

DESENVOLVIMENTO DE ANALISADORES DE UMIDADE PARA MINÉRIO DE FERRO DE CARAJÁS¹

Rilei Vilaça Ribeiro²
Daniela Sedraz Silva³
Rita Virginia²

Pablo Jordano Sacramento Mendes⁴

Resumo

Dentre as tecnologias existentes, a aplicação de microondas é uma das mais recomendadas na determinação de umidade de minérios a granel. O presente trabalho procura relatar os desenvolvimentos feitos ao longo dos anos de 2009 e 2010 para validação desta tecnologia para a medição da umidade do Sinter Feed Carajás. Os testes foram realizados com analisador de umidade, avaliando um total de 20 amostras sob diferentes condições de umidade (8% - 13%), comparando os resultados com o método convencional de determinação de umidade em laboratório. Para avaliação de precisão e exatidão, os métodos estatísticos utilizados foram satisfatórios. A principal vantagem dos analisadores com este princípio de funcionamento está no fato de que as microondas apresentam a propriedade de penetrar todo o leito de minério sem sofrer atenuação e, dessa forma, fornecer medidas mais representativas.

Palavras-chave: Analisadores; Umidade; Minério de ferro; Carajás.

DEVELOPMENT OF MOISTURE ANALYZERS FOR IRON ORE CARAJÁS

Abstract

Among existing technologies the application of microwave is one of the most recommended in moisture determination of bulk materials including iron ore. This paper aims to report the developments made over the years 2009 and 2010 for validation of microwave technology for measuring the Carajas' Sinter Feed moisture. The tests were performed with an analyzer evaluating a total of 20 samples and under different conditions of moisture (8% to 13%) comparing the results with the conventional method of moisture determination in laboratory. The statistical methods used for evaluation of precision and accuracy were satisfactory. The main advantage of this type of analyzer is the fact that microwaves have the property of penetrating the entire bed of ore without suffering attenuation and thus provide more representative measures.

Key words: Analyzers; Moisture; Iron ore; Carajás.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 12º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 12 a 26 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

² Eng. de Minas, Gerência de Desenvolvimento, Otimização de Processo e Laboratórios, Vale.

³ Eng. Química, Gerência de Desenvolvimento, Otimização de Processo e Laboratórios, Vale.

⁴ Gerente, Gerência de Desenvolvimento, Otimização de Processo e Laboratórios, Vale.

1 INTRODUÇÃO

Sensores comerciais para medição de umidade em partículas a granel estão disponíveis para uso em laboratório ou industrialmente há décadas. Embora haja apenas 40 anos que tais métodos tornaram-se comuns, seu uso na indústria mineral ainda não é disseminado.

Segundo Cancilla, Barrette e Rosenblum,⁽¹⁾ ao detectar a presença de água, é importante compreender que a água está em uma grande variedade de estados que podem ser descrito por duas categorias: a água quimicamente ligada à estrutura do minério e as águas superficiais, sendo esta última a que se tem o interesse em medir em um processo industrial.

O conhecimento da umidade de uma amostra é importante para o controle de processo em muitos casos na indústria mineral. O analisador de umidade é um equipamento geralmente utilizado como um indicador de tendência mais precisa, porém menos exato, que outros sensores. No caso específico da usina de minério de ferro de Carajás, níveis críticos de umidade para o *Sinter Feed* em algumas circunstâncias aumentam a ocorrência de diversos problemas operacionais que afetam o rendimento operacional dos circuitos da usina, empilhamento e carregamento de trens. O uso de analisadores de umidade no controle de processo torna-se relevante neste contexto, no qual a velocidade é um importante fator, permitindo análises em tempo real para subsidiar a tomada de decisão para mitigar possíveis problemas decorrentes de alta umidade.

O objetivo deste trabalho é relatar os estudos feitos ao longo dos anos de 2009 e 2010 para validação de tecnologias de medição da umidade do *Sinter Feed* Carajás que possam futuramente ser aplicadas para controle de processos.

1.1 Revisão da Literatura

1.1.1 Princípios de medição de umidade

As propriedades do material são comumente utilizadas para se definir os métodos empregados na análise de umidade. Incluem-se nestas categorias: condutividade elétrica e dielétrica, propriedades de absorção de microondas e de rádio-transmissão. Os métodos mais difundidos envolvem o uso de radiação infravermelha e o uso de microondas. O primeiro método envolve uma determinação superficial, que deve ser representativa das camadas do material a granel a ser analisada. A medição também é afetada pela concentração do feixe de absorção em comprimentos de onda utilizados para caracterizar o conteúdo de água. No caso do infravermelho, o caminho da fonte de luz para a superfície do material e da superfície do material para o detector infravermelho deve estar livre de materiais que absorvem frequências similares ao do infravermelho, tais como vapor d'água ou água livre. Dessa forma, minérios com umidade elevada e que estão propensos ao aparecimento de água livre não são recomendados para uso de tecnologia infravermelha. O segundo método consiste em técnicas de microondas para a medição de umidade em sólidos a granel e baseiam-se em dois princípios: reflexão ou medida de transmissão. As técnicas de reflexão baseiam-se geralmente em uma análise da amplitude ou fase de um sinal de microondas refletida da superfície da amostra para se obter a teor de umidade. Esta abordagem tem a vantagem de exigir apenas um único sensor e sem contato para a análise de amostras altamente atenuantes. No entanto, também apresenta a desvantagem de ser suscetível a erros devido à estratificação do material. A técnica de transmissão envolve a medição da amplitude e/ou fase de um sinal transmitida através do leito de material e é mais comumente usada por ser menos suscetível a erros

associados a uma possível distribuição heterogênea da umidade no leito. Entretanto, este método está limitado à análise de espessuras de camada com uma atenuação de microondas aceitável. Existem exceções, como as aplicações de medição de umidade com princípios de microondas na indústria do carvão, que geralmente envolvem a análise de espessas camadas de carvão, normalmente com teores de umidade na faixa de 10% a 20% e, mesmo assim, tem sido utilizada com sucesso.

Os analisadores de umidade a microondas trabalham com o princípio de que a água tem uma constante dielétrica muito alta quando comparada com outros materiais. Quando a microonda entra em contato com material úmido ela sofre um atraso (portanto, muda de fase) e enfraquece (atenua) devido à transferência de energia ao material. As microondas são afetadas em sua intensidade e velocidade de propagação pela presença de moléculas livres de água no meio. Medindo-se a atenuação (diminuição da intensidade) e a mudança de fase (redução da velocidade) é possível inferir a umidade do material. Uma vez que a mudança de fase e a atenuação também dependem da quantidade de material presente, uma medição da massa sobre pode ser necessário para compensar as medições da microonda. A massa é normalmente dada por uma balança dinâmica.

Princípios de ativação de nêutrons também têm sido utilizados, mas são menos comuns. Este método determina o teor de hidrogênio no material do qual o conteúdo de umidade é inferida. A medida é baseada na desaceleração de um feixe de nêutrons em conjunto com a absorção de radiação gama para determinar a densidade. Estes sistemas são geralmente volumosos e pesados, devido à blindagem do equipamento necessária para difundir a radiação emitida. Além disso, eles também são relativamente complexos em comparação com outros sistemas descritos.⁽¹⁾

1.1.2 Precisão e exatidão de medidas

De forma a se expressar a incerteza de uma medição em termos que sejam compreensíveis usa-se comumente uma linguagem padrão que se vale de métodos que combinam as incertezas dos diversos fatores que podem influenciar no resultado. Os conceitos de Exatidão e Precisão de medidas enquadram-se neste tipo de linguagem.

Exatidão é o grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor considerado como verdadeiro do mensurando. Ou seja, é a concordância entre o valor medido e um valor de referência aceito. Precisão é o grau de concordância entre resultados de medição obtidos sob as mesmas condições. A precisão orienta quanto à probabilidade da dispersão das medidas obtidas pelo equipamento sob diferentes condições (ex: um analisador de umidade “XYZ” é capaz de medir umidade de diferentes patamares da mesma forma?).

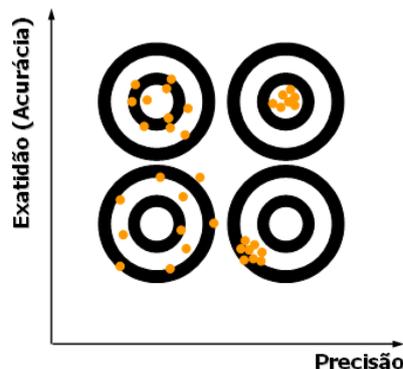


Figura 1. Precisão X Exatidão.

Um das ferramentas utilizadas para expressar o nível de precisão de uma medida é a *incerteza na média*, que pode ser expressa pela fórmula:

$$U_{\bar{x}} = t_{(n-1;0,025)} \cdot \frac{S_T}{\sqrt{n}}$$

Onde:

- U_x = Incerteza na média;
- S_T = Desvio Padrão total;
- n = número total de determinações; e
- $t(n-1;0,025)$ = Variável de t de Student, para 97,5% de significância.

Para avaliação de exatidão, a comparação ponto a ponto, de forma a verificar desvio do resultado em relação ao valor exato (real) pode ser empregada através de gráficos (acurácia). Assim, quanto mais exato o processo de medida mais próximo o resultado está do valor real, de modo que a acurácia está ligada à presença de tendenciosidade das medidas enquanto que a precisão diz respeito à repetibilidade das mesmas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Equipamento

Os testes realizados com o analisador de microondas foram feitos em modo estático no laboratório físico de Carajás com um equipamento industrial disponibilizado para esta finalidade. A opção de se realizar os testes nesta condição deve-se à necessidade de se ter uma ambiente controlável no qual uma grande quantidade de amostras seria testada para avaliar precisão e exatidão do equipamento. Caso o analisador fosse testado industrialmente, não seria possível realizar os testes de forma a aplicar os testes estatísticos, empobrecendo a análise. Além disso, a proximidade do laboratório neste caso foi de suma importância visto que os testes realizados consistiam na leitura da amostra pelo analisador e sua imediata secagem em estufa para determinação do valor de umidade comparativo de laboratório. Caso os experimentos fossem feitos industrialmente, tornar-se-ia necessária o transporte da amostra para o laboratório, correndo-se assim o risco de que a mesma perdesse suas características de intrínsecas umidade. Na Figura 2, um desenho esquemático do equipamento utilizado instalado no laboratório de Carajás.



Figura 2. Desenho esquemático do analisador/ Foto do equipamento utilizado.

O equipamento foi projetado para operar em ambientes agressivos, requer manutenção e calibrações ocasionais, possuindo sistema de segurança para prevenir modificações de configuração não autorizadas.

A calibração foi feita inicialmente apenas com o recipiente no qual a amostra foi acondicionada, em vazio. Este procedimento tem por objetivo evitar possíveis

interferências do recipiente nas análises a serem feitas e consiste em se colocar o recipiente abaixo do feixe de microondas em uma posição pré-definida, zerando os valores medidos pelo equipamento nesta condição. Finalizando este procedimento, iniciaram-se as calibrações propriamente ditas, utilizando-se amostras de *Sinter Feed* Carajás da própria produção, coletadas em torre de amostragem com *ranges* de umidade variando de 8% a 13%.

2.2 Amostras

Para a realização dos testes foram coletadas cerca de 1.000 kg (base seca) de amostras de *Sinter Feed* oriundas das linhas de produção do Peneiramento Secundário da usina de minério de ferro de Carajás.

2.3 Metodologia

O procedimento para tratamento inicial destas amostras consistiu em:

- secagem total das amostras em laboratório, de acordo com a norma ISO3087 (*Iron ores — Determination of the moisture content of a lot*);⁽²⁾
- homogeneização das amostras, compondo uma amostra única; e
- separação em amostras de 50 Kg cada, totalizando 20 amostras.

A partir deste ponto, cada amostra de 50 Kg seguiu a seguinte preparação:

- homogeneização;
- determinação da quantidade de água necessária para o teste, de acordo com o nível de umidade almejado: medida (em peso) em recipiente apropriado e adicionado à amostra de forma dosada. Realizada a homogeneização, evitando também formação de partículas aglomeradas;
- pesagem da caixa de plástico utilizada para acondicionar as amostras. Como padrão, utilizou-se uma única caixa de dimensões 55 x 35,5 x 25 cm conforme figura abaixo;

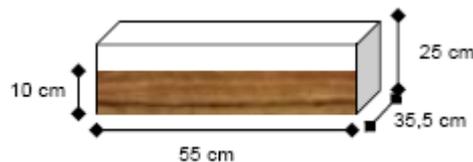


Figura 3. Desenho esquemático da caixa utilizada para acondicionamento das amostras durante os testes.

Adotou-se uma altura do minério no interior da caixa em torno de 10 cm de altura (variável, de acordo com o nível de umedecimento adotado). Este parâmetro é importante visto que, para um correto funcionamento, o analisador necessita de uma altura de camada conhecida e estável para correta leitura do feixe de microondas.

- Após o completo umedecimento e homogeneização, a amostra foi transferida para a caixa plástica padronizada;
- Realizada pesagem da amostra na caixa, anotando o peso úmido;
- Posicionada a caixa no analisador abaixo do feixe de microondas. Os valores de umidade mostrados no visor foram registrados e anotados;
- Após as medidas no analisador, a amostra testada foi transferida imediatamente para uma bandeja metálica (previamente pesada), tomando-se o cuidado de transferir toda amostra da caixa de plástico para a mesa; e

- Secagem em estufa e obtenção do peso seco da amostra após secagem para determinação da umidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes foram realizados para quatro níveis diferentes de umidade, de forma a representar o range de variação naturalmente encontrado para o *Sinter Feed* na operação de Carajás. Os níveis testados compreenderam patamares em torno de 8%, 9%, 12% e 13% de umidade.

O resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Média e desvios dos resultados obtidos

	Estufa			Analisador			
	Range:	Media	Desvio	Range:	Media	Desvio	
1	7 - 8%	7,74	0,25	1	7 - 8%	7,52	0,41
2	8 - 9%	8,81	0,23	2	8 - 9%	8,62	0,38
3	12-13%	12,13	0,15	3	12-13%	12,00	0,34
4	13-14%	13,09	0,12	4	13-14%	13,10	0,18

A primeira abordagem para comparação adotada baseia-se no critério de precisão. Para tanto foi calculado a *incerteza da média*, que leva em consideração o desvio padrão das análises, a quantidade de amostradas analisadas e o valor t de Student tabelado, conforme mostrado na seção 1.1.2. A *incerteza na média* corresponde à imprecisão dos instrumentos e caracteriza-se por uma faixa de valores dentro da qual se encontra o valor verdadeiro da grandeza medida. Na Figura 4 é apresentada de forma comparativa a incerteza calculada para ambos os métodos comparados (analisador e laboratório).

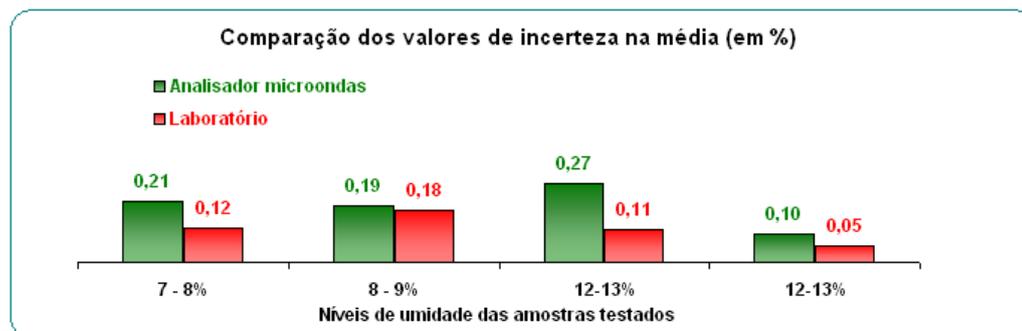


Figura 4. Média e desvios dos resultados obtidos.

Observa-se que o nível de incerteza para o analisador foi superior ao do laboratório em todos os ranges de umidade testada. Entretanto, isso não invalida o analisador de microondas do ponto de vista de precisão, visto que os valores estão dentro da precisão do equipamento estabelecida pelo fabricante (0,50%). Além disso, é importante observar que, em uma aplicação industrial deste equipamento na posição *online* (analisador sobre uma correia transportadora) ou *inline* (amostra retirada da correia transportadora e transferida para correia auxiliar no qual é feita a análise), os erros relacionados à amostragem e preparação tendem a ser mitigados. Outro fator importante a ser considerado refere-se ao fato de que, para a aplicação almejada (controle de processos), o analisador de umidade tem a finalidade de funcionar como um indicador de tendência.

A abordagem de exatidão apresentada a seguir, baseia-se na comparação direta das análises obtidas pelo equipamento de microondas com os respectivos dados obtidos pelo método convencional de laboratório (secagem em estufa). A Figura 5 mostra todos os 80 dados, obtidos em todos os quatro níveis de umidade testados, comparativamente:

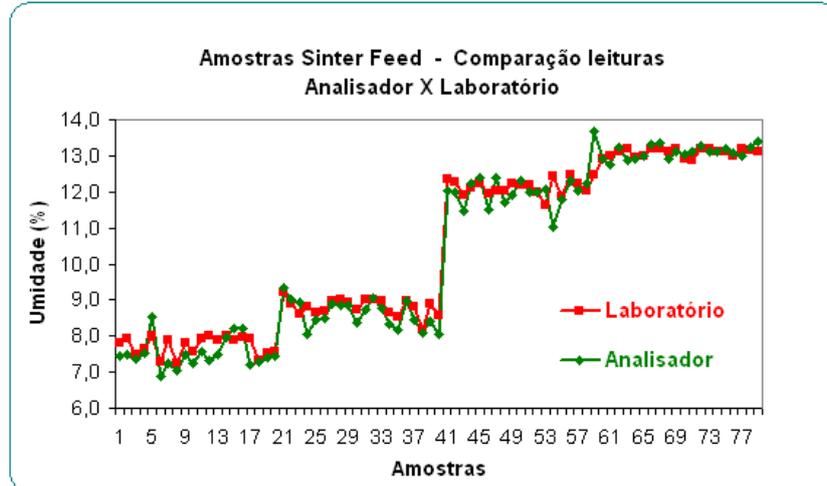


Figura 5. Comparação dos dados.

A avaliação da Figura 5 permite concluir que o analisador de microondas apresentou um desempenho excelente sob diferentes valores de umidade. Prova ser um equipamento robusto para absorver as possíveis variações de umidade do processo industrial de Carajás.

A correlação dos dados analisados pelo equipamento em comparação com o laboratório teve excelente correlação (Figura 6).

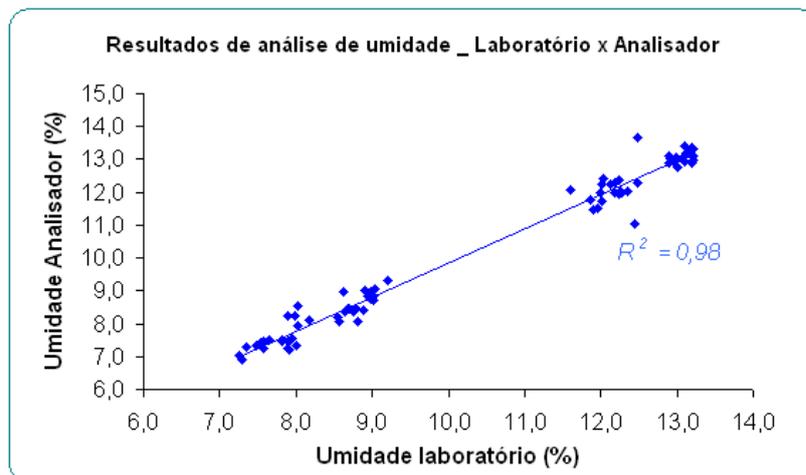


Figura 6. Correlação laboratório x analisador.

4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os testes com o minério de Carajás foram realizados em modo estático no laboratório e consistiram em avaliar no analisador um total de 20 amostras sob diferentes ranges de umidade, totalizando 80 análises, comparando os resultados com as umidades obtidas pelo método convencional de laboratório (secagem em estufa). A precisão do equipamento na condição testada está dentro do limite aceitável para a aplicação

almejada. Para avaliação da exatidão, os resultados foram satisfatórios, inclusive para níveis de umidade elevados (entre 12% e 13%).

O princípio de funcionamento de microondas mostrou-se uma tecnologia robusta para as condições testadas, principalmente para minérios mais úmidos, em que a umidade não está distribuída de forma homogênea no leito de minério. A principal vantagem dos analisadores com este princípio de funcionamento está no fato de que as microondas apresentam a propriedade de penetrar todo o leito de minério sem sofrer grandes atenuações e, dessa forma, fornecer medidas mais representativas.

Recomenda-se a realização de um teste industrial na posição de coleta de umidade do produto Sinter Feed, tendo em vista verificar a influência da massa na medição, garantir altura de camada o mais constante possível e verificar a Disponibilidade Física do equipamento. A instalação do equipamento deve levar em conta mecanismos de proteção para o sensor de nível e feixe de microondas e deve prever também proteções para garantir a limpeza, principalmente destes dois componentes (emissor do feixe de microondas e sensor de nível).

REFERÊNCIAS

- 1 P. A. Cancilla, P. Barrette and F. Rosenblum M., 2002. On-line moisture determination of ore concentrates 'a review of traditional methods and introduction of a novel solution'. Molecular and Cellular Probes Volume 16, Issue 6, December 2002, Pages 393-408.
- 2 **ISO 3087:1998**, Iron ores - Iron ores — Determination of the moisture content of a lot Third edition 1998-12-15