

Métodos estatísticos para controle do processo produtivo de clínquer de cimento Portland

Statistical methods for controlling the production process of Portland cement clinker

Alisson Ferreira¹; Dioniregis Gonçalves Teixeira¹; Flávia Komatsuzaki²

Resumo: O cimento é fabricado a partir da moagem de uma mistura constituída de calcário, escória de alto forno, gesso, materiais de características pozolânicas e de clínquer. O clínquer representa em média 50% da mistura que constitui o cimento, sendo obtido através da exposição da mistura de calcário e argila às temperaturas superiores à 1450°C. O mesmo é responsável pelo endurecimento do cimento na presença de água. O processo de fabricação de clínquer ocorre em forno rotativo. Para verificar a qualidade do clínquer produzido são coletadas amostras pontuais e ensaios são realizados para definir as concentrações do óxido de cálcio livre e silicato tricálcico. De posse destes resultados os controladores do forno atuam no processo. Entretanto, durante o intervalo entre as análises, o operador realiza o controle através da observação de variáveis que estão relacionadas à qualidade do clínquer. Diante desta situação, a presente pesquisa, buscou verificar a inter-relação entre as variáveis do processo. Utilizando essas variáveis foram desenvolvidos modelos matemáticos para estimar valores de dois parâmetros de controle do processo de fabricação de clínquer para cimento portland: óxido de cálcio livre e silicato tricálcico. Os modelos desenvolvidos poderão ser utilizados como ferramenta de apoio no controle do processo produtivo do clínquer, pois durante todo o tempo de funcionamento do forno, os operadores teriam a estimativa de valores de referências de óxido de cálcio livre de silicato tricálcico e não apenas quando coletadas as amostras, tornando o controle mais eficaz e pró ativo.

Palavras-chave: Modelos Matemáticos; Controle de processo; Cimento; Estimativa.

Abstract: The cement is made from the grinding of a mixture consisting of limestone, blast furnace slag, gypsum, materials with pozzolanic characteristics and clinker. O clinker is on average 50% of the mixture that constitutes the cement, responsible for the hardening of cement with the presence of water, obtained by exposing the mixture of limestone and clay to temperatures higher than 1450 ° C. The manufacturing process takes place in clinker rotary kiln. Control of this process is based on monitoring variables related to the process. To check the quality of clinker produced is collected spot samples, tests are conducted to determine the concentrations of free calcium oxide and tricalcium silicate and possessing these results kiln controllers perform the process. However, during the interval between the analyses, the operator realizes the control through observation of variables that are related to the quality of clinker. Before this situation, the present study tries to verify the interrelation between the variables of the process. Using these variables mathematical models were developed to estimate values of two parameters to control the manufacturing process for Portland cement clinker: free calcium oxide and silicate. Os developed models may be used as a support tool in the control of the clinker production process, since during the whole time of operation of the kiln, operators would have an estimated reference values of calcium oxide free of tricalcium silicate and not only when the samples are collected, making the control more efficient and pro-active.

Keywords: Mathematical Model; Process Control; Cement; Estimate.

INTRODUÇÃO

O cimento Portland é uma das substâncias mais consumidas pelo homem e isso se deve as características que lhe são peculiares, como trabalhabilidade e moldabilidade (estado fresco), e alta durabilidade e resistência a cargas e ao fogo (estado duro).

O cimento esta presente em todo tipo de construção, desde a mais simples, utilizado no assentamento de tijolos, até a mais complexa obra de infraestrutura, na barragem das hidrelétricas, seja na fase inicial, até as fases de acabamento.

As empresas de modo geral buscam a estabilidade de seus processos e na indústria cimenteira não é diferente. No processo de fabricação de cimento, que de acordo com Petrucci (1995), consiste na moagem de

uma substância chamada clínquer que é obtida a partir do cozimento de uma mistura de calcário e argila devidamente dosada e homogeneizada. A fabricação de cimento, de acordo com Bauer (1994), é subdividida em extração de matéria-prima, britagem, moedura e mistura, queima, moedura de clínquer e expedição.

Cal, sílica, alumina e óxido de ferro são os componentes principais do cimento, afirma Bauer (1994), que depois de submetidos ao calor no forno, reagem e formam os seguintes compostos:

- Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$);
- Silicato bicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$);
- Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$);
- Ferro aluminato tetracálcio ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$)

¹Graduando em Engenharia de Produção da Faculdade de Engenharia de Passos (FESP|UEMG);

²Docente da Faculdade de Engenharia de Passos (FESP|UEMG). Email: flaviakz@gmail.com.

No processo de queima, especificamente, algumas variáveis são utilizadas como referência para o controle do processo:

- Momento de torção do forno;
- Situação na zona de queima;
- Qualidade final do clínquer;
- Temperatura na saída do forno;
- Temperatura na zona de cozimento.

Porém, devido às características do processo não permitirem que as informações coletadas sejam confiáveis e ainda a existência de atraso quanto à representação do cenário, as ações tomadas para regularização do processo são menos eficazes.

Problemas como este, onde existe variáveis que estão relacionadas entre si, a análise de regressão linear ou não linear permite investigar esta relação e desenvolver um modelo matemático conhecido como equação de regressão, Hines (2003). A equação de regressão permite ainda avaliar uma variável dependente em função das variáveis independentes, Spiegel (1985). Os problemas que envolvem mais de uma variável são chamados de modelos de regressão múltipla, Hines (2003).

CONTEXTO DO PROBLEMA

Apesar da existência de estudos que tratam a variabilidade da qualidade do clínquer, a qual é objeto de estudo deste trabalho, observa-se a necessidade de novos estudos, isto devido a especificidade no comportamento de cada planta, principalmente, devido a características únicas das minas de onde são extraídas as matérias básicas e dos princípios de concepção dos equipamentos para produção de cimento, sendo trabalhos nesta linha de pesquisa ainda necessários.

As variações que ocorrem durante a produção do cimento, interferem diretamente na qualidade do produto, no consumo das matérias-primas e na duração da campanha do forno, por isso o controle das variações durante a produção de clínquer é pauta constante na gestão e controle das indústrias de cimento. Muitas destas variações são provocadas pelo próprio operador que faz alterações baseadas na tentativa e erro. A utilização de métodos estatísticos para composição das proporções poderia tornar estas alterações mais assertivas.

Ensaio realizados em laboratório, para aferir a qualidade do produto, também servem de parâmetro de controle para o processo produtivo de clínquer, mas estes ensaios levam tempo para serem concluídos, em consequência disso, as decisões baseadas nestes resultados são ineficazes. Seria interessante uma variável que representa-se o processo de maneira rápida e confiável para que o operador tomasse suas decisões no processo o mais rápido possível.

CONCEITOS ESTATÍSTICOS

Como este trabalho baseia-se no estudo quantitativo e qualitativo de uma base variada de dados, é neces-

sário o conhecimento de alguns conceitos e ferramentas estatísticas. “A estatística trabalha com a coleta, apresentação, análise e uso de dados para resolução de problemas, tomada de decisões, desenvolvimento de estimativas e planejamento e desenvolvimento tanto de produtos quanto de procedimentos, e ainda usada para a descrição e a compreensão da variabilidade”, afirma Hines (2003, p.151).

“A variância (ou desvio padrão), por exemplo, é uma medida da dispersão dos valores da variável aleatória em redor da média. Se os valores tendem a concentrar-se próximos da média, a variância é pequena; mas se os valores tendem a afastar-se da média, a variância é grande”, afirma Spiegel (1978, p.110).

Segundo Spiegel (1985, p.54): “A média é um valor típico ou representativo de um conjunto de dados[...] vários tipos de médias podem ser definidos[...] a média, a mediana, a média geométrica e a média harmônica”.

Em muitos problemas, há duas ou mais variáveis que são intrinsecamente relacionadas, e é necessário explorar a natureza desta relação. A análise de regressão é uma técnica estatística para a modelagem e a investigação de relações entre duas ou mais variáveis, a relação entre essas variáveis é caracterizada por um modelo matemático chamado de equação de regressão (HINES, 2003, p. 366).

De acordo com Spiegel (1985, p.336) “Uma equação de regressão é uma expressão utilizada para avaliar uma variável dependente, por exemplo, Y, em função das independentes, X1, X2, X3,..., Xn e é denominada de regressão linear como demonstrada na equação (1) que se trata da equação genérica de regressão linear múltipla:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

β_0 = intercepto

ε = erro

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$ = são os coeficientes de regressão

Segundo Hines (2003, p.391): “muitos problemas de regressão envolvem mais de uma variável regressora. Tais modelos são chamados de modelos de regressão múltipla. A regressão múltipla é uma das técnicas estatísticas mais amplamente utilizadas”.

FATORES QUE INFLUEM NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CLÍNQUER

Como o objetivo deste trabalho é fornecer um modelo matemático que possa estimar a qualidade do clínquer, torna-se necessário conhecer os fatores e características que podem interferir na qualidade do material em questão. Os importantes fatores que afetam a queimabilidade inclui a composição química, mineralógica e granulométrica da matéria prima; o grau de homogeneização e o sistema de operação do forno (GHOSH, 1992, p.3 e KIHARA (1983, p.1).

Um melhor controle e conhecimento da composição

da farinha permitem variações na sua composição, com efeitos importantes na aptidão à clínquerização. Condições otimizadas podem ser obtidas pela modificação dos seguintes parâmetros da farinha segundo Gouda (*apud* KIHARA, 1983, p.2):

- Mudança na composição química;
- Melhoria no grau de homogeneização;
- Aumento na finura ou superfície específica;
- Melhor controle da carga (alimentação do forno);
- Modificação na geometria do forno.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Todas as variáveis indicadas na tela de sinóptico (tela de controle) têm a sua importância e algumas destas foram selecionadas com base nos conhecimentos dos operadores de forno. Estão incluídas também, neste total, os ensaios químicos que servem também como base de controle, avaliação e tomada de decisão para a realização de alterações no processo.

De posse das variáveis foi elaborado um questionário onde o participante deveria indicar qual era a relação/impacto com as variáveis com o CaO livre e C3S seguindo os seguintes critérios:

- Nota 1 - caso não tivesse relação;
- Nota 2 - no caso da relação ser fraca;
- Nota 3 - caso a relação ser mediana;
- Nota 4 - se relação forte;
- Nota 5 - se relação muito forte.

Ficou definido que as variáveis selecionadas seriam aquelas que obtivessem acima de 60% de notas 4 e 5. De posse dos resultados do questionário, foram listadas quais serão utilizadas na elaboração dos métodos. As variáveis obtidas são apresentadas na Tabela 1, que também contem os limites de trabalho conforme procedimento específico da empresa.

Anualmente é realizado, o que nas fábricas de cimento é conhecida como grande parada (~ 20 dias), para manutenção geral na área do forno. Então foi escolhido o período entre duas grandes paradas, para coleta e análise de dados. O período para coleta compreende os dados armazenados entre o dia 18/08/2010 a 03/11/2011. A empresa em questão possui um sistema informatizado, conhecido com *Plant Information Management System* (PIMS), que armazena vários dados relativos à produção e controle de processo e qualidade. Para garantir que os dados coletados representem o forno em marcha estável, foi composta uma amostra que contenha dados relativos onde a alimentação de farinha seja maior de 200 toneladas/hora, aproximadamente, 70% da capacidade nominal da planta, totalizando 4101 valores. De posse da amostra de dados, e utilizando a versão 16.0 do *software* Minitab®, aplicou-se os métodos estatísticos para estimar os valores de CaO livre e C₃S. Os modelos de regressão linear foram ajustados utilizando três métodos distintos de seleção de modelos: o método de seleção automático stepwise, o bestsubset, e o método de seleção manual. Baseado nos valores de

Tabela 1: Limite das variáveis

Item	Definição	Limite inferior	Limite superior
CaO livre	CaO livre	-	≤ 2,5
FSC	Fator de saturação em Cal(%)	99	105
MS	Módulo de sílica	2,15	2,7
MA	Módulo de alumina	1,4	2,1
C3S	Silicato Tricálcico	-	≥ 58
#100	Resíduo na peneira 100 mash	1	4
#170	Resíduo na peneira 170 mash	10	14
C4T2	Temperatura do topo do ciclone 4 da torre 2	750	880
C4T1	Temperatura do topo do ciclone 4 da torre 1	820	890
TFP	Temperatura do fundo do précalcinador	820	900
TTP	Temperatura do topo do pré-calcinador	820	950
TAR	Temperatura abaixo das válvulas restritoras	800	1000
NOX	Concentração de nox (PPM)	600	1200
Cor. Forno	Corrente do motor do forno (%A da nominal)	-	90
Prod.Forno	Quantidade de matéria prima alimentada no forno	-	-
Tangencial	Pressão do ar tangencial - relativo a chama (mmCa)	200	900
Externo	Pressão do ar externo - relativo a chama (mmCa)	3000	5000
Interno	Pressão do ar interno - relativo a chama (mmCa)	300	900

Fonte: adaptado de procedimento operacional específico cedido pela empresa

R² ajustados e no desvio padrão do erro, definido que a melhor opção são os modelos gerados pelo método Bestsubsets (Tabela 2).

O Gráfico 1A mostra a frequência e o erro do estimado em relação a CaO livre real e o estimado através do método selecionado. Para um valor que tem como meta resultados inferior a 2,5 % (conforme Tabela 1), os erros observados são muito expressivos, a maioria variando entre -1 e 1, o que confirma o baixo R² do modelo para CaO livre. Em resumo o método estatístico não é eficiente para explicar a variação da CaO livre.,

embora a análise do Gráfico 1B mostre uma relação entre os valores de CaO livre real e CaO livre estimada.

Fazendo uma análise similar à anterior, verificamos no Gráfico 1C o comportamento do erros de estimativa, mas como o objetivo é estimar valores para os quais o limite inferior aceito e de 58%, pode-se considerar estes resultados aceitáveis. Entretanto como no modelo para CaO livre, o modelo matemático para o C₃S apresentou resultado de R² que indica a baixa capacidade de explicar as variações na variável dependente. Analogamente, o Gráfico 1D apresenta comportamento similar,

Tabela 2: Resultados obtidos para os modelos de regressão lineares multivariados

Modelos	<i>Stepwise</i>		<i>Bestsubset</i>		Seleção manual	
	C ₃ S	CaO	C ₃ S	CaO	C ₃ S	CaO
MS	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
MA	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ret100_farmercu	0,086	-	0,121	-	0,086	-
Ret170_farmercu	-	0,076	-	0,076	-	0,076
C4T2	0,000	-	0,000	-	0,000	-
C4T1	0,000	0,039	0,000	0,390	0,000	0,039
TFP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTP	-	0,000	-	0,000	-	0,000
TAR	-	-	-	-	-	-
NOX	0,000	0,000	0,000	-	0,000	0,000
Cor. Forno	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Prod.Forno	-	0,000	-	-	-	0,000
FSC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Tangen	0,061	-	0,000	-	0,061	-
externo	0,000	0,000	-	-	0,000	0,000
interno	-	-	-	-	-	-
IC95%Beta	(60,2027; 60,3321)	(1,97164; 2,00836)	(60,2048; 60,3299)	(1,97164; 2,00835)	(60,2027; 60,3320)	(1,97164; 2,00835)
R2 ajustado	25,52	32,4	23,9	32,38	25,5	32,4

indicando uma relação entre os valores de C_3S real e estimado.

Segundo Hines (2006), “um valor grande R^2 não implica necessariamente que o modelo de regressão seja um bom modelo”. Mediante esta afirmação, foi realizada outras análises com os dados amostrados e gerados com o objetivo de entender mais sobre o comportamento do valores. O resultados apresentados na Tabela 3 demonstram, que apesar dos modelos matemáticos não serem capazes de estimar com precisão o CaO livre e o C_3S , a uma coerência entre a amostra e os valores gerados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio de estudo de caso e de pesquisa bibliográfica, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos de regressão para estimar dois parâmetros muito importan-

tes para controle do processo de produção de clínquer para fabricação de cimento Portland, entretanto os mesmos não apresentaram serem indicados para realizar estimativas confiáveis.

Os ensaios laboratoriais não poderiam ser substituídos pelos modelos de regressão, mesmo que estes fossem altamente precisos e exatos, mas isto não impede que possam ser utilizados como ferramenta de apoio no processo de controle de operação do forno e em consequência do controle das concentrações de CaO livre e C_3S no clínquer produzido.

A aplicação dos modelos de maneira experimental, como ferramenta auxiliar no controle da operação do forno, permitiria a avaliação da influencia de seus resultados sobre a decisão dos operadores do forno, e assim verificar a qualidade do produto antes e depois da utilização dos modelos.

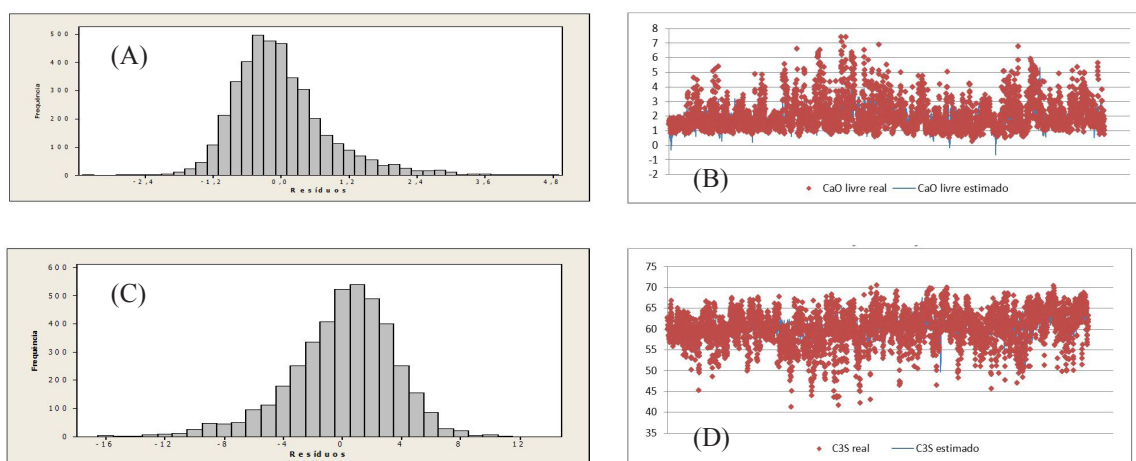


Gráfico 1: Comportamento dos resíduos (A) CaO livre; (B) CaO livre x CaO livre estimada; (C) C_3S livre e (D) C_3S livre x C_3S estimado.

Tabela 3: Análise estatísticas.

	Real		Estimado	
	CaO	C_3S	CaO	C_3S
Média	1,99	60,27	1,99	60,27
Desvio Padrão	1,05	4,16	0,60	2,04
Máximo	7,42	70,45	5,32	67,55
Mínimo	0,28	41,29	-0,62	49,74

REFERÊNCIAS

- BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de Construção**, Rio de Janeiro, 1995, 5 edição.
- GHOSH, S.N. Progress in Cement e Concrete, **Cement and Concrete Science e Technology** Vol.1, Part. 1, New Delhi, India, 1992, 2 edição.
- HINES, William W. **Probabilidade e estatística na engenharia**, tradução de Vera Regina Lima de Farias e Flores, Rio de Janeiro, 2006, 4 edição.
- KIHARA, Yushiro. **Estudo Técnico-Aptidão à Clinquerização de Farinhas de cimento**, São Paulo, 1983, 2 edição
- PETRUCCI, Eladio G.R. **Concreto de cimento Portland**, São Paulo, 1995, 13 edição.
- SPIEGEL, Murray Ralph. **Probabilidade e estatística**, tradução Alfredo Alves de Farias, São Paulo, 2004.
- SPIEGEL, Murray Ralph. **Estatística**, tradução de Carlos Augusto Crusius, São Paulo, 1985, 2 edição.