ISSN:2594-6153

Tempo de retenção no processo de calcinação do coque verde de petróleo, em uma estação experimental construída no laboratório de operações unitárias da Unisanta, em Santos

Luiz Roberto de Oliveira, Nathalia Pan Ribeiro Fernandes, Giovanna Cândido Faria, Pedro Sarkissiam de Castro, Isadora Akemi Yogui, Heloisa Pinheiro Rodrigues Lima, Marcelo Fernandes Cabral, João Pedro da Silva Estevam Teixeira, Leonardo Rossi Alfaia, Matheus Sassanovicz Victor, Edinaldo Pereira da Silva, Deovaldo de Moraes Junior

Universidade Santa Cecília (Santa), Santos-SP, Brasil

E-mail: lrobeveira@gmail.com

Resumo: Muitos pesquisadores têm estudado o movimento de partículas nos fornos rotativos, porém os resultados obtidos têm apresentado inconsistências entre si, principalmente na determinação do tempo médio de residência que as partículas permanecem no forno. Neste artigo, são apresentados os resultados dos estudos realizados em uma estação experimental localizada no laboratório de Operações Unitárias da Unisanta, com 1,10 metros de comprimento e 0,164 metros de diâmetro, em caráter comparativo com os resultados obtidos através das formulações clássicas. Os resultados obtidos demonstram que a equação de Sullivan foi a que mais se aproximou dos resultados experimentais, principalmente devido ao conceito de movimento do leito de partículas em camadas.

Palavras-chave: Fornos Rotativos; Tempo de Residência;

Determination of retention time in the calcination process of green petroleum coke, in an experimental station built in the unit operations laboratory of Unisanta, in Santos

Abstract: : A large number of researchers have studied particle movement in rotary kilns, but their results have been inconsistent, particularly when determining the average particle residence time in the kiln. This article presents the results of studies conducted at an experimental station located in the Unisanta Unit Operations Laboratory, measuring 1.10 meters long and 0.164 meters in diameter, in comparison with results obtained using classical formulas. The results demonstrate that Sullivan's equation most closely approximated the experimental results, primarily due to the concept of layered particle bed movement..

Keywords: Rotary Kilns; Residence Time;

Introdução

Os fornos rotativos são grandes tambores cilíndricos inclinados, construídos de aço estrutural ASTM A-36 e revestidos com material refratário, que giram em torno do seu próprio eixo, por onde passam os materiais que serão tratados termicamente [1]. O transporte das cargas no interior do forno começa pela entrada mais alta do forno, onde as partículas são colocadas. Elas deslizam pelo forno em contracorrente aos gases quentes e saem pela outra extremidade

do forno, quando o tratamento é finalizado. As principais aplicações dos fornos rotativos são a clinquerização na produção de cimento, tratamento de minerais e produção de cal, incineração de resíduos perigosos, na recuperação de resíduos metálicos industriais eletrônicos e de baterias, processos químicos de sintetização e fabricação de produtos químicos, e calcinação do coque verde de petróleo. O conceito de calcinação descreve, genericamente, o tratamento aplicado a um sólido, para obter a remoção de uma fase volátil, ligada quimicamente ao sólido; decomposição térmica; produção de um óxido e mudança de estrutura em substâncias cristalinas [2]. O processo de calcinação do coque verde de petróleo ocorre predominantemente, dentro dos fornos rotativos a uma temperatura que varia de 1200ºC a 1350ºC, onde o coque verde de petróleo (CVP) é tratado termicamente e se transforma em coque calcinado de petróleo (CCP) [3]. O coque calcinado (CCP) é resultante de um tratamento térmico de desumidificação e desidrogenação completa do coque verde de petróleo (CVP) sob condições controladas [4]. Por conter um alto teor de carbono, o coque calcinado de petróleo (CCP) é utilizado como anodo de eletrólise nas indústrias de produção de alumínio. As propriedades do coque calcinado de petróleo e sua morfologia são influenciadas pela temperatura de calcinação e pelo tempo de residência do processo [2]. Entende-se como tempo de residência o tempo médio que uma ou um lote de partículas permanecem dentro do forno, desde sua entrada até sua saída [5]. Os fatores que influenciam o tempo de residência são o comprimento e o diâmetro do forno, o ângulo de inclinação, a velocidade de rotação, as características do leito (carga, granulometria, enchimento) e os fluxos dos gases. O tempo de residência exerce grande influência nas modelagens das trocas de calor ao longo do cilindro [5]. Pesquisadores como Saeman (1951) [4], Sullivan *et al.* (1927) [5] e Chatterjee *et al.* (1981) [6], dedicaram seus estudos na construção de modelos matemáticos que relacionam os parâmetros do forno com o deslocamento médio dos sólidos. Saeman (1951) [4] observou que o movimento axial está relacionado com a geometria do forno (diâmetro, comprimento, ângulo de inclinação e rotação). Sullivan *et al* (1927) [5] relacionou o movimento axial das partículas com os fatores geométricos (comprimento, diâmetro, velocidade de rotação e inclinação) e movimento do leito, as partículas são levantadas pela parede do forno e quando atingem o ângulo crítico (ângulo de repouso), deslizam e rolam de volta, causando o avanço axial médio, concluindo que o tempo de residência aumenta com o aumento do ângulo de repouso e diminui com o aumento da inclinação e da rotação. Chatterjee *et al* (1981) [6], buscaram complementar as análises introduzindo o conceito de distribuição dos tempos de residência ao longo do percurso

permitindo avaliar as frações de partículas que permanecem pouco tempo (bypass) das que permanecem muito tempo (zona morta).

Objetivos

Este artigo teve como objetivos aprofundar o conhecimento nos conceitos já definidos pelos pesquisadores supracitados e apresentar os resultados de uma análise comparativa com dados obtidos em uma pequena estação experimental localizada no laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília (Unisanta) em Santos - SP.

Material e Métodos

Os estudos foram realizados em uma pequena estação experimental do laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília em Santos - SP figura 1.A estação é composta por um tambor cilíndrico de 1,10 m de comprimento por 16,4 cm de diâmetro. Para realização do ensaio, ajusta-se o ângulo de inclinação e a rotação e insere-se o material (coque) pela moega de alimentação. O material desliza por dentro do tambor, até sair pela saída inferior do tambor. Para a determinação do tempo de residência, foram adicionados 2 traçadores de cor diferente da cor das partículas, Quando cada traçador entra no tambor o cronômetro é acionado e quando cada traçador sai do tambor o cronômetro é pausado medindo-se o tempo de residência. Usa-se repetir o experimento algumas vezes para se obter um resultado mais preciso. Os resultados obtidos foram inseridos na tabela 2.



Figura 1. Foto da estação experimental do laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília em Santos SP

Tendo os parâmetros da estação (comprimento, diâmetro, rotação e inclinação), e das partículas (ângulo de repouso e fator de enchimento), é possível aplicar as equações de Saeman, Sullivan e Chatterjee da tabela 1.

Tabela 1. Equações de Seaman, Sullivan e Chatterjee para tempo de residência de partículas em fornos rotativos

<table>
<tr><td>Equação Geral

$tr = \frac{L}{vs}$ (1)</td><td>Seaman
$vs = K.\omega.R.sen(\theta - \beta)$ (3)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Veloc. Angular

$\omega = \frac{2.\pi.n}{60}$ (2)</td><td>Sullivan
$vs = Ks.\omega.R.sen(\theta - \beta).F(\lambda)$ (4)</td></tr>
<tr><td>Chatterjee
$vs = \frac{\pi.D.n}{cos\theta}.\left(\frac{h}{D}\right).tan(\theta)$ (5)</td></tr>
<tr><td>sendo:
t_r o tempo de residência (s)
L o comprimento do tambor (m)
R o raio do tambor (m)
D o diâmetro do tambor (m)
N a rotação do tambor (rev/s)
β o ângulo de inclinação do tambor (graus)</td><td>θ o ângulo de repouso (graus)
F(λ) o fator de enchimento do tambor 20%
h a prof. média do leito de partículas (m)
K a const. empírica de Saeman para enchimento do tambor, 0,5
ks a const. empírica de Sullivan para leito quase cheio, 0,6</td></tr>
</table>

Resultados

Os resultados obtidos através dos cálculos e dos ensaios experimentais estão demonstrados nas tabelas 2.

Tabela 2. Resultados obtidos através da aplicação das equações de Saeman, Sullivan e Chatterjee comparado com os resultados obtidos através de experimentos realizados na estação experimental do laboratório de operações unitárias da Unisanta em Santos figura 1, sem a influência dos gases em contracorrente.

Rotação (rpm)	Inclinação (º)	Saeman	Sullivan	Chatterjee	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
10	8	51,2s	21,3s	286,5s	28s	30s	28s
15	8	34,1s	14,3s	191,0s	16s	26s	16s

Discussão

Com base nos resultados da tabela 2, concluiu-se que os resultados experimentais se aproximaram mais dos resultados obtidos pela aplicação da equação de Sullivan. Isso ocorreu porque, diferentemente de Saeman e Chatterjee, Sullivan considera a formação de um leito granular de partículas que rola em camadas no interior do tambor, similar ao que pôde ser visto durante os ensaios experimentais. Chatterjee se aplicaria mais a tambores maiores e Saeman a tambores mais curtos. Um outro fator que afeta os resultados é o material utilizado nos experimentos, que neste caso foi o coque calcinado de petróleo, com a composição de 50% de 2mm de gramatura, 20% de 4mm de gramatura e 30% com 1mm de gramatura, totalizando 2000g.

Agradecimento: Os autores gostariam de agradecer o apoio dado pelo Laboratório de Operações Unitárias da Unisanta por ceder a estação experimental que simula um forno cilíndrico rotativo.

Conclusões

Como sugestão, novos estudos deveriam ser realizados aumentando a gama de variação das rotações e variando também o ângulo de inclinação do tambor. Outro ponto importante, seria a comparação com outros pesquisadores atuais, que têm realizado diversos modelamentos com diferentes conceitos. E finalmente, a realização de estudos com adaptações no interior do tambor, aumentando sua rugosidade e com a utilização de gás em contracorrente, que faz com que a estação experimental se aproxime mais dos equipamentos usados na indústria.

Referências

1. Baby-Jean Robert Mungyeko Bisulandu, Florian Huchet. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications. Applied Thermal Engineering, 2023, 221, pp.119637. ff10.1016/j.applthermaleng.2022.119637ff. ffhal-04102335
2. Zhang Z., Wang T. Invitation of combustion and thermal-flow inside a petroleum coke Rotary calcining kiln with potential energy saving considerations, Proceedings of ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2011 November 11-17, Denver, Colorado, USA
3. Sharifi K., Rohani A., Golpasha R. Production and Application of Calcined Coke In Rotary Kilns Calciners 3rd International Conference of Chemical, Ecology and Environmental Science (ICEES'2014) March 19-20, 2014 Abu Dhabi (UAE)
4. W.C. Saeman, Passage of solids through rotary kilns, Chem Eng Prog. 47 (1951) 508–514.
5. J.D. Sullivan, C.G. Maier, O.C. Ralston, Passage of solid particles through rotary cylindrical kilns, Govt. Print. Off., Washington, 1927
6. A. Chatterjee, A.V. Sathe, P.K. Mukhopadhyay, Flow of materials in rotary kilns used for sponge iron manufacture: Part II. Effect of kiln geometry, Metall. Trans. B. 14 (1983) 383–392. https://doi.org/10.1007/BF02654357.