

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL PARTICULADO (MP₁₀ E MP_{2,5}) E METAIS PESADOS
PROVENIENTES DE INDÚSTRIAS SIDERÚRGICAS E METALÚRGICAS NO BRASIL.**

Rafaella Cavalcante Regis^{1*}

Patrícia da Silva Barbosa^{2*}

Lincoln Lucilio Romualdo^{3*}

Resumo: A indústria siderúrgica representa um dos pilares da economia nacional, fornecendo o aço que sustenta diversos setores produtivos. No entanto, em concomitância ao desenvolvimento deste setor, está associado à geração de rejeitos e à emissão de poluentes atmosféricos, entre os quais se destacam o material particulado inalável (MP₁₀ e MP_{2,5}), liberado principalmente por chaminés industriais. A presença dessas partículas no ar constitui um grave problema ambiental e de saúde pública, estando relacionada a doenças respiratórias e cardiovasculares. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a caracterização química do material particulado emitido por indústrias siderúrgicas e metalúrgicas no Brasil, reunindo estudos que empregaram técnicas analíticas como espectrometria de absorção atômica (EAA), fluorescência de raios X (FRX) e espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) para identificar e quantificar metais pesados associados às partículas. A literatura evidencia a variabilidade das concentrações metálicas em função das condições operacionais e do tipo de combustível empregado. Ressalta-se, por fim, que a caracterização química do MP₁₀ e MP_{2,5} é fundamental para compreender a origem das emissões, avaliar seus impactos ambientais e subsidiar políticas públicas voltadas à mitigação da poluição atmosférica e à promoção da qualidade do ar em regiões industriais brasileiras.

Palavras-chave: Material particulado; indústria siderúrgica; análises químicas.

INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos principais riscos ambientais à saúde humana, ocupando a segunda posição entre os fatores de risco para doenças não transmissíveis e sendo responsável, anualmente, por milhões de mortes prematuras em todo o mundo (Shairsingh *et al.*, 2023). De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), quase toda a população mundial (99%) está exposta a níveis de poluentes atmosféricos superiores aos considerados seguros, contribuindo para o

^{1*} Instituto de Química – UFCAT: rafaellacavalcanter@gmail.com, barbosa-patricia@outlook.com, lincolnromualdo@ufcat.edu.br

aumento de risco de doenças cardiovasculares, acidentes vasculares cerebrais, doenças respiratórias e diferentes tipos de câncer (World Health Organization, 2025; Lestari, Arrohman, Damayanti, Klimont, 2022; Shovdirov, 2024).

As principais fontes de poluição atmosférica de origem antropogênica são representadas pelos setores de transporte e industrial, cujas atividades em larga escala promovem a liberação contínua de poluentes no ambiente (Kushkbaghi, Ehrampoush, Mirhosseini dehabadi, 2017; Palacio *et al.*, 2023). A crescente demanda por processos industriais mais sustentáveis tem impulsionado a busca por tecnologias que reduzam as emissões de poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e materiais particulados (MP) (Deng *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, governos em todo o mundo têm intensificado esforços para melhorar a qualidade do ar e reduzir os impactos e custos associados à saúde pública (Holloway *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2020). Desde 1987, a OMS emite periodicamente diretrizes de qualidade do ar baseadas em evidências científicas, as quais visam orientar políticas e ações voltadas à redução da exposição humana à poluição atmosférica e de seus efeitos adversos. Em 2023, as diretrizes foram atualizadas e recomendados novos níveis de qualidade do ar para proteger a saúde das populações e consequente mitigação das mudanças climáticas (World Health Organization, 2023; World Health Organization, 2021).

A poluição atmosférica associada às atividades industriais representa um desafio ambiental, especialmente em função da emissão de material particulado contendo espécies químicas potencialmente tóxicas. Entre as diferentes classes de partículas, destacam-se as frações MP₁₀ e MP_{2,5}, definidas a partir do diâmetro aerodinâmico das partículas, por apresentarem alta capacidade de transporte de contaminantes inorgânicos, como metais pesados, além de maior persistência na atmosfera. Do ponto de vista químico, essas partículas constituem sistemas complexos, formados predominantemente por óxidos metálicos, sais inorgânicos e compostos condensados a partir de processos térmicos industriais (Guo *et al.*, 2022).

A média global de concentração de partículas finas em suspensão com diâmetro inferior a 2,5 micrômetros (MP_{2,5}) é de 31,70 µg/m³, que indica um cenário de elevada exposição populacional à poluição atmosférica. Em 2019, o Brasil

registrou concentração média anual de $MP_{2,5}$ de $10,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$, cujo montante corresponde a cerca de 10% abaixo da média das Américas (World Health Organization, 2024).

No contexto industrial brasileiro, as indústrias siderúrgicas e metalúrgicas constituem um importante segmento econômico do país, no entanto, estão intrinsecamente associadas a processos emissores de material particulado atmosférico (Rocha; Guimarães, 2017). Esses setores operam em condições de alta temperatura, favorecendo a volatilização de metais e a formação de partículas finas enriquecidas em elementos como ferro, manganês, zinco, chumbo, cromo e níquel (Oliveira, 2014).

Do ponto de vista da química ambiental, a caracterização do material particulado não se limita à determinação da concentração mássica, mas envolve a identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes, bem como a compreensão dos mecanismos de formação, transformação e estabilização desses materiais. Apesar da existência de estudos sobre emissões atmosféricas da indústria siderúrgica no Brasil, observa-se que os resultados apresentam variações significativas quanto às metodologias analíticas empregadas, aos elementos investigados e à forma de interpretação dos dados químicos.

Nesse cenário, esse trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a caracterização química do material particulado proveniente de indústrias siderúrgicas e metalúrgicas no Brasil, reunindo estudos que aplicaram técnicas analíticas para identificar a composição das frações MP_{10} e $MP_{2,5}$, bem como para a quantificação de metais pesados associados a essas emissões.

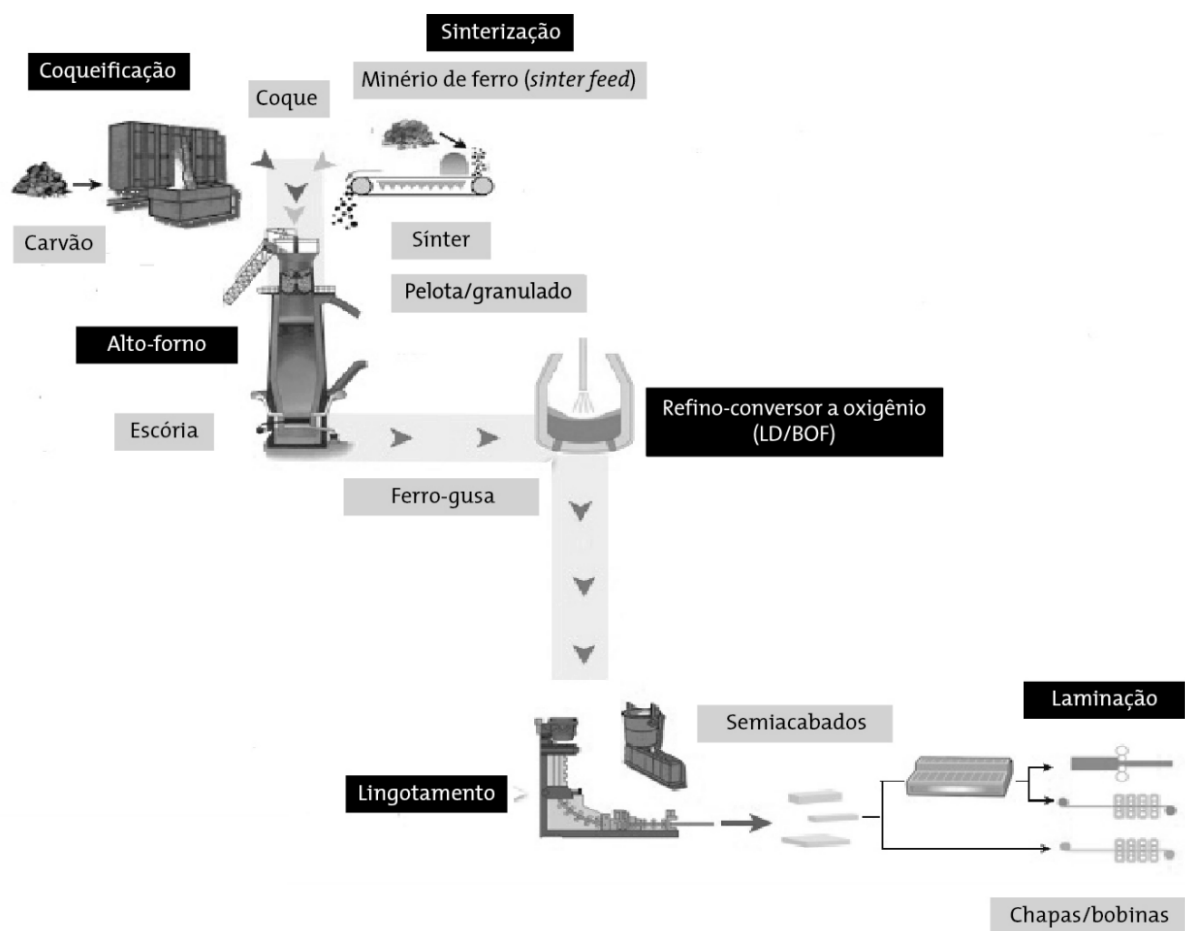
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Panorama da Indústria siderúrgica

A indústria siderúrgica visa à produção de aço por meio de etapas que incluem a extração do minério de ferro, a obtenção do ferro-gusa no alto-forno, o refino na aciaria, o lingotamento e as operações de laminação e acabamento, os quais favorecem a geração e a emissão de partículas sólidas e aerossóis metálicos para a atmosfera (Cuconato, 2019).

Carvalho, Mesquita, Araújo (2015) elaboraram um esquema simplificado da produção de aço, apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Rota de produção do aço.



Fonte: Carvalho, Mesquita, Araújo (2015).

Reis *et al.* (2025) define os principais coprodutos gerados na indústria siderúrgica: a poeira de dessulfurização do ferro-gusa, os resíduos da dessulfurização de gases de combustão, o pó retido em filtros de mangas provenientes da sinterização, os lodos finos siderúrgicos oriundos de sistemas de lavagem e tratamento úmido de gases, a poeira coletada em precipitadores eletrostáticos, o lodo de alto-forno e o pó de alto-forno, os quais apresentam composições ricas em óxidos metálicos e carbono.

Conforme dados da Associação Mundial do Aço, em 2024, China, Índia e Japão lideraram a produção global de aço. No mesmo período, o Brasil ocupou a

nona posição no ranking mundial, com uma produção de 33,2 milhões de toneladas, destacando-se como o maior produtor de aço da América Latina e superando países de reconhecida tradição industrial (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2025; WHO, 2025b).

No entanto, embora esse volume de produção reflita avanços científicos e tecnológicos, ele também traz consigo sérios impactos ambientais. Em 2023, a produção de aço bruto foi responsável pela emissão de 1,92 tonelada de dióxido de carbono por tonelada de aço bruto fundido, além de gerar resíduos significativos provenientes do processo de beneficiamento (WHO, 2025b).

A intensidade de emissões de poeira, definida como a massa de material particulado emitida por tonelada de aço bruto produzido, atingiu em 2024 o valor de 0,32 kg de MP por tonelada de aço, segundo indicadores de sustentabilidade do setor (WHO, 2025a).

As siderúrgicas possuem grande potencial para a emissão de poluentes atmosféricos e, compreender o comportamento do material particulado ambiental, especialmente as frações MP_{10} e $MP_{2,5}$, bem como seus impactos ambientais e os riscos à saúde humana associados às emissões dessas indústrias no Brasil, torna-se fundamental, reforçando a importância de sua adequada caracterização (Andrade *et al.*, 2017; CETESB, 2018).

Material particulado

O MP_{10} são partículas com diâmetro aerodinâmico igual ou menor que 10 μm , as quais podem ser inaladas e se depositar nas vias aéreas superiores. Já o $MP_{2,5}$ é composto por partículas de tamanho ainda mais reduzido, com diâmetro inferior a 2,5 μm , capazes de atingir as porções mais profundas do sistema respiratório e, em determinadas situações, transpor a barreira pulmonar e alcançar a corrente sanguínea, sendo, portanto, associadas a maiores riscos à saúde humana (World Health Organization, 2021; Farias, Silva, 2017).

De acordo com Oliveira (2014), a morfologia e o formato das partículas do material particulado estão associados à sua composição química e às condições ambientais. Partículas higroscópicas tendem a absorver água e adquirir morfologia esférica, enquanto, sob baixa umidade relativa e na presença de íons, pode ocorrer a formação de cristais sólidos. Do ponto de vista físico-químico, o material

particulado é classificado em poeiras, fumos, fumaças e névoas, conforme seu estado físico, mecanismo de formação e tamanho de partícula, sendo a morfologia um fator determinante para sua periculosidade e comportamento aerodinâmico.

A composição química do material particulado emitido para a atmosfera por atividades industriais é, em geral, dominada por elementos metálicos e compostos inorgânicos. Entre os constituintes mais frequentes destacam-se o ferro, típico dos processos siderúrgicos, bem como alumínio, cálcio e silício, associados ao manuseio de matérias-primas e à ressuspensão de poeira de origem industrial (Cuconato, 2019; Queiroz *et al.*, 2019). De acordo com Andrade *et al.* (2017), também são identificadas frações significativas de compostos secundários, como sulfatos e nitratos, resultantes da transformação atmosférica de gases liberados durante etapas de combustão e processos produtivos industriais.

O CONAMA, órgão legislador brasileiro responsável pelas diretrizes ambientais básicas, estabelece padrões nacionais da qualidade do ar através da Resolução nº 03 de 28/06/1990, tendo como base as recomendações da Organização Mundial da Saúde, determinando os limites de concentração dos poluentes, de forma a garantir o bem-estar e a saúde da população:

[...] Art. 1º São padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral (BRASIL, 1990).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a exposição da população ao ar ambiente deve atender a limites médios de longo prazo de 15,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para material particulado inalável (MP_{10}) e de 5,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para material particulado fino ($\text{MP}_{2,5}$) (World Health Organization, 2023).

Técnicas analíticas de caracterização

A caracterização química do material particulado é conduzida por meio de técnicas analíticas como a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) a fluorescência de raios X (XRF), a microscopia eletrônica de varredura associada à espectroscopia de energia dispersiva (SEM-EDS) e a cromatografia iônica. Essas metodologias possibilitam a identificação da composição elementar, a análise da morfologia das partículas e a inferência das principais fontes de emissão do material particulado (Cuconato, 2019; Goecking, 2020; Pozza, 2023).

No contexto brasileiro, em que diversas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas se encontram próximas a áreas urbanizadas, a caracterização química do material particulado configura-se como uma ferramenta fundamental para o monitoramento da qualidade do ar, a avaliação dos riscos à saúde humana e o subsídio à formulação de políticas públicas voltadas ao controle das emissões industriais, em conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação ambiental vigente (Brasil, 2018; CETESB, 2018).

A composição química do material particulado emitido por indústrias siderúrgicas está, portanto, diretamente relacionada aos processos produtivos, às matérias-primas utilizadas e às reações físico-químicas que ocorrem ao longo do processo siderúrgico.

METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo, voltada à análise da caracterização química do material particulado MP_{10} e $MP_{2,5}$ emitido por indústrias siderúrgicas e metalúrgicas no Brasil. A revisão teve como objetivo sistematizar e discutir os principais resultados disponíveis na literatura científica sobre a composição do material particulado e a presença de metais pesados associados a essas emissões.

A busca por publicações científicas foi realizada em bases de dados nacionais e internacionais amplamente reconhecidas, incluindo Scopus, Web of Science,

ScienceDirect, SciELO e Google Scholar, além de repositórios institucionais brasileiros de teses e dissertações. O levantamento bibliográfico ocorreu no período de 1º de dezembro de 2025 a 10 de janeiro de 2026.

Foram utilizados descritores em português e inglês, combinados por meio de operadores booleanos, tais como: “material particulado”, “MP₁₀”, “MP_{2,5}”, “emissões siderúrgicas”, “metais pesados”, “chemical characterization”, “particulate matter”, “steel industry emissions”, “ICP-MS” e “XRF”. Adicionalmente, as buscas foram refinadas de modo a priorizar estudos com enfoque analítico-químico do material particulado, tais como a espectroscopia de absorção atômica (EAA), a fluorescência de raios X (FRX) e a espectroscopia de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS).

Foram incluídos na revisão estudos que atenderam aos seguintes critérios:

- (i) publicações relacionadas à caracterização química de material particulado atmosférico;
- (ii) foco em emissões industriais siderúrgicas e metalúrgicas, preferencialmente no contexto brasileiro;
- (iii) descrição explícita das técnicas analíticas empregadas para determinação de metais e elementos químicos;
- (iv) artigos, dissertações, teses ou documentos técnicos publicados nos últimos 10 anos.

Após a seleção, os artigos foram analisados de forma descritiva e comparativa, buscando-se identificar padrões na caracterização do material particulado, os principais metais associados às emissões e as técnicas analíticas mais empregadas, de modo a subsidiar a discussão sobre a caracterização química do material particulado no contexto das indústrias siderúrgicas e metalúrgicas brasileiras.

RESULTADOS

A caracterização do material particulado (MP) em regiões com presença de atividades metalúrgicas é fundamental, uma vez que esse setor industrial representa uma importante fonte emissora de MP₁₀ e MP_{2,5}, frequentemente associados a

metais pesados e a outros compostos potencialmente tóxicos, capazes de impactar negativamente a saúde humana e o meio ambiente (WHO, 2013; CETESB, 2021).

As metodologias empregadas na caracterização do material particulado variam de acordo com os parâmetros avaliados e com as espécies químicas de interesse. Conforme destacado por Correa *et al.* (2023), a cromatografia iônica (CI) é amplamente utilizada para a identificação e quantificação de espécies iônicas, enquanto a espectroscopia de absorção atômica (EAA) e as técnicas de espectrometria com plasma indutivamente acoplado (ICP) são comumente aplicadas na determinação de metais associados ao MP.

Nesse contexto, Rocha e Guimarães (2017) investigaram o material particulado inalável (MP_{10}) no município de Volta Redonda com base em dados do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), referentes ao período de 2010 a 2014, considerando a influência de uma indústria siderúrgica localizada na região central do município. Os autores observaram variações significativas nas concentrações de MP_{10} , com valor máximo próximo de $145,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2014 e a menor concentração em torno de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2012. Destacou-se ainda que as maiores concentrações ocorreram em áreas situadas a jusante da atividade siderúrgica, evidenciando a influência direta das emissões industriais sobre a qualidade do ar local.

Lima *et al.* (2020) avaliaram a qualidade do ar no Distrito Industrial de Maracanaú, no estado do Ceará, durante o período de novembro de 2015 a abril de 2016, com ênfase no material particulado inalável (MP_{10}) e nos metais associados. As concentrações dos poluentes foram determinadas por espectrometria de absorção atômica, sendo observada concentração média de $46,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP_{10} . Entre os metais analisados, o ferro (Fe) apresentou a maior concentração média ($14,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sendo o elemento mais abundante. Os autores associaram os elevados níveis de Fe à influência das emissões provenientes da indústria siderúrgica, localizada à leste da estação de monitoramento.

De forma semelhante, em um estudo focado em uma área industrial de Juiz de Fora (MG), Mimura, Ferreira e Silva (2020) empregaram a EAA para caracterizar elementos em material particulado atmosférico coletado passivamente. Embora os elevados teores de Al e Fe tenham sido associados principalmente à ressuspensão de solo, os autores destacam que a própria atividade industrial da região contribuiu para esses elementos, considerando a presença de siderúrgicas. O sinal

antropogênico mais marcante foi observado para Cu e As e, principalmente, Zn, Cd e Pb. O estudo atribui esta forte assinatura às emissões industriais combinadas, especialmente da produção de zinco e da siderurgia, identificadas como as fontes prováveis para estes elementos no local, com alguma contribuição adicional do tráfego veicular.

Em uma abordagem mais ampla, Beringuia *et al.* (2021) realizaram um levantamento sobre a concentração, o tamanho e a composição química do material particulado (MP_{10} e $MP_{2,5}$) no estado do Rio de Janeiro, abrangendo estudos desenvolvidos entre 1981 e 2017. Os autores observaram que as maiores concentrações de MP ocorrem em áreas urbanas e industriais, enquanto os menores valores são registrados em locais afastados das atividades urbanas ou próximos ao litoral. Quanto à composição química, nitrato e sulfato destacaram-se como os principais compostos iônicos, ao passo que Fe, Al e Zn foram os elementos predominantes, além da presença de metais como Ni, Cd, Pb e Cu.

Esses resultados corroboram os achados de Correa *et al.* (2023), que indicam sulfato, nitrato e amônio como as principais espécies iônicas associadas ao MP_{10} e ao $MP_{2,5}$ em diferentes estudos, em função de suas concentrações relativamente elevadas.

Baseando-se na análise de partículas sedimentáveis provenientes de uma área siderúrgica, Sousa *et al.* (2021) demonstraram que a contaminação particulada transcende à atmosfera. Por meio das técnicas ICP-MS e DRX, verificou-se uma composição dominada majoritariamente por óxidos de ferro (hematita). A caracterização por DLS e NTA apresentou uma propriedade crítica: as partículas sedimentáveis são aglomerados que se dispersam em meio aquoso, liberando frações nanométricas (<200 nm). Esse mecanismo de dissociação transforma o material depositado em uma fonte contínua de nanopartículas metálicas biodisponíveis, ampliando significativamente seu potencial ecotoxicológico em corpos hídricos.

Monteiro (2025) caracterizou o material particulado atmosférico fino ($MP_{2,5}$) em uma área urbana da cidade de Manaus/AM durante a estação seca dos anos de 2022 e 2023, com foco no perfil de metais associados, utilizando a técnica de espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Os resultados indicaram diferenças na composição química da fração fina entre os

anos estudados, sendo os elementos majoritários em 2022 $\text{Ca} > \text{Na} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Ni}$ e, em 2023, $\text{Na} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Cu} > \text{Mg}$. A diversidade da composição química observada, aliada aos valores de fator de enriquecimento, indicou a contribuição de múltiplas fontes emissoras, tanto naturais quanto antrópicas.

Ribeiro (2016) analisou a poluição atmosférica por material particulado proveniente de indústrias de beneficiamento de silício e ferro-silício no município de Pirapora, por meio de análises laboratoriais voltadas à caracterização granulométrica, mineralógica (DRX) e química (FRX, ICP-OES e TOF-SIMS). Os resultados evidenciaram que o material particulado emitido é predominantemente constituído por sílica amorfa (95,52%), com partículas variando entre 0,18 e 123 μm , das quais aproximadamente 30% correspondem à fração inalável ($<10 \mu\text{m}$). Além disso, foram identificados minerais e metais como magnetita (Fe_3O_4), carbono, Zn, Cu, Pb, Cr e Ni.

De forma integrada, os estudos analisados demonstram que a presença de atividades siderúrgicas e metalúrgicas exerce influência significativa sobre as concentrações e a composição química do material particulado atmosférico, especialmente nas frações MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$. A recorrente identificação de metais potencialmente tóxicos, como Fe, Al, Zn, Pb, Cd, Ni e Cr, bem como de espécies iônicas secundárias, como sulfato, nitrato e amônio, reforça o papel das emissões industriais como fator determinante na degradação da qualidade do ar em áreas urbanas e industriais.

Nesse contexto, a análise desta revisão evidencia que as emissões de material particulado das siderurgias constituem uma fonte significativa de elementos traços com potencial toxicológico. Técnicas como EAA, ICP-OES/MS, DRX e FRX são fundamentais para traçar o perfil químico e associá-lo aos processos produtivos. A revisão indica, ainda, uma lacuna com escassez de caracterizações químicas que discriminem as emissões por processo específico na siderurgia.

CONCLUSÕES

A análise da literatura demonstra que o material particulado emitido por indústrias siderúrgicas e metalúrgicas possui composição química heterogênea, diretamente associada às rotas tecnológicas e às condições operacionais dos

processos de produção do aço. As frações MP₁₀ e, principalmente, MP_{2,5} apresentam elevada concentração de elementos metálicos, com destaque para Fe, Mn, Zn, Pb, Cr e Ni, resultantes de fenômenos de vaporização, oxidação e posterior condensação de espécies metálicas em processos de alta temperatura.

Os estudos revisados indicam a aplicabilidade de técnicas analíticas multielementares, como fluorescência de raios X e espectrometria com plasma indutivamente acoplado, na caracterização química e na quantificação de metais associados ao material particulado. Apesar da variabilidade dos resultados em função das metodologias e dos contextos industriais analisados, os dados sugerem que o MP representa um fator crítico do ponto de vista ambiental e sanitário, ressaltando a necessidade do monitoramento químico sistemático e aprimoramento de estratégias de controle de emissões atmosféricas no setor siderúrgico.

Além disso, os resultados também apontam para uma lacuna no conhecimento: a maioria das pesquisas trata a contribuição siderúrgica de forma agregada a outras fontes industriais ou urbanas. Há uma escassez de trabalhos que realizem uma caracterização química discriminada e específica por unidade de processo dentro do complexo siderúrgico. Avançar além desta abordagem genérica é fundamental para aprimorar a precisão da avaliação de fontes e de risco ambiental.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. F. *et al.* Air quality in the megacity of São Paulo: evolution over the last 30 years and future perspectives. **Atmospheric Environment**, v. 159, p. 66–82, 2017.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990. Dispõe sobre padrões nacionais de qualidade do ar em conformidade com o Pronar.** Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 28 jun. 1990. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=100. Acesso em: 03 jan. 2026.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018. **Dispõe sobre padrões de qualidade do ar.** Diário

- Oficial da União, Brasília, DF, 21 nov. 2018. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=21/11/2018&jornal=515&pagina=155>. Acesso em: 03 jan. 2026.
- BERINGUIA, K *et al.* Avaliação da concentração e composição inorgânica do material particulado coletado no estado do Rio de Janeiro. **Química Nova**, v. 44, n. 6, p. 737–754, 2021. DOI: 10.21577/0100-4042.20170717.
- CARVALHO, P. S. L. de; MESQUITA, P. P. D.; ARAÚJO, E. D. G. de. **Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.41, p. 181-236, 2015.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2018**. São Paulo: CETESB, 2019.
- CORREA, M. A. *et al.* Characterization Methods of Ions and Metals in Particulate Matter Pollutants on PM_{2.5} and PM₁₀ Samples from Several Emission Sources. **Sustainability**, v. 15, 4402, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15054402>.
- CUCONATO, M. V. S. **Caracterização química do material particulado fino (PM_{2,5}) em áreas impactadas por atividades industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- DENG, X. *et al.* Spatial distribution and sectoral characteristics of particulate matter-permitting emissions from heavy metal-emitting enterprises in China: Policy implications and environmental management strategies. **Journal of Hazardous Materials**, v. 500, 140401, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2025.140401>.
- FARIAS, R. F.; SILVA, E. C. Metais pesados em material particulado atmosférico e seus impactos ambientais. **Química Nova**, v. 40, n. 6, p. 686–696, 2017.
- GOECKING, I. S. F. **Caracterização físico-química do material particulado atmosférico em área urbana e industrial**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- GUO, X. *et al.* Effects of atmospheric aging processes on carbonaceous species and water-soluble inorganic ions in biomass burning aerosols. **Atmospheric**

- Environment**, v. 288, 119322, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119322>.
- HOLLOWAY, T. *et al.* Satellite monitoring for air quality and health. **Annu Rev Biomed Data Sci**, v. 4, n. 1, p. 417, 2021.
doi.org/10.1146/annurev-biodatasci-110920-093120.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. **Anuário estatístico 2025. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2025.** Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br>>. Acesso em: 03 jan. 2026.
- KUSHKBAGHI S.; EHRAMPOUSH, M. H., MIRHOSSEINIDEHABADI, S.A. Assessment of role of concrete factories in particulate matter emissions, 2015-2016, using the AQI index and zoning by GIS software (Case study: Nasr Kashan Concrete Factory). **Environmental Health Engineering and Management Journal**, v. 4, n. 3, p. 149-155, 2017. doi: 10.15171/EHEM.2017.21.
- LESTARI, P.; ARROHMAN, M. K.; DAMAYANTI, S.; KLIMONT, Z. Emissions and spatial distribution of air pollutants from anthropogenic sources in Jakarta. **Atmospheric Pollution Research**, v. 13, n. 9, p.101521, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101521>.
- LIMA, J. R. *et al.* Avaliação da poluição atmosférica na área do Distrito Industrial de Maracanaú (CE), Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 3, p. 509–520, maio/jun. 2020. doi: 10.1590/S1413-41522020175292.
- MIMURA, A. M. S.; FERREIRA, C. C. M.; SILVA, J. C. J. Evaluation of atmospheric particulate matter from an industrial area in Southeast Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 12, 2020. Doi: 10.1007/s10661-020-08743-y.
- MONTEIRO, M. D. de O. **Perfil de metais nas partículas atmosféricas de Manaus/AM.** 2025. Dissertação (Mestrado em Química) — Programa de Pós-Graduação em Química, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2025.
- OLIVEIRA, A. A. B. **Inventário das emissões atmosféricas na indústria siderúrgica.** 2014. 85f. Monografia (Curso de Engenharia Metalúrgica) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

- PALACIO, L. C. *et al.* Characterization of airborne particulate matter and its toxic and proarrhythmic effects: A case study in Aburrá Valley, Colombia. **Environmental Pollution**, v. 336, 122475, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122475>.
- POZZA, S. A. *et al.* Particulate matter pollution and non-targeted analysis of polar compounds in three regions of Brazil. **Chemosphere**, v. 341, 139839, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139839>.
- QUEIROZ, P. G. M. *et al.* Avaliação da contribuição de fontes industriais para o material particulado atmosférico em regiões urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 3, p. 415–428, 2019.
- REIS, M. B. *et al.* Characterization of steel industry co-products and recycling pathways. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 40, p. 1307-1344, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.12.150>.
- RIBEIRO, E. V. **A indústria metalúrgica na região de Pirapora-MG/Brasil: a distribuição da poluição por material particulado, sua composição e impactos associados**. 2016. 161 f. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- ROCHA, N. L. T.; GUIMARÃES, C. de S. Estudo da Qualidade do Ar e a Atividade Siderúrgica na Cidade de Volta Redonda. **Cadernos UniFOA**, v. 12, n. 33, p. 25–36, 2017. doi: 10.47385/cadunifoa.v12.n33.497.
- SHAIRSINGH K. *et al.* WHO air quality database: relevance, history and future developments. **Bull World Health Organ**, v. 101, n. 12, 800-807, 2023. doi: 10.2471/BLT.23.290188.
- SHOVDIROV, S. Analyzing the sources and consequences of atmospheric pollution: A case study of the Navoi region. **E3S Web of Conferences**, v. 587, 02016, 2024. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458702016>
- SOUZA, I. C. Atmospheric particulate matter from an industrial area as a source of metal nanoparticle contamination in aquatic ecosystems. **Science of The Total Environment**, v. 753, 141976, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141976>.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air pollution data portal**. **Global Health Observatory**, 2025. Disponível em:

<https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution>. Acesso em: 03 jan. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air Quality Database App: app for exploring air quality in countries. WHO Air Quality Database (update 2024), version 6.1.** Geneva: World Health Organization, 2024. Disponível em: https://worldhealthorg.shinyapps.io/AmbientAirQualityDatabaseV6_1/. Acesso em: 03 jan. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO ambient air quality database, 2022 update: status report.** Geneva: World Health Organization, 2023. Disponível em: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/34c921bb-f3ce-4dcd-a7f8-e405ecaed126/content>. Acesso em: 2 jan. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** Geneva: WHO, 2021.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project.** Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. WORLD STEEL ASSOCIATION. **Sustainability indicators report 2025: sustainability performance of the steel industry.** Brussels: World Steel Association, 2025a. Disponível em: <https://worldsteel.org>. Acesso em: 02 jan. 2026.

WORLD STEEL ASSOCIATION. **World Steel in Figures.** Belgium: World Steel Association, 2025b. Disponível em: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2025-3.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2026.

ZHANG, F. *et al.* Monitoring history and change trends of ambient air quality in China during the past four decades. **Journal of Environmental Management**, v. 260, 110031, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110031>.