

# Impatto ambientale nella produzione e uso del bitume stradale

## *Environmental impact of road bitumen use and production*

A cura del SITEB

### Riassunto

Nell'articolo, tratto dallo studio *Bitume & Asfalto. Stato dell'arte in rapporto all'esposizione professionale e all'impatto ambientale*, prodotto per il SITEB, dal Prof. Marco Scarsella dell'Università di Roma "La Sapienza", vengono analizzate tutte le possibili vie di dispersione nell'ambiente dei principali inquinanti che interessano il bitume stradale. Il contributo alle emissioni fornito dal bitume appare relativamente basso, sempre che, ovviamente, vi sia una corretta gestione di tale materiale, soprattutto relativamente alla sua temperatura di stoccaggio e di miscelazione durante la preparazione del conglomerato.

### Summary

*The aim of this article, taken from the study Bitume & Asfalto. Stato dell'arte in rapporto all'esposizione professionale e all'impatto ambientale, carried out for SITEB by Prof. Marco Scarsella of the University of Rome "La Sapienza", is to evaluate all possible environmental impacts of the main polluting agents related to the use of bitumen, in order to assess the connected risks for the environment and workers health.*

*The contribution of the bitumen to the environmental impact is quite low and its use is safe, providing that the good practices are respected during production and laying of the asphalt mixture.*

## 1. Il rilascio di inquinanti

Mentre numerosissimi sono gli studi epidemiologici e le ricerche di laboratorio attualmente disponibili in letteratura relativamente all'esposizione professionale al bitume, e in particolare ai suoi fumi, relativamente pochi sono i lavori scientifici e le indagini riguardanti il rischio di impatto ambientale e di esposizione non professionale connessi con il rilascio di inquinanti da durante l'uso del bitume. Gli inquinanti generalmente considerati sono quelli tipicamente monitorati per le attività industriali:

- Polveri sottili (PM, dall'inglese Particulate Matter). Vengono distinte in PM<sub>10</sub> e PM<sub>2,5</sub>. Con PM<sub>10</sub> (polveri inalabili) viene definito il particolato formato da particelle inferiori a 10 µm, di cui le polveri sottili PM<sub>2,5</sub>

(polveri toraciche) rappresentano le particelle con diametro inferiore a 2,5 µm. Tale distinzione riflette la differente capacità del particolato di raggiungere le diverse parti dell'apparato respiratorio in funzione delle sue dimensioni: le particelle di diametro compreso tra 10 µm e 2,5 µm



sono in grado di penetrare nell'apparato respiratorio dalle cavità nasali fino ai bronchioli, mentre quelle di diametro inferiore a 2,5 µm possono penetrare più profondamente nei polmoni fino agli alveoli.

- ▶ Composti organici volatili (VOC). Secondo la Direttiva Europea 2004/42/CE (21 Aprile 2004) vengono definiti Composti Organici Volatili quei composti organici che presentano un punto di ebollizione inferiore o uguale a 250 °C alla pressione standard di 101,3 kPa. Una definizione alternativa, spesso utilizzata nelle normative internazionali (ad esempio Direttiva EC 1999/13/EC) definisce i VOC come quei composti organici che presentano a 293,15 K (20°C) una tensione di vapore maggiore o uguale a 0,01 kPa. I VOC comprendono numerose classi di sostanze organiche dalle caratteristiche chimico-fisiche differenti, generalmente liquide a temperatura ambiente e caratterizzate da un punto di ebollizione compreso tra circa 50 e 250 °C alla pressione di 1 atm. Il termine "volatile" indica la tendenza di tali sostanze chimiche ad evaporare a temperatura ambiente. I composti che rientrano in questa categoria sono più di 300. Tra i più noti sono gli idrocarburi alifatici (dal n-esano al n-esadecano, metilenesi, ecc.), i terpeni, gli idrocarburi aromatici (benzene e derivati: toluene, xileni, stirene), gli idrocarburi alogenati (cloroformio, diclorometano, clorobenzeni, ecc.), gli alcoli (etanolo, propanolo, butanolo e derivati), gli esteri, i chetoni, e le aldeidi (tra cui la formaldeide).
- ▶ Idrocarburi policiclici aromatici (IPA). Composti organici la cui struttura principale è costituita da due o più anelli benzenici condensati. A causa della loro scarsa volatilità non vengono considerati come facenti parte dei VOC (tranne eventualmente il naftalene), e vengono classificati come composti organici semi volatili (SVOC).
- ▶ Ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>).
- ▶ Ossidi di zolfo (SO<sub>x</sub>).
- ▶ Ossido di carbonio (CO).

Come si nota, ad esclusione degli IPA, si tratta di inquinanti atmosferici la cui fonte di emissione, relativamente al bitume, può essere sostanzialmente identificata con gli impianti di produzione di conglomerato. A conferma di questo non risultano presenti in letteratura studi specifici sulle emissioni di inquinanti atmosferici da manti stradali, se

si prescinde da quelli relativi al rilascio di particolato generato dalla frizione tra pneumatico e manto stradale.

Più complesso è il discorso relativamente agli IPA. L'interrogativo centrale, a tal riguardo, è se il bitume debba essere considerato una sorgente antropogenica di IPA, seppur di importanza secondaria rispetto a quelle che attualmente vengono riconosciute come sorgenti antropogeniche principali di tali inquinanti, come ad esempio: la combustione di combustibili fossili e di biomasse, i gas esausti del traffico veicolare, la gassificazione del carbone, le emissioni dei forni a coke, i processi di estrazione dell'alluminio, ecc..

Gli IPA sono composti solidi a temperatura ambiente e presentano punti di ebollizione e di fusione relativamente elevati; la loro tensione di vapore è generalmente bassa ed inversamente proporzionale al numero di anelli aromatici. Di conseguenza, tra gli idrocarburi policiclici aromatici il naftalene è il più volatile, con una tensione di vapore pari a  $10,9 \times 10^{-5}$  bar a temperatura ambiente, mentre il benzo[a]pirene è uno dei meno volatili presentando una tensione di vapore pari a  $8,4 \times 10^{-12}$  bar a temperatura ambiente.

Gli IPA presentano bassissima solubilità in acqua e la solubilità diminuisce all'aumentare del peso molecolare. Al contrario, questi inquinanti sono lipofili e gli alti valori del coefficiente di ripartizione acqua/n-ottanolo (indicato come Kow) suggeriscono una capacità di bioaccumulazione di tali composti nei tessuti lipidici degli organismi (v. **Tab. 1**).

Come microinquinanti organici ambientali gli IPA si riscontrano nell'aria sia in forma gassosa che nel particolato.

Gli IPA contenenti due o tre anelli aromatici permangono principalmente in forma gassosa quando vengono immessi nell'atmosfera e di solito, nel giro di 24 ore vengono degradati attraverso una sequenza di reazioni radicaliche che hanno inizio con la addizione di un radicale ossidrilico OH<sup>·</sup>.

Gli IPA con 4 o più anelli, al contrario, tendono a venire adsorbiti su particelle di particolato, per la maggior parte di diametro compreso tra 0,1 e 3 µm.

Gli IPA adsorbiti sulle particelle raggiungono quindi il suolo o i bacini acquiferi attraverso "dry deposition" (precipitazione gravitazionale, diffusione) o "wet deposition" (neve, nebbia, pioggia), mentre gli IPA presenti in atmosfera in fase gassosa, nella zona di inter-

faccia aria/acqua si ripartiscono tra le due fasi secondo il coefficiente di trasferimento aria/acqua.

Data la loro scarsa solubilità in acqua, gli IPA si trovano, nell'ambiente acquatico, fondamentalmente nei sedimenti. Questo aspetto ha una duplice natura: se da un alto gli IPA vengono immobilizzati, dall'altro il loro accumulo costituisce una riserva che, tramite un continuo e lento rilascio, determina la presenza di IPA nelle acque, anche se in concentrazioni molto basse, consentendone così il trasporto e la distribuzione uniforme. Nell'acqua potabile, il livello rappresentativo degli IPA ammonta a pochi µg/l.

Sulla base di quanto esposto, le potenziali vie di dispersione nell'ambiente degli IPA e degli altri inquinanti riportati che interessano il bitume (e che verranno di seguito singolarmente analizzate) sono le seguenti:

- ▶ emissioni atmosferiche dagli impianti di produzione del conglomerato ad alte temperature (hot mix);
- ▶ emissioni atmosferiche dai manti stradali per evaporazione e/o sublimazione;
- ▶ rilascio di IPA dalle pavimentazioni stradali attraverso percolazione delle acque atmosferiche (leaching);
- ▶ rilascio di particolato generato dalla frizione tra pneumatico e manto stradale.

**Tab.1** Parametri chimico-fisici di interesse per la valutazione dell'impatto ambientale degli IPA

	Tensione di vapore (Pa, 25°C)	Solubilità in acqua (millimoli/L)	logKow (25°C)
Naftalene	10.9	2,4x10 <sup>-1</sup>	-
Antracene	7,5x10 <sup>-4</sup>	3,7x10 <sup>-4</sup>	4,54
Fenantrene	1,8x10 <sup>-2</sup>	7,2x10 <sup>-3</sup>	4,57
Acenaftene	5,96x10 <sup>-1</sup>	2,9x10 <sup>-2</sup>	3,92
Acenaftilene	-	-	-
Fluorene	8,86x10 <sup>-2</sup>	1,2x10 <sup>-2</sup>	4,18
Fluorantene	2,54x10 <sup>-1</sup>	1,3x10 <sup>-3</sup>	-
Crisene	5,7x10 <sup>-7</sup>	1,3x10 <sup>-5</sup>	5,86
Pirene	8,86x10 <sup>-4</sup>	7,2x10 <sup>-4</sup>	5,18
Benzo[a]antracene	7,3x10 <sup>-6</sup>	1,3x10 <sup>-5</sup>	5,91
Benzo[a]pirene	8,4x10 <sup>-7</sup>	1,5x10 <sup>-5</sup>	6,04
Dibenzo[a,h]antracene	3,7x10 <sup>-10</sup>	1,8x10 <sup>-6</sup>	6,75
Benzo[e]pirene	-	-	-
Benzo[k]fluorantene	-	-	-
Benzo[b]fluorantene	-	-	-
Indeno[1,2,3cd]pirene	-	-	6,584
Benzo[g,h,i]perilene	6x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>-5</sup>	-

## 2. Emissioni atmosferiche dagli impianti di produzione del conglomerato ad alta temperatura (hot mix asphalt)

Con il termine "hot mix asphalt" (HMA) si definisce la miscela, prodotta a circa 150-160 °C, di materiale litico e bitume in quantità appropriate alla specifica applicazione in campo stradale. L'HMA si distingue dal "warm mix asphalt", nella preparazione del quale l'uso di speciali tecniche e di opportuni additivi permette di ridurre la temperatura di produzione a valori compresi tra 100 e 140 °C. Gli impianti per la produzione di HMA possono essere stazionari o mobili; sulla base del processo di mescolamento possono essere distinti in continui (*drum mix plants*) e discontinui (*batch mix plants*). Negli impianti continui un tamburo essiccante provvede sia all'essiccamento dell'aggregato che al suo mescolamento con il bitume, mentre negli impianti discontinui l'aggregato viene prima essiccato e quindi trasferito in un miscelatore dove viene mescolato con il bitume. In entrambi i casi l'HMA prodotto viene stoccato in un silo per il successivo carico su automezzi e trasporto sui siti di applicazione.

In Europa, nel 2007 sono stati prodotti complessivamente circa 343 milioni di tonnellate di HMA, di cui 35,1 milioni in Italia. Sempre nel 2007, erano presenti in Italia 650 impianti stazionari e 10 impianti mobili.

Nonostante il crescente interesse legato all'impatto ambientale delle attività industriali, non molti sono gli studi relativi alle emissioni degli impianti di produzione di HMA; il più completo ed esaustivo resta certamente il rapporto dell'EPA (U.S. *Environmental Protection Agency*) pubblicato nel 2000.

In tale rapporto relativo agli USA, sulla base di circa 400 documenti relativi alle emissioni di impianti di produzione di HMA, vengono stimate le emissioni annuali per tipici impianti continui con una produzione pari a 200.000 tonnellate annue e impianti continui con una produzione pari a 100.000 tonnellate

annue. Vengono inoltre valutati i singoli contributi alle emissioni totali, considerando sia le sorgenti mobili (i gas di scarico dei motori diesel degli autoveicoli che operano nel sito di produzione), sia le diverse sezioni dell'impianto: in particolare la sezione essiccamento del materiale lapideo e mescolamento, la sezione di stoccaggio dell'HMA e del bitume utilizzato per produrlo, nonché le operazioni di carico e scarico dell'HMA al e dal silo di stoccaggio.

Nel rapporto in oggetto le emissioni di inquinanti associate agli impianti di produzione di HMA includono oltre agli inquinanti riportati (polveri sottili PM<sub>10</sub>, VOC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, IPA) anche i metalli pesanti (*hazardous air pollutant metals*) la cui concentrazione totale nelle emissioni (total metal HAP) è definita come la somma delle concentrazioni di antimonio, arsenico, berillio, cadmio, cromo, cobalto, manganese, mercurio, nichel, piombo e selenio, misurate secondo la procedura prescritta dalla U.S. *Environmental Protection Agency*, EPA Method 29 (40 CFR, *Protection of Environment*, Ch. I [7-1-05 Edition], Part 60, Appendix A-8). Dai dati riportati, all'interno degli impianti di produzione di HMA la sorgente di emissioni più significativa appare la sezione di essiccamento del materiale lapideo. Le

emissioni di tale sezione comprendono i prodotti di combustione completa (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> e acqua) e incompleta (VOC, CO, SVOC) del combustibile utilizzato per il riscaldamento (che dipenderanno, quindi, dal tipo di combustibile, se gasolio o gas naturale) e polveri sottili PM<sub>10</sub> sostanzialmente provenienti dal materiale litico.

In particolare nel caso degli impianti continui, dalla sezione di essiccamento e mescolamento le emissioni non imputabili alla combustione possono comprendere piccole quantità di VOC e di IPA provenienti dal bitume e, nel caso venga utilizzato asfalto riciclato, principalmente dai residui organici in esso contenuti. In tali impianti la sezione di essiccamento del materiale lapideo e mescolamento con il bitume costituisce la sorgente della quasi totalità delle emissioni di PM<sub>10</sub>, che risultano di scarsissima rilevanza nelle sezioni successive.

Negli impianti discontinui, al contrario, vi è un contributo alle emissioni totali di PM<sub>10</sub> nelle sezioni successive al-

l'essiccamento e precedenti il mescolamento con il bitume, cioè nelle fasi di vaglio e di eventuale frantumazione del materiale litico e nel trasferimento al miscelatore. Dall'analisi di quanto trattenuto dai sistemi preposti alla captazione delle polveri e presenti in tali tipologie di impianto risulta la presenza, oltre che di polveri aggregate, di tracce di VOC e di un aerosol creato dalla condensazione di vapori organici provenienti principalmente dalla sezione di mescolamento. Quantitativamente tali emissioni sotto forma di aerosol dipenderanno, ovviamente, dalla temperatura a cui il processo di mescolamento viene realizzato.

In **Tab. 2** vengono riportati i valori stimati per le emissioni totali degli inquinanti in oggetto (esclusi gli IPA) di due tipici impianti continui e discontinui.

Tab.2 Emissioni totali per tipici impianti discontinui e continui

	Impianti discontinui		Impianti continui	
	gas naturale	gasolio	gas naturale	gasolio
PM10 (g/ton HMA)	48,5	48,5	70,3	70,3
VOC (g/ton HMA)	6,8	6,8	22,7	22,7
NOx (g/ton HMA)	13,2	56,3	13,2	27,2
SO2 (g/ton HMA)	2,2	39,9	1,6	5,0
CO (g/ton HMA)	185,9	185,9	63,5	63,5
Metalli (mg/ton HMA)	6,4	6,4	36,5	43,0

Per quanto specificatamente riguarda gli IPA, dalle stime riportate per gli impianti USA emergono le seguenti evidenze:

- ▶ le emissioni totali di IPA risultano estremamente differenti per le due tipologie di impianto. I valori normalizzati risultano pari rispettivamente a circa 58,5 mg IPA/tonnellata di HMA per gli impianti discontinui e compresi tra 112,5 e 427,5 mg IPA/tonnellata di HMA per gli impianti continui.
- ▶ Per entrambe le tipologie di impianto il contributo maggiore alle emissioni di IPA è imputabile alla sezione di essiccamento del materiale lapideo e di mescolamento (circa l'84 % per gli impianti discontinui e dal 74 al 92 % circa per gli impianti continui).
- ▶ Le operazioni di carico e scarico dell'HMA al e dal serbatoio di stoccaggio, valutate per gli impianti continui, contribuiscono dal 19,6 al 5,2 % circa alle emissioni di IPA totali.

► Il contributo dovuto allo stoccaggio del bitume è pari a circa 0,9 % per gli impianti discontinui e variabile da 0,2 a 0,06 % circa per gli impianti continui.

La variabilità dei valori relativi alle emissioni di IPA degli impianti continui sono correlate al combustibile (gas naturale o olio combustibile, rispettivamente per i valori più bassi e più alti riportati) utilizzato per il riscaldamento della sezione di essiccamento del materiale lapideo e di mescolamento; ovviamente, in funzione del tipo di combustibile utilizzato in tale sezione varierà, di conseguenza, il peso percentuale delle altre fonti di emissione.

Tale dipendenza dal combustibile utilizzato non si riscontra, invece, nel caso degli impianti discontinui, in cui i valori di emissione di IPA stimati per tale sezione dell'impianto sono i medesimi sia utilizzando gas naturale che olio combustibile.

A parità di combustibile utilizzato, quindi, dalle stime riportate si evince che le emissioni di IPA da un impianto discontinuo a gas naturale sono pari al 52% delle emissioni di IPA di un corrispondente impianto continuo a gas naturale. Nel caso di utilizzazione di olio combustibile le emissioni stimate di IPA di un impianto discontinuo saranno pari a circa il 14% delle emissioni di IPA di un analogo impianto continuo.

Nell'ambito dei fattori di emissione sviluppati dall'EPA e aggiornati nel 2004 per gli impianti di produzione di HMA, per gli IPA totali (rappresentati in questo caso dalla sommatoria dei 16 idrocarburi policiclici aromatici considerati inquinanti prioritari dall'EPA: 16 EPA PAH), vengono riportati i seguenti valori:

Tab.3 Fattori di emissione di IPA per tipici impianti discontinui e continui

	Impianti discontinui		Impianti continui	
	gas naturale	gasolio	gas naturale	gasolio
Fattore di emissione (mg IPA/ton HMA)	49,5	49,5	85,5	396

È evidente, anche in questo caso, la dipendenza delle emissioni di IPA dal combustibile utilizzato nell'impianto e la notevole differenza del livello di emissioni, a parità di combustibile utilizzato, tra le due tipologie di impianto. I fattori di emissione sono perfettamente in linea con i valori stimati per la sezione di essiccamento del materiale lapideo e di mescolamento già riportati.

Fattori di emissioni più elevati, pari a 139 mg IPA/ton HMA, sono riportati come valori medi per 6 impianti discontinui in uno studio svolto a Taiwan da Lee *et al.* Il medesimo studio riporta anche i valori (con alte deviazioni *standard relative*) di concentrazione totale degli IPA nelle emissioni al camino delle singole sezioni dell'impianto, pari rispettivamente a 354 µg/Nm<sup>3</sup> per la sezione di mescolamento, 107 µg/Nm<sup>3</sup> per la sezione di carico e 83,7 µg/Nm<sup>3</sup> per la sezione di preriscaldamento. Gli autori suggeriscono che la maggior parte degli IPA siano originati dal combustibile utilizzato (olio combustibile). I soli dati disponibili relativi a un campionamento non in-situ sembrano quelli di uno studio volto a determinare la composizione organica di particolato atmosferico campionato presso la Bab-Ezzouar University (Algeri), a circa 200 metri da un non meglio identificato "grande impianto per la produzione di asfalto". In questo lavoro vengono riportate concentrazioni di IPA e nitroderivati comprese tra 44 e 100 µg/m<sup>3</sup>. Pur non escludendo il contributo di emissioni biogeniche, gli autori considerano l'impianto in oggetto come la più probabile fonte di emissione di tali inquinanti.

### 3. Emissioni atmosferiche dai manti stradali per evaporazione e/o sublimazione

Non sono attualmente disponibili dati relativi alla emissione di inquinanti atmosferici dai manti stradali per semplice evaporazione, né relativi alla potenziale sublimazione a temperatura ambiente di IPA dal bitume

presente nei manti stradali. In particolare quest'ultimo fenomeno appare comunque improbabile, alla luce delle caratteristiche chimico-fisiche di questi composti, della matrice complessa in cui essi sono contenuti e dell'intervallo di temperatura considerato.

### 4. Rilascio di IPA dalle pavimentazioni stradali attraverso percolazione delle acque meteoriche (leaching)

Nell'ultimo decennio sono stati pubblicati svariati studi relativi al potenziale rilascio di IPA dai manti stradali per dilavamento e percolazione delle acque meteoriche, e ►►



alla eventuale conseguente contaminazione da IPA delle acque superficiali.

In tali studi le concentrazioni di IPA riscontrate nel percolato sono risultate inferiori ai limiti previsti per le acque superficiali dalle normative di molte nazioni europee e notevolmente al di sotto dei limiti stabiliti dall'Unione Europea per l'acqua potabile (0,01 µg/l per il benzo[a]pirene e 0,1 µg/l per la somma di benzo[b]fluorantene, benzo[k]fluorantene, benzo[g,h,i]perilene e indeno[1,2,3cd]pirene).

Più specificatamente, per quanto riguarda il potenziale rilascio di IPA per dilavamento delle pavimentazioni stradali, le analisi eseguite in alcuni studi su campioni di acque di percolazione da manti stradali non permettono di distinguere tra gli inquinanti eventualmente rilasciati dal bitume e quelli invece provenienti dai gas esausti del traffico veicolare e dalle microparticelle di pneumatico generate dal contatto tra battistrada e pavimentazione stradale, che saranno oggetto di analisi nel successivo paragrafo.

Per una valutazione specifica del potenziale rilascio di IPA dal bitume presente nel manto stradale sono stati quindi svolti studi di laboratorio su campioni di bitume, consistenti in prove di percolazione e successiva analisi del percolato secondo procedure standardizzate.

Nel loro studio del 2001, Brandt & DeGroot attraverso test di rilascio in condizioni statiche (*Static Migration Test, Dutch Norm NEN 7345*) e in condizioni dinamiche (185CEN/TC292, *European Centre for Normalisation, 1999*) hanno valutato il potenziale rilascio di IPA in nove bitumi differenti.

I risultati mostrano il raggiungimento di condizioni stazionarie in 4-9 giorni, con la presenza nelle soluzioni ottenute, prevalentemente di naftalene (da 0,9 a 371 µg/l) e fenantrene (da 2,9 a 182 µg/l). Tali livelli, ben al di sotto dei limiti europei per le acque di superficie, non sono stati considerati tali da costituire un fattore di rischio per gli ambienti acquatici.

Nel 2002 Kriech *et al* hanno pubblicato uno studio di laboratorio condotto su 10 campioni di bitume (6 da pavimentazioni stradali e 4 usati nella impermeabilizzazione dei tetti) utilizzando il metodo US EPA SW846-1311 (*Toxic Characteristic Leachability Procedure, TCLP*), analizzando nei percolati ottenuti la presenza dei 29 principali IPA (mediante analisi GC/MS, US EPA SW846-8270B).

I risultati ottenuti mostrano assenza di tutti gli IPA ricercati (valori al di sotto della soglia di rilevamento) per i percolati ottenuti dai 4 campioni di bitume per uso nella impermeabilizzazione dei tetti, mentre nei percolati di 2 dei 6 bitumi da pavimentazioni stradali risultavano presenti quantità rilevabili di naftalene e fenantrene, inferiori comunque al limite previsto per le acque potabili negli USA (0,15 µg/l).

Già in precedenza lo stesso autore, utilizzando il medesimo metodo US EPA SW846-1311, aveva condotto uno studio su campioni di HMA. Nei percolati, ad eccezione del naftalene (250 ÷ 310 µg/l), tutti gli altri IPA risultavano al di sotto del limite di rilevamento, compreso tra 194 µg/l per IPA contenenti due anelli aromatici e 20 µg/l per gli IPA con un numero superiore di anelli aromatici (da 3 a 6).

In un lavoro più recente è stato analizzato il rilascio di IPA da quattro campioni di HMA mediante test in condizioni statiche (*Static Migration Test, Dutch Norm NEN 7345*) e test in colonna (rapporto corrispondente liquido/solido pari a 100 l/Kg).

I risultati forniscono evidenze che il rilascio di IPA è controllato dalla diffusione. Il modello elaborato su tali dati indica che in 25 anni soltanto una minima parte degli IPA contenuti nell'HMA viene rilasciato (da 0,004 a 1,1% per cinque tra i principali IPA), corrispondente a 0,5 mg/m<sup>2</sup> di superficie asfaltata a contatto con l'acqua. Sulla base dei dati e delle analisi riportate gli autori ritengono molto improbabile che il rilascio di IPA dal manto stradale fornisca un contributo sostanziale ai livelli di tali inquinanti presenti nei terreni circostanti.

Per quanto infine riguarda l'asfalto riciclato, Brantley & Townsend riportano prove di percolazione standard (*batch* e in colonna) eseguite su campioni prelevati in impianti della Florida.

Nei percolati ottenuti tutti i 16 IPA inquinanti prioritari sono risultati al di sotto del limite di rilevamento, compreso tra 0,25 e 5 µg/l.

Norin & Stromvall riportano dati di percolazione in colonna su campioni di asfalto riciclato immagazzinato, indicando una concentrazione degli IPA a più alto peso molecolare maggiore nei percolati da campioni provenienti da stoccaggi prolungati. Gli autori sottolineano la presenza di inquinanti provenienti dai gas esausti del traffico veicolare e dalle microparticelle di

pneumatico generate dal contatto tra battistrada e pavimentazione stradale come cofattori di rilascio oltre al bitume. Sempre relativamente all'asfalto riciclato, Legret *et al* riportano nel loro studio i risultati ottenuti su campioni di asfalto riciclato sottoposti a test statici e su colonna. Il confronto con quanto ottenuto su asfalti "nuovi" con le medesime tecniche indica un contenuto di IPA superiore nei percolati relativi ai campioni di asfalto riciclato. In tutti i casi, comunque, il rilascio viene giudicato complessivamente moderato e al di sotto dei limiti di rilevamento per la maggior parte dei singoli IPA.

## 5. Rilascio di particolato generato dalla frizione tra pneumatico e manto stradale

Negli ultimi anni molti lavori hanno preso in considerazione le emissioni di particelle ultrafini generate dal traffico veicolare (*road dust*) e il loro contenuto in inquinanti, tra i quali gli IPA. Generalmente in tali articoli tra le molteplici potenziali cause di tali emissioni è

sempre riportato anche il rilascio di particolato proveniente dall'usura del manto stradale.

In tutti tali studi viene comunque messa in rilievo la difficoltà di quantificare gli apporti delle differenti sorgenti che contribuiscono alla concentrazione totale di IPA misurata, che principalmente vengono identificate nei gas esausti dei motori diesel, nelle particelle di pneumatico generate dal contatto tra battistrada e pavimentazione stradale, negli oli lubrificanti o nelle particelle generate dall'usura del manto stradale. Per la determinazione dell'origine degli IPA riscontrati viene in genere utilizzata la loro composizione e i rapporti relativi in cui alcuni di essi sono presenti, che costituiscono nell'insieme un profilo rapportabile a ciascuna sorgente di tale inquinamento. Gli IPA, però, si biodegradano e fotodegradano facilmente nell'ambiente e la degradabilità di ciascun composto è piuttosto differente. Di conseguenza i profili di IPA utilizzati per la determinazione della loro origine potrebbero non mantenersi stabili in differenti condizioni ambientali.

In un recente articolo, relativo alla identificazione della natura e della origine delle particelle submicrometriche generate dalla frizione tra pneumatico e manto



stradale, tale problema viene risolto utilizzando un simulatore (VTI road simulator) in modo da escludere i fattori di incertezza dovuti alla degradabilità degli IPA e alla compresenza di differenti sorgenti di particelle ultrafini. I dati riportati indicano, anche se in modo non totalmente conclusivo, che le particelle submicrometriche analizzate sono originate dai pneumatici e non dal bitume presente nella pavimentazione stradale.

Anche se non viene escluso, in nessuno degli articoli disponibili attualmente è riportata evidenza di un chiaro contributo del manto stradale alla formazione di tali particelle, provenienti per lo più dai pneumatici e dai gas di scarico dei motori diesel.

## 6 Conclusioni

Dall'analisi della letteratura relativa a tutte le possibili vie di dispersione nell'ambiente dei principali inquinanti che interessano il bitume nelle varie fasi del suo utilizzo più diffuso e che possono quantificare il rischio di impatto ambientale e di esposizione non professionale correlati a tale materiale, emerge chiaramente una difficoltà intrinseca nella univoca identificazione della sorgente di tali inquinanti.

Se nel caso della valutazione del rilascio di IPA dalle pavimentazioni stradali attraverso percolazione delle acque meteoriche è stato infatti possibile, attraverso prove di laboratorio standardizzate, fornire risposte esaurienti che dimostrano un potenziale di rischio associato al bitume estremamente basso, già più complessa appare l'identificazione del bitume come sorgente degli IPA rilasciati da campioni di asfalto riciclato, dove alcuni cofattori di rilascio (principalmente i gas esausti del traffico veicolare e le particelle ultrafini di pneumatico generate dal contatto tra battistrada e pavimentazione stradale, depositatisi sul manto stradale e intrappolati nella sua struttura porosa) possono contribuire in modo sostanziale alla concentrazione di IPA presente nel percolato.

Il problema è del tutto analogo nel caso delle emissioni di particolato dovuto al traffico veicolare, dove non è possibile una chiara e univoca identificazione dei differenti contributi alla generazione delle particelle ultrafini e degli inquinanti (gli IPA) in esse contenuti analizzando campioni di particolato prelevate direttamente in situ. In tale ambito particolarmente utili possono risultare gli studi di laboratorio eseguiti utilizzando dei simulatori, ancora scarsamente applicati in questo particolare settore di ricerca.

Più complessa è ovviamente la valutazione dell'impatto ambientale e del rilascio di inquinanti potenzialmente dannosi per la salute umana associati al bitume utilizzato negli impianti di produzione del conglomerato ad alte temperature (HMA). La complessità di questi impianti, la concomitante presenza di varie fonti di emissione per i differenti inquinanti (dal combustibile utilizzato, al materiale litico, al bitume, fino ai gas esausti dei veicoli preposti al trasporto delle materie prime e del prodotto finito) e la dipendenza sostanziale delle emissioni dalla corretta gestione delle diverse sezioni dell'impianto determinano infatti, ancora una volta, una difficile valutazione dei differenti contributi alle emissioni totali. Gli studi e i rapporti tecnici attualmente disponibili, relativi alle emissioni degli impianti di produzione di HMA, risultano comunque piuttosto conclusivi e permettono una valutazione, attraverso i fattori di emissione sviluppati dall'EPA, sia delle emissioni totali sia dei contributi alle emissioni delle differenti sezioni degli impianti. In tale contesto risulta evidente che le emissioni da tali impianti di inquinanti prodotti da combustione completa o incompleta sono dello stesso ordine di grandezza di quelle di qualsiasi impianto che utilizzi una equivalente quantità di combustibile, mentre le polveri sottili saranno sostanzialmente provenienti dal materiale litico. Il contributo alle emissioni fornito dal bitume appare relativamente basso, sempre che, ovviamente, vi sia una corretta gestione di tale materiale, soprattutto relativamente alla sua temperatura di stoccaggio e di miscelazione durante la preparazione del conglomerato. ■