

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di ingegneria Civile, Territoriale e Ambientale

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



ANALISI SPERIMENTALE IN VERA GRANDEZZA DI UNA PAVIMENTAZIONE IN CONGLOMERATO BITUMINOSO DRENANTE INTASATO CON MALTA CEMENTIZIA FOTOCATALITICA

Relatore: Prof. Maurizio CRISPINO

Correlatore: Ing. Claudio BROVELLI

Tesi di Laurea di:

Enrico AGUDIO matr. 735495

Mauro RAVASIO matr. 735402

Anno Accademico 2009-2010

INDICE

1. INTRODUZIONE	4
2. FOTOCATALITICO: LA TECNOLOGIA E LE ESPERIENZE DI LABORATORIO	6
2.1. LA FOTOCATALISI E IL SUO SVILUPPO	6
2.2. PURIFICAZIONE DELL'ARIA	11
2.3. IMPATTO AMBIENTALE DELLA REAZIONE CHIMICA	12
2.4. APPLICAZIONI	14
2.4.1. CEMENTO FOTOCATALITICO	14
2.4.2. VETRO FOTOCATALITICO.....	16
2.4.3. RIVESTIMENTI FOTOCATALITICI INTERNI ED ESTERNI	17
2.4.3.1. PAVIMENTAZIONI FOTOCATALITICHE	18
2.5. RICERCHE CONDOTTE	20
3. IL PROTOCOLLO DI PROVA E L'ATTREZZATURA.....	31
3.1. PROTOCOLLO DI PROVA.....	31
3.2. OBIETTIVO	31
3.3. DESCRIZIONE DEL CAMPO PROVE	31
3.4. NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	34
3.5. CARATTERISTICHE DELL'APPARECCHIATURA DI PROVA	35
3.6. PREPARAZIONE DEI CAMPIONI.....	40
3.7. ESPRESSIONE DEI RISULTATI E RIPRODUCIBILITA'.....	41
4. ANALISI SPERIMENTALE: LE FASI	42
5. ANALISI SPERIMENTALE: I RISULTATI.....	58
5.1. PROVE IN LABORATORIO.....	58
5.1.1. CARATTERIZZAZIONE VOLUMETRICA DEL MATERIALE	58
5.1.1.1. ANALISI GRANULOMETRICA	58
5.1.1.2. PERCENTUALE DI VUOTI	60
5.1.1.3. PROVA DI DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO	63
5.1.1.4. PROVE DI ESTRAZIONE: PERCENTUALE DI BITUME.....	65
5.1.2. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL MATERIALE	67
5.1.2.1. PROVA DI TRAZIONE INDIRETTA	67

5.1.2.2.	PROVA DI RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE	67
5.1.2.3.	CALCOLO DEL MODULO ELASTICO	67
5.2.	PROVE IN SITO	67
5.2.1.	DEFINIZIONE CARATTERISTICHE DEL SOTTOFONDO	67
5.2.2.	DEFINIZIONE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI.....	70
5.2.2.1.	ALTEZZA IN SABBIA.....	70
5.2.2.2.	SKID TEST	71
5.2.2.3.	VALUTAZIONE VISIVA DELLA STRATO FESSURATIVO	72
5.2.3.	CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE CAROTE	74
5.2.3.1.	PROVE DI TRAZIONE INDIRETTA	74
5.2.3.2.	PROVA DI RESISTENZA A COMPRESSIONE (STRATO D'USURA)	74
5.2.3.3.	CALCOLO DEL MODULO ELASTICO.....	74
5.2.4.	ANALISI DELLE CAROTE	74
5.2.4.1.	VALUTAZIONE DEGLI SPESSORI.....	74
5.2.4.2.	MASSA VOLUMICA.....	75
5.2.4.3.	ANALISI VISIVA DELL'INTASAMENTO	76
5.2.4.4.	ANALISI VISIVA DELLA CONDIZIONE DEL MATERIALE	78
5.3.	FOTOCATALITICO	79
5.3.1.	MISURE DI ABBATTIMENTO DEGLI INQUINANTI DELLE CAROTE	79
5.3.2.	MISURE DI ABBATTIMENTO DEGLI INQUINANTI DEI PROVINI REALIZZATI CON PRESSA GIRATORIA E SUCCESSIVAMENTE INTASATI CON TX PERCOCEM	85
5.3.3.	USURA SUPERFICIALE.....	85
6.	CONCLUSIONI	86
7.	BIBLIOGRAFIA.....	88
8.	ALLEGATI	91
8.3.	ANALISI GRANULOMETRICA.....	91
8.4.	PERCENTUALE DI VUOTI DELLO STRATO D'USURA CONFEZIONATO IN LABORATORIO CON PRESSA GIRATORIA.....	93
8.5.	PERCENTUALE DI VUOTI DELLO STRATO D'USURA CONFEZIONATO IN LABORATORIO CON MARSHALL.....	95

1. INTRODUZIONE

Sempre più spesso si parla di inquinamento ambientale, questo costituisce una delle problematiche che stanno assumendo sempre più porzioni drammatiche sia per gli effetti che hanno sulla salute umana che per le conseguenze a livello ambientale.

Come rivela l'Agenzia regionale dell'Ambiente (ARPA) della Lombardia, considerando i principali inquinanti quali, solo per citarne alcuni, il monossido di carbonio (CO), l'ossido, il monossido (NO) e il biossido di azoto (NO₂), il benzene, le polveri sottili e in particolare i PM 10, la loro presenza è legata ai cicli di combustione che utilizzano combustibili organici. In ambito urbano la sorgente principale è rappresentata dal traffico veicolare per cui le concentrazioni più elevate si riscontrano nelle ore di punta del traffico.

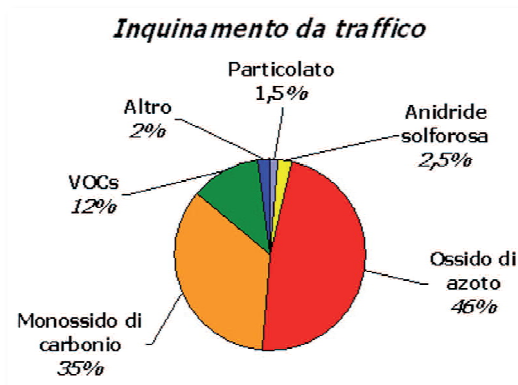


Figura 1- Il contributo di ciascuna frazione inquinante all'inquinamento da traffico complessivo

Risulta chiaro come il contenimento delle concentrazioni degli inquinanti atmosferici al di sotto delle soglie definite dall'unione europea e recepite dalla Legislazione italiana rappresenti, alla luce dei dimostrati effetti che hanno sulla salute umana e sull'ambiente. Sotto questo aspetto risulta di primaria importanza l'individuazione di provvedimenti efficaci volti al raggiungimento di tali livelli di qualità dell'aria e al loro mantenimento nel tempo.

La regolazione del traffico, l'utilizzo dei carburanti ecologici, dei dispositivi catalitici e il blocco della circolazione costituiscono, allo stato attuale, il modo più efficace per controllare e arginare il superamento delle soglie massime.

La ricerca scientifica pone oggi l'attenzione sui materiali fotocatalitici, questi materiali favoriscono e accelerano , in presenza di aria e luce, le reazioni chimiche di ossidazione delle sostanze inquinanti e di riduzioni delle stesse a residui non nocivi. 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.

2. FOTOCATALITICO: LA TECNOLOGIA E LE ESPERIENZE DI LABORATORIO

2.1. LA FOTOCATALISI E IL SUO SVILUPPO

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. Idealmente un fotocatalizzatore deve essere chimicamente e biologicamente inerte, stabile dal punto di vista fotocatalitico, facile da produrre e da utilizzare, attivato dalla luce solare, efficiente e privo di rischi per la salute e per l'ambiente. [2]

Le ricerche scientifiche hanno riscontrato come miglior fotocatalizzatore il Biossido di Titanio (TiO_2). Il titanio è il quarto metallo più diffuso in natura dopo: alluminio, ferro e magnesio ed è il nono elemento chimico per abbondanza costituendo circa lo 0,63% della crosta terrestre.

Il Biossido di Titanio si presenta sotto forma di polvere cristallina incolore. Si trova in natura in tre differenti forme cristalline: rutilio, brookite e anatasio [2] e in fase amorfa.

La brookite ha una struttura orto rombica, le altre due forme, invece, hanno una struttura tetragonale contenente tre ottaedri distorti, in particolare la struttura tetragonale del rutilio contiene due molecole di TiO_2 per cella primitiva. Il rutilio e l'anatasio sono le forme più diffuse in natura.

Le maggiori differenze strutturali tra le diverse forme sono nel numero di ottaedri condivisi, vale a dire due nel rutilio, tre nella brookite e quattro nell'anatasio. Il rutilio è la forma cristallina più stabile termodinamicamente ed è la più usata industrialmente mentre l'anatasio è metastabile e delle tre forme è quella più attiva come fotocatalizzatore e quindi è quella più usata tecnologicamente nei processi di fotocatalisi [3].

Per meglio comprendere il processo della fotocatalisi richiamiamo alcuni principi di chimica: La struttura di un atomo si compone di un nucleo centrale, composto da protoni e neutroni, attorno

al quale si muovono gli elettroni secondo delle traiettorie, anche dette orbite. Gli elettroni orbitanti sull'orbita più esterna sono detti elettroni di valenza, e sono quelli che rendono possibile la formazione di legami tra differenti atomi.

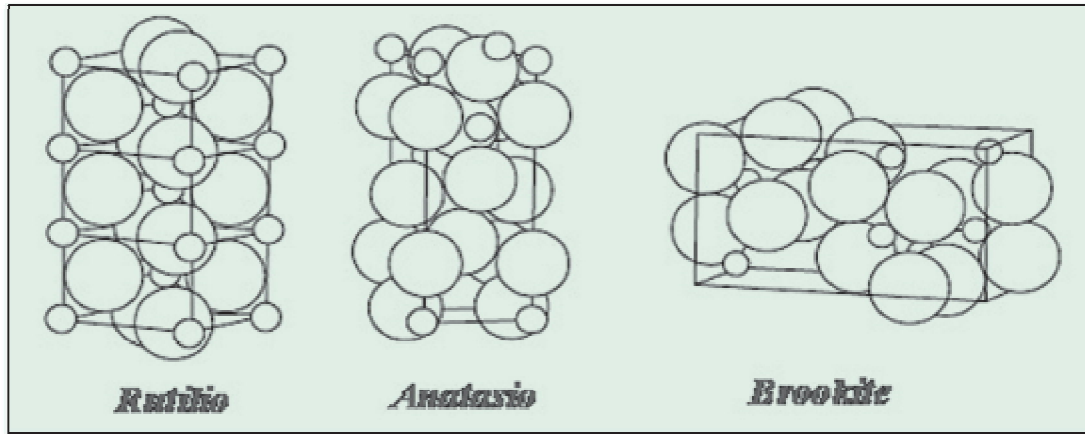


Figura 2 - le tre differenti strutture cristalline del Biossido di Titanio

Il range energetico all'interno del quale si trova una determinata orbita è detto "banda energetica", in particolare nel caso della banda occupata dagli elettroni di valenza (la banda più lontana dal nucleo) si parla di "banda di valenza". La banda successiva alla banda di valenza è detta "banda di conduzione" e il salto energetico tra la banda di valenza e la banda di conduzione si dice "band gap". L'energia necessaria agli elettroni di valenza per passare dalla banda di valenza alla banda di conduzione è detta "band-gap energy" e gli elettroni in grado di superare il band gap sono denominati "elettroni di conduzione". Solo gli elettroni di conduzione sono in grado di muoversi liberamente e di formare legami.

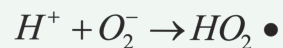
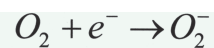
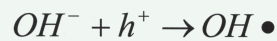
Quando il Biossido di Titanio, nell'isotopo del Rutile o dell'Anatasio, viene irradiato con luce di lunghezza d'onda pari a 413 nm (o inferiore) e 388 nm (o inferiore) gli elettroni di valenza passano alla banda di conduzione e simultaneamente si creano delle vacanze positive pari al numero di elettroni di conduzione. Generalmente lo stato eccitato di un semiconduttore è instabile cioè la configurazione elettronica tende a tornare allo stato iniziale; nel caso del Biossido di Titanio la configurazione elettronica rimane stabile per un tempo sensibilmente più lungo. Per questa ragione il Biossido di Titanio è considerato un ottimo fotocatalizzatore.

La ragione della miglior efficacia fotocatalitica dell'Anatasio è da ricercarsi alla differente posizione della banda di conduzione all'interno della struttura dei due isotopi che consente all'isotopo in oggetto di presentare una maggiore attività fotocatalitica rispetto al Rutile. [4]

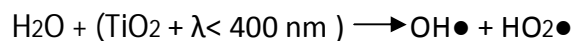
L' Anatasio presenta una migliore efficacia fotocatalitica e il range di lunghezza d'onda in corrispondenza del quale risulta fotoattivo è inferiore a circa 400 nm: questo comporta che solo il 4% della luce solare e lo 0,1% della luce generata da lampada a fluorescenza sia efficace nell'attivazione del foto catalizzatore. [2]

Le reazioni di degrado degli inquinanti che vengono a contatto con la superficie fotocatalitica in presenza di luce e aria sono legate alla formazione sulla superficie fotocatalitica di composti chimici altamente reattivi. Quando il Biossido di Titanio viene irradiato con luce di lunghezza d'onda opportuna si assiste alla formazione di due elettroni di conduzione e di due vacanze positive. Nei materiali ordinari le due cariche positive e le due cariche negative tendono a ricombinarsi velocemente mentre nel TiO₂ il processo di ricombinazione avviene molto più lentamente.

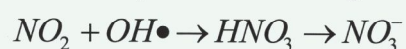
La superficie del TiO₂ contiene acqua adsorbita che viene ossidata dalle vacanze positive fornendo radicali OH⁻, elementi dotati di un fortissimo potere ossidante e, allo stesso tempo, la riduzione dell'ossigeno presente in atmosfera porta alla formazione di ioni O₂⁻ secondo le reazioni chimiche:



Nel complesso:

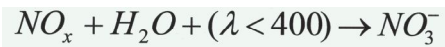


Con riferimento al caso degli Ossidi di Azoto (NO_x) le due specie così formatesi, radicale idrossido e idroperossido, risultano essere altamente reattive, portando alla formazione di acido nitrico, secondo le reazioni:



Il Biossido di Azoto viene trasformato in acido nitrico. Il materiale di supporto al fotocatalizzatore viene scelto in modo che presenti adeguata porosità e caratteristiche alcaline, l'acido nitrico,

trovandosi in ambiente alcalino, viene adsorbito in modo irreversibile sulla superficie ormandosi in ioni nitrato. La reazione complessiva avvenuta sulla superficie è del tipo:



per cui un elemento altamente inquinante è stato ridotto a una sostanza innocua, solubile e non inquinante. [4]

Quindi l'impiego dei materiali fotocatalitici favorisce la degradazione degli Ossidi di Azoto in nitrati (NO_3^-), elementi facilmente dilavati dalle acque meteoriche o di lavaggio e, in ragione delle piccole concentrazioni, privi di un significativo impatto sulle qualità delle acque stesse. Il fotocatalizzatore favorisce lo svolgersi delle reazioni chimiche di degrado degli inquinanti ma non è in alcun modo consumato e quindi il processo chimico è idealmente illimitato. [2]

Il problema della durabilità dell'effetto anti-smog delle superfici fotocatalitiche è connesso al loro progressivo sporcamento: lo sporco e i prodotti stessi delle reazioni di ossidazione degli inquinanti si depositano sulla superficie inibendo le reazioni connesse alla fotocatalisi. Numerose analisi hanno mostrato come il fenomeno non sia irreversibile ma che l'azione fotocatalitica possa essere ripristinata in modo efficace per mezzo del lavaggio della superficie e quindi tramite l'asportazione dei prodotti della fotocatalisi e dello sporco accumulatisi sul materiale.

Il grafico seguente mostra come il lavaggio della superficie fotovoltaica di tipo cementizio riporti la capacità fotocatalitica a livelli prossimi a quello corrispondente alla superficie nuova: [5]

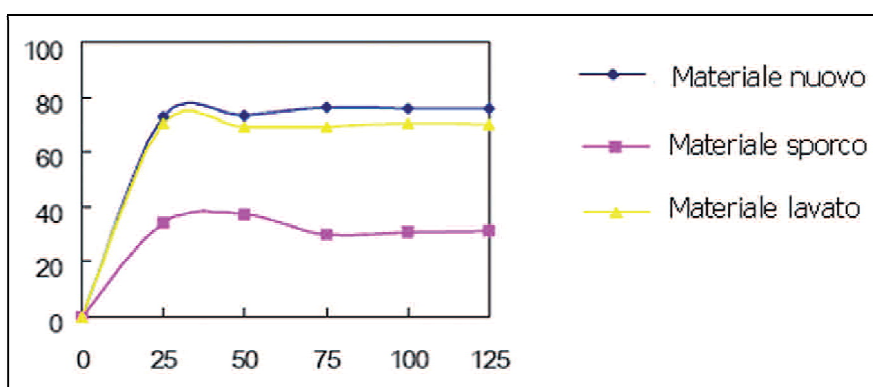


Figura 3 - ripristino dell'attività fotocatalitica tramite lavaggio della superficie

In riferimento alle condizioni di applicazione dei materiali fotocatalitici si può intuire come in un contesto outdoor l'efficienza fotocatalitica del materiale sia naturalmente ripristinata dalle

precipitazioni atmosferiche e dagli eventuali lavaggi periodici, come ad esempio nel caso delle pavimentazioni.

Occorre poi tener presente che la resa dell'attività foto catalitica è influenzata dai seguenti parametri:[6]

- Dosaggio del fotocatalizzatore: la resa delle reazioni chimiche connesse al processo di fotocatalisi si può considerare proporzionale alla concentrazione di fotocatalizzatore sulla superficie;
- Tipologia del Biossido di Titanio;
- Concentrazione iniziale dell'elemento inquinante considerato: il rendimento della degradazione delle sostanze presenta un comportamento del tipo 'a saturazione', cioè il rendimento decresce in modo costante all'aumentare della concentrazione iniziale di inquinante;
- Intensità radiazioni UV: si è riscontrata l'indipendenza del risultato dalle variazioni del flusso radiante all'interno del range tra $10 W/m^2$ e $20 W/m^2$;
- Temperatura: è stato rilevato che variazioni del parametro all'interno di un range di valori tra $20^\circ C$ e $75^\circ C$ non risultano essere correlate a variazioni significative della resa delle reazioni della fotocatalisi;
- Flusso d'aria circolante: la portata del flusso in ingresso influenza fortemente l'attività;
- Umidità dell'aria circostante.

Anche in Italia la ricerca sulla fotocatalisi risulta essere molto attiva. Nel corso di questi ultimi anni, infatti, l'interesse scientifico ed ingegneristico sull'applicazione della fotocatalisi allo studio dei materiali semiconduttori è risultato cresciuto altrettanto esponenzialmente, rispetto al resto del mondo, cercando di trovare la soluzione per le esigenze più pratiche. I prodotti fotocatalitici in grado di abbattere l'inquinamento atmosferico sono rientrati nelle **"Linee Guida per l'utilizzo di sistemi innovativi finalizzati alla prevenzione e riduzione dell'inquinamento ambientale"** indicate dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio con decreto ministeriale del 1 aprile 2004 in attuazione della legge 16 gennaio 2004 nr. 045. L'elenco dei Sistemi e delle Tecnologie innovative, redatto dal Ministero dell'Ambiente, riporta infatti con il Codice ST001, i materiali fotocatalitici: "malte, pavimentazioni, pitture, intonaci e rivestimenti contenenti sostanze fotocatalitiche con biossido di titanio per la riduzione di ossidi di azoto, VOC, batteri e di altri inquinanti atmosferici".

2.2. PURIFICAZIONE DELL'ARIA

I meccanismi di fotocatalisi conferiscono ai materiali contenenti Biossido di Titanio diverse proprietà, le più importanti sono: [3]

- Purificazione dell'aria;
- Azione deodorante;
- Azione antimicrobica;
- Azione antinebbia, materiali autopulenti.

Concentrandoci sull'azione di purificazione dell'aria con l'utilizzo del Biossido di Titanio si ottiene una concreta riduzione delle sostanze organiche e inorganiche provenienti dall'attività umana, da fabbriche, da automobili, da riscaldamento domestico.

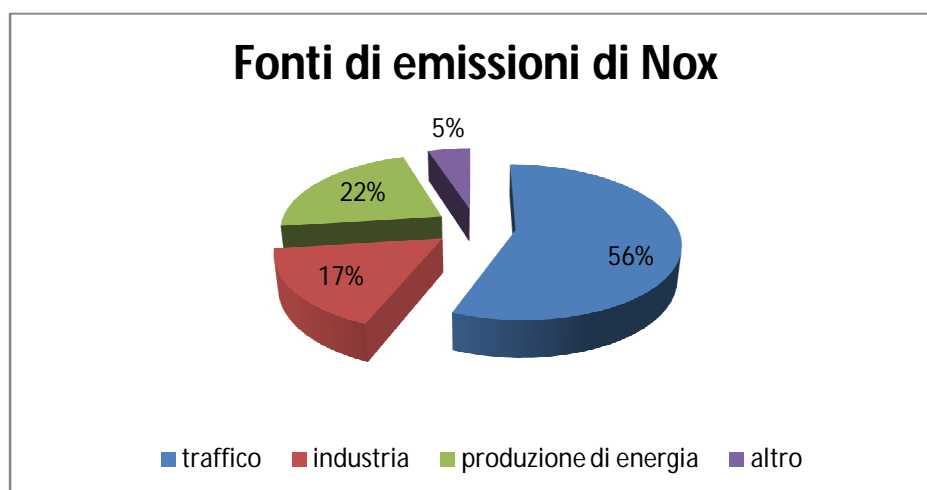


Figura 4 - fonti di emissione di NOX [4]

Durante le innumerevoli prove di laboratorio effettuate sono stati utilizzati come elementi indicativi della capacità del materiale di ridurre le concentrazioni di inquinanti in aria gli Ossidi di Azoto, monossido (NO) e biossido (NO₂) questi, indicati come NOx, si formano da tutti i processi di combustione che avvengono ad alta temperatura.

Analizzando le prove effettuate su strati di [7]:

- TiO_2 mescolato con cemento (5% del peso del cemento);
- Miscela di cemento senza foto catalizzatore.

Analizzando i risultati delle prove effettuate al buio si osserva una parziale riduzione degli NO_x dovuta all'assorbimento e non a fenomeni di fotocatalisi del TiO_2 , tale assorbimento è attribuito all'abilità degli ossidi alcalini di assorbire NO_x .

Le prove fotochimiche sono state eseguite sottoponendo i provini a sette ore di luce, la diminuzione di NO_x è maggiore nel provino con miscela di TiO_2 e cemento rispetto alla miscela di cemento senza fotocatalizzatore dove comunque si riscontra un certo effetto catalitico, probabilmente per la presenza di ossidi nella miscela stessa.[3]

2.3. IMPATTO AMBIENTALE DELLA REAZIONE CHIMICA

Poiché in natura nulla si crea e nulla si distrugge, anche la reazione fotocatalitica presenta dei residui che derivano dalla sua azione ossidante. Generalmente i composti che derivano dalla trasformazione degli inquinanti sono Sali minerali e calcare, prodotti in quantità minima (parti per miliardo) invisibili e innocui.

Il CNR ha voluto comunque valutare le caratteristiche dei residui ambientali che verrebbero a crearsi dalla trasformazione degli inquinanti più frequenti e più pericolosi contenuti nell'aria che respiriamo.

Biossido di azoto

La degradazione del biossido di azoto forma essenzialmente nitrati solubili in acqua e, eventualmente nitriti. La quantità formata di queste specie è molto contenuta per cui esse non costituiscono problema per le acque dilavate. Nel caso di manufatti non esposti, le molecole di nitrato di calcio, risultanti dalla reazione di fotoossidazione, rimangono nella superficie fotocatalitica come sostanze inerti.

Formaldeide

La formaldeide viene degradata a monossido di carbonio oppure a biossido di carbonio. Causa la concentrazione relativamente bassa di formaldeide, anche le concentrazioni dei prodotti formati

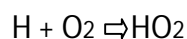
saranno molto basse ed inferiori di circa 100 volte a quelle normalmente presenti nell'ambiente. L'eventuale ossidazione di formaldeide porterebbe alla formazione di biossido di carbonio ed a tracce di acido formico che sarebbero comunque assorbite dal substrato alcalino della superficie fotocatalitica.

Biossido di Zolfo

Il biossido di zolfo viene ossidato ad acido solforico, a sua volta immediatamente adsorbito dal substrato alcalino della superficie fotocatalitica. Il risultato è la formazione di solfato di calcio, debolmente solubile in acqua. Il solfato di calcio, comunemente conosciuto come gesso, non costituisce problema per l'ambiente.

Monossido di carbonio

L'ossidazione del monossido di carbonio porta alla formazione di biossido di carbonio, sostanza praticamente inerte. Il monossido di carbonio potrebbe anche essere ossidato dai radicali OH portando alla formazione di radicali idrogeno (H). Tali radicali reagiscono velocemente con l'Ossigeno dell'aria formando radicali idroperossido:



Quest'ultimo radicale possiede proprietà ossidanti molto più spiccate del radicale OH, per cui il monossido di carbonio potrebbe amplificare le proprietà ossidanti della superficie fotocatalitica con evidente aumento della sua capacità depurativa.

Benzene

La degradazione di benzene su superfici fotocatalitiche procede a velocità molto basse stante la scarsa reattività del benzene verso il radicale OH. Le molecole ossidate possono comunque trasformarsi in composti più semplici quali aldeidi od acidi bivalenti che non portano a nessun effetto ambientale. In alternativa, si può ipotizzare che il Benzene possa addizionare radicali OH e trasformarsi quindi in fenolo, sostanza questa solubile in acqua e comunque di scarso interesse ambientale a causa delle basse concentrazioni risultanti.

Particolato

L'evoluzione del particolato sulle superfici fotocatalitiche è ancora oggetto di speculazione scientifica. Con ogni probabilità le particelle che costituiscono il particolato atmosferico vengono attratte sulla superficie a causa della presenza di cariche libere. Una volta sulla superficie, le particelle potrebbero reagire con i radicali liberi o con molecole di acqua e di ossigeno,

degradandosi a sostanze organiche ossigenate solubili in acqua. La parte inorganica, costituita da composti già ampiamente ossidati, non dovrebbe invece alterarsi.

Possiamo quindi dedurre che i residui della fotocatalisi possono essere ritenuti assolutamente trascurabili.

2.4. APPLICAZIONI

La fotocatalisi dà un'opportunità eccezionale allo sviluppo di applicazioni pratiche che possano essere in grado di inserirsi nel contesto di tutti i giorni. Dalle prime timide applicazioni giapponesi di massetti autobloccanti fotocatalitici per pavimentazione, siamo arrivati oggi a prevedere una serie lunghissima di prodotti che utilizzano il concetto della fotocatalisi per migliorare l'ambiente in cui viviamo, e nel contempo essere compatibili con le necessità e lo stile del mondo moderno. Considerando gli innumerevoli materiali dei quali è composta un'architettura è facile comprendere come l'attenzione dei produttori di materiali fotocatalitici si sia estesa non solo ai cementi in Biossido di Titanio ma anche a altri materiali che compongono un edificio allo scopo di conferire aspetti autopulenti e antinquinamento al maggior numero possibile di materiali in modo tale da poter ottenere benefici estetici, economici e di confort ambientale.

2.4.1. CEMENTO FOTOCATALITICO

Gli studi condotti da alcune aziende italiane hanno permesso di sviluppare un cemento fotocatalitico consistente in un legame bianco con l'aggiunta di Biossido di Titanio (5-10%) prevalentemente sotto forma di anatasio [8] con taglia dei cristalli media di 20 nm ideale per la produzione di calcestruzzi che, oltre alle proprietà meccaniche solite, sono in grado di garantire alte prestazioni estetiche e caratteristiche antinquinamento dalla fotocatalisi del Biossido di Titanio in esso contenute.

Con lo stesso cemento è possibile realizzare anche malte ed intonaci che possono essere utilizzati come rivestimento superficiale allo scopo di conferire proprietà autopulenti, antinquinanti, antibatterici alle superfici sulle quali si applicano. Sono prodotti premiscelati in polvere composti da calce, cemento fotocatalitico, inerti calcarei e quarzo in granulometria selezionata e additivi

speciali. Pronti all'uso, si mescolano con acqua e si applicano come i normali intonaci. Secondo la granulometria dell'inerte possono essere fini o grossi.

Le caratteristiche principali dei materiali ottenuti con il cemento fotocatalitico sono essenzialmente due:

- Capacità di mantenimento della colorazione iniziale ("auto pulitura");
- Capacità di ridurre gli inquinanti organici e inorganici nell'aria circostante.

L'assorbimento della luce UV da parte del TiO_2 incorporato comporta la sua foto attivazione e la conseguente degradazione degli inquinanti come NO e NO_2 , assorbiti nelle particelle e trasformati in acido nitrico (HNO_3). La pioggia allontana l'acido nitrico come ioni nitrati innocui.

I materiali contenenti il cemento fotocatalitico aumentano le proprietà di antinquinamento grazie alle turbolenze dell'aria che trasportano in continuazione NO_x e altri composti volatili e semivolatili sulle superfici degli edifici. [3]

Le applicazioni di cementi e intonaci fotocatalitici alle strutture sono molteplici. Una delle più interessanti riguarda il trattamento delle volte dei tunnel stradali: essendo i tunnel spesso aperti anche al traffico pedonale la qualità dell'aria al loro interno e il mantenimento di un grado di pulizia adeguato sono elementi che devono essere tenuti in considerazione. [2] la mancanza di luce solare all'interno pone la necessità di dotare i tunnel di apparati di illuminazione in grado di fornire una luce con lunghezza d'onda necessaria all'attivazione dei processi di fotocatalisi.

Una delle prime applicazioni di cemento fotocatalitico in Italia risale al 1996 alla Chiesa "Dives in Misericordia" a Roma nel quartiere Tor Tre Teste. Le superfici trattate col prodotto fotocatalitico hanno mantenuto inalterata, a distanza di anni, la colorazione bianca. [9]



Figura 5 - Dives in Misericordia, Roma.

2.4.2. VETRO FOTOCATALITICO

Lo studio del TiO_2 ha consentito lo sviluppo di vari prodotti capaci di eliminare l'acqua ed i depositi di materiale organico e inorganico dalla superficie del vetro. I risultati delle prove condotte hanno evidenziato come i vetri rivestiti di Biossido di Titanio avessero in sostanza le seguenti proprietà:

- Anti-appannamento: per i vetri non rivestiti di TiO_2 , se l'aria umida viene a contatto con il vetro, si formano delle piccole gocce d'acqua e il vetro si appanna, cosa che non accade se il vetro è rivestito con Biossido di Titanio;
- Autopulente, caratteristica duale con quella di antiappannamento;
- Antinquinamento, dato l'elevato potere fotocatalitico del rivestimento fotocatalitico in biossido di Titanio.

2.4.3. RIVESTIMENTI FOTOCATALITICI INTERNI ED ESTERNI

I materiali attualmente commercializzati in Italia per il rivestimento di superfici orizzontali e verticali, interne, esterne possono essere racchiusi nelle seguenti tre categorie:

- Idropitture fotocatalitiche;
- Intonacati fotocatalitici;
- Pavimentazioni fotocatalitiche.

L'applicazione di rivestimenti fotocatalitici esterni degli edifici è la più diffusa, tali applicazioni comprendono sia edifici privati che pubblici.

Un esempio è dato dalla stazione di San Ruffillo a Bologna in cui è stato utilizzato un rivestimento con pittura fotocatalitica.



Figura 6 - Stazione di S. Ruffillo, Bologna

2.4.3.1. 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, 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, le principali difficoltà riscontrate sono connesse alla necessità di mettere a punto una miscela tale da costituire un efficace interlayer di separazione. Il materiale fotocatalitico può essere applicato a freddo, su pavimentazione nuova o esistente, o a caldo, con successiva rullatura della superficie trattata. [10]



Figura 7 - Applicazione in sito di materiali fotocatalitici tramite spruzzatura

Le pavimentazioni che prevedono invece l'applicazione del biossido di titanio per mezzo di una matrice cementizia possono essere distinte in tre tipologie:

- Applicazione superficiale: nel caso di zone destinate al transito dei veicoli ha mostrato una sostanziale inefficienza venendo rapidamente asportata a causa dell'azione abrasiva esercitata dai pneumatici, mentre le applicazioni sperimentali a piste ciclabili e marciapiedi hanno mostrato una maggiore durabilità;
- Pavimentazioni bituminose parzialmente intasate con malta cementizia fotocatalitica: sono state condotte numerose applicazioni riguardanti pavimentazioni urbane interessate sia da flussi di traffico di intensità moderata sia da flussi di traffici intensi. In questo caso lo strato di malta non assolve nessun ruolo strutturale ma si limita ad attribuire alla pavimentazione una funzione foto catalitica;

Pavimentazioni miste in bitume e malta cementizia fotocatalitica che lo intasa completamente: le analisi condotte hanno mostrato la necessità di limitare il contenuto di fotocatalizzatore al di sotto di una determinata soglia per consentire il mantenimento di adeguate caratteristiche della miscela cementizia e di performance ottimali. Per quanto riguarda la capacità di ridurre le concentrazioni di inquinanti questa tipologia ha mostrato risultati analoghi alle altre tecnologie. [2] La pavimentazione fotocatalitica che combina bitume e cemento è costituita da

un conglomerato bituminoso caratterizzato da un alto volume di vuoti, intasato con una malta cementizia molto fluida a cui è aggiunto del biossido di titanio.



Figura 8 - applicazione in sito di materiali fotocatalitici con malte cementizie fotocatalitiche

2.5. RICERCHE CONDOTTE

Numerosi sono, ad oggi, gli esperimenti svolti anche in vera grandezza, questi riguardano sia pavimentazioni spruzzate superficialmente con materiali fotocatalitici non cementizi che pavimentazioni parzialmente intasate con malte cementizie fotocatalitiche costituite da differenti miscele; tali applicazioni comprendono sia ambiti urbani che extraurbani, aree aperte e canyon stradali.

Una delle prime realizzazioni di pavimentazione fotocatalitica è stata messa in opera a Segrate, vicino Milano. La sede stradale interessata dall'applicazione comprende un'area di circa 6.000 mq distribuiti tra due vie a doppio senso di marcia e comprensive di area laterale per il parcheggio. La realizzazione comprende non solo la pavimentazione stradale ma anche la pista ciclabile.

Le fasi realizzative previste per la messa in opera della pavimentazione fotocatalitica prevedono la fresatura dello strato di usura e la stesa dello strato bituminoso open grade adatto ad accogliere la

malta fotocatalitica. Il tappeto bituminoso viene compattato in modo adeguato, in genere un passaggio vibrato oltre la lisciatura, in modo da ottenere un tenore di vuoti idoneo all'applicazione successiva della malta.

L'applicazione della malta è stata effettuata in seguito al raffreddamento a una temperatura della pavimentazione di circa 30°C, per non accelerare la presa della malta ostacolando la corretta percolazione nel supporto bituminoso. Alla stesa fa seguito la lavorazione superficiale con raclee allo scopo di favorire la penetrazione della malta all'interno del conglomerato e di distribuire gli eccessi di malta in modo uniforme sulla superficie, la profondità di intasamento ottimale è fissata a circa 1 – 1,5 cm.

La stesa della malta è seguita da un periodo di maturazione di durata commisurata alle condizioni di umidità di temperatura e all'impiego o meno di acceleranti di presa e di indurimento, in base alle esigenze funzionali della viabilità interessata.

Per quanto concerne la pista ciclabile, questa è stata realizzata applicando uno spessore di 2 mm circa di malta foto catalitica pigmentata di rosso.

L'applicazione è stata nel tempo, monitorata dal punto di vista sia delle caratteristiche di performance della superficie sia dal punto di vista dell'efficacia ambientale dell'impiego di malta contenente biossido di titanio per la pavimentazione stradale.

Le misure relative alle caratteristiche di aderenza della pavimentazione sono state condotte al momento della posa in opera della malta fotocatalitica sulla superficie bituminosa e dopo circa un anno e mezzo dall'apertura al traffico della stessa. Le misure sono state condotte su una serie di punti, distribuiti in modo opportuno sulla pavimentazione lungo le traiettorie degli pneumatici, con Skid Tester. Come mostra il grafico sottostante, l'incremento dei valori della pavimentazione stradale fotocatalitica è dovuto al fenomeno di usura e di asportazione della pellicola più superficiale di malta ad opera dell'azione abrasiva dei pneumatici, quest'azione porta all'affioramento delle cuspidi dello strato bituminoso sottostante. [11]

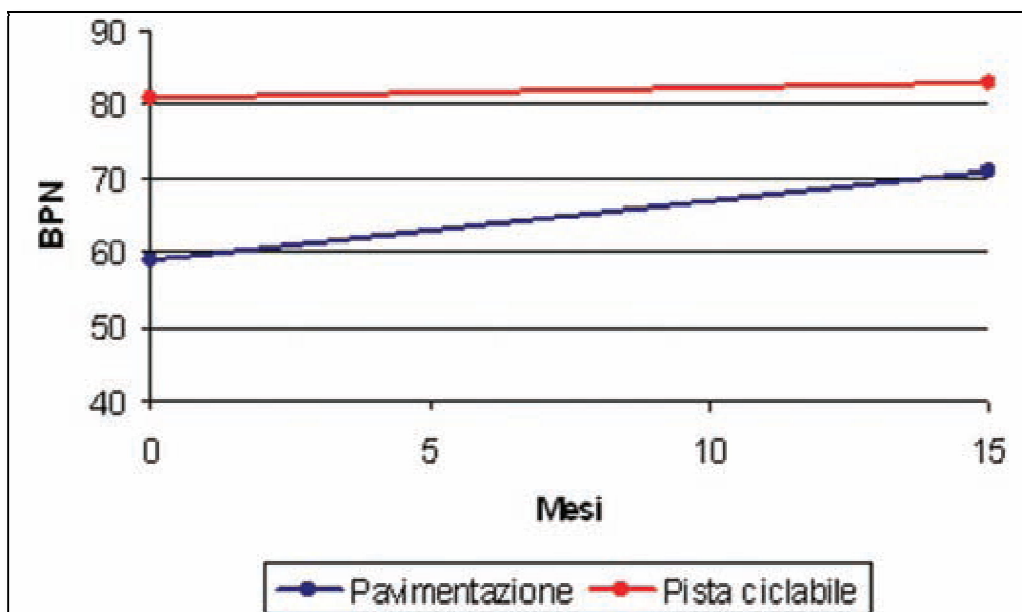


Figura 9 - caratteristiche di aderenza della pavimentazione di Segrate



Figura 10 - superficie di pavimentazione fotocatalitica usurata da pneumatici

Le analisi ambientali volte alla valutazione dell'effettiva capacità della pavimentazione nell'abbattimento delle concentrazioni di sostanze inquinanti sono state condotte parallelamente sulla strada trattata con malta fotocatalitica e su una strada adiacente presentante caratteristiche di traffico del tutto paragonabili alla prima, lo stesso giorno nello stesso periodo di tempo in modo da ottenere condizioni al contorno del tutto simili. Le misurazioni effettuate hanno interessato monossido di carbonio (CO), di biossido di azoto (NO₂) e di biossido di zolfo (SO₂): i risultati

ottenuti hanno evidenziato concentrazioni di inquinanti ridotte in corrispondenza della pavimentazione fotocatalitica rispetto alla pavimentazione tradizionale.

Sempre nell'ambito dell'attività di ricerca del Politecnico di Milano sono state effettuate svariate sperimentazioni con miscele cementizie differenti. Riportiamo qui i risultati ottenuti da tre campi di prova: un primo campo ha evidenziato alcune criticità della miscela utilizzata, un secondo ha portato alla sperimentazione della medesima miscela ottimizzata e di trattamenti per il miglioramento delle caratteristiche superficiali ed infine un terzo campo di prova ha sperimentato una seconda miscela per la determinazione delle caratteristiche superficiali e della capacità di ridurre le concentrazioni di Ossido di Azoto.

Il primo campo prove, che riguardava una pavimentazione interessata da un'intensità di traffico medio-alta composta in prevalenza da auto e macchine commerciali, ha evidenziato caratteristiche estremamente disuniformi della pavimentazione, inoltre i campioni estratti hanno evidenziato un grado di penetrazione della malta non uniforme. Da qui la necessità di ottimizzare al malta.[2]

Di qui, il secondo campo prove presso l'area del Politecnico di Milano nel comune di Carpiano (MI) all'interno di un polo industriale interessato da un livello di traffico elevato. Il metodo di prova si basava sull'applicazione della graniglia sulla superficie immediatamente dopo la stesa della malta. Il campo prove è stato caratterizzato dalla sperimentazione di tre differenti quantità di graniglia applicata alla pavimentazione. Il monitoraggio della pavimentazione ha mostrato la necessità di contenere la quantità di graniglia per evitare problemi connessi all'eccessiva scabrezza superficiale. Per la misura dell'attività fotocatalitica sono stati estratti dei campioni che, sottoposti a prove di laboratorio, hanno evidenziato una riduzione delle concentrazioni degli NOx del 7,5%. [2]

Il terzo campo prove ha previsto l'impiego di una seconda miscela fotocatalitica. In questo caso la pavimentazione non era interessata dal traffico veicolare. Sono stati estratti dei campioni da sottoporre a test di laboratorio per la capacità di degradare gli Ossidi di Azoto in aria: si ottenuto un valor medio di abbattimento percentuale pari a 9,7%. [2]

Sempre nell'ambito del Politecnico di Milano si riporta l'analisi sperimentale condotta da Da Rios G., Lambrugo S., Bacchi M presso il laboratorio sperimentale stradale del DIAR. Questo esperimento 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.

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,
- Tipo C: anatasio drogato con carbonio.

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 [12,13]. 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 [14,15]. In sintesi, le miscele di malta fotocatalitica impiegate nel confezionamento dei provini oggetto di analisi sono riportate nella tabella sottostante (le percentuali sono riferite alla quantità di malta di cemento in peso).

	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

Figura 11 - miscele di malta fotocatalitica oggetto di analisi

I provini da impiegarsi nelle analisi sono stati confezionati con conglomerato bituminoso e poi compattati con pressa giratoria in modo da ottenere un tenore di vuoti mediamente del 27% ed infine completamente intasati con le differenti miscele cementizie.

La misura della capacità fotocatalitica delle differenti miscele di malta cementizia 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, 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 NOx, ad umidità controllata [50% ± 10], un analizzatore a chemiluminescenza preleva un flusso costante di fluido dalla camera di reazione misurandone la concentrazione di NOx. 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 NOx 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.

Tramite l'analizzatore a chemiluminescenza sono state rilevate le concentrazioni di NOx ad intervalli di dieci minuti. Nella figura sottostante si mostrano i risultati ottenuti:

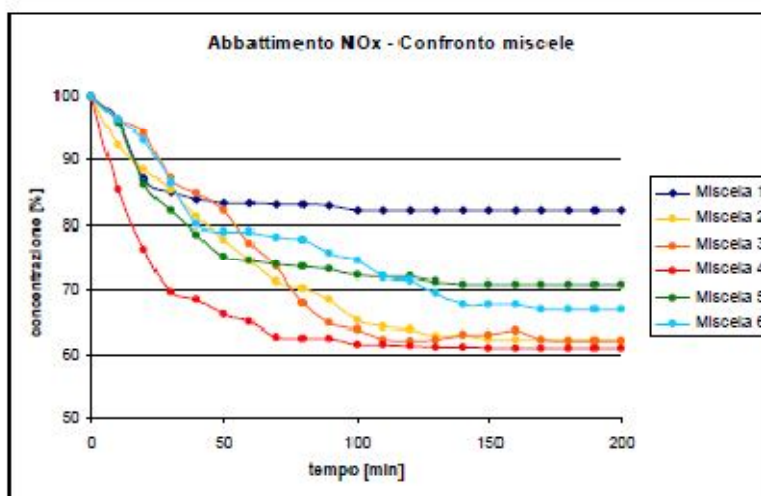


Figura 12 - confronto tra l'abbattimento percentuale delle diverse miscele

Figura 13 - confronto tra l'abbattimento percentuale delle diverse miscele

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.

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. I risultati sono riassunti nella tabella sottostante.

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

Figura 14 - abbattimento percentuale di NOx delle miscele analizzate

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. [10]

E' interessante ricordare anche i risultati ottenuti dal programma sperimentale sviluppato dall'Università Politecnica delle Marche.

Il tronco pilota interessato dalla sperimentazione si estende per 550 m circa con una tipica configurazione "a canyon" estremamente problematica dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico. La lavorazione ha previsto il rifacimento degli strati superficiali della pavimentazione, previa fresatura di quelli attualmente in opera. In particolare nel tratto in esame è stato realizzato uno strato di usura in conglomerato bituminoso aperto dello spessore di 40 mm, con volume dei vuoti residui pari a circa il 20%, al fine di favorire la successiva applicazione dei prodotti fotocatalitici. Il tronco sperimentale è stato successivamente suddiviso in 2 parti in ognuna delle quali è stato applicato un particolare prodotto fotocatalitico. Nella prima, la malta cementizia fotocatalitica è stata stesa in maniera tale da ricoprire la superficie di conglomerato bituminoso drenante e da intasarne parzialmente i vuoti. Per la preparazione dell'impasto è stato necessario aggiungere al pre-miscelato in polvere acqua in quantità del 30% in peso. In tal modo si è ottenuta la fluidità adatta per la corretta penetrazione della malta all'interno della pavimentazione per uno spessore di circa 10÷20 mm. Nel secondo tratto, il prodotto fotocatalitico liquido è stato spruzzato a freddo direttamente sulla superficie stradale pulita ed asciutta.

Per la valutazione dell'efficacia dei trattamenti fotocatalitici, sono state effettuate sia delle indagini sperimentali in sito, tramite centralina ambientale fissa sia test di laboratorio.

Lo studio in sito ha riguardato il monitoraggio nel tempo delle concentrazioni di alcuni dei maggiori inquinanti presenti in atmosfera (PM10, NO₂, NO_x, NO e CO) mentre l'indagine di laboratorio ha previsto l'esecuzione di prove per la valutazione della reattività fotocatalitica dei campioni esaminati nei confronti della rimozione degli ossidi di azoto. Tali prove sono state effettuate su 3 diversi provini cilindrici (con trattamento a malta, con trattamento a spruzzo, non trattato). I provini sono stati inseriti all'interno di un denuder piatto, (contenitore di polietilene sulla cui superficie è posta una lastra di quarzo). All'interno del dispositivo viene fatta passare una miscela d'aria e inquinante, in concentrazione nota, a velocità tale che il moto del fluido si mantenga laminare. Nel corso della prova, attraverso apposito coperchio in vetro, è stato sottoposta la superficie del campione testato ad irraggiamento luminoso di intensità nota. Il calcolo della variazione di concentrazione del gas che attraversa il denuder piatto viene effettuato misurando la concentrazione stessa del gas in entrata ed in uscita dal denuder tramite appositi analizzatori a chemiluminescenza. Tutte le prove sono state condotte con un tasso di umidità relativa costante (pari al 40%) e facendo variare le condizioni di flusso d'aria (0,5 – 1,0 – 1,5 l/min). I risultati delle prove in sito hanno mostrato, per quanto concerne il trattamento fotocatalitico a base cementizia, di non limitare affatto le concentrazioni di PM10; si riscontra, invece, un leggero miglioramento della situazione degli NO_x solo relativamente al primo monitoraggio effettuato dopo 1 mese e nei riguardi dei soli valori massimo e medio. Si potrebbe concludere quindi che il contributo della malta fotocatalitica ha interessato i valori di picco di inquinamento andando a smorzare, poi, anche quelle che sono le concentrazioni medie del periodo stesso. Tale effetto benefico appare quindi limitato solo alle prime fasi di esercizio della pavimentazione, cioè con usura limitata della malta fotocatalitica e, probabilmente, con superficie non ancora saturata dai prodotti delle reazioni ossidanti. I risultati ottenuti dal monitoraggio delle concentrazioni di monossido di carbonio (CO), sembrano invece mostrare chiaramente un beneficio sostanziale, sia nel breve che nel medio periodo derivante dal trattamento cementizio fotocatalitico.

Per quanto riguarda il trattamento liquido fotocatalitico a spruzzo si sono ottenuti risultati analoghi alla malta cementizia ad eccezione del fatto che in questo caso NO e NO₂ presentano una differenza rispetto all'NO_x. Essi infatti evidenziano un miglioramento nel breve periodo anche nei riguardi del valore minimo.

Analizzando i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio si nota sul campione di conglomerato bituminoso drenante non trattato un notevole abbattimento delle concentrazioni di NO₂ in uscita dal denuder piatto. Tale abbattimento è quantificabile in circa il 74% della concentrazione in

entrata. Tale ottimo risultato è con tutta probabilità dovuto all'alto sviluppo superficiale ed agli elevati vuoti intergranulari del provino testato. Ulteriore risultato rimarcabile è la assoluta indifferenza del sistema alla accensione della lampada a raggi UV stante l'assenza di materiale fotocatalitico. Ciò che varia è invece la concentrazione di NO che subisce un incremento all'atto dell'accensione della lampada salvo poi attestarsi nuovamente sui valori precedenti una volta cessata l'irradiazione. Dalla analisi delle prove condotte con flussi di aria superiori sul medesimo materiale, è stato invece osservato che l'abbattimento di NO₂ si riduce drasticamente attestandosi nell'intorno di un 10%. Tale evidenza sperimentale è dovuta probabilmente alle maggiori turbolenze del moto dell'aria.

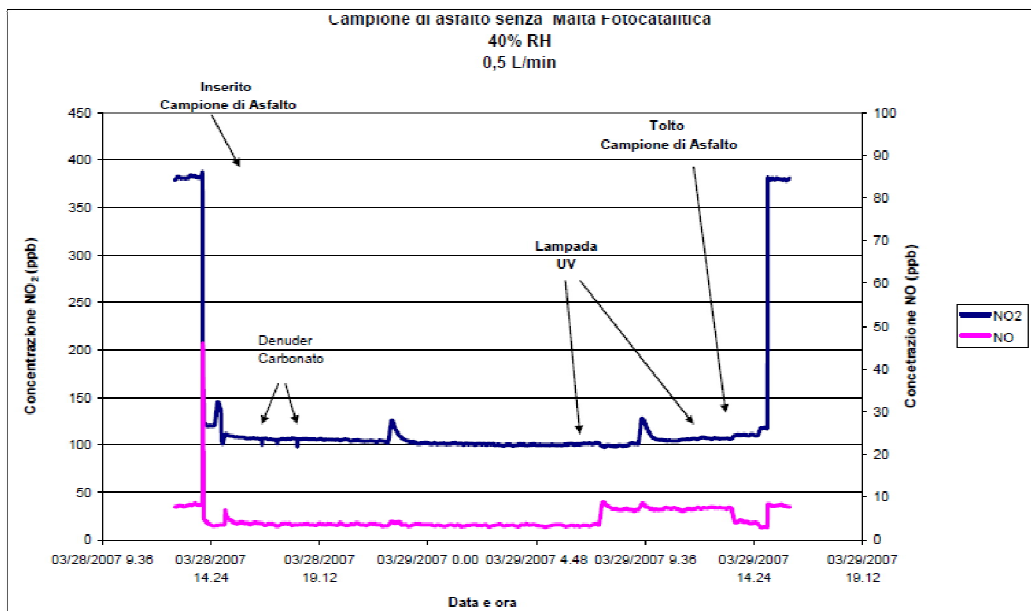


Figura 15 - risultati ottenuti sul provino non trattato

Analizzando invece i risultati ottenuti sul provino trattato con malta fotocatalitica, considerando un flusso d'aria pari a 0,5 l/min, si osserva, anche in assenza di radiazione luminosa, un abbattimento della concentrazione di NO₂ pari a circa il 47%. Una volta accesa la lampada UV tale concentrazione si abbatte ulteriormente fino a raggiungere una riduzione percentuale dovuta alla sola reattività fotocatalitica pari ad un ulteriore 48%.

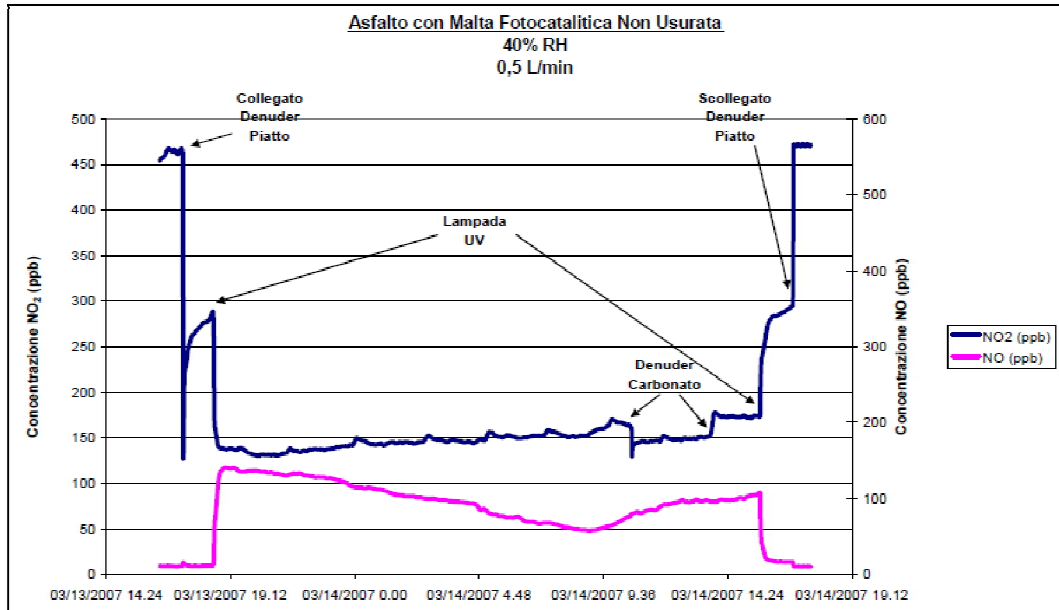


Figura 16 - test di laboratorio malta cementizia

Tuttavia, è opportuno evidenziare come, parallelamente all'abbattimento di NO₂, vi sia un innalzamento marcato di monossido di azoto NO e acido nitroso HONO (non evidenziato nel grafico). Tali sostanze, una volta cessata la sorgente di irradiazione UV, si riconvertono immediatamente in NO₂ il quale ritorna ai livelli precedenti. Questo comportamento farebbe pensare che nel computo totale degli ossidi di azoto (NO_x) la presenza di materiale fotocatalitico sottoposto a raggi UV apporti un beneficio limitato. Così come osservato in precedenza, poi, all'aumentare del flusso di aria diminuiscono gli abbattimenti di sostanza inquinante che si attestano tra il 10% ed il 20%, se non si considera l'apporto dei raggi UV, e che fa registrare abbattimenti ulteriori tra il 20% ed il 30% con lampada accesa. Anche in questo caso però, parallelamente alla riduzione di NO₂ si osservano incrementi di NO e HONO.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti su provini caratterizzati dal trattamento fotocatalitico a spruzzo con flussi di aria minimi (0,5 l/min) è possibile osservare un 30% circa di riduzione di biossido di azoto in assenza di radiazione luminosa esterna (figura 11). Con lampada accesa invece la riduzione sale fino al 43% grazie all'ulteriore riduzione di circa 60 ppb di inquinante.

Anche per gli altri flussi di aria si osservano i medesimi comportamenti ma le riduzioni registrate non sono affatto drastiche. Nel caso di flusso di aria pari a 1,5 l/min, per esempio, la reazione fotocatalitica pura produce appena 3-4 ppb di riduzione del gas analizzato, pari al 5% circa. Occorre di nuovo sottolineare come, durante l'esposizione ai raggi UV, parte dell'NO₂ sia

convertito in NO e HONO in maniera del tutto analoga a quanto osservato per la malta fotocatalitica. [16]

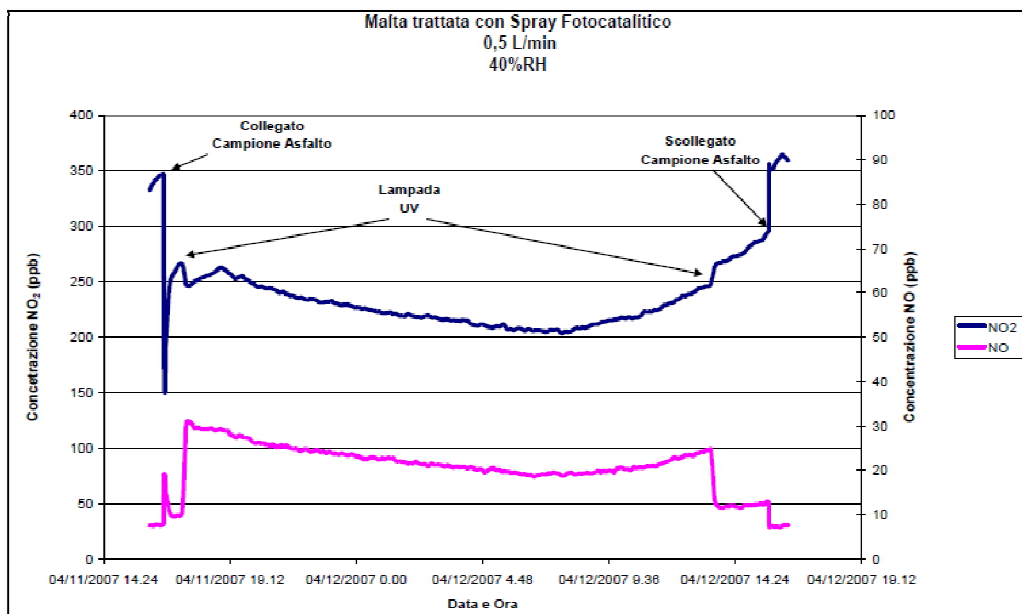


Figura 17 - test di laboratorio sul campione sottoposto a trattamento fotocatalitico a spruzzo

Per le altre prove effettuate sulla validità del TX Active, sia in ambito nazionale che internazionale, rimandiamo alla bibliografia.

3. IL PROTOCOLLO DI PROVA E L'ATTREZZATURA

3.1. PROTOCOLLO DI PROVA

In questo capitolo si vogliono presentare le modalità e le caratteristiche del campo prove, eseguito presso l'impresa BACCHI in collaborazione con ITALCEMENTI GROUP, sviluppate al fine di valutare il comportamento della malta cementizia fotocatalitica TX ACTIVE applicata a pavimentazioni stradali.

3.2. OBIETTIVO

Il seguente protocollo di prova descrive il metodo utilizzato per la determinazione dell'attività fotocatalitica di pavimentazioni stradali aventi caratteristiche fotocatalitiche, nell'ambito degli abbattimenti delle concentrazioni di Ossido di Azoto (Monossido di Azoto NO e Biossido di Azoto NO₂) in aria. Allo stesso tempo vengono descritte le prove effettuate, sia in sito che in laboratorio, al fine di determinare la rispondenza della pavimentazione fotocatalitica agli standard prestazionali definiti dalla normativa vigente.

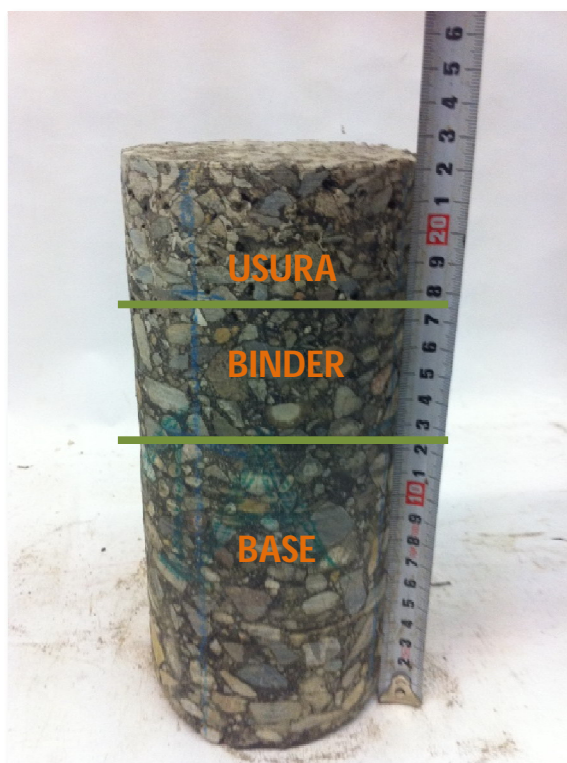
Verrà di seguito descritto il campo prove, l'attrezzatura di misura, le caratteristiche dei provini e dei parametri di prova al fine di produrre una metodologia di misura tale da garantire una riproducibilità.

3.3. DESCRIZIONE DEL CAMPO PROVE

Il campo prove è stato realizzato presso la zona industriale di Carpiano in collaborazione con l'impresa Bacchi e l'Italcementi Group. L'area interessata dall'intervento è caratterizzata da una striscia rettangolare di circa 45 m lunghezza x 3.70 m di larghezza. La lavorazione ha previsto il rifacimento della base, binder e usura della pavimentazione, per un totale di 21 cm, previa fresatura di quelli attualmente in opera. Il tronco sperimentale è stato successivamente diviso in tre parti, di 15 x 3.70 m ciascuna, in ognuna delle quali è stata adottata un particolare prodotto soluzione. Di seguito si riassumono le caratteristiche delle tre sezioni:

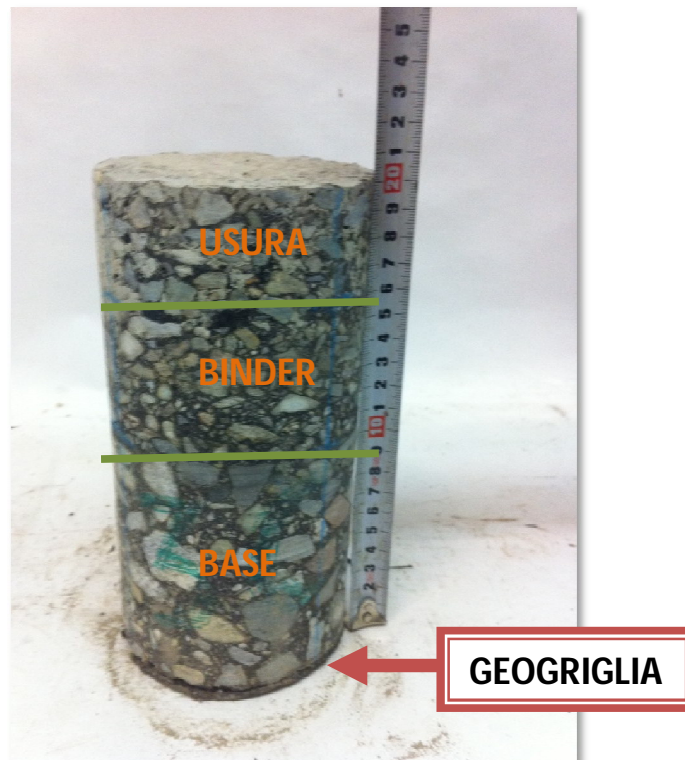
- Nella prima sezione, che di seguito chiameremo **area 1**, è stato realizzato un pacchetto di conglomerato bituminoso caratterizzato da:

- Base di 12 cm in bitume ordinario 50/70;
- Binder di 5 cm in conglomerato bituminoso con fibre;
- Usura di 4 cm in conglomerato bituminoso drenante successivamente intasato con malta foto catalitica TX percocem.



- Nella seconda sezione, che di seguito chiameremo **area 2**, è stato realizzato un pacchetto di conglomerato bituminoso caratterizzato da:
 - Base di 12 cm in bitume ordinario 50/70;
 - Binder di 5 cm in conglomerato bituminoso con fibre;
 - Usura di 4 cm in conglomerato bituminoso drenante successivamente intasato con malta foto catalitica, TX percocem, con espansivo.
- Nella terza sezione, che di seguito chiameremo **area 3**, è stato realizzato un pacchetto di conglomerato bituminoso caratterizzato da:
 - Base di 12 cm in bitume ordinario 50/70 con griglia PGM 100g/mq;
 - Binder di 5 cm in conglomerato bituminoso con fibre;

- Usura di 4 cm in conglomerato bituminoso drenante successivamente intasato con malta foto catalitica, TX percocem, con espansivo.



Le caratteristiche granulometriche e il contenuto dei vuoti, di ogni strato, saranno poi riportate in seguito in funzione dei risultati delle prove di laboratorio su campioni di materiale prelevato.

In tutte le aree la malta cementizia foto catalitica è stata stesa in modo tale da intasare lo strato di usura. Per la preparazione dell'impasto è stato necessario aggiungere al pre-miscelato in polvere acqua in quantità del 27% in peso. In modo tale si è ottenuta la fluidità adatta per la corretta penetrazione della malta all'interno della pavimentazione. La malta foto catalitica è stata applicata alla pavimentazione una volta raggiunta una temperatura superficiale (30°C) 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.

3.4. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

All'interno dell'UNI (l'Ente Nazionale Italiano di Unificazione) tre norme sono state pubblicate sui materiali cementizi fotocatalitici:

- UNI 11238-1. Determinazione dell'attività di degradazione catalitica di microinquinanti organici presenti nell'aria. Parte 1: materiali fotocatalitici cementizi.
- UNI 11247. Determinazione dell'attività di degradazione di ossidi di azoto da parte di materiali inorganici fotocatalitici.
- UNI 11259. Determinazione dell'attività fotocatalitica di leganti idraulici. Metodo di prova della rodammia.

Nella valutazione dell'attività fotocatalitica abbiamo fatto riferimento alla norma UNI 11247, la procedura di misura è la seguente:

1. Stabilizzazione. Il campione viene posto all'interno della camera di reazione con il flusso d'aria inquinata (1, 1,5, 3 l/min) e la lampada UV spenta. Questa fase dura circa 1 ora ed è necessario per uniformare i processi di assorbimento e garantire una concentrazione costante di NOX (cioè la stabilizzazione del flusso di gas) nel flusso di alimentazione del gas. Questo valore iniziale viene annotato come valore CB.
2. Irraggiamento. La lampada UV viene accesa e il sistema tende a uniformarsi in un certo periodo di tempo (di solito circa 1 ora). La concentrazione di equilibrio irradiata viene annotata come valore CL.
3. Ritorno. La lampada UV viene spenta e la concentrazione di NOX tende a tornare al valore iniziale.

Per quanto concerne la normativa di riferimento per l'esecuzione delle altre prove realizzate in laboratorio saranno riportate nei paragrafi inerenti le prove stesse.

3.5. CARATTERISTICHE DELL'APPARECCHIATURA DI PROVA

La misura dell'attività di materiali cementizi nell'abbattimento di ossidi di azoto (NO , NO_2) per via foto catalitica viene realizzata impiegando una metodologia analitica basata sulla chemiluminescenza. Le prove di fotoattività vengono eseguite su aria addizionata con NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) in modo tale da simulare un plausibile grado di inquinamento atmosferico.

L'apparato sperimentale è costituito dai seguenti componenti principali:

- Sorgente di Ossido di Azoto (bombola di NO ed NO_2 in N_2);
- Sorgente di Aria (estratta dall'ambiente di prova);
- Regolatori di flusso (flussimetri ad area variabile);
- Camera di controllo dell'umidità;
- Camera di reazione;
- Analizzatore a chemiluminescenza.

Per il trasferimento del gas vengono utilizzati tubi in politetrafluoroetilene o altro materiale idoneo con caratteristiche che non alterino la concentrazione di ossido di azoto.

Lo schema operativo è illustrato nella figura sottostante:

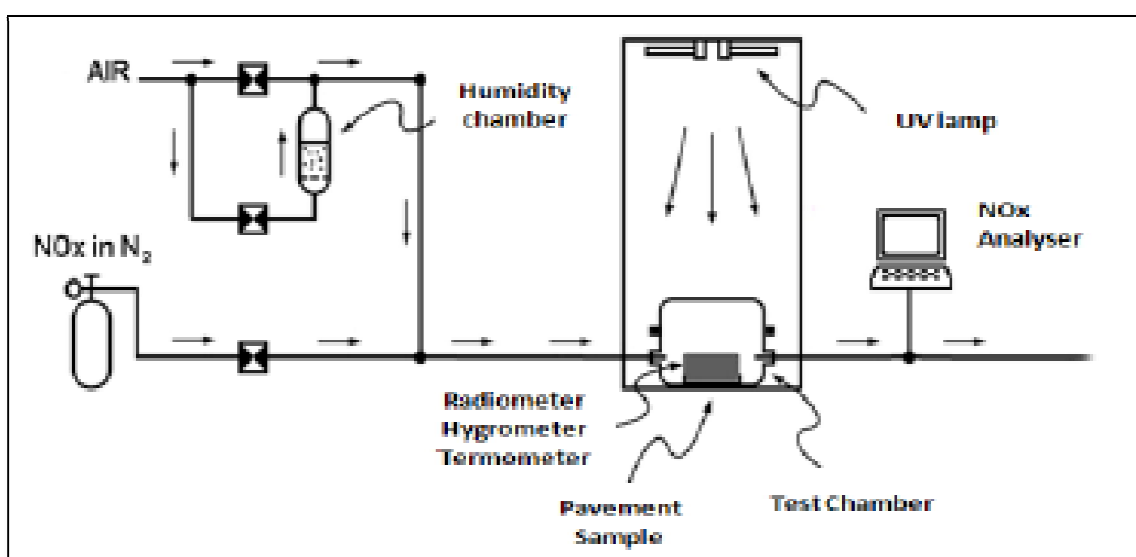


Figura 18 - schema apparecchiatura di prova

Con riferimento allo schema qui sopra riportato richiedono un commento specifico i seguenti componenti:

1. Sorgente di Ossido d'Azoto

La sorgente di Ossido d'Azoto è costituita da una bombola in pressione contenente una miscela di NO e NO₂ in azoto in concentrazione pari a 800 ppb di NO_x con 10 ppb di NO₂, con tolleranze imposte dai metodi di confezionamento e dalla stabilità propria delle miscele stesse.

2. Sorgente di Aria

L'aria, tramite un compressore viene prelevata dall'ambiente di prova e, dopo averne regolato il flusso e l'umidità, viene inserita all'interno della camera.

3. Regolatori di flusso

I flussi di aria e Ossidi di Azoto sono regolati, secondo la normativa, attraverso l'impiego di flussimetri ad aria variabile.

4. Camera di controllo dell'umidità

L'umidità influenza considerevolmente l'attività fotocatalitica. E' necessario, quindi, che il grado di umidità del flusso gassoso sia fissato al valore ottimale del 50% ± 10. Questo viene ottenuto facendo passare aria (prelevata dall'ambiente) nella camera contenente acqua e misurando il grado di umidità con un igrometro di laboratorio.

5. Camera di reazione

La figura sottostante mostra in dettaglio la camera di reazione:

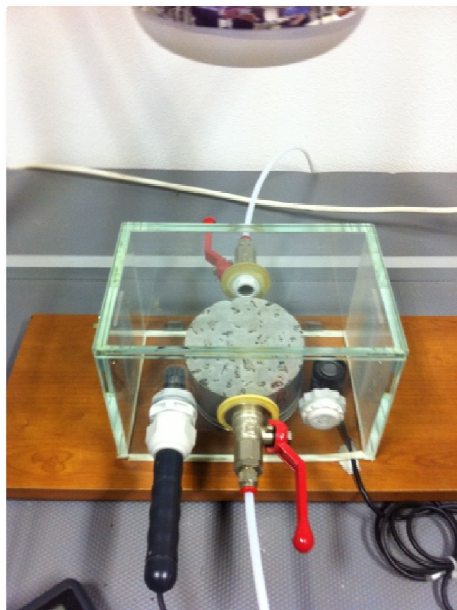


Figura 19 - camera di reazione

Questa è caratterizzata da un parallelepipedo di dimensione 13 cm x 13 cm x 20 cm in vetro Pyrex fatto salvo per la base realizzata in materiale inerte. Su due lati opposti vi sono due fori che consentono l'ingresso e l'uscita dei flussi, tali flussi dovranno essere costanti per tutta la prova.

Allo scopo di controllare le condizioni di umidità, temperatura e radianza all'interno della camera sono posti un igrometro, un termometro e un radiometro.

Il grado di umidità del flusso gassoso, come detto precedentemente, deve essere mantenuto pari al valore ottimale del $50\% \pm 10$.

La temperatura è fissata a $22.5^{\circ}\text{C} (\pm 2.5^{\circ}\text{C})$, questa viene mantenuta mediante interposizione di un filtro d'acqua tra la camera di reazione e l'apparato di illuminazione.

Il flusso radiante invece deve risultare di $20\text{ W/m}^2 \pm 1$.

In realtà essendo l'apparecchiatura di prova a regolazione manuale la temperatura e l'umidità vengono registrate e si assumono come riferimento.

- Caratteristiche della lampada

L'apparecchiatura per l'irradiazione è schematizzata in figura. Caratteristiche ottimali della lampada impiegata per l'irradiazione sono: una potenza di 300W e l'emissione di luce a 365 nm.

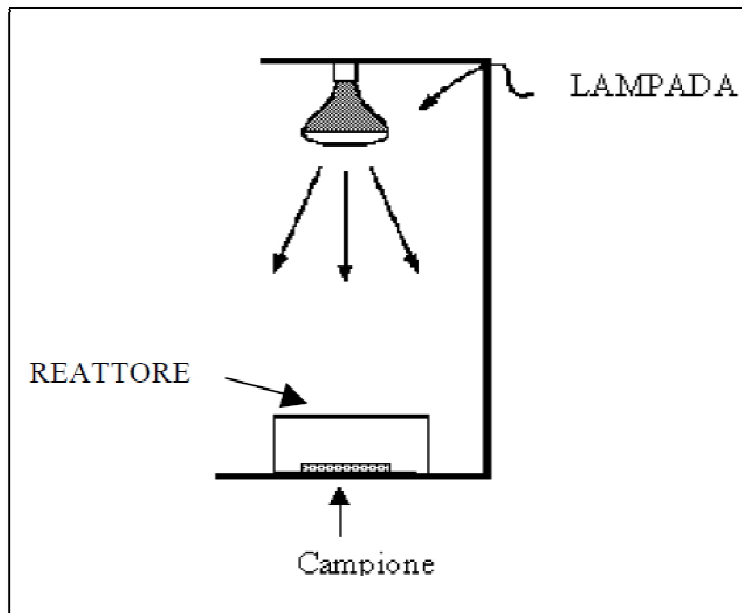


Figura 20 - camera di reazione e apparato di illuminazione

La distanza della lampada dalla superficie del reattore è regolata in modo tale che il flusso radiante risulti essere di $20 \text{ W/m}^2 \pm 1$: la misura viene realizzata ponendo all'interno della camera di reazione un radiometro sensibile ad un campo spettrale compreso tra 315 e 400 nm con un picco a 360 nm.

6. Analizzatore a chemiluminescenza

La misurazione si basa sulla reazione del monossido di azoto (NO) con ozono all'interno di una camera di reazione, con la produzione di molecole di NO_2 allo stato eccitato, tali da emettere luce di lunghezza d'onda tra 590 nm e 3000 nm, con un massimo di 1100 nm. Dalla misura della luce emessa si ricava la concentrazione di NO. Tramite un sistema di conversione degli NO_2 in NO si ricava la concentrazione degli NO_x e quella degli NO_2 per differenza.



Figura 21 - analizzatore a chemioluminescenza

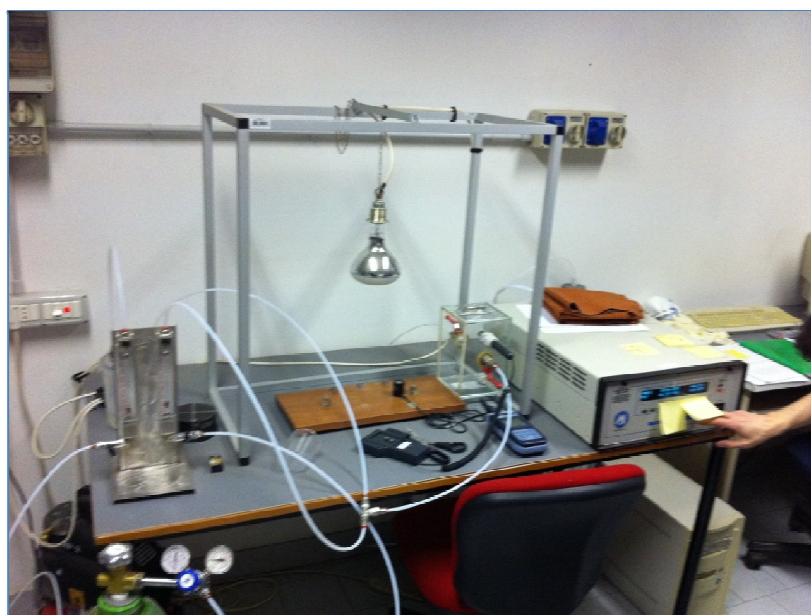


Figura 22 - banco di prova

3.6. PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

I campioni da sottoporre alla prova in oggetto sono di due tipi:

- **CAMPIONI ESTRATTI DAL CAMPO PROVE DI CARPIANO:** i campioni, estratti mediante carotaggio, devono avere diametro di 10 cm. \pm 1cm. dopo essere stati estratti vengono adeguatamente puliti con aria compressa al fine di ridurre al minimo la presenza di polveri all'interno della camera di reazione. I provini verranno poi confinati lateralmente in modo tale che la reazione di fotocatalisi si concentri esclusivamente sulla parte superiore. Come descritto nella presentazione del campo prove, saranno estratti tre campioni per ogni area del campo, per un totale di 9 campioni, di cui 3 caratterizzati da uno strato d'usura intasato con TX Percocem senza espansivo e 6 con espansivo.

INSERIRE FOTO CAROTAGGIO

Figura 23 - Estrazione dei campioni in sito mediante apposita macchina.

- **CAMPIONI CONFEZIONATI AD HOC IN LABORATORIO:** i campioni sono stati compattati in laboratorio con pressa giratoria (50 cicli). Anch'essi hanno diametro pari a 10 cm. \pm 1. Poiché la % di vuoti risultava troppo elevata (come si può vedere nel paragrafo qui di seguito riportato) abbiamo deciso di confezionare i provini con un compattatore Marshall. I provini sono stati poi intasi con TX Percocem con espansivo. Anche in questo caso i provini verranno poi confinati lateralmente in modo tale che la reazione di fotocatalisi si concentri esclusivamente sulla parte superiore.

3.7. ESPRESSIONE DEI RISULTATI E RIPRODUCIBILITA'

Il risultati vengono riportati come percentuale di riduzione di NO_x da parte del campione fotocatalitico esposto a radiazione UV:

$$R[\%] = \left(1 - \frac{C_L}{C_B}\right) \times 100$$

L'attività fotocatalitica (A) di riduzione degli ossidi di azoto (in unità m/h) per diversi tempi di reazione può essere calcolata con la seguente formula:

$$A = \frac{(C_B - C_L)}{C_B} \times \frac{F}{S} \times I$$

Dove:

- C_B e C_L sono le concentrazioni di NO_x, NO₂, NO misurate in condizioni di equilibrio rispettivamente al buio e alla luce;
- S è la superficie geometrica del provino in esame, in m²;
- F è il flusso di gas l/min;
- I è l'intensità adimensionale del fascio luminoso ottenuta confrontando l'intensità I' misurata a livello sperimentale (in W/m²) con 20 W/m², corrispondente a circa 100.000 Lux (il valore medio che raggiunge la luce solare a mezzogiorno di un giorno medio di luglio).

La riproducibilità dei risultati verrà valutata sulla base dei dati ottenuti con almeno due campioni fotocatalitici di uguale composizione chimica. Possono essere considerate valide prove i cui risultati differiscono per non più del 10%.

4. ANALISI SPERIMENTALE: LE FASI

Il campo prove è stato realizzato presso l'area industriale di Carpiano. La realizzazione ha previsto il rifacimento di una tratta di strada, caratterizzata da un traffico prevalentemente pesante, data la natura industriale dell'area, di lunghezza di circa 56 m (45 m da destinarsi alle tre tipologie di soluzioni, già descritte precedentemente, il restante per esigenze lavorative legate alla fresatura). Inizialmente si è provveduto alla fresatura degli strati di base, binder e usura, della pavimentazione esistente, per un totale di 21 cm (la pavimentazione nuova sarà costituita, infatti, da 12 cm di base, 5 di binder e 4 di usura, come si vede nello schema qui sotto).

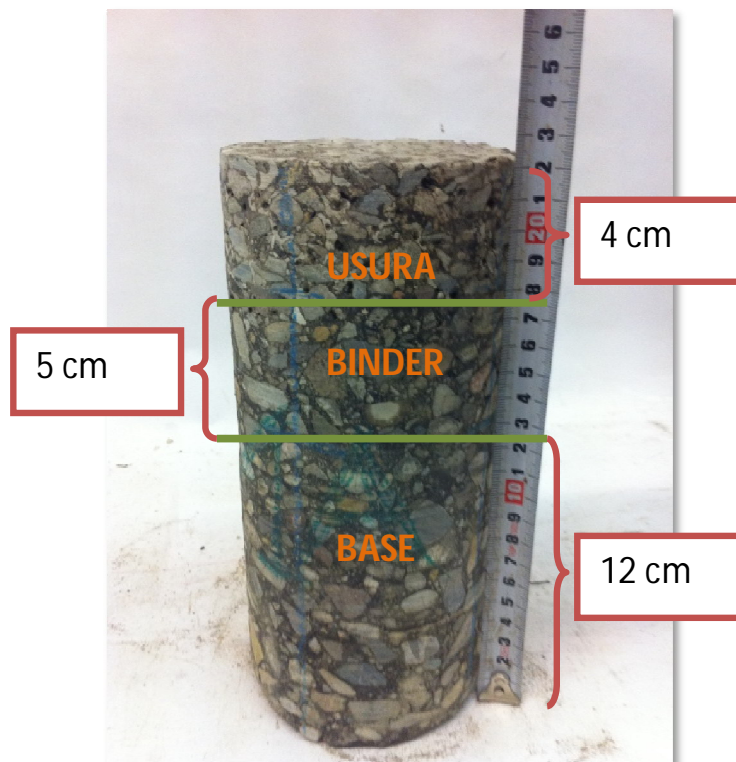


Figura 24 - analisi visiva degli strati realizzati.



Figura 25 - fase di fresatura, pulizia

Al termine della fase di fresatura si è potuto constatare che il fondo era caratterizzato da misto granulare stabilizzato granulometricamente, quindi si è proceduto ad una misura della portanza del sottofondo attraverso una prova, per ciascun area, di carico su piastra secondo la norma CNR 146/92. I risultati sono riportati nel capitolo 4. Tuttavia prima dell'esecuzione delle prove si è provveduto alla pulizia dell'area mediante macchina spazzolatrice aspirante e rullaggio mediante un rullo vibro gammato. Tale rullo poi è stato utilizzato come appoggio dell'apparato di misura.



Figura 26 - prova di carico su piastra

Le prove di carico su piastra hanno evidenziato una portanza del sottofondo (i risultati saranno presentati successivamente), come già da un'analisi visiva si ipotizzava.

In seguito si è potuto procedere con le fasi di realizzazione vere e proprie della nuova pavimentazione. In una prima fase è stato realizzato lo strato di base di 12 cm steso mediante finitrice ad eccezione delle tratte d'attacco, con la vecchia pavimentazione, che sono state stese manualmente. La temperatura di stesa del conglomerato bituminoso è stata misurata pari a 160° C (al banco) mentre, la velocità di avanzamento della finitrice era di 5,7 m/min.



Figura 27 - stesa dello strato di base

Come descritto nella presentazione del campo prove, nell'area 3 è stata posizionata, sul sottofondo, una geogriglia.



Figura 28 - posa geogriglia

Contemporaneamente alla stesa dello strato di base, un rullo vibrante (Bomag BW161AD) da 10 t. compattava lo strato appena steso ad una velocità di 4 Km/h.



Figura 29 - fase di compattazione

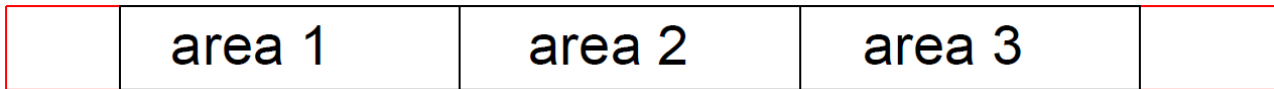


Figura 30 - schematizzazione dell'area di prova

La tabella sottostante riporta il numero di passaggi:

BASE-AREA 1		
	CON VIBRAZIONE	SENZA VIBRAZIONE
lato sx	4	6
tratta centrale	4	6
lato dx	4	8

BASE-AREA 2		
	CON VIBRAZIONE	SENZA VIBRAZIONE
lato sx	4	4
tratta centrale	4	6
lato dx	4	6

BASE-AREA 3		
	CON VIBRAZIONE	SENZA VIBRAZIONE
lato sx	4	2
tratta centrale	4	2
lato dx	4	2

Tabella 1 – base: numero di passaggi del rullo

La differenza, nel numero di passaggi non vibrati, è dovuta a esigenze di manovra della macchina stessa. Poiché la larghezza del campo prove è, come precedentemente citato, di 3,70 m e dato che la larghezza della rullo è di 1,50 m, la compattazione ha previsto il rullaggio di un tratto, lato sx, adiacente al parcheggio, del tratto centrale e del lato destro, adiacente all'altra corsia. La figura sottostante mostra lo schema di compattazione con la sovrapposizione dei passaggi.

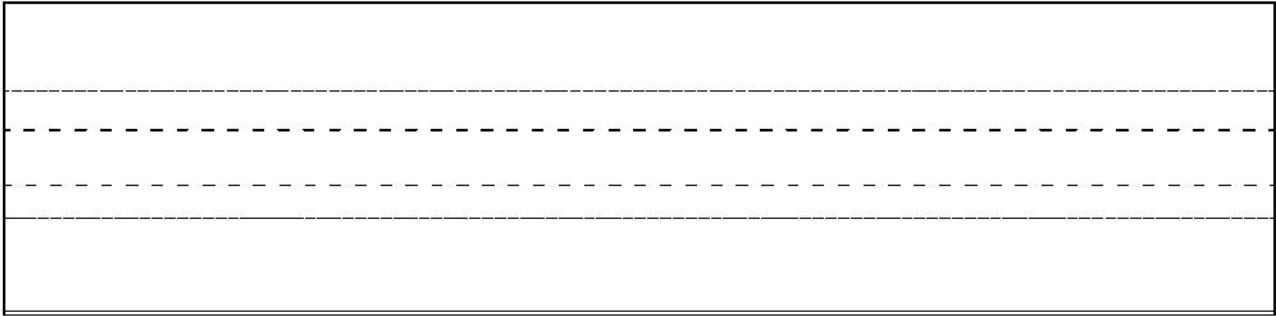


Figura 31 - schema di compattazione

Dopo aver lasciato raffreddare opportunamente lo strato di base si è proceduto alla stesa dello strato di binder, caratterizzato da conglomerato bituminoso con fibre, per uno spessore di 5 cm. Le modalità operative sono le medesime di quelle descritte per lo strato di base, la temperatura del conglomerato bituminoso però è di 190 °C (al banco). Questa differenza è da imputarsi al fatto che il conglomerato bituminoso contiene delle fibre e quindi necessita di temperature più elevate per essere lavorato correttamente. Man mano che si avanzava con la stesura e il rullaggio del binder si controllava in diversi punti che lo spessore da destinarsi allo strato di usura fosse effettivamente di 4 cm.



Figura 32 - fase di stesa dello strato di binder

Anche per lo strato di binder si riporta la tabella che indica il numero dei passaggi:

BINDER- AREA 1 E 2		
	CON VIBRAZIONE	SENZA VIBRAZIONE
lato sx	4	4
tratta centrale	4	4
lato dx	5	2

BINDER- AREA 3		
	CON VIBRAZIONE	SENZA VIBRAZIONE
lato sx	4	2
tratta centrale	4	2
lato dx	4	2

Tabella 2 - binder: numero di passaggi del rullo

Dato che lo strato di binder ha un'altezza inferiore rispetto alla base, con un autocarro di conglomerato la finitrice ha potuto stendere sia il binder dell'area 1 che dell'area 2. Anche qui la differenza, nel numero di passaggi non vibrati, è dovuta a esigenze di manovra della macchina stessa.

Il giorno successivo, dopo il raffreddamento dello strato di binder si è provveduto alla realizzazione dello strato di usura di 4 cm in conglomerato bituminoso open grade. Prima di passare alla stesura è stata spruzzata, sul binder, una mano d'attacco di emulsione bituminosa ordinaria che ha lo scopo di consentire un corretto e saldo ancoraggio dello strato d'usura allo strato sottostante.



Figura 33 - stesura della mano d'attacco

La temperatura di stesa del conglomerato bituminoso è stata misurata al banco pari a 165/170° C, è stata inoltre misurato la temperatura dello strato d'usura appena posato, questa era di 130/140°C. Le modalità operative sono le medesime degli strati precedenti. Nella tabella sottostante si riportano il numero di passaggi del rullo.

USURA		
	CON VIBRAZIONE	SENZA VIBRAZIONE
bordo sx	2	0
lato sx	0	4
tratta centrale	0	4
lato dx	0	4
bordo dx		2

Tabella 3 – usura: numero di passaggi del rullo

Nella tabella numero 3 sono state inserite le voci bordo sx e dx che indicano la parte più esterna del nostro campo, a contatto con la pavimentazione esistente. L'esigenza di rullare anche la parte esterna nasce dalla necessità di eliminare eventuali zone di discontinuità con la pavimentazione esistente.



Figura 34 - stesura e rullaggio dello strato di usura



Figura 35 - analisi visiva dell'apertura dello strato d'usura open grade

Al termine della realizzazione dello strato d'usura si è passati all'intasamento dello conglomerato bituminoso con cemento fotocatalitico.

Al fine di consentire una corretta percolazione del materiale ed evitare una maturazione del cemento prima del completo intasamento dello strato d'usura abbiamo controllato che la temperatura dello strato di conglomerato bituminoso fosse non superiore a 30°C. La temperatura registrata al momento della stesa era di 29°C.

La miscelazione della malta fotocatalitica con acqua è stata realizzata tramite un'apposita miscelatrice.



Figura 36 - macchina per la miscelazione di acqua e cemento

La quantità d'acqua aggiunta per avere una corretta fluidità (tale da consentire una buona percolazione nella pavimentazione) è del 27% (rapporto acqua/cemento pari a 0,43). Come verifica della fluidità è stata misurato il tempo di deflusso di un volume noto di miscela nel cono di Marsh.

Come descritto già precedentemente le tipologie di cemento fotocatalitiche utilizzate sono state due:

- una senza espansivo, utilizzata nell'area 1;
- l'altra con espansivo, utilizzata nelle aree 2 e 3.

La miscela liquida quindi è stata, quindi, stesa sulla pavimentazione e lavorata con raclee.



Figura 37 - intasamento dello strato d'usura e lavorazione mediante raclee

Al termine della lavorazione il nostro stato d'usura si presentava come in figura sottostante:



Figura 38 - strato d'usura intasato

Terminato l'intasamento di tutte le aree la pavimentazione è stata coperta per consentire una corretta maturazione della malta fotocatalitica.



Figura 39 - copertura della pavimentazione

Per poter misurare l'attività foto catalitica e verificare le caratteristiche meccaniche in laboratorio si è proceduto all'estrazione di carote ad una settimana dalla realizzazione della pavimentazione. Contemporaneamente è stato realizzato in laboratorio dei provini cilindrici di 1000 g di peso, 10 cm di diametro e 6 cm di altezza. In questo modo è stato possibile confrontare i risultati ottenuti dal campione prelevato in sito e quello confezionato ad hoc in laboratorio.

Inserire foto provino realizzato in LABORATORIO

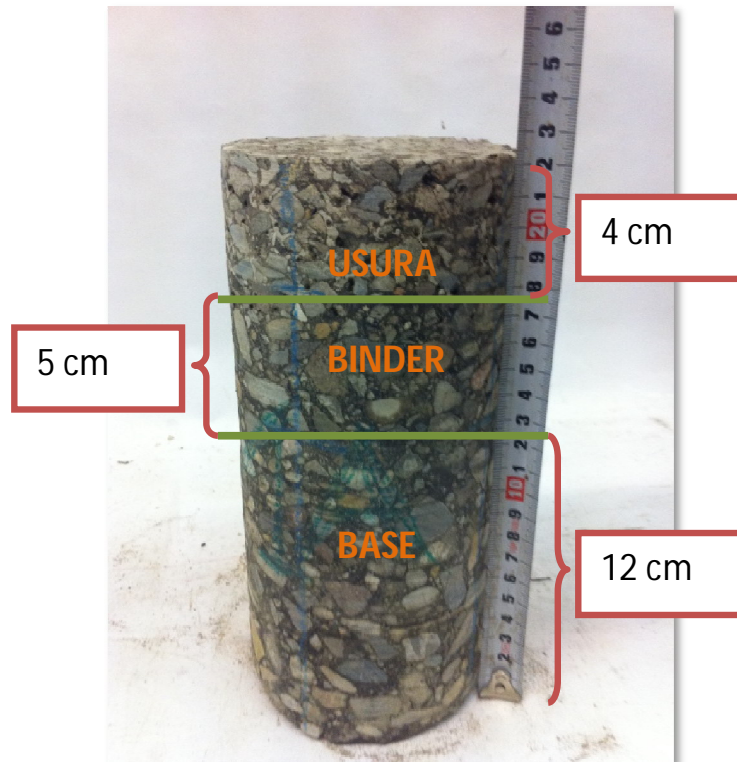


Figura 40 - carota della pavimentazione e provino realizzato in sito

Nella foto sovrastante si è riportata tutta la carota estratta, questa comprende gli strati di base, binder e usura; per l'analisi dell'attività fotocatalitica questa è stata tagliata e si è considerato solo lo strato di usura (intasato con malta fotocatalitica).

I provini realizzati in laboratorio, utilizzati per la valutazione dell'attività fotocatalitica, sono stati realizzati compattando il materiale drenante, preventivamente riscaldato, con la pressa giratoria/compattatore Marshall. Quindi, a maturazione avvenuta e una volta determinate tutte le caratteristiche (che saranno riportate in seguito) sono stati intasati con una miscela composta da cemento fotocatalitico con espansivo e acqua.

RIPORTARE LE QUANTITA' DI ACQUA E CEMENTO

Per ottenere una buona resistenza a compressione, necessaria a rallentare i fenomeni di usura della pavimentazione dovuta ai carichi di traffico, sarebbe necessario adottare un basso rapporto di acqua-cemento, in modo tale da ridurre la porosità della malta. Tale rapporto deve comunque essere tale da consentire il completo intasamento del provino. Per il campo prove sono state utilizzate due tipologie di miscele cementizie: una con espansivo (area 2 e 3) e una senza (area 1),

mentre per i campioni confezionati ad hoc in laboratorio è stata utilizzata solo la miscela cementizia con espansivo.

Una volta preparati i provini in laboratorio e, contemporaneamente, tagliate le carote si è potuto procedere con la sperimentazione vera e propria con l'attrezzatura descritta precedentemente.

Il principio di prova si basa sulla misura della capacità di un campione di ridurre la concentrazione di ossidi di azoto all'interno della camera di reazione in condizioni controllate.

La prova si divide in due fasi: una prima fase in cui il provino è sottoposto ad un flusso di gas (aria e Ossido di azoto), mantenuto costante, in assenza di un flusso radiante (il provino, all'interno della camera di reazione, viene coperto con un panno in modo tale da non essere sottoposto ad alcuna radiazione). Una volta che si raggiunge una condizione di equilibrio (~ 0,2 ppb) si registra l'umidità (intorno al 60% \pm 10), la temperatura e la radianza (che dovrebbe essere zero) e si riportano le concentrazioni di NO_x, NO e NO₂. Tale condizione viene assunta come base di riferimento per il calcolo dell'abbattimento.

Le concentrazioni all'interno della camera si attestano intorno a valori compresi tra 300 e 500 ppb in funzione dell'aria prelevata dall'ambiente. Tale flusso ha la funzione di diluire il flusso di NO_x e apportare gli altri elementi presenti in atmosfera, per esempio gli O₂, necessari per la fotocatalisi.

Una seconda fase che inizia nel momento dell'accensione della lampada e si conclude, ancora, una volta raggiunta una stabilità. L'accensione della lampada fa sì che il fotocatalizzatore si attivi e quindi che si registri un sensibile variazione delle concentrazioni di NO_x (NO e NO₂). Queste subiranno una progressiva diminuzione, proporzionale all'efficacia del materiale in esame, fino al raggiungimento della condizione di stabilità. Anche qui si registrano: umidità (che ovviamente sarà diminuita), la temperatura e la radianza (che ovviamente non sarà più zero) e le concentrazioni di NO_x, NO e NO₂. Queste concentrazioni vengono assunte come riferimento per il termine della prova.

L'efficacia del materiale in esame nella riduzione delle concentrazioni di ossidi di azoto viene determinata sulla base del rapporto percentuale tra le concentrazioni stabili misurate in condizioni di buio e luce.

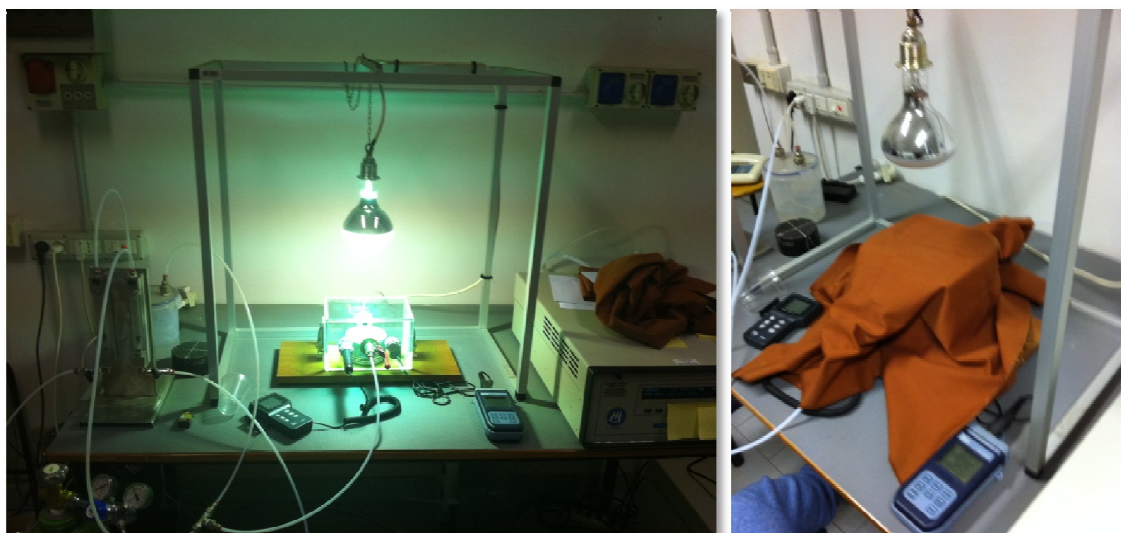


Figura 41 - condizioni di luce - buio

Alcune considerazioni:

- Il provino, essendo completamente intasato, prima di essere immesso nella camera di reazione deve essere opportunamente confinato con del materiale inerte in modo tale da concentrare la reazione solo sulla parte superficiale.



Figura 42 - campioni opportunamente confinati con nastro.

- Al fine di valutare i possibili effetti delle variazioni di intensità di flusso inquinante in ingresso, sono state realizzate tre differenti cicli di prova:
 - secondo la norma UNI 11247 ovvero con un flusso di gas pari a 1,5 l/min (0,75 l/min di NO_x e 0,75 l/min di aria);
 - con un flusso di gas pari a 1 l/min (0,5 l/min di NOX e 0,5 l/min di aria);
 - con un flusso di gas pari a 3 l/min (1,5 l/min di NOX e 1,5 l/min di aria);

5. ANALISI SPERIMENTALE: I RISULTATI

5.1. PROVE IN LABORATORIO

Le seguenti prove sono state realizzate su campioni di materiale, fornito da Bacchi, utilizzato per la realizzazione del campo prove.

5.1.1. CARATTERIZZAZIONE VOLUMETRICA DEL MATERIALE

5.1.1.1. ANALISI GRANULOMETRICA

L'analisi granulometrica è stata realizzata conformemente alla norma UNI EN 933-1. Il campione di materiale è stato sottoposto ad una prova di estrazione (i risultati sono riportati nel capitolo successivo). Separato il bitume dagli aggregati, questi sono stati messi in forno ad essiccare. Ad essiccazione avvenuta è stato possibile eseguire la prova versando gli aggregati in una pila di setacci aventi apertura normata (ISO 3310-1 & 3310-2). I risultati possono essere riassunti dai seguenti grafici:

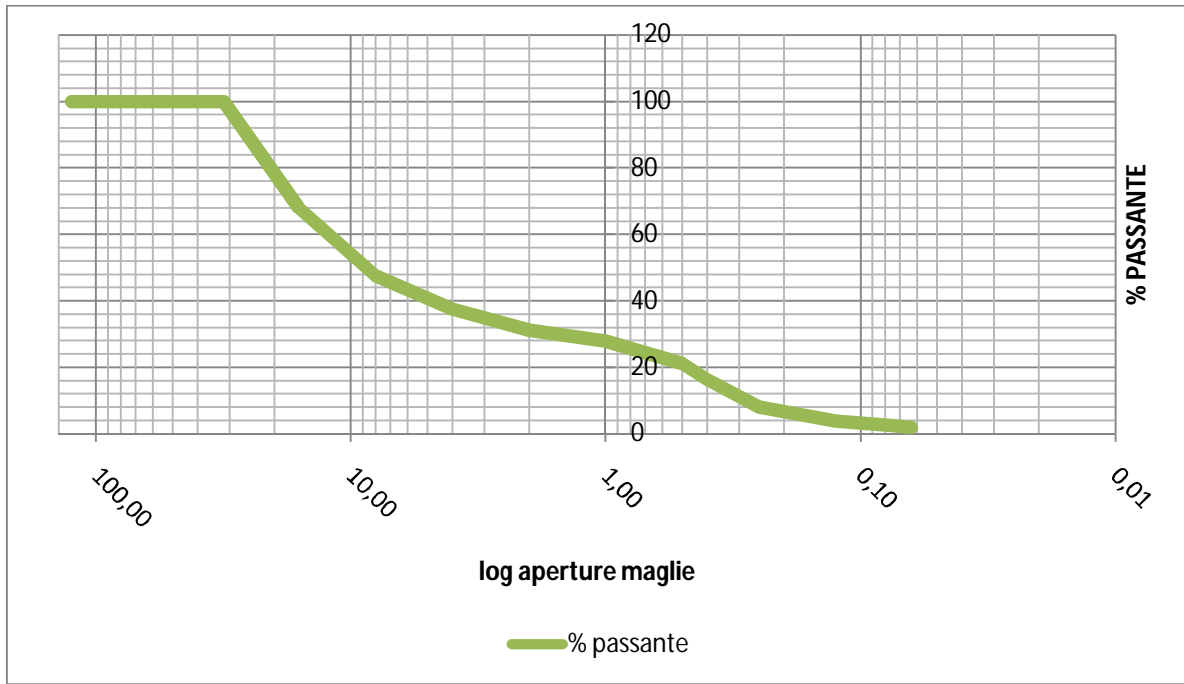


grafico 1 - analisi granulometrica base

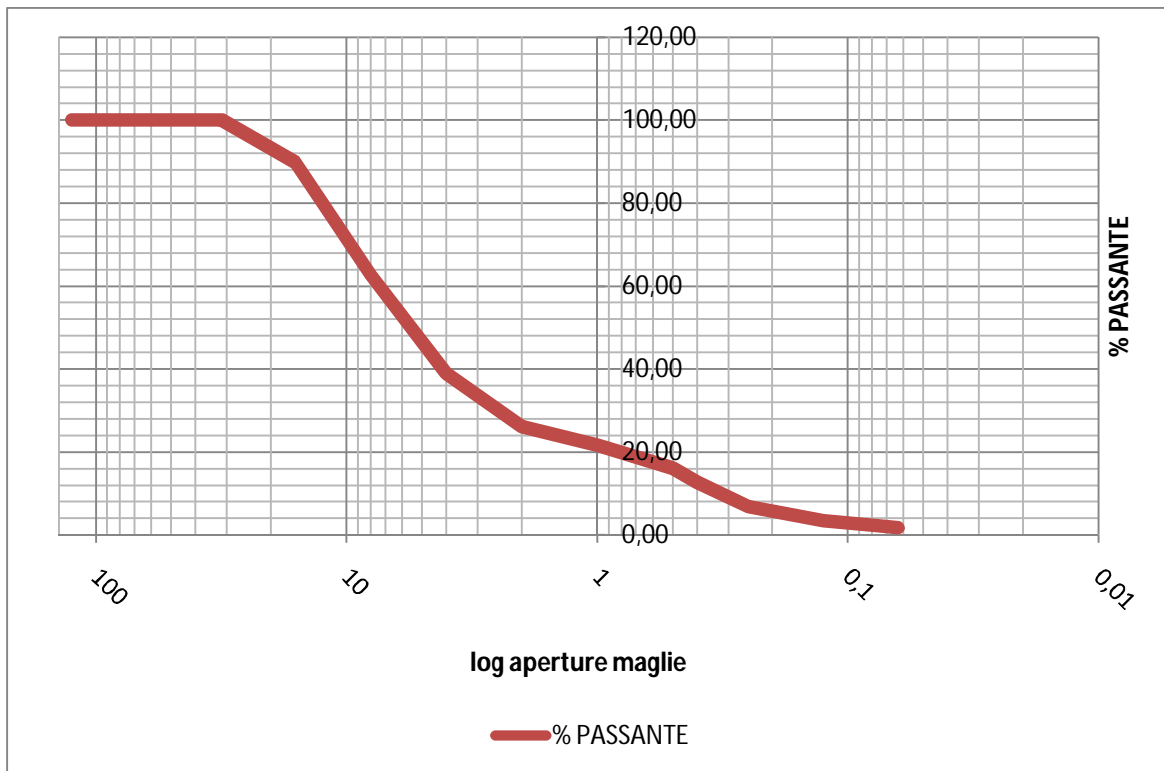


grafico 2 - analisi granulometrica binder

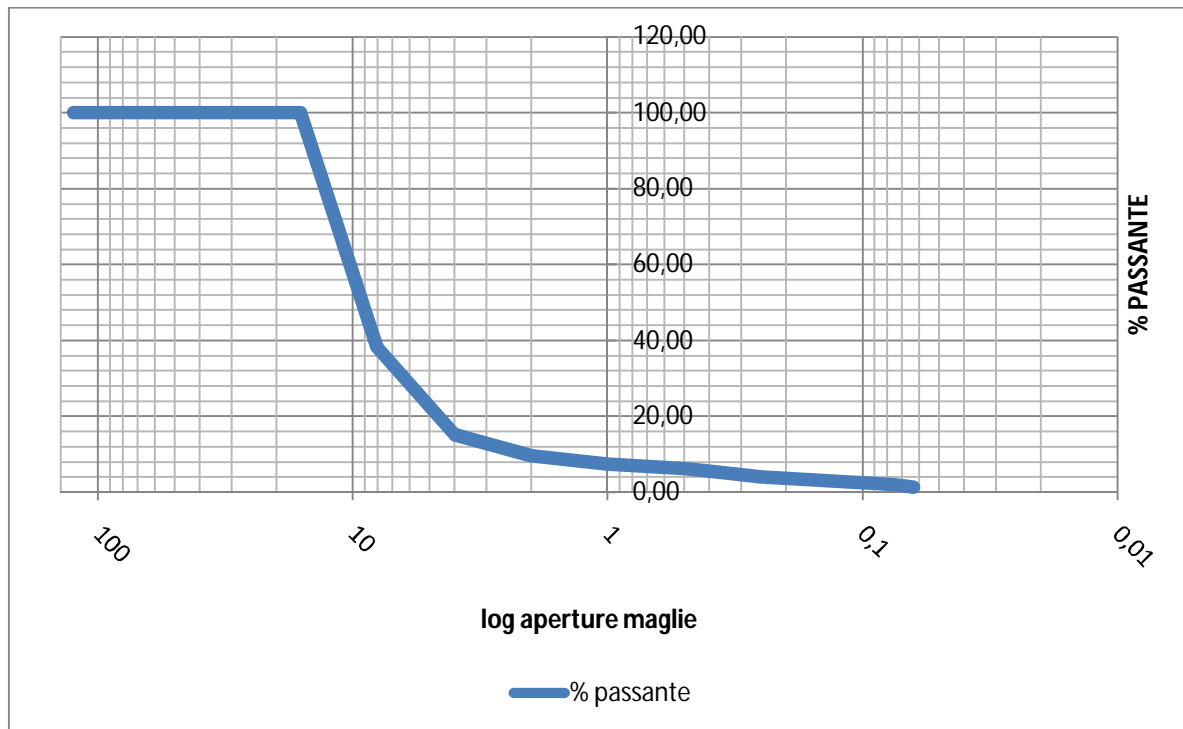


grafico 3 - analisi granulometrica usura

I valori numerici sono riportati in allegato.

5.1.1.2. PERCENTUALE DI VUOTI

Per valutare la percentuale di vuoti sono stati realizzati dei campioni, con il materiale prelevato dal campo prove, utilizzando la pressa giratoria. Il materiale utilizzato per la base e il binder è stato compattato, con un numero di cicli pari a 100, ponendo del materiale, preventivamente riscaldato alla temperatura di stesa (160°C per la base e 180°C per il binder), all'interno di una fustella di 150 mm. Per quanto riguarda l'usura, anche qui il materiale è stato posto in forno ad una temperatura pari alla temperatura di stesa ma è stato compattato in una fustella di 10 cm di diametro e con un numero di cicli pari a 50.

Per valutare la percentuale di vuoti dello strato d'usura si è proceduto con il metodo geometrico: è stato misurato, per ogni provino il peso, il diametro e l'altezza su quattro punti del campione. A titolo di esempio si riporta la seguente tabella:

USURA	POSIZIONE DELLE MISURE DEL DIAMETRO		DIAMTERO [mm]	ALTEZZA [mm]
PROVINO 1	1° FACCIA	ORIZZ.	10,18	6,16
		VERT.	10,27	6,05
	2° FACCIA	ORIZZ.	10,2	6,15
		VERT.	10,19	6,1
	MEDIA		10,21	6,115

USURA	
provino 1	
VOLUME [cm ³]	500,65
PESO [g]	952,24
MASSA VOLUMICA [g/cm ³]	1,90

USURA	
	% VUOTI
Provino 1	26,97

Tabella 4 - determinazione della % di vuoti

Noti il diametro e l'altezza si è calcolato il volume del provino, noto il peso si ricava la massa volumica. A questo punto, calcolato il peso specifico dalla TMD si può ricavare la % di vuoti.

Si riportano le % di vuoti dei nove provini analizzati dello strato d'usura:

USURA	
	% VUOTI
PROVINO 1	26,97
PROVINO 2	27,53
PROVINO 3	32,56
PROVINO 4	25,66
PROVINO 5	27,55
PROVINO 6	26,88
PROVINO 7	25,61
PROVINO 8	27,18
PROVINO 9	27,45

Tabella 5 - % di vuoti dello strato d'usura compattato con pressa giratoria

In allegato tutte le misure effettuate.

Dato che la % di vuoti per i provini realizzati con la pressa giratoria risulta essere troppo elevata si è proceduto alla compattazione tramite Marshall. Riportiamo di seguito i risultati ottenuti con lo stesso metodo descritto poc'anzi.

USURA	
	% VUOTI
PROVINO 1	23,56
PROVINO 2	23,44
PROVINO 3	23,43
PROVINO 4	26,97
PROVINO 5	22,50
PROVINO 6	24,96

Tabella 6 - % di vuoti dello strato d'usura compattato con Marshall

In allegato tutte le misure effettuate.

Per quanto riguarda, invece, lo strato di base e di binder l'analisi della % di vuoti è stata realizzata secondo le norme UNI EN 12697-5/2203. Nelle tabelle sottostanti si riassumono i risultati ottenuti:

BASE	% vuoti
1° CAMPIONE	4,13
2° CAMPIONE	7,99
3° CAMPIONE	6,82

Tabella 7 - % di vuoti dello strato di base

BINDER	% vuoti
1° CAMPIONE	8,56
2° CAMPIONE	7,91
3° CAMPIONE	10,92
4° CAMPIONE	10,12

Tabella 8 - % vuoti dello strato di binder

Poiché, come si vede dalle tabelle sopra riportate, le % di vuoti dello strato di base e binder, compattati con la pressa giratoria, risultano essere eccessivamente elevati abbiamo deciso di provare a compattarli con la Marshall. I risultati sono qui di seguito riportati:

5.1.1.3. PROVA DI DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO

Prelevando dei campioni di materiale, secondo il metodo della quartatura, opportunamente raffreddato e sgranato si è misurato il peso specifico di ogni campione di materiale. Le tabelle sottostanti riportano i risultati ottenuti:

BASE		
PROVA DI DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO		
PESO CASPULA+ TERRENO SECCO [g]	a	575,53
PESO CAPSULA	b	172,67
PESO TERRENO SECCO	c	402,86
TEMPERATURA DI PROVA	d	18,00
PESO PICNOMETRO + ACQUA A T PROVA	e	782,97
	f=c+e	1185,83
PESO PICNOMETRO + ACQUA + TERRENO	g	1024,71
	h=f-g	161,12
PESO SPECIFICO ACQUA A T PROVA [g]	i	1,00
PESO SPECIFICO TERRENO [g]	l=i*c/h	2,50

Tabella 9 - peso specifico conglomerato delle strato di base

BINDER		
PROVA DI DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO		
PESO CASPULA+ TERRENO SECCO [g]	a	573,01
PESO CAPSULA	b	172,66
PESO TERRENO SECCO	c	400,35
TEMPERATURA DI PROVA	d	19,00
PESO PICNOMETRO + ACQUA A T PROVA	e	782,84
	f=c+e	1183,19
PESO PICNOMETRO + ACQUA + TERRENO	g	1025,41
	h=f-g	157,78
PESO SPECIFICO ACQUA A T PROVA [g]	i	1,00
PESO SPECIFICO TERRENO [g]	$l=i*c/h$	2,53

Tabella 10 - peso specifico conglomerato dello strato di binder

USURA		
PROVA DI DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO		
PESO CASPULA+ TERRENO SECCO [g]	a	570,59
PESO CAPSULA	b	172,66
PESO TERRENO SECCO	c	397,93
TEMPERATURA DI PROVA	d	18,00
PESO PICNOMETRO + ACQUA A T PROVA	e	782,97
	f=c+e	1180,90
PESO PICNOMETRO + ACQUA + TERRENO	g	1028,33
	h=f-g	152,57
PESO SPECIFICO ACQUA A T PROVA [g]	i	1,00
PESO SPECIFICO TERRENO [g]	$l=i*c/h$	2,60

Tabella 11 - peso specifico conglomerati dello strato di usura

Non essendoci un capitolato vero e proprio per il campo prove, non si è potuto confrontare correttamente i valori. Però secondo norme di buona tecnica e da un'analisi con materiali analoghi si può dire che i valori ottenuti sono plausibili.

5.1.1.4. PROVE DI ESTRAZIONE: PERCENTUALE DI BITUME

La prova di estrazione è stata realizzata conformemente alla norma UNI EN 12697-34/2004 CNR BU 30/73. Tale prova consente di determinare la concentrazione % di bitume. Per la realizzazione è stato necessario pre-riscaldare in forno i campioni di materiale ad una temperatura tale da consentire il prelievo di almeno 1,5 Kg di materiale.

I risultati sono riportati di seguito:

STRATO DI BASE	
DETERMINAZIONE % DI BITUME	
METODO ESTRAZIONE	
CESTELLO + BITUME [g]	1743,71
PESO CESTELLO [g]	160,67
PESO C.B. [g]	1583,04
PESO CEST. + AGGR. + FILLER 1 [g]	1643,84
PESO AGGR. + FILLER 1 [g]	1483,17
PESO BITUME + FILLER IN SOLUZ. [g]	99,87
PESO VETRO + CROSTA FILLER 2 [g]	1583,75
PESO VETRO [g]	1553,81
PESO NETTO FILLER [g]	29,94
PESO NETTO BITUME [g]	69,93
PESO NETTO INERTI [g]	1513,11
% BITUME RIFERITA AGLI INERTI	4,62
% BITUME RIFERITA AL C.B.	4,42

Tabella 12 - % di bitume conglomerato utilizzato per la base

STRATO DI BINDER	
DETERMINAZIONE % DI BITUME	
METODO ESTRAZIONE	
CESTELLO + BITUME [g]	1799,77
PESO CESTELLO [g]	288,33
PESO C.B. [g]	1511,44
PESO CEST. + AGGR. + FILLER 1 [g]	1707,05
PESO AGGR. + FILLER 1 [g]	1418,72
PESO BITUME + FILLER IN SOLUZ. [g]	92,72
PESO VETRO + CROSTA FILLER 2 [g]	1663,14
PESO VETRO [g]	1643,85
PESO NETTO FILLER [g]	19,29
PESO NETTO BITUME [g]	73,43
PESO NETTO INERTI [g]	1438,01
% BITUME RIFERITA AGLI INERTI	5,11
% BITUME RIFERITA AL C.B.	4,86

Tabella 13 - % bitume conglomerato utilizzato per il binder

STRATO DI USURA	
DETERMINAZIONE % DI BITUME	
METODO ESTRAZIONE	
CESTELLO + BITUME [g]	1746,57
PESO CESTELLO [g]	290,01
PESO C.B. [g]	1456,56
PESO CEST. + AGGR. + FILLER 1 [g]	1671,38
PESO AGGR. + FILLER 1 [g]	1381,37
PESO BITUME + FILLER IN SOLUZ. [g]	75,19
PESO VETRO + CROSTA FILLER 2 [g]	1806,94
PESO VETRO [g]	1797,65
PESO NETTO FILLER [g]	9,29
PESO NETTO BITUME [g]	65,9
PESO NETTO INERTI [g]	1390,66
% BITUME RIFERITA AGLI INERTI	4,74
% BITUME RIFERITA AL C.B.	4,52

Tabella 14 - % bitume conglomerato dello strato di usura

5.1.2. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL MATERIALE

5.1.2.1. PROVA DI TRAZIONE INDIRECTA

5.1.2.2. PROVA DI RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE

5.1.2.3. CALCOLO DEL MODULO ELASTICO

5.2. PROVE IN SITO

5.2.1. DEFINIZIONE CARATTERISTICHE DEL SOTTOFONDO

Come già specificato precedentemente, da un'analisi visiva, si è potuto constatare che il fondo era caratterizzato da misto granulare stabilizzato. Le tabelle sottostanti riportano il risultato delle prove di carico su piastra:

PUNTO 1							
CARICO UNITARIO [N/mm ²]	LETTURA			ΔS [mm]			ΔS [mm] MEDIO
0,02	22,40	14,36	20,10	0,05	0,07	0,10	0,07
0,05	22,35	14,29	20,00	0,39	0,34	0,14	0,29
0,15	21,97	13,95	19,86	0,25	0,23	0,16	0,21
	21,96	13,95	19,86				
0,25	21,72	13,72	19,70	0,20	0,21	0,15	0,19
	21,71	13,72	19,70				
0,35	21,54	13,53	19,57				
	21,51	13,52	19,55				
	21,51	13,51	19,55				

	Δp [N/mm ²]	Md [Mpa]
SOTTOFONDO	0,1	103,45
FONDAZIONE	0,1	140,63

Tabella 15 - risultati modulo di deformazione, punto 1

PUNTO 2							
CARICO UNITARIO [N/mm ²]	LETTURA			ΔS [mm]			ΔS [mm] MEDIO
0,02	10,00	14,00	8,00				
0,05	10,44	14,46	8,66	0,46	0,60	0,88	0,65
	10,44	14,40	8,65				
	10,44	14,39	8,65				
0,15	9,98	13,80	7,78	0,23	0,42	0,72	0,46
	9,98	13,79	7,77				
0,25	9,76	13,42	7,13				
	9,75	13,37	7,05				

	Δp [N/mm ²]	Md [Mpa]
SOTTOFONDO	0,1	46,39
FONDAZIONE	0,1	65,69

Tabella 16 – risultati modulo di deformazione, punto 2

PUNTO 3							
CARICO UNITARIO [N/mm ²]	LETTURA			ΔS [mm]			ΔS [mm] MEDIO
0,02	15,00	18,00	14,00				
0,05	14,98	17,57	14,00	1,31	1,02	0,04	0,79
	14,98	17,57	14,00				
0,15	13,68	16,58	13,96	0,28	0,76	0,17	0,40
	13,67	16,55	13,96				
	13,67	16,55	13,96				
0,25	13,42	15,85	13,81				
	13,40	15,80	13,79				
	13,39	15,79	13,79				

	Δp [N/mm ²]	Md [Mpa]
SOTTOFONDO	0,1	37,97
FONDAZIONE	0,1	74,38

Tabella 17 - risultati del modulo di deformazione, punto 3

PUNTO 4							
CARICO UNITARIO [N/mm ²]	LETTURA			ΔS [mm]			ΔS [mm] MEDIO
0,02	14,00	23,00	14,00				
0,05	14,37	22,64	13,96	0,31	0,37	0,33	0,34
0,15	14,14	22,30	13,63	0,35	0,55	0,20	0,37
	14,06	22,28	13,63				
	14,06	22,27	13,63				
0,25	13,73	21,76	13,44				
	13,72	21,73	13,43				
	13,71	21,72	13,43				

	Δp [N/mm ²]	Md [Mpa]
SOTTOFONDO	0,1	89,11
FONDAZIONE	0,1	81,82

Tabella 18 - risultati modulo di deformazione, punto 4

Alcune considerazioni:

- Nelle tabelle qui sopra riportate i punti son stati rilevati secondo lo schema qui sotto riportato:

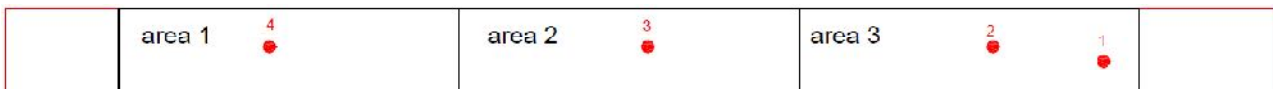


Figura 43 - schema rilevamento punti

- Non essendoci un capitolato vero e proprio per il campo prove, non si è potuto controllare con precisione la qualità del sottofondo. Possiamo, però, far riferimento a norme di buona tecnica secondo le quali valori del modulo di deformazione pari a 50 MPa per il sottofondo e 80 MPa per il fondo sono buoni valori.
- L'eterogeneità dei risultati deriva dal fatto che la prova di carico su piastra è una prova puntuale e quindi i risultati sono fortemente influenzati dalle caratteristiche puntuali del materiale. Il primo punto si discosta in modo rilevante dagli altri, questo può essere dovuto al fatto che la prima misura è stata realizzata prima della pulizia del sottofondo con apposita macchina.

5.2.2. DEFINIZIONE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

Lo scopo della determinazione delle caratteristiche superficiali è quello di verificare che la pavimentazione da noi realizzata abbia caratteristiche pari ad una normale pavimentazione stradale.

5.2.2.1. ALTEZZA IN SABBIA

Dopo 7 giorni dall'apertura al traffico della pavimentazione è stata effettuata una prova di altezza in sabbia. La prova è stata eseguita conformemente alla norma UNI EN 13036-4/2005, CNR BU 105/85. I risultati ottenuti sono riportati in tabella:

	HS [mm]
A	0,49
B	0,52
C	0,56
D	0,44
E	0,47
F	0,49

Tabella 19 - risultati delle misure di altezza in sabbia

Dato che, come abbiamo già specificato, non esiste un capitolato tecnico vero e proprio per la nostra pavimentazione, non abbiamo un valore preciso di riferimento ma possiamo dire che, secondo norme di buona tecnica, valori di 0,5 mm per strati di usura drenante sono buoni valori. I punti denominati A, B, C, D, E, F rappresentano i punti in cui sono state effettuate le misure. Lo schema qui sotto mostra la loro disposizione. (A e B appartengono all'area 1 ovvero quella caratterizzata da malta fotocatalitica senza espansivo le restanti fanno invece riferimento alle aree caratterizzate da malta fotocatalitica con espansivo).

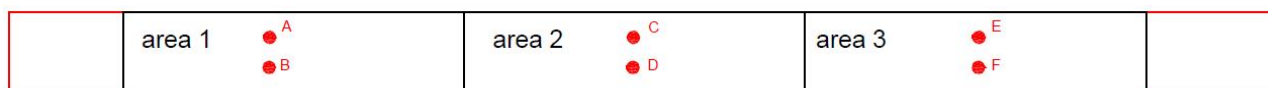


Figura 44 - schema rilevamento altezza in sabbia

5.2.2.2. SKID TEST

Contemporaneamente all'analisi volumetrica di altezza in sabbia sono state effettuate lungo l'area delle misure con Skid Test al fine di verificare le caratteristiche di aderenza della nostra pavimentazione. La norma di riferimento è la UNI/EN 13036-1/2002, CNR BU 94/83. I risultati sono mostrati nella tabella sottostante:

	Valore di Skid medio
1	40
2	45
3	44
4	43
5	41
6	41

Tabella 20 - risultati delle misure effettuate con Skid Test

Alcune osservazioni:

- I punti, che fanno riferimento allo schema mostrato qui sotto, rappresentano dei valori medi di varie misure effettuate.
- Essendo la nostra una pavimentazione drenante intasata come valori di riferimento possiamo considerare quelle di pavimentazioni drenanti; queste sono caratterizzate da valori di Skid pari a 50 / 60. I valori riferiti alla nostra pavimentazione appaiono quindi piuttosto bassi. Ma con la progressiva asportazione della malta di ricoprimento degli inerti superficiali, ad opera del traffico, tali valori potrebbero aumentare. Ricordiamo che le misure effettuate fanno riferimento alla prima settimana di apertura al traffico.
- La temperatura della pavimentazione al momento della misura era di 13° C.



Figura 45 - punti in cui sono state effettuate le prove con Skid Test

5.2.2.3. VALUTAZIONE VISIVA DELLA STRATO FESSURATIVO

La prima analisi visiva della pavimentazione è stata effettuata a sette giorni dalla realizzazione. Non si presentano delle fessure lungo la pavimentazione. Abbiamo però riscontrato che:

- Nell'area 1, caratterizzata da un intasamento con cemento foto catalitico TX Percocem, un lieve affioramento degli inerti in alcuni punti dell'area. Questo è da imputarsi a un non corretto intasamento infatti, al momento della stesa, sono sorte delle difficoltà nel

regolare il giusto apporto di acqua alla miscela. Questo aspetto è stato riscontrato anche dall'analisi visiva delle carote.



Figura 46 - analisi visiva dell'area 1

- Nelle aree 2 e 3 si riscontra una corretta chiusura dello strato superficiale, con una lieve (e normale) usura dello strato superficiale di cemento fotocatalitico, peraltro riscontrata anche nell'area 1, dovuto all'apertura della strada al traffico.

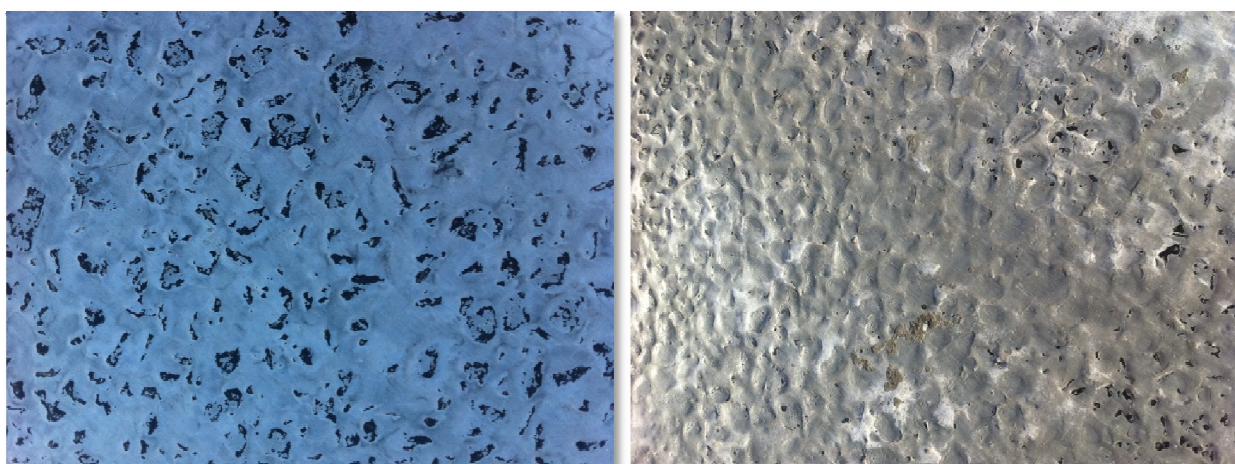


Figura 47 - analisi visiva area 2 e 3

5.2.3. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE CAROTE

5.2.3.1. PROVE DI TRAZIONE INDIRECTA

5.2.3.2. PROVA DI RESISTENZA A COMPRESSIONE (STRATO D'USURA)

5.2.3.3. CALCOLO DEL MODULO ELASTICO

5.2.4. ANALISI DELLE CAROTE

I campioni sono stati estratti con apposita macchina carotatrice, sono stati presi tre campioni per ogni area (1 carota dell'area 2 non è stata poi utilizzata perché rotta al momento dell'estrazione dal carotatore). Come si nota nell'immagine sottostante sono stati estratti nella zona centrale delle tre aree.



Figura 48 - schema estrazione carote

5.2.4.1. VALUTAZIONE DEGLI SPESSORI

In laboratorio i campioni prelevati dal campo prove sono stati analizzati al fine di valutare l'effettivo spessore degli strati di base, binder e usura. Le tabelle qui sotto riportate riassumono il risultato delle misura effettuate.

CAMPIONE 1A	SPESSORE [cm]
USURA	3,825
BINDER	5,525
BASE	12,45

CAMPIONE 1B	SPESSORE [cm]
USURA	3,875
BINDER	5,25
BASE	12,15

CAMPIONE 1c	SPESSORE [cm]
USURA	3,865
BINDER	5,51
BASE	12,37

Tabella 21 - Spessori degli strati dei campioni presi dall'area 1

CAMPIONE 2 A	SPESSORE [cm]
USURA	3,85
BINDER	4,775
BASE	11,275

CAMPIONE 2 C	SPESSORE [cm]
USURA	3,9
BINDER	4,95
BASE	11,15

Tabella 22 - spessori degli strati dei campioni presi dall'area 2

CAMPIONE 3 A	SPESSORE [cm]
USURA	4,2
BINDER	5,275
BASE	10,9

CAMPIONE 3 B	SPESSORE [cm]
USURA	4,05
BINDER	4,925
BASE	11,075

CAMPIONE 3 C	SPESSORE [cm]
USURA	4,075
BINDER	5,225
BASE	10,75

Tabella 23 - spessori degli strati dei campioni presi dall'area 3

Tuttavia una volta tagliate le carote per separare lo strato di usura (poi utilizzato per valutare l'attività foto catalitica), lo strato di binder e di base tali misure sono state ripetute. I risultati sono riportati in allegato.

5.2.4.2. MASSA VOLUMICA

Si riportano i risultati delle pesate idrostatiche effettuate sulle carote:

USURA	massa iniziale secca [g]	massa in acqua [g]	massa provino saturato [g]	temperatura acqua [°C]	massa specifica acqua a T di prova [Kg/m ³]	massa volumica apparente [g/cm ³]
1A	794,74	453,17	800,13	15,4	999,12	2,29
1B	693,43	398,77	696,62	15,4	999,12	2,33
1C	966,45	554,97	969,65	15,4	999,12	2,33
2A	852,17	490,89	855,47	15,4	999,12	2,34
2C	667,55	385,37	669,88	15,4	999,12	2,34
3A	806,72	461,88	811,13	15,4	999,12	2,31
3B	787,62	443,21	798,52	15,4	999,12	2,21
3C	924,49	531,343	927,07	15,4	999,12	2,33

Tabella 24 - massa volumica apparente dello strato d'usura

BINDER	massa iniziale secca [g]	massa in acqua [g]	massa provino saturato [g]	temperatura acqua [°C]	massa specifica acqua a T di prova [Kg/m ³]	massa volumica apparente [g/cm ³]	% vuoti
1A	870,37	506,67	875,28	15,9	999,02	2,36	6,76
1B	1071,68	618,92	1075,66	15,9	999,02	2,34	7,35
1C	915,81	536,46	917,73	15,9	999,02	2,40	5,15
2A	856,95	502,35	858,66	15,9	999,02	2,40	5,03
2C	1024,90	591,21	1026,42	15,9	999,02	2,35	7,01
3A	1021,83	592	1025,55	15,9	999,02	2,35	6,93
3B	913,53	524,6	916,65	15,9	999,02	2,33	7,99
3C	893,76	518,18	897,74	15,9	999,02	2,35	7,02

Tabella 25 - massa volumica apparente dello strato di binder

Tabella 26 - massa volumica apparente dello strato di base

5.2.4.3. ANALISI VISIVA DELL'INTASAMENTO

In laboratorio è stato analizzato le carote estratte per verificare il corretto intasamento dello strato superficiale. Come si evince chiaramente dalle immagini qui sotto, si evidenzia un non completo intasamento dei campioni prelevati dall'area 1. Questo è da imputarsi al fatto che, al momento della stesa, sono sorte delle difficoltà nel regolare il giusto apporto di acqua alla miscela, molto probabilmente è stata aggiunta acqua in abbondanza. Un'altra spiegazione potrebbe essere legata alla tipologia di miscela cementizia che, in quest'area era priva di espansivo.

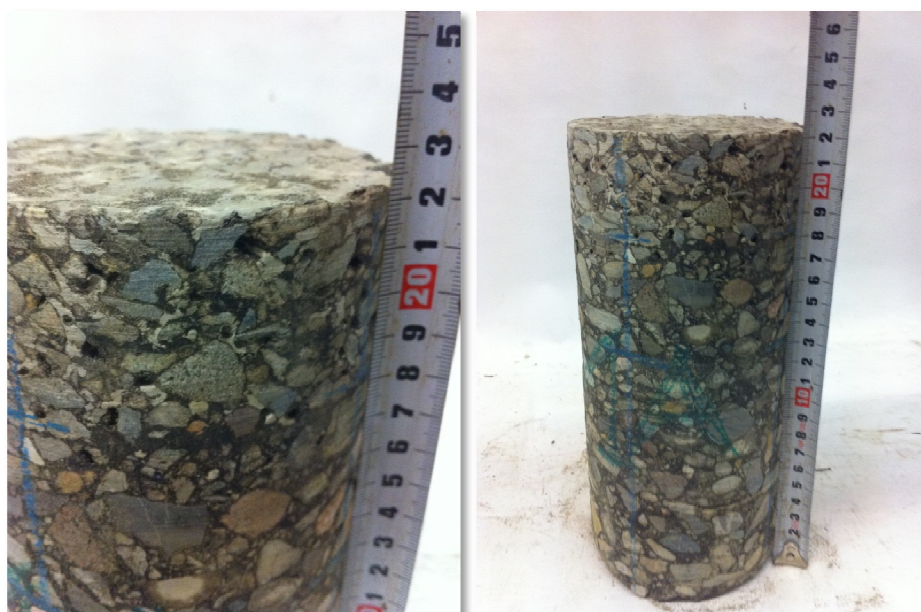


Figura 49 - analisi visiva dell'intasamento: campione area 1

Per quanto concerne invece le carote prelevate dall'area 2 e 3 si evidenzia un corretto e completo intasamento dello strato d'usura. Ricordiamo che in queste aree è stata utilizzata una miscela cementizia foto catalitica con espansivo.

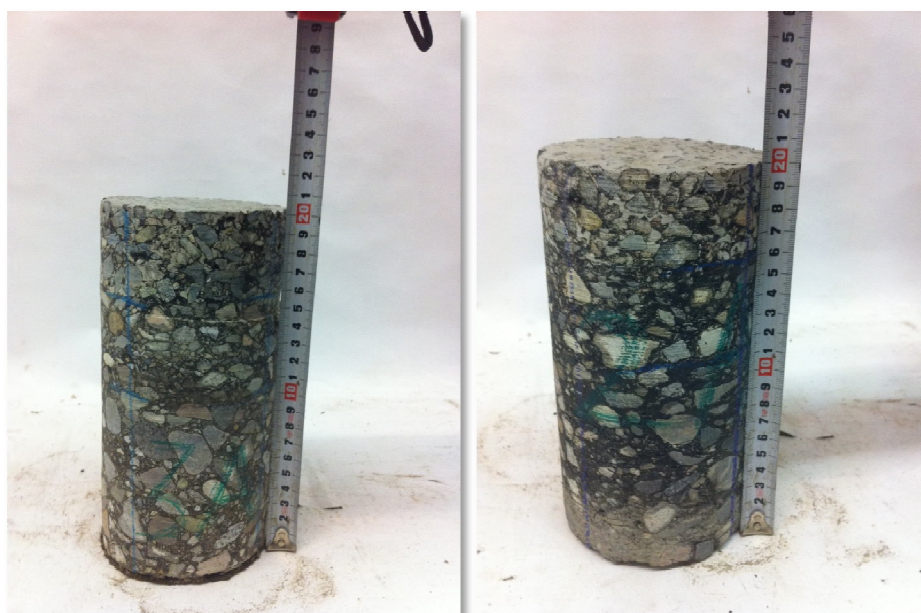


Figura 50 - analisi visiva dell'intasamento, campione area 2 e 3

5.2.4.4. ANALISI VISIVA DELLA CONDIZIONE DEL MATERIALE

Come si può ben vedere dalle foto qui sottostanti e come già accennato in precedenza possiamo dire che:

- nelle carote prelevate dall'area 1 si manifesta unicamente una non completo inatasamento dello strato d'usura mentre, per quanto riguarda lo strato di base e binder, il conglomerato bituminoso appare correttamente compattato.

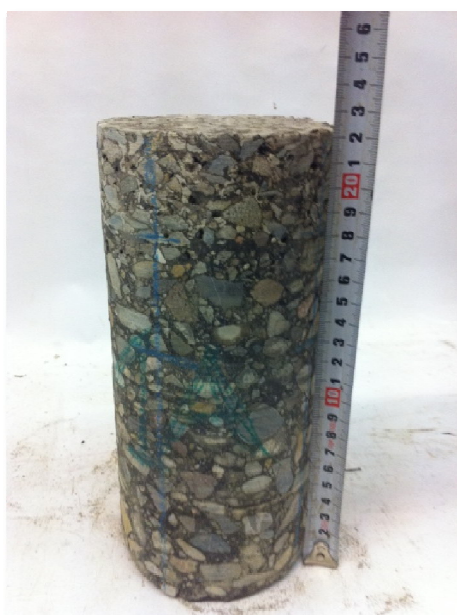


Figura 51 - carota estratta dall'area 1

- nelle carote prelevate dalle aree 2 e 3 l'intasamento sembra più corretto e anche qui la compattazione degli strati sembra corretta.

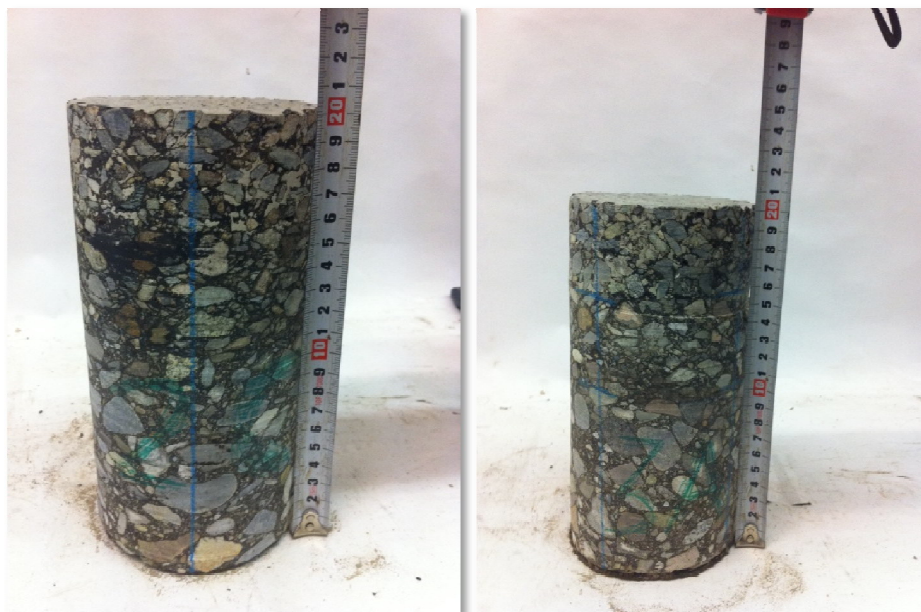


Figura 52 - carote estratte dalle aree 2 e 3

Osservazione: nella figura di destra si può notare al di sotto dello strato di base la geogriglia.

5.3. FOTOCATALITICO

5.3.1. MISURE DI ABBATTIMENTO DEGLI INQUINANTI DELLE CAROTE

Al fine di valutare i possibili effetti delle variazioni di intensità di flusso inquinante in ingresso, sono state realizzate tre differenti cicli di prova:

- secondo la norma UNI 11247 ovvero con un flusso di gas pari a 1,5 l/min (0,75 l/min di NO_x e 0,75 l/min di aria);
- con un flusso di gas pari a 1 l/min (0,5 l/min di NO_x e 0,5 l/min di aria);
- con un flusso di gas pari a 3 l/min (1,5 l/min di NO_x e 1,5 l/min di aria).

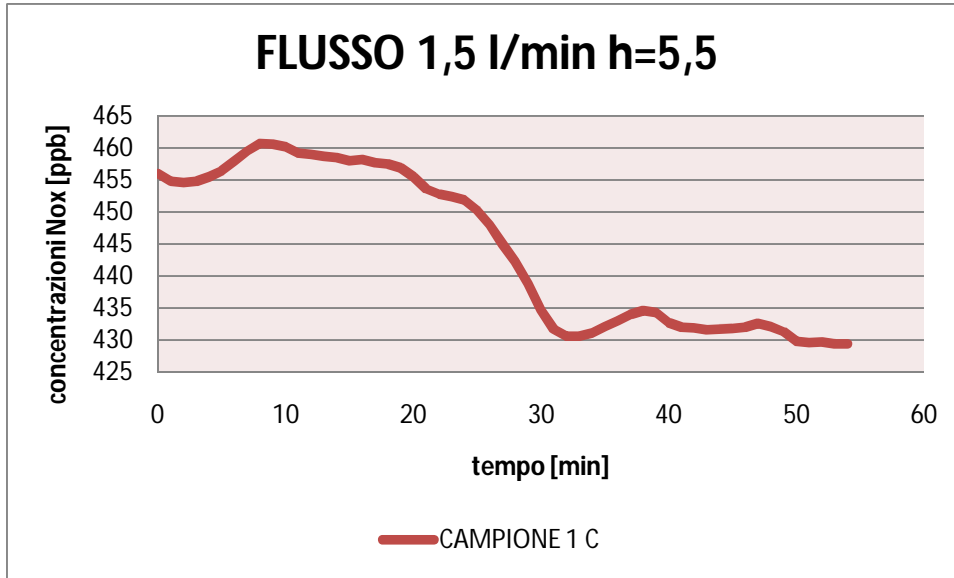
Come già accennato, si è proceduto inizialmente al confinamento del campione per poter concentrare la reazione solo sulla parte superficiale essendo il campione totalmente intasato.

Inizialmente si è proceduto secondo la norma uni con un flusso di 1,5 l/min di gas. Sono stati analizzati due campioni differenti:

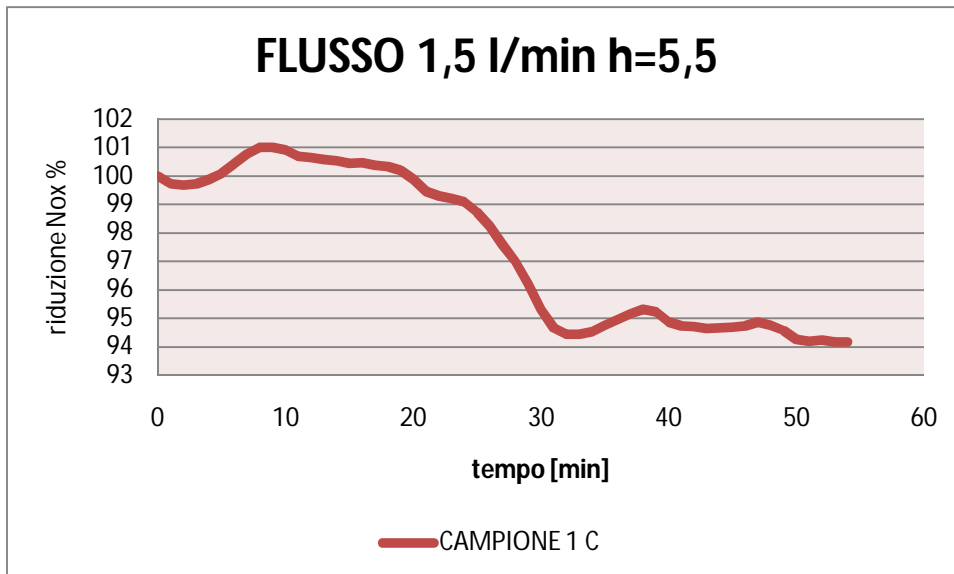
- uno appartenente all'area 1 e quindi caratterizzato da una malta fotocatalitica senza espansivo;

- l'altro appartenente all'area 3 e quindi caratterizzato da malta foto catalitica con espansivo.

Qui sotto si mostrano i risultati.

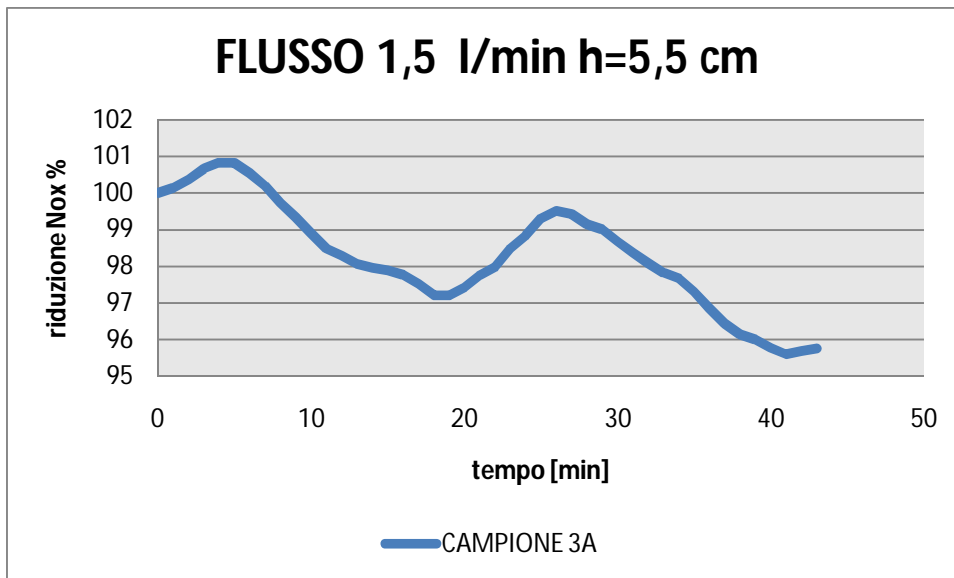
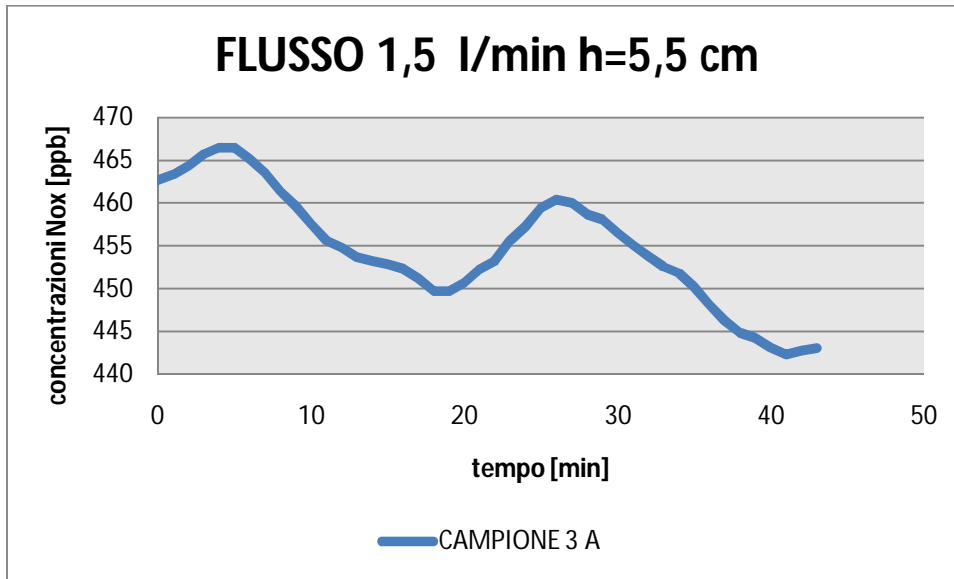


Per maggior chiarezza è stato riportato un secondo grafico in cui è espressa la riduzione percentuale degli inquinanti dall'inizio alla fine della prova.



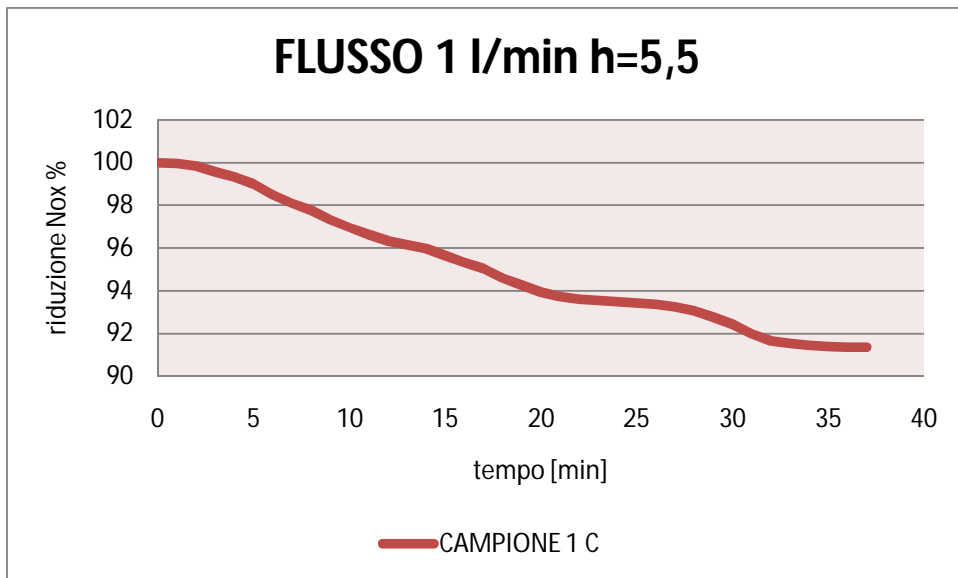
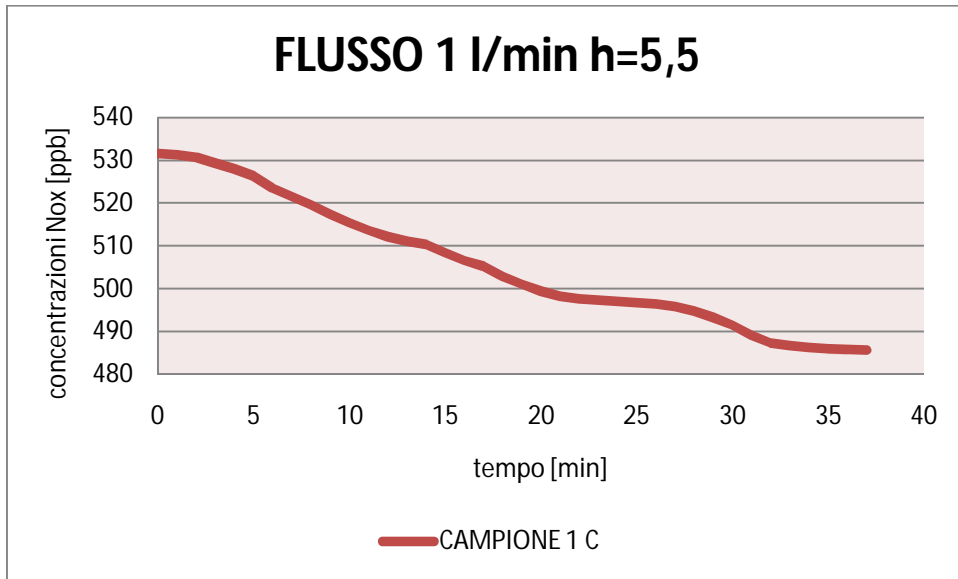
Dai grafici si può notare come l'abbattimento sperato non si è registrato.

Riportiamo i risultati del campione con espansivo:

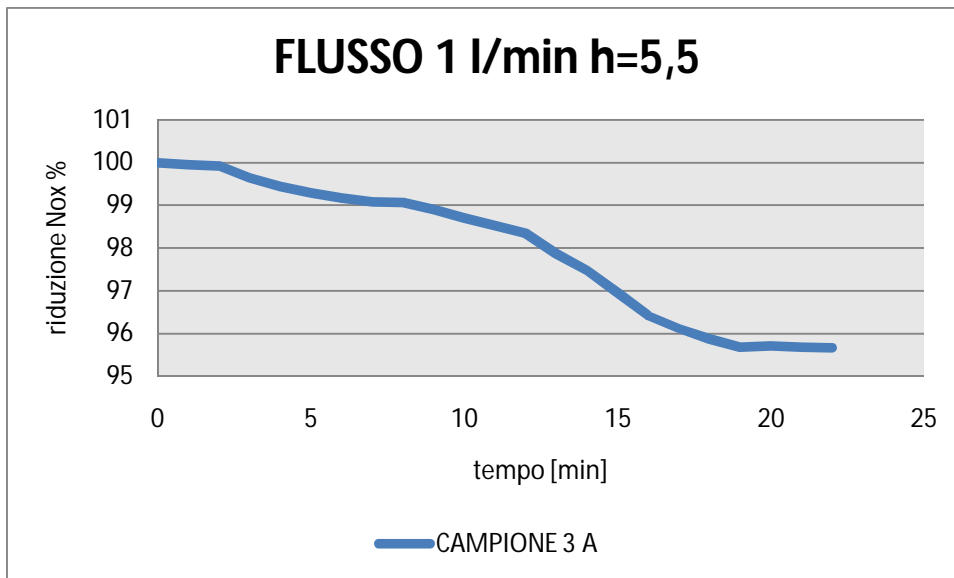
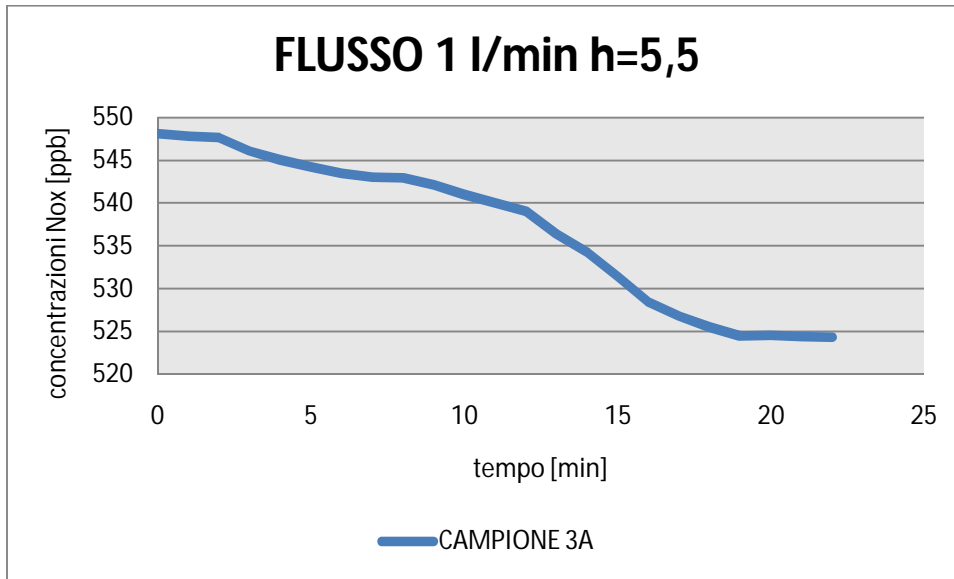


Anche in questo caso non si registra un abbattimento significativo. L'altezza dei campioni è stata posta pari a 5,5, questo grazie all'utilizzo di distanziatori.

Si è quindi proceduto a variare il flusso di gas, ponendolo uguale a 1 l/min di cui 0,5 l/min di aria e 0,5 l/min di Ossidi di Azoto. I risultati ottenuti sono i seguenti:

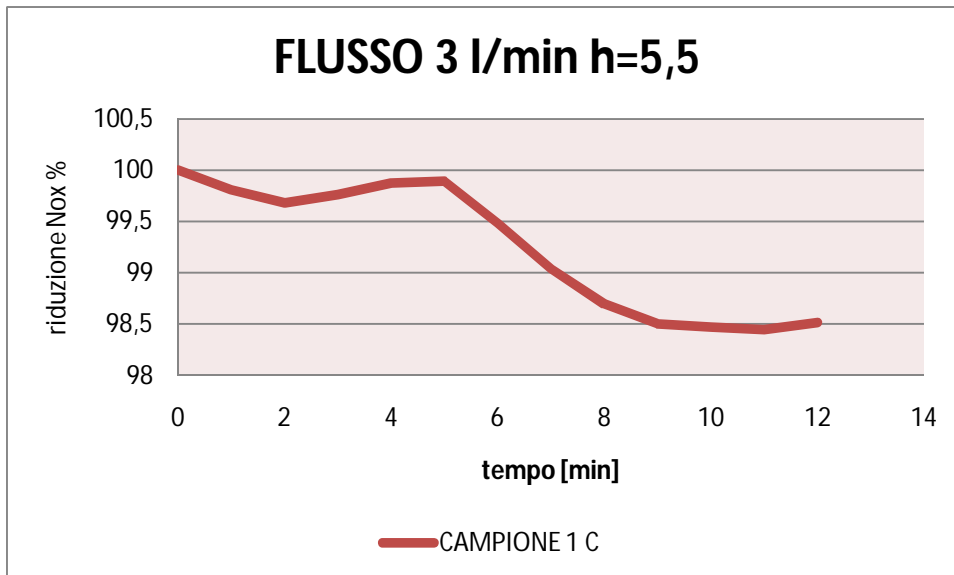
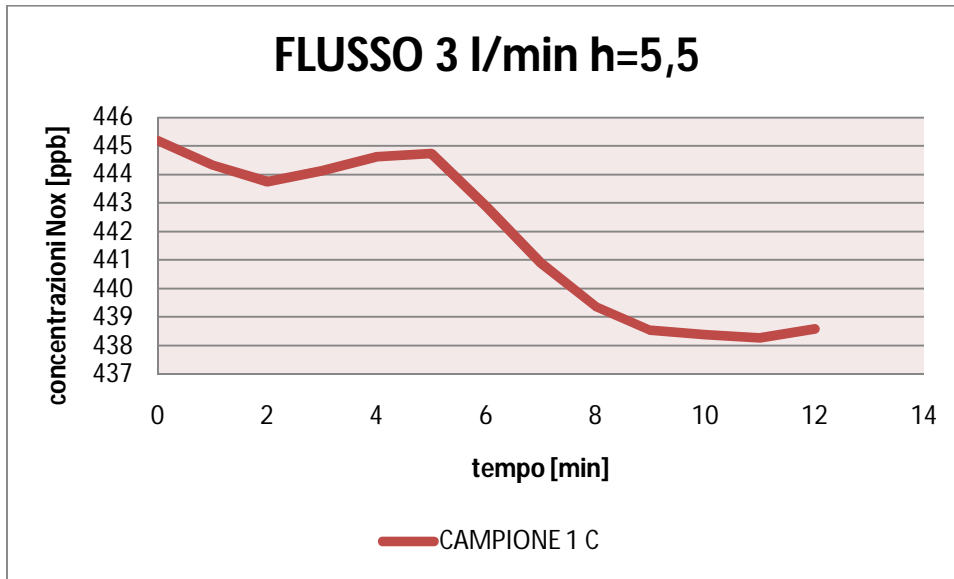


Mentre per il campione con espansivo:

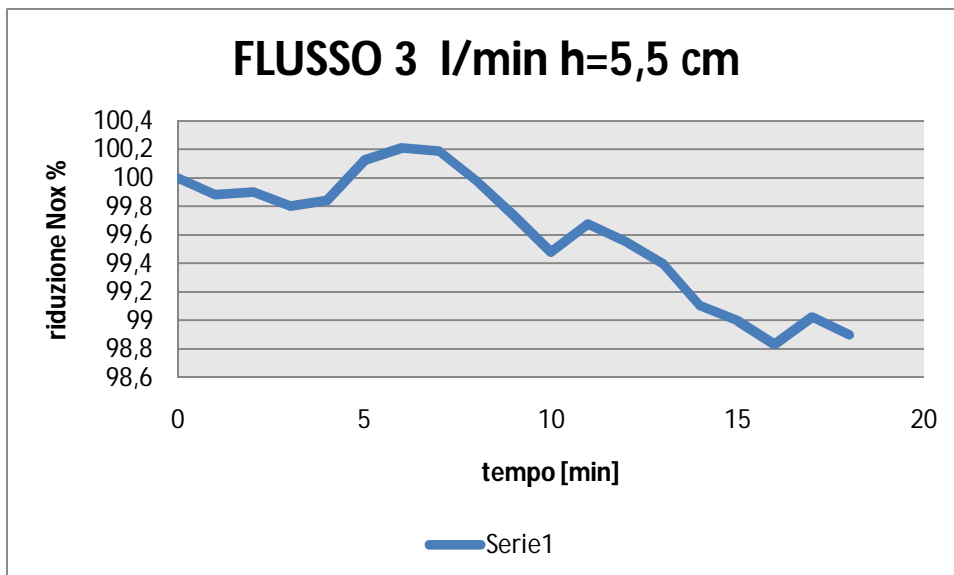
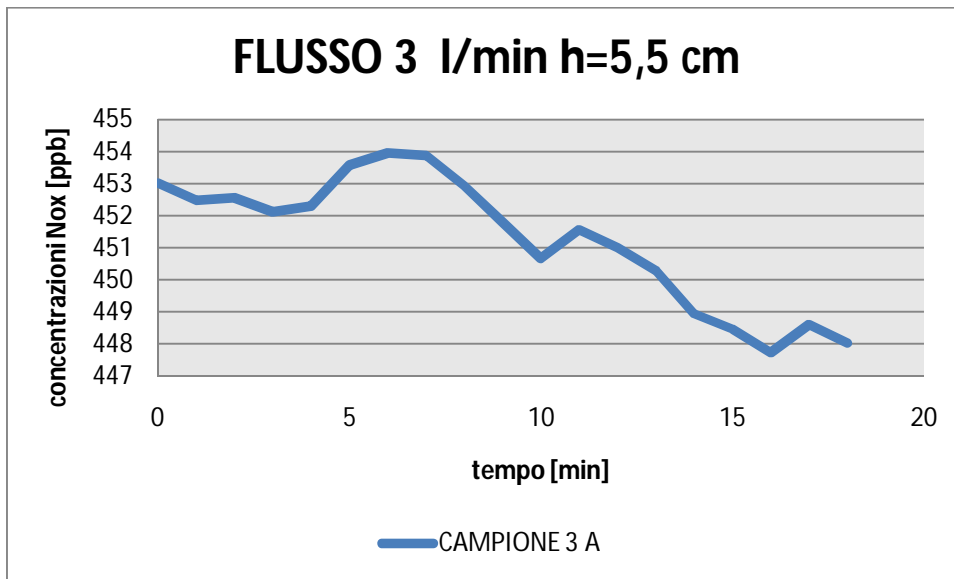


Anche qui l'abbattimento misurato non risulta essere significativo.

Per ultimo si è aumentato il flusso a 3 l/min di cui 1,5 l/min di aria e 1,5 l/min di Ossidi di Azoto.



E per il campione 3 A:



5.3.2. MISURE DI ABBATTIMENTO DEGLI INQUINANTI DEI PROVINI REALIZZATI CON PRESSA GIRATORIA E SUCCESSIVAMENTE INTASATI CON TX PERCOCEM

5.3.3. USURA SUPERFICIALE

6. CONCLUSIONI

Per quanto concerne l'analisi delle caratteristiche superficiali come riportato dai risultati di altezza in sabbia e Skid possiamo dire che la pavimentazione in oggetto ha dato buoni risultati. A lungo termine sarebbe interessante indagare l'andamento di tali caratteristiche superficiali. Quello che ci aspettiamo è un aumento dei valori di Skid dovuti ad una costante usura dello strato superficiale della pavimentazione.

Per quanto concerne l'attività fotocatalitica dobbiamo innanzitutto fare alcune considerazioni: a differenze delle prove di laboratorio, nelle quali è possibile mantenere costanti alcuni parametri (tra i quali soprattutto la radianza, l'umidità e il flusso di inquinanti), nelle condizioni reali le variabili in gioco sono più aleatorie:

- Nelle condizioni reali l'umidità varia continuamente in funzione della temperatura e dei venti mentre, nelle analisi di laboratorio l'umidità del gas viene controllata e mantenuta costante intorno al 50% nelle condizioni di lampada accesa. E' possibile ipotizzare una resa del fotocatalizzatore, in climi molto umidi, molto maggiore di quelle che si avrebbe in zone più secche;
- All'interno della camera di reazione non vi sono correnti d'aria che possano ridurre o aumentare la resa del fotocatalizzatore;
- A differenza delle carote estratte dal campo prove, soprattutto con riferimento a quelle prese nell'area 1, i provini da noi realizzati in laboratorio presentano una distribuzione ottimale del fotocatalizzatore cioè un completo intasamento del campione, senza alcuna asportazione che si riscontra lievemente nelle carote dovuta al traffico;
- Mentre in laboratorio il flusso radiante è sempre costante, all'aperto l'intensità della radiazione solare non rimane costante durante il giorno e varia molto nei diversi periodi dell'anno. Inoltre il flusso radiante in laboratorio è perfettamente perpendicolare al campione mentre all'aperto no;
- Sulle pavimentazioni reali si deposita spesso dello sporco che non permette il completo irraggiamento del fotocatalizzatore poiché lo schermava dai raggi solari. Quindi la realizzazione di pavimentazioni fotocatalitiche dovrebbe essere accompagnata da una pulizia costante della strada;

- Il passaggio dei veicoli provoca un usura del manto stradale e con il tempo a una diminuzione del materiale fotocatalitico presente sulla superficie. Tale problema risulta essere di notevole rilevanza soprattutto nel caso di stesura del fotocatalizzatore con il metodo dello spruzzaggio.

7. BIBLIOGRAFIA

- CNR Roma Istituto di Inquinamento Atmosferico Ivo Allegrini: "Relazione Tecnica sulle potenzialità dei materiali al biossido di titanio";
- **[1]** Fujishima A., Hashimoto K., Watanabe T., "*TiO₂ photocatalysis: fundamentals and applications*", Tokyo: BKC, Inc. 1999;
- **[2]** Tesi di laurea di Lambrugo S., "Innovazione nei requisiti delle pavimentazioni stradali: le proprietà fotocatalitiche", Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Infrastrutture Viarie, Ambientale e Rilevamento, Dottorato in Geodesia e Geomatica, 2007.
- **[3]** Prof. Ing. Franco Sandrolini, Ing. Domenico Giordano: "il Biossido di Titanio nei materiali da costruzione antinquinamento ed autopulenti", Dipartimento di Chimica Applicata e Tecnologia dei Materiali, 2008;
- **[4]** Giovanni Da Rios, Susanna Lambrugo, Federico Fiori: "Fotocatalisi per l'ambiente urbano" - Strade & Autostrade 2007;
- **[5]** Jimmy Chai-Mei Yu: "Deactivation and regeneration of environmentally exposed titanium dioxide (TiO₂) based products", Testing Report, Department of Chemistry, The Chinese University of Honk Hong 2007;
- **[6]** J.M. Hermrmann, L. Réruchon, E. Puzenat, C. Guillard - "Photocatalysis: from fundamentals to self-cleaning applications", Rilem Symposium on photocatalysis, 2007, Florence, Italy;
- **[7]** L. Cassar, Carmine Pepe, G.P. Tognon, G.L. Guerrini, R. Amadelli, - "White cement for architectural concret, possessing photocatalytic properties" 11th International Congress on the Chemistry of Cement 2008;
- **[8]** L. Cassar, Carmine Pepe, G.P. Tognon, G.L. Guerrini, R. Amadelli, - "il cemento bianco per calcestruzzi ad alte prestazioni", L'industria italiana del cemento 2000;
- **[9]** Tesi di laurea di Susanna Alberti, A. Zaffaroni: "Pavimentazioni stradali fotocatalitiche: indagine sperimentale dei parametri di prova", Politecnico di Milano, facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale, tesi di laurea 2009-2010;
- **[10]** G. Da Rios, S. Lambrugo, M. Bacchi: "Analisi sperimentale per pavimentazioni urbane fotocatalitiche", 17° convegno nazionale S.I.I.V 2008;

- **[11]** Giovanni Da Rios, Susanna Lambrugo: "pavimentazioni di supporto ad azioni fotocatalitiche" - Strade & Autostrade 2007;
- **[12]** Stephan P. Blöß, Lothar Elfenthal, "*Doped titanium dioxide as a photocatalyst for UV and Visible Light*", Rilem Symposium on photocatalysis, 2007, Florence, Italy;
- **[13]** Irie H., Watanabe Y. e Hashimoto K., "*Carbon doped Anatase TiO₂ Powders as a visible light photocatalyst*", Chemistry letters 32, 2003;
- **[14]** Crispino M., Lambrugo S., "*An experimental characterization of a photocatalytic mortar for road bituminous pavement*", Rilem Symposium on photocatalysis, 2007, Florence, Italy.
- **[15]** Crispino M., Lambrugo S., "Effectiveness of a photocatalytic wearing course through experimental analysis", ISAP, Zurich, 2008. (in corso di pubblicazione);
- **[16]** Tesi di laurea di: Santagata F. A., Pasquini E., Bocci M., Canestrari F.: "VALUTAZIONE SPERIMENTALE DELL'EFFICACIA DISINQUINANTE DI PAVIMENTAZIONI FOTOCATALITICHE" Università Politecnica delle Marche, 17° convegno nazionale SIIV, 2008;
- Th.Maggos, J.G.Bartzis, M.Liakou, C.Gobin: "PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF NO_x GASES USING TiO₂ – CONTAINING PAINT: AREAL SCALE STUDY" 2007 nel contesto del progetto europeo PICADA;
- Th.Maggos, J.G.Bartzis, A.Plassais, Ch.Vasilokos, N.Moussiopoulos, L.Bonfous: "PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF NO_x IN A PILOT STREET CANYON CONFIGURATION USING TiO₂ – MORTAR PANELS" 2007.
- " TX Active, principio attivo fotocatalitico" approfondimento tecnico , ITALCEMENTI GROUP, 2009;
- " TX Active: presentata la prima soluzione attiva al problema dell'inquinamento , ITALCEMENTI GROUP, 2006;
- L. Cassar - Photocatalysis of cementitious materials: clean buildings and cleanair", MRS Bulletin, 2004
- E. Toraldo, S. Lambrugo - "The optimization of photocatalytic mortar for road pavements", 4th International Conference Bituminous mixtures and pavements, Thessaloniki, Greece, April 2007;
- Takashi Ibusuki, "Environmental conservation by photocatalyst technology", Electrochemistry 2006;

- Y. Murata, K. Kamitani, H. Tawara, H. Obata, Y. Yamada - "NOx removing pavement structures", US patent office, 2002;
- Chunxiang Qian, Lianfang Zhao, Dafang Zu, "Photocatalytic concrete and its performance", 17th ASCE, 2004;
- norma UNI 11247 relativa al protocollo di prova, novembre 2010;
- " Caratterizzazione di pavimentazioni stradali fotocatalitiche ", Norme tecniche del Comune di Milano , Ottobre 2007;
- AIR PURIFICATION AND SELF-CLEANING MATERIALS: PHOTOCATALYTIC PAVEMENT BLOCKS ON THE 'LEIEN' OF ANTWERP , A. Beeldens, K. Redant ; Belgian Road Research Centre, Brussels, Belgium 2007;
- Air Purification Test Procedure For Photocatalytic Materials (Technical Report), The National Institute for Resources and Environment (NIRE), Japan, (2000);
- NOx removal from vehicle emissions by functionality surface of asphalt road Meng Chena, Yanhua Liub, College of Traffic, Northeast Forestry University, 26 Hexing Road, Harbin 150040, People's Republic of China,2009;
- Gouvea, C.A.K., Wypych, F., Moraes, S.G., Duran, N., Nagata, N., Peralta-Zamora, P., (2000), Semiconductorassisted photocatalytic degradation of reactive dyes in aqueous solution, Pergamon: Chemosphere 40, pp. 433-440;
- Kaneko, M., & Okura, I. (2002). Photocatalysis science and technology.In Cleaning Atmospheric Environment (pp. 123–155).Tokyo: Kodansha;
- "Photocatalytic Coating on Road Pavements/Structures for NOx Abatement" Presented to Houston Advanced Research Center Daniel H. Chen, Kuyen Li, Photocatalysis & Solar Processing Lab Robert Yuan, Andy Green Center for Composite Materials Lamar University, Beaumont, Texas 2005;

8. ALLEGATI

8.3. ANALISI GRANULOMETRICA

STRATO DI BASE				
ANALISI GRANULOMETRICA				
UNI EN 933-1		PESO TRATTENUTO	PESO PROG.	PESO PASSANTE
SETACCI ISO 3310-1 & ISO 3310-2	mm	g	[%]	[%]
	125	0	0	100
	63	0	0	100
	31,5	0	0	100
	16	475,06	32,09	67,91
	8	777,62	52,53	47,47
	4	924,66	62,46	37,54
	2	1018,68	68,81	31,19
	1	1068,44	72,17	27,83
	0,5	1168,59	78,93	21,07
	0,4	1238,93	83,69	16,31
	0,25	1362,2	92,01	7,99
	0,125	1424,21	96,20	3,80
	0,075	1445,32	97,63	2,37
	0,063	1452,79	98,13	1,87
FONDO [g] = E		1478,38	99,86	0,14
PESO INIZIALE [g] = O		1480,46	100,00	0

Tabella 27 - analisi granulometrica strato di base

STRATO DI BINDER				
ANALISI GRANULOMETRICA				
UNI EN 933-1		PESO TRATTENUTO	PESO PROG.	PESO PASSANTE
SETACCI ISO 3310-1 & ISO 3310-2	mm	g	[%]	[%]
	125	0	0	100,00
	63	0	0	100,00
	31,5	0	0	100,00
	16	144,52	9,76	89,80
	8	528,61	35,71	62,69
	4	865,29	58,45	38,93
	2	1046,94	70,72	26,11
	1	1111,05	75,05	21,59
	0,5	1189,35	80,34	16,06
	0,4	1238,07	83,63	12,62
	0,25	1319,24	89,11	6,90
	0,125	1367,47	92,37	3,49
	0,075	1386,62	93,66	2,14
0,063	1392,69	94,07	1,71	
FONDO [g] = E		1414,15	95,52	0,20
PESO INIZIALE [g] = O		1416,95	100,00	0,00

Tabella 28 - analisi granulometrica strato d'usura

STRATO DI USURA				
ANALISI GRANULOMETRICA				
UNI EN 933-1		PESO TRATTENUTO	PESO PROG.	PESO PASSANTE
SETACCI ISO 3310-1 & ISO 3310-2	mm	g	[%]	[%]
	125	0	0	100,00
	63	0	0	100,00
	31,5	0	0	100,00
	16	0	0	100,00
	8	860,06	58,09	37,90
	4	1175,85	79,42	15,10
	2	1252,64	84,61	9,56
	1	1281,21	86,54	7,49
	0,5	1299,56	87,78	6,17
	0,4	1308,86	88,41	5,50
	0,25	1328,08	89,71	4,11
	0,125	1345,72	90,90	2,83
	0,075	1357,42	91,69	1,99
0,063	1365,99	92,27	1,37	
FONDO [g] = E		1380,53	93,25	0,32
PESO INIZIALE [g] = O		1384,98	100,00	0,00

Tabella 29 - analisi granulometrica dello strato d'usura

8.4. PERCENTUALE DI VUOTI DELLO STRATO D'USURA CONFEZIONATO IN LABORATORIO CON PRESSA GIRATORIA

USURA	POSIZIONE DELLE MISURE DEL DIAMETRO		DIAMETRO [cm]	ALTEZZA [cm]
1° CAMPIONE	1° FACCI A	ORIZZ.	10,18	6,16
		VERT.	10,27	6,05
	2° FACCI A	ORIZZ.	10,2	6,15
		VERT.	10,19	6,1
	MEDIA		10,21	6,115
2° CAMPIONE	3° FACCI A	ORIZZ.	10,11	6,28
		VERT.	10,07	6,29
	4° FACCI A	ORIZZ.	10,15	6,23
		VERT.	10,13	6,25
	MEDIA		10,115	6,2625
3° CAMPIONE	5° FACCI A	ORIZZ.	10,67	6,32
		VERT.	10,31	6,22
	6° FACCI A	ORIZZ.	10,72	6,23
		VERT.	10,37	6,16
	MEDIA		10,5175	6,2325
4° CAMPIONE	7° FACCI A	ORIZZ.	9,98	6,23
		VERT.	9,99	6,39
	8° FACCI A	ORIZZ.	9,99	6,22
		VERT.	9,98	6,24
	MEDIA		9,985	6,27
5° CAMPIONE	9° FACCI A	ORIZZ.	10,09	6,29
		VERT.	10,07	6,23
	10° FACCI A	ORIZZ.	10,08	6,2
		VERT.	10,1	6,24
	MEDIA		10,085	6,24
6° CAMPIONE	11° FACCI A	ORIZZ.	10,03	6,4
		VERT.	10,01	6,36
	12° FACCI A	ORIZZ.	10,04	6,33
		VERT.	10,01	6,31
	MEDIA		10,0225	6,35
7° CAMPIONE	13° FACCI A	ORIZZ.	10,05	6,22
		VERT.	9,98	6,2
	14° FACCI A	ORIZZ.	10,06	6,21
		VERT.	10,04	6,23
	MEDIA		10,0325	6,215
8° CAMPIONE	15° FACCI A	ORIZZ.	10,07	6,35
		VERT.	10,1	6,28
	16° FACCI A	ORIZZ.	10,06	6,26
		VERT.	10,06	6,28
	MEDIA		10,0725	6,2925
9° CAMPIONE	17° FACCI A	ORIZZ.	10,03	6,35
		VERT.	10,07	6,32
	18° FACCI A	ORIZZ.	10,08	6,32
		VERT.	10,1	6,29
	MEDIA		10,07	6,32

USURA	
CAMPIONE 1	
VOLUME	500,65
PESO [g]	952,24
MASSA VOLUMICA	1,90

USURA	
CAMPIONE 2	
VOLUME	503,23
PESO [g]	949,86
MASSA VOLUMICA	1,89

USURA	
CAMPIONE 3	
VOLUME	541,47
PESO [g]	951,12
MASSA VOLUMICA	1,76

USURA	
CAMPIONE 4	
VOLUME	490,97
PESO [g]	950,58
MASSA VOLUMICA	1,94

USURA	
CAMPIONE 5	
VOLUME	498,46
PESO [g]	940,57
MASSA VOLUMICA	1,89

USURA	
CAMPIONE 6	
VOLUME	500,97
PESO [g]	954,06
MASSA VOLUMICA	1,90

USURA	
CAMPIONE 7	
VOLUME	491,30
PESO [g]	951,92
MASSA VOLUMICA	1,94

USURA	
CAMPIONE 8	
VOLUME	501,40
PESO [g]	950,95
MASSA VOLUMICA	1,90

USURA	
CAMPIONE 9	
VOLUME	503,35
PESO [g]	951,16
MASSA VOLUMICA	1,89

USURA	
	% VUOTI
CAMPIONE 1	26,97
CAMPIONE 2	27,53
CAMPIONE 3	32,56
CAMPIONE 4	25,66
CAMPIONE 5	27,55
CAMPIONE 6	26,88
CAMPIONE 7	25,61
CAMPIONE 8	27,18
CAMPIONE 9	27,45

Tabella 30 - analisi della % di vuoti dello strato d'usura

8.5. PERCENTUALE DI VUOTI DELLO STRATO D'USURA CONFEZIONATO IN LABORATORIO CON MARSHALL

USURA	POSIZIONE DELLE MISURE DEL DIAMETRO		DIAMTERO [cm]	ALTEZZA [cm]
1° CAMPIONE	1° FACCIA	ORIZZ.	10,13	5,93
		VERT.	10,14	5,90
	2° FACCIA	ORIZZ.	10,14	5,90
		VERT.	10,12	5,88
	MEDIA		10,13	5,90
2° CAMPIONE	3° FACCIA	ORIZZ.	10,14	5,90
		VERT.	10,12	5,90
	4° FACCIA	ORIZZ.	10,14	5,90
		VERT.	10,12	5,94
	MEDIA		10,13	5,91
3° CAMPIONE	5° FACCIA	ORIZZ.	10,14	5,89
		VERT.	10,11	5,92
	6° FACCIA	ORIZZ.	10,12	5,93
		VERT.	10,13	5,92
	MEDIA		10,13	5,92
4° CAMPIONE	7° FACCIA	ORIZZ.	10,15	6,14
		VERT.	10,15	6,13
	8° FACCIA	ORIZZ.	10,17	6,16
		VERT.	10,14	6,20
	MEDIA		10,15	6,16
5° CAMPIONE	9° FACCIA	ORIZZ.	10,14	5,85
		VERT.	10,14	5,84
	10° FACCIA	ORIZZ.	10,13	5,82
		VERT.	10,14	5,81
	MEDIA		10,14	5,83
6° CAMPIONE	11° FACCIA	ORIZZ.	10,15	6,00
		VERT.	10,15	5,99
	12° FACCIA	ORIZZ.	10,14	5,99
		VERT.	10,12	6,00
	MEDIA		10,14	6,00

USURA	
CAMPIONE 1	
VOLUME [cm ³]	475,95
PESO [g]	947,56
MASSA VOLUMICA [g/cm ³]	1,99

USURA	
CAMPIONE 2	
VOLUME [cm ³]	476,32
PESO [g]	949,80
MASSA VOLUMICA [g/cm ³]	1,99

USURA	
CAMPIONE 3	
VOLUME [cm ³]	476,25
PESO [g]	949,78
MASSA VOLUMICA [g/cm ³]	1,99

USURA	
CAMPIONE 4	
VOLUME [cm ³]	498,47
PESO [g]	948,08
MASSA VOLUMICA [g/cm ³]	1,90

USURA	
CAMPIONE 5	
VOLUME [cm ³]	470,57
PESO [g]	949,85
MASSA VOLUMICA [g/cm ³]	2,02

USURA	
CAMPIONE 6	
VOLUME [cm ³]	484,12
PESO [g]	946,18
MASSA VOLUMICA [g/cm ³]	1,95

USURA	
	% VUOTI
PROVINO 1	23,56
PROVINO 2	23,44
PROVINO 3	23,43
PROVINO 4	26,97
PROVINO 5	22,50
PROVINO 6	24,96

Tabella 31 - % vuoti dello strato d'usura

8.6. SPESSORI DEGLI STRATI DI BASE, BINDER, USURA DELLE CAROTE

BASE	DIAMTERO [cm]	ALTEZZA [cm]
CAMPIONE 1 A	10,35	12,975
CAMPIONE 1B	10,375	11,6125
CAMPIONE 1C	10,3	11,2125
CAMPIONE 2 A	10,43	10,875
CAMPIONE 2C	10,2125	11,19
CAMPIONE 3A	10,3125	10,525
CAMPIONE 3B	10,2375	11,1225
CAMPIONE 3C	10,1875	10,6625

Tabella 32 - dimensioni strato di base, carote

BINDER	DIAMTERO [cm]	ALTEZZA [cm]
CAMPIONE 1 A	10,325	4,51
CAMPIONE 1B	10,4	5,36
CAMPIONE 1C	10,3875	4,52
CAMPIONE 2 A	10,38	4,21
CAMPIONE 2C	10,225	5,275
CAMPIONE 3A	10,2025	5,285
CAMPIONE 3B	10,1875	4,725
CAMPIONE 3C	10,25	4,5675

Tabella 33 - dimensioni strato di binder, carote

BASE	DIAMTERO [cm]	ALTEZZA [cm]
CAMPIONE 1 A	10,3975	4,15
CAMPIONE 1B	10,2125	3,66
CAMPIONE 1C	10,1875	4,865
CAMPIONE 2 A	10,2625	3,4475
CAMPIONE 2C	10,2475	3,455
CAMPIONE 3A	10,25	4,2575
CAMPIONE 3B	10,2075	4,09
CAMPIONE 3C	10,2075	4,815

Tabella 34 - dimensioni strato di usura

