

AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO E DIÓXIDO DE NITROGÊNIO NA USINAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Amanda Pontes Maia Pires Alcantara

Jefferson Pereira Ribeiro

Lucas Melo Barbosa

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco

Bruno Vieira Bertoncini

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 avaliou as emissões atmosféricas oriundas do processo de usinagem de misturas asfálticas. Os serviços de pavimentação asfáltica são importantes para o crescimento das cidades, sobretudo em centros urbanos, onde há maior necessidade de escoamento de mercadorias e de deslocamento de pessoas. No entanto, a indústria da infraestrutura de transportes pode gerar problemas ambientais, em especial, contribuições significativas à poluição atmosférica, uma vez que diversos poluentes são emitidos durante os serviços de pavimentação asfáltica. Para analisar o impacto da usinagem de uma mistura asfáltica, foram utilizados métodos de amostragem passiva, para análise de NO₂ e amostragem ativa, para análise de Material Particulado (MP). Os resultados mostraram que as concentrações de MP na usina ultrapassaram os valores limites estabelecidos pela OMS e pelo CONAMA para padrões de qualidade do ar, enquanto as concentrações de NO₂ estiveram abaixo desses limites.

Palavras-Chave: Misturas asfálticas; usinas de asfalto; poluição atmosférica; material particulado; NO₂.

ABSTRACT

The present study evaluated the atmospheric emissions from the process of manufacturing asphalt mixtures. Asphalt paving services are of great importance for the development of cities, especially in urban centers where there is a greater need to dispose of goods and people. However, the transport infrastructure industry can generate environmental problems, in particular, significant contributions to air pollution, since several pollutants are emitted during asphalt paving services. In order to analyze the impact of the manufacturing of an asphalt mix, passive sampling method was used for NO₂ analysis, and active sampling for particulate matter (PM) analysis. The results showed that PM concentrations in the plant exceeded the limit values established by WHO and CONAMA, for air quality standards, while NO₂ concentrations were below these limits.

Key-words: Asphalt mixtures; asphalt plants; atmospheric pollution; particulate matter; NO₂.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento sustentável está associado ao progresso tecnológico e socioeconômico dos países com redução dos impactos ao ambiente e à saúde humana (Tsai, 2018). A temática da poluição atmosférica ganhou espaço no meio científico em todas as esferas do conhecimento. Este fato decorre da necessidade de compreender como os diversos setores contribuem para a degradação da qualidade do ar, sobretudo nos grandes centros urbanos. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, 2018), cerca de 92% da população mundial vive em locais onde as concentrações de poluentes excedem os limites normatizados por esta organização.

Demandas ambientais no setor de pavimentação asfáltica, em particular, têm despertado atenção e motivado pesquisas no que tange à análise, caracterização e quantificação das emissões asfálticas (Ma *et al.* 2016; Porot *et al.* 2016; Thives e Ghisi, 2017); ao desenvolvimento de tecnologias para mitigação dessas emissões por meio da redução da

temperatura de usinagem e aplicação de misturas asfálticas (Gong *et al.* 2019; Zhu *et al.* 2019); e à análise dos impactos das emissões asfálticas sobre a saúde humana (Kim *et al.* 2017).

O processo de fabricação de misturas asfálticas é, convencionalmente, realizado a temperaturas elevadas, da ordem de 160°C. O aquecimento dos insumos que compõem as misturas asfálticas, sobretudo do ligante asfáltico (ou Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP), é necessário para garantir a redução da viscosidade do CAP e garantir a trabalhabilidade necessária para realizar o recobrimento dos agregados pétreos. No entanto, acredita-se que isto influencie, diretamente, na poluição atmosférica e que os diversos processos envolvidos na indústria da pavimentação asfáltica (usinagem, transporte e aplicação desses materiais) possam prejudicar, significativamente, a qualidade do ar urbano (NIOSH, 2000). Portanto, mapear esses processos quanto aos níveis de emissões atmosféricas torna-se um objeto de estudo pertinente.

Nota-se uma deficiência quanto à política de controle de emissões oriundas do setor de pavimentação e a ausência de normas que regulamentem os níveis permitidos para as emissões asfálticas. Portanto, o presente estudo utilizou, como base para elaboração do escopo do trabalho e discussão dos resultados, normas e legislações vigentes para padrões de qualidade de ar no geral, como a principal norma brasileira que traz limites para as concentrações de poluentes atmosféricos, a CONAMA n° 491/2018. Os padrões de qualidade do ar funcionam como um instrumento de gestão da qualidade do ar e têm por objetivo preservar o meio ambiente e a saúde da população com relação aos riscos causados pela poluição atmosférica. Esses padrões utilizam como referência os valores de concentração de poluentes prioritários, estabelecidos pela OMS (CONAMA 491/2018).

Considerando o conteúdo da citada normativa, este trabalho propõe quantificar e avaliar as concentrações de Material Particulado (MP) e dióxido de nitrogênio (NO₂) oriundas da usinagem de misturas asfálticas em uma usina localizada na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Para isso, foi utilizado um método de amostragem ativa, para partículas inaláveis, com tamanho aerodinâmico equivalente de corte de 10µm (MP₁₀), e um método de amostragem passiva, para o NO₂. O mapeamento realizado na usina ocorreu em dois momentos distintos, uma amostragem foi realizada durante um período de inatividade da usina e a outra amostragem ocorreu durante o processo de usinagem da massa asfáltica. Dessa forma, pretende-se avaliar a contribuição do processo de usinagem para as emissões dos poluentes coletados na usina e, posteriormente, avaliados em laboratório.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Optou-se por dar ênfase, nesse trabalho, à coleta e análise de MP e NO₂ durante a etapa de usinagem de misturas asfálticas. A escolha dos poluentes analisados deu-se pela intrínseca relação destes com o comprometimento à saúde humana e com a ocorrência de fenômenos ambientais graves, como o *smog* fotoquímico, bem como pela viabilidade e facilidade de coleta e análise desses poluentes. Além disso, escolheu-se avaliar, primeiramente, a usinagem de misturas asfálticas por esta ser uma etapa inicial, onde este composto é formado e no qual, supostamente, há maior contribuição com relação às emissões atmosféricas, devido esta ser a etapa produtiva na qual a temperatura da mistura asfáltica é máxima.

Definido o problema deste estudo, foi proposto um plano experimental para que o seu

objetivo pudesse ser alcançado, conforme as etapas metodológicas dispostas na Figura 1. A partir dela, pode-se verificar os diferentes métodos de amostragem e análise utilizados, assim como os poluentes cujas concentrações foram obtidas.

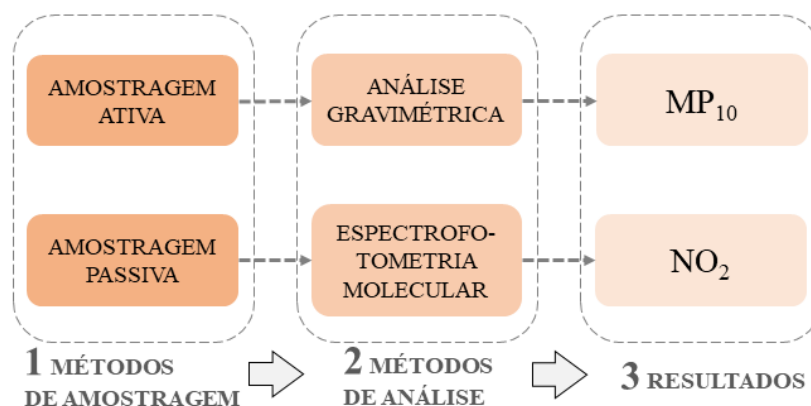


Figura 1: Fluxograma da metodologia proposta.

2.1. Usinagem da mistura asfáltica

Para a coleta e análise das emissões asfálticas, foi acompanhado o processo de usinagem de misturas asfálticas em uma usina localizada na RMF, CE, do tipo de produção contínua (*drum-mixer*) e contrafluxo, que usa gás natural como combustível para aquecimento dos insumos e possui capacidade máxima de produção de 160 toneladas por hora. Além disso, a usina conta com 4 silos dosadores de agregados, um silo adaptado para utilização de material fresado e um silo de estocagem de mistura asfáltica. A Figura 2 contém uma representação esquemática da configuração da usina monitorada nesse estudo.

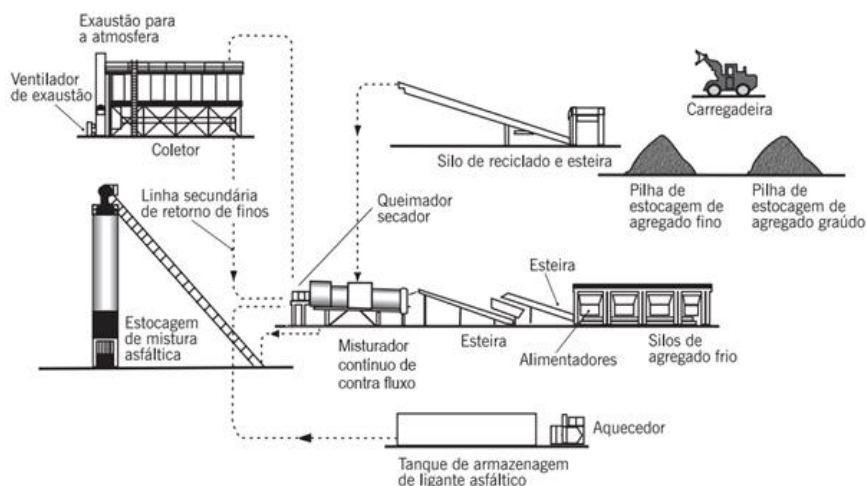


Figura 2: Esquema de produção da mistura asfáltica na usina avaliada (Fonte: Bernucci *et al.*, 2010).

As amostragens aconteceram entre os meses de abril e maio de 2019, que compreendem o período chuvoso da região em estudo. Para cada período de coleta, foram utilizados dois traços diferentes (Tabela 1) para a composição das misturas asfálticas usinadas. Nas seções seguintes, que apresentam os procedimentos utilizados em ambas as amostragens, serão especificados os traços utilizados para cada período de coleta, além de alguns dados meteorológicos obtidos a partir do uso de uma estação convencional da rede do Instituto

Nacional de Meteorologia (INMET), localizada a menos de 10km da usina. Ademais, ressalta-se que as usinagens acompanhadas para a coleta dos poluentes aconteceram sem anormalidades, com temperaturas de usinagem variando entre 165 e 175°C.

Tabela 1: Composições das misturas asfálticas usinadas e avaliadas durante as amostragens

Traço / Insumos	Tipo de Mistura	Teor de Projeto de CAP (%)	CAP virgem (%)	Brita 1/2” (%)	Pó de pedra (%)	Material Fresado (%)
01	CAUQ	5,7	4,8	16,5	63,7	15,0
02	AAUQ	6,0	5,4	-	84,6	10,0

2.2. Métodos de amostragem

2.2.1. Amostragem ativa de MP

A amostragem ativa do MP foi realizada por um amostrador de grandes volumes (Hi-Vol), modelo HIVOL 3000, da marca Ecotech, cujo princípio de amostragem é a sucção do ar ambiente, através do uso de uma bomba, para o seu interior, onde um papel filtro de celulose, previamente pesado e de tamanho igual a 20,3cm por 25,4cm, fará a coleta das partículas. Além disso, o equipamento é dotado de um separador inercial de partículas capaz de separar partículas com um diâmetro igual ou inferior a 10 μ m (MP₁₀), para que apenas estas sejam destinadas ao filtro. O referido amostrador pode ser visto na Figura 3.



Figura 3: Amostrador de grandes volumes (Hi-Vol) utilizado no estudo (Fonte: Ecotech).

O método de amostragem utilizado foi similar ao normatizado pela ABNT (NBR 13412/1995), tendo como principal diferença o tempo de amostragem, reduzido de 24 para 3 horas, devido à grande quantidade de partículas em suspensão no local durante o funcionamento da usina. A determinação do tempo de amostragem foi baseada em testes preliminares, onde se observou a ocorrência de saturação do filtro e perda de carga em tempos de amostragem superiores a 3 horas, e, por consequência, o mau funcionamento do equipamento, o que poderia causar danos ao mesmo.

Conforme apresentado na Figura 4, o amostrador foi alocado em duas posições diferentes na usina: na Posição 1, entre a cabine de operação da usina e o tambor misturador e na Posição 2, ao lado do queimador secador da usina. Para cada posição, foram realizadas duas coletas com a usina em funcionamento, sempre no mesmo horário, de 10:43 às 13:43hrs, em dias consecutivos: 24 e 25 de abril, para a Posição 1; e 29 e 30 de abril, para a Posição 2. Além

disso, com o objetivo de excluir possíveis contribuições de outras atividades poluidoras que acontecem no entorno da usina de asfalto, foram realizadas mais duas coletas, denominadas de “Branco”, com a usina na situação inativa. Esta coleta foi feita apenas para a Posição 2, nos dias 07 e 08 de maio, em um período que a usina não produziu misturas asfálticas. As condições de coleta da amostragem ativa, assim como os dados referentes às misturas asfálticas produzidas durante os períodos de amostragem, estão dispostas na Tabela 2.

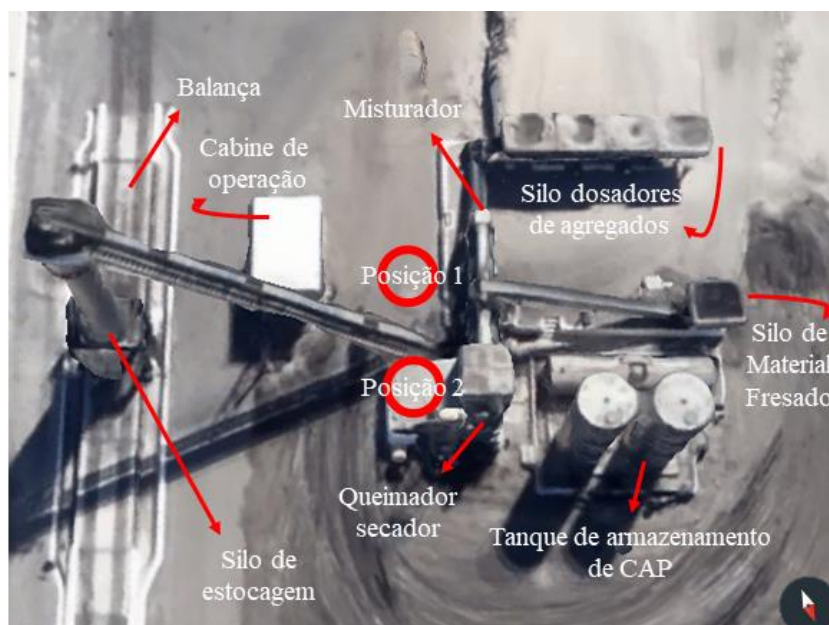


Figura 4: Locais de amostragem ativa na usina utilizada no estudo (Fonte: Google Earth).

Tabela 2: Condições de coleta da amostragem ativa

Amostragem	Data	Total de mistura produzida durante a amostragem (ton)	Traços	Temperatura ambiente média (°C)	Precipitação (mm)	Umidade (%)
Posição 1	24/04	130,98	01	28,2	5,4	80,0
	25/04	258,70	01	24,7	49,2	98,0
Posição 2	29/04	277,86	01 e 02	28,7	11,4	84,0
	30/04	92,06	01	26,0	5,4	98,0
Branco	07/05	-	-	27,0	0,0	74,0
	08/05	-	-	27,0	9,4	92,0

2.2.2. Amostragem passiva de NO₂

A coleta de NO₂ foi realizada a partir do uso de amostradores passivos. Optou-se por esse tipo de amostragem devido à possibilidade de coletas por longos períodos de tempo, ao baixo custo dos equipamentos, assim como a facilidade e praticidade do seu manuseio, da operação no local e da quantificação das concentrações dos poluentes. Apesar disso, ressalta-se que a amostragem passiva, mesmo com essas vantagens, é um método ainda pouco utilizado para a coleta de emissões asfálticas, sendo utilizada por Ribeiro *et al.* (2018) apenas nas etapas de transporte e aplicação de misturas asfálticas.

Os amostradores passivos utilizados neste estudo seguem a configuração proposta por Ribeiro *et al.* (2018), conforme ilustração da Figura 5a. Ao invés da amostragem ativa, cujo equipamento faz uso de uma bomba para succionar o ar ambiente para o seu interior, o princípio do amostrador passivo é a coleta gasosa a partir da difusão do ar atmosférico, que

entra no dispositivo por uma de suas extremidades, percorre o corpo do amostrador (em forma de tubo), até alcançar a sua outra extremidade, que é fechada e contém um papel filtro, previamente impregnado de uma solução absorvedora específica para reagir com o poluente a ser coletado. Além disso, o amostrador também dispõe de uma tampa, com um orifício, encaixada na extremidade aberta, com uma tela metálica acoplada, de modo a evitar a entrada de partículas de diâmetro maior ou igual a 1,18mm, o que poderia contaminar o filtro e prejudicar a coleta do gás, como também serve de proteção à choques mecânicos. Na Figura 5b, pode-se verificar os suportes acrílicos nos quais os amostradores ficam presos, instalados em locais elevados no entorno da usina.

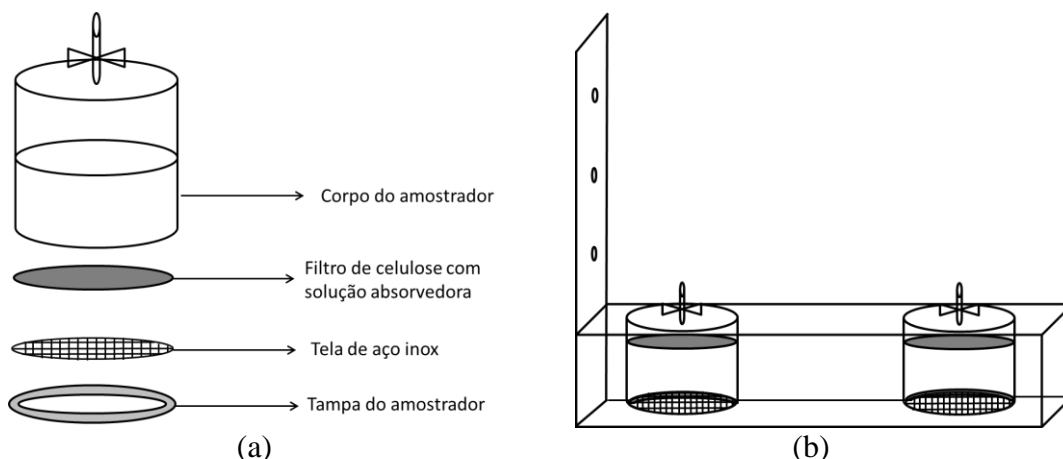


Figura 5: Esquema ilustrativo do amostrador passivo (Fonte: Ribeiro *et al.*, 2018).

A preparação das membranas filtrantes de celulose foi realizada a partir de seus recortes, feitos de modo a se obter filtros circulares de 25mm de diâmetro. Depois, em cada um deles foi adicionado 100µL de solução absorvedora específica para NO₂, conforme mostrado na Tabela 3. Feito isso, os filtros foram secos em um dessecador à vácuo, por um período de 30 minutos, para então serem colocados na extremidade fechada de cada amostrador passivo, previamente lavado com água deionizada e detertec (Extran, Merk). A medida que os filtros foram colocados nos amostradores, os conjuntos eram guardados em sacos herméticos e acondicionados à temperatura de 4°C até o dia da amostragem.

Tabela 3: Soluções usadas para impregnação e eluição dos filtros dos amostradores passivos.

Gás amostrado	Solução absorvedora	Solução reagente	Reação química
NO ₂	KI 0,5mol/L + KOH 0,2mol/L em metanol	NEDA (N-(1-naftil-etilenodiamina), reagente de Griess-Saltzman	$NO_2 + I^- \longrightarrow NO_2^- + \frac{1}{2} I_2$ $NO_2 + O_3 \longrightarrow NO_3^- + O_2$

No total, foram preparados 24 amostradores com filtros, onde 12 foram utilizados para a coleta do NO₂ oriundo das emissões da usina de asfalto em funcionamento e os outros 12 foram utilizados para uma amostragem denominada de “Branco”, feita com a usina inativa, com o objetivo de coletar possíveis contribuições de outras fontes emissoras de NO₂, de modo a comparar as concentrações deste poluente proveniente exclusivamente das emissões oriundas do processo de usinagem de misturas asfálticas. Dos 12 amostradores, um deles foi mantido nas condições de acondicionamento laboratorial, sendo utilizado, posteriormente, na análise com a intenção de excluir possíveis erros de preparação dos filtros que pudessem ter resultado em contaminação. Por fim, os 11 amostradores foram distribuídos na usina de

asfalto, conforme pode ser observado na Figura 6, em postes presentes no local, por exemplo, para que os suportes pudessem ficar presos em locais elevados, facilitando a difusão do ar.



Figura 6: Distribuição dos amostradores passivos no local da usina avaliada (Fonte: Google Earth).

As coletas foram realizadas por um período de amostragem de 72 horas, tanto para a usina em funcionamento como para a usina inativa. As condições de coleta da amostragem passiva, assim como os dados referentes às misturas asfálticas produzidas durante os períodos de amostragem, estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4: Condições de coleta da amostragem passiva

Amostragem	Dias	Total de mistura produzida durante amostragem (ton)	Traços	Temperatura ambiente média (°C)	Precipitação total (mm)	Média da umidade (%)
Usina inativa (Branco)	19/04 a 21/04	-	-	27,1	18,8	91,8
Usina funcionando	24/04 a 26/04	1.298,12	01 e 02	26,9	55,0	86,2

2.3. Métodos de análise em laboratório

2.3.1. Análise gravimétrica para MP

A medida que os filtros foram retirados do Hi-Vol, estes eram encaminhados para o laboratório para pesagem em uma balança analítica, com precisão de 0,1mg. A diferença entre o peso após a coleta e o peso inicial, obtido antes da amostragem, resulta no peso de MP₁₀ coletado. A divisão do peso de MP₁₀ pelo volume de ar amostrado permite a obtenção da concentração de partículas em suspensão, conforme Equação 1.

$$C = \frac{(Pf - Pi) \times 10^{-6}}{V} \quad (1)$$

em que C: concentração de MP [$\mu\text{g}/\text{m}^3$];
Pf: peso final do filtro [g];
Pi: peso inicial do filtro [g];
V: volume de ar amostrado [m^3].

2.3.2. Espectrofotometria molecular para NO₂

Seguindo a Tabela 3, a quantificação de NO₂ foi feita a partir do método Griess-Saltzman (SALTZMAN, 1954) modificado, que tem como base a espectrofotometria molecular UV-Vis. Para isso, após a amostragem, os filtros de celulose, até então acondicionados em sacos herméticos e à temperatura de 4°C, foram transferidos para um tubo de centrifugação do tipo Falcon de 15mL, onde eram adicionados de 6mL da solução reagente (Tabela 3), prosseguindo-se com a análise da solução eluída em 540nm no espectrofotômetro UV-Vis.

As concentrações médias de NO₂ obtidas em cada amostrador passivo, para o período total de exposição, foram calculadas através da Lei de Difusão de Fick (Equação 2), sendo feita a consideração de que a amostragem aconteceu em um sistema de coleta eficiente.

$$C = \frac{m.L}{D.A.t} \quad (2)$$

em que: *C*: concentração externa de NO₂ (µg/m³);
m: massa total do analito coletada sobre o filtro (µg);
L: comprimento do percurso difusivo (altura do amostrador) (m);
D: coeficiente de difusão do NO₂, corrigido para a temperatura média externa (m²/h);
A: área da seção transversal do percurso difusivo (seção do amostrador) (m²);
t: tempo total de amostragem [h].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Material Particulado (MP₁₀)

A Tabela 5 mostra os resultados das concentrações de MP coletado na usina nos períodos de usinagem de mistura asfáltica, denominados de Posição 1 e Posição 2, além do período em que a usina estava inativa, denominado de “Branco”, sendo esta coleta realizada na Posição 2. Para efeitos de comparação com as legislações vigentes, os valores foram divididos pelo período de amostragem (3 horas), de modo que fossem obtidos valores de concentração por hora.

Tabela 5: Concentrações de MP₁₀ obtidas na usina de asfalto

Amostragem	Dia	Concentrações de MP ₁₀ (µg/m ³ /h)
Posição 1	24/04	317,96
	25/04	331,94
Posição 2	29/04	277,31
	30/04	2.290,10
Branco	07/05	18,41
	08/05	178,11

Observa-se que os valores obtidos no presente trabalho foram semelhantes aos usualmente encontrados na literatura. Ribeiro *et al.* (2019) utilizou um medidor automático de poeira para a quantificação das Partículas Totais em Suspensão (PTS) e obtiveram valores entre 72 e 848µg/m³/h, durante um período de coleta de 45 minutos. Os resultados de Fontenele *et al.* (2018), que também fizeram uso de amostragem ativa de Material Particulado, mas para partículas com tamanho igual ou inferior a 2,5µm, mostraram que os valores de PM_{2,5} foram da ordem de 195 e 176,7µg/m³/h. No entanto, ressalta-se a obtenção de um valor destoante dos demais valores, que foi para a Posição 2, no dia 30/04, igual a 2.290,10µg/m³/h, e no dia 08/05, igual a 178,11.

Eliminando-se a possibilidade de a posição do amostrador ter afetado a concentração de MP_{10} coletado, tendo em vista que outra coleta na mesma posição resultou em um valor próximo aos demais, verificaram-se as condições de produção ou variáveis meteorológicas para explicar essa concentração. No entanto, insolitamente, observou-se que no dia 30/04, apesar da menor produção de mistura asfáltica (apenas 92,06 toneladas), e no dia 08/05, apesar da usina ter estado inativa, houve uma elevada emissão de MP, o que vai de encontro a estudos que obtiveram correlações diretamente relacionadas entre produção e quantidade de MP produzido (Gaudefroy *et al.*, 2008; Fontenele *et al.*, 2018). Além disso, para essa amostragem, houve pouca precipitação pluviométrica (Tabela 4) se comparada a outros dias de coleta, o que, geralmente, acarreta em maior concentração de MP próximo ao nível do solo.

Sendo assim, pode-se inferir que o próprio manuseio da usina pode ter afetado a coleta, como o ato de desligar e ligar o equipamento, o que pode dispersar os finos acumulados no fundo do tambor misturador, ou a utilização do pré-silo, localizado no elevador da mistura asfáltica, ainda próximo à saída do tambor misturador (onde estava o amostrador), para a eliminação de algum refugo de material, o que ocasionaria o grande acúmulo de MP. Além disso, procedimentos usuais no canteiro da usina também podem ter acarretado essa concentração elevada, como o transporte de material pétreo de granulometria fina nas proximidades do amostrador.

Os limites das concentrações de MP utilizados para comparação dos valores obtidos foram os adotados pela OMS (2006) e pelo CONAMA (CONAMA 491/2018), que são equivalentes. Nesse caso, foi utilizado o limite de padrão de qualidade final, o mais rigoroso, igual a $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ para um período de amostragem de 24 horas. Sendo assim, obtém-se o valor de $2,08\mu\text{g}/\text{m}^3$ para concentração em uma hora. A partir da Figura 7, que apresenta um gráfico com os valores obtidos, percebe-se que, para todos os casos, os valores limites estabelecidos pelas normas são ultrapassados, principalmente com a usina em funcionamento.

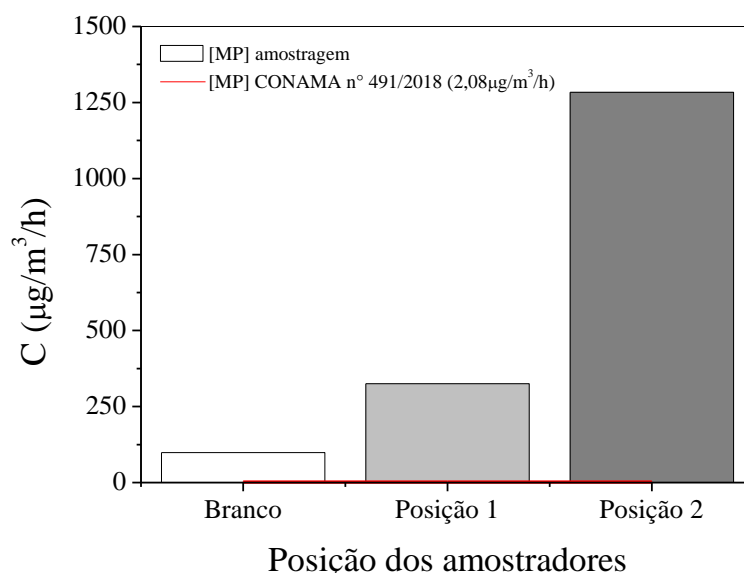


Figura 7: Resultados de emissões de Material Particulado (MP) na usina (Fonte: autor).

3.2. NO₂

A Tabela 6 mostra os resultados das concentrações de NO₂ coletado na usina no período de usinagem da mistura asfáltica e no período em que a usina estava inativa, denominado de “Branco”. Para efeitos de comparação com as legislações vigentes, os valores foram divididos pelo período de amostragem (72 horas), de modo que fossem obtidos valores de concentração por hora.

Tabela 6: Concentrações de NO₂ obtidas na usina de asfalto

Pontos	Concentrações de NO ₂ (µg/m ³ /h) – “Branco”	Concentrações de NO ₂ (µg/m ³ /h) – Usina ativa
Ponto 1	13,5244	18,9225
Ponto 2	11,2607	15,8752
Ponto 3	17,1812	31,1990
Ponto 4	14,9175	26,9327
Ponto 5	11,8701	22,2311
Ponto 6	18,3131	32,2438
Ponto 7	10,2158	32,9403
Ponto 8	16,8329	16,1364
Ponto 9	3,5988	12,3925
Ponto 10	15,0045	23,4500
Ponto 11	11,4348	33,3756

Com exceção do Ponto 8, observa-se que todas as concentrações obtidas de NO₂ no período em que a usina estava produzindo misturas asfálticas foi superior ao período em que ela estava inativa, com concentrações superiores em duas vezes ou mais, como foi o caso do Ponto 11. Vale ressaltar que ambos os períodos apresentaram médias de temperatura ambiente e umidade próximas, variando apenas quanto à precipitação pluviométrica, com valores superiores na coleta com a usina em funcionamento, o que pode ter causado redução nos valores de concentração obtidos, de modo que o impacto do funcionamento da usina pode ser ainda maior do que os valores encontrados neste estudo.

A Figura 8 mostra um gráfico com as concentrações de NO₂ obtidas para cada ponto nas duas situações em que as amostras foram coletadas. Para todos os casos, é observado que as concentrações ficaram inferiores aos valores de limites mais rigorosos, que são os de padrão de qualidade final, de ambos os órgãos, cujas legislações foram utilizadas para fins de comparação (CONAMA e OMS), que é igual a 200µg/m³/h. O mesmo aconteceu no estudo realizado por Rubio *et al.* (2012), onde os dados de concentração obtidos para NO_x, a partir do uso de analisadores automáticos, resultou em valores inferiores (51ppm) aos limites da legislação vigente na época onde foi feito o estudo de caso (300ppm), ainda que o analisador tenha sido alocado diretamente na saída da unidade de exaustão da usina (fonte pontual).

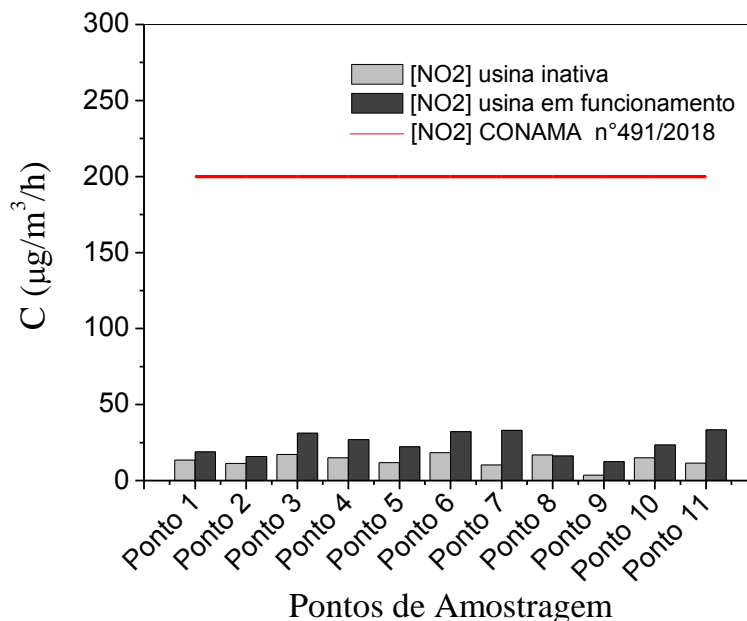


Figura 8: Resultados de emissões de NO₂ na usina (Fonte: autor).

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Compreender a problemática das emissões asfálticas provenientes do processo de pavimentação é de extrema importância. Isto poderá auxiliar tomadores de decisão na área a inovar processos, regulamentar atividades, reduzir e/ou tratar as emissões de poluentes, dentre outros benefícios.

Entre as amostragens realizadas neste estudo, percebeu-se que os valores encontrados para as concentrações de MP foram bastante superior ao valor limite adotado, o que pode resultar em sérios riscos para a saúde dos trabalhadores envolvidos e para a população que frequenta ou reside no entorno da usina. No entanto, ressalta-se a alta variabilidade dos resultados, o que leva à necessidade de maior compreensão de variáveis meteorológicas e de maior controle do processo de usinagem, bem como do que acontece no canteiro da usina, para que se possa entender melhor o comportamento da dispersão do MP nesses locais.

Quanto às amostragens de NO₂, percebe-se que os valores de concentração obtidos para este poluente esteve abaixo do valor limite adotado, mesmo quando comparado com os valores máximos obtidos nos pontos de amostragem durante a usinagem de misturas asfálticas. Apesar de, aparentemente, os resultados encontrados não representarem um risco aos trabalhadores da usina e à população que frequenta e reside nas proximidades, seria interessante realizar um monitoramento da usina durante o período seco, tendo em vista que as precipitações pluviométricas podem ter afetado estas concentrações.

Ademais, as legislações utilizadas para esta comparação podem não ser adequadas, tendo em vista que tratam de padrões de qualidade do ar, e não de uma legislação específica para esse tipo de atividade industrial, o que revela a necessidade de regulamentação de níveis de concentração de poluentes atmosféricos para processos de usinagem de misturas asfálticas.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, NUTEC, LACOR, LANÁGUA e LAT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J.A. e Soares, J. B. (2010). *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros*. PETROBRAS/ABEDA, Rio de Janeiro.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA nº 491/2018, de 19 de novembro de 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 01/07/2019.
- Fontenele, P.V.G., Castelo Branco, V.T.F, 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. DOI:10.14295/transportes.v26i2.1447
- Gaufrey, V.; Deygout, F.; Viranaiken, V.; Le Coutaller, P.; Paranhos, R.; La Roche, C. (2008) Laboratory identification of fumes during manufacturing of hydrocarbons mixtures. *Anais do International Symposium on Asphalt Pavements and Environment (ISAP)*, France, p. 278-286.
- Gong, J.; Wang, Q.; Xi, Z.; Xi, Z.; Cai, J.; Ding, G.; Xie, H. (2019). Performance evaluation of warm mix asphalt additive modified epoxy asphalt rubbers. *Construction and Building Materials*, v. 204, p.288–295. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.197
- Kim, K.H; Kumar, P.; Szulejko, J. E.; Adelodun, A.; Junaid, M. F.; Uchimya, M.; Chambers, S. (2017) Toward a better understanding of the impact of mass transit air pollutants on human health. *Chemosphere*, v.174, p.268-279. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.01.113
- Ma, F.; Sha, A.; Lin, R.; Huang, Y.; Wang, C. (2016) Greenhouse Gas Emissions from Asphalt Pavement Construction: A Case Study in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. v. 13, p. 351-365. DOI:10.3390/ijerph13030351.
- NIOSH (2000) *Health effects of occupational exposure to asphalt: hazard review*. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH.
- OMS (2006) Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Organização Mundial da Saúde, Geneva.
- Porot, L.; Scott, D.; Gaufrey, V. (2016) Laboratory evaluation of emissions from asphalt binder and mixes using a bio-rejuvenating agent. *Anais do Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Prague, p. 1- 9.
- Ribeiro, J.P.; Barbosa, L.M.; Castelo Branco, V.T.F, Cavalcante, R.M. (2018) Avaliação da emissão de poluentes atmosféricos durante os processos de usinagem, transporte e aplicação de misturas asfálticas em ambiente urbano. *Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, Gramado, RS, p. 1831–1842.
- Rubio, M. del C.; Moreno, F.; Martínez-Echevarría, M. J.; Martínez, G.; Vázquez, J. M. (2010) Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, v. 4, p. 1-6. DOI:10.1016/j.jclepro.2012.09.036
- 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
- Thives, L. P; Ghisi, E. (2017) Asphalt mixtures emission and energy consumption: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, p. 473–484. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.087.
- Tsai, D.H.A. (2018) The effects of dynamic industrial transition on sustainable development. *Structural Change and Economic Dynamics*, v. 44, p. 46-54. DOI: 10.1016/j.strueco.2017.10.002.
- Zhu, J.; Zhang, K.; Liu, K. Shi, X. (2019) Performance of hot and warm mix asphalt mixtures enhanced by nano-sized graphene oxide. *Construction and Building Materials*, v. 217, p.273–282. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.05.054.

Amanda Pontes Maia Pires Alcantara (amanda.a@det.ufc.br)

Jefferson Pereira Ribeiro (jeffersonufc7@gmail.com)

Lucas Melo Barbosa (lucasmb@det.ufc.br)

Verônica Teixeira Franco Castelo Branco (veronica@det.ufc.br)

Bruno Vieira Bertoncini (bruviber@det.ufc.br)

Departamento de Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará

Avenida Humberto Monte, s/n. CEP: 60.440-900 – Fortaleza, CE, Brasil.

Rivelino Martins Cavalcante (rivelinocaval@gmail.com)

Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará. Avenida da Abolição, 3207. CEP:

60.165-081 – Fortaleza, CE, Brasil.