

## **Redução do custo de co-processamento de um resíduo industrial gerado na produção de alumínio primário utilizando a metodologia DMAIC**

Emílio Gomes Gervásio (Universidade Federal de Viçosa) e-mail: omilioop@yahoo.com.br  
Jaqueline Akemi Suzuki (Universidade Federal de Viçosa) e-mail: jaqueline.suzuki@ufv.br

*Resumo: O presente artigo trata-se de um estudo de caso realizado em uma indústria metalúrgica de produção de alumínio. Dentre os objetivos do trabalho, está o de apresentar a metodologia DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar e Controlar) como metodologia aplicável para a redução do custo de processamento do material retido sobre os filtros de lama, que compõem uma das etapas da exaustão e tratamento do fluído gerado no processo de redução do óxido de alumínio, além de ser empregado na busca de melhoria de seus processos. Nesse sentido, a proposta abordou algumas etapas de implantação e execução do DMAIC e a efetividade dessa metodologia. Tendo como desfecho a eliminação do transporte para o armazenamento do cake e de todo o resíduo originado da limpeza das torres, o risco de impacto ambiental nas vias públicas pelo derramamento, dentre outros ganhos financeiros e ambientais. Palavras Chave: DMAIC; Redução de custos; Processo alumínio;*

### **1. Introdução**

Os diversos setores da economia brasileira estão se reestruturando na busca de adequação e modernização, que lhes assegurem um lugar de destaque, pois a alta competitividade entre as empresas faz com que estas estejam, constantemente, buscando alternativas para garantir sua sobrevivência no mercado. Em face desse cenário, os gerentes estão aprendendo novos modos de dirigir suas empresas e os trabalhadores estão aprendendo como contribuir, com seus conhecimentos, para melhorar os processos de produção, tornando-os mais eficazes (PANDE 2001 *apud*, OLIVEIRA, 2005 p. 08).

Essa abordagem gerencial permite às organizações acompanhar as rápidas mudanças e até mesmo, se antecipar a elas. Ao priorizar o monitoramento, o controle e o incremento contínuo dos processos, as organizações capacitam-se a permanecer no mercado, assim esse estilo de gerenciamento pela qualidade dá ênfase, antes do lucro, à satisfação das necessidades dos clientes.

Diante desse panorama, a relevância desse estudo refere-se ao fato de que, atualmente, tem sido de muita importância para as empresas conhecer todo o seu processo produtivo e evidenciar as oportunidades de reduções de custos em suas diferentes etapas do processo. Baseado numa metodologia *Lean*, denominada DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar), um desmembramento de toda a cadeia produtiva e aplicação das variadas ferramentas de análise e soluções de problemas nos permite alcançar os mais brilhantes resultados. O estudo foi realizado na empresa Novelis, indústria multinacional, do ramo metalúrgico de produção de

alumínio primário, localizada em Ouro Preto, indústria que se originou a partir de um desmembramento de praticamente todos os negócios de laminados da Alcan. Toda produção industrial, até então, desse metal é baseada no processo Hall-Heroult onde as matérias-primas: alumina, os fluoretos, a criolita, os óxidos para produção das ligas, barrilha ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), são dissolvidos num banho de sais fundidos, o qual é atravessado por corrente elétrica. Dessa forma os íons de Al<sup>+</sup> presentes podem ser reduzidos, tendo como resultado o alumínio metálico.

Nesse sentido, o artigo se organizará a apresentar o processo de produção de alumínio e de geração dos gases, em seguida se deterá em conceituar e apresentar a metodologia supracitada (DMAIC), com vistas a demonstrar a utilização da metodologia ao estudo realizado na indústria e os resultados alcançados para a melhoria do processo e redução de custo. Assim, são relacionados os possíveis benefícios obtidos com a adoção da metodologia DMAIC, ao demonstrar a importância de ser tratada como um dos pilares da estratégia de negócios da organização. O objetivo do trabalho foi de realizar por meio da metodologia DMAIC um diagnóstico de todo o processo de geração e destinação do resíduo *cake* obtida nas etapas de produção de alumínio primário a fim de identificar oportunidades de ganhos tanto econômicos quanto ambientais. Para tanto, os objetivos específicos definidos foram de: reduzir o custo do processamento do *cake* que hoje é de R\$ 142,21 por tonelada transportada; reduzir o volume de resíduo transportando, cerca de 250 ton/mês, cujo custo atual é da ordem de R\$ 35.522,50 também reduzir em média,

## 2. Produção de alumínio e geração dos gases

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio, o alumínio apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial, tendo até então diversas aplicações devido às diversas ligas. Toda produção industrial, até então, desse metal é baseada no processo Hall-Heroult, onde as matérias-primas: a alumina, os fluoretos, a criolita, os óxidos para produção de ligas, barrilha ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e fluorita ( $\text{CaF}_2$ ), são dissolvidos num banho de sais fundidos, o qual é atravessado por corrente elétrica. Dessa forma os íons de Al<sup>+</sup> presentes podem ser reduzidos, tendo como resultado o alumínio metálico. Existe um processo no qual se usa carbono para romper a ligação química oxigênio/alumínio, porém esse, ainda não corresponde com produtividade obtida no processo Hall-Heroult.

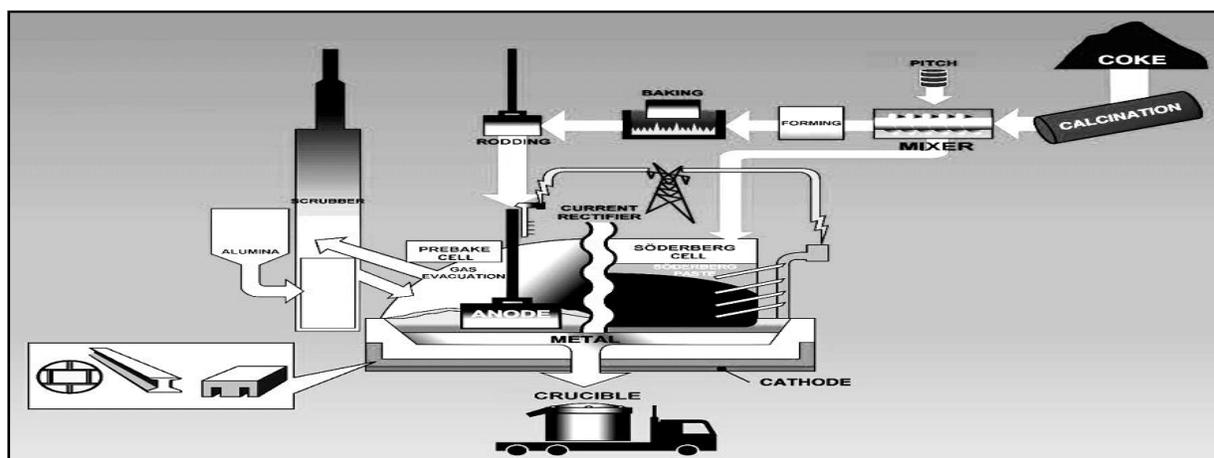


Figura 1 – Ilustração esquemática de uma célula eletrolítica no fluxo de processo de redução da alumina

O processo para a produção, de alumínio, da empresa Novelis do Brasil, relatado nesse trabalho e ilustrado esquematicamente na figura 1, corresponde somente à unidade industrial de Ouro Preto cujas instalações possuem sistemas de lavagem a úmido dos gases e particulados finos gerados nos fornos elétricos das instalações de redução eletrolítica. Nesse processo, os gases particulados emitidos, além de representarem perda de matéria-prima, são nocivos à saúde humana. Após a limpeza ou lavagem desses gases, realiza-se um tratamento desse produto gerado que por consequência origina-se um resíduo denominado pela empresa como cake além disso há resíduos do processo para obtenção do alumínio, sob a forma de gases e pós, gerado pelos fornos, que saem da parte interna da estrutura e carcaça e se espalham pelas salas dos fornos, poluindo a atmosfera. Esses gases e pós são nocivos à saúde do homem por isso, devem ser retirados das salas dos fornos e passarem por um processo de purificação antes de serem lançados para a atmosfera. Sistema para lavagem dos gases

Diante da impossibilidade de se eliminar os gases e particulados gerados no processo industrial para a produção do alumínio, criou-se sistemas para combater tais resíduos poluentes, Na figura 2 demonstra-se uma das torres de lavagem dos gases.



**Figura 2** – Foto de uma das três torres de lavagem dos gases existentes na fábrica.

## **2.1 A lavagem dos gases**

No sistema de lavagem dos gases “úmidos” ácidos, a lavagem dos gases por via úmida é realizada nos depuradores de gases (torres lavadoras). Nestes depuradores, através do contato líquido-gás, promovido pela lavagem dos gases em contra corrente, são absorvidos os elementos arrastados pelo sistema de exaustão dos fornos e desprende-se o vapor devido a temperatura dos gases que saem dos fornos. Os sólidos são retidos na solução ácida sendo todo este material denominado “bleed” (pH ácido entre 3 e 4 ), que é retirado por bombeamento e enviado para posterior tratamento (neutralização), onde as substâncias poluentes são separadas da água e filtradas por um filtro do tipo prensa gerando assim um resíduo sólido conforme ilustrado na figura 3 e a este material sólido a Novelis denominou-se de “cake”( composto basicamente de fluoreto de cálcio, alumina e carbonáceos ).



**Figura 3** – Foto de uma porção de uma “torta de cake” gerada em uma das 64 placas que compõem o filtro-prensa.

Esse composto, *cake*, anteriormente era depositado em um aterro industrial, porém hoje, o mesmo é negociado junto à uma empresa de cimento e refratários onde é tido como matéria-prima para o processo de produção e fornecimento de calor. Ao fazer uma análise do processo de geração, a quantidade e o processamento desse resíduo, chega-se num valor de custo mensal de aproximadamente  $R\$39.660,00/mês$ , o que seria um custo relativamente alto diante das oportunidades de ganhos. Conforme estudos realizados anteriormente, sabe-se que 50% da composição do *cake* é umidade (água) e tomando como base este item, conclui-se que, se fosse conseguido reduzir em pelo menos 15% de sua umidade, reduzir-se-ia uma quantidade de 382,05 toneladas/ano, o que corresponderia num ganho financeiro de  $R\$60.608,4$ , sem contar nas demais oportunidades que se poderia trabalhar.

Vislumbrou-se a partir daí, a possibilidade de utilização da Metodologia DMAIC para se avaliar as oportunidades de melhoria e de redução de custo no processamento do material retido nos filtros de lama.

### 3. A metodologia DMAIC

A metodologia DMAIC foca na simplificação dos processos, que permite, se bem aplicada, sustentar e maximizar o sucesso empresarial, mediante estreita compreensão das necessidades dos clientes, uso disciplinado de fatos, dados e análise estatística e a atenção diligente à gestão, melhoria e reinvenção, de forma a assegurar a redução do nível de defeitos, o aumento da satisfação dos clientes e da lucratividade da organização. E essa metodologia é, portanto, constituída de seis etapas integradas, definidas conforme HARRY (1998) citado por OLIVEIRA (2005). Na etapa inicial, ou seja, na parte **D** do ciclo, a direção e gerências dão as diretrizes para as equipes de melhorias. (HARRY 1998 *apud* OLIVEIRA, 2005 p. 14).

Na seqüência, o trabalho passa a ser coordenado pelos especialistas e a parte MAIC do ciclo tem os seguintes objetivos:

#### Medição

- Fazer a tradução das variáveis críticas do cliente “Y” para as variáveis críticas do produto “y”;
- Avaliar a confiabilidade do sistema de medição;
- Avaliar o desempenho dos “y” os mais críticos;

#### Análise

- Determinar as variáveis críticas do processo “x” que podem afetar as variáveis críticas do produto, e quais destes “x” apresentam-se como maiores fontes de variação do processo.
- Fazer melhorias nas variáveis “x” evidentes.
- Escolher as variáveis “x” controláveis mais apropriadas para futuros ensaios.

**Melhoria**

- Aplicar planejamento experimental para diferenciar as variáveis muitas e triviais das poucas e vitais;
- Fazer análise de sensibilidade para avaliar o comportamento das variáveis mais importantes;
- Estabelecer condições de trabalho mais adequadas;
- Estabelecer tolerâncias máximas para as variáveis muitas e triviais e ótimas, para as variáveis poucas e vitais;

**Controle**

- Planejar estratégias de monitorização e melhoria contínua das variáveis “x” mais importantes, para que a melhoria do processo siga um comportamento em degraus e não em forma de serra.

Finalmente, deve ser mantido um histórico dos estudos realizados, para que os conhecimentos adquiridos sejam divulgados e aplicados em processos similares da empresa, uma vez que não é inteligente e nem econômico “reinventar a roda” a cada novo problema. (OLIVEIRA, 2005 p. 17)

Uma vez analisados os fundamentos teóricos da metodologia DMAIC e a estratégia em que está inserida, passaremos ao estudo de caso realizado a partir de uma análise básica do processo de geração e destinação do resíduo *cake* onde foi observado oportunidades de ganhos, como ditos anteriormente, tanto financeiros quanto ambientais. Tendo como base a metodologia, iniciamos a fase DEFINIR com a criação um plano de comunicação; formação da equipe, avaliação de viabilidade de execução do projeto, identificação das saídas e entradas, uma tabela de responsabilidades e visita aos galpões de armazenamento do *cake*.

**3.1 Tabela SIPOC**

A partir da definição das entradas e saídas do processo, que fornece uma visão macro de todo o processo onde se pode identificar e dividir as principais etapas obtendo as informações básicas dos fornecedores internos e externos, entradas (inputs), processo, saídas para os clientes tanto internos como externos do processo. A tabela SIPOC visualizada na Tabela 1, ajudou a visualizar a voz do cliente e a começar a ver as relações entre as entradas e as saídas do processo.

**Tabela 1:** SIPOC (*Supplier, Input, Process, Output e Customer*)

<b>Supplier (Fornecedor)</b>	<b>Input (Entradas)</b>	<b>Process (Processo)</b>	<b>Output (Saídas)</b>	<b>Customer (Clientes)</b>
Redução II	Bleed.	Neutralização e filtragem do bleed.	Bleed neutralizado e filtrado	Soecom
Utilidades	Água			Meio Ambiente
Cimentos Itaú	Cal hidratada		Cake.	Redução II.

Fonte:projeto Melhoria Contínua Novelis Alumínio 2012.

De acordo com o escopo, realizamos a fase MEDIR, na qual procedeu-se a um planejamento de coleta de amostras, uma bateria de testes na operação de filtragem, onde foi alterado os parâmetros de operação (tempo de filtragem, nível de sólido no decantador e pressão de desarme do filtro prensa), realização de teste de secagem do *cake* sob um calcinador de alumina; aferição e estudo de todo o sistema de medição de pH e de adição da cal hidratada; implementação de um sistema de secagem com o ar comprimido automático ( esta última como uma melhoria rápida).

Com os dados consolidados, na fase ANALISAR foi realizado testes e análises para avaliar a correlação existente entre as variáveis do processo e uma avaliação de todo o processo de armazenagem e transporte do resíduo *cake*, utilizando-se das seguintes ferramentas de administração e gestão da qualidade da produção: Diagrama de Pareto; Brainstorming; Gráfico de controle; Gráfico de Capabilidade; Histograma; Correlação.

#### 4. Análise dos resultados

De acordo com os ensaios realizados, foram obtidos os seguintes resultados: O *cake* exposto sob o calcinador secou apenas a superfície do resíduo contido na caçamba, daí analisou-se a área para possível espalhamento do mesmo mas as condições de manuseio, espaços e estruturas da área da alumina e a quantidade gerada, inviabilizaram o projeto.

#### 3.2 Fluxograma do processo

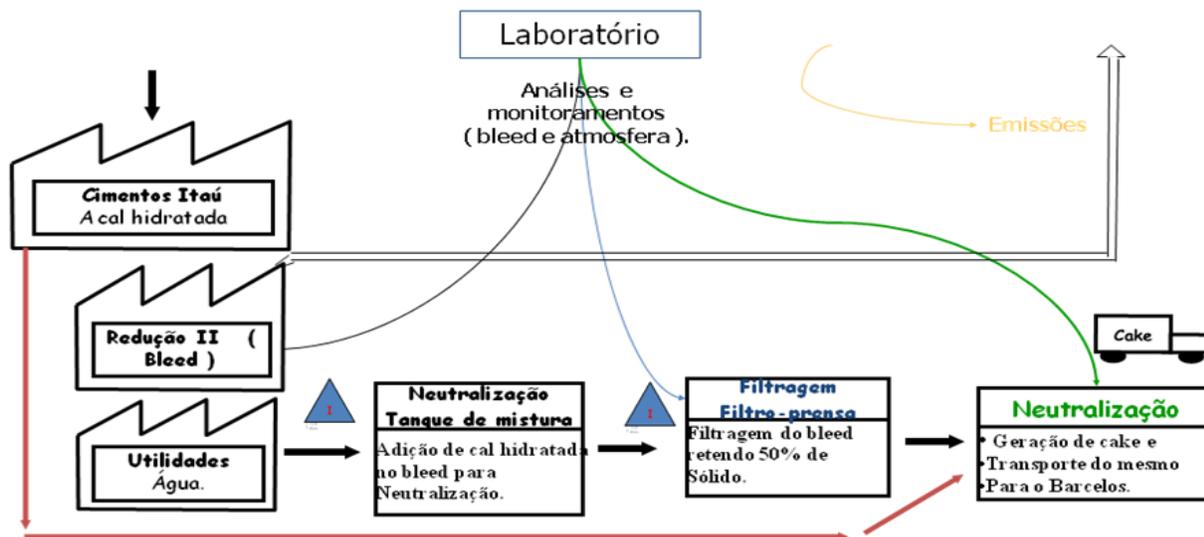


Figura 6: Fluxograma do processo de neutralização. Fonte: Novelis Alumínio (2012).

Uma representação gráfica do fluxograma do processo, representada na figura 6, auxiliou na identificação das entradas e saídas do processo e, além disso, proporcionou a capacidade de visualizar e identificar oportunidades de melhoria.

### 3.3 Gráfico de Pareto:

A Figura 7 ilustra um gráfico de Pareto relativo ao custo e o volume de cake gerado no processo de lavagem de gases decorrente da produção de alumínio e o respectivo co-processamento.

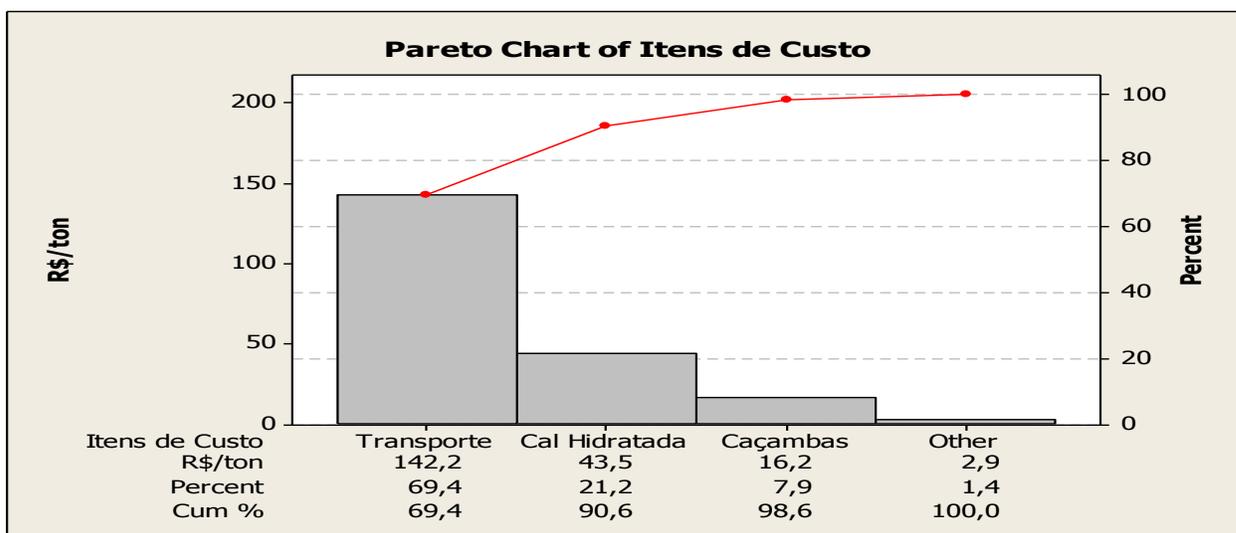


Figura 7: Gráfico de Pareto para custo/cake gerado e co-processado.

O gráfico de pareto, auxiliou na determinação da ordem em que os problemas pudessem ser avaliados, devido à frequência de ocorrência ou seu nível. Como tal gráfico, é uma técnica que separa os problemas vitais dos muitos triviais, indicando a importância relativa de cada categoria de problemas por meio de barras dispostas em ordem decrescente.

### 3.4 A logística de transporte

Ao analisar toda a logística de transporte, levantou-se a composição do custo da mesma da qual se pode visualizar na tabela 2. Assim, segue o custo mensal das variáveis logísticas:

Tabela 2: Composição do custo total da logística de transporte.

Itens	R\$/mês
Aluguel de 5 caçambas para o transporte do "cake"	436.00
Remoção das caçambas	866.00
Movimentação / transporte das caçambas	1,430.00
Mão-de-obra de segurança do galpão de armazenamento	3,240.00
Escolta da máquina que movimenta o "cake" no galpão	230.00
Custo da máquina que movimenta o "cake"	3,440.00
<b>TOTAL</b>	<b>9,642.00</b>

Fonte: Projeto Melhoria Contínua – Novelis Alumínio 2012.

Ao somar todos esses custos chega-se num total de R\$ 9642,00 mensal o que representa um custo anual de aproximadamente R\$ 115.704,00.

### 3.5 O Consumo e sistema de adição da cal hidratada

Ao centrar na análise do consumo da cal hidratada, no ano de 2012 gerou-se 2.547 toneladas de CAKE e gastou-se uma média muito aproximada de 0,23 toneladas de cal hidratada de CAKE gerado, hoje o preço da cal hidratada é de R\$189,30, ou seja, o custo com a cal hidratada/ tonelada de CAKE produzido é de R\$43,53. Nessas condições gastou-se no ano de 2012 com cal hidratada para neutralização um valor de R\$110870,91. A adição da cal é realizada de forma esporádica e sem controle proporcionando um consumo descontrolado da cal.

A variação do percentual de umidade no cake, não foi significativa frente aos objetivos específicos desejados, que era de obter uma redução de 15% da umidade presente no cake, no qual representa 50% de sua massa total. A figura 8 ilustra um exemplo das planilhas preenchidas no departamento do laboratório após análises das amostras coletadas.

Novelis OURO PRETO		BOLETIM DE ANÁLISE QUÍMICA			LABORATÓRIO QUÍMICO	
NOME DO CLIENTE:		NOME DO ANALISTA:			ASSINATURA RESPONSÁVEL:	
PROCEDÊNCIA:		Crispim			REQUISIÇÃO N°:	
REDUÇÕES		DATA DA ANÁLISE:				
Especificação de amostra		SÓLIDOS			UMIDADE	
underflow 1	do dia 7/02/06	25,6%	297,3g/L		CAKE	50,5%
underflow 2	do dia 7/02/06	25,0%	293,4g/L		CAKE	50,8%
underflow1	do dia 08/02/06	26,6%	316,0g/L		CAKE	49,3%
underflow2	do dia 08/02/06	27,9%	335,6g/L		CAKE	48,3%
underflow 1	do dia 10/02/06	19,0%	214,5g/L		CAKE	48,1%
underflow 2	do dia 10/02/06	19,1%	213,8g/L		CAKE	49,7%

Figura 8: Planilha preenchida no departamento do laboratório após análises das amostras coletadas

Os gráficos de controle visualizados na figura 9 auxiliaram na análise da variação do percentual de umidade presente nas tortas de cake após filtragens no filtro prensa, permitiu-nos concluir que o processo está estável pois o gráfico das amplitudes móveis (2º gráfico) está sob controle estatístico, pois nenhum ponto está além dos limites de controle e o gráfico dos valores individuais (1º gráfico) também está sob controle estatístico pois não existe nenhum ponto que esteja acima do limite superior de controle caracterizando uma causa especial de variação.

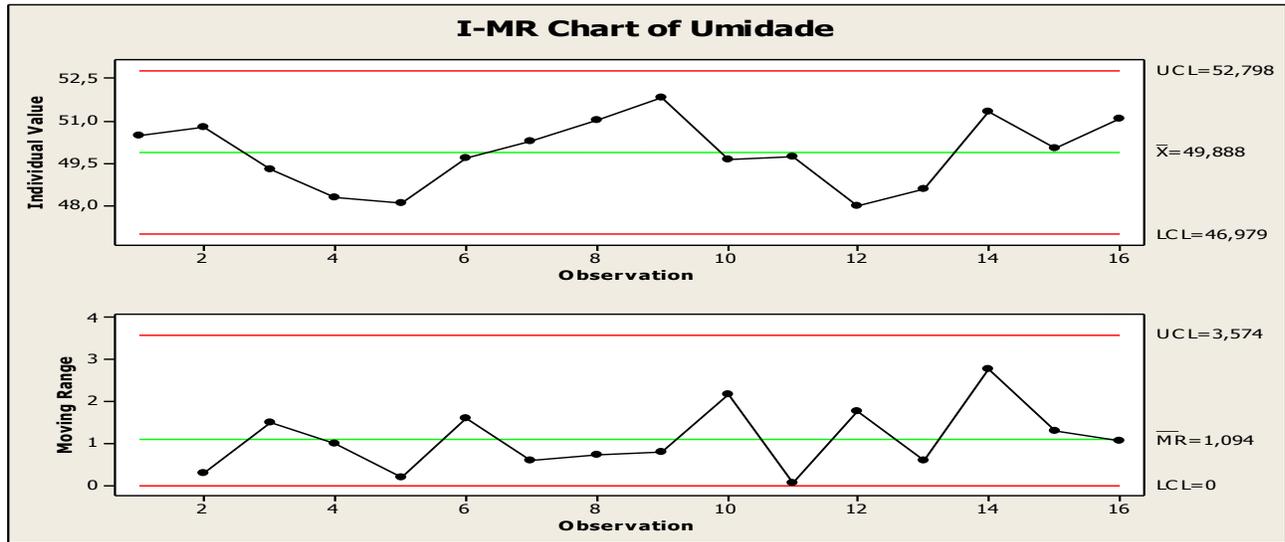


Figura 9: Gráficos de controle para a análise da variação do percentual de umidade.

A Figura 10 apresenta os gráficos de controle que são utilizados para verificar se o processo está sob controle: o gráfico sequencial de pontos das últimas 16 observações que também é usado para verificar se o processo está sob controle, o histograma dos dados do processo e gráfico de probabilidade normal para verificar se os dados estão normalmente distribuídos e o gráfico de capacidade do processo e estatísticas de capacidade dentro e global: CP, CPK e desvio padrão dentro; Pp, Ppk e desvio padrão global.

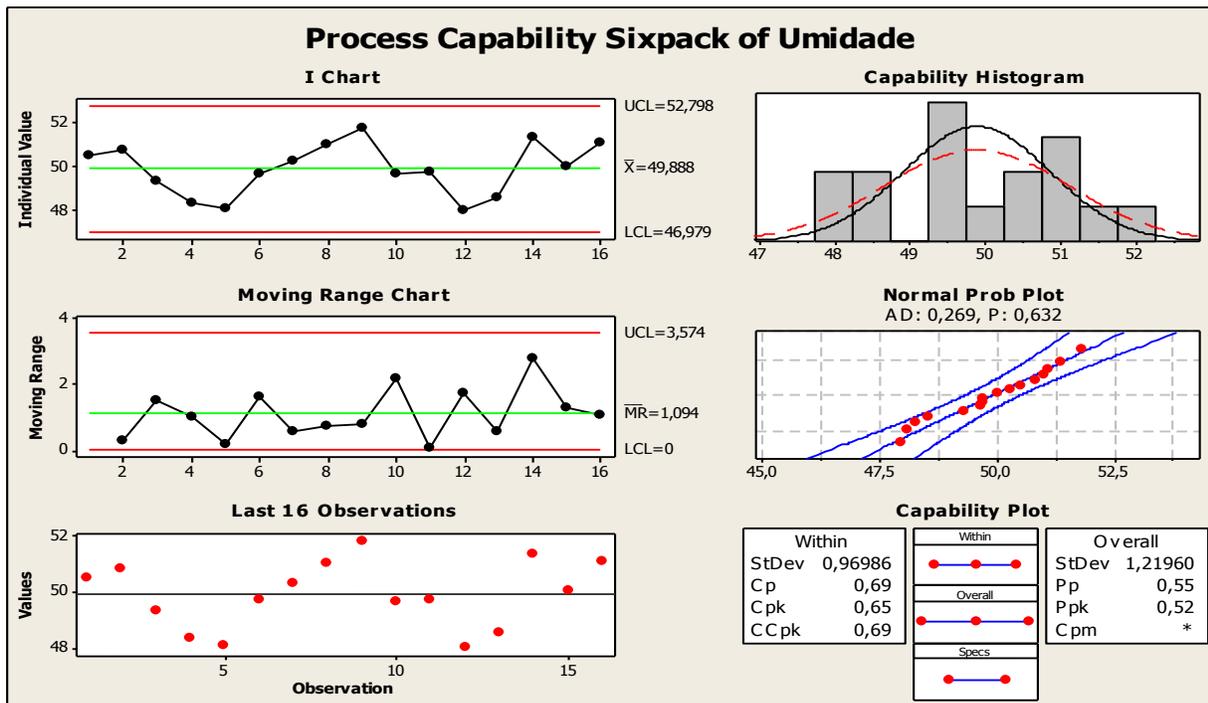
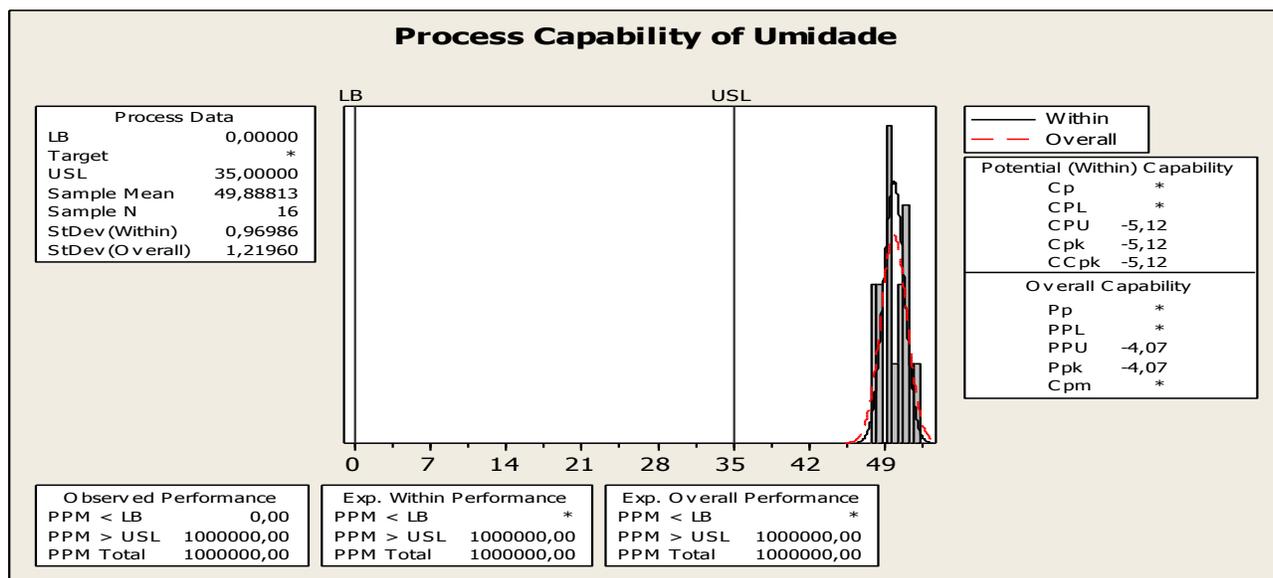


Figura 10: Gráficos de capacidade para a análise da variação do percentual de umidade.

Ainda analisando o gráfico da figura 10, se o  $C_p < 1$  então a variabilidade do processo é maior que os limites da especificação. Os valores  $C_p$  e  $C_{pk}$  são calculados com base no Desvio Padrão avaliado.

Portanto, nota-se que o processo não possui nenhum ponto fora dos limites de controle, porém o teste de causas especiais falhou no teste 2. Tem-se 3 pontos consecutivos acima da linha central no gráfico das médias (gráfico  $\bar{X}$ ) que caracteriza uma causa especial de variação. Os dados desta análise seguem uma distribuição normal, porém o processo não é estatisticamente capaz, pois  $C_p$  e  $C_{pk}$  são menores que 1,33.



**Figura 11:** Gráficos de capacidade para a análise da variação do percentual de umidade.

Na figura 11, o gráfico demonstra o quanto está fora o processo mediante a meta que estipulamos atingir que nesse caso seria um *cake* com uma umidade de até no máximo 35%.

### Considerações finais

Nas fases melhorar e controlar, após toda análise nos pontos de maiores relevância nos custos e nas condições ambientais, foram tomadas algumas ações que obtiveram alguns resultados finais conforme descrito a seguir:

- Eliminação de (os) transporte para o armazenamento do *cake* e de todo o resíduo originado da limpeza e faxina nas torres;
- Eliminou-se o risco de impacto ambiental nas vias públicas por derramamento do *cake* sem contar na redução da probabilidade de riscos de acidentes de trânsito e o aumento da satisfação da comunidade;
- Eliminou-se todo o custo que se tinha com a logística do transporte do *cake* para o armazenamento externo da Novelis que totalizava um valor de R\$ 8675,00/mês e passou-se para

uma nova sistemática de carregamento do *cake* onde o veículo de transporte, já posicionado sob o filtro-prensa, iria direto para o cliente;

- Instalado um sistema automático de adição da cal hidratada onde se pode tarjar uma faixa de ótima de pH controlada e mantida por uma adição dosada automaticamente de acordo com seus limites mínimos e máximos desejados que atendem satisfatoriamente uma reação de neutralização, consumindo, desta forma, uma quantidade de cal suficientemente necessária, sem desperdícios.

- Hoje, com todos os valores concretos e reais, pode-se calcular um ganho estimado no valor de R\$ 81,0 mil/ano o que corresponde aproximadamente à U\$ 41,5 mil/ano.

Percebe-se que muitas empresas ainda hoje são carentes de técnicas e métodos eficientes que possibilitam resultados satisfatórios, entretanto, muitas têm conhecimento da existência destes e por inúmeras razões não acreditam ou não arriscam o investimento. Haja vista que a qualidade de um produto possui relação direta com as condições em que é produzido, fazendo-se necessária a preocupação com o desempenho dos processos produtivos. Para tanto, a metodologia DMAIC se mostrou eficaz como roteiro para o delineamento do projeto e solução de um problema onde abordou ferramentas e técnicas que deram direcionamento às análises e tomadas de decisões para obtenção dos resultados citados anteriormente.

#### Referências Bibliográficas

ANDRADE, S. B.. *Influência da Qualidade da Alumina no Processo de Redução*. Aratu: Alcan Alumínio do Brasil S.A., 1990.

BRASIL. Professores do Departamento de Engenharia de Produção a Escola Politécnica da USP e Fundação Alberto Carlos Vanzolini. Coordenador: Contador, J. C.. *Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a serviço da modernização da empresa*. São Paulo: Editora Blücher, 1998. 593 p. (2.<sup>a</sup> Ed.)

Calegare, A. J. A., *Introdução ao Delineamento de Experimentos*. São Paulo: Editora Blücher, 2001.

Costa Neto, P. L. O., *Estatística*. São Paulo: Editora Blücher, 2002. P. (2.<sup>a</sup> Ed.)

Montgomery, D. C., *Introdução ao Controle Estatístico de Qualidade*. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

BRASIL, ALCAN/NOVELIS. Confederação Nacional dos Metalúrgicos. Disponível em: <<http://www.cnmcut.org.br/empresas/alcan-novelis> > Acesso em: 22/10/2014

BRASIL, A História do Alumínio. Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em: <http://www.abal.org.br/aluminio/historia-da-industria/brasil/> Acesso em: 21/10/2014

OLIVEIRA, G. N. A METODOLOGIA DMAIC: uma alternativa robusta para a melhoria de processos. Disponível em: [http://geraldonilton.com/publica/Monografia\\_Metodologia\\_DMAIC.pdf](http://geraldonilton.com/publica/Monografia_Metodologia_DMAIC.pdf) . Acesso em: 20/10/2014

PEREZ-WILSON, Mário. *Seis Sigma: compreendendo o conceito, as implicações e os desafios*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999.