

## ANÁLISE DE O<sub>2</sub> EM EXCESSO NOS GASES COMBUSTÃO DE UM FORNO DE COQUERIA DO TIPO HEAT RECOVERY\*

Neussias Inocência Henrique<sup>1</sup>

Yan Samuel Ferreira Junqueira<sup>2</sup>

Robson Jacinto Coelho<sup>3</sup>

Glauber de Sousa de Araujo<sup>4</sup>

Luiz Afonso de Andrade<sup>5</sup>

Charles Humberto Effgen Wernesbach<sup>6</sup>

Jonas Constancio Nunes<sup>7</sup>

Sandro de Souza Azevedo<sup>8</sup>

Rafael Pedrosa Pereira<sup>9</sup>

Gregore da Silva Tasca<sup>10</sup>

### Resumo

O processo de coqueificação em uma Coqueria do tipo *Heat Recovery* ocorre pela queima da matéria volátil presente no carvão, principal combustível para aquecimento dos fornos. Uma segunda queima não desejada ocorre pela combustão do coque. Essa queima indesejada é denominada *Burn Loss*. A quantidade de ar succionada para dentro dos fornos é pelo sistema de exaustão e controlada por um sistema automático de abrir ou fechava as válvulas utilizando através de um sistema de controle chamado de PID Combustão. Com os dados do perfil de oxigênio dos fornos do tipo *Heat Recovery* é possível determinar a quantidade exata de O<sub>2</sub> em excesso objetivando a queima dos gases total dos gases. Os principais benefícios de se analisar a quantidade de O<sub>2</sub> em excesso e entender o processo de combustão dos fornos e poder alterar o sistema de admissão de ar com o objetivo de aumenta da capacidade de produção do forno (aumento da velocidade de coqueificação) e otimização da sucção ao longo dos fornos no mesmo coletor.

**Palavras-chave:** Coqueria *Heat Recovery*, Combustão, Gases de Coqueria, Oxigênio e PID Combustão.

### ANALYSIS OF O<sub>2</sub> IN EXCESS AT COMBUSTION GASES OF A COKE PLANT OVEN IN THE TYPE HEAT RECOVERY

#### Abstract

The process of coking in a coke oven of the type *Recovery of heat* by means of burning of volatile matter present coal, main fuel for heating the ovens. A second unwanted burning for the coke combustion. This unwanted burning is called *Burn Loss*. The amount of drag in the ovens and the exhaust system and control by an automatic system to open or closed the valves, through a control system called *PID Combustion*. With the Oxygen profile data of *heat recovery type ovens* it is convenient to determine an exact amount of O<sub>2</sub> in excess with the aim of burning the total gases of the gases. The main benefits of analyzing the amount of O<sub>2</sub> in excess and understanding the combustion process of the furnaces and being able to change the air inlet system with the objective of increasing the furnace production capacity (increase of coking time) and optimization of suction over the ovens Not even.

**Keywords:** *Heat Recovery*; *Coke Plant*; *Combustion*, O<sub>2</sub>

<sup>1</sup> Engenharia Química, Engenheiro de Processo, thyssenkrupp CSA, Unidade Técnica da Redução, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

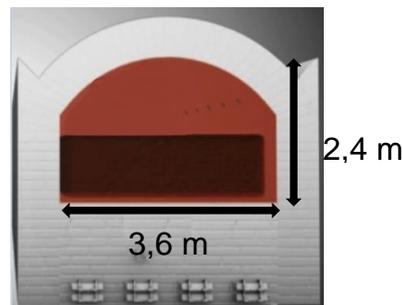
<sup>2</sup> Engenharia de Controle e Automação, Engenheiro de Processos, Unidade Técnica da Redução, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- <sup>3</sup> *Engenharia Metalúrgica, Mestrado em Engenharia de Materiais, Unidade Técnica da Redução, Engenheiro Especialista em Redução, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>4</sup> *Administração de Empresas, Técnico de Qualidade III, Coqueria Operação, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>5</sup> *Master Comercio Exterior e Finanças Internacionais, Coordenador Unidade Técnica Coqueria, Unidade Técnica da Redução thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>6</sup> *Tecnólogo em Mecânica, Gerente de Operação Alto Fornos, Redução, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>7</sup> *Técnico em Eletrotécnica, Operador de Produção III - Coqueria, Coqueria Operação, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>8</sup> *Técnico em Eletromecânico, Técnico Especialista Refratário, Coqueria Operação, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>9</sup> *Engenharia de Controle e Automação, Engenheiro de Automação Pleno, Coqueria Manutenção, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*
- <sup>10</sup> *Técnico em Eletrotécnica, Técnico em Instrumentação I, Coqueria Manutenção, thyssenkrupp CSA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

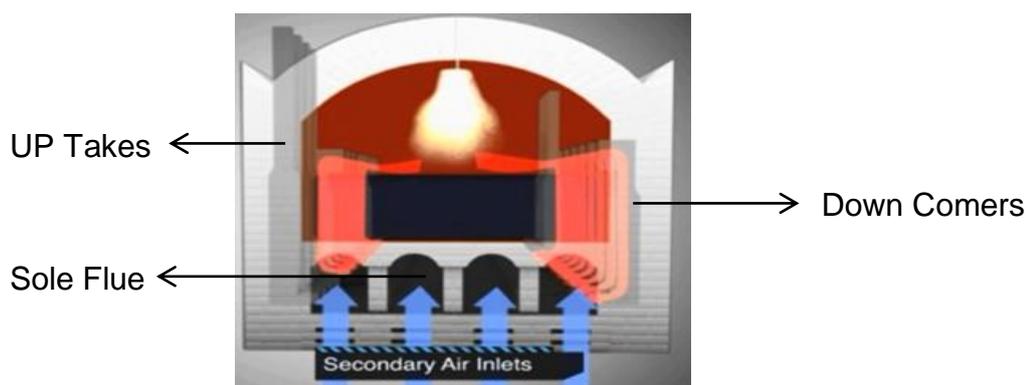
A Coqueria da tkCSA utiliza a tecnologia *Heat Recovery* para produção de coque e de vapor como subproduto do processo. A matéria volátil presente no carvão é utilizada como combustível para aquecimentos dos fornos. O ar necessário para ocorrer à combustão é succionado da atmosfera através de exaustores fazendo o processo trabalhar com pressão negativa.

Os fornos como mostra a **Figura 1**, possuem as seguintes dimensões, 13,3 metros de comprimento, 3,6 metros de largura e 2,4 metros de altura. O forno é dividido em duas câmaras de combustão, primária e secundária (topo e *Sole Flue* respectivamente). O topo é composto por seis entradas de ar e a soleira composta por dezesseis entradas de ar.



**Figura 1.** Dimensões do forno.

O processo de queima da matéria volátil ocorre em duas etapas. Primeiramente o ar succionado no topo dos fornos reage com os gases provenientes da massa de carvão enforada, nessa etapa ocorre à queima de aproximadamente 60% dos gases. Os gases remanescentes são succionados para a soleira pelos *Down Comers*. No *Sole Flue* o ar é distribuído nos dezesseis pontos onde ocorre a combustão secundária (remanescente). Após os gases percorrerem toda a extensão da soleira e serem queimados, os fumos são enviados aos coletores via *Up Takes*. A **Figura 2** exemplifica o processo de queima nos fornos.



**Figura 2.** Exemplificação da combustão no topo e soleira.

O coletor tem como objetivo transportar os gases queimados durante a combustão até as caldeiras onde a energia térmica será utilizada para a produção de vapor. Após essa etapa existe o processo de dessulfuração FGD (*Full Gas Desulfurization*) para limpeza dos gases antes de ser enviada a chaminé.

## 2 OBJETIVO

Como a admissão de ar (oxigênio) é de suma importância para o processo de coqueificação é necessário entender toda a combustão dos gases no interior do forno com o objetivo de otimizar a queima dos voláteis. Sendo assim temos como objetivo nesse trabalho realizar um estudo do comportamento térmico do fornos através da análise de temperatura, pressão e oxigênio.

Diante dos dados coletados será possível entender qual é o ponto máximo de injeção de oxigênio no topo dos fornos visto que é o ponto principal de queima dos gases.

Nos próximos tópicos do trabalho será apresentando as variáveis do processo, a taxa de liberação dos gases, o sistema de admissão de ar, teoria sobre a reação de combustão, o instrumento de medição de oxigênio, metodologia e os resultados obtidos.

## 3 INFLUÊNCIAS NO PROCESSO HEAT RECOVERY

A temperatura dos fornos deve ser mantida dentro da faixa ótima de operação para maximizar o processo de coqueificação.

Durante o processo de coqueificação a queima da matéria volátil, principal combustível do forno, sofre influência de vários parâmetros externos que afetam diretamente a temperatura dos fornos, sendo os principais mostrados na **Tabela 1**.

**Tabela 1.** Parâmetros externos que influenciam o processo de coqueificação.

INFLUÊNCIAS NO PROCESSO HEAT RECOVERY		
Matéria Prima	Estrutura dos Fornos	Controle de Processo
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Matéria Volátil</li> <li>● Umidade da mistura de carvão</li> <li>● Cinza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Projeto da soleira dos fornos</li> <li>● Sistema de isolamento dos fornos</li> <li>● Vedação das portas</li> <li>● Quantidade e projeto das entradas de ar</li> <li>● Qualidade do refratário</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Temperatura no início do enformamento</li> <li>● Altura da carga enformada</li> <li>● Densidade da massa enformada</li> <li>● Perda de calor</li> <li>● Volume da câmara de combustão</li> <li>● Cinza</li> <li>● Pressão de sucção dos gases</li> <li>● Volume de ar para combustão</li> <li>● Tempo de residência</li> <li>● Entrada de ar falso</li> <li>● Habilidade dos operadores</li> <li>● Disponibilidade de máquina</li> </ul>

Esses parâmetros afetam a geração de gases dentro do forno e consequentemente a combustão que mantém o forno aquecido pode perder eficiência.

## 4 GERAÇÃO DE GASES E QUEIMA NO FORNO

Logo após o enformamento da massa de carvão, inicia-se o processo de coqueificação, com a liberação de gases proveniente da matéria volátil. A geração de gases tende a seguir a curva teórica, apresentada na **Figura 3**.

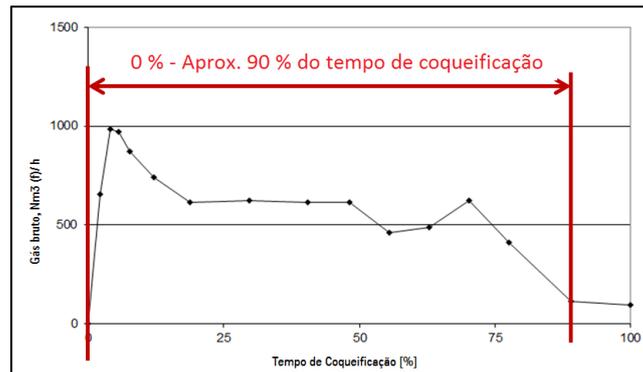


Figura 3. Geração de gases durante processo de coqueificação.

Com o objetivo de maximizar a queima e manter os fornos com a máxima temperatura possível durante o processo, o volume de ar succionado no forno deve acompanhar na mesma proporção às oscilações da geração.

Devido às influências que ocorrem no processo, a geração de gases tende a divergir da curva teórica, neste caso, o volume de ar succionado deve variar de acordo com a geração de gases real no forno.

No início do processo necessitamos de uma grande quantidade de ar para ocorrer à completa combustão, após aproximadamente 10 horas o volume de gás gerado começa a diminuir fazendo com que o gás enviado a soleira seja menor, conseqüentemente a quantidade de ar na soleira não necessita ser máxima.

No final do processo de coqueificação, os gases gerados são queimados somente na câmara primária, sendo assim, a quantidade de ar succionado deve ser reduzida, pois caso ocorra excesso de ar o mesmo irá reagir com o próprio coque, reduzindo o volume de produção (*Burn Loss*).

## 5 SISTEMA DE ADMISSÃO DE AR

A admissão de ar por um sistema automático denominado PID Combustão e visa garantir a combustão dos gases na soleira e topo dos fornos, uma vez que a admissão de ar se dará na mesma proporção da quantidade de gases gerados dentro do forno.

O PID Combustão trabalha em relação a temperatura dos fornos. As válvulas de admissão de ar abrem e fecham para garantir que a reação de combustão entre os gases provenientes da câmara primária com o ar da atmosfera seja completa.

O controle via PID Combustão, verifica durante todo o processo as variações de temperaturas e caso algum distúrbio ocorra as válvulas da soleira irão modular para otimizar a queima.

O controle da válvula do topo irá modular a válvula para que após certa temperatura e tempo de coqueificação, seja iniciado o fechamento gradual, a fim de otimizar a relação ar/ gás.

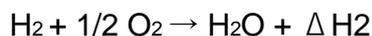
## 6 REAÇÃO DE COMBUSTÃO

De maneira geral, define-se combustão como uma reação química exotérmica entre duas substâncias ditas combustível e comburente, ocorrendo a alta temperatura e com ritmos intensos. Há uma grande variedade de materiais que podem ser

considerados combustíveis; porém, a maior parte daqueles empregados industrialmente é composta basicamente de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e nitrogênio. O comburente normalmente utilizado é o oxigênio do ar. Na prática, costuma-se denominar "combustão completa" ao processo que leva as substâncias combustíveis à sua forma mais oxidada e, "combustão incompleta" ao processo no qual os produtos de combustão são constituídos, em parte, por formas que representam oxidação parcial dessas substâncias.

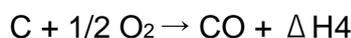
Quando o oxigênio fornecido ao processo é "teoricamente" o necessário e suficiente para oxidar completamente os elementos combustíveis, diz-se que a reação é estequiométrica. Quando a quantidade do oxigênio é maior, fala-se em excesso de oxigênio; em caso contrário, fala-se em falta de oxigênio, situação na qual não se pode realizar a combustão completa dos elementos constituintes do combustível.

Partindo das substâncias mais simples, formadas por elementos que estão presentes na maioria dos combustíveis, as reações de "combustão completa" seriam:

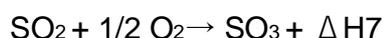
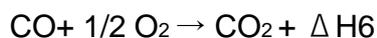


onde  $\Delta H1$ ,  $\Delta H2$  e  $\Delta H3$  representam a energia liberada por unidade de massa, ou volume ou outra unidade qualquer, normalmente referidas às substâncias combustíveis.

As reações denominadas de "combustão incompleta" seriam:



As substâncias resultantes destas últimas reações poderiam ainda ser oxidadas através das seguintes reações:



Neste caso, ter-se-ia, para as energias liberadas, as seguintes relações:

$$\Delta H6 + \Delta H4 = \Delta H1$$

e

$$\Delta H7 + \Delta H5 = \Delta H3$$

A ocorrência da reação "completa" ou "incompleta" depende de vários fatores, tais como: relação entre as massas de combustíveis e comburentes, temperatura na qual se processa a reação, tempo de permanência do combustível, presença ou não de catalisadores.

Como usualmente o oxigênio é retirado do ar atmosférico, fala-se em excesso de ar ou falta de ar, sendo este constituído, basicamente, de oxigênio (O<sub>2</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>).

A partir das reações básicas de combustão, é possível determinar a quantidade de ar a ser consumido, bem como a quantidade de gases a serem gerados, em massa e em volume.

Na maioria das vezes, a combustão se processa com quantidade de ar diferente da estequiométrica. Define-se então o coeficiente de ar ( $\lambda$ ) como sendo:

$$\lambda = \frac{\text{massa de ar utilizado}}{\text{massa de ar estequiometrico}}$$

Com esta definição, tem-se  $\lambda=1$  para combustão estequiométrica,  $\lambda>1$  para combustão com excesso de ar e  $\lambda<1$  para combustão com falta de ar (incompleta).

Nos processos industriais de combustão, a determinação de  $\lambda$  pode ser feita basicamente de duas maneiras: medindo as vazões (mássicas ou volumétricas em alguns casos) de combustível e ar de combustão, utilizando a expressão acima, desde que se conheça a massa de ar estequiométrica necessária, ou então, no caso de combustão completa, medindo os teores de CO<sub>2</sub> e/ou O<sub>2</sub> nos gases de combustão e calculando  $\lambda$  a partir desses valores. A determinação dos teores do CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> nos gases pode ser feita utilizando vários dispositivos hoje existentes, tais como: analisadores de absorção, dos quais o Aparelho de Orsat é o mais difundido, cromatógrafos, analisadores contínuos (paramagnéticos para O<sub>2</sub>, absorção de radiação infravermelha para CO<sub>2</sub>) e espectrômetro de massa.

Todos os instrumentos e dispositivos mencionados processam amostras de gases secos (após eliminada praticamente toda a água presente), motivo pelo qual os teores assim determinados se denominam em "base seca".

## 7 INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

O instrumento de medição de oxigênio tem como objetivo realizar análise dos gases de combustão na câmara primária (interior do forno) e no sole flue (secundária) por meio de ar primário e ar secundário de forma otimizada, é necessária a medição contínua do oxigênio nas duas saídas ('ducts') dos respectivos fornos.

Neste sistema, uma pequena parte do fluxo de gases de exaustão é retirada através de um tubo cerâmica interna por meio do princípio de injetor (utilização de ar comprimido) e conduzida sobre uma sonda externa de dióxido de zircônio. Esta sonda mede o teor de oxigênio a temperaturas de aprox. 600 até 700 °C. A estrutura montada está conforme as figuras 4,5, 6 e 7, no esquema abaixo:

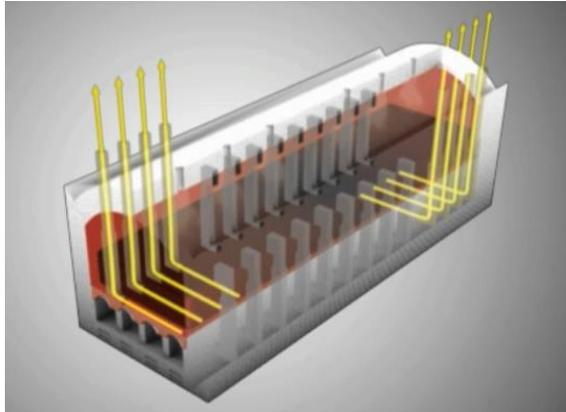


Figura 4. Fluxo de gás para up taker.

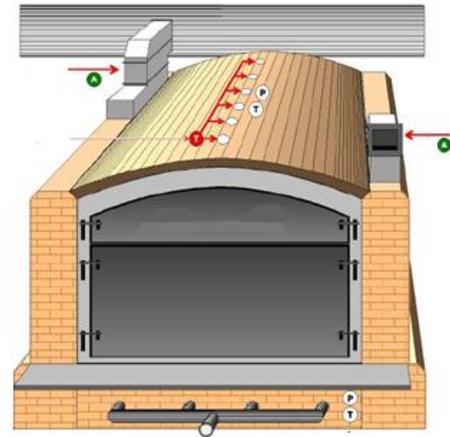


Figura 5. Posição de instalação dos analisadores.

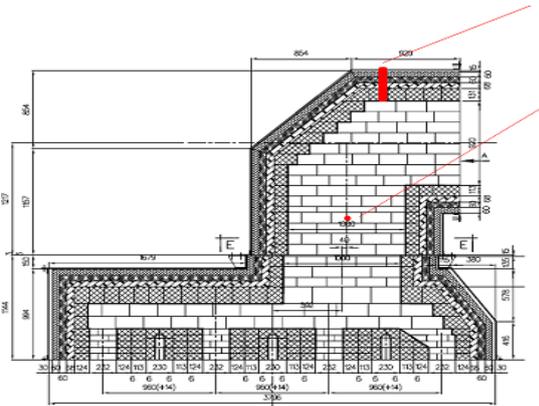


Figura 6. Ponto de instalação



Figura 7. O instrumento de medição

## 8 METODOLOGIA

Procurando entender o melhor ponto de admissão de ar nos fornos o acompanhamento do O<sub>2</sub> em excesso no forno com variações na vedação da porta do forno, conforme a figura 8:

	Vedação da porta do forno	
	Manta Cerâmica	Massa Refratária
1 Ciclo de Coqueificação ( 68hs)	X	X
2 Ciclo de Coqueificação ( 68hs)	X	
3 Ciclo de Coqueificação ( 68hs)		X

Figura 8. Metodologia para analisar o O<sub>2</sub> em excesso

## 9 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisamos o forno com a vedação com massa refrataria e com manta cerâmica, conforme a figura 9 e 10 , abaixo:

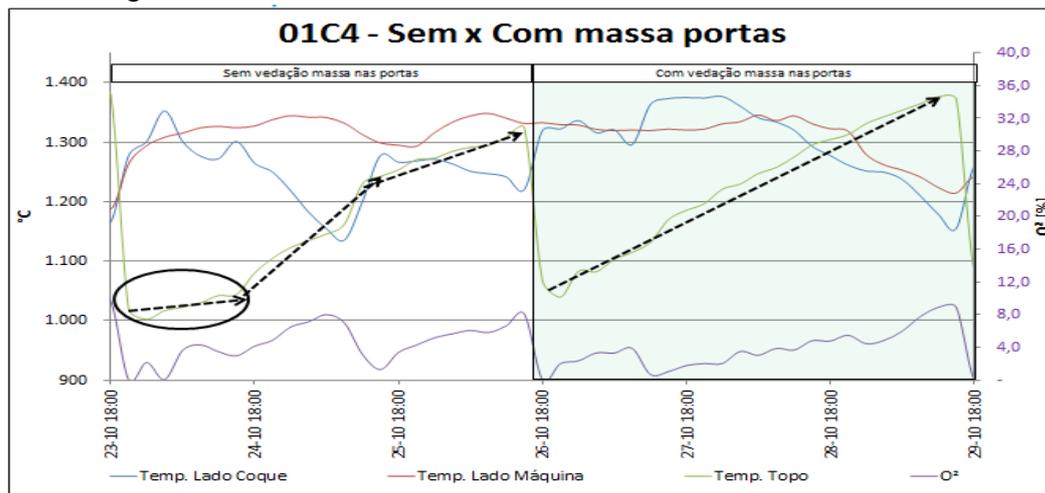
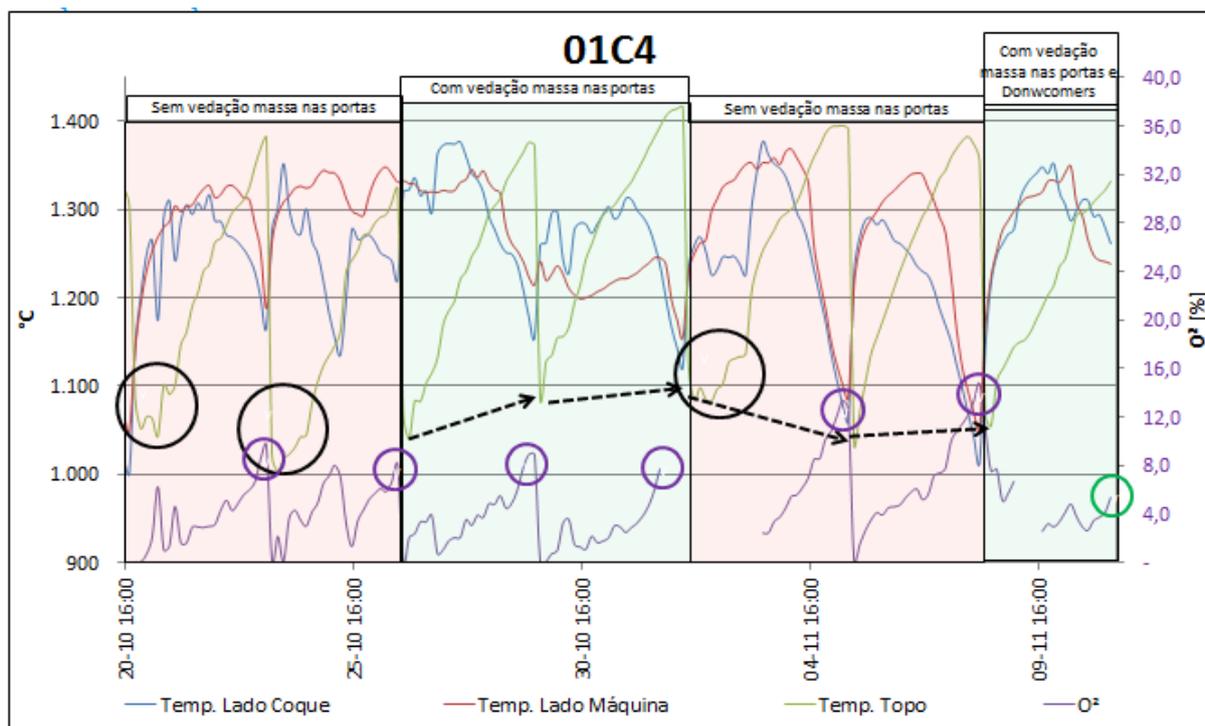


Figura 9. Gráfico de comparação entre a porta vedada com massa refratária

A massa refratária permite uma melhor estanqueidade no forno e com isso a admissão de ar é otimizada no início do processo de coqueificação evitando do coque no interior do forno no final do processo de coqueificação e permiti uma melhor distribuição de O<sub>2</sub> para o forno adjacente.



**Figura 10.** Gráfico de comparação entre a porta vedada com massa refratária

A quantidade de oxigênio em excesso para o forno do tipo *heat recovery* é 8% de O<sub>2</sub> sendo o ponto de medição depois da caldeira. No caso específico da Coqueria da tkCSA isso significa 60.000 m<sup>3</sup> de ar/ forno/dia. Sendo assim entender e saber a quantidade certa de comburente que está sendo injetada no interior do forno é fundamental para o processo. São utilizadas aproximadamente 4.5 toneladas de ar por tonelada de carvão enforado.

## 10 CONCLUSÃO

Conforme os dados apresentados no início do processo de coqueificação temos uma deficiência de oxigênio visto que é entre as dez primeiras horas que temos o maior volume de gás a ser queimando é a quantidade de comburente em excesso é inferior a 1%. Porém quando existe uma melhor vedação das portas é notório que o rendimento térmico do forno é superior ao sem vedação, pois a quantidade de oxigênio é distribuída de forma uniforme. Com isso é fundamental manter o forno completamente vedado durante todo o processo de coqueificação para que a queima dos gases seja otimizada e a distribuição de sucção para os fornos adjacentes.

## REFERÊNCIAS

- 1 **Coelho, Robson Jacinto. Modelos de previsão de qualidade metalúrgica do coque a partir da qualidade dos carvões individuais e do coque obtido no forno piloto de coqueificação da CST. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2003. Silva, J.E.; Oliveira, A.F. Evolução do uso de carvões “soft” e “steam coal” na coqueria Heat Recovery e impactos na qualidade do coque e no custo da mistura. 45º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2015, Rio de Janeiro – RJ.**
- 2 **Junqueira, Y.S.F.; Coelho, R.J.; Henrique, N.I.; at all. Stamping Charger com automatismo” - Compactação da massa de carvões - Estudo teórico e análise prática na tkCSA. 44º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2014, Belo Horizonte, MG.**
- 3 **Henrique, N.I.; Junqueira, Y.S.F.; Coelho, R.J.; Henrique, N.I.; at all. PID Combustão – Um melhor controle para queima dos gases em coqueria Heat Recovery. 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2016, Rio de Janeiro, RJ.**
- 4 **Henrique, N.I.; Coelho, R.J.; Junqueira, Y.S.F.; at all. Reparo a quente nos coletores de gases de combustão, através da projeção de massa refratária com vídeo monitoramento. 46º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, 2016, Rio de Janeiro, RJ.**
- 5 **Ronald Kim, Franz-Josef Schuecker. Coke Oven with optimized control and method of control. Patent Publication Number: 20090032382. Date of Patent: Jun 18, 2013.**
- 6 **Westbrook, Richard W. Coke oven flue gas sharing. Patent Publication Number: US6596128 B2. Date of Patent: Jul 22, 2003.**