

Copyright 2010, ABRACO

Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2010, em Fortaleza/CE no mês de maio de 2010.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Characterization of corrosion process in Bauxite Slurry Pipeline

Otilio Othon¹, Gerson Melo², Romulo Rufino³, Marco Veisac⁴, Fabio Mendes⁵, Geraldo Brittes⁶, Francisco Edvan⁷, Luis C. Mascarenhas⁸, Arquimedes Andreda⁹, José A. Gomes¹⁰

Abstract

The mine of Miltônia is placed in Paragominas-PA, in the north of Brazil. Bauxite slurry pipeline starts at the Mine of Miltônia and finishes at the draining installation of Alunorte refinery at the port of Barcarena-PA, located approximately 244km away from the mine. The system was designed for an underground 24" OD API 5L X70 steel pipe, to carry 14.5 million dry metric tonnes per years of 50.5% solid concentration bauxite slurry. With seven months of operation were evidenced an increase of the pumping pressure, this operational situation was attributed the possible material sedimentation in the bottom of pipeline. After pig cleaning operation, was observed that the reason for the elevated system pressure was due to the increase of roughness in the pipe as a result of the corrosion process, since the residue removed by the end of the cleaning process was oxidized ferruginous material. This result leded to a work to characterize the type of corrosion installed in the system. This paper will present the results, relating the parameters that are causing the corrosion on the analysis of water and the slurry pumped in pipeline. On the analysis where observed a low pH, high concentration of dissolved oxygen and presence of microorganisms in the water. Besides that, there's an abrasive characteristic of the slurry. It's being considered a treatment with dosage of corrosion inhibitor and biocide.

Words key: Slurry Pipeline, Bauxita, Paragominas

Resumo

A mina de Miltônia está situada em Paragominas, estado do Pará no norte do Brasil. O mineroduto de polpa de bauxita começa na Mina de Miltônia e termina na instalação de desaguamento da Alunorte no porto de Barcarena-PA, com uma extensão de aproximadamente 244 km da mina. O sistema foi projetado para uma tubulação subterrânea de aço do tipo API 5L X70 com de diâmetro externo de 24" para transportar 14,5 milhões de toneladas métricas secas por ano de polpa de bauxita com uma concentração de 50,5% de sólidos. Com sete meses de operação foi constatado aumento da pressão de bombeamento, isso foi atribuído a possível

¹ Master-Industrial Chemistry - Vale- Diretoria Bauxita de Paragominas

² Specialist-Mechanical Engineer - Vale- Diretoria Bauxita de Paragominas

³ Master-Mechanical Engineer - Vale- Diretoria Bauxita de Paragominas

⁴ Operation Manager - Vale- Diretoria Bauxita de Paragominas

⁵ Master-Technician Manager - Vale- Diretoria Bauxita de Paragominas

⁶ Executive Director - Vale- Diretoria Bauxita de Paragominas

⁷ General Manager - Vale- Diretoria Bauxita de Paragominas

⁸ Account Manager - Nalco Brasil Ltda

⁹ Área Manager – Nalco Brasil Ltda

¹⁰ Industrial Chemistry - Nalco Brasil Ltda

sedimentação de material no fundo do duto. Após operação de limpeza com PIG's constatou-se que a elevação da pressão era conseqüência do aumento da rugosidade interna do duto causado por processo corrosivo, já que o resíduo removido ao final da limpeza foi material ferruginoso oxidado. Isso Resultou num trabalho para caracterizar o tipo de corrosão instalada no sistema. Neste trabalho descreveremos os resultados obtidos relacionando os parâmetros causadores de corrosão em análise da água e da polpa bombeada no mineroduto. Onde foi observado um baixo pH, alta concentração de oxigênio dissolvido e presença de microorganismos na água, além de um caráter abrasivo da polpa de bauxita. Esta sendo proposto um tratamento com dosagem de inibidor de corrosão e biocida.

Palavras-chave: mineroduto, bauxita, Paragominas

1. Introdução

A bauxita é uma rocha formada pelo intemperismo de rochas ricas em alumina. A bauxita ao contrário dos outros minerais possui uma ampla gama de propriedades físicas que dependem da sua origem e história geológica. Algumas são macias, enquanto outras são duras e pisolítico. A densidade pode variar de 2,5 a mais de 3,0 g/cm³, dependendo da proporção de gibbsitica e hidróxidos de ferro. A friabilidade (tendência a quebrar sob o corte) varia de depósito para depósito. Os testes de laboratório são necessários para avaliar as propriedades da bauxita para uso em transporte por dutos. (Hallbom & Gandhi, 2006)

A Província Bauxitífera de Paragominas está localizada na parte leste do estado do Pará e na parte oeste do estado do Maranhão na Amazônia Oriental, este caracterizado por um relevo tipo planalto dissecado com a diminuição da altitude da fronteira sul até a margem norte. A bauxita de Paragominas foi formada pela alteração laterítica de depósitos siliciclásticos do Cretáceo durante o Paleógeno. Possuindo um manto argiloso residual, essencialmente caulínítico que constitui capeamento de vastos platôs. O manto laterítico/bauxítico exibe uma estrutura acamada, devido à presença de horizontes ricos em Al ou Fe alternados. O platô Miltônia está situado na zona 4, onde estão os mais importantes depósitos de bauxita de interesse econômico, sendo o depósito mais extenso e denso de bauxita da Amazônia, onde as camadas de bauxita predominam o perfil atinge espessuras métricas por ser o ambiente favorável a bauxitização. (Kostchoubey, et al. 2005)

Atualmente para indústrias da mineração, mineroduto está sendo utilizado no transporte de minério, concentrado ou rejeito. No transporte de concentrado, um sistema típico inclui tanque de armazenamento com agitadores, uma estação de bombeamento, o duto e um terminal de recepção. Em alguns casos, uma estação de válvula e estação de monitoramento de pressão é incluído para melhorar a operação do sistema (Betinol & Navarro, 2007)

A Vale está implantando um mineroduto para o transporte de concentrado de bauxita da Mina de Miltônia (Paragominas, região no norte do Brasil) para refinaria da Alunorte, no terminal de Barcarena, no estado do Pará. O minério é beneficiado para produção de concentrado de minério que será transportado por 244 quilômetros de extensão.

Este trabalho apresenta os resultados relativos ao estudo dos causadores da corrosão no mineroduto, através da análise da água e da polpa bombeada na tubulação, a fim de fornecer informações que permitam a aplicação de tratamento químico adequado para proteger e prolongar o tempo de vida do mineroduto.

2. Revisão bibliográfica

A corrosão é definida pela deterioração de um material metálico por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A reação do metal com os elementos do meio, onde o metal é convertido para um estado não metálico, com isso o mesmo perde suas qualidades essenciais, como resistência mecânica, elasticidade, ductibilidade, comprometendo o desempenho a que se destinam (GENTIL, 2007; RAMANATHAN, 1988).

A atividade metabólica dos microorganismos também promove o desencadeamento do processo corrosivo, principalmente em meios aquosos e no solo. A corrosão microbiana é classificada de acordo com a capacidade ou inabilidade de se desenvolverem em meios com oxigênio (RAMANATHAN, 1988).

Um sistema industrial quando impactado pela corrosão, tem seus custos econômicos elevados devidos substituição de peças, equipamentos, gastos com manutenção de sistemas de proteção, acarretando perdas diretas e indiretas. As corrosões em tubulações enterradas para transporte de minério, óleo e produtos químicos, podem resultar em ruptura, causando grandes danos ambientais e prejuízos econômicos (GENTIL, 2007; GOMES, 2000).

O sistema do mineroduto de bauxita foi projetado baseado na ASME B31.11, *Slurry Transportation Piping Systems, 2002 Standard Edition*. Esta 2,0 metros abaixo do solo, possui 24 polegadas de diâmetro exterior, seu constitui-se de aço API 5L X70, em alguns trechos mineroduto possui um fator de projeto de 0,80, especificado para mínimo de tensão de escoamento, para trechos inacessíveis ou de difícil acesso possui um fator de projeto 0,65.

O mineroduto tem capacidade de transportar 9,9 milhões de toneladas por ano de bauxita, usando uma estação de bombeamento localizada na Mina de Miltônia. O mineroduto no futuro terá outra estação de bombeamento para o aumento da capacidade de transferência a um máximo de 14,85 milhões de toneladas por ano de bauxita, assim como minimizar a taxa de corrosão devido alto gradiente de pressão. Os dados referentes ao mineroduto de bauxita estão na Tabela 1.

Tabela 1. Características do mineroduto de bauxita

<i>Diâmetro Nominal (pol)</i>	<i>Extensão (km)</i>	<i>Fluido de operação</i>	<i>Vazão de operação (m³/h)</i>	<i>Operação</i>	<i>Pressão de Operação (kg/cm²)</i>	<i>Passagem de PIG</i>
24	244	Água/polpa de bauxita	1680	contínua	137	anual

Os parâmetros de projeto para o mineroduto foram selecionados para fornecer flexibilidade durante a operação. No entanto, há limitações quanto ao que pode ser transportado com segurança. O operador do mineroduto deve monitorar as propriedades da polpa de bauxita para garantir uma operação segura.

O mineroduto de bauxita está enterrado e utiliza a mesma faixa de servidão dos minerodutos de caulim já existentes das empresas Pará Pigmentos e Imerys por 120 kms. Um sistema de proteção catódica esta disponível para reduzir a corrosão externa da tubulação. Os terminais de teste da proteção catódica são espaçados em intervalos de aproximadamente 2 km ao longo do mineroduto. O duto também possui revestimento externo de três camadas de alta densidade de polietileno, quando usado juntamente com o sistema de proteção catódica, protege a tubulação da corrosão externa. (PSI, 2004)

Estações de monitoramento de pressão estão instaladas ao longo do mineroduto, para monitorar as condições hidráulicas do sistema. Os dados de pressão fornecem informações que suportam operador de tomada de decisão. Além disso, os dados do monitoramento de pressão, juntamente com dados da estação de bombeamento e os dados do terminal fornecem informações necessários para detecção de anomalias como vazamento ou entupimento do mineroduto. As instalações da estação de bombeamento, estações de monitoramento da pressão e terminais estarão ligados por cabo de fibra óptica. (PSI, 2004)

Para o transporte no mineroduto a polpa de bauxita deve possuir as características descritas na Tabela 2.

Tabela 2. Características da polpa de bauxita

		Projeto
Distribuição Granulométrica (% passante)	48#	100 ^a
	65#	94.7 ^a
	325#	40 – 47 ^a
	10µm	19 – 25 ^b
Concentração de Sólido		50,5%
pH		6.8 a 7.9
Rheology	Viscosidade (cP)	7.5 – 10.0
	Yield stress (dynes/cm ²)	10-90

^a PSI Document.: n 0 990-LR-173, n0130-03-0001-RT for transport

^b Bokela Test Report.: n 07069/B1-R1 for filter process

A caracterização da corrosão no mineroduto iniciou a partir da elevação da pressão de operação do duto, a primeira hipótese seria material depositado no fundo do duto, já que as características granulométricas estavam fora do projetado. Durante operação de remoção de uma curva de 90° para instalação de lançador de *pig*, verificou-se que a rugosidade interna da tubulação estava altamente agressiva (Figura 1), o que levantou a possibilidade de que a elevação da pressão de bombeamento de polpa estivesse relacionado com desencadeamento de processo corrosivo ao longo do mineroduto.



Figura 1: superfície interna do mineroduto (Km 0)

Outro indicativo que um processo corrosivo agia no mineroduto, era que a água bombeada não passava por algum tipo de tratamento, e esta possui um teor de oxigênio dissolvido na ordem 8 mg/l, e valores de pH variando entre 4,2 a 6,4 ao longo do ano durante período seco e chuvoso respectivamente.

Para caracterizarmos de fato esse processo corrosivo, contratou-se a empresa Nalco para avaliar as características corrosivas, através de análises físico-químicas, verificações microbiológicas e medições da taxa de corrosão através de cupons e medidas por diferença de polarização. Com objetivo de caracterizar o grau de agressividade dessa corrosão e propor programa de tratamento químico com dosagem de inibidores da corrosão.

3. Resultados

3.1- Resultados das análises químicas, físico-químicas e microbiológica

O período do monitoramento ocorreu entre maio e junho de 2009. Os pontos estudados foram no início do mineroduto em Paragominas e no final em Barcarena. Na tabela 3 temos os valores médios das variáveis avaliadas no monitoramento.

Tabela 3: Resultados das análises químicas, físico-químicas e microbiológicas das amostras de polpa de bauxita e água

	Material	pH	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	S.T.D (mg/l)	Dureza Ca (mg/l)	Alcalinidade (mg/L CaCO_3)	Ferro Total (mg/l)	O.D. (mg/l)	Cloretos (mg/l)	C.T.B (UFC/mL)
EB1	Polpa	7,44	94,03	63,94	40,24	8,09	0,02	5,00	6,97	4.273
EDB	Polpa	7,15	104,43	71,01	40,18	9,50	0,41	7,14	6,39	755
EB1	água	5,65	22,45	15,27	2,55	3,41	2,31	8,43	6,25	8.3871
EDB	água	6,19	24,62	16,74	4,80	5,60	0,21	0,20	5,71	393

EB1: Estação de Bombeamento 1 (Paragominas); EDB: Estação de Distribuição de Barcarena

Os dados acima apresentados mostram, baixo valor de pH da água para o contato com superfície metálica, possivelmente atribuídos aos ácidos orgânicos provenientes de decomposição vegetal, o pH da polpa se matem na faixa de neutralidade. Observam-se baixas concentrações de sais carbonáceos, sendo esta uma água branda em relação à dureza. Além de baixos teores de ferro e de cloretos

Os teores de oxigênio dissolvido na água decrescem ao longo do transporte no mineroduto, atingindo valores de zero no terminal. Indicando que nesses sistemas temos dois ambientes um aeróbico e outro anaeróbico.

Constata-se também a presença de microorganismos através da contagem de bactérias totais (CTB), expressas em UFC/ml, constatou-se um pico máximo de 100.000 UFC/ml na EB1, com redução desses valores a 1.000 UFC/ml nas amostras coletadas na EDB – Barcarena. Essas reduções acompanharam o decréscimo nos residuais do oxigênio dissolvido analisado nas mesmas amostras, o que confirma a menor atividade em meio não aerado. Foram realizadas análises específicas para bactérias redutoras de sulfato, porém, não foram detectadas nas amostras da EB1, mas sendo detectado em amostras da EDB. Não sendo constante seu aparecimento.

A polpa de bauxita apresentou valores de pH na faixa de neutralidade, teores de oxigênio dissolvido próximo aos valores encontrados para água, baixas concentrações de sais carbonáceos, e presença de colônias de bactérias.

3.2- Avaliação do processo de corrosão

Com base nos resultados acima efetuou-se a avaliação da agressividade da corrosão no mineroduto de bauxita através dos índices de saturação ou de Langelier, e o índice de estabilidade de Ryznar. Que estabelece valores do índice menor que 6, água com características incrustantes, valores maiores que 7, água corrosiva.

Os valores de índice de Ryznar para água bombeada no mineroduto apresentou resultados da ordem de 10 a 17, caracterizando essa água como altamente corrosiva. Já os resultados para polpa ficaram entre 8 e 12, também classificada com características corrosivas.

Foram também determinadas medidas de potencial e de corrente através do método de polarização linear (LPR), que possibilita verificar a velocidade instantânea da corrosão *on line*. Foram instaladas duas sondas LPR, uma para verificação das características apenas da água, e outra para acompanhamento do sistema água/polpa de bauxita, que reflete a condição operacional do mineroduto.

O gráfico abaixo mostra os valores encontrados no período do monitoramento, uma taxa de corrosão instantânea para água acima de 4 mpy, atingindo picos na ordem de 14 mpy. Para o sistema água/polpa de bauxita os valores são maiores, na ordem de 10 mpy, obtendo-se valores de 43 mpy. Este fato ocorre devido ao alto teor de sólido da polpa de bauxita.

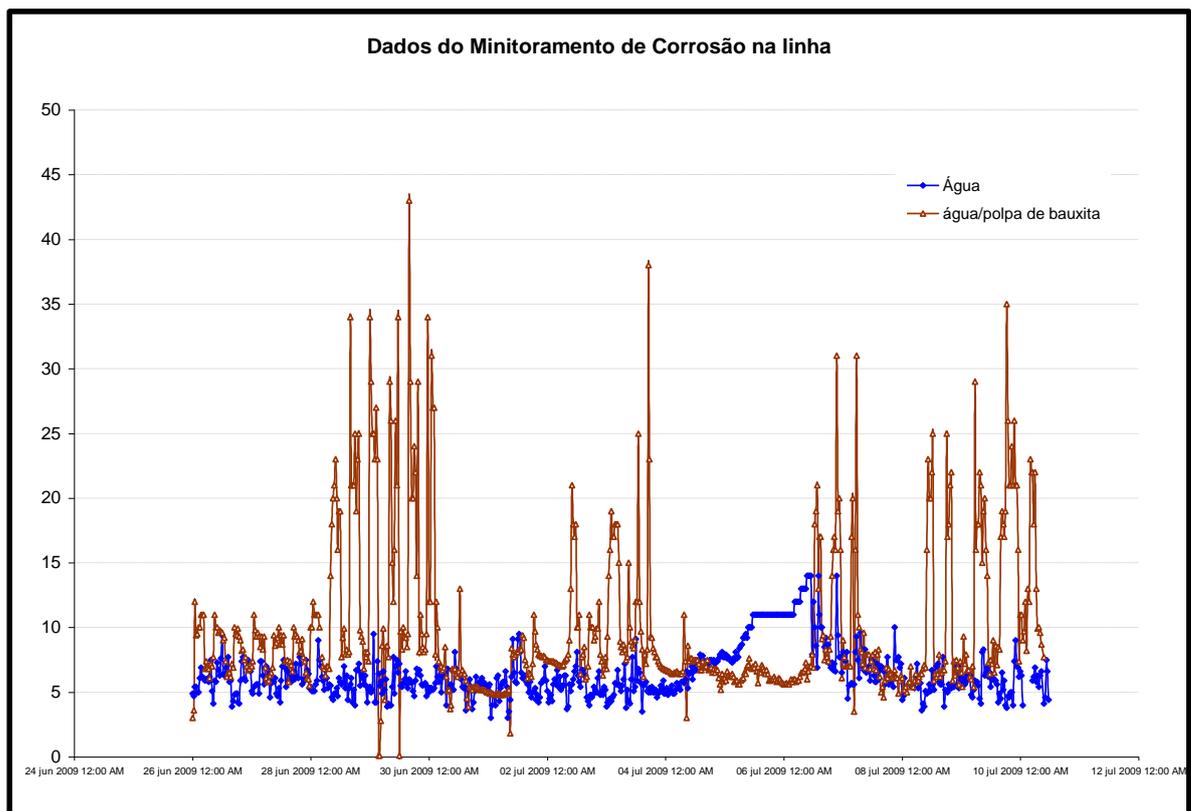


Figura 2: Gráfico da taxa de corrosão (mpy) por polarização linear no sistema do mineroduto

Outro método utilizado para avaliar a taxa de corrosão no sistema, foi através da de cupons de prova, para verificação qualitativa e quantitativa da perda de massa. Os cupons foram instalados em dois pontos de monitoramento para verificação das características da água e as características do sistema água/polpa de bauxita. Na tabela 4 temos os valores

médios de taxa de corrosão baseado na perda de massa, e na figura 3 o estado dos cupons após período de monitoramento.

Tabela 4. Taxa de corrosão no mineroduto determinada através de cupons de prova

Sistema	Período (dias)	Taxa Corrosão (mpy)
água	19	18,99
	30	14,65
água/polpa bauxita	28	40,92

4. Conclusões

Os resultados obtidos nesse monitoramento confirmam o desencadeamento do processo corrosivo no sistema do mineroduto de bauxita. Onde os principais agentes causadores dessa corrosão são os baixos valores de pH, os teores de oxigênio dissolvido e a presença de microorganismos (bactérias) na água e polpa de bauxita.

As leituras *in situ* através de sondas LPR mostram valores significativos de taxa de corrosão tanto para água, como para o sistema polpa/água.

Os ensaios com os cupons de prova confirmam o grau de agressividade ao qual o mineroduto está exposto. Sendo que para o sistema polpa/água temos também contribuição da perda de massa por abrasão dos particulados da polpa.

Para manutenção da integridade do mineroduto faz-se necessário tratamento com dosagem de inibidores de corrosão para ajuste do pH para um meio de imunidade ou passivação, sequestrante de oxigênio (sulfito ou bissulfito) e dosagem de biocidas para inativação da proliferação bacterianas. E acompanhamento através das sondas LPR e corpos de prova para verificação a eficiência do programa de tratamento.

5. Agradecimentos

A Vale e a Diretoria de Operações Bauxita Paragominas pela permissão para publicação deste trabalho.

A equipe de operadores e mantenedores do Mineroduto de Bauxita Paragominas

Aos técnicos da Nalco Brasil, pela parceria e dedicação durante o período deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

BETINOL, R. & NAVARRO, L.A. . **Slurry Pipeline Design Approach**. Brass Chile Publications, pp.13, 2007

GENTIL, VICENTE, 2007. **Corrosão**. 5ª Ed. –Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A..

GOMES, L.P.. **Diagnóstico de corrosão e proteção catódica em tubulações enterradas de plantas industriais**. Boletim da IEC-Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda., nº. IEC-SPD001-IT-001. 30p. disponível em <http://www.koende.com.br/downloads/Prot_catodica.pdf>. Acesso em 09/01/2010.

HALLBOM, D.J. AND GANDHI, R.L..**Long Distance Hydrotransport Systems for Bauxite Ore**. Proceedings of the XXIII International Mineral Processing Conference, Istanbul, Turkey, pp. 1966-1971, 2006.

KOSTCHOUBEY, B. et al.. **Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província bauxitífera de Paragominas, nordeste da bacia do Grajaú , nordeste do Pará/oeste do Maranhão**. In: *Caracterização de depósitos minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM-CT/MINERAL-ADIMB. pp.: 687-782,2005.

PSI, **OPERATING AND CONTROL PHILOSOPHY- PARAGOMINAS BAUXITE PROJECT (PSI-130-03-0002-DC rev 01)**. Pipeline system Incorporated. 25p. , 2004

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu Controle**. 1ª Ed, São Paulo, Ed. Hemus, 198