

USO DE MINÉRIO ALTERNATIVO EM CIRCUITO RKEF*

*Carolina das Graças Graciano Guimrães¹
Cláudia Mara Sperandio Neves²
Flávio Zelante Filho³
Edgard Jesus Betancourt⁴
Aldo José Duarte Ferrari⁵
José Francisco Cabello Russo⁶*

Resumo

O presente trabalho aborda o processamento industrial em circuito RKEF (*Rotary Kiln- Electric Furnace*) de um volume de minério saprolítico alternativo disponível nas proximidades da unidade industrial da Anglo American, CODEMIN. A motivação do trabalho está relacionada com a possibilidade de redução da distância média de transporte em 87% comparada à praticada atualmente pela Anglo American para alimentar a unidade de CODEMIN. Nesse contexto, dada a compatibilidade entre o minério de Barro Alto, atualmente alimentado em CODEMIN, e o minério alternativo, ambos lateríticos/saprolíticos, foi proposta a realização de testes industriais para validação desta compatibilidade. Amostras de três tipos diferentes do minério alterantivo foram tomadas para processamento em duas fases, a primeira fase contempla a avaliação do potencial de upgrade (enriquecimento) de níquel por classificação granulométrica. Na segunda fase, o minério é alimentado no circuito pirometalúrgico de CODEMIN para avaliação de parâmetro de qualidade (teor final da liga ferroníquel) e produtividade (taxa de fusão e consumo específico de energia para fusão). Os resultados indicaram uma baixa expressividade para o *up grade* na malha de 50mm. O processamento metalúrgico indicou resultados satisfatórios para produtividade e pontos de atenção para especificação final da liga ferroníquel.

Palavras-chave: Minério Saprolítico; Circuito RKEF; Up grading; Ferroníquel

USE OF ALTERNATIVE ORE IN RKEF CIRCUIT

Abstract

This paper approaches the processing in a RKEF (*Rotary Kiln-Electric Furnace*) circuit of an alternative saprolite ore that is available in the vicinity of Anglo American's industrial unit, CODEMIN. The motivation of the work is the possibility of reducing the average haulage distance (AHD) in 86% compared to the currently AHD performed by Anglo American to feed the CODEMIN unit. Both ores, the Barro Alto and the alternative ore are compatible classified as lateritic / saprolitic. In this context industrial tests were proposed to be carried out in order to validate the compatibility. Samples of three different types of the alternative ore were taken for a two-stage processing. The first phase considers the evaluation of the nickel upgrading potential by size fraction classification. In the second phase, the ore was fed into the pyrometallurgical circuit of CODEMIN in order to evaluate parameters related to product quality (final ferronickel composition) and productivity (smelting rate and specific energy consumption for reduction in Electrical Furnaces). The results indicated a low up grading rate for nickel content when screened at 50mm. The metallurgical processing indicated satisfactory results for productivity and points of attention for the final specification of the ferronickel alloy.

Keywords: Saprolitic Ore; RKEF Circuit; UP grading; Ferronickel

- ¹ *Engenheira Metalurgista, Engenheira de Processos, Gerência de Desenvolvimento de Processos – Níquel, Anglo American, Belo Horizonte, MG, Brasil.*
- ² *Engenheira Geóloga, Especialista de Recursos e Reservas, Gerência de Geociências, Anglo American, Belo Horizonte, Brasil.*
- ³ *Engenheiro de Minas, Especialista em Operação de Mina, Gerência de Tecnologia em Mineração, Anglo American, Belo Horizonte, MG, Brasil.*
- ⁴ *Engenheiro Metalurgista, Coordenador de Processos, Gerência de Processos – CODEMIN, Anglo American, Niquelândia, GO, Brasil.*
- ⁵ *Geólogo, Gerente de Tecnologia em Mineração, Anglo American, Belo Horizonte, MG, Brasil.*
- ⁶ *Engenheiro de Minas, Gerente de Desenvolvimento de Processos, Anglo American, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Diante da pressão econômica, social e ambiental que a indústria de mineração está submetida nos dias atuais, alternativas que consideram a sustentabilidade do processamento mineral se apresentam de extrema relevância para o negócio. Neste contexto, a Anglo American realizou um estudo para o aproveitamento de recurso mineral alternativo na unidade industrial de CODEMIN, em Niquelândia, Goiás.

O processamento dos recursos minerais existentes na mina de CODEMIN tornaram-se economicamente inviáveis em 2004, quando a unidade passou a ser alimentada com minério da mina de Barro Alto, também pertencente à Anglo American. Apesar da distância intermunicipal entre Barro Alto e Niquelândia (170km), o transporte do minério ainda torna o seu processamento rentável.

A disponibilidade de um recurso mineral alternativo com características químicas semelhantes ao que já é alimentado em CODEMIN, associados à redução de custos com transporte em 86% e consequente redução de emissão de CO₂ motivaram a execução de testes em escala industrial para validação deste recurso no circuito de CODEMIN.

A unidade industrial de CODEMIN, cujo fluxograma produtivo é apresentado na Figura 1, utiliza o circuito RKEF (*Rotary Kiln – Electric Furnace*) para processamento de minério laterítico/saprolítico de níquel. O circuito RKEF foi desenvolvido na década de 50 e desde então é considerada uma técnica consolidada para produção de ferroníquel via processamento de minérios lateríticos (1). Trata-se de uma rota que envolve duas etapas primordiais para a transformação do minério em liga metálica, a calcinação em fornos rotativos (*Rotary Kilns*) e a redução em fornos elétricos (*Electric Furnaces*).

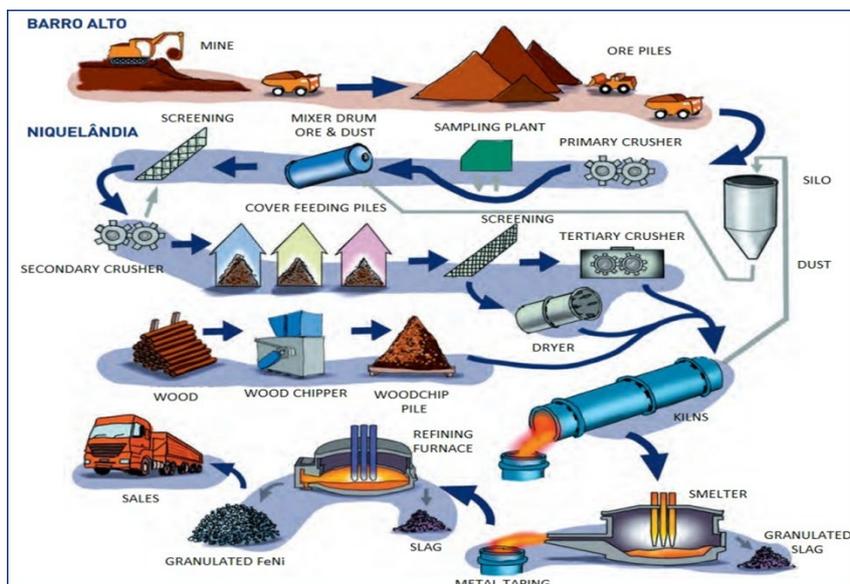


Figura 1: Fluxograma da produção de ferroníquel em CODEMIN.

Na calcinação é fornecida energia térmica, por meio de queima de combustível, de modo a decompor os minerais hidratados, já que a presença de moléculas de água pode propiciar a ocorrência de explosões quando o minério é alimentado no Forno Elétrico (2). Nesta etapa ocorre também a remoção parcial do oxigênio (pré redução)

dos principais óxidos metálicos (Fe_2O_3 e NiO) pela presença de agente redutor (carvão mineral ou madeira).

A redução é responsável por promover a fusão redutora do minério calcinado. O aporte térmico é originário da resistência da carga (minério calcinado) à passagem de corrente elétrica juntamente com as reações exotérmicas sofridas pelo agente redutor remanescente na carga. A separação da liga metálica de ferroníquel da escória é realizada por diferença de densidade no interior dos fornos elétricos.

O minério processado pela unidade de CODEMIN é do tipo laterítico, que é formado por processo de intemperização das rochas ultramáficas. A alternância nas estações secas e úmidas, sobre temperaturas altas, favorece o intemperismo de dunitos e peridotitos (rochas ricas em olivina) e o enriquecimento do níquel no perfil de alteração. O processo de intemperismo em clima tropical provoca o colapso da estrutura cristalina das olivinas, formando minerais secundários, como as serpentinas(3) (4).

As condições físico-químicas do meio determinarão a maior ou menor mobilidade dos elementos químicos no perfil de alteração e, promoverão a redistribuição dos elementos das rochas ultramáficas, conforme ilustrado pela Figura 2.

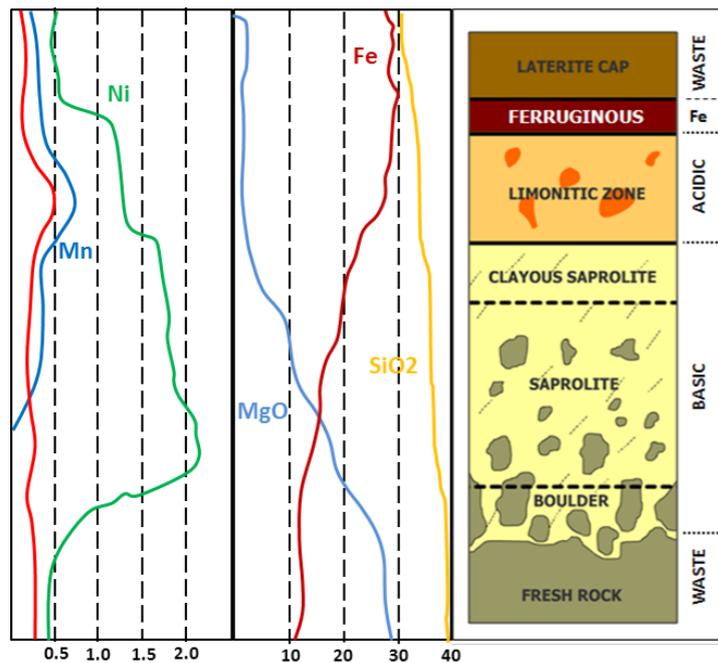


Figura 2: Perfil laterítico esquemático de alteração de rochas ultramáficas.

A concentração do níquel ocorre pela sua baixa mobilidade geoquímica, comparativamente a outros elementos. O intemperismo é mais intenso e mais desenvolvido nas rochas fraturadas e/ou falhadas (devido à maior permeabilidade), formando depressões e pináculos na interface entre a rocha fresca e rocha intemperizada. As depressões constituem armadilhas para a precipitação e acumulação de níquel dissolvido. Os pináculos constituem blocos de mais baixos teores que adentram o minério implicando na diluição na lava.

Essa diferença de características físicas e químicas motiva o processo de *up grade*, ou seja, o aumento de teor de níquel pela rejeição de frações de baixo teor (5). No caso da mina de Barro Alto, o método de *up grade* aplicado é o peneiramento conforme mostrado na Figura 3.

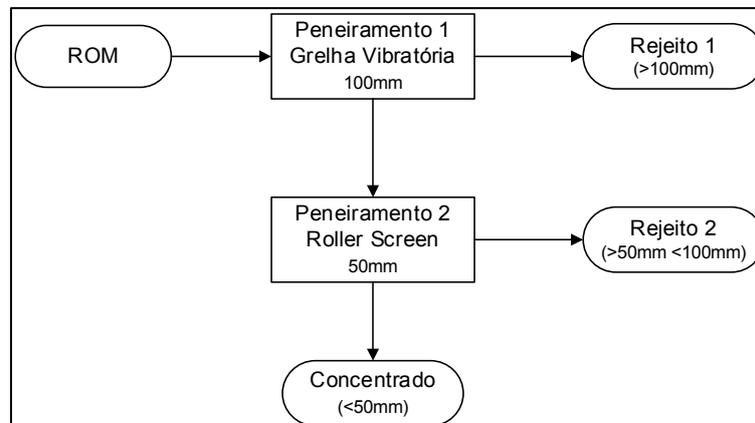


Figura 3: Fluxograma da planta de *up grade* de Barro Alto.

2 DESENVOLVIMENTO

Com o objetivo de validar a aplicação novos tipos de minério em um circuito RKEF, os testes em escala industrial consideraram duas fases. A primeira fase avalia o potencial de enriquecimento, *up grade*, de níquel a partir de classificação granulométrica. O *up grade* é usualmente praticado em operações de minério laterítico, com o objetivo de aumentar o teor de níquel a ser alimentado no circuito pirometalúrgico e reduzir a massa do material a ser transportado e processado.

A segunda fase contempla o processamento pirometalúrgico nos Calcinadores e Fornos Elétricos na unidade industrial de CODEMIN.

2.1 Materiais e Métodos

O estudo considerou o processamento de amostras de três mil toneladas de três tipos de minério, chamados A, B e C. Essas amostras foram extraídas de pilhas de estoque grandes (de até 80 mil toneladas). A fim de se obter uma composição média apenas das amostras tomadas para os testes industriais (três mil toneladas de cada tipo de minério), as pilhas de estoque foram amostradas com o auxílio de perfuratriz com espaçamento de 10x10 metros e analisadas quimicamente.

A Tabela 1 apresenta a análise química dos minérios utilizados nos testes industriais (A,B e C) com base nos resultados das amostras de perfuratriz dos pontos retomados para compor as três mil toneladas.

Tabela 1: Teores médios das amostras de cada tipo de minério tomado para os testes industriais.

Teor médio de formação das pilhas							
Tipo	Ni	Fe	Co	Cu	MgO	SiO2	SiO2/MgO
A	1.42	14.80	0.038	0.064	22.53	31.46	1.40
B	1.74	16.97	0.047	0.081	17.37	39.70	2.29
C	2.10	18.29	0.068	0.186	9.11	45.08	4.95

2.1.1 Fase 1 – Avaliação de enriquecimento (*Up grading*)

O peneiramento para avaliação da taxa de enriquecimento de níquel para os três tipos de minério foi realizado em duas etapas seguindo o fluxograma da Figura 4.

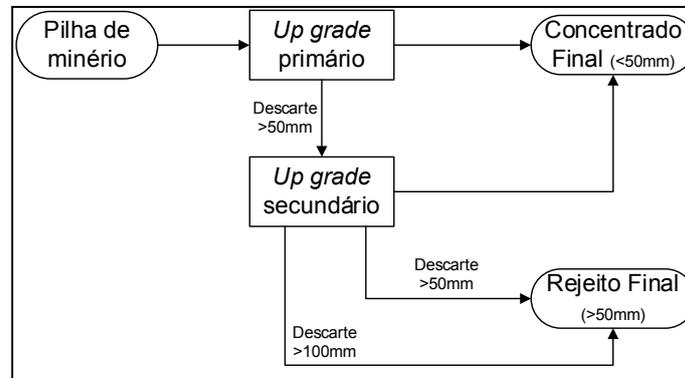


Figura 4: Fluxograma para processamento dos minérios

Na primeira etapa de *up grade*, o *up grade* primário, cada tipo de minério foi peneirado separadamente em concha classificadora como ilustrado na Figura 5. A malha de peneiramento considerada foi de 50mm.

A concha classificatória é um equipamento desenvolvido para processamento (britagem ou peneiramento) de minérios e outros materiais de forma portátil. Trata-se de uma concha adaptada com martelos acoplados em eixos paralelos em sua base que é incorporada em equipamentos móveis (escavadeira ou pá carregadeira). Após o carregamento do material pela máquina móvel, o motor que aciona a rotação dos eixos é ligado para iniciar o peneiramento.



Figura 5: Concha classificatória acoplada em escavadeira.

A segunda etapa de peneiramento, *up grade* secundário, foi realizado na planta fixa de peneiramento cujo fluxograma é mostrado na Figura 3. Esta etapa é necessária para garantir a máxima recuperação do minério da fração fina. Entretanto, o *up grade* secundário considerou o peneiramento apenas da fração rejeitada na primeira etapa.

Na primeira fase, todos os fluxos de material foram pesados em balança rodoviárias para que o balanço de massa fosse realizado.

As análises químicas dos produtos e rejeitos foram obtidas por fluorescência de raios-x no equipamento PANalytical Axios.

2.1.2 Fase 2 – Circuito RKEF

Após as duas etapas de peneiramento descritas no item 2.1.1, o minério enriquecido foi adicionado às pilhas de alimentação do circuito pirometalúrgico de CODEMIN. As proporções de adição estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Proporção de adição de minério alternativo nas pilhas de alimentação do circuito de CODEMIN.

Teor médio de formação das pilhas de alimentação da planta								
Pilha	% Ni	% Fe	% Co	% Cu	% MgO	%SiO ₂	SiO ₂ /MgO	% Minério alternativo
1171A	1.74	13.50	0.037	0.005	23.06	41.48	1.77	9.51
1173B	1.68	14.37	0.040	0.012	22.53	41.32	1.80	19.05
1175C	1.64	12.69	0.039	0.010	23.38	41.77	1.76	10.02
1176B	1.72	12.60	0.037	0.015	23.62	42.28	1.76	8.62

A adição do minério alternativo nas pilhas foi realizada sequencialmente para os tipos de minério A, B e C de modo a se obter 10% ou 20% em massa em cada pilha que será alimentada na planta sem que as restrições de processo fossem alteradas.

2.2 Resultados e Discussão

2.2.1 Fase 1 – Avaliação de enriquecimento (*Up grading*)

Os resultados das duas etapas de peneiramento para enriquecimento dos três tipos de minério são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados dos testes de enriquecimento para os três tipos de minério testados.

Minério	Up Grade Global								
	Recuperação massa	Desvio balanço	Recuperação metalúrgica	%Ni alimentação (calculado)	%Ni produto	Enriquecimento níquel	SiO ₂ /MgO alimentação (calculado)	SiO ₂ /MgO produto	Enriquecimento SiO ₂ /MgO
A	85.76%	-8.23%	97.01%	1.33	1.51	13.12%	1.30	1.34	2.90%
B	90.63%	-6.12%	98.76%	1.69	1.85	8.97%	2.01	2.18	8.37%
C	87.24%	-11.57%	99.49%	1.75	1.99	14.04%	3.64	4.12	13.00%

Considerando o fechamento global, observa-se que apenas em um dos três testes realizados o desvio ficou superior a 10%, indicando um bom aproveitamento dos dados gerados. É importante ressaltar que devido ao fator escala, o balanço de massa do teste é ligeiramente comprometido. O tamanho e volume dos equipamentos não permitem que o manuseio seja conciso. Outros fatores como umidade, aderência do minério aos equipamentos (caminhões e carregadeiras) também influenciam no fechamento do balanço de massa. Devido às diferenças nas características físicas dos tipos de minério, o desvio no balanço de massa foi variável.

A rejeição média de massa no balanço global foi de aproximadamente 12,0%. Este dado está diretamente relacionado com o fator de enriquecimento de níquel uma vez que, para a maioria dos tipos de minério o material rejeitado representa a diluição do

corpo mineral. Assim, quanto maior a massa rejeitada no processo de *up grade*, maior tende a ser o fator de enriquecimento.

Diante das dificuldades práticas em se obter amostras do minério alimentado no circuito para análise química representativa, os teores de níquel na alimentação foram calculados a partir do balanço dos fluxos gerados no processo. Todos os fluxos de minério foram pesados e amostrados de modo a garantir a maior acuracidade nos cálculos do balanço de massa e metalúrgico.

Para que a metodologia de cálculo dos teores da alimentação a partir do balanço de massa fosse aplicada, foi necessário analisar quimicamente amostras dos rejeitos produzidos no teste. Os resultados das análises químicas são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Análise química das amostras dos rejeitos gerados nos testes industriais.

Análises químicas - Rejeitos								
Tipo	Co	Cu	Ni	Fe	SiO ₂	MgO	CaO	Relação
A	0.020	0.015	0.84	7.01	57.40	20.30	2.20	2.56
B	0.015	0.015	0.88	6.25	43.30	32.10	1.83	1.28
C	0.027	0.043	0.88	7.95	64.37	13.00	2.18	4.31

Os resultados obtidos com os testes industriais com o minério alternativo indicaram que o enriquecimento de níquel por classificação foi pouco expressivo para a malha de 50mm.

A relação SiO₂/MgO também não apresentou variação significada para os minérios testados. Este fato está associado à baixa massa rejeitada durante a classificação e composição química do rejeito que apresentou teor considerável de MgO e CaO.

2.2.2 Fase 2 – Circuito RKEF

A avaliação da alimentação do minério alternativo no circuito RKEF de CODEMIN foi realizada sobre dois principais aspectos: Produtividade e Especificação do produto.

Dentro da produtividade os principais parâmetros foram fusão diária de minério calcinado e consumo específico de energia para fusão nos fornos elétricos. As Figura 6 Figura 7 apresentam os dados da fusão diária e consumo específico de energia do forno elétrico nos períodos em que as pilhas descritas na Tabela 3 foram alimentadas no circuito de CODEMIN. Ambos parâmetros obtidos do sistema de informação do controle de processo da empresa.

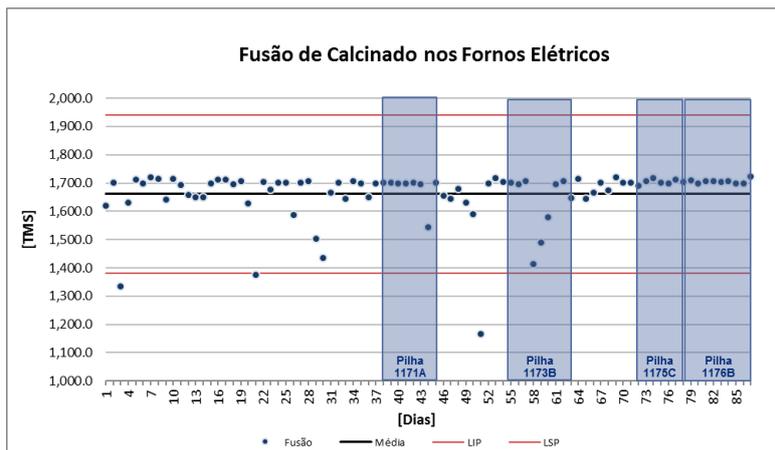


Figura 6: Fusão diária de calcinado nos fornos elétricos de redução da planta de CODEMIN.

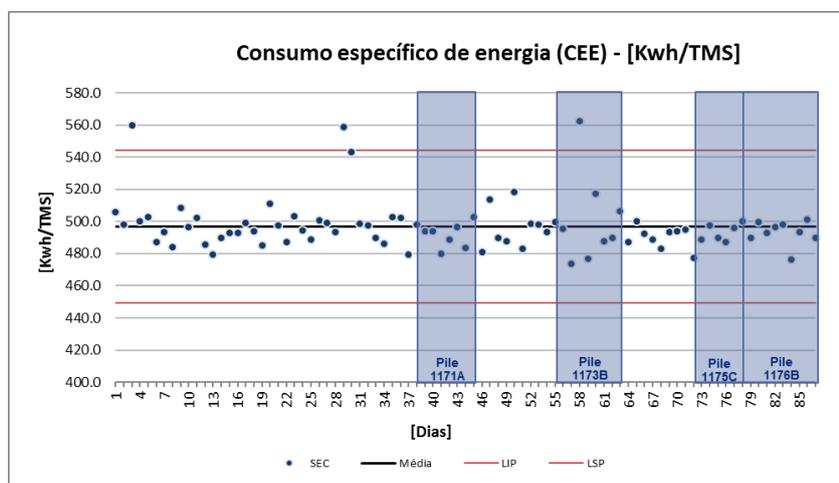


Figura 7: Consumo específico de energia dos fornos elétricos no período em que as pilhas compostas de minério alternativo foram alimentadas no circuito de CODEMIN.

O processamento do minério nos fornos elétricos de CODEMIN, embora com participação parcial nas pilhas de homogeneização, apresentou bons resultados em termos de produtividade, com desempenho equivalente ao que vinha sendo observada nas pilhas anteriores que não continham minério alternativo.

A especificação foi avaliada com base no teor de cobre da liga metálica. O teor de cobre representa uma limitação comercial e os limites não devem ser excedidos uma vez que muitas podem ser aplicadas durante o processo de venda da liga.

Conforme mostrado na Figura 8, o produto final apresentou divergência da especificação estabelecida para alguns consumidores em termos do teor de cobre, entretanto a comercialização da liga ainda é possível para clientes específicos. Assim, a utilização do minério alternativo no circuito RKEF fica limitado ao teor máximo de cobre na liga de ferroníquel possível para comercialização da liga. Neste caso, a aplicação industrial do recurso se daria de maneira combinada ao minério de Barro Alto.

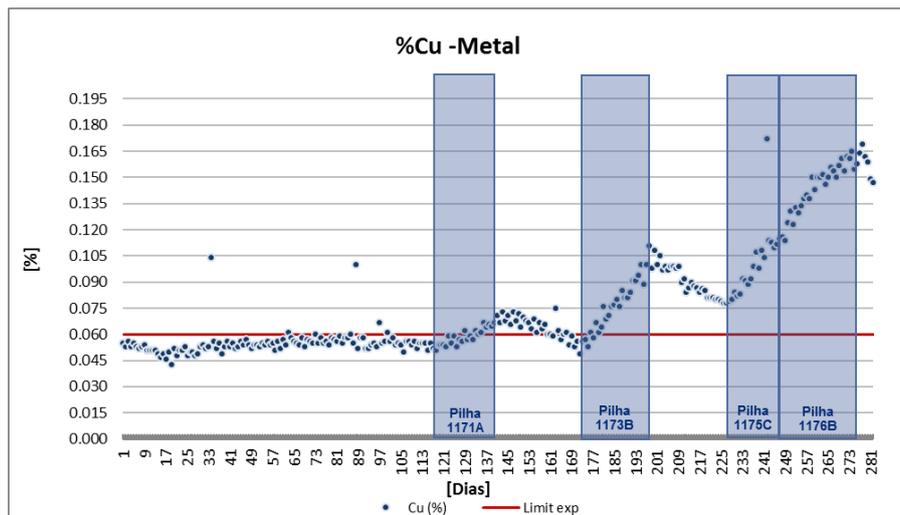


Figura 8: Teor de cobre na liga ferroníquel no período em que as pilhas com minério alternativo foram alimentadas no circuito.

3 CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos em termos de produtividade, os testes industriais indicam a viabilidade técnica de utilização dos três tipos de minério alternativo no circuito RKEF. Para a qualidade do produto final, a limitação está vinculada ao teor de cobre na liga ferroníquel, que é regida pelas restrições comerciais.

Com relação ao enriquecimento de níquel por classificação (*up grade*) os testes não indicaram resultados expressivos para uma malha de 50mm.

REFERÊNCIAS

- 1 Svana, Erik; Ysteb R. Production of FeNi from high iron nickel ores. In: Proceedings of the Seminar on Problems and Prospects of Ferro-Alloy Industry in India. Jamshedpur, India; 1983. p. 51–62.
- 2 Crundwell FK, Moats MS, Ramachandran V, Robinson TG, Davenport WG. Dewatering and Calcination of Laterite Ores. In: Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. Amsterdam: Elsevier Ltd; 2011. p. 55–65.
- 3 Li S. Study of Nickeliferous Laterite Reduction. Thesis. 1999;2–184.
- 4 Solar MY, Mostaghel S. Smelting of difficult laterite ores. Miner Process Extr Metall . 2015;124(1):35–46.
- 5 Crundwell FK, Moats MS, Ramachandran V, Robinson TG, Davenport WG. Upgrading of Laterite Ores. In: Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. 2011. p. 39–47.