



NO_x e o balanço de massa do forno de clínquer

Versão traduzida: NO_x in the mass balance

By Dr. Michael Clark ICR August 2013

Nesse artigo, da sessão “Fórum Técnico”, da edição de agosto da revista *International Cement Review*, o Dr. Clark discute como as emissões de NO_x contribuem para o balanço de massa do forno de clínquer. Como o NO_x é gerado e como as emissões podem ser controladas ou reduzidas?

Leia a tradução desse artigo e saiba mais.

Caso tenha alguma dúvida, comentário ou sugestão envie-nos um e-mail para artigos@optimus.eng.br e nós da Optimus Engenharia teremos prazer em ajudar você!



Em 2012 uma série de workshops realizados em conjunto com as conferências Cemtech Dubai, Jacarta e Genebra sobre o tema fundamental do balanço de massa de um forno de cimento tornaram-se populares. Esses workshops deram destaque a uma ampla discussão sobre emissões de SO_2 e metais pesados nos fornos de clínquer – em particular, as emissões de mercúrio e tálio. Fundamentalmente, tudo o que entra em um forno deve sair seja no clínquer, nas emissões gasosas, ou deve se concentrar nas colagens que se formam dentro do sistema de clínquerização.

Óxidos de Nitrogênio

Óxidos de nitrogênio (NO_x) formam outra classe de emissões gasosas dos fornos de clínquer que está sendo cada vez mais fortemente regulamentada. Realmente, é discutível que as emissões de NO_x sejam um problema muito maior para operadores de forno de cimento do que as emissões de SO_2 ou metais pesados. NO_x é emitido por todos os fornos de cimento, enquanto as emissões de SO_2 apenas surgem em níveis problemáticos quando existem sulfetos nas matérias-primas. Metais pesados são emitidos de fornos de cimento apenas em quantidades diminutas, exceto em alguns casos isolados. Portanto, as emissões de NO_x são um problema para todos os operadores de forno de cimento. Emissões de SO_2 e metais pesados são apenas de interesse direto para alguns operadores de forno de cimento, apesar do interesse acadêmico de todos. Então, como as emissões de NO_x se encaixam no balanço de massa fundamental de um forno de clínquer?

Fontes de NO_x

Compostos de nitrogênio na matéria-prima

Não há entradas de NO_x em um forno de clínquer, nem nas matérias-primas nem no combustível (tal como não existem entradas de SO_2).

No entanto, existem compostos de nitrogênio em matérias-primas e, particularmente nos combustíveis utilizados para aquecer um forno de cimento.

Qualquer composto orgânico de nitrogênio no combustível será oxidado para NO_x no queimador principal do forno e no precalcinador. A menos que técnicas de mitigação de pós-combustão sejam implantados (combustão estagiada no precalcinador ou redução Não-Catalítica Seletiva – SNCR), então este NO_x derivado do nitrogênio orgânico do combustível vai deixar o forno como as emissões nos gases de exaustão.

A única maneira de evitar tais emissões de NO_x do combustível é selecionar os combustíveis com baixo teor de nitrogênio orgânico.

Oxidação do Nitrogênio atmosférico

No entanto, tais emissões de NO_x não são a principal preocupação dos operadores de forno de cimento. A principal preocupação é a oxidação de parte do nitrogênio do ar utilizado no forno para queima do combustível no queimador principal. Existe uma entrada significativa de nitrogênio atmosférico passando pelo forno vindo do ar de combustão e de resfriamento, já que o ar tem 78% de nitrogênio em volume.

A entrada total de ar em um sistema de forno típico é de aproximadamente $1,7\text{-}2,0\text{m}^3$, significando que a entrada de nitrogênio total será $1,35\text{-}1,55\text{m}^3$. No entanto, a maior parte (55-60%) do ar soprado para resfriar o clínquer é retirada do sistema no próprio resfriador. Em termos de balanço de massa, este ar e seu nitrogênio associado entra e sai do sistema sem passar pelo forno.

Apenas 40-45% do ar soprado dentro do resfriador passa pelo forno e pelo calcinador na forma de ar de combustão.



Desses, 40-45 % do ar de combustão, 15 a 20 % do ar total, passarão pela zona de queima do forno servindo como ar secundário para a combustão do combustível injetado no queimador principal. Este ar secundário irá incluir de 280-320m³ de nitrogênio por tonelada de clínquer produzido... e é isso (juntamente com o nitrogênio do ar primário no queimador principal) que pode ser convertido em NO_x no forno. Isso é potencialmente uma enorme quantidade de NO_x – cerca de 1Mmg/Nm³ nos gases de exaustão do forno.

Atendendo aos padrões

Felizmente, isso não é o que acontece. Os limites europeus para emissões de NO_x em fornos de cimento existentes são um máximo de 800mg/Nm³ dos gases de exaustão. Nenhum forno de cimento seria capaz de cumprir essas normas se todo o nitrogênio do ar de combustão fosse oxidado a NO_x. Existem pelo menos duas razões para isso.

NO e NO₂

Em primeiro lugar, o NO_x é um nome genérico para todos os óxidos de nitrogênio: NO, NO₂, N₂O e N₂O₄. Aproximadamente 95 % do NO_x emitido a partir de fornos de clínquer está forma de monóxido de nitrogênio (NO) e o restante como dióxido de nitrogênio (NO₂). Na atmosfera, o NO é oxidado a NO₂ e por isso as medições de NO_x referem-se ao NO₂.

Estequiometricamente, formação de NO requer a combinação de uma molécula de nitrogênio, N₂, com uma molécula de oxigênio, O₂. Formação de NO₂ requer a combinação de uma molécula de nitrogênio com duas moléculas de oxigênio. A quantidade de oxigênio necessário para converter todo o nitrogênio no ar secundário para NO e NO₂ não está presente em uma chama de forno de clínquer.

Apenas a quantidade de ar suficiente para queimar o combustível no queimador principal é injetada no forno e essa combustão consome praticamente todo o oxigênio no ar.

Consequentemente, por falta de oxigênio, a maior parte do nitrogênio no ar secundário não pode ser convertida em NO_x e, portanto, o nitrogênio do ar secundário simplesmente é passa pelo forno como um inerte, um gás que não reage quimicamente.

A necessidade de altas temperaturas

Em segundo lugar, temperaturas muito altas são necessárias para oxidar o nitrogênio do ar de combustão para NO_x. As temperaturas de 1850 a 2000°C na chama do queimador principal são suficientes para oxidar parte do nitrogênio do ar primário e secundário com a pequena quantidade de oxigênio em excesso que está presente, além do que o necessário para a combustão do combustível.

Quanto maior a temperatura da chama do queimador principal, maior será o grau de oxidação do nitrogênio e a formação de NO_x. É por isso que o teor de NO_x no gás da entrada do forno de clínquer é um bom indicador do pico de temperatura na chama e, portanto, na zona de queima de um forno de clínquer. É por causa da necessidade de temperaturas muito elevadas para esta formação de NO_x térmico que nenhum NO_x térmico é formado no precalcinador. As temperaturas nesse ponto do processo não são altas o suficiente.



Redução de NOx

Estas duas razões pelas quais todo o nitrogênio do ar de combustão não é oxidado explicam as técnicas mais comuns usadas para minimizar a formação de NOx no queimador principal de um forno de clínquer.

Em primeiro lugar, a disponibilidade de oxigênio na temperatura de pico na chama do queimador principal é limitada, reduzindo a quantidade de ar primário, introduzida no forno com o combustível através do queimador principal. Queimadores Low-NOx com pouquíssimo ar primário como 5% foram utilizados com este objetivo e foram bem sucedidos na redução da formação de NOx e emissões dos fornos de cimento.

No entanto, como um queimador principal de forno de clínquer trabalha com o princípio de sucção de ar secundário para a chama pelo efeito do jato, velocidades de injeção extremamente altas deste ar primário precisam ser empregadas para garantir o impulso suficiente para permitir a mistura adequada na chama. Mesmo queimadores com jato quase na velocidade sônica, frequentemente o momento era insuficiente para misturar o ar secundário e combustível rapidamente e produzir a chama quente e firme que é necessária para a qualidade ideal do clínquer.

Como resultado, a popularidade de tais queimadores diminuiu, e há um reconhecimento de que 10 a 12% de ar primário é a quantidade necessária no queimador principal para produzir uma chama eficaz.

Outras tecnologias para redução de NOx tiveram que ser desenvolvidas. Um dos métodos para evitar as temperaturas muito altas que levam à formação de NOx na chama do queimador principal do forno é o uso das técnicas de refrigeração da chama tais como a injeção de água no interior da chama.

Esses métodos de redução de NOx destinavam-se a reduzir a formação de NOx na chama do queimador principal. Estes têm sido amplamente substituídos por métodos de redução de NOx pós-formação tais como a combustão estagiada em precalcinadores e SNCR, que são eficazes na redução de NOx nos gases de exaustão, após sua formação na chama do queimador principal.

Tais métodos de redução de NOx são atualmente reconhecidos como mais eficazes que os métodos de prevenção de formação de NOx. Em última análise, a redução catalítica seletiva (SCR) de NOx nos gases de exaustão antes de sua descarregada para a atmosfera seria a tecnologia mais eficaz de redução de NOx. Contudo, outras técnicas de menor custo têm sido suficientes para atender às normas de emissão de NOx atuais.

Assim, as emissões de NOx não são um fluxo de contribuição significativa para o balanço de massa de um forno de clínquer. Elas certamente podem ser consideradas no cálculo da massa dos gases de exaustão do forno, mas são praticamente insignificantes. A maior parte do nitrogênio introduzido no forno de clínquer simplesmente passa direto pelo sistema da clinquerização sendo exaurida pelo forno ou pelo resfriador.

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



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



Ótimo Planejamento Financeiro - Bem-Haveres / LLC

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