



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

LEOMAR OLIVEIRA DOS SANTOS

**A CORROSÃO NA ESTRUTURA METÁLICA DOS FILTROS DE PROCESSO DO
FORNO DE CLÍNQUER DECORRENTE DO PONTO DE ORVALHO ÁCIDO**

MOSSORÓ

2021

LEOMAR OLIVEIRA DOS SANTOS

**A CORROSÃO NA ESTRUTURA METÁLICA DOS FILTROS DE PROCESSO DO
FORNO DE CLÍNQUER DECORRENTE DO PONTO DE ORVALHO ÁCIDO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Gecílio Pereira da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Ferreira da Silva Filho

MOSSORÓ

2021

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237c Santos, Leomar Oliveira dos.
A corrosão na estrutura metálica dos filtros
de processo do forno de clínquer decorrente do
ponto de orvalho ácido / Leomar Oliveira dos
Santos. - 2021.
22 f. : il.

Orientador: Gecilio Pereira da Silva.
Coorientador: Luiz Ferreira da Silva Filho.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2021.

1. Corrosão. 2. Processo de produção. 3.
Filtro. 4. Ponto de orvalho ácido. I. Silva,
Gecilio Pereira da, orient. II. Silva Filho, Luiz
Ferreira da, co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LEOMAR OLIVEIRA DOS SANTOS

**A CORROSÃO NA ESTRUTURA METÁLICA DOS FILTROS DE PROCESSO DO
FORNO DE CLÍNQUER DECORRENTE DO PONTO DE ORVALHO ÁCIDO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

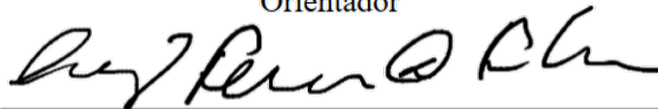
Defendida em: 18 / 11 / 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Gecílio Pereira da Silva (UFERSA)

Orientador



Prof. Dr. Luiz Ferreira da Silva Filho (UFERSA)

Co-orientador



Engenheira Química MSc. Richelly Nayhene de Lima

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Grato a Deus pelo fôlego de vida e pelo refúgio necessário nas adversidades.

A minha família, que sempre me apoia e me incentiva a nunca desistir dos meus sonhos. Em especial aos meus pais, Luiz Augusto e Aparecida, meus alicerces.

A minha noiva Fernanda, por todo amor e carinho, e por me apoiar sempre.

A todos os meus amigos, em especial os amigos de fé, da Assembleia de Deus em Baraúna/RN, que sempre estão lá quando preciso deles.

A fábrica de cimento Muzu, em especial ao amigo João Batista, por me proporcionar tanto aprendizado profissional e contribuir substantivamente na realização deste trabalho.

A todos os meus professores da UFERSA, em especial a Josy Ramos, do campus Pau dos Ferros, que muito colaborou na realização do meu artigo que embasou este trabalho.

Ao meu professor orientador, professor Gecílio Pereira, pela paciência e pelo incentivo.

E aos demais membros da banca examinadora, professor Luiz Ferreira e engenheira química Richelly, pelo tempo cedido na concretização deste trabalho.

A gravidade explica os movimentos dos planetas, mas não pode explicar quem colocou os planetas em movimento. Deus governa todas as coisas e sabe tudo que é ou que pode ser feito.

Isaac Newton

RESUMO

Nos processos industriais, os equipamentos estão suscetíveis à corrosão, que pode torná-los inadequados para o uso e assim causar prejuízos, sejam eles ambientais, financeiros ou à saúde humana. Na indústria cimenteira, o equipamento mais afetado pela corrosão em toda a linha de produção do cimento é o filtro de processo do forno de clínquer, visto que o meio no qual o filtro está inserido é bastante agressivo. Estudos por meio de análises e medições mostram que a principal causa dessas corrosões é devido ao ponto de orvalho ácido. O estudo em questão propõe como controlar o ponto de orvalho ácido, bem como mostrar medidas de prevenção aos ataques corrosivos no filtro.

Palavras-chave: Corrosão. Processo de produção. Filtro. Ponto de orvalho ácido.

ABSTRACT

Our industrial processes, equipment are susceptible to corrosion, which can be destroyed and unsuitable for the use and assimilation of damages. In the cement industry, the equipment most affected by corrosion throughout the cement production line is the clinker kiln process filter, since the environment in which the filter is inserted is quite aggressive. Studies by means of analyzes and measurements show that a major cause is corrosive due to the acid dew point. The study in question how to control acid dew point, as well as show measures to prevent corrosive attacks on the filter.

Keywords: Corrosion. Production process. Filter. Acid dew point.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Filtro de mangas em operação	13
Figura 2	– Esquema simplificado de fabricação de cimento portland	14
Figura 3	– Representação do forno e seus componentes	15
Figura 4a	– Corrosão causada por condensação ácida na tampa do filtro	18
Figura 4b	– Corrosão causada por condensação ácida nas flautas	18
Figura 4c	– Corrosão causada por condensação ácida nas gaiolas	18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

ABCP Associação Brasileira de Cimento Portland

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Corrosão	12
2.2	Filtro de mangas	12
2.3	Ponto de orvalho ácido	13
2.4	Cimento Portland	13
2.4.1	<i>Processo de fabricação de cimento Portland</i>	14
2.4.2	<i>Preparação do clínquer e geração dos gases</i>	15
2.4.3	<i>Filtro de processo do forno de clínquer</i>	15
3	PROBLEMAS COM CORROSÃO NO FILTRO	17
3.1	Oxidação das partes metálicas do filtro	17
3.2	Consequências da corrosão no filtro	19
4	POSSÍVEIS SOLUÇÕES	20
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	21
	REFERÊNCIAS	22

1 INTRODUÇÃO

Como qualquer planta industrial, o processo de fabricação de cimento Portland não se abstém da emissão de gases para o meio ambiente, uma vez que a operação principal do processo ocorre em um forno rotativo. Consequentemente, se há combustão, há emissão de gases.

Por esse motivo, a implantação de um sistema que amenize ou elimine essas emissões torna-se imprescindível, já que órgãos como o CONAMA não permitem que fábricas potencialmente poluidoras funcionem sem antes passar por uma rigorosa avaliação ambiental na qual os limites de emissão devem ser atendidos.

Para tanto, são estabelecidos padrões e normas, tais como a Resolução CONAMA nº 491 de 2018, que estabelece os padrões de qualidade do ar (CONAMA, 2018).

Buscando-se evitar que esses gases sejam jogados na atmosfera e prejudiquem o meio ambiente, são usados sistemas de ventilação industrial, como os filtros de mangas, responsáveis pela filtragem dos detritos e gases para liberar o ar para a atmosfera o mais límpido possível, da parte do processo onde estão inseridos.

Ademais, nas indústrias acontecem perdas de produção e paradas da unidade por corrosão de equipamentos e estruturas, visto que os tais são feitos de metais e/ou ligas metálicas, o que não é diferente em uma indústria cimenteira. O filtro de processo do forno de clínquer é o equipamento mais afetado pela corrosão em toda a linha de produção do cimento. Vale ressaltar que o meio no qual o filtro está inserido é bastante agressivo.

A problemática gira em torno da indústria de cimento, onde é mostrado como se dão as corrosões em um ponto importante do processo de fabricação de cimento, o filtro de processo do forno de clínquer, bem como as soluções cabíveis no combate à essas corrosões.

O presente estudo mostra como controlar o ponto de orvalho ácido, propondo medidas de prevenção aos ataques corrosivos no filtro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Corrosão

Segundo Gentil, corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1998).

Este processo, literalmente, consome o material, reduzindo a capacidade de carga e causando concentração de tensões. Gentil explica que essa deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, tais como desgaste, tornando-o inadequado ao uso (GENTIL, 1998).

Para Schweitzer, existem três razões principais para se preocupar e estudar corrosão: segurança, economia e conservação. Além do mais, a falha precoce de pontes ou estruturas devido à corrosão pode resultar em ferimentos humanos ou mesmo morte (SCHWEITZER, 2010).

2.2 Filtro de mangas

Os filtros de mangas se encaixam nos sistemas de ventilação industrial, sendo responsáveis pela filtragem dos detritos e gases para liberar o ar para a atmosfera o mais límpido possível, da parte do processo onde estão inseridos.

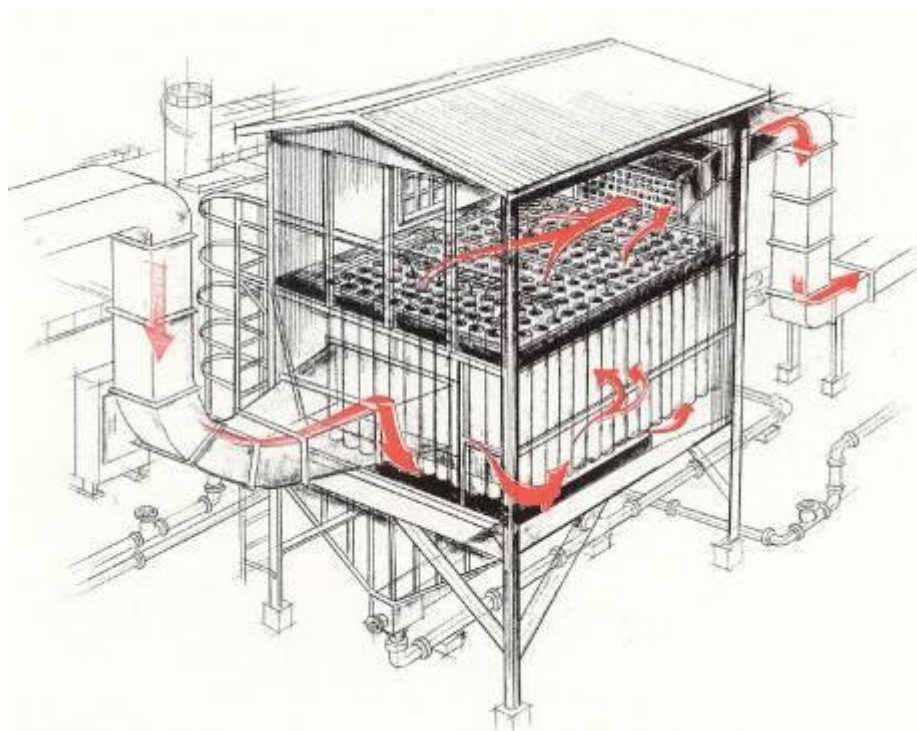
De acordo com o Manual Técnico da Ventec Ambiental (2008),

um filtro de mangas é basicamente composto por câmara superior, corpo central e moega de recolhimento, operando em condições contínuas, sendo dotado de sistema automático de limpeza das mangas filtrantes. Na câmara superior, as flautas direcionam o ar comprimido ao sistema, às mangas. No corpo do filtro, as mangas são montadas sobre gaiolas armadas, que visam à manutenção de seu perfil cilíndrico quando em operação (VENTEC AMBIENTAL, 2008, p. 3).

Barbosa e Silva (2013) realizaram um estudo de eficiência de um filtro de mangas no tratamento de gases oriundos da queima de biomassa sólida. A partir dos resultados obtidos, constataram a alta eficiência do filtro, bem como sua viabilidade nos processos industriais envolvendo queima (BARBOSA e SILVA, 2013).

Os filtros de processo são, em geral, filtros de mangas que participam do processo de produção. A Figura 1 esquematiza um filtro de processo e seu funcionamento.

Figura 1: Filtro de mangas em operação.



Fonte: VENTEC AMBIENTAL (2008).

2.3 Ponto de orvalho ácido

Sabendo que o ponto de orvalho designa a temperatura a qual um determinado vapor presente no ar passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por meio da condensação, o chamado orvalho, Pacheco (2006) destaca que o ponto de orvalho ácido, nesse caso, seria o limite de temperatura gasosa acima do qual não ocorre condensação de ácido sulfúrico (PACHECO, 2006).

Schweitzer destaca o orvalho como uma causa muito importante de corrosão, especialmente sob condições controladas (SCHWEITZER, 2010, p. 81).

2.4 Cimento Portland

Segundo a ABCP, o cimento é um pó fino com propriedades aglomerantes, que endurece sob a ação de água (ABCP, 2016).

Não é à toa ser um dos materiais mais consumidos no mundo, o cimento está presente em toda parte, desde pequenas construções como casas, até grandes obras como edifícios e pontes, tendo em vista que é a matéria prima principal do concreto.

A palavra “cimento” é originada do latim *caementu*, que designava na velha Roma espécie de pedra natural de rochedos e não esquadrejada. A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos (BATTAGIN, 2009).

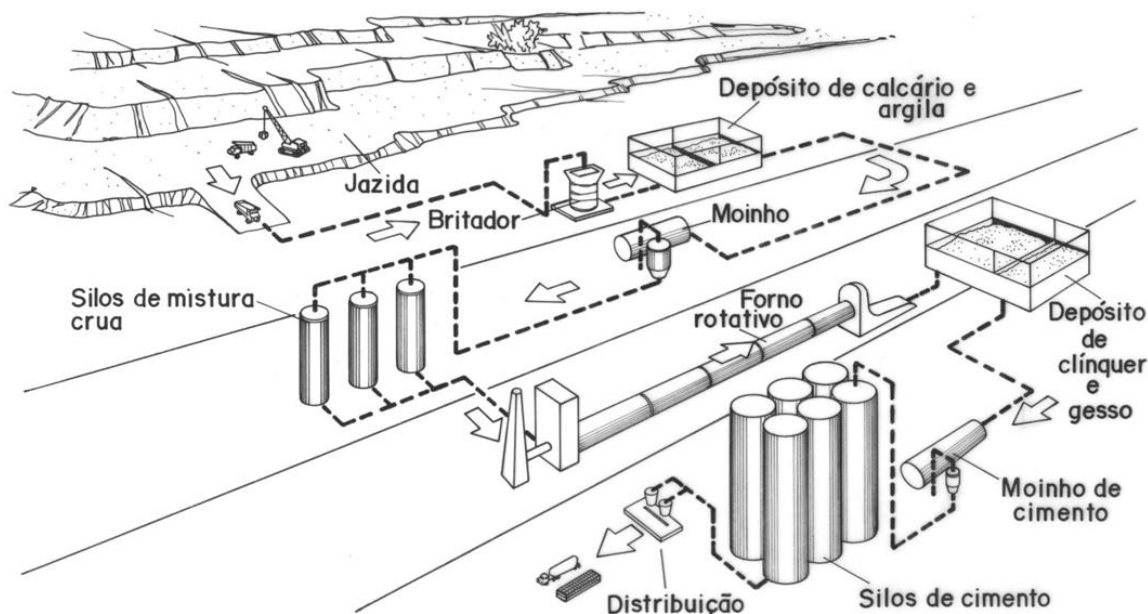
Arnaldo Battagin (2009) explica que o nome “Portland” foi dado em 1824 pelo químico britânico Joseph Aspdin, pelo simples fato de o cimento apresentar cor e propriedades semelhantes às rochas da ilha britânica de Portland (BATTAGIN, 2009).

2.4.1 Processo de fabricação de cimento Portland

Segundo Taylor (1997, p. 1), o cimento Portland é feito por aquecimento de uma mistura de calcário, argila e outros minerais, em um forno rotativo a uma temperatura de cerca de 1.450 °C, onde cristais de clínquer são produzidos. Para fazer o cimento, o clínquer é misturado com uma pequena porcentagem de calcário e finalmente moído (TAYLOR, 1997).

Um esquema simplificado do processo é esquematizado a seguir (Figura 2).

Figura 2: Esquema simplificado de fabricação de cimento portland.



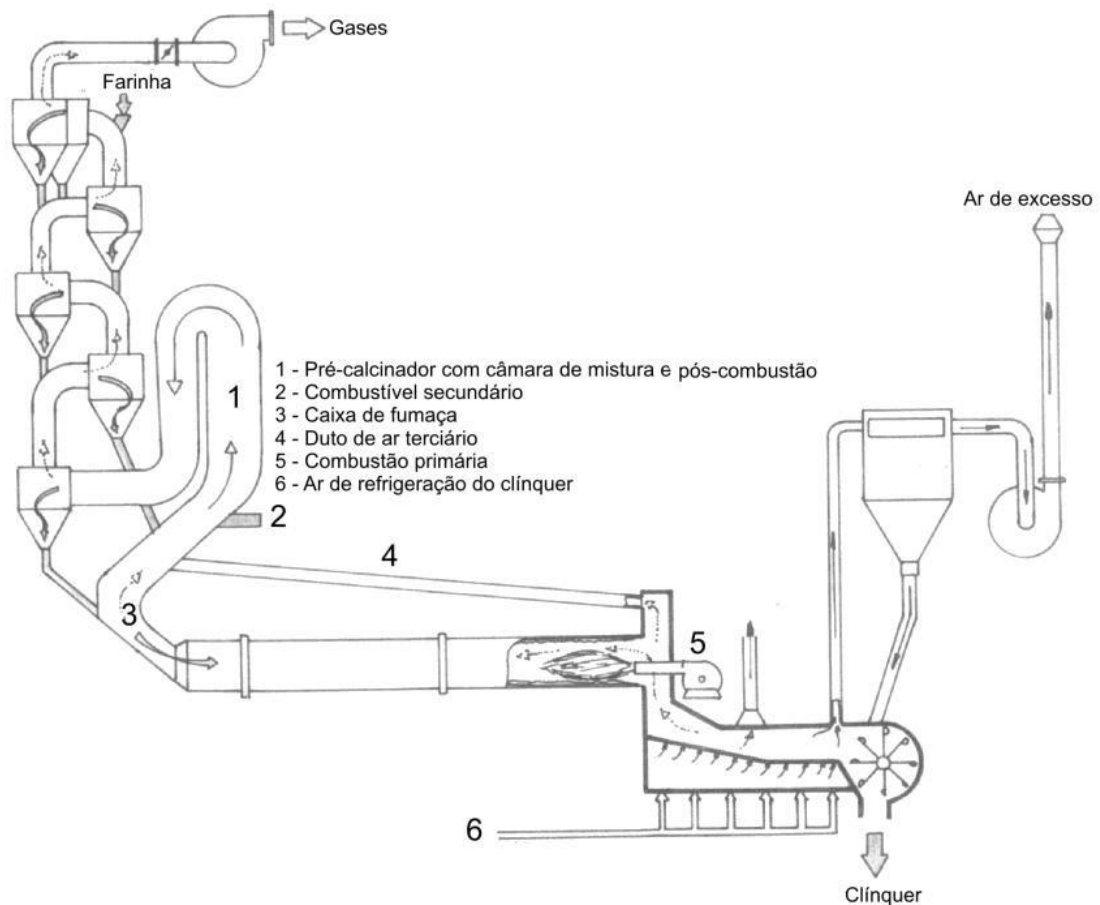
Fonte: CENTURIONE (1999).

2.4.2 Preparação do clínquer e geração dos gases

O clínquer é o principal componente da fabricação de cimento. A mistura crua que entra no forno rotativo à 1.450 °C passa por um processo chamado clinquerização, e cristais de clínquer são produzidos (TAYLOR, 1997).

A Figura 3 mostra a representação esquemática de um forno rotativo de clinquerização com torre de pré-aquecimento, cinco estágios de ciclones, pré-calcinador (com câmara de combustão e de mistura juntas), instaladas em linha em relação ao fluxo dos gases efluentes do forno (FARENZENA, 2003).

Figura 3. Representação do forno e seus componentes.



Fonte: FARENZENA (2003).

Após o forno, os resfriadores têm a importante função de reduzir o mais rápido possível a temperatura do material que sai do forno, a fim de impedir a reconversão das fases

mineralógicas formadas na clinquerização. Centurione (1999) explica que os gases provenientes dos resfriadores atravessam o forno no sentido oposto ao fluxo de materiais para resfriar o clínquer recém produzido, além de pré-aquecer as matérias-primas que entram no forno (CENTURIONE, 1999).

O fluxo dos gases continua no sentido inverso e finaliza com a passagem dos gases por um filtro de processo onde são submetidos a uma precipitação final, sendo eliminados na atmosfera quase que isentos de partículas sólidas.

2.4.3 Filtro de processo do forno de clínquer

Dentre os filtros de processo presentes na linha de produção de cimento, destaca-se o filtro de processo do forno de clínquer, responsável pela filtragem dos gases mais “agressivos”, advindos do forno tais como o SO_2 (dióxido de enxofre) e o SO_3 (trióxido de enxofre), produtos da combustão.

O filtro de processo do forno de clínquer faz o despoeiramento entre a moagem da farinha e o forno. Os gases (com particulado) vindos do moinho e do forno são direcionados ao filtro através de um exaustor, que por sua vez, direciona esses gases à chaminé, dissipando-os na atmosfera. São alguns desses gases que, na presença de água, fazem do filtro de processo do forno o mais suscetível à corrosão, quando em determinadas condições de operação.

3 PROBLEMAS COM CORROSÃO NO FILTRO

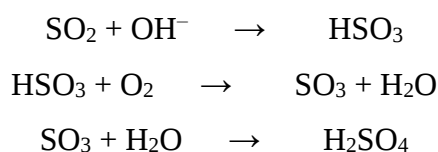
A queima de combustível com enxofre em sua estrutura molecular resulta na oxidação do mesmo, formando o gás SO_2 , o qual reage com o oxigênio residual dos gases sujos quando a temperatura cai para algo abaixo de $300\text{ }^\circ\text{C}$, formando assim o gás SO_3 (PACHECO, 2006).

Por consequência disto, o filtro torna-se o equipamento mais afetado pela corrosão em toda a linha de produção, já que esses gases fazem do meio no qual o filtro está inserido propenso a corrosão.

Além disto, devido à forte afinidade do gás SO_3 por água, haverá a formação de ácido sulfúrico (H_2SO_4), e essa formação tem um agravante, pois ao reagir com o metal da gaiola (ferro ou outro) há liberação do gás hidrogênio, o qual ataca a manga filtrante.

A formação do ácido potencializa a taxa de corrosão dos equipamentos na qual esses gases são direcionados – o filtro de processo do forno, tornando-o o mais suscetível a corrosão.

De fato, dependendo do ambiente, o SO_2 é capaz de ser oxidado de uma ou mais das seguintes maneiras:



Das reações, pode-se destacar a oxidação do SO_2 em SO_3 e deste, em H_2SO_4 (SCHWEITZER, 2010, p. 97).

3.1 Oxidação das partes metálicas do filtro

Em inspeção realizada no filtro de processo do forno da fábrica de cimento Mizu, situada em Baraúna/RN, observou-se manchas avermelhadas, caracterizadas pela oxidação das partes metálicas do filtro, como mostra a Figura 4. Além disso, é possível ver claramente a degradação das flautas.

Foi realizado um estudo de causa no local e constatou-se que a principal das causas era o ponto de orvalho ácido. O ácido sulfúrico condensado em detrimento do ponto de orvalho ácido ataca as estruturas metálicas do filtro, deteriorando-as fortemente.

Figura 4: Corrosão causada por condensação ácida (a) na tampa da câmara, (b) nas flautas e (c) nas gaiolas.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Arquivo MIZU.

Pacheco explica que a condensação ácida é promovida quando a temperatura no filtro é inferior ao ponto de orvalho ácido que, para o caso do H_2SO_4 , é de $113\text{ }^\circ\text{C}$ (PACHECO, 2006).

Nessas condições, a condensação ácida é iminente. E pelo caráter ácido, os problemas são ainda mais evidentes, uma vez que a condensação ácida causa corrosão e agride a estrutura metálica do filtro.

3.2 Consequências da corrosão no filtro

Uma gaiola danificada decorrente da corrosão causa furos, rasgos na manga, fazendo com que o material e os gases que passam pelo filtro entrem na manga através desses furos e causem, assim, poluição ao meio ambiente. Como consequência, vêm os prejuízos financeiros, visto que a produção pára, porque o filtro fica ineficiente e tem que parar devido às mangas danificadas. Nem o forno nem o moinho de cru rodam com o filtro parado. Sem contar os danos à saúde de quem trabalha, que vai respirar um ar poluído.

4 POSSÍVEIS SOLUÇÕES

O filtro do forno opera a temperaturas em torno dos 120 °C, temperatura acima do ponto de orvalho ácido (de 113 °C), onde teoricamente não deveria ocorrer condensação do ácido. Entretanto, vale destacar que as paredes da estrutura não estão a 120 °C, mas numa temperatura bastante inferior dependendo da temperatura atmosférica local.

Pacheco ressalta, então, que para uma faixa de segurança e manter os equipamentos seguros frente à corrosão causada pelo ácido sulfúrico, uma solução é trabalhar com uma margem mínima de 15 °C acima do ponto de orvalho ácido, evitando condensações por oscilações no processo (PACHECO, 2006).

Como o filtro é uma parte do processo, manutenções no mesmo são descartadas durante o funcionamento do forno, visto que o forno pára se o filtro parar.

Em virtude disso, manutenções como troca de mangas, gaiolas, vedações das tampas e alguma eventual ação corretiva/preventiva para sanar desgastes devido à corrosão na parte interna do filtro só são possíveis durante paradas pré-definidas de manutenção do forno. Essas ações podem ser a pintura (da forma correta: com limpeza, revestimento primário e acabamento) ou a substituição da peça corroída por outra nova.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto, as problemáticas da corrosão nos processos industriais causam prejuízos ambientais, financeiros e à saúde do homem, dependendo do caso, de modo que essa proposição necessita de estudo, investigação e controle.

A avaliação do aspecto químico da filtração se faz indispensável nas investigações de falhas de projetos ou de solução de problemas crônicos dos sistemas de filtração, seja por entupimento, seja por alta emissão de pó devido ao ataque químico dos elementos filtrantes. Todavia, faz-se necessário reforçar, que é fortemente recomendável, a avaliação concomitante do aspecto mecânico, como por exemplo, dentre muitos itens, a eficiência do sistema de limpeza.

Uma vez que a eficiência depende também do aspecto mecânico do filtro, o combate aos ataques corrosivos se torna obrigação das fábricas, a fim de que todos inseridos no meio (o financeiro da empresa, a saúde humana, o meio ambiente) ganhem com isso.

Por fim, no que se diz respeito ao filtro do forno, percebe-se a necessidade do acompanhamento da temperatura de operação do mesmo, de maneira que a condensação ácida seja anulada e consequentes danos ao filtro sejam evitados.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Básico sobre cimento**. São Paulo: 2016. Disponível em: <<https://abcp.org.br/basico-sobre-cimento/>>. Acesso em: 30 out. 2021.
- BARBOSA, M. G.; SILVA, C. L. **Eficiência de um Filtro de Mangas no Tratamento de Gases Oriundos de Caldeira de Queima de Biomassa Sólida**. IX Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 9, n. 11, pp. 293-308, Bauru, SP, 2013.
- BATTAGIN, A. F. **Uma breve história do cimento Portland**, Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo: 2009. Disponível em: <<https://abcp.org.br/uma-breve-historia-do-cimento-portland/>>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- CENTURIONE, Sérgio Luiz. **A Mineralização do Clínquer Portland e seus benefícios tecnológicos**. 1999. 146 p. Tese (Doutorado) - Curso de Mineralogia e Petrologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Conama nº 491**, de 19 de novembro de 2018. Estabelece os padrões de qualidade do ar. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- FARENZENA, H. **Fabricação de Cimento Portland** – Fundamentos básicos da calcinação e clínquerização. Manual técnico, 2003.
- GENTIL, Vicente. **Corrosão**. 3. ed. 373 p. Rio de Janeiro: LTC, 1998.
- PACHECO, Tito de Almeida. **O Aspecto Químico da Filtração Industrial**. Cerâmica Industrial, Cachoeirinhas, RS. 10 p. Setembro, 2006.
- SCHWEITZER, Philip A. **Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, Preventative Methods**.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd Edition. Thomas Telford Publishing, London: 1997.
- VENTEC AMBIENTAL. **Manual Técnico de Instalação, Operação e Manutenção, Filtro de Mangas**. 14 p. Indaiatuba, SP, 2008.