

## Artigo Técnico

### Estudo de caso: Efeitos da composição do material combustível volátil do coque verde de petróleo no perfil de temperatura de forno rotativo de calcinação

*Case of study: Effects of green  
petroleum coke's volatile combustible  
matter composition in the temperature  
profile of a calcination Rotary kiln*

Francisco Matthews da Silva e Silva<sup>\*ab</sup>,  
Wagner Aldeia<sup>cd</sup>

<sup>a</sup> Mestrado Profissional em  
Processos Industriais Instituto  
de Pesquisas Tecnológicas  
do Estado de São Paulo  
S.A., São Paulo-SP, Brasil.

<sup>b</sup> Engenheiro Químico

<sup>c</sup> Docente do Mestrado  
Profissional em  
Processos Industriais

<sup>d</sup> Laboratório de Processos  
Químicos e Tecnologia  
de Partículas, Instituto de  
Pesquisas Tecnológicas do  
Estado de São Paulo S.A.,  
São Paulo-SP, Brasil.

\*e-mail: fm.dsilva2@gmail.com

Palavras-chave: calcinação de  
coque; modelagem; aprendizado  
de máquina; planejamento de  
experimento; forno rotativo.

*Keywords: coke calcination;  
modeling; machine learning; design  
of experiments; rotary kiln*

## Resumo

Um modelo por algoritmo de aprendizado de máquina do processo de calcinação de coque verde de petróleo em fornos rotativos foi desenvolvido, para simular a temperatura de saída dos gases do processo e estudar os efeitos da composição do material combustível volátil (VCM). O modelo foi criado a partir do algoritmo de árvore de decisão CART e interpretado através do planejamento fatorial (DOE) das onze (11) variáveis e em dois (02) níveis. O modelo desenvolvido apresentou excelente aderência, com  $R^2$  de 85,37% e, através do planejamento fatorial, foi possível determinar que as frações do VCM volatilizados entre 270 °C e 590 °C possuem o significativo efeito na temperatura de saída dos gases, de +9,48%, quando atribuídos junto à vazão de injeção de ar terciário.

## Abstract

*A green petroleum coke calcination process model in Rotary kilns was developed to simulate the exit gas temperature and study the effects of volatile combustible matter (VCM) composition. The model was developed by the decision tree algorithm CART and interpreted through factorial design (DOE) of eleven (11) variables and two (02) levels. The developed model presented excellent adherence, with  $R^2$  of 85.37% and through the factorial experiment was possible to determine that the VCM fractions volatilized between 270 °C and 590 °C has significant effect in the exit gas temperature, of +9.48%, when assigned with tertiary air injection flow.*

## 1 Introdução

O alumínio é amplamente utilizado na indústria de eletrônicos, aeroespacial, automotiva, alimentícia e construção civil, totalizando uma produção mundial de 67,2 milhões de toneladas métricas em 2021 (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2021). O processo produtivo do alumínio primário consiste na redução do óxido de alumínio (alumina) através da aplicação de corrente elétrica, com um consumo de 14 a 38 MWh por tonelada de alumínio produzido, face o consumo teórico de 6,23 MWh por tonelada (MILOVANOFF; POSEN; MACLEAN, 2020; YU, B. *et al.*, 2021; FORTIN; KANDEV; FAFARD, 2012; OBAIDAT M. *et al.*, 2018). Para tanto, são confeccionados anodos de carbono, compostos de piche, entre 13% e 15% em massa, e coque calcinado de petróleo, que são responsáveis pela transferência da energia elétrica (ou elétrons)

para a cuba de produção de alumínio. Este último, o coque calcinado de petróleo, é um sólido de alto teor de carbono, entre 97% e 99%, obtido a partir da calcinação de coque verde de petróleo.

No processo de calcinação, o coque verde de petróleo é aquecido em temperatura entre 1100 °C e 1350 °C, e mantido nessas condições entre 1 e 36 horas, dependendo da tecnologia empregada. No ocidente, a tecnologia mais difundida é a de fornos rotativos (*Rotary kilns*), nos quais o coque é calcinado através da queima do material combustível volátil (Volatile combustible matter, VCM) residual do coque verde, pela injeção de ar ou queima direta de combustível, que pode ser gás natural ou óleo de xisto (EDWARDS, L., 2015).

O controle do processo de calcinação de coque em fornos rotativos é influenciado por diversas variáveis, entre elas a umidade, a granulometria e o material combustível do coque verde. Entretanto, o controle de anomalias no forno é um processo altamente sensível, dependendo da visualização interna, assim como o acompanhamento do perfil de temperatura. A perda do controle de temperatura do forno pode ocasionar a degradação precoce do material refratário do forno, perda na consistência da qualidade do coque calcinado e, em casos mais graves, paradas inesperadas devido ao deslocamento longitudinal excessivo do forno, uma vez que a variação da posição da zona de maior temperatura do forno irá movimentar o forno na mesma direção, podendo assim “travar” o forno em função do contato dos anéis de apoio em superfícies estáticas.

Em função da complexidade do processo de calcinação, experimentos em escala industrial são altamente restritos, podendo afetar a campanha do forno e os compromissos de produção, impossibilitando assim maiores conhecimentos das variáveis de influência no perfil de temperatura do forno, para posterior formulação de novas estratégias de controle do processo, assim como melhores modelos de previsão. Desta forma, com o início da difusão de ferramentas de aprendizado de máquina (*Machine Learning*, ML), abordagens complementares com métodos estatísticos clássicos, como o Experimento fatorial (em inglês *Design of Experiments*, DOE), podem abrir novas possibilidades de estudos sobre as influências não definidas em processos industriais (FREIESLEBEN, J.; KEIM, J.; GRUTSCH, M., 2020).

O presente estudo tem como objetivo determinar os principais efeitos entre as diferentes frações do material combustível do coque verde de petróleo no perfil de temperatura de fornos rotativos, através da modelagem da temperatura de saída dos gases do forno (variável resposta,  $y$ ), com as variáveis de manipulação do forno ( $x$ ) e seis faixas de volatilização do material combustível ( $m$ ). A modelagem do processo de calcinação utilizada

é baseada no algoritmo de regressão *CART* (*Classification and Regression Trees*, Árvores de Classificação e Regressão, em tradução livre), criado a partir do banco de dados de processo e de qualidade da matéria-prima, e a interpretação dos efeitos individuais e combinados das variáveis acima citadas através de Experimento Fatorial Fracionado, 1/16, de dois fatores e onze variáveis (211).

## 2 Procedimento metodológico

### 2.1 Banco de dados

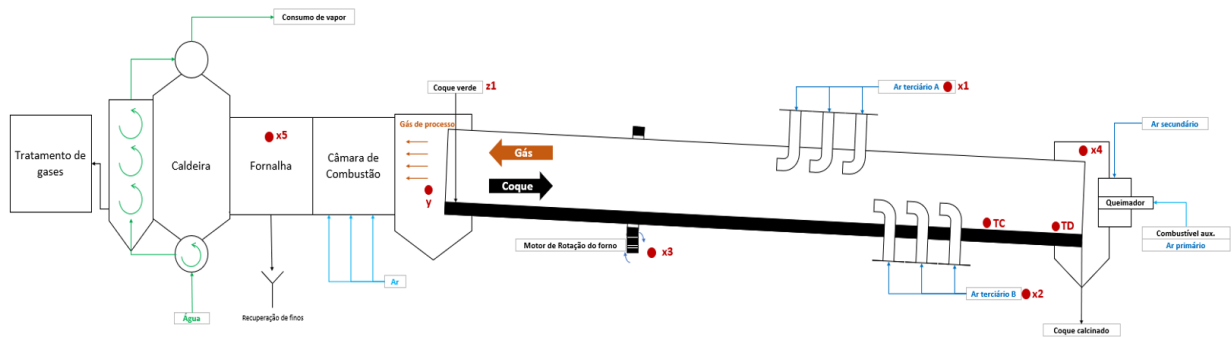
A média horária dos dados históricos utilizados para a modelagem do processo de calcinação foi obtida a partir de 1829 h de operação (já removidos períodos de parada, partida e mau funcionamento de instrumentos) de uma unidade de calcinação de coque verde, através do software *Osisoft PI Datalink*, de uma unidade com capacidade de processamento de 30 t/h de coque verde, comprimento superior a 50 m e diâmetro superior a 2 m, em que a espessura do material refratário varia ao longo do comprimento do forno, composto de concreto aluminoso de baixo cimento, variando entre 200 e 350 mm de espessura, fixado através de âncoras em “v”, soldadas no costado metálico. Na **TABELA 1** é possível observar as variáveis do forno utilizadas para a modelagem do processo e, na **FIGURA 1**, é possível observar o fluxograma do forno rotativo de calcinação de coque verde, com destaque às variáveis observadas na **TABELA 1**.

**Tabela 1 - Variáveis do forno utilizadas para a modelagem do processo**

Variável	Abreviação	Unidade	Tipo
Temperatura de saída dos gases	TSG	°C	Variável de processo
Rotação do ar terciário A	x1	RPM	Variável manipulada
Rotação do ar terciário B	x2	RPM	Variável manipulada
Rotação do forno	x3	RPM	Variável manipulada
Pressão da fornalha	x4	mmCA g	Variável manipulada
Pressão interna do forno	x5	mmCA g	Variável manipulada

Fonte: elaborado pelos autores

Figura 1 - Fluxograma simplificado de um forno de calcinação de coque verde de petróleo



Fonte: elaborado pelos autores

O histórico das diferentes frações de material combustível volátil do coque verde foi obtido no banco de dados do analisador termogravimétrico macro *Leco TGA 701*, de 534 lotes de coque verde processados no intervalo das 1829 h de operação, em que as misturas de diferentes fontes (refinarias) de coque verde realizadas são denominadas *blends*. O método de medição do material combustível volátil foi o *ASTM D7582 Standard Method for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*. A perda em massa do material combustível do coque, volatilizado a partir de 110 °C foi utilizado no presente estudo e subdividido em intervalos de 160 °C, definido em função da temperatura isenta de água (110 °C) e a primeira fração de valor comercial (270 °C, faixa do óleo diesel). Desta forma foram definidos quatro intervalos de perda em massa entre 110 e 270 °C (m1), 270 e 430 °C (m2), 430 e 590°C (m3), 590 e 750 °C (m4), 750 e 910 °C (m5) e 910 e 950 °C (m6). Por fim, todo o tratamento de dados, incluindo o fracionamento do material combustível volátil liberado durante o aquecimento, foi realizado através de *scripts Python*, módulos *pandas* e *numpy*.

## 2.2 Modelagem e interpretação do modelo

Com os dados históricos filtrados e organizados, se utilizou o *software Minitab 21* para modelar o processo, através do módulo de árvores de classificação e regressão (*Classification and Regression Trees, CART*) e projetado um experimento fatorial, do tipo  $2^{11}$ , com as 11 variáveis em estudo (sendo 5 variáveis do forno e 6 do material combustível

do coque verde), em que os limites inferiores e superiores foram definidos a partir do primeiro e terceiro quartil do conjunto de dados, respectivamente. Na **TABELA 2** é possível observar os *ranges* utilizados, por variável.

**Tabela 2 - Intervalos utilizados no experimento fatorial**

Variável	Q1	Q3
x1 (vazão de ar terc. A, em RPM)	1236.46	1480.56
x2 (vazão de ar terc. B, em RPM)	1247.88	1520.95
x3 (rotação do forno, em RPM)	2.10	2.31
x4 (pressão da fornalha, em mmCA)	-6.04	-4.08
x5 (pressão do cabeçote do forno, em mmCA)	-2.96	-1.75
m1 (VCM. 110 a 270°C, em % massa)	0.06	0.15
m2 (VCM. 270 a 430°C, em % massa)	0.66	0.81
m3 (VCM. 430 a 590°C, em % massa)	2.78	2.92
m4 (VCM. 590 a 750°C, em % massa)	3.33	3.59
m5 (VCM. 750 a 910°C, em % massa)	2.02	2.29
m6 (VCM. 910 a 950°C, em % massa)	0.60	0.66

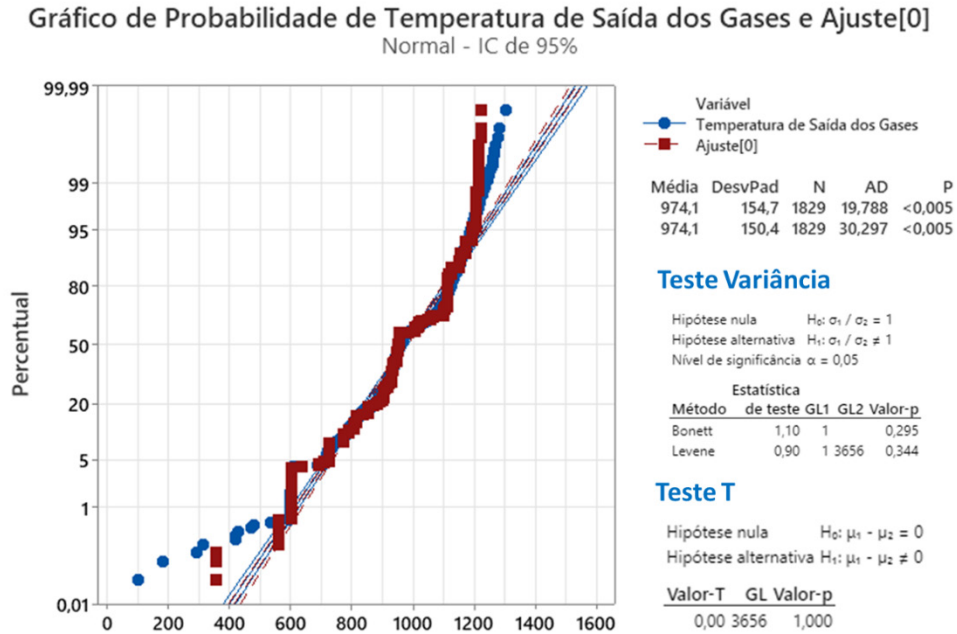
Fonte: elaborado pelos autores

## 3 Resultados e discussão

### 3.1 Modelo CART e Experimento Fatorial

Foi possível observar uma excelente aderência do modelo pelo método CART, com  $R^2$  de 94,43% para o conjunto de dados de treinamento (1280 pontos/horas, que representam 70% do total de dados, selecionados de forma aleatória) e 85,37% para o conjunto de dados de teste (549 pontos/horas, que representam 30% do total de dados), além da média e desvio padrão estatisticamente igual aos dados medidos, conforme observado na **FIGURA 2**, e na **TABELA 3** é possível observar o resumo dos resultados do modelo.

Figura 2 - Teste T e de variância para duas amostras - Temperatura de saída dos gases medido e simulado (Ajuste [0])



Fonte: elaborado pelos autores

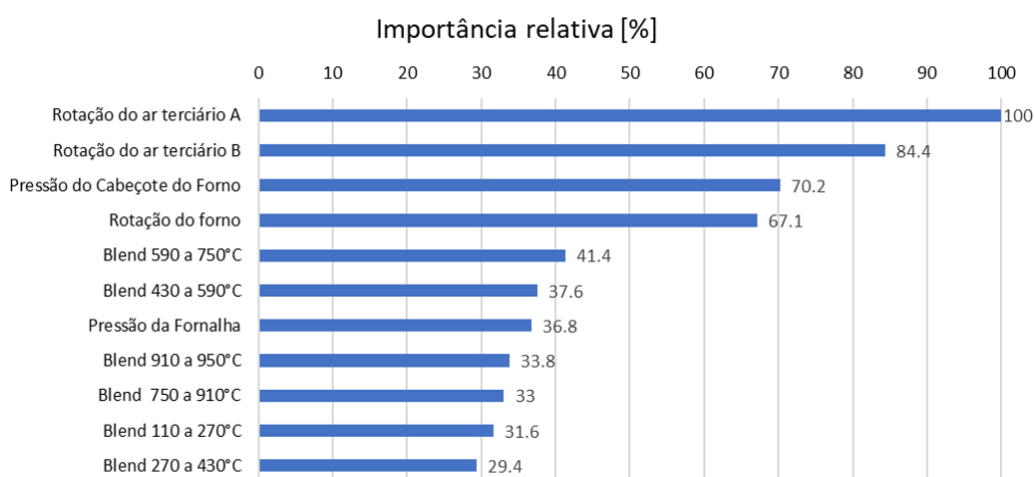
Tabela 3 - Resumo dos resultados do modelo CART

Estadística	Treinamento (1280 pontos)	Teste (549 pontos)
R <sup>2</sup>	94.43%	85.37%
Raiz do quadrado médio do Erro (RMSE)	36.52	59.17
Quadrado médio do erro (MSE)	1333.61	3501.36
Desvio absoluto médio (MAD)	20.68	29.95
Erro percentual absoluto médio (MAPE)	2.48%	3.67%

Fonte: elaborado pelos autores

Em termos de importância relativa, o modelo é capaz de demonstrar as principais variáveis que impactam a temperatura de saída dos gases, conforme observado na operação do forno e na literatura (FARAGO, F. J., SOOD, R.R., STOKES, D.M., 1976; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992a; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992b BUI, R.T, PERRON, J., READ, M., 1993; ZHANG, Z., WANG, T., 2010a; ZHANG, Z., WANG, T., 2010b), sendo possível dividir em dois grupos, de alta importância relativa, que são as variáveis relacionadas à operação do forno (vazão de ar terciário A, B, pressão do cabeçote do forno e rotação do forno) e as variáveis de baixa importância relativa, que são as diferentes frações do material combustível volátil e variáveis de operação da caldeira de recuperação, conforme se pode observar na **FIGURA 3**.

**Figura 3 - Gráfico de barras da importância relativa das variáveis preditoras da temperatura de saída dos gases**



Fonte: elaborado pelos autores

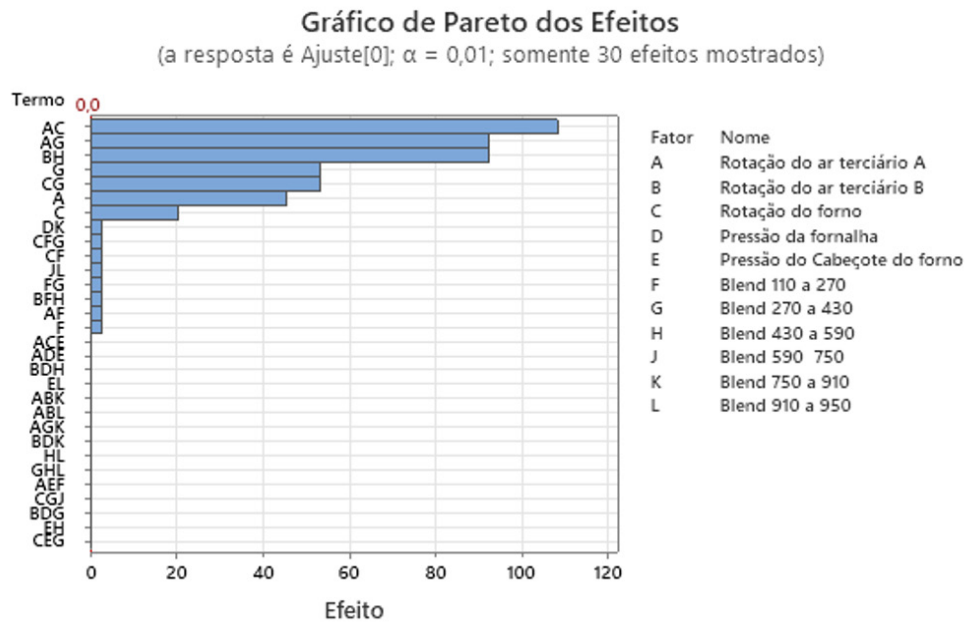
Todavia não foi possível, através da interpretação dos resultados do modelo, determinar as interações entre variáveis, fazendo-se necessário complementar a interpretação através do Experimento Fatorial.

## 3.2 Experimento Fatorial e principais efeitos

Diferentemente dos resultados preliminares da modelagem por CART, com o planejamento de experimento foi possível interpretar e determinar as principais interações entre

variáveis e os seus respectivos efeitos na temperatura de saída dos gases. Na **FIGURA 4**, são demonstrados os principais efeitos na temperatura de saída dos gases do forno rotativo de calcinação. Os principais efeitos são discutidos individualmente nas próximas seções.

**Figura 4 - Gráfico de Pareto dos efeitos na temperatura de saída dos gases**



PEP de Lenth = 1,316960E-14

Fonte: elaborado pelos autores

### 3.2.1 Efeito da vazão do ar terciário A (x1) e rotação do forno (x3) – “AC”

O principal fator de influência na temperatura de saída dos gases do forno de calcinação é a combinação da vazão (observado a partir da rotação do motor elétrico do ventilador de injeção de ar) do ar terciário mais próximo da alimentação do forno (A, x1), com a rotação do forno (x3), quando elevados do menor nível para o maior, com efeito de +108,27 °C (+11,11 %), conforme observado na operação do forno e em estudos anteriores (FARAGO, F. J., SOOD, R.R., STOKES, D.M., 1976; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992a; PERRON, J., BUI, R.T, NGUYEN, H.T., 1992b BUI, R.T, PERRON, J., READ, M., 1993; ZHANG, Z., WANG, T., 2010a; ZHANG, Z., WANG, T., 2010b). Além disso, quando se busca a elevação da vazão de alimentação de coque

verde do forno, a vazão de ar terciário e rotação do forno são elevados de forma paralela e gradativa, se buscando o controle da zona de calcinação na região dos tubos de ar terciário e, em função disto, possui o maior efeito observado na temperatura de saída dos gases.

### **3.2.2 Efeito da vazão do ar terciário A (x1) e a fração do VCM entre 270 e 430 °C (m2) – “AG”**

O segundo fator de maior influência na temperatura de saída dos gases do forno de calcinação é a interação entre a vazão do ar terciário A (x1) com o material combustível volátil do coque verde volatizado entre 270 e 430 °C (m2), com efeito de +92,36 °C (+9,48 %), quando elevados do menor para o maior nível. Pode-se observar assim, que o ar de combustão injetado no forno na região mais próxima da alimentação tende a reagir com o volátil mais leve do coque verde, ao se considerar a fração de 110 a 270 °C com baixo impacto na operação do forno, uma vez que possuem menor concentração entre as frações estudadas. Analogamente, uma vez que a injeção do ar terciário A é responsável pela mistura dos voláteis com o oxigênio de reação e, ainda nessa região, a combustão é iniciada, a interação entre as duas variáveis confirmam o observado em escala industrial, assim como nas simulações de Zhang e Whang (2010a; 2010b). Além do mais, coque verde com maior teor de voláteis, na faixa de 270 a 430 °C, necessitam de mais ar terciário na primeira região de injeção, uma vez que o presente experimento retrata a operação do forno de calcinação e logo, no período de estudo, foi necessário aumentar a vazão de ar terciário A, para a manutenção/controle do posicionamento da zona de calcinação.

### **3.2.3 Efeito da vazão do ar terciário B (x2) e a fração do VCM entre 430 e 590 °C (m3) – “BH”**

Semelhante ao discutido na seção anterior, há significativa influência na temperatura de saída dos gases entre a vazão do ar terciário B (x2) com o material combustível do coque verde desprendido do sólido entre 430 e 590 °C (m3), com efeito de +92,36 °C (+9,48 %) na temperatura de saída dos gases, quando se aumenta as variáveis do menor para o maior nível. Logo, coque verde com maior teor de voláteis entre 430 e 590 °C, necessita de mais ar terciário na região para a manutenção/controle da temperatura de saída dos gases. Além disso, a região dos tubos de ar terciário B é considerada a região

em que se posiciona de forma ideal a zona de calcinação e, ao se comparar a mediana e a amplitude do material combustível de 430 a 590 °C das diferentes fontes de coque verde, as que possuem menor mediana e maior estabilidade na presente fração, tornam-se as fontes mais estáveis para operação do forno.

### **3.2.4 Efeito da rotação do forno (x3) e a fração do VCM entre 270 e 430 °C (m2) e efeito isolado da rotação do forno (x3) – “CG” e “C”**

Similar ao discutido nas seções anteriores, há significativo efeito na temperatura de saída dos gases entre a rotação do forno (x3) e a fração do material combustível entre 270 e 430 °C (m2), quando se eleva as presentes variáveis do menor para o maior nível, com efeito de +53,09 °C (+5,45 %) na temperatura de saída dos gases. Tal efeito pode ser explicado nas manobras de partida e/ou elevação de carga da unidade, em que a vazão de alimentação de coque verde do forno é elevada gradativamente, junto à rotação do forno e, assim que atingidas as temperaturas internas desejadas, a mistura de coque verde é alterada, pois é normalmente utilizado apenas uma fonte de coque para a partida das unidades de calcinação.

Analogamente, há significativo efeito isolado da rotação do forno (x3) na temperatura de saída dos gases, com efeito de +20,24 °C (+2,08 %), sendo este explicado conforme Bui, Perron e Read (1993), em que a zona de calcinação irá se “espalhar” pelo comprimento do forno, elevando assim a temperatura de saída dos gases.

### **3.2.5 Efeito isolado do VCM entre 270 e 430 °C (m3) – “G”**

Há significativo efeito isolado da fração entre 270 e 430 °C do VCM na temperatura de saída dos gases, quando elevado do menor nível para o maior nível, com efeito de +53,09 °C (+5,45 %). A elevação da temperatura de saída dos gases se deve ao ajuste do perfil de temperatura do forno em função do aumento do material combustível volátil do coque na região em que se inicia a combustão no interior do forno, e pela variação normal dentro de uma mesma batelada ou pela adição de uma fonte de maior concentração de voláteis.

### 3.2.6 Efeito isolado da vazão do ar terciário A (x1) – “A”

A vazão do ar terciário A (x1) possui significativa influência na temperatura de saída dos gases, com efeito de  $-45,38\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-4,66\%$ ), quando o mesmo é elevado do menor para o maior nível. A elevação da vazão de ar terciário A ocasionando na redução da temperatura de saída dos gases demonstra o deslocamento da zona de calcinação para a descarga do forno, efeito que pode ser explicado em função de dois fenômenos. O primeiro deles é de excesso de ar de combustão na zona de mistura e início da combustão do material combustível e, o segundo fenômeno, de pressurização do forno que, quando combinados, ocasionam o deslocamento da zona de calcinação para a descarga. Logo, a elevação da vazão de ar terciário deve ser cuidadosamente realizada, pois a presente manobra pode gerar o efeito contrário ao que normalmente se busca nesse tipo de operação, de deslocamento da zona de calcinação em direção à alimentação do forno ou aumento da temperatura de calcinação.

## 4 Conclusões

É possível concluir que as principais variáveis de influência no perfil de temperatura de fornos rotativos de calcinação do coque verde são as frações volatilizadas entre  $270\text{ e }430\text{ }^{\circ}\text{C}$  (m2) e entre  $430\text{ e }590\text{ }^{\circ}\text{C}$  (m3), entretanto com a interdependência com a vazão de ar terciário A e B, respectivamente. O efeito calculado na temperatura de saída dos gases, para ambas as variáveis, foi de  $+92,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ao se elevar as variáveis do menor nível para o maior nível.

O método complementar de regressão CART e DOE proporcionou resultados qualitativos satisfatórios, pois foi possível confirmar efeitos já conhecidos no processo de calcinação em fornos rotativos e na literatura, como a relação entre a rotação do forno e a vazão de ar terciário. De forma inédita, foi possível observar a correlação entre os hidrocarbonetos volatilizados entre  $270\text{ e }430\text{ }^{\circ}\text{C}$  e entre  $430\text{ e }590\text{ }^{\circ}\text{C}$ , junto à rotação do ar terciário A e B, com a temperatura de saída dos gases do forno. O modelo do processo de calcinação por regressão CART resultou em uma correlação com  $R^2$  de  $85,37\%$  e desvio absoluto médio de  $29,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para o modelo com 11 variáveis, e uma correlação com  $R^2$  de  $84,53\%$  e desvio absoluto médio de  $32,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , para o modelo com 5 variáveis, filtradas a partir do DOE, além de médias estatisticamente exatas aos resultados medidos em campo, nos dois modelos, comprovando-se assim um excelente método para previsão do comportamento do processo. Entretanto, se observou uma modelagem excessivamente generalista para a aplicação, pois, ao se complementar

ao método de DOE, os resultados de diferentes experimentos derivaram em valores iguais de resposta na temperatura de saída dos gases, fazendo assim com que os efeitos calculados fossem exatamente iguais.

Logo, para a melhoria e continuidade da pesquisa, se sugere:

- A modelagem do processo de calcinação com diferentes algoritmos de aprendizado de máquina, como neural networks, random forest etc;
- A análise crítica minuciosa dos dados, de forma a se remover por completo os dados em períodos de falhas dos instrumentos e períodos transientes pós parada do processo;
- A utilização de um analisador termogravimétrico micrométrico, para maior precisão na determinação da perda em massa dos voláteis do coque, além da perda de massa e composição dos voláteis através de espectrometria de massa;
- A alteração das faixas de temperatura do material combustível volátil do coque verde da análise termogravimétrica, de tal forma a se identificar a temperatura de início da volatilização dos hidrocarbonetos, assim como outras faixas de voláteis de interesse comercial;
- Adicionar a variável granulometria do coque verde na análise, uma vez que há efeito na velocidade liberação de material combustível volátil;
- Explorar o método em diferentes processos industriais, não apenas calcinação de coque verde em fornos rotativos.

## 5 Referências

- BRIEMAN, L. *et al.* Classification and Regression Trees. 1ªed. **CRC Press**, 2017
- BUI, R. T.; PERRON, J.; READ, M. **Model-based optimization of the operation of the coke calcination kiln**. Carbon, v. 31, n. 7, p. 1139-1147, 1993.
- DONTSOVA, T.V. *et al.*; Simulation of the Control System of the Coke Calcination in Tubular Rotary Kilns. **Russian Metallurgy (Metally)**, v. 2020, n. 13, p. 1600-1606, 2020.
- DUDEK, M., TIEKE, O. **Method of producing petroleum coke calcinate**. Depositante: Wintershall Aktiengesellschaft. US n. 4176010. Depósito: 18 julho 1977, Concessão: 27 novembro 1979.
- EDWARDS, L. The History and Future Challenges of Calcined Petroleum Coke Production and Use in Aluminum Smelting. **Jom**, [S.L.], v. 67, n. 2, p. 308-321, 2015.
- ELKANZI, E.M., MARHOON, F.S., JASIM, M.J.; Rate-based Simulation of Coke Calcination in Rotary Kilns. **Proceedings** [...]. Roma: SCITEPRESS, 2012, p. 5-10.
- FARAGO, F.J., SOOD, R.R., STOKES, D.M. **Method of calcining coke in a Rotary kiln**. Depositante: Alcan Research and Development Ltd. US n.3966560. Depósito: 6 maio 1974. Concessão: 29 julho 1976
- FISCHER, W.K., PERRUCHOUD R. C. Influence of Coke Calcination Parameters on Petroleum Coke Quality. **Light Metals**, 1985, p. 811-826
- FORTIN, H.; KANDEV, N.; FAFARD, M. **FEM analysis of voltage drop in the anode connector induced by steel stub diameter reduction**. Finite Elements In Analysis And Design, [S.L.], v. 52, p. 71-82, 2012.
- FREIESLEBEN, J.; KEIM, J.; GRUTSCH, M. Machine learning and Design of Experiments: alternative approaches or complementary methodologies for quality improvement?. **Quality And Reliability Engineering International**, [S.L.], v. 36, n. 6, p. 1837-1848, 2020.

GRIFFINS, J.A., MARSH, H. Surface Structures in Carbons from Petroleum and Botanical Sources. **Carbon**, Baden-Baden, v.80, p. 17-20, 1981.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **IAI Statistical Report**. Londres, 2021. <{ HYPERLINK. Disponível em: "<https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>" }> Acesso em: 27 mar. 2020.

JENA, M., DEHURI, S. Decision Tree for Classification and Regression: A State-of-the Art Review. **Informatica**. [S.L.], v.44, n. 4, 2020.

LOH, W.Y. Fifty Years of Classification and Regression Trees. **International Statistical Review**. [S.L.], v.82, n. 3, p. 329-348, 2014.

MILOVANOFF, A.; POSEN, I. D.; MACLEAN, H. L. Quantifying environmental impacts of primary aluminum ingot production and consumption: a trade: linked multilevel life cycle assessment. **Journal Of Industrial Ecology**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 67-78, 2020.

OBAIDAT M. *et al.* Energy and Exergy Analyses of Different Aluminum Reduction Technologies. **Sustainability**. [S.L.], v. 10, n. 4, p.1216, 2018.

PERRON, J.; BUI, R. T.; NGUYEN, H. T. Modélisation d'un four de calcination du coke de pétrole: I. Le modèle. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**. Quebec, p. 1108-1119, 1992a.

PERRON, J.; BUI, R. T.; NGUYEN, H. T.. Modélisation d'un four de calcination du coke de pétrole: II. Simulation du procédé. **The Canadian Journal Of Chemical Engineering**. Quebec, p. 1120-1131, 1992b.

SILVA, E.P.; **Modelos matemáticos empíricos para a densidade real e aparente do coque calcinado de petróleo a partir de dados industriais**. 2008. 141 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Processos Industriais – Otimização e Desenvolvimento de Processos) – Coordenadoria de Ensino Tecnológico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2008.

YU, B. *et al.* Technological development pathway for a low-carbon primary aluminum industry in China. **Technological Forecasting And Social Change**, [S.L.], v. 173, p. 121052, 2021.

ZHANG, Z.; WANG, T. Simulation of Combustion and Thermal-Flow Inside a Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln - Part I: Process Review and Modeling. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, [S.I], v. 2, 2010a.

ZHANG, Z.; WANG, T. Simulation of Combustion and Thermal-Flow Inside a Petroleum Coke Rotary Calcining Kiln - Part II: Analysis of Effects of Tertiary Airflow and Rotation. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, [S.I], v. 2, 2010b.

DOI: 10.29327/2152495.7.22-2

