



Atingindo baixo consumo térmico com uso de ferramentas tecnológicas e análise de temperatura de combinabilidade

Mônica Guimarães Ferreira
Thiago Silveira Formiga

Em geral, para uma fábrica de cimento o consumo térmico é o mais importante indicador da eficiência da planta. Há uma busca constante para mantê-lo nos níveis mais baixos possíveis. Muitas podem ser as causas de um alto consumo térmico, por exemplo:

- Combustão ineficiente no calcinador;
- Redução de troca de calor na torre de pré-aquecimento;
- Formato de chama inadequado;
- Problemas na operação do resfriador.

Outra causa de alto consumo que é pouco lembrada é a composição da farinha.

Como assim?

Sabe-se que é necessária uma composição específica da farinha em termos de CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ para a formação do clínquer com as quantidades ideais de C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF. Na indústria esse controle é feito com frequência, porém, o que algumas vezes é negligenciado é que além das quantidades relativas das fases do clínquer a composição da farinha também governa, conseqüentemente, as taxas de reações químicas que liberam ou absorvem calor. **Isso quer dizer que a composição da farinha influencia no consumo térmico do forno.**

Uma indicação clara desta governança é a temperatura de combinabilidade, que é um valor de referência que nos dá uma ideia do calor mínimo que uma determinada farinha demanda para produzir o clínquer. A fórmula da temperatura de combinabilidade é:

$$TC = 436 + 21 \cdot \%RI + 10 \cdot FSC + 3 \cdot R\#90 + 32 \cdot MA - 250 \cdot \%F - 20 \cdot \%SO_3 - 18 \cdot \%MgO$$

TC: Temperatura de combinabilidade em °C;

%RI: Porcentagem de farinha insolúvel em ácido (retido 90 µm);

FSC: Fator de saturação do clínquer;

R#90: Porcentagem de retido em 90 µm;

MA: Módulo de alumina;

%F: Porcentagem de flúor no clínquer;

%SO₃: Porcentagem de enxofre no clínquer;

%MgO: Porcentagem de óxido de magnésio no clínquer.

Na prática...

Essa influência da composição no consumo térmico pode parecer muito teórica, mas o que ocorre na prática é que as suas variações afetam o calor necessário no forno.

Foi o que se constatou em uma determinada fábrica de cimento no Brasil. Um trabalho de redução de consumo térmico foi requisitado e, ao se analisar todos os possíveis motivos, concluiu-se que a variação da temperatura de combinabilidade era o principal motivo do alto consumo térmico devido a sequência de fatos descrita a seguir:

- O forno recebe uma alimentação com alta variação na composição química;

- Consequentemente, a temperatura de combinabilidade também terá alta variação;
- O combustível não é ajustado para se adequar à variação da demanda;
- A cal livre medida possui então uma alta variação;
- O operador percebe isso, se preocupa principalmente com picos altos de cal livre que implicam em baixa resistência do clínquer;
- O operador trabalha para assegurar uma produção com baixa cal livre com um nível de temperatura alto, raramente reduzindo-o;
- Resultado: um consumo térmico maior do que o necessário.

Como resolver o problema?

Como o problema identificado é relacionado à variabilidade, a teoria estatística é capaz de apontar a estratégia para resolvê-lo. Com ela é possível identificar se o forno é naturalmente instável (forno muito antigo ou com problema de projeto) ou se ocorrem eventos externos esporádicos que atrapalham sua operação. Podemos identificar qual é o caso por meio do cálculo de dois índices: o de capacidade e o de performance.



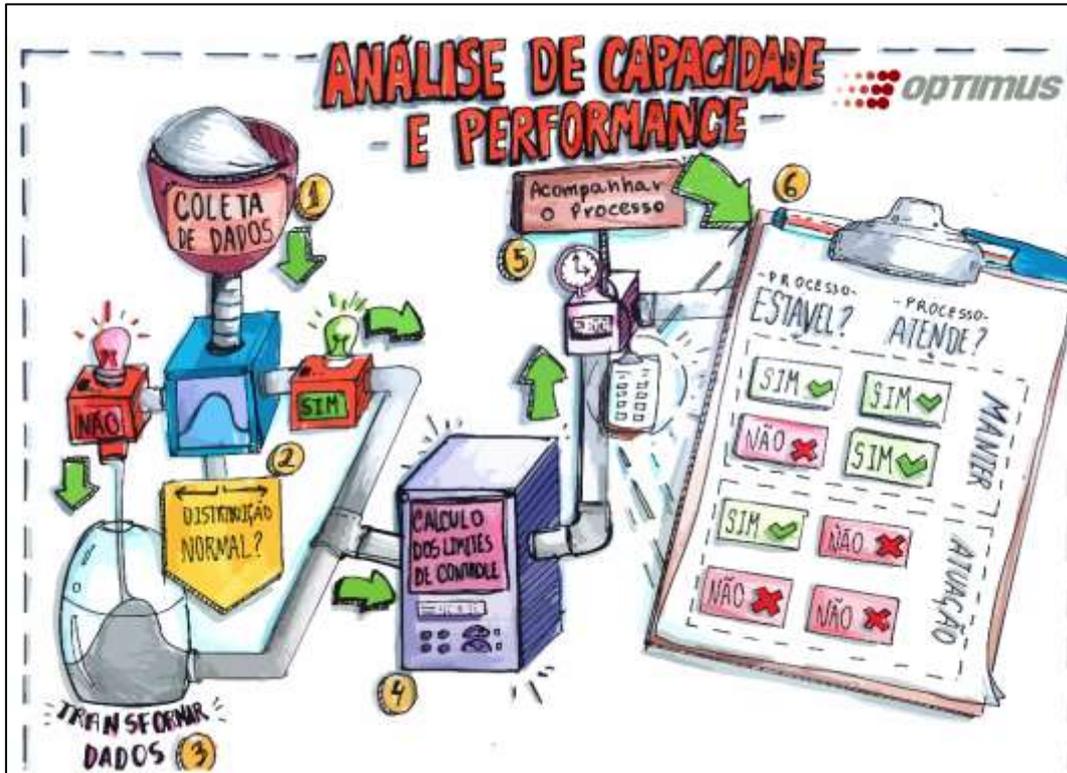
Se o *índice de capacidade* estiver alto é porque há uma alta variabilidade natural devido apenas às causas comuns. Mas se o *índice de performance* estiver alto é porque existem muitas variações externas esporádicas devido às causas especiais.

A estratégia para resolver causas comuns de falha é uma mudança intrínseca no processo, como troca de revestimento, instalação de controle etc. Essas sempre requerem investimento, porque o processo normalmente não é capaz de produzir com baixa variabilidade.

Para resolver falhas com causas especiais, em geral não é necessário investimento, porque são frutos de interferências externas, como problema no empilhamento, erro de um medidor etc. A ação necessária é a investigação em campo logo que se detecte uma falha, para rastrear interferências. Geralmente são tomadas medidas internas para melhoria de comportamento e manutenção em periféricos.

Aplicando a metodologia

Para a fábrica com problema de consumo térmico empregamos a metodologia de análise de performance e capacidade, seguindo os passos descritos na figura abaixo. A variável medida que terá os índices calculados será a **cal livre**.



O procedimento foi:

1 – Coleta de dados: foram coletados dados de cal livre de 10 em 10 minutos durante 3 meses;

2 – Teste de normalidade: os dados devem seguir a distribuição normal, por isso emprega-se um teste. No caso analisado os dados foram reprovados no teste;

3 – Caso não seguirem distribuição normal devem passar por uma transformação que os tornem normais;

4 – Cálculo de limites de controle: indicam o intervalo em que 99,73% dos dados se encontram;

Para se calcular os limites de controle da cal livre, calcula-se a média dos valores medidos de cal livre e das amplitudes móveis (a diferença entre dois valores subsequentes) no período em questão. Em seguida obtemos os limites pelas equações abaixo:

$$LSC = X + E_2 \cdot MR$$

$$LIC = X - E_2 \cdot MR$$

Onde:

LSC: Limite superior de controle;

LIC: Limite inferior de controle;

X: Média;

E₂: Fator (tabelado);

MR: Média das amplitudes móveis.

5 – Acompanhamento do processo: com os limites controle calculados e os limites de especificação estabelecidos, a operação é acompanhada, registrando-se o comportamento dos novos pontos em relação aos limites.

Devem-se observar dois aspectos:

- O processo pode estar **estável**, ou seja, sempre dentro dos limites de controle, **ou não**, com muitos pontos saindo dos limites.
- O processo também pode **atender**, ou seja, estar sempre dentro dos limites de especificação; **ou não**, produzindo grande quantidade de material fora da qualidade.

Temos então as combinações entre esses fatores:

- Se o processo está estável e atende, devemos manter a operação.
- Se não está estável mas atende, não é o melhor dos mundos, mas não teria grandes problemas porque o cliente estará satisfeito.
- O processo está estável e não atende, quer dizer que o seu processo naturalmente não tem capacidade de atender as especificações. Será necessária mudança no processo.
- Se não está estável e não atende, primeiramente devemos estabilizar, usando a estratégia de acompanhamento e detecção de causas, depois se avalia a necessidade ou não de mudança do processo.

O resultado para a fábrica analisada está no gráfico abaixo:

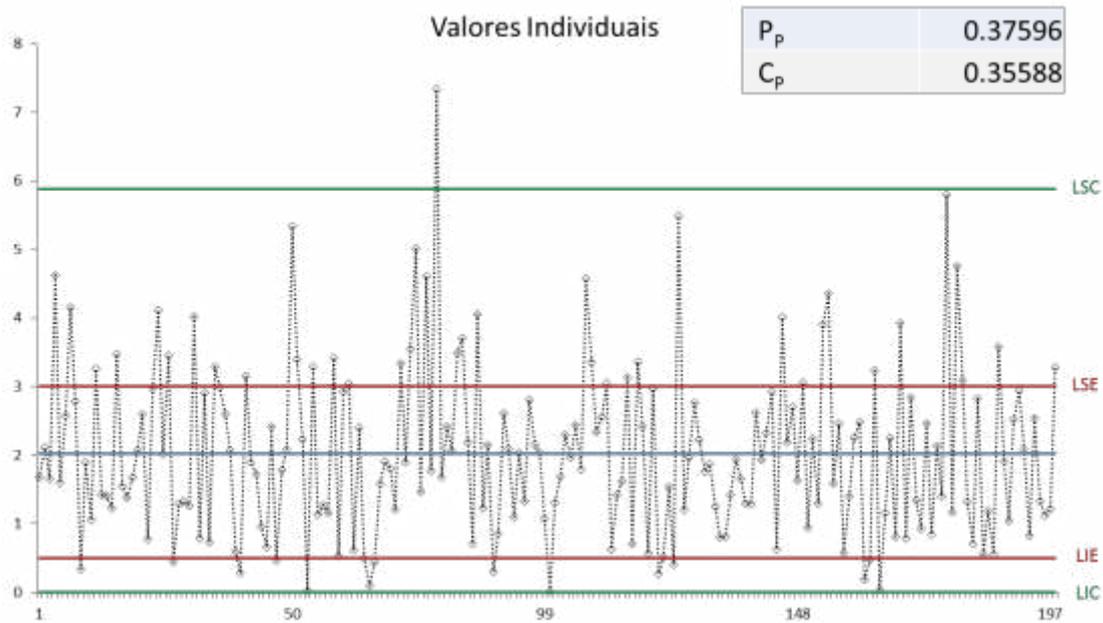


Gráfico 1: Distribuição dos valores de cal livre em relação aos limites de especificação e de controle.

Pelo acompanhamento pode-se verificar que a cal livre está estável, mas não está atendendo às especificações. Outra forma de se avaliar é aplicando-se os índices de capacidade e performance. Abaixo são mostradas as fórmulas:

<p>ÍNDICE DE CAPACIDADE - C_p</p> $C_p = \frac{\text{Variabilidade permitida do processo}}{\text{Variabilidade inerente}}$ $C_p = \frac{LSE - LIE}{6 \cdot \left(\frac{R}{1,128} \right)}$		<p>ÍNDICE DE PERFORMANCE - P_p</p> $P_p = \frac{\text{Variabilidade permitida do processo}}{\text{Variabilidade total}}$ $P_p = \frac{LSE - LIE}{6 \cdot \sigma}$
--	--	--

Os resultados para a fábrica são:

P_p	0.37596
C_p	0.35588

Estes valores comprovam as análises gráficas indicando que o processo tem problema relacionado à capacidade.

Para aumento da capacidade foi proposto um sistema de controle. Utilizamos a temperatura de combinabilidade calculada a partir dos dados do analisador para enviarmos ao software. O software analisava os dados e dava o resultado com a melhor combinação de composição da farinha para minimizar a temperatura de combinabilidade. Desta forma reduzimos a variabilidade e garantimos que o forno estaria estável em um ponto que exigia o mínimo de consumo térmico, como ilustrado a seguir.

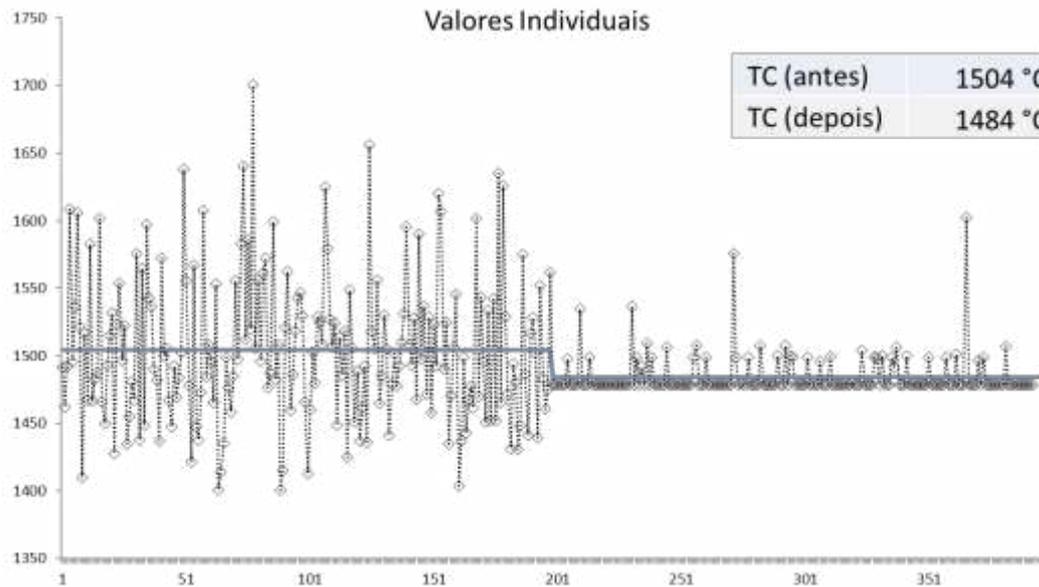


Gráfico 2: Distribuição das temperaturas de combinabilidade antes e depois da instalação do sistema de controle.

Além de obter uma temperatura de combinabilidade mais estável, houve uma redução de 20°C em sua média. Aos poucos os operadores visualizavam que a cal livre não estava saindo do controle e conseguiam operar com temperaturas mais baixas economizando combustível.

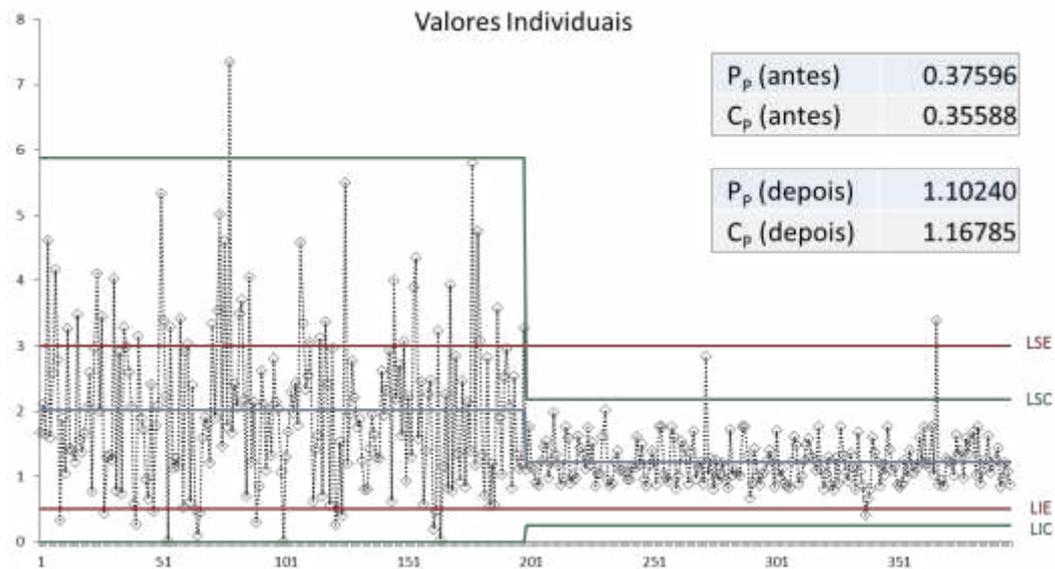


Gráfico 3: Distribuição dos valores de cal livre em relação aos limites de especificação e de controle antes e depois da instalação do sistema de controle.

Ao analisar novamente os limites de controle para o sistema após as modificações propostas, percebemos uma alteração significativa no comportamento da cal livre, com redução da variabilidade. Os índices de capacidade e performance passam a apresentar valores acima de 1, indicando que o processo está estável e atende.

A média de temperatura de combinabilidade 20°C mais baixa, representa uma economia de cerca de 14kcal/kg de clínquer, para uma produção de 3000 toneladas por dia de clínquer, gerando um ganho em combustível de aproximadamente R\$790.000,00 por ano.

Lições aprendidas

1. A variabilidade da composição da farinha é causa de alto consumo térmico, e geralmente é negligenciada.
2. A temperatura de combinabilidade é um ótimo índice para sintetizar os efeitos da variação da composição no consumo térmico.
3. O método de cálculo de capacidade e performance auxilia na busca pela melhor estratégia para resolver problemas de variabilidade.

Acesse nosso Knowledge Center

+55 (31) 3786 -1589



[linkedin.optimus.eng.br](https://www.linkedin.com/company/optimus-eng-br)



www.optimus.eng.br



[facebook.optimus.eng.br](https://www.facebook.com/optimus.eng.br)



R. Desembargador Tinoco, 265 - Loja 03 - Bairro Monsenhor Messias - Belo Horizonte / MG