osservazioni diversi, per valutare l'influenza sul traffico pedonale.

Questi risultati sono riassunti in Tabella 16.

Dai risultati risulta evidente il comportamento quasi lambertiano di tutte le superfici considerate.

Tabella 15 Misurazione di q e r nelle condizioni di osservazione previste dalla normativa.

Caratterizzazione angolare del manto stradale											
Condizione angolare di misura		Campione									
		Sample_9_grey		Sample_5_white		Sample_5_road		Sample_1_road		Sample_2_road	
		Grandezza		Grandezza		Grandezza		Grandezza		Grandezza	
Angolo di illuminazione		q	$r \cdot 10^4$	q	$r \cdot 10^4$	q	$r \cdot 10^4$	q	$r \cdot 10^4$	q	$r \cdot 10^4$
tg ϵ	[°]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]
0,58	30	0,12	789	0,23	1527	0,15	989	0,06	380	0,09	603
0,70	35	0,09	589	0,19	1183	0,10	649	0,06	350	0,09	520
0,84	40	0,12	456	0,18	687	0,11	416	0,07	330	0,11	490
1,00	45	0,12	429	0,15	516	0,10	352	0,09	320	0,11	390

Tabella 16 Misurazione di q e r nella condizioni di osservazione tipiche del traffico pedonale.

Caratterizzazione angolare del manto stradale							
Condizione angolare di misura		Campione					
		Sample_9_grey		Sample_5_white		Sample_5_road	
Angolo di osservazione	Angolo di illuminazione	Grandezza		Grandezza		Grandezza	
		q	r 10 ⁴	q	r 10 ⁴	q	r 10 ⁴
[°]	[°]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]	[sr ⁻¹]
20	15	0,25	2296	0,32	2897	0,08	751
30		0,16	1457	0,24	2202	0,06	546
45		0,12	1093	0,22	1980	0,05	491
20	30	0,12	780	0,22	1450	0,06	367
30		0,12	769	0,21	1410	0,05	346
45		0,11	718	0,20	1344	0,05	329
20	35	0,12	790	0,20	797	0,05	292
30		0,11	725	0,21	828	0,05	289
45		0,11	685	0,21	808	0,04	267
20	40	0,11	432	0,20	797	0,05	176
30		0,11	425	0,21	828	0,04	167
45		0,11	409	0,21	808	0,04	166
20	45	0,10	366	0,20	712	0,04	154
30		0,11	369	0,20	712	0,04	150
45		0,10	356	0,20	714	0,04	155

6. MISURE TERMICHE

6.1. Descrizione delle condizioni sperimentali

Le misurazioni termiche sono state eseguite sui campioni sia in laboratorio sia in situ.

Le misure in laboratorio hanno avuto la finalità di verificare eventuali variazioni di emittenza tra le superfici, per applicare eventuali fattori correttivi sulle misure termiche eseguite con una termo camera NEC precedentemente tarata presso l'INRIM.

In laboratorio i campioni sono stati tenuti per 3 giorni in laboratorio in condizioni di temperatura controllata a (23 ± 2) °C per garantire condizioni ottimali di equilibrio termico.

In loco le misure sono state eseguite in diversi giorni e a diverse ore per considerare l'effetto climatico sulla temperatura superficiale del manto.

In laboratorio e sul campo la termocamera è stata posizionata perpendicolarmente al campione. Alcune acquisizioni sul campo sono avvenute con termo camera inclinata per verificare eventuali evidenti disuniformità termiche sul manto dovute per esempio all'ombra creata dagli alberi presenti in prossimità del sito sperimentale..

6.2. Risultati

6.2.1. Misure in laboratorio

Le misure in laboratorio hanno dimostrato che i campioni oggetto dello studio presentano la stessa emissività termica. In particolare hanno dimostrato che non essendo presenti gradienti di temperatura, è possibile considerare uguale l'emissività termica dell'asfalto non trattato e trattato con vernici al biossido di titanio anche in situ e quindi le eventuali differenze di temperatura riscontrabili a seguito dell'irraggiamento solare, sono imputabili a una effettiva differenza di temperatura e non a una differente emissività dei materiali.

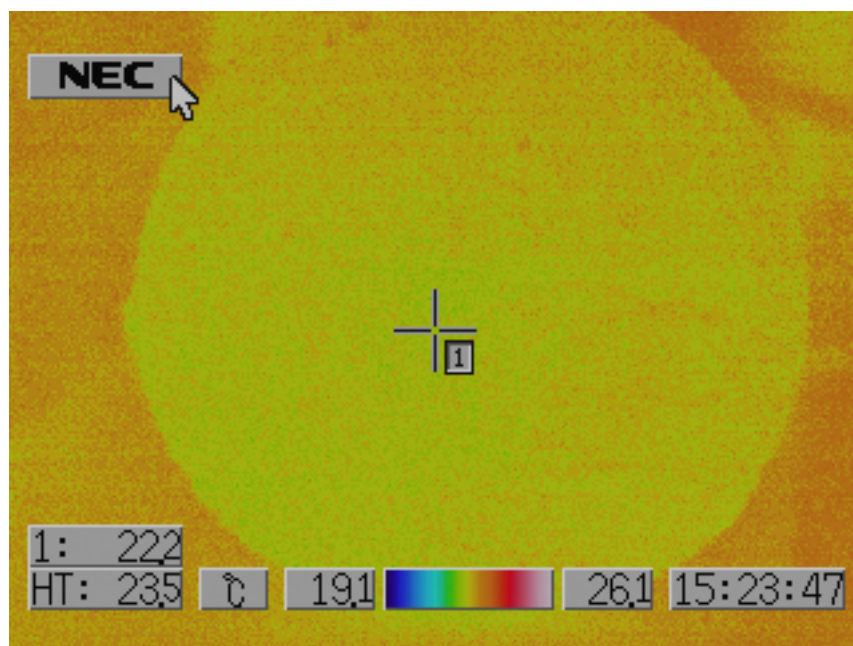


Figura 18 Valutazione delle proprietà termiche in laboratorio sulla carota numero 1. La mezzaluna superiore corrisponde al Sample_1_road. La mezzaluna inferiore ha subito il trattamento al biossido di titanio: Sample_2_grey a destra, Sample_2_white a sinistra.

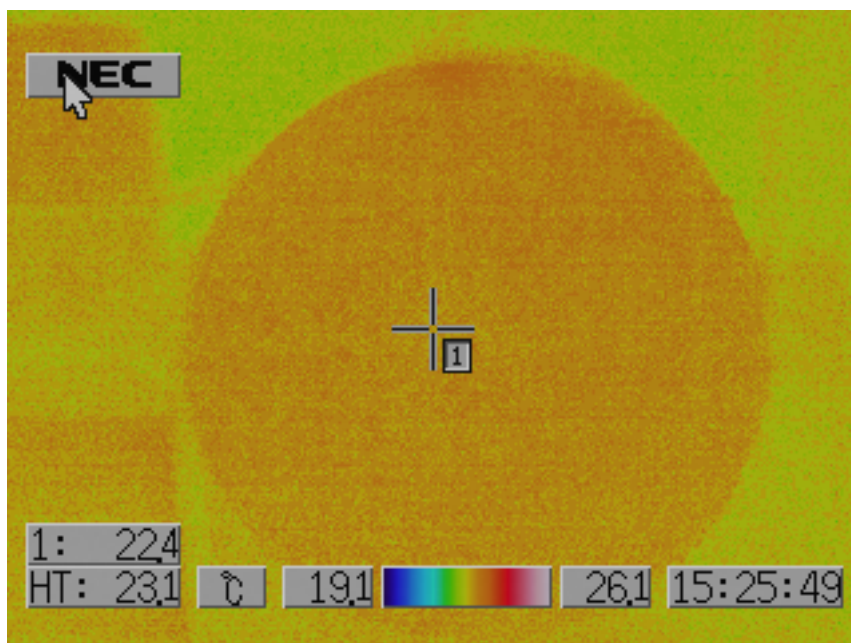


Figura 19 Valutazione delle proprietà termiche in laboratorio sulla carota numero 2. La mezzaluna superiore corrisponde al Sample_2_road. La mezzaluna inferiore ha subito il trattamento al biossido di titanio: Sample_3_grey a destra, Sample_3_white a sinistra.

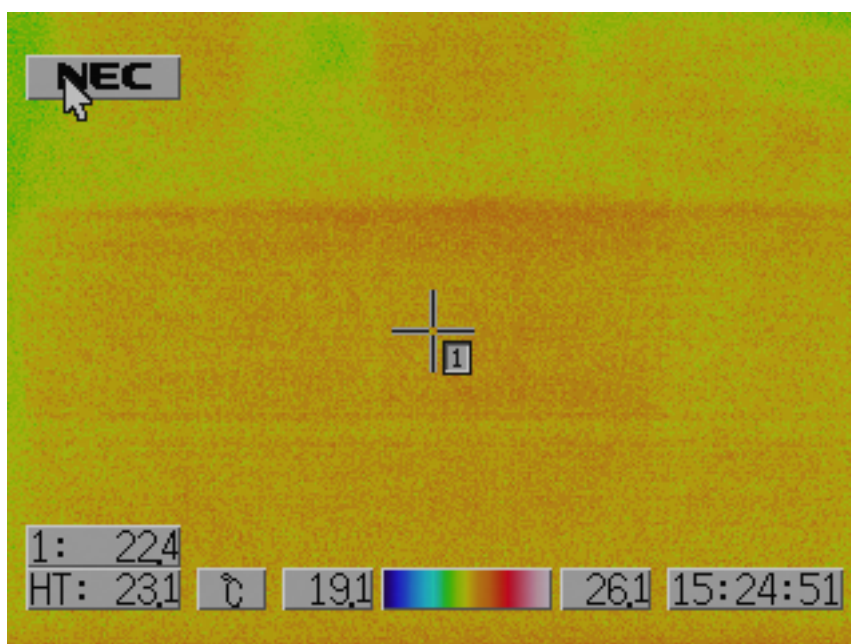


Figura 20 Valutazione delle proprietà termiche in laboratorio dei campioni di vernice al biossido di titanio su supporto in legno. La parte destra corrisponde al Sample_1_grey, la parte sinistra al Sample_1_white.

6.2.2. Misure sul campo

Il manto stradale del sito di misura è stato caratterizzato dal punto di vista termico in due diverse condizioni di misura:

- Condizione A: ore 9,30 del 20-09, in condizioni di irraggiamento solare ridotto e temperatura ambiente di $(19 \pm 2) ^\circ\text{C}$;

- Condizione B: ore 15,40 del 09-09 in condizioni di pieno sole e temperatura ambiente di $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$.

Il forte gradiente termico, non presente nelle condizioni di laboratorio, è dovuto alla diversa risposta dei materiali all'irraggiamento solare diretto e alle condizioni precedenti di illuminazione. In particolare nella misura al mattino l'asfalto non ha avuto tempo di riscaldarsi, mentre nel pomeriggio non si è ancora raffreddato.

Il comportamento termico dei diversi asfalti è riassunto nella Tabella 17. Nella condizione A, quando la radiazione solare non ha riscaldato le superfici, le differenze tra gli asfalti sono trascurabili, mentre diventano sensibili nella situazione B, quanto la radiazione solare ha avuto il tempo di riscaldare le superfici. In questo caso la differenza di temperatura tra asfalto chiaro e asfalto non trattato raggiunge i $9 ^\circ\text{C}$.

Tabella 17 Comportamento termico degli asfalti misurati.

Condizione	Asfalto non trattato	Asfalto con vernice grigia		Asfalto con vernice bianca		
	Temperatura misurata	Temperatura misurata	Temperatura variazione rispetto all'asfalto non trattato	Temperatura misurata	Temperatura variazione rispetto all'asfalto non trattato	Temperatura variazione rispetto all'asfalto con vernice grigia
	T_m	T_m	ΔT_a	T_m	ΔT_a	ΔT_g
	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]
A	19,8	19,8	-0,1	18,8	1,0	1,1
B	33,8	30,8	3,0	24,5	9,3	6,3

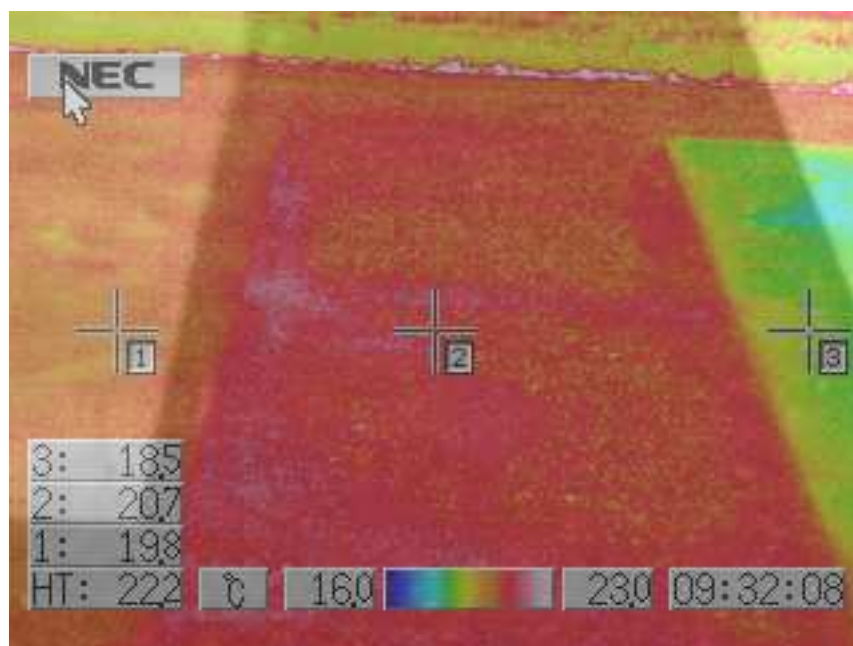


Figura 21 Caratterizzazione termica nella Condizione A. A sinistra vernice al biossido di titanio grigio, al centro parte di asfalto non trattato e a destra vernice al biossido di titanio bianco.

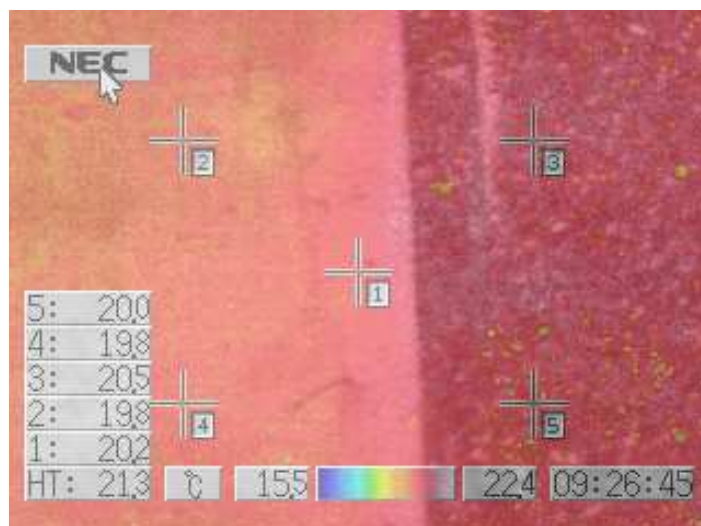


Figura 22 Caratterizzazione termica nella Condizione A. A sinistra vernice al biossido di titanio grigio, a destra asfalto non trattato.

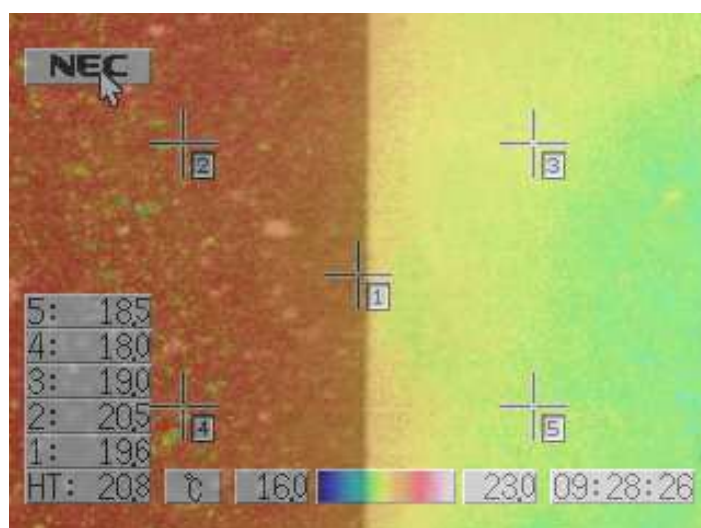


Figura 23 Caratterizzazione termica nella Condizione A. A sinistra asfalto non trattato, a destra vernice al biossido di titanio bianco.

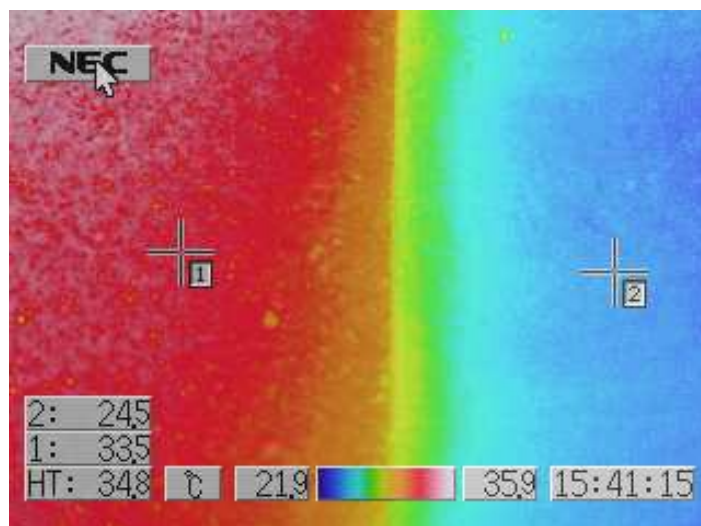


Figura 24 Caratterizzazione termica nella Condizione B. A sinistra asfalto non trattato, a destra vernice al biossido di titanio bianco.

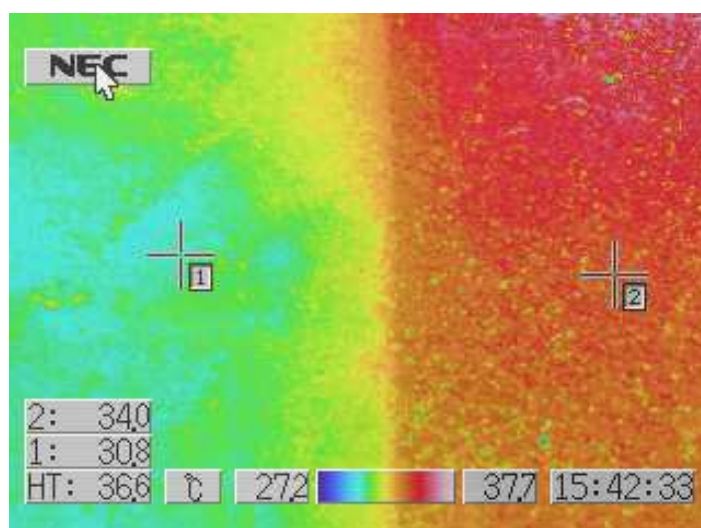


Figura 25 Caratterizzazione termica nella Condizione B. A sinistra vernice al biossido di titanio grigio, a destra asfalto non trattato.

7. CONCLUSIONI

7.1. Influenze illuminotecniche nell'adozione di asfalti "chiari"

L'uso di asfalti chiari presenta conseguenze illuminotecniche riconducibili essenzialmente ai seguenti punti:

- Riduzione del flusso luminoso installato, infatti aumentando la radiazione riflessa nella direzione di osservazione è possibile ottenere i valori prescritti di luminanza del manto stradale con valori inferiori di illuminamento.
- Miglioramento delle condizioni di visione, infatti generalmente gli ostacoli che possono essere presenti sulla strada sono scuri e quindi, con asfalti chiari, si tenderebbero a vedere sempre con contrasto negativo aumentando, a parità di altri fattori, il parametro VL dell'algoritmo STV (§3.1). Inoltre operare sempre con un contrasto dello stesso tipo evita che la luminanza dell'ostacolo si trovi inferiore alla soglia di visibilità e quindi l'ostacolo non sia percettibile. In queste condizioni è

ipotizzabile un ulteriore riduzione di categoria illuminotecnica e quindi di flusso luminoso installato;

- Miglioramento del confort visivo, infatti l'incremento della luce diffusa (ad elevati angoli di osservazione, l'asfalto si può considerare lambertiano) rende più luminoso l'ambiente cittadino riducendo le condizioni di abbagliamento generate sia dagli apparecchi di illuminazione sia dalla presenza di sorgenti private (ad esempio vetrine);
- Aumento dell'illuminazione indiretta: la maggior luce riflessa tende a migliorare le condizioni luminose dell'ambiente aumentando la sicurezza del traffico misto, ossia quando sono presenti contemporaneamente pedoni e veicoli. Anche zone esclusivamente pedonali è più semplice ottenere condizioni di illuminazione adeguate al riconoscimento dei volti e alla percezione di ostacoli.
- Potenziale aumento inquinamento luminoso, specialmente in ambito extraurbano. In zone urbane il flusso luminoso disperso in modo lambertiano verso l'alto può essere in gran parte schermato da edifici e costruzioni. In ogni caso con una oculata scelta delle proprietà in riflessione (massimizzazione della riflessione speculare e riduzione di quella lambertiana) è possibile ottimizzare le condizioni di impatto ambientale e di consumi energetici.

Durante il giorno la presenza di asfalti particolarmente chiari può creare condizioni di abbagliamento o di elevato contrasto tra zone illuminate e zone in ombra, specialmente per i pedoni o se sono presenti zone con asfalti di diverso tipo (ad esempio marciapiede e carreggiata).

Dalle misure eseguite risulta evidente la superiorità, anche in riflessione speculare, del manto trattato con vernice rispetto al manto non trattato, in particolare nel caso della vernice bianca.

Questa diversità di caratteristiche richiede, qualora la vernice sia applicata su strade già illuminate, una verifica progettuale dell'impianto di illuminazione. Infatti, se è vero che il livello medio di luminanza sicuramente incrementa e quindi la nuova situazione supera le richieste normative, nulla si può dire, a priori, sulle uniformità di luminanza e quindi sul superamento dei requisiti normativi relativi a questi parametri. Inoltre una verifica progettuale potrebbe consigliare una riduzione del flusso luminoso emesso dagli apparecchi di illuminazione, ottenibile, per esempio, con regolatori di flusso luminoso o con diminuzione della potenza delle lampade installate.

7.2. Influenze termiche nell'adozione di asfalti "chiari"

Dal punto di vista termico gli asfalti trattati con vernice manifestano indubbiamente vantaggi sostanziali, presentando differenze di temperatura superficiali significativamente inferiori a quelle dell'asfalto non trattato. Queste differenze sono più evidenti con la vernice bianca (circa 10 °C nelle condizioni sperimentali considerate). Inoltre, considerando che l'asfalto di riferimento presente nel sito sperimentale è risultato particolarmente chiaro, l'effetto positivo del ridotto riscaldamento superficiale potrebbe essere maggiormente accentuato nelle città ove, per motivi di reperibilità degli inerti dell'asfalto, questi sono particolarmente scuri. Da risultati di misure sul campo risulta che il valore di Q_0 pari a 0,56 sia più realistico di quello proposto dalla normativa attuale ($Q_0 = 0,07$). Questo nuovo valore è stato proposto nella revisione della norma sull'illuminazione delle gallerie in fase di discussione.

7.3. Sviluppi futuri

I risultati delle misure hanno evidenziato l'interesse nell'adottare asfalti di tipo chiaro, ma restano aperti alcuni problemi che meritano valutazioni aggiuntive adeguatamente

supportate da una campagna di misura più estesa di quella descritta nel presente rapporto.

In particolare:

- verifica dell'invecchiamento delle prestazioni col tempo, ad esempio l'asfalto bianco deve buona parte delle sue caratteristiche a un alto fattore di riflessione nel visibile;
- verifica dell'influenza dallo spessore di vernice stesa e dalla modalità di stesura sulle caratteristiche fotometriche;
- misurazioni termiche di tipo esteso e continuativo per individuare l'inerzia termica del sistema in complesse condizioni climatiche;
- individuazione delle variazioni nelle caratteristiche di riflessione speculare con diverse tecniche di stesura delle vernici e su asfalti di diversa granulometria;
- verifica delle prestazioni illuminotecniche su un impianto reale.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI 11095:2003, "Luce e illuminazione - Illuminazione delle gallerie"
- [2] UNI 10439 seconda edizione luglio 2001; "Illuminotecnica – Requisiti illuminotecnici delle strade con traffico motorizzato".
- [3] UNI UNI 10819:1999, "Luce e illuminazione - Impianti di illuminazione esterna - Requisiti per la limitazione della dispersione verso l'alto del flusso luminoso".
- [4] UNI EN 13201-2:2004, "Illuminazione stradale. Parte 2: requisiti prestazionali".
- [5] UNI EN 13201-3:2004, "Illuminazione stradale. Parte 3: calcolo delle prestazioni".
- [6] UNI EN 13201-4:2004, "Illuminazione stradale. Parte 4: Metodi di misurazione delle prestazioni fotometriche".
- [7] UNI 11248:2007, "Illuminazione Stradale – Selezioni delle Categorie Illuminotecniche".
- [8] CIE Publication No. 115, "Recommendation for the lighting of roads for the motor and pedestrian traffic", Commission International d'Eclairage, Vienna 1995.
- [9] CEN TR13201-1, "Road lighting - Part 1: Selection of lighting classes".
- [10] L. Fellin, P. Iacomussi, G. Rossi, P. Soardo, "Weight on sky luminance and the limiting magnitude of the sources around the site", Proceedings of CIE International Session, pp. D5-46-49 Beijing, 4-11 July 2007.
- [11] Decreto 14 settembre 2005 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Norme di illuminazione delle gallerie stradali".
- [12] Paola Iacomussi, Giuseppe Rossi, Mario Castellano, "The on site evaluation of performances of road lighting installations", Proceedings of Lux Europa, Berlin, 19/21-09-2005, pagg. 494-497.
- [13] CIE TR 144:2001 "Road Surface and Road Marking Reflection Characteristics", CIE – Vienna, 2001.
- [14] Adrian, W. K., "Visibility of Targets: Model for Calculation", Lighting Research and Technology, 21(4) pp. 181-188 (1989)
- [15] FHA "Safety Benefits of Roadway Lighting Using Small Target Visibility (STV) Design" Federal Highway Administration Washington, DC (1997)
- [16] ANSI/IESNA RP-8-00 (R2005), "Roadway Lighting", ANSI Approved Illuminating Engineering Society of North America 01-Jul-2000.
- [17] J. Lecocq "Calculation of the Visibility Level of Spherical Targets in Roads", Lighting
- [18] UNI 10819:1999 "Luce e illuminazione – Impianti di illuminazione esterna – Requisiti per la limitazione verso l'alto del flusso luminoso".
- [19] P. Soardo, L. Fellin, P. Iacomussi, G. Rossi, "A Scientifically Based Analysis of the Effects of Town Lighting on Sky Glow". Proceeding of the 26th session of the CIE, Beijing 4/11-07-2007, Volume 2, pagg. D5-46, D5-49.
- [20] P. Iacomussi (INRIM), G. Rossi (INRIM), P. Soardo (AIDI), "The luminance coefficient in road lighting - A parameter for saving energy and reducing atmospheric pollution", CIE Congress, Budapest, 2009.

- [21] UNI EN 410:2000 “Vetro per edilizia – Determinazione delle caratteristiche luminose e solari delle vetrate”.

9. SOMMARIO

1. Introduzione	2
1.1. Obbiettivo della ricerca	2
1.2. Condizioni di caratterizzazione dei manti stradali	2
1.3. Caratterizzazione dei manti stradali	2
1.4. Simulazioni delle condizioni applicative	2
1.5. Misure sul campo	2
2. Normativa riferita all'illuminazione stradale	3
2.1. Riferimenti normativi italiani ed europei	3
2.2. Requisiti prestazionali degli impianti	5
3. Impatto ambientale	8
3.1. Metodologie innovative di progetto legate alle condizioni di visione di ostacoli	8
3.1.1. Premessa	8
3.1.2. I compiti visivi del guidatore	8
3.1.3. Basi teoriche	9
3.1.4. Il modello di visibilità	11
3.1.5. Il modello STV	13
3.2. Inquinamento luminoso	14
3.2.1. Diffusione della radiazione luminosa	15
3.2.2. Situazione normativa	17
3.2.3. Leggi regionali	19
4. Caratterizzazione del Manto stradale per l'illuminotecnica	19
4.1. Grandezze normative per la caratterizzazione delle proprietà in riflessione	19
4.2. Condizioni angolari di misura	21
5. Caratterizzazione dei campioni	22
5.1. Campioni e condizioni sperimentali delle misure in laboratorio	22
5.2. Sito sperimentale	25
5.3. Misure spettrali	31
5.4. Misure globali in riflessione	36
5.5. Misure direzionali	40
6. Misure termiche	41
6.1. Descrizione delle condizioni sperimentali	41
6.2. Risultati	42
6.2.1. Misure in laboratorio	42
6.2.2. Misure sul campo	43
7. Conclusioni	46
7.1. Influenze illuminotecniche nell'adozione di asfalti "chiari"	46
7.2. Influenze termiche nell'adozione di asfalti "chiari"	47
7.3. Sviluppi futuri	47
8. Bibliografia	49
9. Sommario	51