

ANALISI SPERIMENTALE PER PAVIMENTAZIONI URBANE FOTOCATALITICHE

Da Rios G.

*Professore Ordinario, DIIAR - Sezione Infrastrutture Viarie, Politecnico di Milano,
giovanni.darios@polimi.it*

Lambrugo S.

*Dottoranda di Ricerca, DIIAR - Sezione Infrastrutture Viarie, Politecnico di Milano,
susanna.lambrugo@polimi.it*

Bacchi M.

*Dottorando di Ricerca, DIIAR - Sezione Infrastrutture Viarie, Politecnico di Milano,
matteo.bacchi@mail.polimi.it*

ABSTRACT

Il mantenimento di livelli della qualità dell'aria conformi ai limiti previsti dalle Direttive Europee in materia di inquinamento atmosferico costituisce nelle aree urbane una problematica complessa, sinora affrontata con provvedimenti connessi alle caratteristiche emissive dei veicoli e a politiche di gestione ad hoc.

Allo stato attuale un ulteriore strumento di controllo dell'inquinamento atmosferico è costituito dai prodotti fotocatalitici, materiali in grado cioè di contribuire alla riduzione di inquinanti in atmosfera in relazione alla loro capacità di accelerare le reazioni di ossidazione delle sostanze nocive in elementi inerti. L'applicazione di tali materiali alle opere civili, in particolare alle pavimentazioni stradali, costituisce una possibilità che deve essere tenuta in debita considerazione per la viabilità urbana che rappresenta una delle principali superfici disponibili nonché sede primaria dell'inquinamento da traffico.

L'obiettivo che la presente memoria si pone è di tracciare il quadro dell'applicazione sperimentale dei materiali fotocatalitici alle pavimentazioni stradali, ponendo l'attenzione su una particolare tipologia di pavimentazione urbana con caratteristiche fotocatalitiche in cui lo strato superficiale è costituito dalla combinazione di conglomerato bituminoso con un legante cementizio fotocatalitico. La tipologia di pavimentazione composita in oggetto viene caratterizzata dal punto di vista dell'abbattimento fotocatalitico in funzione del contenuto e della tipologia di fotocatalizzatore impiegata, simulandone l'effetto sulle concentrazioni di NOx all'interno di una struttura urbana di tipo canyon.

KEYWORDS

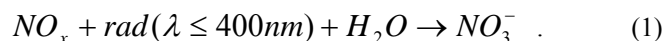
Pavimentazioni stradali fotocatalitiche, Misura attività fotocatalitica, Modello canyon

INTRODUZIONE

Il fenomeno chimico della fotocatalisi si basa sulla proprietà di una sostanza chimica, il fotocatalizzatore, di accelerare, in presenza di luce e aria, le reazioni di ossidazione degli inquinanti atmosferici, favorendo così la loro riduzione a sostanze inerti non dannose né per l'uomo né per l'ambiente [1]. Il fotocatalizzatore è un semiconduttore che, in relazione alla sua particolare configurazione elettronica, qualora irradiato con radiazione di lunghezza d'onda opportuna, genera uno stato eccitato tale da favorire, in funzione del numero di vacanze sulla sua superficie, le reazioni chimiche tra le sostanze inquinanti e gli elementi normalmente presenti in atmosfera.

Il migliore fotocatalizzatore conosciuto è il biossido di titanio, nella particolare configurazione cristallina dell'*anatasio*, una sostanza chimica in grado di generare, qualora irradiata con radiazione di lunghezza d'onda inferiore a 400nm, uno stato eccitato estremamente stabile, il cui decadimento nel tempo è lento e consente un elevato rendimento delle reazioni connesse alla fotocatalisi [2].

Gli ossidi di azoto, NO e NO₂, costituiscono allo stato attuale uno degli inquinanti atmosferici con maggiore impatto sulla salute e sull'ambiente. Il potere ossidante del fotocatalizzatore nei riguardi degli ossidi di azoto è legato, in sintesi, ad una reazione del tipo:



Il fotocatalizzatore, irradiato con luce di lunghezza d'onda inferiore a 400nm, genera il proprio stato eccitato caratterizzato dalla presenza di due elettroni di conduzione e di due vacanze positive, l'acqua adsorbita sulla superficie viene ossidata generando radicali OH mentre l'ossigeno presente in atmosfera viene ridotto con la formazione di ioni idroperossido. Le due specie, altamente reattive, si legano agli NO_x generando acido nitrico che, in presenza di ambiente alcalino, viene adsorbito dalla superficie formando ioni nitrato. Un elemento altamente inquinante può essere quindi ridotto, per mezzo della catalisi fornita dalla superficie contenenti anatasio, in un elemento del tutto inerte.

L'efficacia dell'anatasio non si limita ai soli ossidi di azoto, ma riguarda anche altri fattori inquinanti dell'atmosfera, dagli ossidi di zolfo ai composti benzenici. Per verificare l'entità dell'abbattimento ottenuto gli ossidi di azoto rimangono i marcatori più immediati ed affidabili.

La necessità di intercettare gli elementi inquinanti a ridosso della fonte di emissione appare evidente, per questa ragione la ricerca si è concentrata nello sviluppo di materiali fotocatalitici con caratteristiche tali da poter essere applicati al contesto urbano. Gli autori si propongono di indagare, in particolare, le caratteristiche di una pavimentazione stradale fotocatalitica, valutandone le performance nell'abbattimento delle concentrazioni degli inquinanti al variare delle tipologie e della quantità di fotocatalizzatore impiegato e di simulare, tramite un modello di dispersione di tipo "canyon" la distribuzione delle concentrazioni di NO_x all'interno di un tratto stradale lateralmente marginato da edifici, in presenza o in assenza di una pavimentazione stradale fotocatalitica.

LE PAVIMENTAZIONI FOTOCATALITICHE

La realizzazione di pavimentazioni stradali con caratteristiche fotocatalitiche costituisce una possibilità di crescente interesse per la riduzione di inquinanti atmosferici. Le pavimentazioni stradali infatti costituiscono una superficie caratterizzata da un ampio sviluppo in termini di superfici e da una distribuzione capillare all'interno del tessuto urbano, inoltre, costituendo la sede del traffico stradale, consentono di intercettare le sostanze inquinanti immediatamente a ridosso della loro fonte di emissione principale, massimizzando l'effetto delle superfici fotocatalitiche nella riduzione degli inquinanti e nella prevenzione della formazione di inquinanti di tipo secondario.

Allo stato attuale le tipologie di pavimentazioni stradali di tipo bituminoso con caratteristiche fotocatalitiche oggetto di applicazioni sperimentali sono differenti [3], gli elementi discriminanti risultano essere le caratteristiche del supporto per mezzo del quale il fotocatalizzatore viene applicato alla pavimentazione e le modalità di applicazione. Il fotocatalizzatore infatti non può entrare direttamente in contatto con la superficie bituminosa che, in quanto costituita da matrice organica, verrebbe degradata.

In relazione alla natura del supporto bituminoso si distinguono due tipologie differenti di pavimentazioni fotocatalitiche: a supporto cementizio e non cementizio.

Le pavimentazioni bituminose sulle quali il fotocatalizzatore viene applicato sulla superficie per mezzo di un supporto non cementizio sono composte da uno strato bituminoso tradizionale sul quale il biossido di titanio viene applicato mediante la spruzzatura di una resina inorganica all'interno della quale si trova in sospensione. Il materiale fotocatalitico può essere applicato a freddo, su pavimentazione nuova o esistente, o a caldo, con successiva rullatura della superficie trattata.

Le pavimentazioni che prevedono invece l'applicazione del biossido di titanio per mezzo di una matrice cementizia possono essere distinte in tre tipologie: una prima nella quale la malta cementizia fotocatalitica viene applicata su una pavimentazione bituminosa di tipo chiuso con uno strato superficiale di pochi millimetri, la seconda che prevede la posa di uno strato di conglomerato bituminoso di tipo aperto intasato con malta cementizia fotocatalitica per una profondità di 1-2 cm ed infine la terza che prevede il completo intasamento dello strato bituminoso. Le differenti tipologie si adattano a differenti livelli e caratteristiche di traffico, nei paragrafi successivi si farà in particolare riferimento ad una pavimentazione di tipo misto bitume/cemento, completamente intasata, adatta quindi anche a traffico lento e pesante.

La pavimentazione fotocatalitica in bitume e cemento

La pavimentazione in oggetto si avvale di una tecnologia propria delle pavimentazioni in bitume e cemento [4], caratterizzate da elevate performance

strutturali, attribuendo allo strato una ulteriore funzione anti-inquinante mediante miscelazione della malta cementizia che le compone con biossido di titanio.

La pavimentazione è composta da uno strato bituminoso open graded, confezionato con il 4,5% di bitume ordinario 50/70. La granulometria del materiale e le modalità di compattazione consentono di ottenere uno strato con tenore e distribuzione dei vuoti (25-30%) tali da consentirne il completo intasamento da parte della malta cementizia fotocatalitica.

La malta cementizia impiegata per il confezionamento della pavimentazione fotocatalitica presenta elevate caratteristiche di fluidità, tali da consentire il completo intasamento dello strato bituminoso, e di resistenza meccanica, in grado di conferire allo strato performance adeguate anche a tipologie di traffico critiche [5].

Il fotocatalizzatore, biossido di titanio nella struttura cristallina dell'anatasio, viene aggiunto alla polvere cementizia in percentuale variabile, in funzione del tipo di performance desiderata. La malta viene miscelata con un contenuto d'acqua variabile tra il 16,8 e il 19%, in funzione della quantità di biossido di titanio impiegata [6].

La pavimentazione fotocatalitica viene realizzata stendendo il conglomerato bituminoso con le caratteristiche sopra descritte con normale finitrice e quindi compattata in modo da ottenere una percentuale di vuoti compresa tra il 25 e il 30%.

La malta fotocatalitica viene applicata alla pavimentazione una volta raggiunta una temperatura superficiale (30° in media) tale da non interferire in modo significativo con i tempi di presa della malta stessa. La superficie viene lavorata con raclee in modo da favorire la penetrazione della malta all'interno dei vuoti e da eliminarne gli eccessi dalla superficie. Ulteriori operazioni di rifinitura superficiale [7,8] consentono di ottenere le caratteristiche di aderenza desiderate.

ANALISI SPERIMENTALE

L'analisi sperimentale condotta dagli autori, presso il Laboratorio Sperimentale Stradale del DIAR – Politecnico di Milano, comprende una prima fase di analisi dell'attività fotocatalitica di provini di pavimentazione, confezionati con differenti tipologie di biossido di titanio in differenti percentuali, ed una seconda fase di modellazione delle concentrazioni di inquinanti in una struttura stradale di tipo canyon sia in presenza di una pavimentazione tradizionale sia di pavimentazioni fotocatalitiche di tipo misto in bitume e cemento.

Definizione delle miscele di malta fotocatalitica

Le miscele di malta cementizia fotocatalitica prese in esame nell'analisi sperimentale hanno visto l'impiego di tre differenti tipologie di biossido di titanio in due differenti percentuali. Le tipologie di fotocatalizzatore analizzate sono state desunte da prodotti industriali disponibili in commercio:

- Tipo A: anatasio,
- Tipo B: anatasio drogato con carbonio (1),
- Tipo C: anatasio drogato con carbonio (2).

Il drogaggio dell'anatasio con carbonio consente di incrementarne l'attività fotocatalitica anche in presenza di radiazione di lunghezza d'onda superiore a 400 nm, e cioè di campo di radiazione visibile [9,10].

Le percentuali di biossido di titanio sperimentate sono state definite sulla base di studi preliminari, allo scopo di ridurre l'impatto del fotocatalizzatore sul rapporto acqua cemento [11,12]. In sintesi, le miscele di malta fotocatalitica impiegate nel confezionamento dei provini oggetto di analisi sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1: Miscele di malta fotocatalitica oggetto di analisi

	TiO ₂	TiO ₂ [%]*	w [%]*
Miscela 1	TipoA	5	16,8
Miscela 2	TipoA	7,5	17
Miscela 3	TipoB	5	16,8
Miscela 4	TipoB	7,5	17
Miscela 5	TipoC	5	16,8
Miscela 6	TipoC	7,5	17

**le percentuali sono riferite alla quantità di malta di cemento in peso*

I provini da impiegarsi nelle analisi sono stati confezionati utilizzando il conglomerato bituminoso descritto nel paragrafo precedente, compattati con pressa giratoria in modo da ottenere un tenore di vuoti mediamente del 27% ed infine completamente intasati con le differenti miscele cementizie.

Analisi della capacità fotocatalitica della pavimentazione

La misura della capacità fotocatalitica delle differenti miscele di malta cementizia precedentemente definite è stata condotta sottoponendo provini di pavimentazione ad un test per la determinazione dell'attività di degradazione degli ossidi di azoto in aria.

L'apparecchiatura di misura (Fig. 1), appositamente messa a punto, anche in base alle principali normative Uni in merito, si compone di una camera di reazione in vetro, del volume di 3,38 litri, all'interno della quale viene posto il provino. In ingresso alla camera di reazione si ha un flusso di 5 litri/min, costante, di una miscela di aria e NO_x, ad umidità controllata [50% ± 10], un analizzatore a chemiluminescenza preleva un flusso costante di fluido dalla camera di reazione misurandone la concentrazione di NO_x.

Il campione viene posto all'interno della camera di reazione e viene misurata la concentrazione di ossidi di azoto in condizioni di buio. Il reattore viene quindi irradiato con una lampada di potenza pari a 300W ed emissione di luce a 365nm, posta ad una distanza tale da far sì che il flusso radiante integrato tra 300 e 400nm, misurato da un radiometro posto all'interno del reattore, sia pari a 20 W/m², tramite l'analizzatore a chemiluminescenza viene determinata la concentrazione di NO_x all'interno del reattore, nel tempo. La prova viene protratta fintantoché la concentrazione di inquinanti nel reattore, in condizione di luce accesa, assume un valore costante.

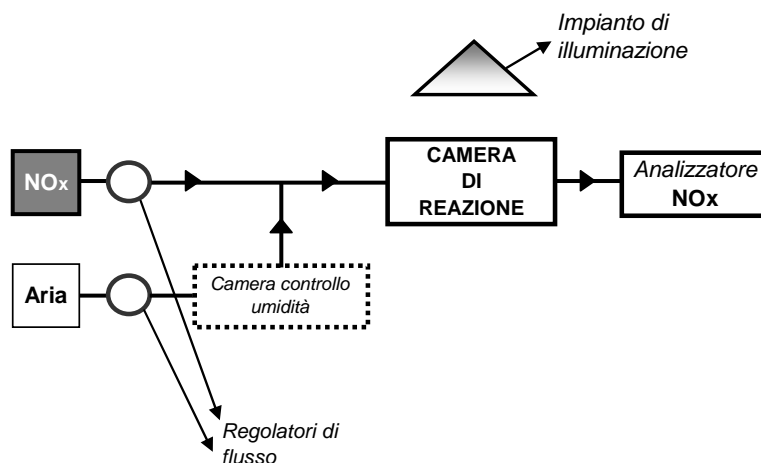


Figura. 1 – Apparecchiatura per la misura della capacità fotocatalitica di pavimentazioni stradali

Ciascuno dei provini confezionati con le miscele descritte nel paragrafo precedente è stato confinato lateralmente e quindi introdotto all'interno della camera di reazione e sottoposto a test. Tramite l'analizzatore a chemiluminescenza sono state rilevate le concentrazioni di NOx ad intervalli di 10 minuti. I risultati di ciascun test presentano le caratteristiche illustrate nel grafico di Figura 2 relativamente alla miscela 4.

La concentrazione di inquinanti rimane costante fino all'attivazione dell'impianto di illuminazione, quindi si registrano variazioni delle concentrazioni fino al raggiungimento di una nuova condizione di stazionarietà della misure.

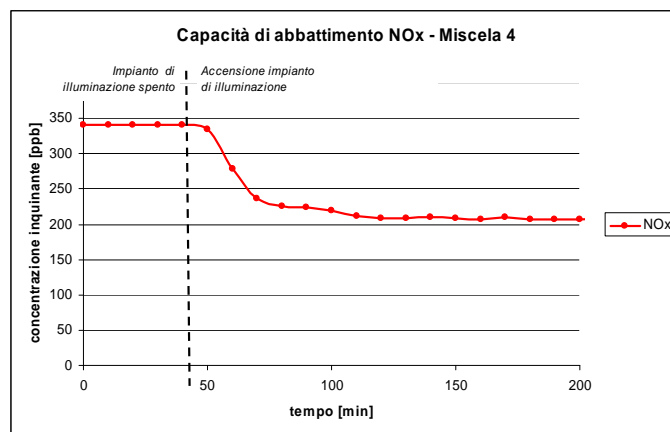


Figura 2 – Risultato del test di attività fotocatalitica sulla miscela 4

Il confronto tra le differenti modalità di abbattimento delle concentrazioni di NOx nel tempo è riportato, in termini percentuali, in Figura 3, la cui origine dei tempi coincide con l'attivazione della fotocatalisi mediante accensione della lampada.

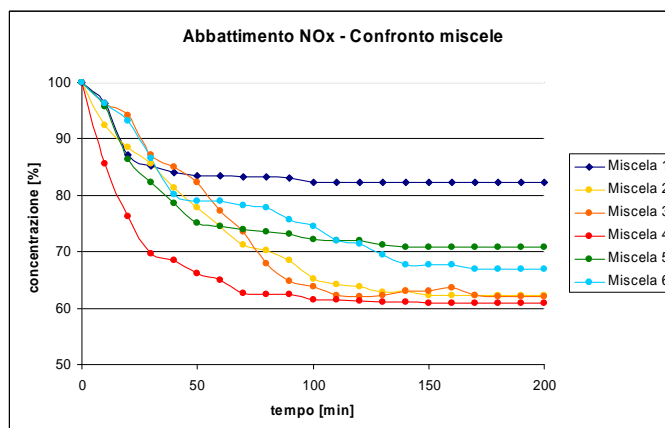


Figura 3 – Confronto tra l'abbattimento percentuale delle differenti miscele

L'attività complessiva della miscela fotocatalitica nell'abbattimento degli NOx viene espressa come differenza percentuale tra la concentrazione iniziale, a luce spenta, e la concentrazione finale, in condizioni nuovamente stazionarie (Tabella 2).

Tabella 2: Abbattimento percentuale di NOx delle miscele analizzate

	Abbattimento NOx [%]
Miscela 1	18%
Miscela 2	38%
Miscela 3	38%
Miscela 4	40%
Miscela 5	29%
Miscela 6	33%

Le indicazioni desumibili dalla Tabella 2 rappresentano un univoco approccio prestazionali e, in quanto tali, risultano idonee a testare, in via preliminare di prequalifica, la rispondenza intrinseca dei prodotti e delle tecnologie di applicazione e confezionamento. Analogamente, dopo la posa in scala reale, la medesima procedura consente di accertare la permanenza dei requisiti prestazionali inizialmente previsti,

Impatto della pavimentazione fotocatalitica sulla dispersione degli inquinanti in un canyon stradale

La misura in campo dei macro effetti antismog della presenza di pavimentazioni fotocatalitiche risulta alquanto controversa per la inferenza di molteplici fattori ed elementi ambientali in grado di incidere sul microclima del sito di misura. Per valutare progettualmente gli effetti della fotoattività è quindi preferibile appoggiarsi a modelli teorici, alquanto affidabili ma esposti a risultanze meno univoche rispetto alle prove di laboratorio.

La tipica struttura urbana costituita da una strada delimitata su ciascun lato da palazzi viene detta “canyon stradale”. La circolazione d’aria all’interno del canyon stradale ha caratteristiche fortemente locali essendo influenzata dalle caratteristiche geometriche del canyon e dalle caratteristiche del vento ai tetti. La geometria del canyon e le caratteristiche del vento ai tetti fanno sì che si formi una circolazione del vento di tipo elicoidale, con asse parallelo all’asse longitudinale della sede stradale [13,14]. Ipotizzando una geometria di tipo canyon e fissate le condizioni al contorno è possibile determinate le concentrazioni di inquinanti, NO_x , in assenza e in presenza di pavimentazione fotocatalitica.

In ciascun punto del canyon stradale la concentrazione di inquinanti può essere assunta come la somma di due fattori: la concentrazione di fondo, dovuta al contributo d’area, e la concentrazione dovuta alle emissioni di inquinanti all’interno del canyon stesso (1).

$$C_{tot} = C_f + \Delta C \quad (2)$$

Il contributo dovuto alle emissioni interne al canyon è definito in modo differente in funzione della posizione del punto recettore, sul lato sopravento o sul lato sottovento, e in funzione della direzione del vento ai tetti [15].

Ipotizzando che l’angolo formato dal vento ai tetti con l’asse longitudinale del canyon sia prossimo a 90° , nel caso in cui il punto recettore si trovi sottovento il contributo ΔC è definito come:

$$\Delta C = \frac{KQ_s}{(u + 0.5)[(x^2 + z^2)^{1/2} + L_o]} \quad (3),$$

mentre, nel caso in cui il recettore sia posto sopravento, il contributo ΔC è dato dalla formula:

$$\Delta C = \frac{KQ_s(H_b - z)}{L(u + 0.5)H_b} \quad (4),$$

essendo:

K = una costante derivata empiricamente assunta pari a 7,

Q_s = il tasso di emissione medio [$\mu\text{g}/\text{ms}$],

x = la componente orizzontale della distanza del recettore dal punto di emissione,

z = la componente verticale della distanza del recettore dal punto di emissione,

u = velocità del vento ai tetti [m/s],

Da Rios G., Lambrugo S., Bacchi M.

L_o = una costante funzione della lunghezza media dei veicoli, assunta pari a 2m,
 L = larghezza media della strada,
 H_b = altezza media degli edifici costituenti le pareti del canyon.

Le ipotesi semplificative del modello, stazionario e bidimensionale, rendono il modello inadeguato per la rappresentazione del caso di assenza di vento e pongono limitazioni in merito alla mancanza di considerazione degli effetti del gradiente del campo di concentrazione generato dalle differenti emissioni corrispondenti a sezioni adiacenti. L'applicazione al caso in esame appare tuttavia soddisfacente, volendo gli autori rappresentare una sola sezione tipo, localizzata nella mezzeria del canyon, e condizioni di vento non nullo.

Si è ipotizzata una geometria del canyon caratterizzata da una larghezza della sede stradale pari a 10 metri, da un'altezza media dei palazzi ai lati di 18 metri e da una circolazione ad unico senso di marcia tale da consentire la localizzazione del punto di emissione nella mezzeria della sezione del canyon stesso. Per il calcolo del tasso di emissione si è considerata una velocità media di percorrenza di 30 km/h, condizioni di accelerazione nulla, ipotizzando la sezione in esame posizionata nella parte media del canyon urbano, ed un valore di emissione di NO_x pari a 0.0001 grammi/metro assunto da letteratura [16] e stimato sulla base di modelli di dispersione tipo EMOD.

Sulla base del modello di dispersione definito in precedenza per lo scenario descritto è possibile determinare una distribuzione delle concentrazioni di NO_x, con riferimento al solo contributo delle emissioni inquinanti all'interno del canyon stesso (ΔC), per una giornata estiva, per punti recettori situati a quote differenti. In particolare in figura 4 vengono riportati i valori della concentrazione di NO_x alle quote di 0,5, 1, 2, 5, 8 e 12 metri, lungo la sezione del canyon stesso.

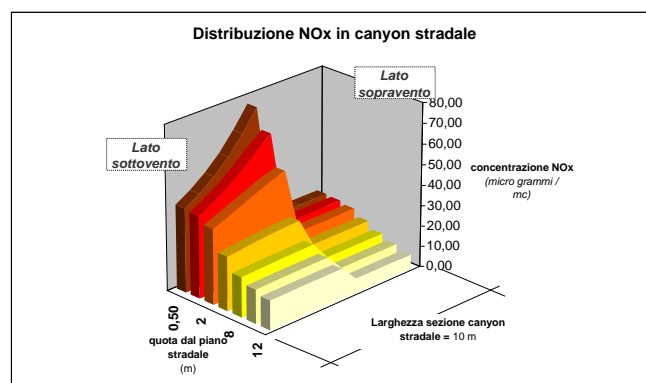


Figura 4 – Stima delle concentrazioni di inquinanti in un canyon stradale con modello di tipo “canyon”

La concentrazione totale di NO_x in ogni punto è data dalla somma della quota parte dovuta alle sorgenti di emissione interne al canyon così definite e del contributo d'area, o concentrazione di fondo.

Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio condotte su ciascuna tipologia di campione è stata calcolata la massa di inquinante che si deposita sulla superficie

nell'unità di tempo, facendo riferimento alle condizioni standard di prova. La pavimentazione fotocatalitica è stata quindi modellata alla stregua della fonte di emissione, inserendola nel modello canyon precedentemente descritto ed utilizzando il tasso di emissione medio precedentemente calcolato.

Riferendosi alla sezione corrispondente al marciapiede sottovento, e cioè la zona del canyon a maggiore concentrazione di inquinanti interessata dal transito di traffico pedonale, si è proceduto al calcolo delle concentrazioni in presenza di ciascuna delle sei tipologie di pavimentazione fotocatalitica considerate. In Figura 5 sono riportate le concentrazioni stimate, in funzione della quota all'interno del canyon, al variare della tipologia di pavimentazione impiegata, conformemente ai parametri fissati nella fase di analisi di laboratorio. La concentrazione di NOx rappresentata in figura è riferita al solo contributo dovuto alle sorgenti di emissione interne al canyon, ovvero il traffico stradale, modellato come una sorgente lineare posta al centro del canyon stesso, con riferimento all'atmosfera convenzionale inquinata secondo le procedura di prova standard.

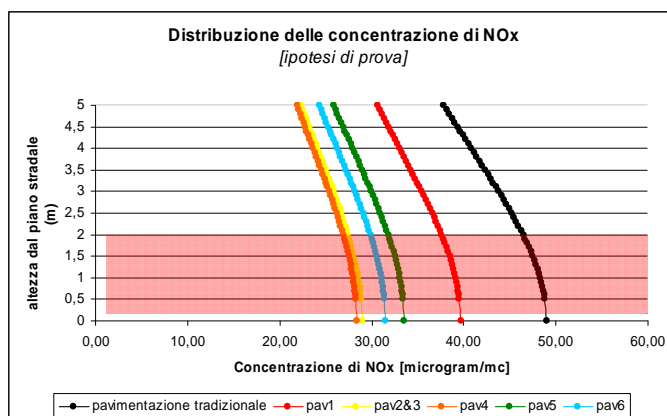


Figura 5 – Concentrazioni lato sottovento al variare della malta fotocatalitica impiegata dovute al fonti interne al canyon in condizione di prova

Ipotizzando parametri di concentrazione iniziale differenti da quelli di prova e prossimi ad una situazione tipica per un canyon urbano [17], sulla base delle velocità di deposizione precedentemente calcolate e tenendo conto che la concentrazione di inquinante influenza l'efficienza delle reazioni connesse al fenomeno di fotocatalisi conformemente ad un processo eterogeneo di tipo Langmiur-Hinshelwood, si è ipotizzata una seconda distribuzione di concentrazioni (Fig. 6).

Si è ottenuta da un lato la conferma di una linea di tendenza decrementale in quota ma anche la netta compattazione della concentrazione al suolo dei valori di inquinanti azotati, con limitatissime differenze di efficacia dei campioni esaminati.

Gli effetti delle differenti pavimentazioni fotocatalitiche valutati dal modello mettono in luce quanto ad una univoca determinazione dell'attività fotocatalitica secondo prova sperimentale si accompagni una difficile trasposizione dei risultati al caso reale, in ragione dell'elevata numerosità e complessità dei fattori interagenti.

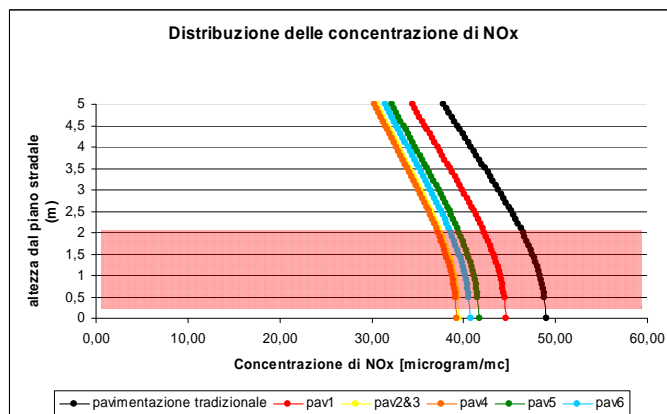


Figura 6 – Concentrazioni lato sottovento al variare della malta fotocatalitica impiegata dovute ai fonti interne al canyon in condizioni tipiche

In corrispondenza della quota corrispondente all'altezza di respiro dei pedoni sul lato sottovento del canyon stradale preso in esame si rileva in ogni caso una riduzione delle concentrazioni, con particolare riferimento al caso di pavimentazioni fotocatalitiche confezionate con anatasio drogato con carbonio e quindi sensibili ad una gamma di lunghezze d'onda più ampia.

CONCLUSIONI

L'analisi nell'efficacia di ciascuna tipologia di pavimentazione nell'abbattimento delle concentrazioni di NO_x in atmosfera ne ha evidenziato una riduzione in ciascuno dei casi presi in esame, anche a fronte di percentuali di fotocatalizzatore sensibilmente contenute. In particolare si evidenzia una maggiore attività fotocatalitica complessiva delle miscele confezionate con biossido di titanio drogato con carbonio.

La simulazione delle concentrazioni di inquinanti in una sezione stradale tramite l'applicazione di un modello di diffusione di tipo "canyon" ha permesso di quantificare, seppur in modo semplificato, l'effettiva entità della riduzione di concentrazione di NO_x dovuta alla presenza di una pavimentazione con caratteristiche fotocatalitiche in corrispondenza delle diverse quote del canyon stesso.

Il confronto tra le concentrazioni modellate in funzione di differenti scenari mette in luce la complessità sita nel passaggio dalle misure di laboratorio alla modellazione di risultati in grande scala, in relazione alla numerosità dei parametri e alla complessità del fenomeno, difficilmente rappresentabile in ogni suo aspetto per mezzo di un modello semplificato. Va poi evidenziata, specie ai fini quantitativi di valutazione dei fattori di riduzione, la notevole incidenza dello specifico ambito di concentrazione di NO_x, risultando in laboratorio, secondo la procedura standard, un effetto amplificato rispetto al caso reale in campo.

Le percentuali di abbattimento delle concentrazioni di NO_x per le miscele fotocatalitiche evidenziano la necessità di ulteriore sperimentazione per incrementare la

quantità di fotocatalizzatore e concentrarlo nel solo strato superficiale per contenere i costi, senza tuttavia alterare le elevate performance strutturali della pavimentazione completamente intasata.

La notevole dispersione dei risultati ottenuti con prodotti fotocatalitici commercialmente qualificati come equivalenti dimostra ancora una volta la necessità di una rigorosa procedura di pre-qualifica con campi prova mirati a cogliere le reali valenze prestazionali delle tecnologie operative proposte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fujishima A., Hashimoto K., Watanabe T., “*TiO₂ photocatalysis: fundamentals and applications*”, Tokyo: BKC, Inc. 1999.
- [2] Fujishima A., Rao T., Tryk D.A., “Titanium dioxide photocatalysis”, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Reviews*, 1, 2000.
- [3] Da Rios G., Fiori F., Lambrugo S., “*Fotocatalisi per l'ambiente urbano*”, *Strade & Autostrade*, 3-2008.
- [4] Da Rios G., Bacchi M., “*Le pavimentazioni in bitume cemento*”, *Strade & Autostrade*, 2-2007.
- [5] Da Rios G., Agostinacchio M., Fiori F., “*Performance and durability of gouted open grade asphalt concretes*”, *Mairepav* 5, 2007.
- [6] Toraldo E., Lambrugo S., “*The optimization of photocatalytic mortar for road bituminous pavement*”, 4th Iconf, Thessaloniki, Greece, 2004.
- [7] Crispino M., Lambrugo S., “*Surface characteristics and environmental performance of a photocatalytic innovative pavement*”, *RSS*, Roma, 2007.
- [8] Crispino M., Lambrugo S., “*A real scale analysis of surface characteristics of a photocatalytic pavement*”, *SIIV*, Palermo, 2007.
- [9] Stephan P. Blöß, Lothar Elfenthal, “*Doped titanium dioxide as a photocatalyst for UV and Visible Light*”, *Rilem Symposium on photocatalysis*, 2007, Florence, Italy.
- [10] Irie H., Watanabe Y. e Hashimoto K., “*Carbon doped Anatase TiO₂ Powders as a visible light photocatalyst*”, *Chemistry letters* 32, 2003.
- [11] Crispino M., Lambrugo S., “*An experimental characterization of a photocatalytic mortar for road bituminous pavement*”, *Rilem Symposium on photocatalysis*, 2007, Florence, Italy.
- [12] Crispino M., Lambrugo S., “*Effectiveness of a photocatalytic wearing course through experimental analysis*”, *ISAP*, Zurich, 2008. (in corso di pubblicazione)
- [13] Benarie M. M., “*Urban air pollution modelling*”, *The Macmillan Press*, 1991.
- [14] Yamartino R.J., Wiegard G., “*Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollutant concentration fields within urban street canyon*”, *Atmospheric Environment* Vol20, no. 11, 1986.
- [15] Hassan J.L., Taylor A.D., “*A simple model of pollutant concentrations in a street canyon*”, *Environmental Monitoring and Assessment*, no. 52, 1998.
- [16] Mancuso R. L., Ludwig F.L., “*User's manual for APRAC-1A: Diffusion model program*”, *CRC and EPA*, Contract CAPA-3-68
- [17] ARPA Lombardia