

## AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS DURANTE OS PROCESSOS DE USINAGEM, TRANSPORTE E APLICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS EM AMBIENTE URBANO

**Jefferson Pereira Ribeiro**

**Lucas Melo Barbosa**

**Verônica Teixeira Franco Castelo Branco**

Departamento de Engenharia de Transportes  
Universidade Federal do Ceará

**Rivelino Martins Cavalcante**

Instituto de Ciências do Mar  
Universidade Federal do Ceará

### RESUMO

O presente estudo buscou avaliar as emissões atmosféricas oriundas dos processos relacionados às obras de pavimentação asfáltica (usinagem, transporte e aplicação de misturas asfálticas). Os serviços de pavimentação asfáltica promovem o desenvolvimento dos grandes centros urbanos, pois facilitam o escoamento de mercadorias e o deslocamento da população. No entanto, trazem consigo diversos passivos ambientais, em especial, a poluição atmosférica. Para o cumprimento dos objetivos, foram utilizados métodos de amostragem passiva, para a quantificação dos fumos de asfalto ( $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$ ), e amostragem ativa, para a quantificação de material particulado total (MPT). Os resultados mostraram que as concentrações de material particulado na usina foram superiores às outras atividades (transporte e aplicação). Durante o transporte da mistura asfáltica, as concentrações de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  foram bem superiores que as medidas realizadas durante a sua aplicação. O fator determinante na emissão dos fumos de asfalto foi a temperatura, embora outros fatores, como as condições meteorológicas vigentes, possam ter contribuído para a dispersão dos poluentes, principalmente durante a aplicação da mistura asfáltica.

**Palavras-Chave:** Pavimentação asfáltica; poluição atmosférica; fumos de asfalto;  $\text{NO}_2$ ;  $\text{SO}_2$ .

### ABSTRACT

This work pretends to evaluate atmospheric emissions from the processes related to asphalt paving works (production, transportation and placement of asphalt mixtures). Asphalt paving services promote the development of large urban centers, as they facilitate the transportation of goods and population. However, they bring various environmental products, especially air pollution. For the accomplishment of these objectives, passive sampling methods were used for the quantification of asphalt fumes ( $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$ ) and active sampling for the quantification of total particulate matter (TPM). The results showed that the concentrations of particulate material in the plant were higher than the other activities (transportation and placement). During the transportation of the asphalt mixture, the concentrations of  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$  were much higher than the measurements carried out during their placement. The determining factor in the emission of asphalt fumes was the temperature, although other factors, such as the current meteorological conditions, may have contributed to the dispersion of the pollutants, especially during the placement of the asphalt mixture.

**Key-words:** Asphalt paving; atmospheric pollution; particulate matter;  $\text{NO}_2$ ;  $\text{SO}_2$ .

### 1. INTRODUÇÃO

O segmento de pavimentação rodoviária contribui de forma negativa em termos da produção de poluentes atmosféricos, causando elevado impacto na qualidade do ar, principalmente devido ao uso de materiais asfálticos aquecidos. A problemática das emissões de poluentes atmosféricos deve-se, em grande parte, a um dos constituintes das misturas asfálticas empregadas em obras de pavimentação: o ligante asfáltico, também chamado de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Derivado do petróleo, o ligante asfáltico, ou simplesmente asfalto, é constituído da última fração resultante do processo de destilação desse material, caracterizado pela alta viscosidade, cor escura e por ser um material inflamável. No entanto, a preocupação ambiental, no que diz respeito aos ligantes asfálticos, é decorrente da sua composição química: este se trata de uma mistura de hidrocarbonetos (90 a 95%), contendo também heteroátomos de nitrogênio, enxofre, entre outros (5 a 10%) (Bernucci *et al.*, 2008).

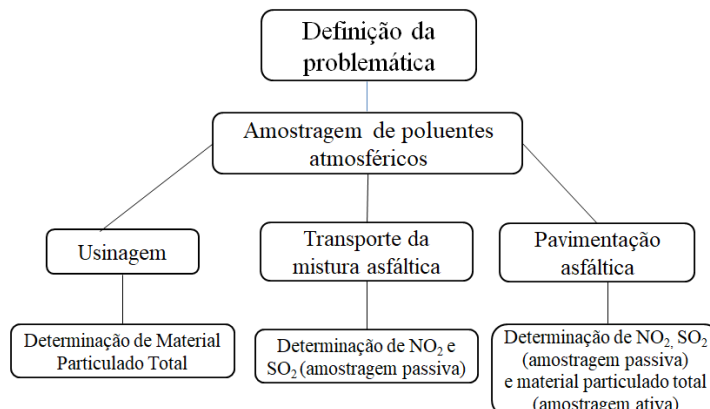
Para a utilização do CAP, no processo de fabricação de misturas asfálticas, faz-se necessário que ele seja aquecido a altas temperaturas (na ordem de 150°C), de modo que sua viscosidade diminua e este se torne trabalhável. Com isso, os hidrocarbonetos que compõem o ligante asfáltico são emitidos para o ambiente, em forma de gás, e, ao entrarem em contato com o ar atmosférico, de menor temperatura, podem se condensar. As partículas condensadas e a fase que continua em estado gasoso formam os fumos de asfalto, que permanecem dispersos no ambiente. Segundo Gaudefroy *et al.* (2008), dentre os componentes dos fumos de asfalto, estão os compostos orgânicos formados por Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), cujo potencial carcinogênico e mutagênico é apontado em estudos recentes. Além disso, os fumos de asfalto também são responsáveis por problemas respiratórios, dores de cabeça, náuseas, tonturas, irritações na pele e nos olhos, entre outros (NIOSH, 2000).

Como uma forma de reduzir essas emissões a academia vem desenvolvendo estudos. A partir de 1996, alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de reduzir a temperatura de usinagem e, conseqüentemente, de aplicação de misturas asfálticas, visto que a temperatura parecia ser um fator crucial para a geração de fumos de asfalto. Prowell e Hurley (2007) comprovaram que reduções de 30 a 50°C na temperatura de usinagem permitem obter, de forma significativa, uma diminuição na produção de emissões e de odores asfálticos, o que deu origem às misturas mornas e semimornas. Além da redução das emissões asfálticas, o menor gasto de combustível no processo de usinagem também permite uma redução nas emissões de gases de efeito estufa e um menor custo energético, o que fez com que essas misturas ganhassem destaque nas pesquisas acadêmicas. Ainda assim, não se identifica na literatura estudos que visem conhecer, quantificar e avaliar as emissões em todas as fases de um processo produtivo adotado na pavimentação, o que talvez fosse mais efetivo, do ponto de vista de diagnóstico, para então se propor alternativas de solução, tais quais as apontadas por Prowell e Hurley (2007).

Diante dessa problemática e da escassez de dados referentes aos níveis de emissão de poluentes atmosféricos provenientes das diversas etapas da indústria da pavimentação asfáltica no Brasil, buscou-se nesta pesquisa avaliar a poluição em todas as etapas do processo de construção de um pavimento asfáltico (usinagem, transporte e aplicação). Em complementação, também foram propostos os seguintes objetivos: desenvolvimento de método de amostragem para quantificação de poluentes durante o transporte e na execução do pavimento; determinação das concentrações de material particulado durante a usinagem da mistura asfáltica e aplicação da mesma.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Após a definição da problemática, foi estabelecido o plano experimental, conforme pode ser observado na Figura 1. Nesta observa-se que, primeiramente, foi realizada a coleta de material particulado durante a produção da mistura asfáltica na usina, em seguida foi realizada a amostragem passiva de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> durante o transporte da mistura até o local onde foi executada a pavimentação do trecho monitorado, e por último foram realizadas amostragem ativa de Material Particulado Total (MPT) e amostragem passiva de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> durante a aplicação da mistura asfáltica.



**Figura 1:** Fluxograma da metodologia proposta.

### 2.1. Produção da mistura asfáltica

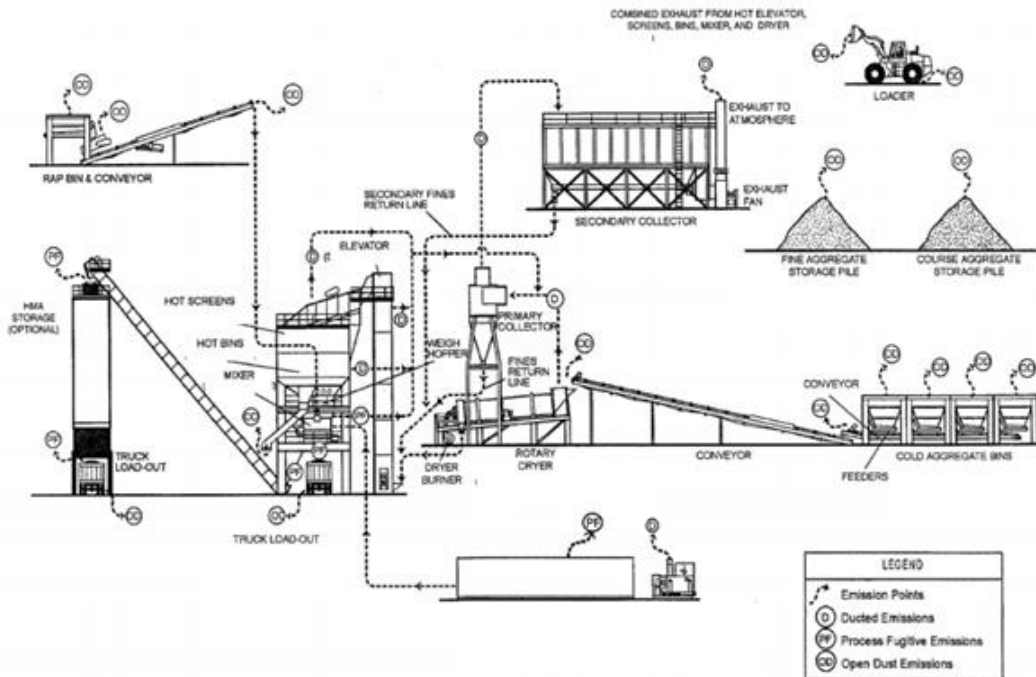
Para a mistura asfáltica dos serviços analisados, foi utilizado um traço de Concreto Asfáltico Usinado à Quente (CAUQ), com 5,5% de CAP, classificado por penetração como 50/70, e faixa granulométrica composta por pó de pedra, brita 3/8” e brita 5/8”. Além disso, foi incorporado um teor de 15% de material fresado na mistura.

A mistura asfáltica foi produzida em uma usina cujo esquema produtivo segue a ilustração apresentada na Figura 2. Tal usina está localizada em um distrito industrial da Região Metropolitana de Fortaleza - CE. Trata-se de uma usina convencional, de produção contínua, do tipo contra fluxo, que utiliza óleo pesado como combustível para o aquecimento dos materiais, e gás natural para o processo de mistura, e que possui capacidade máxima de produção igual a 160 toneladas por hora. Vale ressaltar que, para o emprego do material fresado, a usina conta com um silo adaptado, próximo ao centro do tambor secador, para que esse material não entre em contato direto com a chama que aquece os demais insumos. Além disso, a usina dispõe de uma unidade filtrante composta por um conjunto de 600 mangas, que possui o papel de mitigar as emissões atmosféricas e reter partículas finas de agregados, que retornam para o tambor secador, a fim de serem incorporadas novamente a mistura asfáltica.

A produção aconteceu sem nenhuma anormalidade, em período não chuvoso, com temperaturas ambientes variando entre 32 a 34°C. A temperatura de usinagem, controlada na cabine de operação da usina, foi mantida constante e igual a 160°C e a taxa de produção foi mantida em, aproximadamente, 100 toneladas por hora. Ao sair da usina, a temperatura da mistura foi verificada por meio de um termômetro, que apontou 155°C. Demais características do traço da mistura também foram verificadas em laboratório, estando em conformidade com os dados fornecidos pela empresa e com o teor de CAP desejado, igual a 5,5%.

### 2.2. Transporte e aplicação da mistura asfáltica

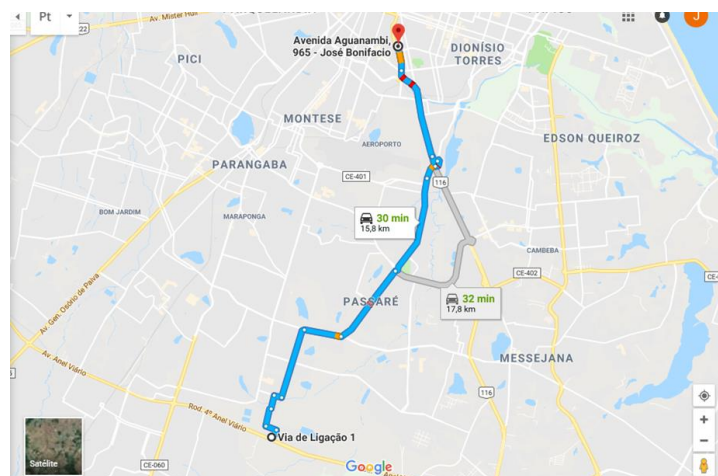
A partir da usinagem da mistura asfáltica, o material foi carregado em um caminhão do tipo basculante, com capacidade de 10 m<sup>3</sup>, e, posteriormente, o veículo foi pesado para se obter a quantidade de massa de mistura asfáltica, através da diferença do peso obtido pelo peso prévio do caminhão, sem o material (tara). O veículo percorreu um percurso de 23 Km de extensão, transitando por parte da rodovia BR-116, em direção à Fortaleza, para chegar ao seu destino final, a Avenida Aguanambi (Figura 3), aonde a mistura asfáltica foi aplicada. Apesar de ter trafegado em uma rodovia federal, ressalta-se que grande parte do percurso realizado foi feito em perímetro urbano, havendo áreas residenciais e comerciais no entorno da via.



**Figura 2:** Esquema de produção de misturas asfálticas em uma usina (Fonte: Vallero, 2014).

Ao chegar ao local, o veículo despejou a mistura asfáltica na concha de uma vibroacabadora pneumática, previamente preparada para receber o material. A mesa reguladora do equipamento foi configurada eletronicamente para que a espessura inicial da camada executada tivesse 6 cm de altura, de modo que, considerada uma taxa de empolamento equivalente a 20%, a espessura final, após a compactação, tivesse altura igual a 5 cm. As espessuras de aplicação também foram verificadas, através de uma régua, pelo operador da mesa reguladora.

Após a aplicação da mistura asfáltica, foi dado prosseguimento ao serviço com a compactação do revestimento, realizada por dois rolos: o primeiro, do tipo pneumático; e, logo em seguida, o segundo, do tipo tandem (ou de chapa). A compactação foi feita de modo a se garantir um grau de compactação próximo a 100%.



**Figura 3:** Local de amostragem durante a aplicação da mistura asfáltica (Fonte: Google Maps).

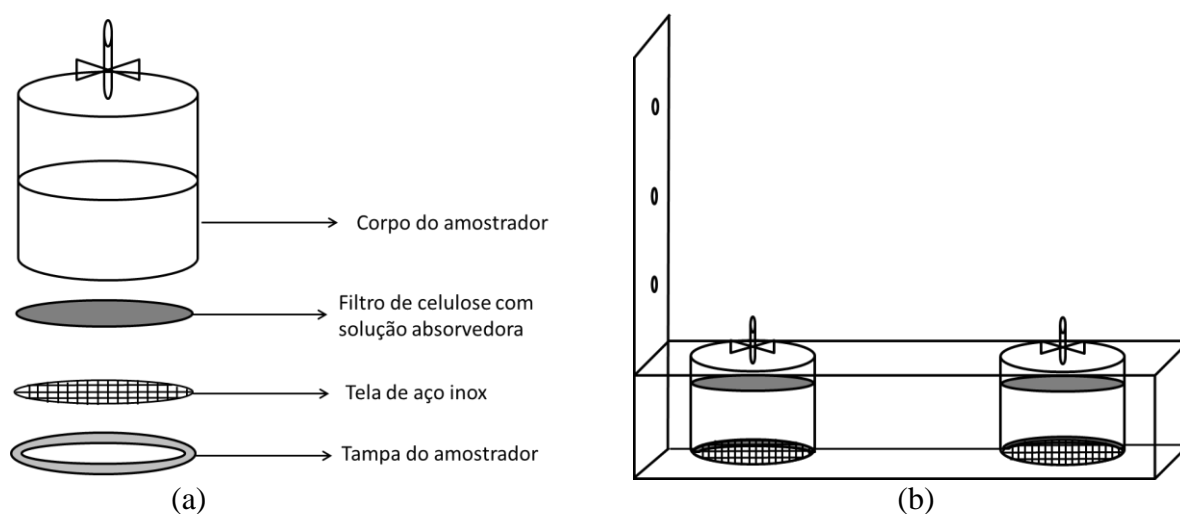
Todo o procedimento citado anteriormente foi feito para uma faixa de rolamento, de comprimento aproximado igual a 155 m e largura de 3,50 m, e repetido para outras duas faixas idênticas, resultando em uma largura total de 11,50 m. Por fim, ressalta-se que o serviço foi realizado sobre um pavimento asfáltico antigo, previamente preparado para receber a nova mistura, através do procedimento denominado de pintura de ligação. Para isso, foi utilizada uma emulsão asfáltica do tipo RR-2C e sua aplicação foi realizada por um caminhão espargidor, que percorreu o trecho a uma velocidade tal que resultasse em uma taxa de aplicação igual a, aproximadamente, 1 L/m<sup>2</sup>.

### 2.3. Métodos de amostragem

#### 2.3.1. Amostragem passiva de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>

Para a amostragem de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, foram utilizados amostradores passivos. A escolha pelo método de amostragem passiva se deu pelo baixo custo e pela facilidade de operação e quantificação dos poluentes utilizando esse método de amostragem. Os amostradores utilizados neste trabalho foram adaptados da configuração proposta por Campos *et al.* (2006). Este equipamento, ilustrado na Figura 4a, tem como princípio de funcionamento a coleta de amostras gasosas seletivas por difusão do ar e consiste de um tubo de polietileno com uma extremidade fechada e a outra aberta. Na extremidade fechada, foi colocado o filtro, já impregnado com a respectiva solução absorvedora, e, na extremidade aberta, foi conectada uma tela metálica que exerce a função de proteção a choques mecânicos e uma tampa com um orifício que encaixa no tubo (Figura 4a). Dois amostradores foram colocados em cada suporte de acrílico (Figura 4b) para cada conjunto, sendo um para a amostragem de NO<sub>2</sub> e o outro para a de SO<sub>2</sub>.

As etapas de preparação do amostrador passivo foram realizadas da seguinte forma: cada uma das partes do amostrador foi lavada com detergente (Extran, Merk) e água deionizada, sendo este posteriormente seco à temperatura ambiente. Para a amostragem do NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> foram adicionados 100 µL da solução absorvedora nos respectivos filtros de celulose de 25 mm de diâmetro e estes, após secos em dessecador à vácuo por um período de 30 minutos, foram inseridos nos amostradores. Os amostradores foram armazenados em sacos herméticos e acondicionados a 4°C até a data da amostragem. Na Tabela 1, são apresentadas as soluções usadas para impregnação e eluição dos filtros.



**Figura 4:** Esquema ilustrativo do amostrador passivo.

**Tabela 1:** Soluções usadas para impregnação e eluição dos filtros dos amostradores passivos.

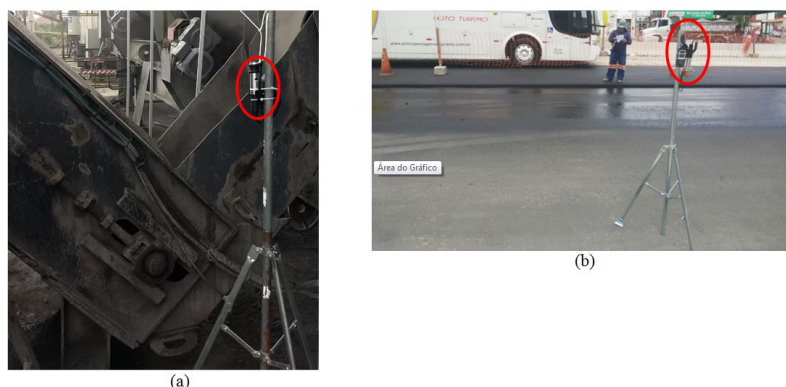
Poluente	Solução Absorvedora	Solução Reagente	Reação química
NO <sub>2</sub>	KI 0,5 mol/L + KOH 0,2 mol/L em metanol	NEDA (N-(1-naftil-etilenodiamina) reagente de Griess-Saltzman	NO <sub>2</sub> + I <sup>-</sup> → NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + ½ I <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> + O <sub>3</sub> → NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + O <sub>2</sub>
SO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 0,01 mol/L	Peróxido de Hidrogênio (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) 30%	SO <sub>2</sub> + CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> → SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + CO <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + ½ O <sub>2</sub> → SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>

Para esse estudo, foram impregnados 15 filtros de NO<sub>2</sub> e 15 filtros de SO<sub>2</sub>. Os brancos de amostragem foram preparados seguindo a mesma metodologia dos demais amostradores, entretanto, os mesmos permaneceram lacrados em sacos herméticos por todo o período de amostragem. O método utilizado para quantificação do NO<sub>2</sub> foi o Griess-Saltzman (SALTZMAN, 1954) modificado, que se baseia na espectrofotometria molecular UV/VIS. Após a amostragem, cada filtro de NO<sub>2</sub> foi transferido para um tubo de falcon de 15 mL, e neste foram adicionados 6 mL da solução reagente (reagente de Griess-Saltzman) (Tabela 1). A solução eluída dos filtros de NO<sub>2</sub> foi quantificada em 540 nm no espectrofotômetro UV-Vis. A quantificação do SO<sub>2</sub> foi realizada num cromatógrafo de íons, Modelo: 883 Basic IC plus, Fabricante: Metrohm.

### 2.3.2. Amostragem de Material Particulado (MP)

O equipamento utilizado para a quantificação do MP durante o processo de usinagem e aplicação da mistura asfáltica é um medidor de poeira automático, Microdust Pro CEL-712 (marca Casella). Seu princípio de funcionamento baseia-se na dispersão da luz emitida pelo medidor. Esse equipamento informa com precisão a quantidade de Partículas Totais em Suspensão (PTS) por m<sup>3</sup> de ar que está na atmosfera do local amostrado, sendo os resultados expressos em µg/m<sup>3</sup>. É válido salientar que esse equipamento quantifica todas as granulometrias de material particulado presente no ambiente amostral em conjunto, isto é, não avalia as frações das partículas separadamente.

Na Figura 5a e 5b, são mostrados os locais onde foi colocado o equipamento. Na usina, o local escolhido para a amostragem foi próximo a saída do misturador e do elevador de mistura asfáltica (Figura 5a), sendo definido este ponto de coleta pela grande quantidade de fumos de asfalto visíveis neste local. No campo, o equipamento foi colocado próximo ao local onde estava sendo realizada a aplicação da mistura asfáltica, como pode ser observado na Figura 5b. O tempo de amostragem foi de 45 minutos para ambos os locais.



**Figura 5:** Locais de amostragem: (a) usina e (b) execução da pavimentação asfáltica.

## 2.4. Distribuição dos amostradores

### 2.4.1. Usinagem

A coleta foi realizada a partir da usinagem da mistura asfáltica, com a distribuição prévia de 4 conjuntos de amostradores passivos, próximo à saída do material pelo tambor secador, pouco antes deste ser despejado no caminhão basculante; próximo a chaminé, por onde saem os gases emitidos no tambor secador, após serem filtrados pelo conjunto de mangas. Esses locais foram escolhidos pelo fato de se observar nos mesmos a emissão direta de gases para a atmosfera, oriundos do aquecimento do material. A Figura 6 mostra onde foram colocados os amostradores passivos e o equipamento que quantifica o Material Particulado Total (MPT) na usina.



**Figura 6:** Amostragem de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> e Material Particulado Total (MPT) na usina.

### 2.4.2. Transporte do material asfáltico

Antes do carregamento do primeiro caminhão basculante, foram acoplados, na carroceria do veículo, dois conjuntos de amostradores passivos, um conjunto de cada lado, próximo à cabine, de modo que os filtros ficassem posicionados na altura do basculante, como pode ser observado na Figura 7. Esses amostradores permaneceram na carroceria do caminhão durante todo o transporte do material e até o completo descarregamento no local de execução. A quantificação do MPT não foi realizada nessa etapa, devido à impossibilidade de instalação do equipamento no caminhão.



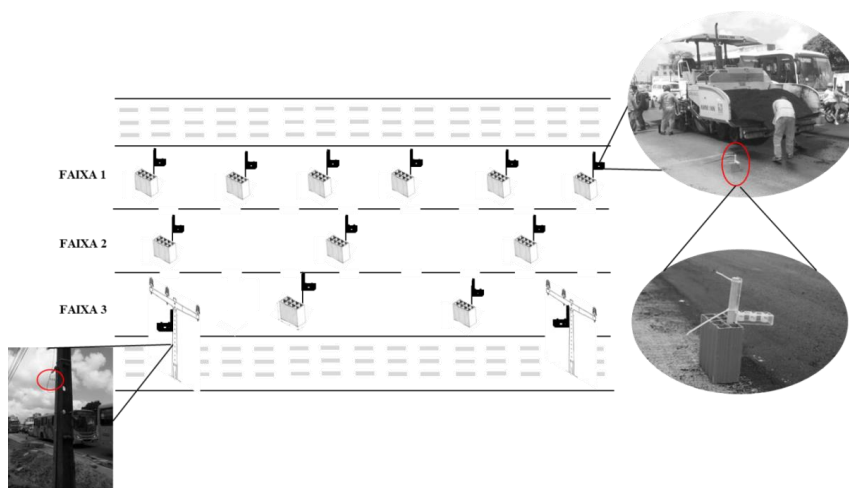
**Figura 7:** Amostragem de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> no caminhão basculante durante o transporte da mistura asfáltica.

### 2.4.3. Aplicação da mistura asfáltica

No trecho em execução, foram distribuídos seis conjuntos de amostradores na faixa 1, três conjuntos de amostradores na faixa 2 e dois conjuntos de amostradores na faixa 3, conforme ilustração da Figura 8. Os amostradores localizados na faixa 1 permaneceram até a finalização da aplicação da mistura asfáltica das três faixas. Nas demais faixas, os amostradores permaneceram posicionados apenas durante o período de pavimentação de suas respectivas faixas. Além disso, dois conjuntos de amostradores também foram fixados, cada, em dois postes presentes no entorno da via no momento da execução do serviço de pavimentação.

Sendo assim, os tempos de amostragem foram diferentes para cada uma das três faixas de rolamento: 3,67 h para a faixa 1; 1,5 h para a faixa 2; e 1 h para a faixa 3. Já para os amostradores posicionados nos postes, o tempo de amostragem foi o tempo total de coleta, utilizada para a faixa 1, ou seja, 3,67 h.

Além disso, no dia anterior, outros dois conjuntos de amostradores foram instalados, cada, nos mesmos dois postes utilizados na amostragem inicial, com o objetivo de se obter o nível de concentração desses gases na via, devido aos veículos que nela trafegam. Dessa forma, é possível estimar o impacto causado pelo serviço de aplicação da mistura asfáltica no local, através da diferença entre os valores obtidos nas duas amostragens.



**Figura 8:** Esquema da distribuição de amostradores passivos de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> durante aplicação da mistura asfáltica.

### 2.5. Determinação das concentrações de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> na atmosfera

A concentração média dos gases na atmosfera durante o período de exposição do amostrador passivo foi calculada pela lei de difusão de Fick (Equação 1), considerando um sistema de coleta eficiente.

$$C = \frac{m.L}{D.A.t} \quad (1)$$

em que C é a concentração externa (ambiente) do gás ( $\mu\text{g m}^{-3}$ );

m é a massa total coletada ( $\mu\text{g}$ ) acumulada sobre o filtro;

D é o coeficiente de difusão do poluente (NO<sub>2</sub> ou SO<sub>2</sub>) (corrigido para a temperatura média do período de amostragem);

A é a área da seção transversal do percurso de difusão ( $\text{m}^2$ );

t é o tempo de amostragem (h);

L é o comprimento do percurso difusivo (m) – é a altura do amostrador até o filtro.

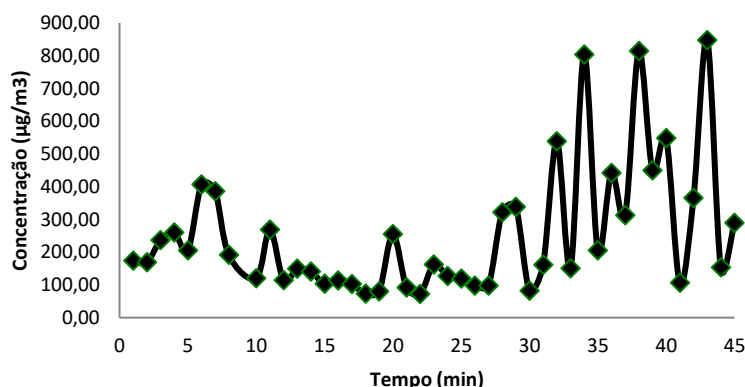


### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Usinagem

Os resultados apresentados na Figura 9 mostram as concentrações de material particulado coletados na usina. De acordo com esses resultados, nota-se que as concentrações de material particulado variaram no decorrer da usinagem da mistura asfáltica, com concentrações de 72,00 até 848,00  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Essa variação provavelmente está associada à composição dos agregados e do CAP, ou seja, durante o processo de usinagem, parte desse material é lançado ao meio ambiente na forma de gases e material particulado. A quantificação do  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  não foi obtida durante a usinagem da mistura asfáltica, devido às elevadas concentrações de material particulado lançados na atmosfera, com valores que ultrapassaram 848,00  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Esse material particulado impede a passagem de ar pelos filtros impregnados com a solução absorvedora, impedindo o seu aprisionamento através de reações químicas para posterior análise, conforme pode ser observado nas reações apresentadas na Tabela 1.

Estudo semelhante foi realizado por Fontenele *et al.* (2018), onde os autores relataram que as concentrações de MP na usina foram superiores daqueles obtidos durante a aplicação em campo e que fatores como temperatura, quantidade de material utilizado e ventilação do local de aplicação influenciam na emissão desses poluentes. Os valores obtidos pelos autores para a concentração de MP foram próximos aos observados no experimento aqui relatado.



**Figura 9:** Concentrações de Material Particulado (MP) coletados na usina.

#### 3.2. Transporte do material asfáltico

Os resultados apresentados na Figura 10 mostram as concentrações de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  oriundas do transporte da mistura asfáltica, desde o seu carregamento na usina até o local onde houve a sua aplicação. Observa-se que os valores das concentrações médias desses poluentes atmosféricos foram elevados ( $\text{NO}_2$  - 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  em 1h e  $\text{SO}_2$  - 920  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  em 24h). Esses valores estão associados às temperaturas elevadas da mistura asfáltica (150-170°C), que contribuem para a emissão desses compostos. É importante salientar que os valores de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  são expressos em 1h e 24h, respectivamente, sendo esses intervalos relacionados a padrões de qualidade do ar, devido à carência de legislação para os poluentes  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  relacionados à indústria da pavimentação asfáltica.

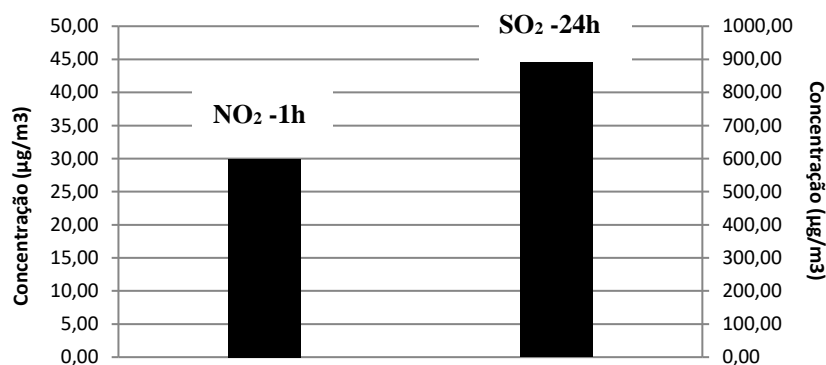


Figura 10: Concentrações de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> durante o transporte do material asfáltico.

### 3.3. Aplicação da mistura asfáltica

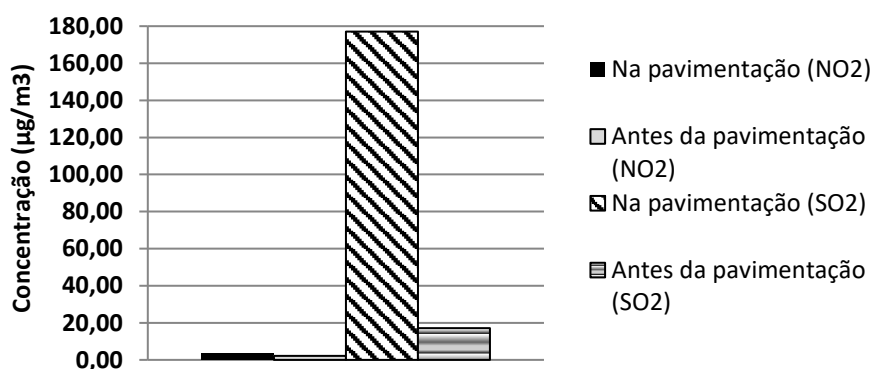
Os amostradores colocados na faixa 1 apresentaram emissão média de NO<sub>2</sub> entre 7,31µg/m<sup>3</sup> em 1h e SO<sub>2</sub> na faixa de 121,19µg/m<sup>3</sup> em 24h. As emissões relacionadas à faixa 1 da via são o somatório das contribuições oriundas do processo de aplicação da mistura asfáltica e também da circulação dos veículos, pois, após a conclusão dos serviços de pavimentação, houve a liberação da via para o tráfego. Os valores das emissões obtidos durante a pavimentação da 2ª faixa da via apresentaram uma média de 10,94µg/m<sup>3</sup> para NO<sub>2</sub> e 211,42 µg/m<sup>3</sup> para o SO<sub>2</sub>. As emissões de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> da faixa 2 foram coletadas apenas durante a execução da pavimentação desta faixa específica, indicando que as concentrações dos poluentes estão, possivelmente, associadas apenas à aplicação da mistura asfáltica. As concentrações de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> provenientes da pavimentação da faixa 3 apresentaram concentrações médias de NO<sub>2</sub> (7,50µg/m<sup>3</sup> em 1h) e SO<sub>2</sub> (486,41µg/m<sup>3</sup> em 24h). Assim como ocorreu na 2ª faixa, as concentrações dos poluentes foram quantificadas somente durante a execução do pavimento desta citada faixa.

Ao comparar as concentrações de NO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub> durante o transporte do material asfáltico com aquelas obtidas durante a aplicação da mistura asfáltica, nota-se que os valores foram superiores no transporte do material. Assim como foi dito anteriormente, a temperatura é um fator determinante para emissão de poluentes atmosféricos, pois afeta a energia cinética das moléculas, e por consequência influencia a emissão dos poluentes. A variação da temperatura pode corroborar ou desfavorecer a emissão de gases poluidores. No presente estudo, houve uma diminuição da temperatura da mistura asfáltica durante a execução da pavimentação, em torno de 10°C, o que gerou menor emissão de poluentes, fato este que pode ser observado nas Figuras 12 e 13. Segundo Fontenele *et al.* (2018), a distância entre a usina e o local onde será aplicada a mistura asfáltica influencia nos níveis de emissão, pois, quanto maior for o tempo gasto no trajeto, maior será o calor perdido da mistura para o meio ambiente, e assim, por consequência, há um decaimento da emissão de poluentes. As condições meteorológicas, como o vento, também podem ter influenciado nas concentrações de poluentes obtidas, pois, no caminhão, a mistura asfáltica estava coberta com uma lona plástica, protegendo a mesma da ação do vento. De acordo com Cavalcante *et al.* (2016), Aguiar *et al.* (2017) e Rocha *et al.* (2017), a relação Altura (A) e Largura (L) são responsáveis pela direção e velocidade do vento, sendo fator preponderante para a dispersão dos fumos de asfalto e, por consequência, da qualidade ambiental.

A quantificação do material particulado também foi realizada durante a execução do revestimento asfáltico. Esses resultados apontam que os valores de material particulado são menores do que aqueles encontrados durante as coletas realizadas na usina. A maior parcela das

concentrações ficou abaixo de  $68\mu\text{g}/\text{m}^3$ , com exceção do valor quantificado em 25 minutos. Esses resultados confirmam o estudo realizado por Fontenele *et al.* (2018), onde foram encontradas em campo concentrações menores de MP, se comparadas aos valores coletados durante a usinagem da mistura asfáltica. As possíveis justificativas para tal discrepância entre os valores encontrados na usina e em campo (durante a execução do pavimento) são as temperaturas mais elevadas utilizadas no processamento de usinagem e a própria homogeneização dos agregados com o CAP, que contribui para a saída dos fumos de asfalto para o meio ambiente. Segundo Gasthauer *et al.* (2008), Cravo (2010) e Motta (2011), a temperatura das misturas asfálticas aplicadas em campo influencia nas concentrações de fumos de asfalto emitidos, e que, portanto, podem afetar a saúde dos trabalhadores.

Na Figura 11, são demonstrados os valores das concentrações de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  a partir dos amostradores posicionados nos postes, antes e no momento da execução do pavimento asfáltico. Observaram-se valores médios de  $\text{NO}_2$  ( $2,21\mu\text{g}/\text{m}^3$  em 1h) e  $\text{SO}_2$  ( $17,12\mu\text{g}/\text{m}^3$  em 24h) antes da realização do serviço de pavimentação. Durante a pavimentação do trecho monitorado, as concentrações quantificadas foram de  $3,71\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{NO}_2$  e  $177,11\mu\text{g}/\text{m}^3$  para  $\text{SO}_2$ . Os dados obtidos evidenciam que esses poluentes podem estar em concentrações elevadas, mesmo em pontos distantes da fonte emissora, podendo não somente afetar os trabalhadores do setor, mas também as pessoas que vivem ou trabalham no entorno do local onde a obra está sendo realizada. Outro fator que confirma essa possibilidade é que as concentrações de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  antes da realização do serviço de pavimentação foram bastante inferiores àquelas coletadas no do momento da pavimentação do trecho.



**Figura 11:** Concentrações de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  dos amostradores colocados nos postes antes e durante e a aplicação da mistura asfáltica.

#### 4. CONCLUSÕES

A indústria do asfalto proporciona diversos benefícios à sociedade, entretanto, provoca efeitos prejudiciais ao meio ambiente. No presente estudo, foram avaliadas as emissões de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  e MPT em atividades ligadas às obras de pavimentação: 1) durante o processo de usinagem; 2) durante o transporte da mistura asfáltica; e 3) durante a aplicação da mistura asfáltica.

Os resultados encontrados nesse trabalho mostraram que as concentrações de MPT quantificados na usina foram superiores aos do trecho de aplicação da mistura. Essa variação foi atribuída à diferença de temperatura da mistura asfáltica no momento da aplicação, o que causou diminuição das concentrações de fumos de asfalto emitidas para o meio ambiente. Durante o transporte do material asfáltico, as concentrações de  $\text{NO}_2$  e  $\text{SO}_2$  foram bem superiores aos valores da aplicação da mistura asfáltica. Alguns fatores podem ter contribuído para tal

discrepância, entre eles podemos destacar: a temperatura e os fatores meteorológicos (direção e velocidade do vento), o que favoreceu a diminuição das concentrações desses poluentes no meio ambiente.

Dessa maneira, esse estudo pretende alertar os trabalhadores e os órgãos competentes sobre os riscos que a atividade de pavimentação asfáltica pode proporcionar à saúde da população. A partir desse trabalho, outras investigações podem ser realizadas, considerando diferentes características de vias, como largura e volume de tráfego, além de outros fatores como gabarito médio das edificações, condições meteorológicas e período de aplicação (diurno ou noturno).

**Agradecimentos:** Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, NUTEC, LACOR.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, L. F. M. C.; Silva, M. V. C.; Gandu, A. W.; Rocha, C. A. e Cavalcante, R. M. (2017) Caracterização de cânions urbanos e seus efeitos climáticos em área com intenso processo de verticalização na cidade de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 4, p. 1046–1058.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J.A. e Soares, J. B. (2008). Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros. PETROBRAS/ABEDA.
- Campos, V. P.; Cruz, L. P. S.; Alves, E. M.; Santos, T. S.; Silva, A. D.; Santos, A. C. C.; Lima, A. M. V.; Paixão, C. S.; Santos, D. C. M. B.; Brandão, D. S.; Andrade, E. J. S.; Júnior, J. I. M.; Conceição, K. C. S.; Ramos, M. S.; Pontes, M. C. G.; Amaral, M. F. e Mattos, R. R. (2006) Monitoramento atmosférico passivo de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub> em áreas urbanas e de influência industrial como prática de química ambiental para alunos de graduação. *Química Nova*, v. 29, n. 4, p.872-875. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422006000400042>.
- Cavalcante, R. M.; Rocha, C. A.; De Santiago I. S. e Thiers, P. R. L. (2016) Influence of Urbanization on Air Quality Based on the Occurrence of Particle-Associated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Tropical Semiarid Area (Fortaleza-CE, Brazil). *Air Qual Atmos Health.*, p. 437-445. DOI 10.1007/s11869-016-0434-z.
- Cravo, M. C. C. (2010) Estudos Relacionados aos Fumos de Asfalto. Conferência Proferida Durante o 3º Workshop em SMS – Comissão de Asfalto do IBP. São Paulo/SP, Brasil.  
doi: 10.26848/rbgf.v10.4.p1046-1058
- Fontenele, P.V.G., Branco, V.T.F.C., Cavalcante, R. C., Ferreira, W.L.G., Rocha, C.A. (2018) Avaliação da exposição e risco de câncer em trabalhadores da pavimentação: um estudo baseado nos níveis de partículas respiráveis presentes nos fumos de asfalto. *Revista Transportes*, v. 26, n. 2, p. 55-69.
- Gasthauer, E.; Mazé, M.; Marchand, J. P. e Amouroux, J. (2008) Characterization of Asphalt Fume Composition by GC/MS and Effect of Temperature. *Fuel*. Vol. 87, p. 1428-1434. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.06.025.
- Gaufrey, V.; Deygout, F.; Viranaiken, V.; Le Coutaller, P.; Paranhos, R. e La Roche, C. (2008) Laboratory identification of fumes during manufacturing of hydrocarbons mixtures. In: International Society for Asphalt Pavements, Zürich. Anais.
- Motta, R. (2011) Estudos de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo (USP). DOI: 10.11606/T.3.2011-19072011-170629.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) (2000). Health effects of occupational exposure to asphalt: hazard review.
- Prowell, B. D. e Hurley, G. C. (2007) Warm-mix asphalt: Best Practices. Quality Improvement Series 125. Lanham: National Asphalt Pavement Association.
- Rocha, C. A.; Sousa, F. W.; Zanella, M. E. e Cavalcante, R. M. (2017). Environmental Quality Assessment in Areas Used for Physical Activity and Recreation in a City Affected by Intense Urban Expansion (Fortaleza-CE, Brazil): Implications for Public Health Policy. *Expo Health*. DOI 10.1007/s12403-016-0230-x.
- Saltzman, B. E. (1954) Colorimetric microdetermination of nitrogen dioxide in the atmosphere. *Analytical Chemistry*, v. 26, n. 12, p. 1949–1955. DOI: 10.1021/ac60096a025.
- Vallero, D. A. (2014) Fundamentals of Air Pollution. 5. Ed. California: Elsevier Inc.