

PROCESSO DE CALCINAÇÃO DA CAL CALCÍTICO EM FORNOS MAERZ CALCINATION PROCESS OF LIMESTONE LIME IN MAERZ OVENS

Luiz Antônio da Silva Felício*
Rúben Christian Barbosa*

RESUMO

Foi realizado um estudo sobre a produção de cal calcítico em fornos Maerz através da calcinação do carbonato de cálcio. Existem vários modelos de fornos que são utilizados para realizar o processo de calcinação, foi, o estudo em específico realizado foi em fornos verticais do tipo Maerz. Tal modelo tem como principais características sua eficiência que pode chegar até 35% maior em termos de baixos custos e a possibilidade de trabalhar com calcário (CaCO_3) onde pode ser usado um range de granulométrico extenso. O calcário muda suas características em função dos níveis de decomposição da mina, sendo que de acordo com a bancada de exploração tem uma mudança nas características físico-química do material o que afeta a taxa de decomposição térmica do CaCO_3 . No processo foi utilizado o combustível LDG no forno em estudo. O LDG é um gás proveniente do sopro dos convertedores da Aciaria de uma usina de fábrica de aço, as características do LDG é seu baixo poder calorífico, não ultrapassando 2500KcalNm³ por causa da sua grande concentração de gás inerte e sua variação constante de qualidade, o forno referido no processo é da fabricante Maerz, ele tem um processo de produção contínuo com alimentação em bateladas, o desligamento do mesmo por longos períodos independente do motivo acarreta em uma grande perda térmica devido o desligamentopor falta de combustível e que irá afetar a qualidade do material posteriormente, por isso a disponibilidade operacional é extremamente importante.

Palavras-chave: Calcário calcítico. LDG. Forno Maerz.

ABSTRACT

A study was carried out on the production of calcitic lime in Maerz kilns through calcination of calcium carbonate. There are several models of kilns that are used to carry out the calcination process, the specific study carried out was in Maerz type vertical kilns. The main features of this model are its efficiency, which can reach up to 35% higher in terms of low costs, and the possibility of working with limestone (CaCO_3) where an extensive range of granules can be used. Limestone changes its characteristics as a function of the mine's decomposition levels, and according to the exploration bench there is a change in the physical and chemical characteristics of the material, which affects the rate of thermal decomposition of CaCO_3 . In the process, LDG fuel was used in the furnace under study. LDG is a gas coming from the blowing of converters in the melt shop of a steel plant, the characteristics of LDG are its low calorific value, its large concentration of inert gas and its constant quality variation, the furnace referred to in the process is from Maerz manufacturer, it has a continuous production process with batch feed, its shutdown for long periods regardless of the

Formatado: Recuo: Primeira linha: 0 cm

*Rede de Ensino Doctum – Unidade Serra – luizantoniofelicio@outlook.com – graduando em engenharia de Produção.

**Rede de Ensino Doctum – Unidade Serra - prof.ruben.barbosa@doctun.edu.br (orientador do trabalho)

reason leads to a large thermal loss which will affect the quality of the material later, so operational availability is extremely important.

Keywords: Calcitic limestone. LDG. Oven Maerz

1- Introdução

A cal é um produto obtido do resultado da decomposição térmica do calcário calcítico, dolomítico ou conchas calcárias. O processo de calcinação consiste em aquecer uma substância a altas temperaturas, sem atingir o seu ponto de fusão, de forma a conseguir que ocorra a separação química do material mais volátil com menos volátil (BOYNTON, 1980).

O Forno Maerz consiste em dois eixos verticais e um canal cruzado de conexão. Ambos os eixos trabalham um com o outro. Enquanto um calcina o produto, o outro pré-aquece o calcário. Na cuba de queima, a cal é calcinada em fluxo paralelo. Os gases de combustão quentes são transferidos através do canal de passagem para a cuba que está regenerando, onde o calcário é pré-aquecido na área superior da cuba. A direção do fluxo dos gases é invertida em intervalos regulares. Isso permite que ocorra o pré-aquecimento regenerativo do calcário (o calcário na zona de pré-aquecimento do forno atua como trocador de calor) e assim para o aproveitamento máximo do calor contido nos gases do forno (Maerz_2002).

Há três zonas nos fornos de fabricação cal: pré-aquecimento, calcinação e resfriamento, sendo o tempo de residência total do material de aproximadamente 36 horas (MAERZ, 2002).

O calcário são rochas formadas a partir do mineral calcita, cuja composição química contém mais de 50% de CaCO_3 , sendo provavelmente a matéria prima mais utilizada na indústria (SANTANA, 2002). Em geral, uma rocha com porosidade natural desprezível e estrutura interna densa, condições essas que variam conforme sua origem geológica: calcários mais antigos possuem uma estrutura física interna mais compacta quando comparados aos calcários de idade geológica mais recente, que possuem uma estrutura física mais porosa (HAYASHI, 1996). O ambiente de deposição é importante, porque determina o tamanho, forma, pureza, e outras economicamente significativas características do depósito de rocha carbonática (FREAS, HAYDEN e PYOR, 2006).

O gás utilizado no processo é o LDG, gerado na aciaria durante o sopro de oxigênio nos conversores ou convertedores. Durante este processo ocorre a oxidação dos elementos contidos no ferro-gusa (carbono e outros minerais), gerando a

elevação da temperatura do metal e a eliminação dos elementos indesejáveis no aço. Logo após o início do sopro a formação de CO + CO₂ é iniciada, porém o determinante para que a recuperação de gás seja iniciada são os teores de CO e O₂. Em média recupera-se o gás situado entre o segundo e o décimo sexto minuto de sopro, o que corresponde a 70~80% do total de gás gerado em uma corrida (CAPUTO, 2009).

A principal característica de uma indústria é a eficiência, caracterizada por uma série de fatores, principalmente relacionados com a qualidade dos produtos e questões financeiras. Na produção para se obter resultados, é importante priorizar alguns pontos, e o combustível é um deles. As fontes de combustíveis exercem grande influência na qualidade do produto, nos custos de processo de fabricação e na taxa de emissão de poluentes. Assim, a escolha do combustível é de extrema importância para todo o sistema produtivo (SOARES, 2007).

O trabalho objetivou realizar um estudo sobre a produção de cal calcítico em fornos Maerz através da calcinação do carbonato de cálcio onde foram [analisadas](#) as pressões do forno quando é [utilizado](#) o calcário de bancadas diferentes. Para isso, procedeu-se a uma revisão bibliográfica, caracterização da matéria prima, monitoração do gás LDG, análise da eficiência térmica [do forno](#) da disponibilidade [de operação](#).

2- Referencial teórico

2.1- Calcário

O calcário é, em geral, uma rocha com porosidade natural desprezível estrutura interna densa, condições essas que variam conforme sua origem geológica, calcários mais antigos possuem uma estrutura física interna mais compacta quando comparados aos calcários de idade geológica mais recente, que possuem uma estrutura física mais porosa (HAYASHI, 1996). O ambiente de decomposição é importante porque determina o tamanho, forma, pureza, e outras economicamente significativas características do depósito de rocha carbonática (FREAS, HAYDEN e PYOR, 2006).

A classificação brasileira atual divide os calcários quanto à concentração de óxido de magnésio (MgO), em (INCAPER, 2007):

- Calcário calcítico – menor que 5%;
- Calcário magnesiano – entre 5% e 12%;

- Calcário dolomítico – maior que 12%.

2.2- Granulometria do calcário

A granulometria do calcário tem influência significativa na sua taxa de decomposição durante a calcinação, que pode ser inibida devido às zonas de altas concentrações de CO₂ preso nos interstícios das partículas da rocha ou nos interstícios do leito (SOARES, 2007). A forma compactada pode ocorrer quando há excesso de material fino na alimentação dos fornos de calcinação. Isso torna mais lento o processo de decomposição, podendo até interromper o fluxo do CO₂ já liberado, provocando paradas indesejáveis à operação (SAMPAIO e ALMEIDA, 2008).

2.3- Fornos Maerz verticais

A calcinação é realizada em diferentes tipos de reatores, tais como: forno vertical (forno de cuba), intermitente ou contínuo, forno rotativo e forno de leito fluidizado (TRAJANO, 1969).

Um forno PFR (forno de eixo regenerativo de fluxo paralelo) consiste em dois eixos verticais e um canal cruzado de conexão. Ambos os eixos trabalham um com o outro. Enquanto um calcina o produto, o outro pré-aquece a pedra. No poço de queima, a cal é calcinada em fluxo paralelo. Os gases de combustão quente são então transferidos através do canal de passagem para o eixo sem combustão, onde pré-aquecem o calcário em contrafluxo na área superior do eixo. A direção do fluxo dos gases é invertida em intervalos regulares. Isso permite que ocorra o pré-aquecimento regenerativo da pedra (a pedra na zona de pré-aquecimento do forno atua como trocador de calor) e, assim, para o aproveitamento máximo do calor contido nos gases do forno, conforme a Figura 01.

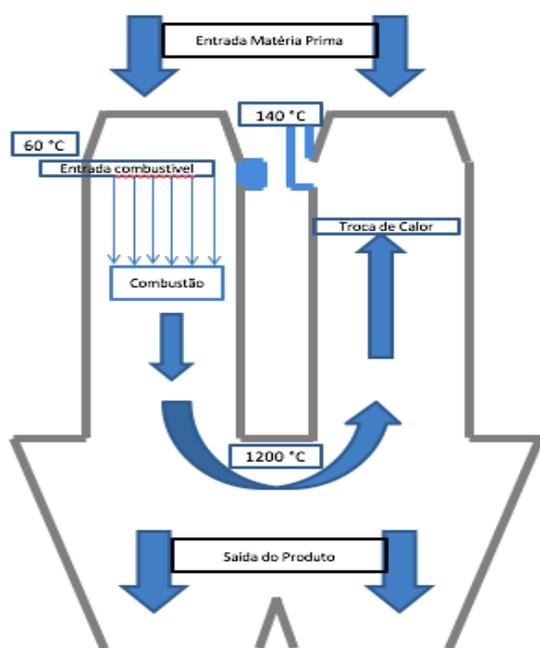


Figura 01: Sistema de funcionamento do forno Maerz

Fonte: Maerz (2012)

2.4- Preaquecimento

O pré-aquecimento ocorre na parte superior do forno Maerz, o material com granulometria variando entre 25 e 100 mm entra com a temperatura ambiente (20°C) e vai realizando troca térmica com os gases da combustão por aproximadamente entre 5 e 6 horas, chegando a mais de 750 °C. A temperatura não é suficiente para realizar a calcinação do material, porém é iniciado o processo de dissociação da estrutura cristalina e a alteração da morfologia, o que acaba ajudando o processo de decarbonatação.

A cuba em que está regenerando o calcário absorve a energia térmica dos gases que sobem pela zona de queima, ocasionando a transferência direta de calor contra a corrente. Na cuba em queima, o calcário libera parte do seu calor para pré-aquecer o ar de combustão descendente (contribuindo com a combustão na ponta das lanças) em transferência direta de calor com fluxo paralelo (Marz 2002).

2.5- Combustão

No processo de combustão a carga permanece no forno a certo tempo de modo que ocorra a transformação das rochas calcárias em cal virgem da forma mais completa possível. A uma temperatura de dissociação do carbonato de cálcio é em torno de 900 °C. Na zona de combustão o material tem contato direto com a chama. Nesse forno citado, existem duas cubas com 33 lanças verticais que injetam de forma homogênea o combustível, as lanças entram na parte superior da zona de preaquecimento e se dispõem no meio da carga descendente (MAERZ, 2002).

É extremamente importante que a distribuição de calor ocorra da forma mais homogênea possível para que o material descarbonate totalmente. A Cuba em que está em queima recebe calor pelo ar de combustão da cuba que está regenerando conforme a [Figura 02](#). As mais altas temperaturas são geradas na parte superior da zona de queima, portanto a cal não é “exposta” a alta temperatura no final da zona de queima. Na Cuba em regeneração a calcinação continua ocorrendo lentamente com o calor recebido dos gases de queima vindos do canal de conexão (MAERZ, 2002).

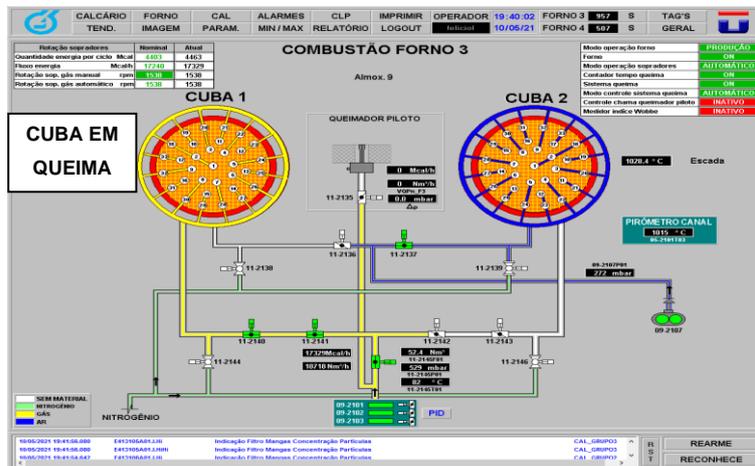


Figura 02: Cuba em queima

Fonte: Lhoist (2021)

2.6- Resfriamento

A cal produzida nesses fornos pode chegar a mais de 1000 °C e essa temperatura tem que ser reduzida, esse processo é feito através de sopradores de ar de resfriamento, conforme a Figura 03, a cal é refrigerada até 100 °C com ar

atmosférico introduzido dentro do forno e aproveita o calor para auxiliar o processo de combustão. Há Sopradores de ar de resfriamento que promovem o fluxo de ar da parte inferior até o topo do forno, aquecendo progressivamente em contato com a cal. O resfriamento ocorre nas duas cubas simultaneamente, porém com vazões diferentes entre as cubas. A troca de calor é de baixo para cima onde o ar dessa troca de calor é reaproveitado. Ao resfriar a cal ela é beneficiada de acordo com os pedidos dos clientes (MAERZ, 2021).

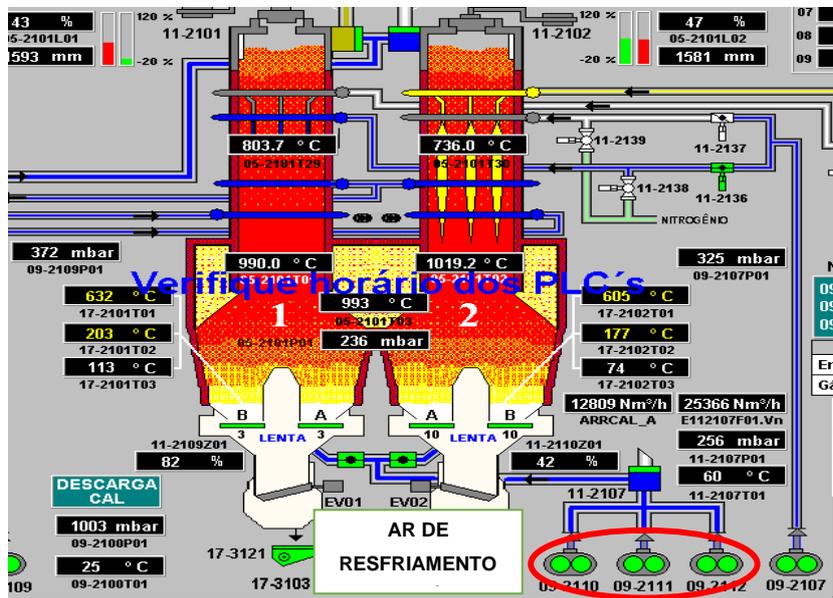


Figura 03: Ar de resfriamento das lanças

Fonte: Lhoist (2021)

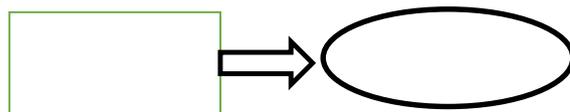
2.7- Combustível usado no processo

O combustível utilizado é o gás LDG (“Linz-Donawitz gas”) proveniente de um processo de aciaria durante o sopro de oxigênio nos conversores ou convertedores, nos conversores ficam o gusa líquido, a escória e a sucata de aço sólida, é injetado Oxigênio (O₂) puro, que é conhecido como o sopro de Oxigênio. Após isso, o C e o Si são oxidados gerando calor. Na Figura 04 segue um esquema representativo do processo de aciaria.

Podem ocorrer dois sopros, o primeiro sopro é para a oxidação do material, o segundo é para queimar o Monóxido de Carbono (CO), ainda dentro dos

Formatado: Fonte: Itálico

Comentado [RB1]: O que significa a sigla LD? Não foi apresentada anteriormente no texto.



convertedores para continuar gerando calor para fundir as sucatas. Nesse processo são produzidos alguns gases, geralmente saem a altas temperaturas e ainda possuem uma porcentagem de Óxido de Ferro (FeO), escória e outros componentes (FREITAS, 2012).

Gases são formados durante esse processo nos convertedores, alguns passam por processos de purificação para serem descartados (FREITAS, 2012), outros acabam fazendo parte do restante do processo, como no caso do Gás LDG, usado como combustível do processo de calcinação aqui em estudo.

Normalmente para ser recuperado o gás deve possuir mais de 30% de CO na composição e menos de 2% de O₂, então é necessário retirá-lo no tempo correto, aproximadamente do segundo minuto até o décimo sexto minuto após o sopro. Esse gás possui um poder calorífico médio entre 1500 a 2500 [kCal/Nm³](#) e como depende de muitas variáveis para a sua produção, acaba ocasionando uma variação de seu poder calorífico (MAGALHÃES, 2010).

O poder calorífico do combustível é medido de forma online com um calorímetro CWD 2000 UNION APPARATEBAU GMBH da empresa Alemã. Com os dados fornecidos pelo calorímetro sobre o valor calorífico que o gás se encontra (PCI), é possível avaliar a injeção do combustível no forno, também é possível correlacionar com a injeção de combustível no forno e a perda energética de acordo com a diminuição do poder energético do gás. Um combustível com o seu valor calorífico baixo, pode fazer a operação injetar uma quantidade elevada de gás nos fornos e vindo a causar pressão alta nos fornos.

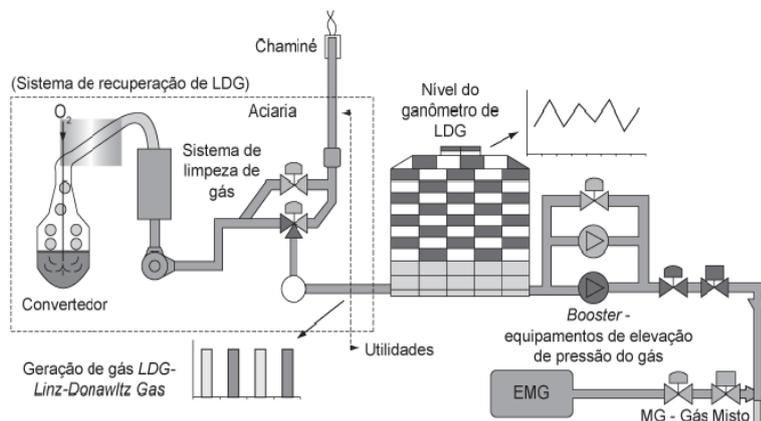


Figura 04: Captação de gás LDG

Fonte: Gestão e produção.

2.8- Calcinação

Uma característica do processo de calcinação é o uso de uma fase gasosa para transferir o calor necessário e, simultaneamente, arrastar, o mais rápido possível, os produtos gasosos gerados na decomposição, para um melhor desempenho do processo, sendo muito importante o controle da pressão do CO_2 a estequiometria da reação estabelece que 1 Kg de calcário (CaCO_3) origina cerca de 560 g de cal (CaO) e cerca de 440 g de dióxido de carbono (CO_2) (CUNHA et al., 1949).

Calcinação é o tratamento térmico a que é submetido, notadamente carbonatos e hidratos, para remoção de CO_2 , água e outros gases “ligados fortemente, quimicamente” a essas substâncias (ROSENQUIST, 1983). A calcinação é um processo endotérmico, que é usado principalmente na produção de óxidos, na [Figura 05](#) mostra as etapas que o [calcário](#) pode passar até se transformado em [cal](#).



Figura 05: Amostra de [cal](#)

Fonte: Lhoist (2021)

3- Metodologia

O presente trabalho foi realizado utilizando dados de pesquisas experimental e exploratória onde foram realizadas coletas de cal e calcário e analisadas na Lhoist do Brasil. A base da pesquisa é bibliográfica onde buscou-se artigos científicos relacionados sobre o processo de calcinação da cal [calcítica](#).

3.1- Matéria prima

As [matérias primas](#) utilizadas nos fornos de calcinação devem ser conhecidas e analisadas antes que o material entre no processo. Saber a composição química do material, sua característica cristalina, resistência a crepitação e sua granulometria são essenciais para que se façam os ajustes corretos no processo. Normalmente a carga

de um forno recebe mais de um tipo de material, com isso se torna mais desafiador ter um produto com qualidade sem que ocorra transtorno no processo.

3.2- Análise Granulométrica

A fração granulométrica no forno em estudo é de 0 a 100 mm, que foi avaliada quanto a distribuição de tamanho das partículas nas amostras coletadas antes da entrada do material no forno. As peneiras utilizadas foram de 100, 75, 60, 40, 25,10 e 5 milímetros (LHOIST, 2021). A identificação granulométrica é mostrada na Tabela 01.

Tabela 01: Análise granulométrica de agosto de 2021

	P100	P75	P60	P40	P25	P10	P5
1/08	0	7,14	28,82	53,37	5,47	3,57	0,34
2/08	0	9,36	41,59	44,11	9,66	2,471	0,42
3/08	0	3,77	54,53	35,42	3,37	1,12	0,34
4/08	0	6,01	38,28	48,29	4,06	1,12	0,38
5/08	0	8,25	31,96	46,82	7,62	3,01	0,4
6/08	0	14,98	28,38	47,20	5,72	2,15	0,24
7/08	0	6,31	36,88	41,59	8,67	3,96	0,53
8/08	0	13,19	35,67	41,93	5,97	1,74	0,26
9/08	0	8,27	30,29	52,01	6,47	1,03	0,42
10/08	0	5,41	52,88	33,58	4,93	1,41	0,47
11/08	0	10,70	31,61	50,95	3,02	1,65	0,42
12/08	0	11,82	33,91	45,12	5,28	2,48	0,4
13/08	0	15,72	25,60	47,32	5,64	3,69	0,37
14/08	0	10,95	34,14	41,01	8,08	4,03	0,29
15/08	0	15,94	33,14	36,16	8,19	3,86	0,51
16/08	0	15,24	28,98	47,97	4,57	2,22	0,24
17/08	0	8,3	25,78	56,97	5,64	1,45	0,36
18/08	0	11,77	30,90	45,18	6,84	3,07	0,5
19/08	0	9,30	35,77	48,08	3,46	1,52	0,34
20/08	0	11,22	30,21	47,40	5,08	4,31	0,3
21/08	0	15,10	32,78	39,12	7,15	3,79	0,36
22/08	0	15,81	31,35	40,89	6,24	2,79	0,5
23/08	0	9,68	29,08	51,37	5,39	2,67	0,26
24/08	0	15,78	30,84	42,55	5,07	3,32	0,37
25/08	0	11,57	31,01	48,73	5,43	1,78	0,38
26/08	0	8,19	36,45	49,15	3,34	1,19	0,43
27/08	0	12,26	17,14	64,38	14,67	2,04	0,38
28/08	0	11,85	19,72	65,94	11,02	1,95	0,41
29/10	0	6,35	25,5	51,45	8,53	5,31	0,59
30/10	0	10,06	30,89	45,01	8,32	3,48	0,33
31/10	0	12,22	36,87	51,24	7,96	2,42	0,27
Media/ Mês:	10,72	32,61	47,10	6,47	2,60	0,38	

Fonte: Autor (2021ANO)

Formatado: Fonte: Não Negrito

3.3- Composição Química

Para as bancadas de calcário que foram utilizadas para o estudo, foram feitas uma análise de sua composição química. As amostras foram submetidas à análise via espectrometria de fluorescência de Raio-x e analisador de carbono e enxofre.

Para realizar a análise multielementar por fluorescência de Raios X foi utilizado o equipamento Raio X modelo MDX 1000 (Oxford Instruments NanoAnalysis, Reino Unido) e o gás utilizado foi o argometa (Argônio 90% + Metano 10%). Tal equipamento tem como base operacional a análises dos raios X emitidos pelos elementos químicos presentes na amostra, após os mesmos serem excitados. Após a excitação, cada elemento emite linhas espectrais características, sendo que de acordo com a intensidade relaciona a quantidade do elemento presente na amostra. Outro equipamento utilizado para realizar a caracterização química da amostra foi o SC-144DR LECO (Leco Corporation, [Suíça](#)) que é um instrumento de quantificação simultânea de carbono e enxofre, a partir de um detector de infravermelho (LHOIST, 2021).

3.4- Gás LDG

O PCI do gás LDG foi monitorado por medições online. O equipamento utilizado para medição foi o Calorímetro CWD2000 (UNION APPARATEBAU GMBH, Alemanha), que mede o poder calorífico, índice de Wobbe, peso específico incluindo célula de densidade incorporada (Figura 06), e seu resultado é enviado via [DeviceNet](#) para o supervisor no painel central.

A determinação do número de Wobbe e a densidade, poderão ser realizados por meio das medições do equipamento calorímetro ou através da relação entre a densidade relativa e o poder calorífico (Equação 01).

$$W_{inf} = \frac{\text{Poder Cal orífico Inferior (Volume)}}{\sqrt{\text{Densidade Relativa do Ar}}} \quad (1)$$

É possível verificar os diferentes gases e seus desempenhos energéticos quando relacionados a um mesmo queimador, se possuir o mesmo número de Wobbe significa que possui o mesmo desempenho para aquele queimador (BIZZO, 2003).

Através dos equipamentos de medições usados para capturar os resultados de PCI e através dos dados de qualidade química do gás e do seu condensado é possível traçar um paralelo de comparação da variação do PCI e o resultado final de produção. De acordo com a Figura 07 os sopradores de injeção de gás LDG funciona em função do PCI que se encontra no momento da leitura no CWD 2000.



Figura 06: Calorímetro

Fonte: Lhoist 2021

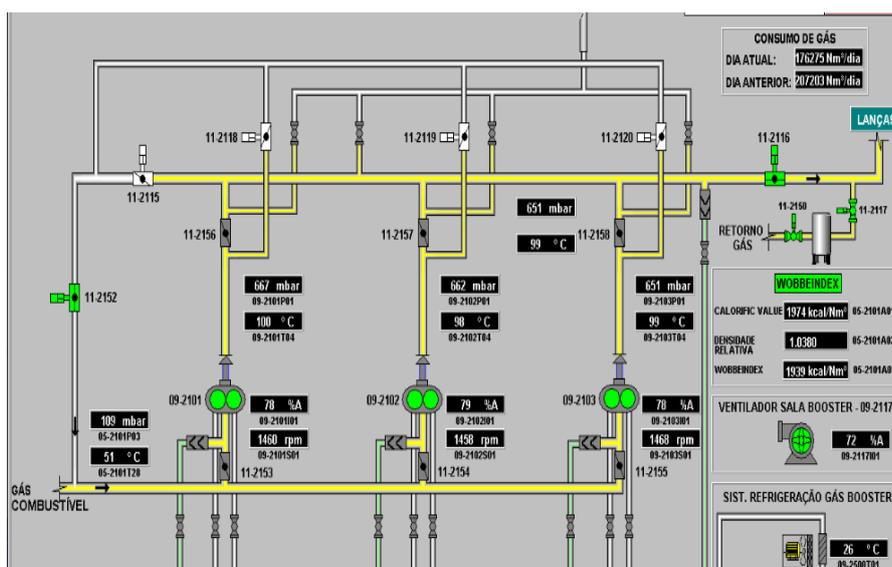


Figura 07: Injeção de gás LDG

Fonte: Lhoist (2021)

3.5- Eficiência Térmica

O poder calorífico do gás LDG nesse processo não é estável e o mesmo foi avaliado quanto a sua perda energética de acordo com o decaimento do poder calorífico do gás LDG, foi utilizado a lei do resfriamento de Newton. A lei de resfriamento de Newton nos diz que a taxa de transferência de calor é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre uma massa e a outra.

A utilização do calculado foi com base na lei de resfriamento de Newton, representado pela (Equação 2) levando em consideração o modelo de balanço de energia para sistema fechado, ou seja, o escoamento do fluido é totalmente interno, e para comprovar como a temperatura dos componentes sofre variação pela transferência de calor por convecção (Equação 3) (INCROPERA; DEWITT, 2003).

$$q''_s = h(T_s - T_m) \quad (2)$$

em que:

q''_s = taxa de transferência de calor

h = coeficiente local de transferência de calor

T_s = temperatura da superfície

T_m = temperatura média do fluido

$$q_{conv} = mC_p(T_{m,s} - T_{m,e}) \quad (3)$$

em que:

q_{conv} = taxa de transferência de calor no tubo

m = taxa de fluxo de massa

C_p = Coeficiente Térmico

$T_{m,s}$ = temperatura média de saída do fluido

$T_{m,e}$ = temperatura média de entrada do fluido

Os elementos que compõe o gás LDG tem um coeficiente térmico diferente, com isso é possível saber qual elemento interfere na perda energética do processo na figura-Figura 08 mostra quando o PCI perde valor as temperaturas do processo tambemtambém diminuem e com isso a uma necessidade dos sopradores injetarem mais combustivelcombustivel nos fornos e com isso acaba elevando as pressões.

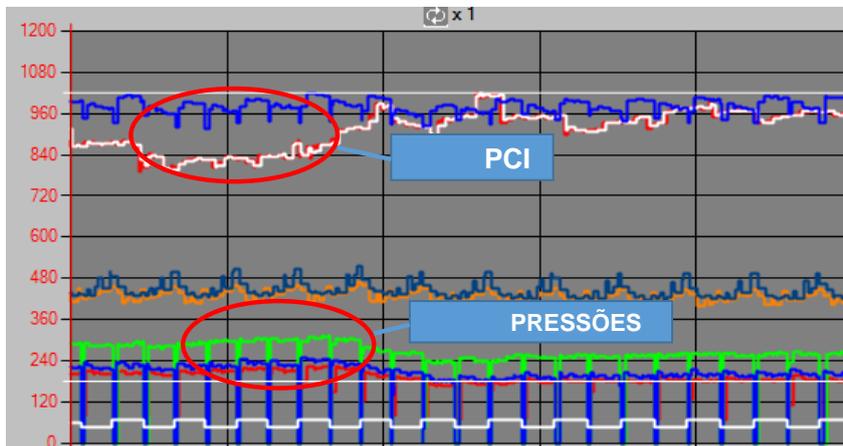


Figura 08: PCI e Pressões

Fonte: Ihoist (2021)

3.6- Disponibilidade operacional

Disponibilidade operacional é a probabilidade de que um sistema estará disponível, quando acionado de uma forma aleatória, num ponto do tempo (BERQUÓ, 2014).

Por se tratar de um processo de operação contínua é necessário que não ocorra interrupções. Em trocadores de calor quando ocorrem paradas na injeção de calor, a temperatura tende a dissipar para o meio. Apesar de em fornos verticais Maerz terem quatro camadas de material refratário e isolante com baixa condutividade térmica, sempre haverá perdas de energia térmica. Na retomada de operação após desligamento de um forno, grande parte da energia injetada é absorvida pelo corpo do trocador de calor para que entre novamente em equilíbrio térmico. Resumidamente equilíbrio térmico é o estado em que se igualam as temperaturas de dois corpos, as quais, em suas condições iniciais apresentavam diferentes temperaturas. Uma vez que as temperaturas são equiparadas o fluxo de calor é interrompido, chegando ambos os corpos a este equilíbrio térmico (INCOPRERA, 1990).

Os fatores que influenciam a disponibilidade operacional são:

- Falta de combustível e/ou matéria prima;
- Quebra de equipamentos;
- Problemas operacionais;

Os desligamentos dos fornos foram avaliados durante dois meses e foi possível avaliar os principais motivos das interrupções que afetam o processo de fabricação de cal.

Ao fazer uma análise das interrupções dos fornos durante o período foi dividido a quantidade de horas paradas nos dois meses pelos motivos que causaram as interrupções

Na primeira etapa do processo, a zona de pré-aquecimento é importante que o material saia da temperatura ambiente e chegue a uma favorável para que a reação aconteça mais facilmente. Essa parte do processo é necessária que o forno tenha um sistema de despoejamento via filtro de processo, isso fara com que as partículas mais finas sejam retiradas do forno, evitando que chegue a zona de calcinação. Apesar de não haver reação durante o pré-aquecimento do material, as ligações químicas começam a ficar mais fragilizadas o que irá facilitar a dissociação.

Quando o material entra efetivamente na zona de calcinação ele tende a retrain, já que ocorre uma perda de 44% de sua massa. Na zona de combustão é necessário que o tempo e a temperatura sejam adequados para o material que está calcinando (SOARES, 2007). Em fornos Maerz cada cuba tem 33 lanças que injetam o combustível, as lanças do centro possuem placas de orifício 20% menor do que as lanças da extremidade, para homogeneizar a distribuição de calor dentro do forno. Os gases quentes têm mais facilidade para passar no centro do forno já que na extremidade pode ocorrer a formação de camadas limites

A quantidade de ar ou de combustível em uma reação de um determinado processo de combustão é determinada pela razão de Ar-Combustível ou de Combustível-Ar (MORAN; SHAPIRO, 2009).

A relação Ar/gás deve ser alterada de acordo com a carga do forno. Materiais mais densos e com granulometrias maiores que 75 mm exigem que o forno trabalhe com a quantidade de ar maior que 100% da relação estequiométrica com o combustível. Isso favorece que a reação de combustão aconteça e forme chamas mais duras. Já calcários com distribuição granulométrica menor que 75 mm, devem trabalhar com quantidade de ar menor que 100% da relação estequiométrica com o combustível, pois necessitam de uma quantidade menor de energia. Chamas com valores abaixo da relação ar/combustível são mais longas e mais brandas (LHOIST, 2020).

É necessário realizar inspeção periódica nas lanças de distribuição de combustível. O combustível utilizado tem muitas impurezas que acarretam incrustações nas lanças, estas incrustações devem ser detectadas e retiradas para manter o fluxo de combustível normalizado. A Figura 09 mostram os mangotes onde ocorre a entrada de combustível no forno. A Figura 10 mostra as incrustações que podem ocorrer nos mangotes.



Figura 09: Mangotes de injeção de LDG

Fonte: Lhoist (2021)



Figura 10: Obstrução de mangotes de injeção de LDG

Fonte: Lhoist (2021)

Com os dados de paradas do mês de análise foi elaborada uma relação com a qualidade do produto, onde se pode notar a relação.

Na última etapa do processo, o resfriamento do material é necessário que a quantidade de ar de resfriamento seja suficiente para resfriar a cal e absorver o calor que irá auxiliar na combustão, cales muito quentes mostra que está tendo uma perda de energia térmica e material com temperatura abaixo de 100 °C indica um excesso na quantidade de ar de resfriamento. No forno em estudo a quantidade de ar de resfriamento é de aproximadamente 0,60 m³/KgCal.

4- Resultados das discussões

4.1- Composição Química do Calcário

A análise realizada durante o estudo foi utilizada a fluorescência de raios x e se encontra na Tabela 02.

Tabela 02: Percentual da composição do calcário, técnica de fluorescência de Raios x

CALCÁRIO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	P
BANCO 780	0,07	0,05	0,1	54,42	0,13	0,07

BANCO 795	0,67	0,06	0,27	52,48	0,07	0,06
BANCO 810	0,42	0,02	0,12	53,8	1,49	0,06
BANCO 820	0	0,03	0,06	55,65	0,08	0,04
BANCO 830	0	0,03	0,09	55,4	0,124	0,06
BANCO 845	0	0,01	0,04	55,61	0,07	0,07
BANCO 860	0	0,02	0,08	55,63	0,06	0,07

Fonte: Mota (2014)

No calcário analisado a uma grande quantidade de impurezas que podem até mudar a composição química do material de acordo com os níveis das bancadas citadas na Tabela 02. A composição química de cada bancada está relacionada com formação geológica do material a composição química do material tem que ser analisada e de acordo com a sua composição pode saber se [é](#) viável para o processo. Analisando a quantidade de contaminantes é possível saber o CaO total disponível depois da descarbonatação e assim pode indicar o seu uso específico.

Tabela 03: Teores de S e CO₂ no calcário

CALCÁRIO	S (% massa)	CO ₂ (% massa)
BANCO 780	0,049	44,80
BANCO 795	0,389	44,36
BANCO 810	0,074	44,34
BANCO 820	0,045	45,45
BANCO 830	0,026	45,07
BANCO 845	0,025	45,15
BANCO 860	0,009	45,38

Fonte: Mota (2014)

No calcário analisado das bancadas citado na Tabela 02 a sílica (SiO₂) é um dos principais contaminantes o calcário para o uso em metalúrgica deve conter menos de 2% de sílica (Luz e Linz, 2008) um calcário com grandes quantidades de sílica pode ser prejudicial ao processo. As bancadas analisadas no estudo podem ser utilizadas no processo siderúrgico.

A cal é utilizada na siderurgia como um dessulfurante e por isso ela deve conter o teor de enxofre menor que 0,10% no calcário para ser eficaz no processo. Na bancada que foram avaliadas a bancada 795 se encontra com um teor de enxofre mais elevado sendo assim não recomendado para utilizar no processo, mas se feito a uma homogeneização com outras bancadas e os níveis de enxofre ficar abaixo do estabelecido poderá ser utilizado.

4.2- Análise Granulométrica

O material que vai ser enviado para o processo de calcinação deve ser analisado a sua granulometria antes do envio, caso seja necessário será feito algumas mudanças nos parâmetros dos fornos. A granulometria do calcário utilizado e mostrado na tabela a seguir onde para se obter um bom funcionamento dos fornos sem que ocorra colagem no processo a minha distribuição granulométrica tem que estar entre 40 e 70 mm. Um calcário com granulometria menor que 40 mm a sua superfície de contato com o calor é maior e pode calcinar com menor tempo. Esse material fino depois de calcinado se continuar recebendo calor ele pode passar para a fazer líquida e formar aglomerado quando for resfriado.

As análises de calcário são feitas diariamente para que o operador ou o engenheiro de processo possa avaliar a granulometria e alterar os parâmetros se houver necessidade. A uma inspeção diária na pilha de calcário e uma comunicação com os colaboradores da mina onde é extraído o mesmo para que se tenha uma visão mais ampla do processo.

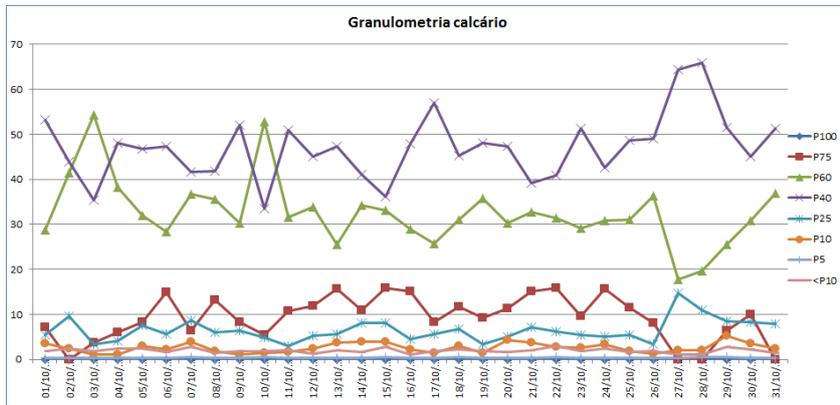


Figura 09: Variação granulométrica do calcário

Fonte: O autor

4.3- Eficiência energética

O forno vertical em estudo é totalmente automatizado e de acordo com a leitura online do poder calorífico do combustível o sistema vai variando a quantidade de gás a ser injetado para que a quantidade energia se mantenha estável. Porém de acordo com que o PCI diminui, ocorre uma perda energética para que a reação de combustão aconteça. Para avaliar a quantidade de energia térmica perdida foi simulado uma

situação com uma produção de 460 ton/dia e 830 Kcal/KgCal de consumo térmico. Todos os parâmetros se mantiveram estáveis, apenas o poder calorífico alterou, conforme mostrado na Tabela 04.

O combustível entra no forno a aproximadamente 60 °C e sai acima de 140 °C, todo o gás que entra e não libera energia acaba roubando energia do sistema, pois sua temperatura de saída é maior.

De acordo com a Tabela 04, quanto maior a quantidade de gases inertes o volume de gás injetado no forno aumenta, isso ocorre para que a quantidade de energia pedida pelo sistema se mante estável, porém como mostrado na última coluna, quanto maior é quantidade de gás injetado maior também é perda energética podemos ver que mesmo aumentando a quantidade de gás, o CO que é efetivamente o combustível não se altera.

Tabela 04: Resultado da perda energética de N₂ e CO₂

Consumo Kcal/Kg Cal	PCI Kcal/m ³	CO ₂ %	N ₂ %	Volume de gás m ³ /h	CO ₂ Kg/h	N ₂ Kg/h	Perda Energia CO ₂ Mcal/h	Perda Energia N ₂ Mcal/h	Perda Energia Total %	Perda Consumo Térmico Kcal/KgCal
830	2050	0	0	6067	0	0	0	0	0	0
830	2300	8,69	15	7951	1367,98	1536,13	104,1	135,05	1,31	10,99
830	2250	10,35	15	8128	1665,41	1570,33	126,74	138,05	1,45	12,16
830	2200	12,01	15	8312	1976,13	1605,88	150,39	141,18	1,59	13,39
830	2150	13,67	15	8506	2301,65	1643,36	175,16	144,47	1,75	14,68
830	2100	15,33	15	8708	2642,34	1682,39	201,08	147,9	1,91	16,03
830	2050	16,98	15	8920	2999,66	1723,34	228,28	151,5	2,08	17,44
830	2000	18,64	15	9144	3375,34	1766,62	256,87	155,31	2,25	18,93
830	1950	20,3	15	9378	3769,75	1811,83	286,88	159,28	2,44	20,49
830	1900	21,96	15	9625	4185,19	1859,55	318,5	163,48	2,64	22,14
830	1850	23,62	15	9885	4622,93	1909,78	351,81	167,89	2,84	23,87
830	1800	25,28	15	10159	5084,76	1962,72	386,95	172,55	3,06	25,7
830	1750	26,94	15	10450	5573,66	2018,94	424,16	177,49	3,29	27,64
830	1700	28,6	15	10757	6090,74	2078,25	463,51	182,7	3,53	29,68
830	1650	30,26	15	11083	6639,36	2141,24	505,26	188,24	3,79	31,86
830	1600	31,91	15	11429	7222,04	2208,08	549,6	194,12	4,07	34,16

Fonte: Lhoist (2021)

4.4- Combustível

O gás LDG é proveniente dos convertedores LD, sua composição varia de acordo com a eficiência do processo siderúrgico e da quantidade de gás captado. De acordo com a mudança na composição química do gás, seu poder calorífico também varia. Normalmente a mudança está relacionada a porcentagem de CO e CO₂ na composição, um é inversamente proporcional ao outro, de acordo com a queda do PCI a porcentagem de CO diminui, pois é o único elemento presente no gás que efetivamente é um combustível, os outros componentes são gases inertes.

4.5- Disponibilidade Operacional

Foram avaliada a pressão do ar de combustão do forno durante o uso do calcário da bancada 845,830 e 795 durante um [período](#) de dez meses e foi tirado uma [média](#) mensal da pressão do processo de calcinação em forno [Maerz](#) quando o mesmo estava [utilizado](#) calcário de diferentes bancadas podendo identificar que quando o forno trabalha com calcário das bancadas 845 e 830 as pressões ficam mais elevadas passando de 300 mbar que não é o ideal para o processo de calcinação e para os equipamentos já com o uso do calcário da bancada 795 a pressão manteve mais [estáveis](#) e [próximo](#) ao ideal que é 250 mbar.

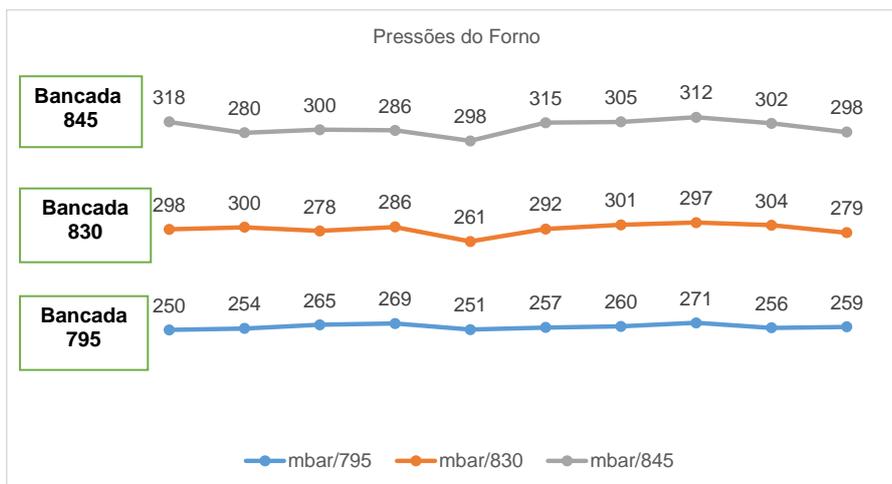


Figura 11: Pressão no processo de calcinação

Fonte: O autor

5- Considerações Finais

A partir dos resultados e discussões que foram obtidos nesse trabalho, pode-se notar como a matéria prima, que a qualidade do calcário é essencial para que o forno tenha uma boa operação.

Com as análises físicas e químicas realizadas no calcário pode notar que apesar da pouca diferença na composição química, cada camada tem sua característica. Dentro do material analisado, a bancada 795 enxofre alto foi a que necessitou da menor quantidade de energia para descarbonatar e a 845 a maior, a bancada 830 foi a que apresentou maior perda de massa e a maior pureza.

Foi possível notar como o perfil granulométrico flutua, sendo necessário fazer ajuste na temperatura do forno para se adequar. Mais de 90% do material tem granulometria acima de 40mm, porém o restante são pequenas partículas que caso não se tenha um ajuste adequado da temperatura do forno e do perfil da chama, pode

vir a ocasionar um problema. A bancada analisada, sendo a que fica na parte superior da mina a 830 mostra uma grande perda de massa onde o material crepita muito e vindo gerar grande quantidade de material fino no interior do forno e com isso o forno trabalha com pressões mas elevadas isso mostra que os equipamentos podem trabalhar mas sobrecarregado enquanto a bancada analisada a 795 a mais inferior da mina a diferença de pressão é significativa onde o forno trabalha com pressão média de 273,5 mbar ficando próximo ao ideal que é 250 mbar

O gás LDG mostrou bastante variação no seu poder calorífico no período analisado. De acordo com a queda da sua qualidade, a quantidade de energia perdida é maior, já que a quantidade gases inertes aumenta. A relação CO e CO₂ é inversamente proporcional, de acordo com que o PCI aumenta a quantidade de CO₂ diminui. De acordo com a relação PCI e Reatividade é possível afirmar que o gás influencia diretamente na qualidade do produto. Além da perda energética, quando o PCI cai à temperatura da chama também diminui o que causa mais um impacto negativo para o processo.

Analisando as paradas que ocorreram no forno notou que o principal motivo de ocorrências é a falta de combustível, as paradas foram ocasionados por falta de gás. Tal problema não tem gerenciamento, já que o combustível é fornecido diretamente pelo cliente. Relacionando a quantidade de paradas diárias com a qualidade do produto, observou-se que quanto maior as horas de forno desligado, maior será a interferência na especificação do produto no final, por isso é necessário trabalhar para diminuir a quantidade horas paradas gerenciáveis.

Para que o processo sofra o menor impacto possível é preciso ter uma boa avaliação da matéria prima que está entrando no forno, podendo assim fazer ajustes necessários. A criação de uma malha de controle que compense a quantidade de energia perdida quando o PCI cai também ajudaria minimizar tal problema. Com relação as paradas, é necessário focar os esforços no motivo gerenciável para poder diminuir o impacto.

Referências

BERQUÓ, J. E. *Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade: O trinômio da Operacionalidade*. 2014. MSC. Disponível em <http://www.dcabr.org.br/download/artigos/msc_49.pdf> Acesso em: 10 set. 2021.

BIZZO, W. A. Geração, Distribuição e Utilização de Vapor. 2003. 128f. Apostila de Curso – Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP. 2003. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br>> Acesso em: 10 de setembro de 2021.

BOYNTON R. S. *Chemistry and Technology of Lime and Limestone*. 2^o Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1980.

CAPUTO, P. D. *Utilização de Syngas em substituição de combustíveis gasosos em Processos Siderúrgicos*. 2009. 72f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, 2009.

CUNHA, J. *Indústria Brasileira de cal*. DNPM – Laboratório da Produção Mineral (LPM). 1949.

FREAS, R. C., HAYDEN, J. S., PRYOR Jr., C. A. *Limestone and Dolomite, in Industrial Minerals and Rocks*. 7^o Edition., Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2006.

FREITAS, H. L. *Análise Numérica da Eficiência da Separação Gás-Líquido do Lavador de Gás da ArcelorMittal Monlevade*. 2012. 128f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

HAYASHI, A. M. (1996). *Estudo do Efeito dos Parâmetros Físicos e Químicos de Adsorvente Sólido no Processo de Adsorção do SO₂ em calcário*. Dissertação de Mestrado. Campinas, SP: UNICAMP.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2003. 698 p.

LHOIST.https://www.lhoist.com/br_br/transformando-rocha-em-cal-calc%C3%ADtica-ou-dolom%C3%ADtica. Acesso em 10 setembro.2021

ROSENQVIST, T. *Principles of Extractive Metallurgy*. 2^a ed. Mc Graw-Hill, 1983.

LUZ, A.B.; CAMPOS, A.R.; CARVALHO, E.A.; BERTOLINO, L.C.; SCORZELLI, R B. (2008). ArgilaCaulim. In: Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações, Adão B. Luz e Fernando Lins (Edit.), p. 256-294, CETEM/MCT, 2008

MAGALHÃES, L. C. *Estudo de Gaseificação da Lama de Alto Forno da ArcelorMittal Tubarão*. 2010. 67f. Dissertação (mestrado de Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Geração de Energia) – Faculdade de Engenharia dos Campos de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. *Princípios da Termodinâmica para Engenharia*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2009. 800 p.

MOTA, J. L. *Análise das Propriedades Físico-Químicas de Calcários Calcíticos Depositados em Diferentes Níveis da Jazida da Região de Matozinhos (MG)*. 2014. Monografia – Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2014.

OXFORD MDX1000: *Espectrômetro WDX de Fluorescência de Raio X. ZAF Sistemas Analíticos Tecnologia que Funciona*. Disponível em: <http://zafsistemas.wix.com/zaf#!__oxford/mdx> Acesso em: 10 de setembro de 2021.

SOARES, B. D. *Estudo da Produção de Óxido de Cálcio por Calcinação do Calcário: Caracterização dos Sólidos, Decomposição Térmica e Otimização Paramétrica*. 2007. 82f. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2007.

SANTANA, E. R. R. (2002). *Caracterização e Reconstrução Mineralógica de Carvão, Caulim, Calcário e de Cinzas Sulfatadas Geradas à Temperatura de um Leito Fluidizado Visando sua Aplicação na Indústria Cimenteira*. Tese de Doutorado. Porto Alegre, RS: UFRGS.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Cidade Universitária, RJ: *Rochas e Minerais Industriais, Calcário e Dolomito*, 2008. 2ª Ed. Disponível em: < <http://cetem.gov.br>> Acesso em: 25 de agosto de 2021.

The MAERZ. *Parallel Flow Regenerative Lime Kiln Maerz*. Maerz, 2002.

TRAJANO, R.B. *Curso de Metalurgia Extrativa Geral*. PUC/RJ, 1969.

UNION APPARATEBAU GMBH. *Equipamento calorímetro*. Manual. 2006.