

# DESAFIOS NAS MEDIÇÕES DE NÍVEIS BAIXOS DE EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA\*

Ivan R. Jankov<sup>1</sup>

Henrique José Rodstein<sup>2</sup>

Gabriel Alcoforado<sup>3</sup>

## Resumo

Os limites de emissão de material particulado na indústria siderúrgica são definidos por legislação ambiental, normas das agências reguladoras e/ou por políticas ambientais da própria empresa, podendo chegar até 5 mg/Nm<sup>3</sup>. A implementação de equipamentos de despoeiramento para atender aos limites de emissão sempre é acompanhada de testes de performance, baseados em medições do tipo gravimétrico nas condições isocinéticas, que são utilizados para demonstrar o cumprimento das especificações do projeto, bem como para parametrização de sistemas de monitoramento contínuo. As medições baseadas em procedimentos definidos nas décadas de 1970 a 1990, apresentavam resultados questionáveis para níveis baixos de emissão de material particulado e, em consequência, na EU e nos EUA foram editadas recentemente metodologias específicas para este caso. Mesmo considerando que a execução de testes gravimétricos seja um procedimento bastante comum, quando da medição de baixos níveis de emissão de particulado, cuidados especiais são necessários para que as incertezas não invalidem o resultado, pois em alguns casos a reprodutibilidade chegou a atingir aproximadamente 50% do valor medido. É nosso objetivo analisar os principais fatores que influenciam a repetibilidade de medição, e, baseado nas experiências reais, apresentar as práticas que precisam ser implementadas para aumentar a confiabilidade dos resultados.

**Palavras-chave:** Emissões de material particulado, Metodologias de análise de material particulado, Sistemas de despoeiramento, Siderurgia.

## CHALLENGES IN THE MEASUREMENTS OF LOW LEVEL EMISSIONS OF PARTICULATE MATTER IN STEEL INDUSTRY

### Abstract

The Emission Limit Values (ELVs) for the Particulate Matter in the steel industry are defined by environmental legislation, requirements of the competent authorities, and/or environmental policies of the company, reaching 5 mg/Nm<sup>3</sup>. The implementation of the dedusting equipment to reach ELVs are always accompanied by performance test, based on gravimetric measurements of isokinetically obtained samples, which are used to demonstrate the abiding to the project specifications, as well as parametrisation of the Continuous Emission Monitoring systems. The measurements based on methods defined in the 1970s to 1990s, have shown questionable results for low level emissions of particulate matter. And, as a consequence, in EU and USA, new methods have been promulgated specific for such case. Although the performance of gravimetric tests is relatively common, when applied to low level emissions of particulates, special precautions are needed in order to ensure that the uncertainties do not invalidate the result, since in some cases the reproducibility reached approximately 50% of the measured value. It is our goal to analyse the main factors, which influence the repeatability of the measurement and, based on the hands-on experience, present the practices which need to be implemented in order to increase the result reliability.

**Keywords:** Emission of particulate matter, Methods of particulate matter analysis, Dedusting systems, Steel plants.

<sup>1</sup> Físico, Ph.D., Coordenador de Engenharia de Aplicação - Controle de Poluição Atmosférica, Rhamatech, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Eletrotécnico, Diretor Geral, Emrod Engenharia, São Paulo, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Eletricista, MSc., Especialista em Projetos de Engenharia, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil

## 1 INTRODUÇÃO

No setor industrial mundial há uma tendência para definir limites de emissões de material particulado cada vez mais restritivos. Como possível exemplo desta tendência, na União Europeia, os limites máximos de emissão de material particulado nas plantas siderúrgicas integradas são normalmente abaixo de 20 mg/Nm<sup>3</sup> (e em algumas áreas podem chegar até 5 mg/Nm<sup>3</sup>) [1].

Na legislação brasileira, as emissões das fontes fixas (ou seja, medidas nas chaminés) na área siderúrgica são determinadas pelas resoluções da CONAMA 382 (de 2006) e 436 (de 2011), para plantas novas e existentes, respectivamente. Entretanto, estima-se que esta legislação será revisada no futuro próximo, contemplando os limites de emissão mais baixos.

É importante salientar que as outras considerações também podem influenciar as emissões efetivas no setor industrial. Os órgãos ambientais podem exigir emissões mais restritivas, em comparação a legislação federal, devido as condições de poluição de bacia aérea local, bem como para diminuir a visibilidade da pluma na chaminé. Além disso, uma planta siderúrgica pode decidir implementar os projetos com as emissões menores, do que exigidos pela legislação nacional, devido às políticas ambientais da própria empresa, ou seja, no caso de empresas multinacionais que mantem os mesmos critérios ambientais de projeto, independentemente do país da localização da planta.

As plantas siderúrgicas brasileiras estão modernizando os equipamentos de controle de poluição atmosférica devido aos seguintes motivos principais: limites de emissão mais restritivos exigidos pelos órgãos ambientais, mudança do processo que implica na inclusão de novos pontos de despoeiramento, ineficiências de operação e manutenção dos equipamentos, falhas no projeto original do sistema de controle ambiental. Isto normalmente implica em reforma dos Precipitadores Eletrostáticos e/ou implementação das tecnologias de mangas filtrantes (Filtro de Mangas, Filtro Híbrido) [2-4].

A implementação dos equipamentos de despoeiramento é acompanhada de testes de performance, baseados em medições do tipo gravimétrico nas condições isocinéticas. Estes são utilizados para demonstrar o cumprimento das especificações técnicas e garantias do projeto. Além disso, como os sistemas de monitoramento contínuo nas chaminés são exigidos cada vez mais frequente, para a sua parametrização é necessário realizar as medições independentes (utilizando outra metodologia, baseado em princípio analítico distinto em comparação com o do monitoramento contínuo).

De forma geral, a medição de concentração de material particulado é mais complexa que a medição dos gases, devido a não uniformidade de distribuição de material particulado no fluxo gasoso em conjunto com a não uniformidade da velocidade do gás na chaminé/duto. Além disso, durante a coleta das amostras, devido ao processo de condensação, podem se formar partículas novas (o que não ocorreria nas condições de temperatura/pressão do gás na chaminé/duto) influenciando/distorcendo assim os resultados finais. Isto propiciou a elaboração das diretrizes muito precisas para conseguir as amostras representativas.

Entretanto, para níveis baixos de emissão de material particulado, notou-se que as medições baseadas em procedimentos definidos nas décadas de 1970 a 1990, por exemplo, USEPA 5, USEPA 17 e ISO 9096, apresentavam resultados questionáveis. Mesmo considerando que a execução de testes gravimétricos seja um procedimento conhecido, quando da medição de baixas quantidades de particulado, cuidados especiais se mostraram necessários para que as incertezas não invalidem o resultado, pois em alguns casos a reproducibilidade chegou a atingir aproximadamente 50 % do valor medido [5].

Desta forma, em paralelo com o desenvolvimento das tecnologias capazes de atingir os níveis baixos de emissão, era necessário promulgar as novas metodologias de medição de material particulado para estes casos. Além disso, o monitoramento atmosférico de material particulado com tamanhos menores ( $PM_{10}$  e  $PM_{2,5}$ ), introduzido nas últimas décadas, impulsionou o desenvolvimento das metodologias específicas. Por exemplo, na União Europeia, a metodologia EN 13284-1, baseada na filtração de material particulado de uma amostra isocinética coletada in-situ (requerendo posteriormente a análise de filtro em um laboratório), é adequada para concentrações abaixo de  $50 \text{ mg/Nm}^3$  (a metodologia foi testada e validada para as concentrações de 2 a  $5 \text{ mg/Nm}^3$ ). Salienta-se que os procedimentos que descrevem os requerimentos de medição (número e posição de pontos de coleta, etc), por exemplo, EN 15259, também precisam ser respeitados para obter os resultados confiáveis. Para os casos de sistemas de monitoramento contínuo, existem os procedimentos específicos que precisam ser seguidos, por exemplo, EN 14181 e EN 13284-2.

A principal preocupação nas medições de níveis baixos de emissão é minimizar as incertezas dos resultados. Todas as fontes de incertezas precisam ser analisadas com o objetivo de determinar as mais relevantes, bem como distinguir quais das fontes possam ser controladas/corrigidas pelo especialista de amostragem e quais não (por exemplo, condições operacionais da planta, condições ambientais, localização dos pontos de coleta).

No Brasil, a execução de testes gravimétricos é um procedimento bastante comum para emissões acima de  $20 \text{ mg/Nm}^3$ . Entretanto, os casos das medições de baixos níveis de emissão de particulado ( $< 10 \text{ mg/Nm}^3$ ) apresentam os novos desafios. Neste artigo, analisamos os principais fatores que influenciam a repetibilidade de medição, e, baseado nas experiências reais, apresentamos as práticas que precisam ser implementadas para aumentar a confiabilidade dos resultados.

## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 Método Gravimétrico de Amostragem

Este método recebe o nome de gravimétrico devido a determinação da quantidade de material particulado presente em um gás ser feita através da passagem deste gás pelo filtro e medindo a diferença de peso do filtro antes e após a passagem do gás. A vazão do gás que passa pelo filtro é ajustada para garantir a condição isocinética da coleta. O valor da emissão (concentração) de material particulado é a

razão entre a diferença de peso do filtro, ou seja, a massa de material coletado no filtro, e a vazão de gás que passou por este.

De uma forma geral, podemos afirmar que a amostra coletada por este método representará a condição de emissão do processo quando os seguintes pontos são atendidos, entre outros:

- Homogeneidade da vazão, temperatura e composição do gás no plano de amostragem na chaminé/duto;
- Determinação correta da quantidade e localização de pontos no plano de amostragem.

### 2.1.1 Amostragem Isocinética

Uma extração isocinética significa que a velocidade e a direção do fluxo de gás na entrada do bocal da sonda são as mesmas do fluxo de gás no ponto de medição na chaminé/duto. Isto evita efeitos de separação aerodinâmica, ou seja, garante a coleta de material particulado por unidade de vazão na boquilha em quantidade igual a existente no gás, e também evita distorções na distribuição granulométrica do particulado, ou seja, garante que não haverá coleta apenas de uma faixa granulométrica do material.

Para podermos assegurar que a amostragem é isocinética, a velocidade do gás deve ser medida, através de tubo tipo Pitot, em cada ponto de posicionamento da sonda no interior da chaminé/duto. Baseado neste “mapeamento” das velocidades, o fluxo de extração de gás pela sonda deve ser correspondente calculado e, durante a coleta, ajustado através da válvula de sucção da bomba de vácuo.

### 2.1.2 Aplicação do Método

Apresentamos a seguir um resumo das instruções de aplicação do método (maiores detalhes podem ser verificados nas normas pertinentes).

Para realizar as medições, usa-se um trem de amostragem, composto por (ver **Figura 1.**):

- Sonda com boquilha, tubo tipo Pitot e sensor de temperatura;
- Filtro, que pode ser interno (localizado na parte da sonda dentro da chaminé/duto) ou externo (localizado fora da chaminé/duto); se for filtro externo, é necessário mantê-lo aquecido a uma temperatura aproximada de 120 °C, para evitar a condensação no filtro;
- Condensadores;
- Sistema de Sucção.

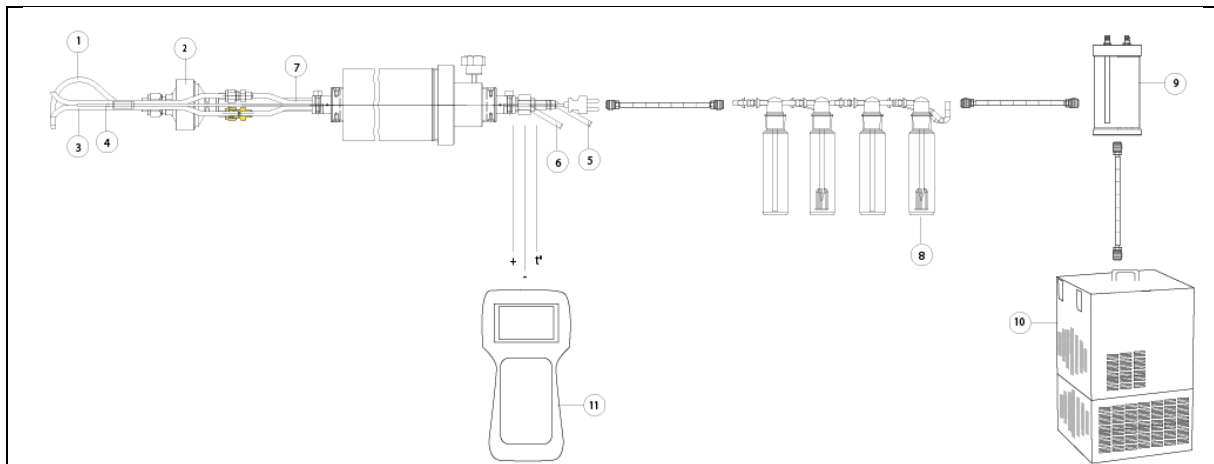


Figura 1a. Filtro interno \*)

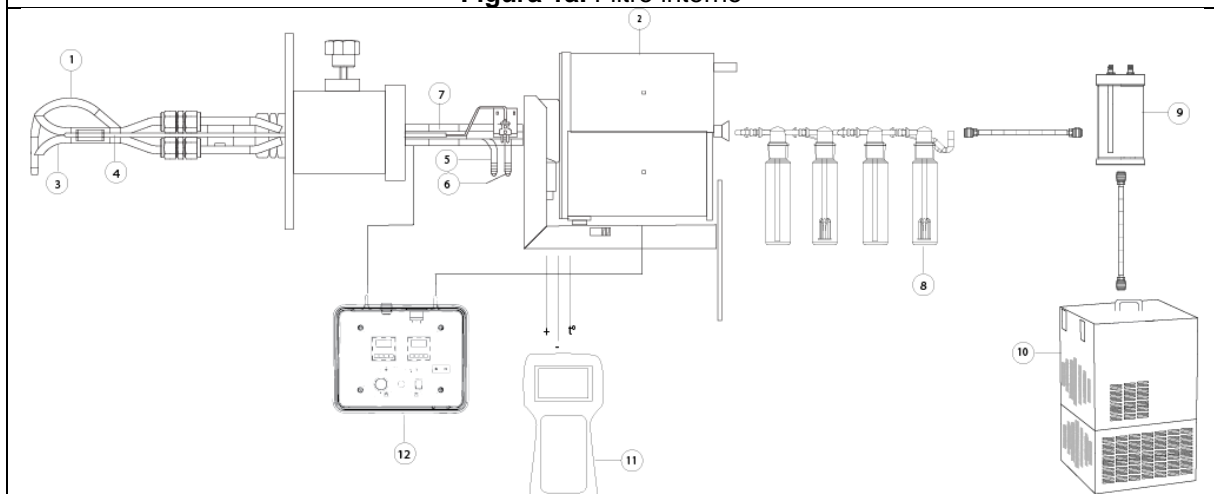


Figura 1b. Filtro externo \*\*)

Figura 1. Exemplos de trens de amostragem manual [6]

\*) 1) Boquilha, 2) Filtro e Suporte, 3) Tubo Pitot, 4) Sensor de Temperatura, 5) Conexão do Pitot (+), 6) Conexão do Pitot (-), 7) Tubulação, 8) Sílica Gel, 9) Sistema de Resfriamento e Secagem, 10) Sistema de Extração com Bomba de Vácuo e Controle, 11) Medição de Fluxo

\*\*) 1) Boquilha, 2) Filtro e Suporte, 3) Tubo Pitot, 4) Sensor de Temperatura, 5) Conexão do Pitot (+), 6) Conexão do Pitot (-), 7) Tubulação e Suportes, 8) Sílica Gel, 9) Sistema de Resfriamento e Secagem, 10) Sistema de Extração com Bomba de Vácuo e Controle, 11) Medição de Fluxo, 12) Sistema de Aquecimento do Filtro

Para aplicação deste método, deve-se definir o plano de medição na chaminé/duto onde será realizada a coleta do material particulado (as normas recomendam posições com intuito de diminuir risco de realizar as medições nos fluxos excessivamente turbulentos e/ou ciclônicos conforme demonstrado na **Figura 2.**) e a quantidade e a localização de pontos da sonda no interior da chaminé/duto (definidas pela norma de forma a se garantir que a amostragem recolhida reflita adequadamente a distribuição interna de particulado na chaminé/duto).

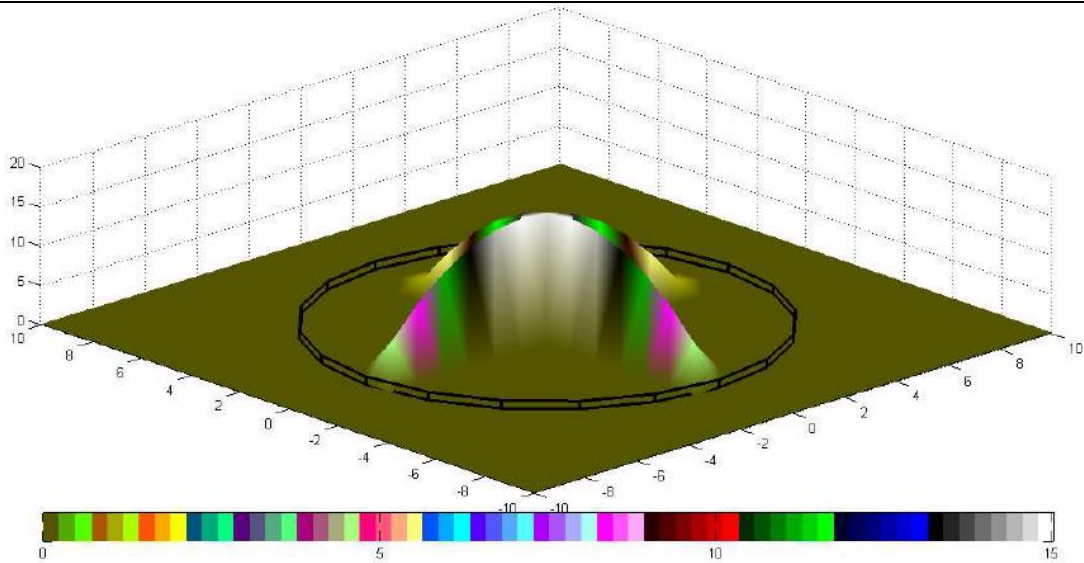


Figura 2a. Laminar

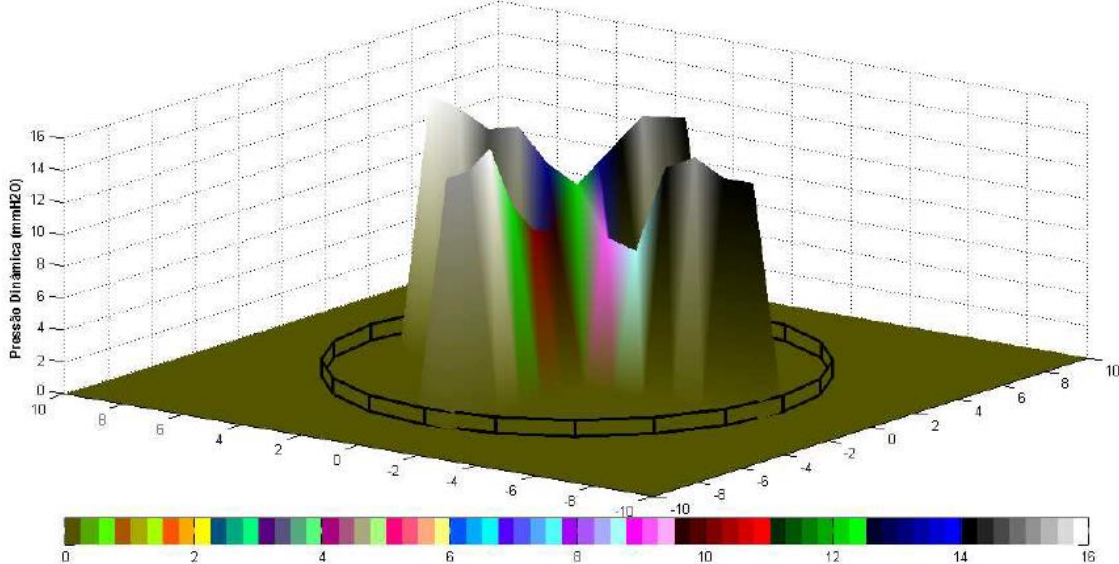


Figura 2b. Excessivamente turbulento

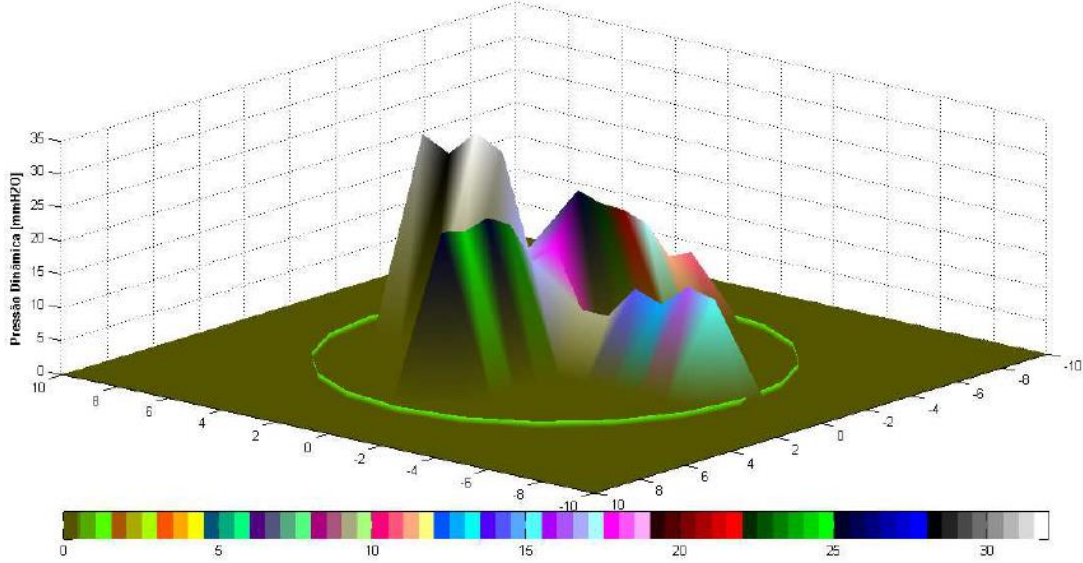


Figura 2c. Ciclônico

Figura 2. Tipos de fluxo gasosos

A sequência de aplicação deste método é:

- Testar a integridade do equipamento de medição, por exemplo, vedação, calibração;
- Determinar no plano de medição as velocidades para cada ponto ( $\Delta P$ ) através do uso de tubos tipo Pitot e calcular a vazão volumétrica do gás em cada ponto;
- Verificar que as velocidades medidas do gás não indicam a existência do fluxo excessivamente turbulento e/ou ciclônico. Caso sim, é necessário buscar outro plano de amostragem (que possui o fluxo laminar do gás) e/ou usar as normas específicas;
- Coletar a amostra de material de partículas (no filtro), sempre ajustando (através da bomba de vácuo) o fluxo de gás extraído de forma se ter uma amostragem isocinética. A amostra é coletada durante um determinado período de tempo para cada ponto e assim garantir a representabilidade da amostragem;
- Calcular o peso do material particulado retido no filtro;
- Calcular a concentração, usando a vazão considerada durante a coleta e o peso do material coletado.

## 2.2 Incertezas da Medição

A incerteza atribuída a um resultado representa o intervalo de valores em torno do resultado em que se espera estar o verdadeiro valor. Note-se que o verdadeiro valor é um conceito, e não um número a ser determinado. Todas as medições tem uma incerteza e o objetivo é quantificar esta incerteza para que os resultados possam ser interpretados corretamente.

Normalmente a incerteza vem acompanhada da indicação do percentual de confiabilidade. Este percentual define a probabilidade do verdadeiro valor se encontrar no intervalo de incerteza em torno do valor medido.

Desta forma, se a medição de uma emissão for de 10 mg/Nm<sup>3</sup> e a incerteza for de +/- 1 mg/Nm<sup>3</sup>, sendo a confiabilidade de 95 %, entende-se que, em 95 % das medições, o resultado verdadeiro encontra-se no intervalo entre 9 a 11 mg/Nm<sup>3</sup>.

O termo “precisão”, definido como a medida do acordo entre um método e o valor verdadeiro assumido, já foi utilizado no passado nas normas, mas a ISO atual considera que este não é um termo quantitativo e, portanto, não deve ser misturado com o termo “incerteza”.

Vários fatores geram incertezas, cada um com uma contribuição diferente na incerteza total da medição [5]. De forma geral, as incertezas podem ser distribuídas em 2 grupos, levando em consideração suas origens:

- Incerteza aleatória é aquela que muda entre medições sucessivas de forma aleatória (randômica), no período das medições. Isto compreende, entre outros, os erros humanos na execução dos testes, falhas na aplicação do método, manuseio inadequado do filtro e condições de processo inadequadas (não estáveis);

- Incerteza sistemática é aquela que permanece inalterada durante o período de medições, ou seja, um aumento do número de medições não reduz necessariamente os efeitos desta incerteza. Isto compreende, entre outros, as imprecisões dos processos de pesagem de material e dos equipamentos de controle do Sistema de Sucção.

O enfoque genérico do Guia para Expressão de Incertezas de Medição [7], que se tornou a base para órgãos internacionais de padronização, precisa ser levado em consideração no cálculo da incerteza total de medição. O objetivo é ter uma incerteza total de +/- 5%.

Os passos que devem ser tomados para a definição da incerteza são:

- Analisar o método de medição e identificar potenciais fontes de incerteza;
- Quantificar as fontes significativas de incerteza, ou seja, descartar cada fonte que contribui com menos de 10% da fonte principal/maior [8];
- Calcular a incerteza e a confiabilidade;
- Emitir o relatório com o resultado da medição sempre acrescido do valor de incerteza e de confiabilidade.

Uma forma de se diminuir a incerteza é a execução de várias coletas e considerar a média dos valores de emissão obtidos como o sendo valor verdadeiro. Lembramos que esta sistemática diminui o efeito das incertezas aleatórias, mas não o efeito das incertezas sistêmicas.

### 2.3 Recomendações para Diminuir as Incertezas na Aplicação do Método

Baseado na nossa experiência prática, abaixo são listados alguns dos pontos a serem observados quando da aplicação do método gravimétrico no caso de baixos níveis de emissão de material particulado:

- Furos para inserção da sonda na chaminé/duto  
As normas antigas definiam furos com diâmetros de 3" a 4". Com sondas de dimensões próximas a 3" e considerando que qualquer choque da sonda com a parede do furo é uma possível fonte de contaminação da amostragem, recomendamos que o furo tenha um diâmetro de 5" a 6", conforme norma EN 13284.
- Tamanho da sonda  
O tamanho de boquilha é relacionado com a vazão necessária de sucção, que por sua vez deve refletir as condições de fluxo na chaminé/duto. Entretanto, na norma EN 13284 recomenda-se o uso de boquilha de 8 mm e, portanto, a capacidade da bomba de vácuo precisa ser escolhida adequadamente.
- Manuseio da sonda  
Quando da inserção da sonda deve-se aguardar um certo tempo para termos a certeza da sonda estar na mesma temperatura dos gases. O tempo menor pode implicar em condensação na sonda devido a temperatura menor, o que altera o resultado das medições.
- Manuseio do filtro  
De acordo com a norma EN 13284, recomenda-se o uso de filtro integrado na sonda (dentro da chaminé/duto), já que, no caso de filtros separados da



sonda, a troca de filtros é fonte de erros. Desta forma, após cada coleta, deve ser trocado o conjunto filtro+sonda (que são previamente preparados antes da medição e levados para o laboratório após a medição).

- Tipo de filtro

O uso de filtro tipo Dedal, típico para coletas de maior quantidade de particulado, deve ser evitado, dando-se preferência a filtros tipo Disco (PETRI). Para o material do filtro existem várias possibilidades, sendo as mais comuns para medição de baixo valor de emissão a fibra de quartzo com 47 mm ou fibra de vidro com PTFE.

- Duração da coleta

As normas “tradicionais” indicam uma duração mínima de coleta de 1 hora. Quando da medição de baixa emissão este período implica em uma quantidade muito pequena de material coletado com conseqüente aumento na incerteza dos resultados, pois são mais sensíveis a eventuais desvios. Baseado em nossa experiência, recomendamos que se tenha no mínimo 20 mg do material coletado no filtro, que corresponde a um período mínimo de 4 horas para a coleta.

- Sistema de sucção

A inserção da sonda na chaminé/duto é feita pelo operador, que faz manualmente a colocação da sonda nos pontos de amostragem. Durante o tempo de amostragem, em cada ponto deve-se controlar a pressão de sucção da bomba ( $\Delta P$ ) para se manter a condição isocinética. Os sistemas de sucção podem ser com controle manual, semiautomático e automático. O controle manual é o mais econômico, mas torna a medição mais dependente do operador e mais suscetível a erros humanos, principalmente em coletas com tempo de execução mais longo. Desta forma recomendamos que, sempre que possível, seja utilizado um equipamento semiautomático ou automático.

- Estabilidade processual

As normas citam que a aplicação deste método pressupõe uma estabilidade processual. Variações bruscas de vazão e temperatura podem ocasionar a perda da condição de medição isocinética. Também a variação da composição dos gases, com mudança do teor de umidade e das características físico-químicas do material particulado influenciam o resultado da medição. Por outro lado, como a duração da coleta é maior em relação as normas “tradicionais” (várias horas; ver acima), esta estabilidade processual se torna muito mais crítica. Desta forma, os parâmetros processuais (inclusive o “mapeamento de velocidades na chaminé/duto) devem ser medidos no início e no final de cada dia de coleta e não apenas uma vez no início de bateria de testes.

### 3 CONCLUSÃO

No setor industrial mundial há uma tendência para definir limites de emissões de material particulado cada vez mais restritivos. A implementação de equipamentos de despoeiramento para atender aos novos limites de emissão sempre é acompanhada de testes de performance, baseados em medições do tipo gravimétrico nas condições isocinéticas, que são utilizados para demonstrar o cumprimento das especificações do projeto, bem como para parametrização de sistemas de monitoramento contínuo. Com o advento de limites mais restritivos de emissão

tornou-se necessário promulgar novas metodologias de medição de material particulado, específicas para estes níveis baixos de emissão.

No Brasil, a execução de testes gravimétricos é um procedimento bastante comum para emissões acima de 20 mg/Nm<sup>3</sup>. Entretanto, para os casos das medições de baixos níveis de emissão de particulado (< 10 mg/Nm<sup>3</sup>), cuidados especiais são necessários para que as incertezas não invalidem os resultados. Apresentamos aqui as nossas recomendações baseando-se na análise comparativa entre as normas “tradicionais” e as normas EN 13284 e USEPA Método 5i, bem como experiências práticas.

## REFERÊNCIAS

- 1 BREF IS, **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production**, Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre, European Commission, 2013
- 2 Ivan R. Jankov e Nelson Nobolo Hayashi, **Soluções de modernização de sistemas de controle de poluição atmosférica nas plantas de sinterização**, 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 2015
- 3 Rafael Sartim, Ivan R. Jankov e Nelson Nobolo Hayashi, **Melhorias na Eficiência dos Sistemas de Controle das Emissões Primárias do Processo de Sinterização**, 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 2016
- 4 Ivan R. Jankov, Henrique José Rodstein e Nelson Nobolo Hayashi, **Filtro Híbrido em Siderurgia**, 47º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 2017
- 5 G.B. Woollatt, **Estimating Measurement Uncertainty for Particulate Emissions from Stationary Sources**, Clean Air Journal 27(1) p.19-31 (2017)
- 6 <http://www.amsanalitica.com/en/emission-dust-sampling-options.html>
- 7 Joint Committee for Guides in Metrology, **Evaluation of Measurement Data**, JCGM 100:2008, JCGM 101:2008, JCGM 102:2011, JCGM 104:2009
- 8 UK Environmental Agency, **Technical Guidance Note M2**, 2017