Categoria: Normas Técnicas
Eixo temático: Amostragem

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Validação Estatística de Célula Robotizada para Preparação de Amostras de Minério de Ferro

Vale S/A

Heberson Silva
Marcelo Carvalho
Mateus Sampaio
Samantha Santos
Silvana Gonçalves

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO | BRAZILIAN MINING | MINERÍA DE BRASIL

Introdução

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

A automação de processos laboratoriais na mineração tem se consolidado como **estratégia para redução do esforço operacional e aumento da segurança, padronização e confiabilidade dos resultados analíticos**, especialmente na preparação inicial de amostras.

Neste contexto, o presente trabalho objetiva a validação estatística de uma célula robotizada inovadora para Preparação Inicial de amostras de minério de ferro, baseada na integração de manipulador robótico industrial com sistemas automatizados de alimentação, homogeneização, divisão e dispositivos de controle e rastreabilidade. A avaliação foi conduzida com base nos requisitos das normas ABNT NBR ISO 3082 e ABNT NBR ISO 3086.

Desenvolvimento

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Sistema Robotizado de Preparação e Metodologia de Validação

A ABNT NBR ISO 3082, referência internacional para preparação de amostras de minério de ferro, reforça a importância do processo de Preparação Inicial de Amostras quando estabelece os princípios e requisitos necessários para garantir a representatividade das amostras e correta determinação de suas propriedades químicas, físicas e granulométricas (ISO, 2017).

Preparação Inicial de Amostras

Etapa crítica na cadeia de valor dos laboratórios de mineração, **responsável pela obtenção de alíquotas representativas que suportam decisões operacionais, comerciais e de controle de qualidade**.

PROCESSO MANUAL

- Demanda **alto esforço ergonômico** (homogeneização, divisão e redução de massas).
- A execução **impacta diretamente na acurácia e confiabilidade dos resultados**.

×

PROCESSO AUTOMATIZADO

- **Redução da variabilidade** associada à intervenção humana nas etapas do processo;
- **Aumento da confiabilidade** dos resultados analíticos;
- Aumento da **precisão, repetibilidade e segurança operacional**;

Desenvolvimento

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

A preparação inicial das 78 amostras foi realizada em célula robotizada desenvolvida para execução automática das etapas de alimentação, homogeneização e divisão das amostras.

- O projeto da Célula Robotizada e a integração atendem aos requisitos de segurança estabelecidos pelas normas ABNT NBR ISO 10218-1 e ABNT NBR ISO 10218 – 2, enquanto o processo de Preparação Inicial foi concebido em conformidade com os princípios definidos na ABNT NBR ISO 3082;
- Validação do desempenho: ensaios comparativos com o método tradicional, estruturados de acordo com os critério estabelecidos na NBR ISO 3086 para verificar viés de preparação;
- Ensaios contemplam: análise estatística de parâmetros químicos, granulométricos, permitindo avaliar a presença de viés sistemático e equivalência de variabilidade e a reprodutibilidade entre métodos;

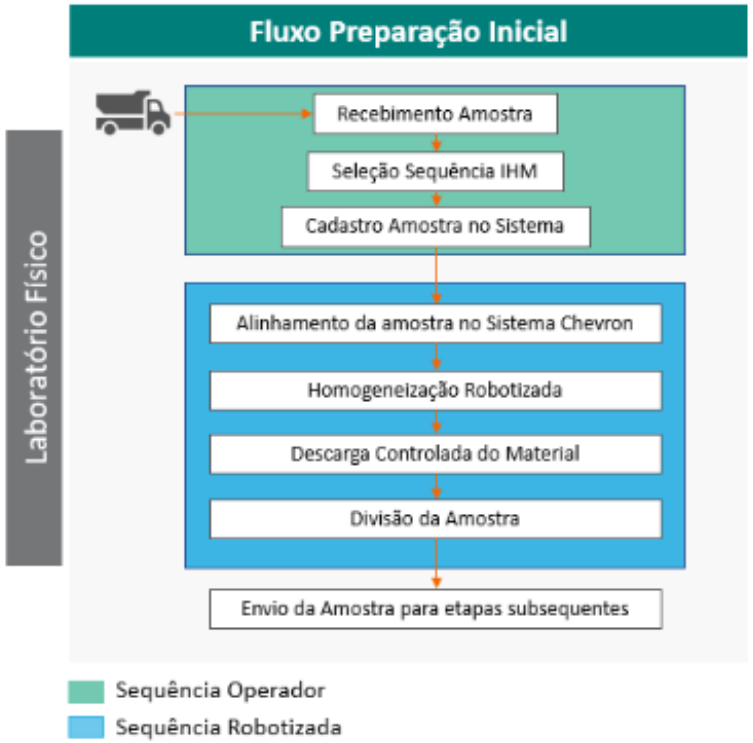


A arquitetura e o controle do sistema foram diretamente validados quanto à sua capacidade de assegurar representatividade e consistência nos resultados obtidos.

Desenvolvimento

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

Métodos



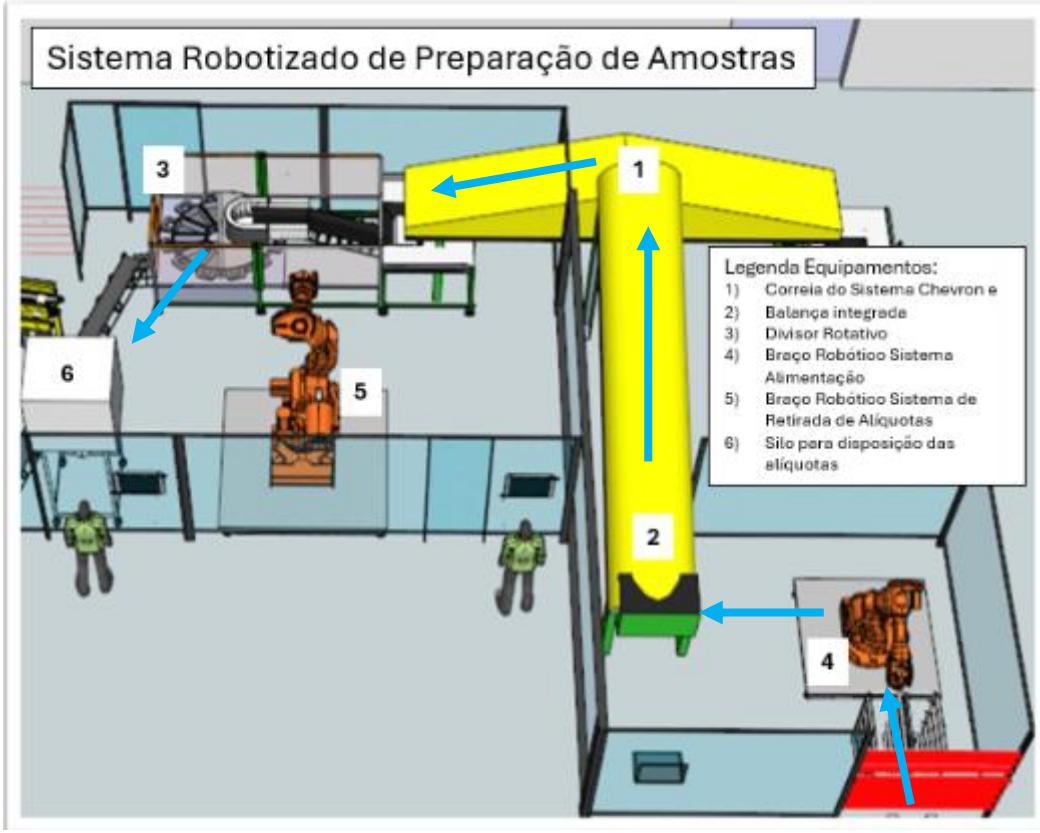
Fonte: Próprios Autores

Metodologia Robotizada de Preparação Inicial de Amostras:

1. Recebimento da amostra;
2. Cadastro IHM: registro e identificação da origem;
3. Alimentação automática via correia do sistema de homogeneização autodenominado "Chevron", passando por uma balança integrada que registra a massa;
4. Com base na pesagem, o sistema determina automaticamente a receita lógica, definindo a massa necessária para esta preparação.
5. Baseado na receita , o robô posiciona e aciona a sequência de caçambas no divisor rotativo, garantindo a distribuição das frações conforme o plano de amostragem.
6. Amostra é submetida à homogeneização em correia *vai-e-vem* (Empilhamento Chevron), promovendo uma distribuição uniforme do material antes da divisão final;
7. Todo processo é monitorado e registrado pelo sistema, assegurando rastreabilidade e repetibilidade das operações.
8. Descarga controlada e a divisão da amostra no divisor rotativo (equivalente ao quarteamento) garantindo redução de massa com manutenção da representatividade em conformidade com a ABNT NBR ISO 3082;

Após a preparação inicial, a amostra segue para a próxima etapa do processo.

Desenvolvimento



Fonte: Próprios Autores

O procedimento adotado para preparação inicial das amostras na célula robótica é apresentado de forma esquemática na figura. As setas representam o fluxo percorrido pela amostra durante o processo.

Validação do Método:

1. Comparação estatística entre as metodologias;
2. Avaliação de viés a partir da comparação de pares de resultados obtidos sob condições equivalentes:
   a. Avaliação de *outliers de Grubss;*
   b. Verificação de vícios;
3. Complementarmente, uso indicadores de tendência central, dispersão e testes de hipóteses (MAE, RMSE, R^2);

Importante!
O controle automatizado das condições operacionais (Massa, Sequência e Ciclos) assegura repetibilidade e aderência aos critérios de preparação definidos na ABNT NRB ISO 3082.

Desenvolvimento

Resultados e Discussões

A avaliação estatística do processo automatizado foi conduzido a partir da comparação direta entre resultados de 78 amostras independentes e de diferentes origens, analisadas pelo método convencional (manual) e automatizado. Foram considerados parâmetros químicos e granulométricos críticos para interface comercial (Fe, SiO2, Al2O3, PPC, +12,5mm , +6,3mm, +1mm e -0,15mm, por meio de métricas de erro, associação linear e testes de hipótese, além de teste de vício mencionado na ABNT NBR ISO 3086.

Tabela 1 – Verificação de vício conforme ABNT NBR ISO 3086 (d = manual − automático; IC de 95%; atípicos de Grubbs excluídos).

Parâmetro	n	Val. Atípico	$\bar{d}$	s_d	IC 95%	p	Vício
Fe	78	–	−0,121	0,663	−0,270 a 0,029	0,111	Não sig.
SiO_2	78	–	0,119	0,911	−0,086 a 0,325	0,250	Não sig.
Al_2O_3	77	45	−0,030	0,2	−0,075 a 0,016	0,199	Não sig.
P	77	55	−0,0002	0,0051	−0,0013 a 0,0010	0,736	Não sig.
Mn	78	–	−0,021	0,113	−0,047 a 0,004	0,104	Não sig.
CaO	77	7	−0,012	0,089	−0,032 a 0,009	0,253	Não sig.
MgO	77	10	−0,010	0,08	−0,028 a 0,009	0,297	Não sig.
TiO_2	77	65	−0,002	0,019	−0,0057 a 0,0028	0,493	Não sig.
PPC	77	10	0,029	0,275	−0,033 a 0,092	0,350	Não sig.
+6,3 mm	78	–	0,258	2,515	−0,309 a 0,825	0,368	Não sig.
+1,0 mm	78	–	0,865	4,667	−0,187 a 1,918	0,106	Não sig.
-0,15 mm	78	–	−0,915	4,079	−1,835 a 0,004	0,051	Não sig.

Fonte: Próprios Autores

Os resultados da tabela indicam:

- O teste de Grubbs identificou um outlier para Al_2O_3, P, CaO, MgO, TiO_2 e PPC;
- Não foram encontrados vícios quando comparados os $\bar{d}$ e os IC;
- Conforme item 7.4.2 da ABNT NBR ISO 3086 por não ser possível determinar a causa dos outlier com confiança razoável, estes foram excluídos.

Desenvolvimento

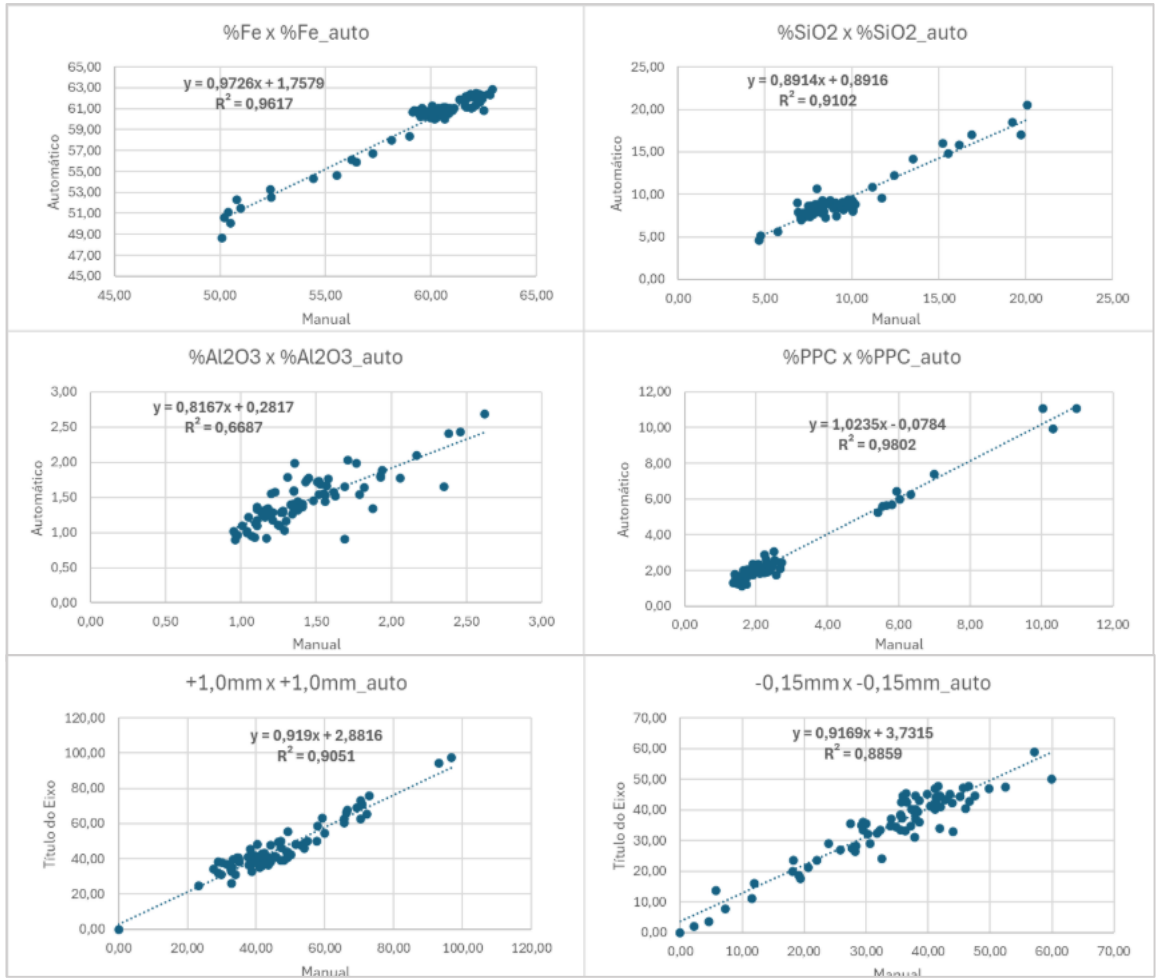
Resultados e Discussões

Tabela 2 – Estatísticas comparativas entre método manual e automático

Parâmetros	MAE	RMSE	R^2	Teste t	Test F
Fe	0,523	0,670	0,962	0,823	0,942
SiO2	0,699	0,913	0,910	0,800	0,553
Al2O3	0,152	0,219	0,669	0,741	0,991
P	0,004	0,005	0,801	0,984	0,647
Mn	0,079	0,115	0,659	0,477	0,795
CaO	0,035	0,120	0,992	0,917	0,768
MgO	0,047	0,101	0,990	0,914	0,730
TiO2	0,015	0,021	0,807	0,957	0,444
PPC	0,226	0,298	0,980	0,962	0,771
+6,3mm	1,937	2,512	0,967	0,908	0,969
+1,0mm	3,901	4,717	0,905	0,717	0,762
-0,15mm	3,190	4,155	0,886	0,631	0,819

Fonte: Próprios Autores

- As métricas apresentadas na Tabela 2 demonstra que os valores de erro médio absoluto (MAE) e erro quadrático médio (RMSE) indicam que as diferenças entre os métodos são, de modo geral, reduzidas e compatíveis com a variabilidade natural do processo.
- O R^2 indica bom ajuste linear da reta aos dados do método manual e automático;
- O Teste t indica a semelhança entre as médias;
- O Teste F, observa-se que a variância entre os métodos é equivalente;



Fonte: Próprios Autores

Comparativo de aderência entre os resultados manuais e automáticos para os parâmetros principais.

Os gráficos de dispersão, associados às métricas estatísticas apresentadas, corroboram que as diferenças observadas são essencialmente aleatórias e não associadas a falhas estruturais do processo automatizado.

Conclusão

PRÊMIO BOAS PRÁTICAS NA MINERAÇÃO DO BRASIL 2026

A avaliação comparativa entre os métodos manual e automatizado demonstrou elevada concordância dos resultados, com diferenças reduzidas e ausência de viés sistemático significativo, conforme os critérios estabelecidos na ABNT NBR ISO 3086.

O método automatizado apresentou variabilidade equivalente à do método manual, garantindo **precisão** e **reprodutibilidade** dos resultados. Adicionalmente, o controle das etapas de preparação assegura **conformidade com os princípios da ABNT NBR ISO 3082**, especialmente no que se refere à **homogeneização e à representatividade das amostras**.

Dessa forma, a célula robotizada encontra-se **TECNICAMENTE VALIDADA PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL**, constituindo uma solução robusta para automação da preparação de amostras em laboratórios de mineração, com ganhos em **padronização**, **confiabilidade** e **eficiência operacional**. Nesse contexto, a realização periódica de comparações entre os métodos de preparação possibilita o acompanhamento contínuo e a avaliação consistente do desempenho da célula na rotina operacional.



Uma máquina pode fazer o trabalho de cinquenta homens comuns. Nenhuma máquina pode fazer o trabalho de um homem extraordinário”.

Elbert Hubbard / Exame

OBRIGADO (A)!

Samantha Eliza Vivekananda dos Santos
Vale S/A
samantha.santos@vale.com