



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS I
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL**

ROSIMARY RAMOS DE OLIVEIRA MASCARANHAS

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE FORNOS DESTINADOS A
CALCINAÇÃO DO GESSO NO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**

**CAMPINA GRANDE
2016**

ROSIMARY RAMOS DE OLIVEIRA MASCARANHAS

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE FORNOS DESTINADOS A
CALCINAÇÃO DO GESSO NO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado a Coordenação do curso de Química Industrial pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba em cumprimento a exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Química Industrial.

Orientadora: Dra. Vera Lúcia Meira Morais

**CAMPINA GRANDE
2016**

É expressamente proibida a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano da dissertação.

M395e Mascaranhas, Rosimary Ramos de Oliveira.
Estudo da eficiência energética de fornos destinados a calcinação do gesso no polo gesseiro do Araripe [manuscrito] / Rosimary Ramos de Oliveira Mascaranhas. - 2016.
58 p. : il. color.

Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

"Orientação: Profa. Dra. Vera Lúcia Meira Morais, Departamento de Química".

1. Gipsita. 2. Gesso. 3. Fornos. 4. Eficiência térmica. I. Título.

21. ed. CDD 660.282

ROSIMARY RAMOS DE OLIVEIRA MASCARANHAS

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE FORNOS DESTINADOS A
CALCINAÇÃO DO GESSO NO POLO GESSEIRO DO ARARIPE**

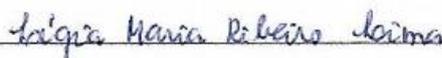
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentando a Coordenação de Química Industrial pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba em cumprimento a exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Química Industrial.

Nota: 10,0 (Dez e dez)

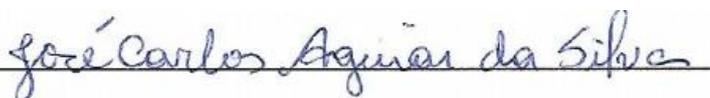
Aprovado em: 31 / outubro / 2016



Prof^ª. Dr^ª. Vera Lúcia Meira Moraes
CCT/DQ/UEPB
Orientadora



Prof^ª. Dr^ª. Lígia Maria Ribeiro Lima
CCT/DESA/UEPB
Examinadora



Dr. José Carlos Aguiar da Silva
Embrapa Algodão
Examinador Externo

*A minha família pelo apoio incondicional
em todos os momentos.*

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À Deus;

A meus pais, Josefa Ferreira e Severino Ramos, irmãs, Sayonara e Socorro Ramos e irmão, Carlos Alberto.

A meu esposo e parceiro de todas as horas, Edson Mascaranhas e a razão de minha vida, minha filha Marina Oliveira.

A Coordenação do Curso de Química Industrial, hoje representada pelos Professores Doutores Hélvia Araújo e Arimateia Nóbrega, pelo apoio e compreensão. Finalmente!

A Professora Maria de Fátima, Coordenadora de Estágio Supervisionado, por seus ensinamentos e postura profissional e pessoal. És uma grande mulher abençoada por Deus.

A Professora Dr^a Vera Lúcia por aceitar essa orientação e por acreditar em minha capacidade intelectual, finalmente Professora. Obrigada!

A professora Dr^a Lígia Maria e o Dr. José Carlos Aguiar da Silva (Embrapa Algodão) pelo prestígio da presença em minha banca de defesa.

Aos professores, Dr^a Vanúcia França, José Duarte (eterno Zezé), José Elias da Silva (Curso de Matemática) e Wagner Brandão. Muito obrigada por tudo.

A turma do Curso de Química Industrial ano 2013.2 nas pessoas de Carlos, Shelton, Pâmela e Thayse, obrigada por me aceitarem na turma e fazerem com que os últimos dias tenham sido tão especiais.

A Paulo Valeriano, Iremar Silva e Sr. Campos, empresa Rei de Ouro Alimentos, pelo estágio e início de minha experiência profissional. Aprendi muito com todos vocês. Obrigada.

Ao CEPIS, (Centro de Produção Industrial Sustentável) pela oportunidade de trabalhar em projetos voltados ao estudo do gesso, principalmente na pessoa de Aluzilda Oliveira, Coordenadora dos Projetos.

E por fim, sem desmerecer a importância, agradeço a todos que contribuíram para conclusão dessa formação.

RESUMO

A gipsita (sulfato de cálcio dihidratado - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um minério natural e de grande ocorrência no Brasil e no mundo. Basicamente é constituída 79% de sulfato de cálcio e 21% de água de cristalização. Quando desidratada, a gipsita perde até 1,5 moléculas de água e transforma-se o que comercialmente se designa de gesso (hemidrato de sulfato de cálcio dihidratado - $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). O “Polo Gesseiro do Araripe” (PGA), situa-se no extremo oeste do estado, a cerca de 700 km da capital pernambucana, Recife, e abrange os Municípios de Araripina, Bodocó, Exú, Ipubí, Ouricuri e Trindade. A produção de gesso por meio de uma transformação termoquímica da gipsita compreende as seguintes etapas: extração da gipsita, britagem, calcinação ou desidratação térmica, moagem e ensilagem. A gipsita sofre sucessivas perdas de água de cristalização quando é aquecida e apresenta duas transformações endotérmicas quando aquecida a uma taxa de aquecimento próxima a $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Na primeira, a 100°C , perde 75% da sua água de cristalização e transforma-se em hemidrato, e na segunda, a 200°C , perde os 25% restantes de água de cristalização e transforma-se em anidrita, que não possui valor comercial. A lenha é a principal fonte energética empregada pelas empresas, segundo dados do SINDUSGESSO e IBAMA-PE. O processo de fabricação consome grande quantidade de energia térmica obtida através da combustão da biomassa renovável. Segundo dados do SINDUSGESSO, há em operação no PGA cerca de 270 fornos do tipo barriga quente. Para esses equipamentos, as principais possibilidades de intervenção são: recuperação de calor, controle automático e monitoramento, melhoria do isolamento térmico e uso de lenha picada. A determinação da eficiência energética de um sistema, geralmente é muito relevante, visto que, ela indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal sem que haja perdas, pois para a indústria perdas implica maiores custos. Esse trabalho buscou avaliar a eficiência térmica dos fornos de duas empresas pertencentes ao Polo Gesseiro do Araripe com a utilização de lenhas em toras e cavaco como combustíveis. Foi possível observar que os fornos estudados podem ter a eficiência elevada se alguns ajustes no sistema de recuperação de calor, calcinação e qualidade da combustão forem realizados.

Palavras-chave: Gipsita; Gesso; Fornos; Eficiência Térmica.

ABSTRACT

Gypsum (calcium sulfate dihydrate. - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is a natural ore and high occurrence in Brazil and in the world. Basically it compound 79% calcium sulfate and 21% water of crystallization. When dehydrated, gypsum loses up to 1,5 water molecules and becomes what is known commercially gypsum (calcium sulfate hemihydrate dihydrate - $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). The "Plasterer's Center of Araripe" (PGA), is located at the western end of the state, about 700 km from the capital of Pernambuco, Recife, and covers the municipalities of Araripina, Bodocó, Exú, Ipubi, Ouricuri and Trindade. The production of gypsum through of a thermochemical transformation of gypsum comprising the following steps: extraction of gypsum, crushing, calcination or thermal dehydration, milling and ensiling. The gypsum undergoes successive loss of water of crystallization when it's heated and it has two endothermic transformation when heated to a next heating rate $10^\circ \text{C} / \text{min}$. At first, at 100°C , it loses 75% of its water of crystallization and becomes hemihydrate, and the second at 200°C , it loses the remaining 25% of crystallization water, and turns into anhydrite, which it hasn't commercial value. The firewood is the main energy source used by companies, according to SINDUSGESSO and IBAMA-PE data. The manufacturing process consumes large amounts of thermal energy it obtained from the combustion of renewable biomass. According to SINDUSGESSO data, there is in operation on the PGA about 270 ovens of the type "barriga quente". For these devices, the main intervention possibilities are: heat recovery, automatic control and monitoring, improved thermal insulation and use of chopped firewood. The determination of the energy efficiency of a system, it is usually very important, since it indicates how much a real equipment come close to ideal behavior without that there is losses, so for the industry some losses implies higher costs. This study aimed to evaluates the thermal efficiency of ovens of two companies belonging to the Plasterer's center of Araripe with the use of firewood in logs and wood chips as fuel. It was observed that the studied ovens it may have high efficiency to some adjustments in the heat recovery system, calcination and combustion quality are realized.

Keywords: Gypsum; Plaster; Furnaces; Thermal Efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Composição química média da gipsita	19
Figura 2 –	Variedades de gipsita: cocadinha (a); Johnson ou pedra branca (b); rapadura (c) e alabastro (d)	20
Figura 3 –	Percentual dos tipos de gipsita encontradas no Polo Gesseiro do Araripe	20
Figura 4 –	Fluxograma do processo de produção do gesso	23
Figura 5 –	Estoque de gipsita	23
Figura 6 –	Alimentação de gipsita na tremonha	24
Figura 7 –	Britadores de mandíbulas	24
Figura 8 –	Rebritador	24
Figura 9 –	Forno tipo “barriga quente” para produção de gesso externamente sem câmara de combustão (a); forno “barriga quente” interno (b); câmara de combustão de forno “barriga quente”	26
Figura 10 –	Moinho	27
Figura 11 –	Ensacamento	28
Figura 12 –	Estoque de produto acabado e expedição	28
Figura 13 –	Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo panela.	30
Figura 14 –	Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo marmita.	31
Figura 15 –	Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo rotativo tubular	32
Figura 16 –	Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo marmita rotativo.	33
Figura 17 –	Energia química nas reações de combustão	35
Figura 18 –	Representação dos municípios que compõem o Polo Gesseiro do Araripe - PGA	43
Figura 19 –	Medidores de umidade: (a) para madeira; (b) por infravermelho.	45

Figura 20 –	Pesagem da lenha (a); metragem da lenha (b) e pesagem do cavaco (c)	46
Figura 21 –	Analisador de gases de combustão (a); Medição de gases <i>in situ</i> (b)	46
Figura 22 –	Paredes do forno com destaque para a fornalha (a); Termômetro por infravermelho (b)	47
Figura 23 –	Consumo de lenha por tonelada de gesso produzido.	50
Figura 24 –	Energia gerada e consumida em <i>KWh</i>	55
Figura 25 –	Eficiência térmica dos fornos	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Propriedades físicas da gipsita e suas características	19
Tabela 2 –	Características dos diferentes tipos de fornos para calcinação	34
Tabela 3 –	Composição do ar seco	35
Tabela 4 –	Porcentagens em volume de CO ₂ e O ₂ nos gases de combustão e o excesso de ar através da análise dos gases da combustão.	38
Tabela 5 –	Indicadores de desempenho e acompanhamento da Empresa A	48
Tabela 6 –	Indicadores de desempenho e acompanhamento da Empresa B	49
Tabela 7 –	Informações sobre as perdas de calor pela chaminé nas empresas A e B	51
Tabela 8 –	Perdas de energia nas paredes do forno das empresas A e B	52
Tabela 9 –	Quantitativo de lenha relacionada as perdas de energia nas paredes do forno das empresas A e B	53
Tabela 10 –	Custo das perdas de energia nas paredes do forno das empresas A e B.	53
Tabela 11 –	Energia gerada pelas paredes do forno, gases de combustão, consumo do combustível e eficiência dos fornos referente as visitas de medições <i>in situ</i> .	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASSOGESSO	Associação Nacional dos fabricantes e comerciantes de gesso e seus derivados
BPF	Óleo combustível derivado de petróleo
CBE	Companhia Brasileira de Equipamento
CEPIS	Centro de Produção Industrial Sustentável
DEQ	Departamento de Engenharia Química
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
FA	Fundação Araripe
IBAMA-PE	Superintendência do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ITEP	Instituto Tecnológico de Pernambuco
LPQ	Laboratório de Processos Químicos
PaqTc	Parque Tecnológico da Paraíba
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PGA	Polo Gesseiro do Araripe
PMFS	Planos de Manejo Florestal Sustentável
SINDUSGESSO	Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

LISTA DE SÍMBOLOS

η_{MD}	Eficiência pelo método direto
\dot{Q}_f	Calor fornecido pelo combustível (<i>kW</i>)
\dot{Q}_u	Calor útil (<i>kW</i>)
\dot{m}_c	Vazão mássica de combustível (<i>kg/s</i>)
\dot{m}_v	Vazão mássica de vapor (<i>kg/s</i>)
h_a	Entalpia da água de entrada (<i>kJ/kg</i>)
h_v	Entalpia do vapor produzido (<i>kJ/kg</i>)
<i>A</i>	Coefficiente estequiométrico
a.C.	Antes de Cristo
$C_{(s)}$	Fuligem
$CaSO_4$	Anidrita insolúvel
$CO_{(g)}$	Monóxido de carbono
$CO_{2(g)}$	Dióxido de carbono
$H_2O_{(v)}$	Vapor de água
<i>K</i>	Somatório de todas as perdas exceto as perdas pela chaminé
<i>kg</i>	Quilograma
<i>km</i>	Quilometro
<i>Mcal</i>	Megacalorias
<i>mm</i>	Milímetro
<i>Mt</i>	Mega tonelada
$^{\circ}C$	Graus Celsius
<i>st</i>	Metros estéreos
η	Eficiência térmica (%)
λ	Coefficiente de excesso de ar.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	HISTÓRICO E COMPOSIÇÃO DA GIPSITA	18
2.2	TIPOS DE GIPSITA	19
2.3	PRODUÇÃO DA GIPSITA	20
2.4	APLICAÇÕES E IMPORTÂNCIA DA GIPSITA E DO GESSO	21
2.5	PROCESSO PRODUTIVO DO GESSO	23
2.5.1	Descrição das etapas de produção	23
2.5.1.1	<i>Gipsita (estoque in natura)</i>	23
2.5.1.2	<i>Britagem</i>	23
2.5.1.3	<i>Rebritagem</i>	24
2.5.1.4	<i>Moagem</i>	24
2.5.1.5	<i>Calcinação</i>	25
2.5.1.6	<i>Pulverização</i>	27
2.5.1.7	<i>Estabilização</i>	27
2.5.1.8	<i>Embalagem</i>	28
2.5.1.9	<i>Estoque de produto acabado e expedição</i>	28
2.6	FORNOS	28
2.6.1	Fornos para calcinação do gesso	30
2.6.1.1	<i>Forno tipo panela</i>	30
2.6.1.2	<i>Forno tipo marmita vertical</i>	30
2.6.1.3	<i>Forno rotativo tubular</i>	31
2.6.1.4	<i>Marmita rotativo ou “barriga quente”</i>	33
2.7	COMBUSTÃO	35
2.7.1	Perdas de calor na combustão	38

2.8	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	38
2.8.1	Mecanismos de transferência de calor	39
2.8.2	Eficiência térmica de fornos	40
2.8.2.1	<i>Método Direto</i>	40
2.8.2.2	<i>Método Indireto</i>	41
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	43
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	43
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	
3.2.1	Empresa A	44
3.2.2	Empresa B	44
3.3	ANÁLISE DOS DADOS	45
3.3.1	Determinação da umidade do combustível (lenha/cavaco)	45
3.3.2	Consumo de (lenha/cavaco) e energia gerada pelo combustível	46
3.3.3	Diagnostico dos gases da chaminé	46
3.3.4	Transferência de calor pelas paredes dos fornos	47
3.3.5	Eficiência Térmica dos fornos	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO COMBUSTÍVEL (LENHA/CAVACO)	48
4.2	CONSUMO DE (LENHA/CAVACO) E ENERGIA GERADA	48
4.3	DIAGNOSTICO DOS GASES DA CHAMINÉ	50
4.4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELAS PAREDES DOS FORNOS	51
4.5	EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS FORNOS	54
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
6	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A gipsita (sulfato de cálcio dihidratado - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é um minério natural e de grande ocorrência no Brasil e no mundo. Sua composição básica é compreendida de 79% de sulfato de cálcio e 21% de água de cristalização. Quando desidratada, a gipsita perde até 1,5 moléculas de água e transforma-se no que se designa de gesso (hemidrato de sulfato de cálcio - $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). A característica mais importante do gesso é a capacidade de se reidratar, como também o fenômeno de tempo de pega que possibilita um tempo médio de trabalhabilidade importante para determinadas atividades comerciais, como a construção civil, etc (BENACHOUR, 2001).

As aplicações da gipsita são encontradas em diversos setores industriais. Segundo Lyra Sobrinho (2001), ela pode ser utilizada na fabricação de cimento, tintas, discos, pólvora, botões, fósforos, na correção de solos, no acabamento de tecidos de algodão, e como distribuidor e carga de inseticidas e de papel. Outras aplicações também podem ser verificadas na fabricação de cerveja, aumentando sua dureza, no polimento de chapas estanhadas e como *filler* na construção de estradas asfaltadas. A indústria química utiliza a gipsita e a anidrita para obter vários produtos, dentre os quais podem ser citados: ácido sulfúrico, enxofre elementar, barrilha, cloreto de cálcio, sulfato de amônio e carbonato de cálcio.

Já a utilização do gesso possui maior aplicação no setor de construção civil, seja no revestimento de paredes ou na produção de placas, blocos, painéis e também na decoração, etc., pois está sendo muito utilizado na substituição de outros materiais como a cal, o cimento, a alvenaria e a madeira. Também é muito aplicado na confecção de moldes para as indústrias cerâmica, metalúrgica e de plásticos; em moldes artísticos, ortopédicos e dentários; como agente desidratante; aglomerante do giz e na briquetagem do carvão. Por suas características de resistência ao fogo é empregado na confecção de portas corta fogo; na mineração de carvão para vedar lâmpadas, engrenagens e áreas onde há perigo de explosão de gases. Além de aplicações considerando suas outras propriedades como isolante acústico, térmico e a higroatividade (MUNHOZ, RENOFIO, 2007).

A região produtora, que recebeu a denominação de Polo Gesseiro do Araripe (PGA), surgiu por volta da década de 60 do século com as atividades de mineração de gipsita. O PGA situa-se no extremo oeste do Estado, a cerca de 700 km da capital

pernambucana, Recife, e abrange os Municípios de Araripina, Bodocó, Exú, Ipubí, Ouricuri e Trindade, que representam 8,69% do território do Estado e 2,98% da população pernambucana (SHINOHARA, OLIVEIRA, 2014).

Ainda, segundo Shinohara & Oliveira (2014), o estado de Pernambuco se apresenta como maior produtor brasileiro de gipsita desde a década de 60 e vem mantendo essa posição desde então. Estima-se que a facilidade de acesso as minas, que apresentam vias de escoamento asfaltadas e energia elétrica disponível; as condições de lavras (lavras a céu aberto, menor razão estéril/minério e maior pureza do minério) e proximidade do mercado consumidor seja uma das alternativas para o estado permanecer nesse *ranking*.

O *cluster* do gesso reúne em média um total 800 empresas, sendo destas, 49 empresas destinadas a mineração, 140 são indústrias de calcinação, e cerca de 600 empresas são fabricantes de produtos pré-moldados de gesso. Dados do Sindicato da Indústria do Gesso do Estado de Pernambuco (SINDUSGESSO-PE) e da Associação Nacional dos fabricantes e comerciantes de gesso e seus derivados (ASSOGESSO), indicam que em 2013 a produção na região atingiu o total de 4,5 milhões de toneladas proveniente da extração de 15 milhões de toneladas do minério. Desse total de gipsita, 9,7 milhões de toneladas foram destinadas à produção de cimento e de gesso agrícola, e os 5,3 milhões de toneladas restantes foram destinados a produção de gesso, enquanto a produção de pré-moldados ultrapassou 125 milhões de unidades naquele ano. Todo esse conjunto de produtos correspondeu a 97% da produção nacional e gerou um faturamento anual de aproximadamente R\$ 2,0 bilhões (HENRIQUES JR., 2013)

A produção de gesso é realizada por meio de uma transformação termoquímica da gipsita e compreende as seguintes etapas: extração da gipsita, britagem, calcinação ou desidratação térmica, moagem e ensilagem (BENACHOUR, 2001).

De acordo com Oliveira *et al.*, (2012), a gipsita sofre sucessivas perdas de água de cristalização quando é aquecida e apresenta duas transformações endotérmicas quando aquecida a uma taxa de aquecimento próxima a 10°C/min. Na primeira, a 100°C, perde 75% da sua água de cristalização e transforma-se em hemidrato, e na segunda, a 200°C, perde os 25% restantes de água de cristalização e transforma-se em anidrita, que não possui valor comercial. Devido a presença de impurezas, em alguns casos, há registros de efeitos térmicos acima de 450°C.

A produção de gesso demanda grande quantidade de energia térmica para desidratação da gipsita, e de acordo com Peres *et al.*, (2008), a quantidade teórica dessa energia é na ordem de 154 *Mcal/ton* de gesso, estima-se que o consumo real de energia no PGA alcance 211 mil toneladas equivalentes de petróleo por ano, incluindo a energia elétrica. Nesse montante, a lenha representa 97% dos insumos energéticos usados, contabilizando 2,565 milhões de metros estéreos (*st*) por ano (ADENE/ATECEL, 2006).

A lenha é a principal fonte energética empregada pelas empresas e segundo dados do SINDUSGESSO-PE e da Superintendência do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA-PE), 15% são provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS); 65% são referentes a algaroba, podas de plantios de caju, eucalipto. Os 20% restantes, segundo Reigenhaupt e Pareyn, (2010), correspondem a vegetação nativas, retiradas sem autorização dos agentes de meio ambiente e, portanto, de origem irregular, pois são provenientes de desmatamentos (EMBRAPA, 2006).

O processo de fabricação de gesso consome uma grande quantidade de energia térmica obtida através da combustão da biomassa renovável. O aumento do custo deste combustível, atrelada as perdas de energia através da chaminé e das paredes do forno, aumentam o custo da produção, o que dificulta a competitividade das empresas no mercado, visto que a média de aproveitamento da energia utilizada no processo de calcinação é de aproximadamente 50%. Melhorar o aproveitamento do combustível implica diretamente na melhoria da qualidade da combustão e na eficiência do forno, buscando otimizar o processo para diminuir os impactos tanto financeiros e sociais, como principalmente, ambientais.

Portanto, esse trabalho busca avaliar a eficiência térmica dos fornos de duas empresas pertencentes ao Polo Gesseiro do Araripe com a utilização de lenhas em toras e cavaco como combustíveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

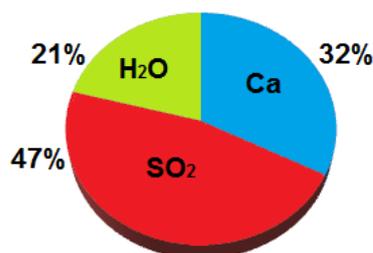
2.1 HISTÓRICO E COMPOSIÇÃO DA GIPSITA

O gesso é um material conhecido desde épocas remotas. Suas técnicas de produção são frutos de uma longa tradição que integram as formas de fabricação, as condições locais, as fontes naturais, e os hábitos de utilização; o que pode ser facilmente verificado, porque os procedimentos de fabricação e as formas de utilização são diferentes de um país para outro. Sua história está associada as civilizações antigas na confecção de esculturas e ornamentações. Os egípcios usaram gipsita como argamassa na construção das pirâmides cerca de 3000a.C. e os romanos a utilizavam em pequenas quantidades para o acabamento de construções. Já ao final do século XVIII, a Europa começou a utilizar a gipsita na correção de solos (PERES, *et al.*, 2008).

Segundo Pereira (1973) *Apud* Lima Filho (2010), em 1835 começou nos Estados Unidos a utilização da calcinação da gipsita para emprego na construção civil, mas, esta aplicação só se desenvolveu por volta de 1885, com a descoberta de um método comercial para retardar o tempo de pega do gesso. A indústria cimenteira, cuja fabricação requer a adição de gipsita ao *clinker*, na proporção de 2% a 5%, para retardar o tempo de pega possibilitou um grande aumento no consumo deste mineral e, portanto, a indústria de construção civil é atualmente a maior consumidora do minério gipsita.

A gipsita, também designada por pedra de gesso, ou sulfato de cálcio é um minério, cuja composição química corresponde a fórmula $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Gesso é a denominação comercial atribuída ao pó de sulfato de cálcio hemidratado - $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$. Segundo Lima Filho (2010), o minério de gipsita da região do Araripe é considerado o de melhor qualidade no mundo, apresentando um teor de pureza entre 88% e 98%. A composição química média da gipsita encontrada no Araripe, pode ser visualizada na figura 1.

Figura 1 – Composição química média da gipsita.



Fonte: Lima Filho (2010)

De acordo com Baltar, *et al.* (2008), as propriedades físicas da gipsita possuem as seguintes características presentes na tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas da gipsita e suas características

Propriedade Física	Características
Cor	Variável, podendo ser incolor, branca, cinza e outras (dependendo das impurezas)
Brilho	Vítreo, nacarado ou sedoso
Dureza (Escala de Mohs)	2
Densidade	2,3
Hábito	Prismático
Clivagem	Em quatro direções
Morfologia e tamanho dos cristais	Varia de acordo com as condições e ambientes de formação

Fonte: Baltar *et al.*, (2008)

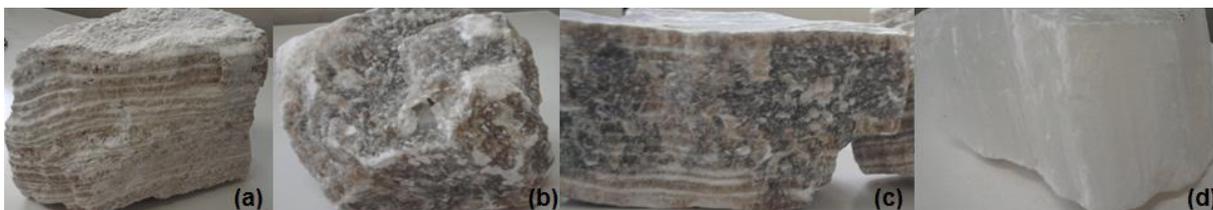
2.2 TIPOS DE GIPSITA

A gipsita do Araripe se apresenta de diversas formas e são conhecidas como pedra branca, rapadura cocadinha, alabastro e pedra ruim. As variedades mineralógicas de acordo com Melo (2013) apresentam as seguintes características:

- **Cocadinha:** a figura 2(a) apresenta um tipo de gipsita estratificada com ralos filmes de argila verde;
- **Pedra Johnson ou Pedra Branca:** a figura 2(b) apresenta uma variedade mais pura, com a coloração variando de branco a creme, e caracteriza-se por apresentar uma estrutura com “nódulos” e “estrelas”;
- **Rapadura:** a figura 2(c) é uma variedade estratificada que apresenta filmes milimétricos de argila verde;

- **Alabastro:** figura 2(d) apresenta uma variedade maciça e transparente, muito usado em esculturas. Tipo que se caracteriza por apresentar problemas na calcinação devido ao seu caráter fibroso que promove anisotropia.

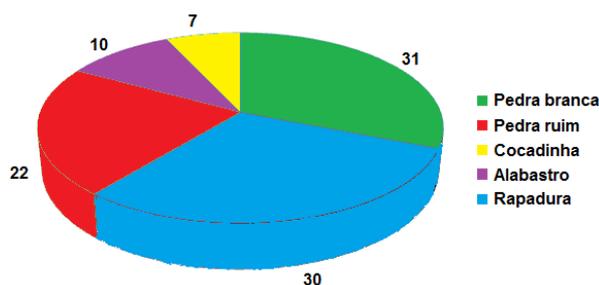
Figura 2 – Variedades de gipsita: cocadinha (a); Johnson ou pedra branca (b); rapadura (c) e alabastro (d)



Fonte: Melo (2013)

Em 1981 a mineradora São Jorge em Ouricuri-PE realizou uma quantificação de cada tipo e apresentou a classificação representada na figura 3.

Figura 3 – Percentual dos tipos de gipsita encontradas no Polo Gesseiro do Araripe.



Fonte: Melo (2013)

2.3 PRODUÇÃO DA GIPSITA

Segundo dados do DNPM (2013), a produção mundial de gipsita para esse ano foi de 160 milhões de toneladas, apresentando um aumento de 5,3% na produção referente ao ano de 2012. O país que mais produziu gipsita no mundo continua sendo a China, representando cerca de 31,3% de toda a produção mundial e, os Estados Unidos da América, o segundo maior produtor, com representação de 10,2%. Já o Brasil encontra-se em 11º lugar em produção de gipsita no mundo, representando cerca de 2,1%, ou seja, 3,3 Mt. No entanto, é o maior produtor de gipsita da América do Sul.

No Brasil, o estado de Pernambuco é o principal produtor de gipsita, responsável por 87,6% de toda a produção, onde localiza-se o “Polo gesseiro do Araripe” (PGA), composto pelos municípios de Araripina, Trindade, Ipubí, Bodocó e

Ouricuri, situado no extremo oeste do estado pernambucano. Outro produtor de gipsita é o estado do Maranhão, com representação de 9,1%, onde foi inaugurado o Distrito Industrial de Grajaú, com o intuito de oferecer uma infraestrutura competitiva para o gesso, pois a cidade localizada a 550 km de São Luiz, e também é conhecida como um polo gesseiro. Já os estados do Ceará, Amazonas e Pará, apresentam as seguintes representações no mercado interno de 2,5%, 0,6% e 0,2%, respectivamente (DNPM, 2013).

Com representação de 50% de toda a produção nacional de gipsita para o ano de 2013, as maiores empresas produtoras foram a Mineradora São Jorge S/A, Votorantim Cimentos N/NE, Rocha Nobre Mineração Ltda., Mineração Alto Bonito Ltda., Alencar & Parente Mineração Ltda., CBE - Companhia Brasileira de Equipamento (Grupo João Santos) e a Mineradora Rancharia Ltda. (HENRIQUES JR, 2013).

2.4 APLICAÇÕES E IMPORTÂNCIA DA GIPSITA E DO GESSO

Segundo Baltar *et al.* (2004), a utilização do tipo de gipsita depende do produto que se deseja obter. As melhores pedras, ou seja, as mais puras, são usadas para produção dos gessos beta e alfa. Os tipos: alabastro, boró e anidrita são utilizados na fabricação de cimento ou na agricultura, enquanto que a selenita é utilizada em polarizadores.

A gipsita e anidrita podem ser empregadas industrialmente para obtenção de ácido sulfúrico, sulfato de amônio e sulfato de magnésio. Se emprega gipsita moída como carga para papel, na fabricação de tintas, discos, pólvora, botões e fósforos, e no acabamento de tecidos de algodão. Ela também é utilizada como distribuidor e carga em inseticidas e na fabricação de cerveja, quando se deseja aumentar sua "dureza". Sua aplicação também é encontrada no polimento de chapas estanhadas, na obtenção de enxofre elementar, e como *filler* na construção de estradas asfaltadas (PEREIRA, 1973 *Apud* LIMA FILHO, 2010).

Outras aplicações para a gipsita e o gesso são encontradas nas seguintes atividades:

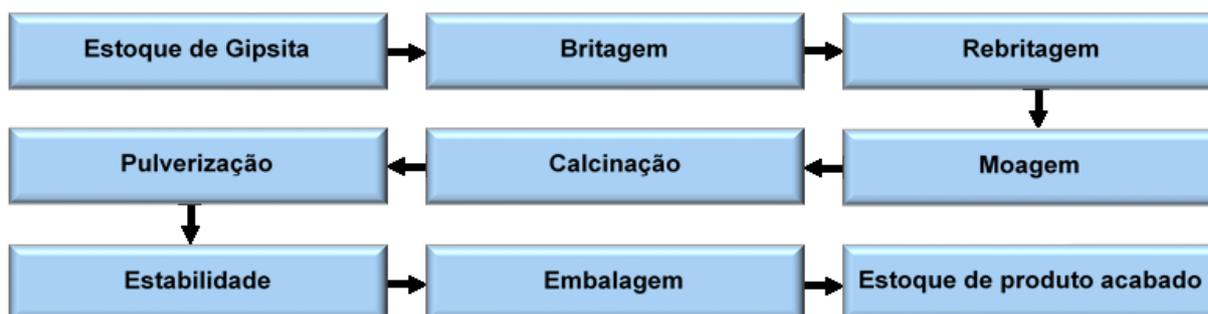
- **Fabricação de cimento *Portland*:** A gipsita *in natura* ou crua é adicionada ao *clinker*, na proporção de 3 a 5% em peso, com a finalidade de controlar o tempo de pega;
- **Agricultura:** O gesso agrícola, que consiste no minério de gipsita *in natura* moído é utilizado para dessalinização de solos, reagindo com o carbonato de sódio para formar o carbonato de cálcio e o sulfato de sódio como fonte de cálcio e de enxofre;
- **Na área da saúde:** Os gessos ortopédicos e odontológicos são muito utilizados na imobilização, como próteses temporárias, produção de modelos para usos ortodônticos e na confecção de próteses;
- **Indústria cerâmica:** O gesso cerâmico é usado especialmente na produção de moldes nos processos de colagem na indústria de louças sanitárias. A durabilidade dos moldes de gesso associada ao seu custo de produção tem contribuído para a competitividade desse produto no mercado;
- **Indústria farmacêutica:** O gesso é usado como ingrediente em vários produtos como, por exemplo, pasta de dente;
- **Indústrias de plásticos e papel:** O gesso pode ser utilizado como carga;
- **Tratamento de água:** O gesso pode ser utilizado para modificar a qualidade da água, principalmente na correção da dureza;
- **Construção civil:** O gesso, como material de construção, é utilizado para execução de revestimentos, em blocos e painéis de vedação, forros, e como elemento de decoração nas construções.

A principal aplicação do gesso nos países industrializados é na produção de pré-fabricados, tais como bloquetes, chapas divisórias e de revestimento, como também na produção de estuque. Além dessas aplicações, usa-se o gesso na confecção de moldes para as indústrias metalúrgicas, como agente desidratante, como aglomerante do giz e na briquetagem do carvão. O gesso não é combustível e resiste ao fogo por longo tempo. Devido a essa propriedade, é aplicado no isolamento de áreas que oferecem riscos a explosão (RIBEIRO, 2006).

2.5 PROCESSO PRODUTIVO DO GESSO

De acordo com o processo de desidratação da gipsita, podemos classificar o produto desidratado em gesso alfa ou beta. Seu processo produtivo, de forma geral, compreende as seguintes operações unitárias mostradas na figura 4, abaixo (PERES, *et al.*, 2008).

Figura 4 – Fluxograma do processo de produção do gesso



Fonte: Autor

2.5.1 Descrição das etapas de produção

2.5.1.1 Gipsita (*estoque in natura*)

A gipsita *in natura* proveniente da mineradora é pesada para ocorrer à certificação da quantidade real, como também para realizar uma breve avaliação para identificação do tipo fornecido. O estoque encontra-se a céu aberto, próximo ao processo de produção como mostra a figura 5.

Figura 5 – Estoque de gipsita



Fonte: Autor

2.5.1.2 Britagem

Após a alimentação da matéria-prima na tremonha, a gipsita segue para a britagem, onde seus pedaços com tamanhos que variam de 50 a 400mm são

fragmentados a aproximadamente 30 a 50mm, normalmente com a utilização de britadores de mandíbulas e rebitadores de martelos.

Figura 6 – Alimentação de gipsita na tremonha



Fonte: Autor

Figura 7 – Britadores de mandíbulas



Fonte: Autor

2.5.1.3 Rebritagem

Consiste na diminuição da granulometria da pedra para tamanhos que variam de 0 a 5mm, objetivando uma maior eficácia no processo industrial.

Figura 8 – Rebritador



Fonte: Autor

2.5.1.4 Moagem

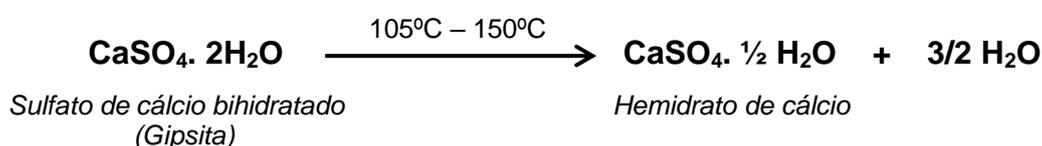
Dependendo do tipo de forno a ser utilizado, a gipsita britada deve ser moída em moinhos de martelos, antes de ser enviada para a etapa de calcinação. Dependendo da existência de plantas de calcinação, com fornos de diferentes tipos,

a gipsita moída pode ser peneirada em peneiras vibratórias e separada em frações para uso na alimentação de cada tipo de forno.

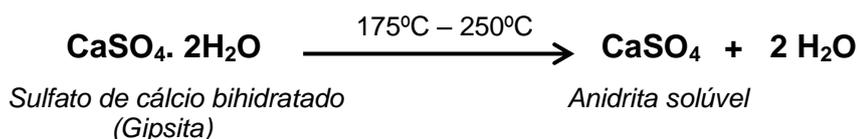
2.5.1.5 Calcinação

A operação de calcinação da gipsita a transforma em gesso pela ação do calor. Quando essa transformação é realizada a pressão atmosférica, se obtém o gesso beta e quando submetido a uma pressão maior que a atmosférica, obtém-se o gesso alfa. Essa etapa consiste na remoção da água de cristalização através da desidratação térmica do mineral para que este se torne um produto útil para a construção civil. É nesta etapa que se define o tipo de gesso a ser fabricado, pois é através da variação da temperatura de calcinação que se obtém as diferentes características diretamente relacionadas à sua utilização: o gesso rápido ou gesso de fundição e o gesso lento ou revestimento.

De acordo com Perez *et al.* (2008), a calcinação da gipsita é realizada com a liberação de água de cristalização ou água de combinação contida na gipsita e que normalmente ocorre numa faixa de temperatura compreendida entre 105°C - 150°C, conforme a equação:

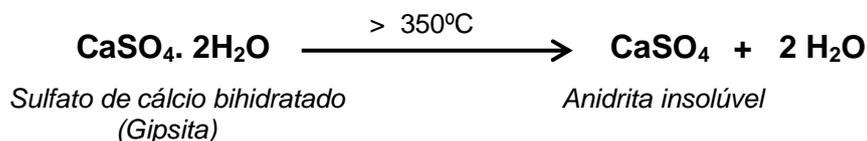


A partir de 150°C, ocorre um aumento acentuado da temperatura sem modificações significativas da composição encontrada. Contudo, a reação de desidratação com obtenção de hemidrato é encontrada em patamares de temperaturas contidas no intervalo de aproximadamente 175°C a 250°C, onde pode ser encontrada anidrita solúvel, denominada de gesso rápido, onde o tempo de pega é muito curto.



Com o aumento da temperatura até 350°C, obtém-se um produto constituído por anidrita desidratada, agora com características de tempo de pega longo, denominado de gesso lento. Muito utilizado para elaboração de misturas visando à produção de gesso para revestimento (30% de anidrita + 70% de hemidrato).

Em temperaturas superiores a 350°C, obtém-se anidrita insolúvel. Este produto foi denominado de gesso morto por apresentar características inertes, ou seja, não apresenta o fenômeno de pega, pois a anidrita supercalcinada não se reidrata.



Os processos de calcinação da gipsita, segundo Peres *et al.* (2008), pode ser realizado de forma direta ou indireta, conforme descrição abaixo.

- **Calcinação direta/contínua sob pressão atmosférica**

Nesta condição, a calcinação é normalmente realizada em fornos rotativos (tubulares). A gipsita moída é introduzida logo após a câmara de combustão e transita pelo forno até a outra extremidade, onde é separada dos gases de combustão. Tais condições são utilizadas para a produção do gesso tipo beta.

- **Calcinação indireta/contínua**

Nesta condição, a calcinação é normalmente realizada em fornos rotativos com dois tubos, onde os gases quentes transitam pela capa interna para que o minério seja aquecido pela capa externa ou por tubos inseridos nessa segunda capa. Essa operação é realizada para a produção do gesso tipo beta.

- **Calcinação indireta/batelada**

Nesta condição, a calcinação é normalmente realizada em fornos tipo marmitta (rotativo ou vertical), que variam nas dimensões e na capacidade de produção, a depender de seus fabricantes. Essa operação é realizada para a produção do gesso tipo beta.

Figura 9 – Forno tipo “barriga quente” para produção de gesso externamente sem câmara de combustão (a); forno “barriga quente” interno (b); câmara de combustão de forno “barriga quente”



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor

- **Calcinação sob pressão maior que a atmosférica**

No Brasil, a exemplo da Europa e dos Estados Unidos, utiliza-se o processo autoclavado com injeção de vapor, além de outro processo, mais moderno, que consiste na desidratação da gipsita em meio líquido. Este segundo processo permite a produção de gesso com o formato do cristal predefinido. Estas condições são utilizadas para a produção do gesso tipo alfa.

2.5.1.6 Pulverização

O gesso obtido após a calcinação do minério é normalmente moído em moinho de martelos com peneiras na faixa de 0,6mm a 0,8mm de abertura - moagem fina para obtenção da granulometria final especificada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para gesso lento e para gesso rápido.

Figura 10 – Moinho



Fonte: Autor

2.5.1.7 Estabilização

Dependendo das condições de calcinação, o gesso pode passar por um período de ensilamento ou estabilização, com a finalidade de se obter uma maior homogeneidade na sua composição química final.

2.5.1.8 Embalagem

O gesso moído é encaminhado para um silo de armazenamento, o qual possui em sua extremidade uma máquina ensacadeira. O Gesso é embalado em sacos multifoliados de papel, contendo 40kg, conforme figura 11. Logo em seguida são pesados e encaminhados para a expedição ou para a fabricação de placas e blocos.

Figura 11 – Ensacamento



Fonte: Autor

2.5.1.9 Estoque de produto acabado e expedição

O produto acabado é estocado em *pallets* e separados por tipo de produto (rápido ou lento), onde são identificados nas embalagens por marcações e cores que definem tipo de produto conforme figura 12, e estes permanecem no galpão até serem expedidos.

Figura 12 – Estoque de produto acabado e expedição



Fonte: Autor

2.6 FORNOS

Segundo Viana *et al.*, (2012), para a realização de cozimento, fusão, calcinação, tratamento térmico, secagem de um determinado material, é utilizado um forno que possui como princípio básico, transferir ao material o calor necessário para

realização dessas ações com segurança, uniformidade e com o máximo de eficiência. Portanto, a construção de um forno requer um estudo minucioso sobre transferência de calor, circulação e dos meios de minimizar as perdas, quer sejam pela chaminé ou por radiação.

O forno à combustão é o mais utilizado em processos industriais e podem ser classificados com base na relação entre o equipamento, o combustível e o material. Segundo Viana *et al.*, (2012), os fornos podem ser classificados pelas seguintes características.

- **Fornos em que o combustível e o material estão na mesma câmara**, como exemplo temos os fornos medas ou caieiras, cubilos e altos fornos;
- **Fornos em que o combustível e o material estão em câmaras separadas e os gases de combustão não têm contato com o material**, como as muflas, retortas e cadinhos;
- **Fornos em que o combustível é constituído pelas próprias impurezas do material ou parcialmente pelo próprio material**, como os incineradores e conversores;
- **Fornos em que o combustível e o material estão em câmaras separadas, mas os gases de combustão têm contato com o material.**

Na última classificação estão os fornos intermitentes, muito utilizados para cerâmica, calcinação, secagem, processos químicos, etc; onde a circulação dos gases é realizada em função da distribuição do material dentro do forno, onde essa distribuição pode implicar na melhoria da eficiência do forno, pois uma má distribuição, além de reduzir a eficiência do equipamento com a exaustão dos gases excessivamente quentes, expõe parte do material a temperaturas muito altas, enquanto parte do material não alcança a temperatura necessária.

Os fornos contínuos são os mais eficientes, pois o calor é aproveitado ao máximo. Entretanto, só se justificam para fabricação contínua e uniforme. Portanto, essa não é a realidade das empresas pertencentes ao PGA pernambucano.

2.6.1 Fornos para calcinação do gesso

Segundo Peres *et al.* (2008), existe no PGA vários tipos de plantas industriais que são caracterizadas pelo tipo de forno que utilizam, como por exemplo: os fornos do tipo panela, marmita e tubulares.

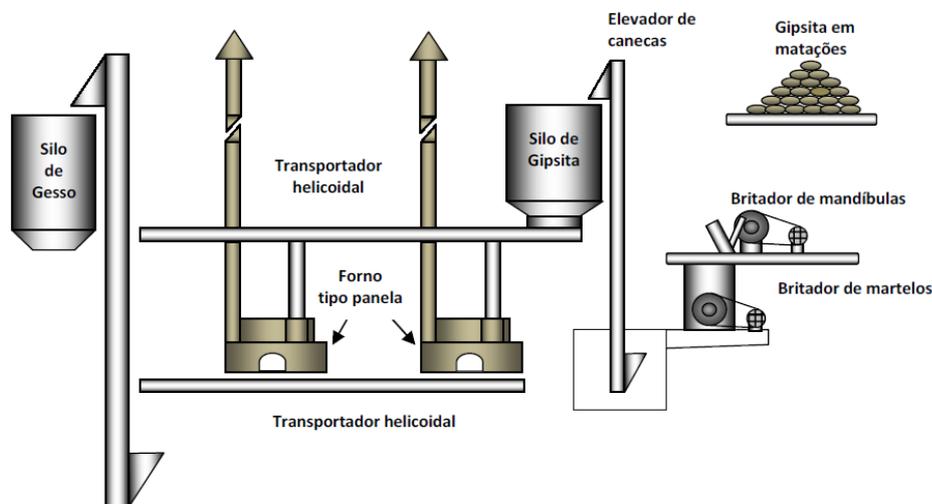
2.6.1.1 Forno tipo Panela

Na década de 90, esse era o tipo de forno mais comum na região. Com o passar dos anos foi sendo substituído devido sua baixa eficiência e má qualidade do produto final. No entanto, esse tipo de forno apresenta as seguintes vantagens:

- possibilidade de operação sem instrumento para controle da temperatura;
- possibilidade de obtenção de praticamente todos os tipos do gesso beta;
- simplicidade de manutenção e baixo custo de reposição.

O fluxograma típico de uma fábrica que utiliza forno do tipo panela está representado pela figura 13.

Figura 13 – Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo panela



Fonte: Lima Filho (2010) com adaptação de Peres *et al.* (2008)

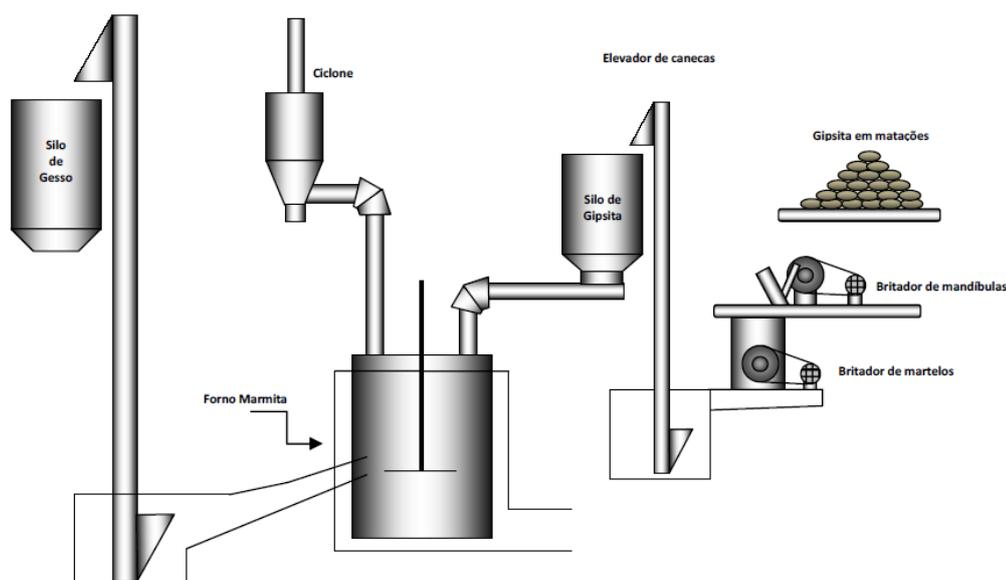
2.6.1.2 Forno tipo marmita vertical

Com o auxílio técnico do Instituto Tecnológico de Pernambuco (ITEP), esse tipo de forno começou a ser utilizado nas empresas a partir da década de 80. Ainda há empresas que utilizam esse tipo de forno, pois os mesmos apresentam as seguintes vantagens, de acordo com Peres *et al.* (2008).

- aumenta a produtividade, pois utiliza menos operários por tonelada de gesso produzida;
- permite uma maior uniformidade, pois produz uma maior quantidade em relação as bateladas dos fornos tipo panelas;
- permite a utilização de combustível alternativo – lenha ou óleo preto (BPF), sem realizar grandes modificações nas fornalhas;
- possui maior rendimento do combustível, uma vez que consome uma quantidade menor de lenha por tonelada de gesso produzida;
- diminui a poluição ambiental no ambiente de trabalho, pois o pó liberado durante a calcinação é retido em um aerociclone quente.

O fluxograma típico de uma fábrica que utiliza fornos do tipo marmita está representado pela figura 14.

Figura 14 – Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo marmita.



Fonte: Lima Filho (2010) com adaptação de Peres *et al.* (2008).

2.6.1.3 Forno rotativo tubular

Esse tipo de forno passou a ser utilizado também na década de 80, operando inicialmente com óleo BPF como combustível. No entanto, algumas empresas começaram a acoplar gaseificadores de lenha e carvão e algum tempo depois foram substituídos por fornos com aquecimento indireto, tornando-se um tipo de marmita (rotativo). Estes fornos são bastantes parecidos e produzem cerca de três a quatro

toneladas de gesso por hora. Utiliza a gipsita de pequena granulometria. Essa homogeneidade aumenta a eficiência na calcinação, no entanto, carece de equipamentos e/ou mecanismos necessários para retenção de poeira, tais como labirintos, ciclones ou filtros de manga.

O forno tipo rotativo (tubular), quando comparado com os outros modelos, apresenta as seguintes vantagens:

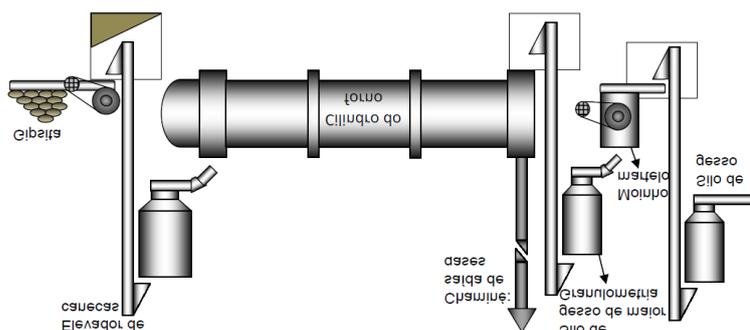
- produção contínua facilitando a obtenção de um gesso com características uniformes;
- maior rendimento térmico por utilizar o aquecimento direto (contato da chama com o minério), e facilmente isolável;
- fornalha independente que permite as manutenções necessárias com pequenas paradas;
- facilidade de automação por ser um processo contínuo com ganhos de qualidade e diminuição de custos.

As principais características desse forno foram muito bem detalhadas pelo Henriques Jr., (2013, p.67).

“Este forno é composto por um longo tubo rotativo horizontal, com diâmetro entre 1 e 3 m e comprimento de 12 a 20 m. É feito de aço e revestido internamente com material refratário. Nesse equipamento, o minério, por gravidade, percorre toda a extensão do tubo rotativo e é calcinado no trajeto. O tempo de residência é controlado pela velocidade de rotação do tubo. A capacidade do forno varia de 3 a 4 t de gesso/hora, e o consumo específico de energia médio é de 17 kg de GLP/t de gesso ou 80 kg de biomassa/t de gesso, menor que o do forno anterior por se tratar de um processo contínuo e com troca direta de calor” (HENRIQUES JR, 2013, p.67).

O fluxograma típico de uma fábrica que utiliza fornos rotativos (tubulares) está representado pela figura 15.

Figura 15 – Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo rotativo tubular



Fonte: Lima Filho (2010) com adaptação de Peres *et al.* (2008)

2.6.1.4 Marmita rotativa ou “barriga quente”

Em meados da década de 90, os fornos do tipo marmita rotativa, inicialmente fabricados pela empresa francesa Grelbex e logo após pela empresa local, Metalúrgica SM Tanques, começou a ser utilizado pelas empresas do PGA, sendo hoje, o tipo mais encontrado entre as empresas (PERES *et al.*, 2008).

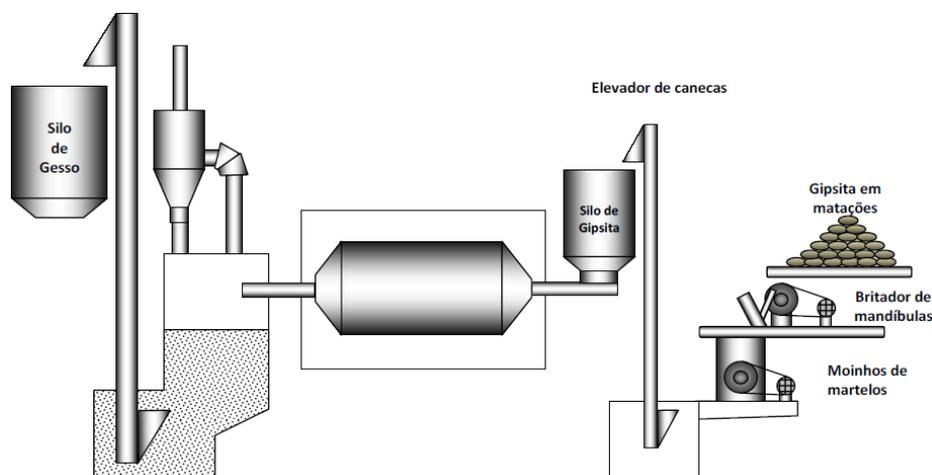
As características principais desse forno foram muito bem detalhadas pelo Henriques Jr (2013, p.66).

“São fornos constituídos por um cilindro rotativo horizontal, de aço, sendo as pedras de gipsita colocadas em uma de suas extremidades, enquanto na oposta se procede à retirada do gesso produzido por gravidade. O cilindro é recoberto por uma parede de refratários que se estende até o piso, onde está a fornalha. Os gases de combustão têm fluxo ascendente, passam externamente pelo cilindro e seguem para a chaminé. O processo se dá por batelada e dura entre 1 h e 1h10’. Em alguns casos, há controles automáticos que seguem comandos preestabelecidos mediante gerenciamento por computadores (controle de tempo, temperatura e perda de massa). Em outros equipamentos a operação é totalmente manual, dependendo da experiência dos operadores.

Nesses equipamentos, o minério moído não entra em contato direto com a chama, situação que reduz a eficiência térmica do sistema. A capacidade desses fornos pode variar entre 3,2 t e 6,0 t de gesso/batelada. O consumo específico de energia também é variável, entre 0,5 a 0,8 metro estéreo (st) de lenha/tonelada de gesso. Excepcionalmente há casos com consumo inferior, em torno de 0,25 st/t de gesso, onde estão implantadas adaptações para recuperação de calor, controle automático e uso de lenha picada. Empregando-se coque de petróleo, o consumo específico gira em torno de 40 kg de coque/t de gesso” (HENRIQUES JR, 2013, p.66).

O fluxograma típico de uma fábrica que utiliza fornos marmita rotativos está representado pela figura 16.

Figura 16 – Fluxograma típico de uma planta de produção de gesso com utilização do forno tipo marmita rotativo



Fonte: Lima Filho (2010) com adaptação de Peres *et al.* (2008)

Segundo Peres *et al.* (2008), cada tipo de forno apresenta características peculiares com vantagens e desvantagens. Na tabela 2, encontramos um resumo das características mais importantes dos tipos de fornos em operação no PGA.

Tabela 2 – Características dos diferentes tipos de fornos para calcinação

Características	Rotativo tubular	Marmita vertical	Panela
Tipo de gesso produzido	Fundição	Fundição e revestimento	Fundição e revestimento
Controle do tempo de pega	Não	Sim	Sim
Tendência a formar superaquecimento ou gesso cru	Sim	Não	Não
Poluição do ambiente interno	Pouco	Pouco	Muito
Combustível utilizado	BPF	Lenha ou BPF	Lenha
Tipo de calcinação	Queima direta e contínua	Queima indireta batelada	Queima indireta batelada
Consumo de combustível (Kg lenha/ton. gesso)	----	350	525
PCI da lenha (Kcal/kg)	3.131	3.131	3.131,20
Consumo energia/ton. gesso (kcal/t)	1.095.950	1.095.950	1.643.800
Investimento (R\$)	Grande	Médio	Pequeno
Capacidade produtiva (t/h)	2,5 – 3,5	0,6 – 0,8	0,1 – 0,2
Manutenção	Media	Media	Grande
Eficiência térmica (%)	14,0	14,0 Lenha	9,4

Portanto, em relação às características de cada forno, os seguintes aspectos podem ser analisados e comentados (PERES, *et al.*, 2008):

- a dificuldade para controlar o tempo de pega do gesso, no forno rotativo (tubular), deve-se, principalmente, à distribuição granulométrica do material (minério) utilizado na alimentação;
- a tendência a formar supercalcinado no forno rotativo (tubular) deve-se, principalmente, ao gradiente térmico ao qual o minério é submetido;
- o consumo de combustível de cada forno está associado a seus projetos construtivos, sendo que o BPF praticamente não é utilizado pelas empresas devido aos custos;
- a grande manutenção necessária ao forno tipo panela deve-se à baixa qualidade e inadequação dos materiais utilizados na sua fabricação, o que o torna um equipamento de baixo custo, no entanto, com pequena vida útil.

2.7 COMBUSTÃO

Segundo Souza (2006), a combustão é um processo químico exotérmico composto de dois elementos distintos, o combustível e o comburente. A reação mais largamente utilizada na indústria é a que utiliza o oxigênio como elemento comburente. Os combustíveis são compostos basicamente de carbono e hidrogênio, mais contém pequenos percentuais de enxofre e outros elementos. O comburente mais utilizado é o ar atmosférico, pelo fato de ser a fonte mais abundante e barata de oxigênio. A composição média do ar seco está representada na tabela 3.

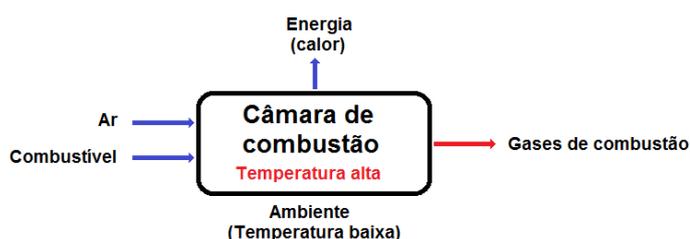
Tabela 3 – Composição do ar seco

Elemento	Composição média		Valores práticos	
	Em peso	Em volume	Em peso	Em volume
Nitrogênio	75,55	78,13	77	79
Oxigênio	23,10	20,90	23	21
Outros	1,35	0,97	-	-

Fonte: Viana *et al.* (2012)

O processo de combustão se inicia quando a mistura atinge uma temperatura mínima, característica de cada combustível, denominada de ponto de inflamação, na qual a reação de oxidação, que até então progredia lentamente, torna-se mais rápida.

Figura 17 – Energia química nas reações de combustão

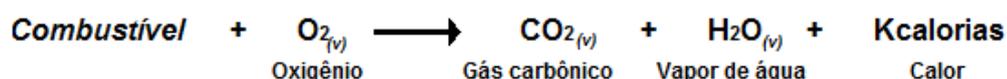


Fonte: Viana *et al.* (2012)

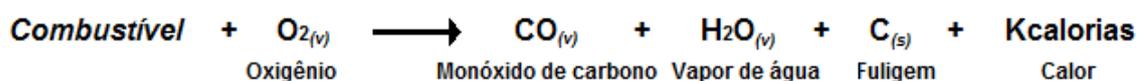
A combustão pode ser classificada de duas maneiras: completa ou incompleta, dependendo de como se dá a reação entre o carbono do combustível e o oxigênio. Na combustão completa ocorre a reação total do carbono com o oxigênio, gerando como produtos deste processo dióxido de carbono, vapor d'água, óxidos de enxofre e de nitrogênio. Já na combustão incompleta, parte do carbono não reage ou reage parcialmente com o oxigênio, produzindo, além dos compostos anteriores, monóxido de carbono e, algumas vezes, fuligem, se houver falta considerável de ar. Em alguns

casos, podem ainda ser encontrados traços do combustível nos gases de saída do processo (VIANA *et al.*, 2012).

Quando ocorre a combustão completa, os produtos formados são dióxido de carbono $\text{CO}_{2(g)}$ e água em forma de vapor $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$. Esse tipo de reação ocorre quando há um suprimento suficiente de oxigênio.



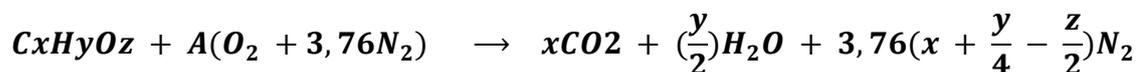
Já quando a combustão é incompleta, os produtos formados podem ser o monóxido de carbono $\text{CO}_{(g)}$, o vapor de água $\text{H}_2\text{O}_{(v)}$ ou a fuligem $\text{C}_{(s)}$, pois o suprimento de oxigênio não foi suficiente para consumir todo combustível.



Portanto, a combustão incompleta teoricamente aumenta o consumo do combustível. Além disso, seus componentes quando emitidos na atmosfera provocam sérios danos ao meio ambiente e a saúde das pessoas.

Outra classificação possível é a chamada combustão estequiométrica, que é um caso particular da combustão completa onde a quantidade de ar admitida no processo é exatamente a necessária para que ocorra a reação total do carbono com o oxigênio. A partir da composição do combustível pode-se chegar a esta quantidade mínima teórica de ar necessária à combustão através de um balanço químico.

De maneira genérica, a equação de combustão estequiométrica de um combustível qualquer é dada por:



Onde a parcela $(\text{O}_2 + 3,76\text{N}_2)$ refere-se ao ar e o valor de A, chamado de coeficiente estequiométrico, é dado pela seguinte expressão matemática:

$$A = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}$$

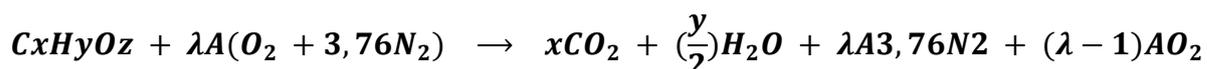
A partir da equação genérica acima se deduz a relação ar/combustível estequiométrica para um determinado combustível. Esta relação pode ser dada em volume ou em peso, como é apresentado em seguida.

- Em volume: $\frac{a}{c} = \frac{A(1 + 3,76)}{1} = 4,76A$
- Em peso: $\frac{a}{c} = \frac{A(32 + 3,76 \cdot 28)}{12x + y + 16z} = \frac{137,28A}{2x + y + 16z}$

Na prática, sempre se utiliza uma quantidade de excesso de ar para se garantir que a combustão seja completa, devido aos problemas relativos à mistura ar-combustível, que, geralmente, não se dá de maneira perfeita, especialmente com os combustíveis sólidos.

A quantidade de excesso de ar deve ser cuidadosamente controlada para se obter o máximo rendimento da combustão. Quando ocorre falta de ar, a combustão se dá de maneira incompleta, não aproveitando todo o potencial do combustível e gerando gases poluentes como o monóxido de carbono. Quando há uma quantidade excessiva de ar, a temperatura de saída dos gases de combustão diminui consideravelmente, prejudicando sua utilização (SOUZA, 2006).

A equação da combustão com excesso de ar de um combustível genérico é dada por:



onde λ é o coeficiente de excesso de ar.

De maneira genérica, as porcentagens em volume em base seca de CO_2 e O_2 presentes no gás gerado podem ser dadas em porcentagem em volume para base seca e para base úmida. Na prática, estas equações são mais aplicadas quando o parâmetro λ é explicitado. Deste modo, a partir da análise dos gases de combustão chega-se ao excesso de ar utilizado na combustão, conforme está apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Porcentagens em volume de CO₂ e O₂ nos gases de combustão e o excesso de ar através da análise dos gases da combustão

Propriedade	Gás analisado	Base seca	Base úmida
Porcentagem em volume	CO ₂	$\frac{100 x}{x + 3,76 A \lambda + (\lambda - 1)A}$	$\frac{100 x}{x + \frac{y}{2} + 3,76 A \lambda + (\lambda - 1)A}$
	O ₂	$\frac{100 A (\lambda - 1)}{x + 3,76 A \lambda + (\lambda - 1)A}$	$\frac{100 A (\lambda - 1)}{x + \frac{y}{2} + 3,76 A \lambda + (\lambda - 1)A}$
Excesso de ar	CO ₂	$\lambda = \frac{A + x(\frac{100}{\%CO_2} - 1)}{4,76 A}$	$\lambda = \frac{A + x(\frac{100}{\%CO_2} - \frac{y}{2})}{4,76 A}$
	O ₂	$\lambda = \frac{\%O_2 (A - x) - 100A}{A(4,76 \%O_2 - 100)}$	$\lambda = \frac{\%O_2 (A - x - \frac{y}{2}) - 100A}{A(4,76 \%O_2 - 100)}$

Fonte: Viana *et al.* (2012)

2.7.1 Perdas de calor na combustão

Mesmo quando ocorre a combustão completa existem perdas de calor nos gases de exaustão, sejam eles produtos secos ou com vapor d'água. Estas perdas podem ou não ser inerentes ao processo de combustão. Essas perdas são basicamente de dois tipos:

- vapor d'água nos gases de exaustão;
- perda nos gases secos da exaustão.

Entre as perdas que são evitáveis, podemos citar à combustão incompleta do carbono, formando monóxido de carbono ao invés de dióxido, que também pode ocorrer na presença de carbono não oxidado nos gases de saída, presente na forma de fuligem. Estas perdas evitáveis podem ser combatidas através de várias medidas, como, por exemplo, pelo controle do excesso de ar e pela manutenção regular dos queimadores (VIANA *et al.*, 2012).

2.8 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

No cenário atual, o potencial energético representa uma das principais bases do desenvolvimento econômico de uma empresa, pois intensifica a produção, eleva o nível tecnológico e melhora as condições de trabalho com otimização e eficiência (VLASSOV, 2001). As empresas buscam minimizar os impactos dos custos em seu processo produtivo para se tornarem mais competitivas diante do mercado. Trabalhar

com uma melhor eficiência energética é promover a sustentabilidade, pois o uso racional dos recursos energéticos reduz os custos financeiros e favorece ganhos ambientais e sociais, pois a matriz energética utilizada é a biomassa florestal.

Segundo Henriques Jr. (2013), as empresas produtoras do gesso apresentam grandes possibilidades de melhorias no processo de calcinação, implementando medidas de eficiência energética nos fornos e conseqüentemente, reduzindo o consumo da lenha. Segundo dados do SINDUSGESSO, há em operação no PGA cerca de 270 fornos do tipo barriga quente. Portanto, para esses equipamentos, as principais possibilidades de intervenção são: recuperação de calor, controle automático e monitoramento, melhoria do isolamento térmico e uso de lenha picada.

Falar de energia térmica exige o conhecimento de alguns conceitos básicos, como calor e temperatura, calor específico, calor sensível, calor latente e poder calorífico, além dos mecanismos de transferência de calor, dos tipos de combustíveis e do processo de combustão.

O poder calorífico representa a quantidade de calor liberada na combustão de uma unidade de massa de um combustível. Ele pode ser classificado em superior ou inferior. O poder calorífico superior inclui a energia do combustível mais o calor latente da água presente nos gases de combustão, pois considera que ela esteja líquida. Já o poder calorífico inferior não considera isso. Como a temperatura de saída dos gases de combustão é superior à temperatura de vaporização da água esta medida é mais realista, como por exemplo, o Poder Calorífico Inferior (PCI) da lenha com umidade de 25% é de 10.591 Kcal/kg, enquanto que o Poder Calorífico Superior (PCS) é de 13.814 Kcal/kg, levando em consideração a massa específica da lenha de 390 Kg/st (VIANA *et al.*, 2012).

2.8.1 Mecanismos de transferência de calor

Os principais processos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação. A condução ocorre pela transferência de energia causada por colisões entre moléculas vizinhas de um corpo. Este processo ocorre em materiais sólidos, sendo os melhores condutores os metais, como por exemplo os fornos destinados a desidratação da gipsita. A convecção é a transferência de calor que ocorre nos fluídos e gases. Quando um recipiente contendo um líquido é aquecido, a parte inferior recebe

calor pela condução do fundo do recipiente. Já a radiação, é o processo pelo qual o calor é transferido através de ondas eletromagnéticas, sem a necessidade de um meio material para sua propagação (VIANA *et al.*, 2012).

2.8.2 Eficiência térmica de fornos

Segundo Viana *et al.*, (2012), a determinação da eficiência energética de um sistema geralmente é muito relevante, visto que, ela indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal sem que haja perdas, pois, para a indústria, perdas implica maiores custos. Portanto, é muito importante trabalhar com equipamentos de alto rendimento e manter a eficiência em um nível máximo para minimizar as perdas e conseqüentemente, os custos do processo.

De maneira geral, a eficiência térmica pode ser determinada pela seguinte fórmula matemática:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_f}$$

onde: η : eficiência térmica (%)

\dot{Q}_u : calor útil (kW)

\dot{Q}_f : calor fornecido pelo combustível (kW)

Partindo destas considerações iniciais, a eficiência térmica pode ser calculada através de duas maneiras distintas, os métodos direto e indireto.

2.8.2.1 Método Direto

A eficiência pelo método direto é dada por:

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot q_f}$$

onde: η_{MD} : eficiência pelo método direto

\dot{m}_v : vazão mássica de vapor (kg/s)

\dot{m}_c : vazão mássica de combustível (kg/s)

h_v : entalpia do vapor produzido (kJ/kg)

h_a : entalpia da água de entrada (kJ/kg)

Quando a medida de algumas destas variáveis for imprecisa ou não puder ser obtida, o valor da eficiência pode ser obtido pelo método indireto.

2.8.2.2 Método Indireto

O método indireto utiliza a análise das perdas do forno para obter o valor da eficiência. A maior parcela de perda está no fluxo de gases pela chaminé, que pode ser medido de maneira precisa e o valor da eficiência pode ser obtido com razoável precisão. A perda total de calor é obtida pela soma das perdas por transferência de calor e pelas perdas associadas aos fluxos que deixam o forno, exceto naturalmente, o fluxo de vapor. Desta maneira, de acordo com Viana *et al.* (2012), a perda total é composta basicamente pelas seguintes perdas:

- **Perdas por transferência de calor** - através do calor absorvido pelas paredes, pelo teto e pela soleira do forno e liberado por radiação e convecção. O valor destas perdas, embora possam ser calculados, são estimados em função do isolamento, correspondendo à cerca de 20% do calor total.
- **Perdas por vazamentos na estrutura do forno** - que costumam operar com pressão superior à atmosférica, e perdas de calor pela porta, quando esta é aberta. Estas perdas geralmente variam entre 2% e 8% do calor total, dependendo da operação e da manutenção do forno.
- **Perdas pela chaminé** - As perdas na chaminé podem ser divididas em duas parcelas principais: as perdas associadas aos gases secos formados na combustão e as perdas associadas ao vapor presente na chaminé. A perda associada aos componentes do gás seco gerado na combustão surge devido ao fato destes gases estarem acima da temperatura ambiente.

Após a determinação das perdas, se estas forem obtidas em valores absolutos, a eficiência pelo método indireto pode ser dada por:

$$\eta_{MI} = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{q_f}$$

Esta equação também pode ser representada da seguinte forma:

$$\eta_{MI} = 1 - \left(K + \frac{\left(\frac{\lambda a}{c} + 1 \right) c_p \cdot (T_{CH} - T_{Ref})}{PC} \right)$$

onde: **K**: representa o somatório de todas as perdas exceto as perdas pela chaminé.

PC: poder calorífico inferior do combustível.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

O trabalho baseia-se em um estudo de caso, que segundo Gil (2008), consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento. Foi desenvolvido no período de maio de 2015 a janeiro de 2016 e contou com o apoio e participação da Fundação Araripe (FA) e a equipe de consultores do Centro de Produção Industrial Sustentável/Parque Tecnológico da Paraíba (CEPIS/PaqTc).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida em empresas do Polo Gesseiro do Araripe (PGA) que utilizam forno do tipo marmita rotativo “barriga quente” com alimentação a lenha em toras e lenha picada “cavaco”. O PGA compreende os municípios de Trindade, Araripina, Ipubi, Ouricuri e Bodocó e sua produção de gesso para fundição ou revestimento compreende 95% de todo o gesso produzido no Brasil, isso implica a grande importância do setor.

Figura 18 – Representação dos municípios que compõem o Polo Gesseiro do Araripe - PGA



Fonte: Agência Estadual de Planejamento e Pesquisa Condepe/Fidem *apud* ADENE/ATECEL (2006).

As empresas analisadas estão inseridas no PGA e serão denominadas Empresa A e Empresa B. Foram realizadas duas visitas em cada empresa com duração de oito horas cada, com intervalo aproximado de 60 dias entre as visitas. O

objetivo era realizar as medições e obter informações sobre o processo produtivo e acompanhar algumas bateladas durante o período, para posterior avaliação da eficiência do processo de calcinação de cada uma delas.

3.2.1 Empresa A

A empresa A existe há apenas 5 anos e atualmente produz gesso rápido (fundição), gesso lento (revestimento), além dos pré-moldados placas e blocos. A empresa opera praticamente 24 horas/dia durante toda a semana para o processo de produção do gesso e em dois turnos para a produção dos pré-moldados. De acordo com informações repassadas pela administração, a empresa produz semanalmente 123 bateladas, o que representa 492 bateladas/mês. Cada batelada produz 160 sacos (40 Kg), portanto, a produção média mensal é de 3.150 *ton/mês*.

A empresa possui 2 fornos com capacidade de 6,5 toneladas cada que funcionam 24 horas diariamente por 5 dias por semana e mais 4 horas aos sábados, com produção média de 12 fornadas/dia para cada forno, totalizando 24 fornadas/dia, utilizando mensalmente cerca de 600 *st* de lenha. Correspondendo a um custo mensal de R\$ 84.000,00 com a matriz energética.

3.2.2 Empresa B

A empresa B existe há 17 anos e atualmente produz gesso rápido (fundição) e gesso lento (revestimento). A empresa opera 24 horas/dia durante toda a semana (7 dias). Segundo dados da produção repassados pela administração, a empresa apresentou produção média de 1.420 bateladas/mês durante o primeiro semestre de 2016, com média de 4.544 *ton./mês*, no entanto, a empresa possui capacidade instalada para produzir 6.000 *ton./mês*, o que indica que a mesma trabalhou com 76% de sua capacidade produtiva. Para a produção mensal de 4.544 toneladas de gesso, são necessárias aproximadamente 6.000 toneladas de gipsita, portanto, o custo mensal para a aquisição da matéria-prima será de R\$ 132.000,00 considerando o valor de R\$ 22,00 *ton/gipsita*.

A empresa possui 4 fornos do tipo marmitta horizontal “barriga quente”, sendo três deles do tipo SM. Todos possuem capacidade de 3,2 *ton/batelada* cada que funcionam 24 horas/dia durante todo o mês. Os fornos 2, 3 e 4 são alimentados por cavaco de forma automática, no entanto sem controle de quantidade. Com isso a

empresa não consegue identificar o real consumo individual de cada forno, nem tão pouco consegue identificar o que apresenta melhor eficiência e consequentemente economia do combustível. Na alimentação do forno 1 ainda é utilizado lenha como combustível. Se o cavaco utilizado for de eucalipto, o custo com a matriz energética é de R\$ 82.050,00, o que anualmente acarreta um valor aproximado de R\$ 984.600,00. Já se a matriz energética utilizada for a lenha nativa, o custo será de R\$ 78.901,30 mensal.

A empresa dispõe de monitoramento da temperatura de calcinação, portanto, o tempo de cada forno segue orientação do Controle de Qualidade que analisa cada batelada com ensaios laboratoriais para averiguar a qualidade do produto.

O tempo de cada batelada difere em relação aos fornos, assim com a temperatura de desidratação da gipsita. Para o forno 1 e 4, temos a temperatura de 155°C e um tempo médio de 101 minutos para o forno 1 e de 91 min para o forno 4. Para o forno 2, a temperatura era de 133°C e um tempo para ciclo completo (enforna + desidratação + desenforna) de aproximadamente 99 min e por fim, para o forno 3, a temperatura era de 151°C e o tempo do ciclo era de 110 minutos.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS

3.3.1 Determinação da umidade do combustível (lenha/cavaco)

A umidade da lenha em toras foi verificada com o auxílio do medidor de umidade para madeira DL 822 com martelete da DigiSystem pertencente ao CEPIS/PaqTc, no entanto, a umidade do cavaco foi determinada pelo Analisador de Umidade por Infravermelho IV 200 da Gehaka, que pertence ao Laboratório de Processos Químicos do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco LPQ/DEQ/UFPE.

Figura 19 – Medidores de umidade: (a) para madeira; (b) por infravermelho



3.3.2 Consumo de (lenha/cavaco) e energia gerada pelo combustível

O consumo de combustível dos fornos (lenha em tora ou cavaco) foi verificado durante as duas visitas realizadas a cada empresa. Durante essas visitas, foi realizada a pesagem da lenha com o auxílio de uma balança dinamômetro da SoloStocks pertencente ao CEPIS/PaqTc, como também a metragem em metro stéreo (*st*). A cada alimentação do forno, a lenha era pesada e computada. Por meio desse procedimento, foi possível determinar a quantidade de lenha utilizada em cada batelada em massa (*Kg*) e em volume (*st*). O cavaco, também foi pesado com o auxílio de uma balança pertencente a empresa, conforme o forno era alimentado.

Figura 20 – Pesagem da lenha (a); metragem da lenha (b) e pesagem do cavaco (c)

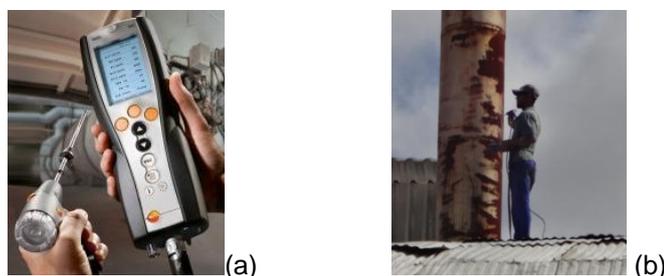


Fonte: Autor

3.3.3 Diagnostico dos gases da chaminé

As emissões atmosféricas foram medidas na saída da chaminé dos fornos por um período de 1 hora para cada batelada analisada, com o auxílio do analisador de gases de combustão testo 340 O equipamento pertence ao CEPIS/PaqTc.

Figura 21 – Analisador de gases de combustão (a); Medição de gases *in situ* (b)

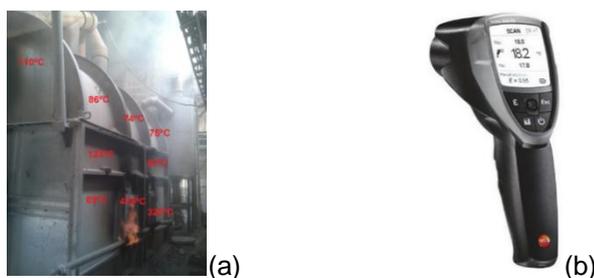


Fonte: Fonte própria

3.3.4 Transferência de calor pelas paredes dos fornos

As temperaturas médias registradas nas paredes do forno (fornalha, enforna, desenforna e a parede oposta as fornalhas) foram realizadas com o termômetro por infravermelhos de elevada temperatura teste 835-T2, pertencente ao CEPIS/PaqTc.

Figura 22 – Paredes do forno com destaque para a fornalha (a); Termômetro por infravermelho (b)



Fonte: Autor

3.3.5 Eficiência Térmica dos fornos

Para a determinação da eficiência térmica dos fornos foram utilizados os valores referentes as perdas de calor gerados pela chaminé e pelas paredes do forno e a energia gerada pela queima do combustível. O objetivo dessa avaliação é demonstrar de forma numérica a eficiência do processo estudado comparado com o a eficiência máxima que o mesmo pode atingir, considerando a própria estrutura do forno individualmente. Considera-se que ele atinge total eficiência quando não houver perdas quantificáveis externas ao sistema. Neste caso, não irá se considerar como eficiência de 100% a energia necessária para desidratar a gipsita, mas sim quando não houver perdas de temperatura para o ambiente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DO COMBUSTÍVEL (LENHA/CAVACO)

A umidade da lenha verificada para a Empresa A na 1ª visita foi de 51,6% e na 2ª visita foi de 35,3%, o que implica um PCI da lenha de 1.309 kcal/kg e 2.049 kcal/kg, respectivamente. Já para a Empresa B que utiliza o cavaco como matriz energética, os valores de umidade obtidos foram de 23% (PCI = 2.603 kcal/kg) para as duas visitas, pois o cavaco é produzido e estocado em local arejado e coberto. A umidade do combustível, seja lenha em toras ou cavaco influi diretamente no PCI e consequentemente no consumo, pois quanto mais úmida a matriz energética, menos eficiente se mostrará o processo de combustão.

4.2 CONSUMO DE (LENHA/CAVACO) E ENERGIA GERADA

O consumo do combustível dos fornos da Empresa A foi realizado com base na lenha utilizada por cada batelada, como também por cada tonelada de produto final. A empresa realizou um acompanhamento contínuo de 20 bateladas para cada forno e sua média e avaliação estão constantes na tabela 5.

Tabela 5 – Indicadores de desempenho e acompanhamento da Empresa A

Indicadores	Unidade	Forno 1		Forno 2	
		Inicial	Final	Inicial	Final
Umidade da lenha	%	51,6	35,3	51,6	35,3
Consumo lenha/fornada	st/for	1,31	0,93	1,34	1,08
Consumo lenha/produto acabado	st/ton	0,23	0,16	0,21	0,17
Energia térmica gerada	KWh	876,60	1.023,02	814,90	1.102,92

Fonte: Autor

O consumo de combustível dos fornos da Empresa B foi realizado com base na quantidade de cavaco (kg) utilizado em cada batelada, como também por cada tonelada de produto final. A empresa realizou um acompanhamento contínuo de 6 bateladas para cada forno. O forno 1 da empresa, que utiliza lenha como matriz energética estava em manutenção no momento das medições. Já o forno 4 também se encontrava em manutenção no momento segunda visita. O resumo da avaliação dos fornos da Empresa B estão descritos na tabela 6.

Tabela 6 – Indicadores de desempenho e acompanhamento da Empresa B

Indicadores	Forno 2		Forno 3		Forno 4
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial
Consumo cavaco/batelada (Kg/bat)	497,38	390,51	435,72	369,95	353,51
Consumo lenha/batelada (Kg/bat)	534,82	419,90	468,52	397,80	380,12
Consumo lenha/batelada (st/bat)	1,21	0,95	1,06	0,90	0,86
Consumo cavaco/ produto acabado (Kg/ton)	155,43	122,03	136,16	124,30	110,47
Consumo lenha/ produto acabado (Kg/ton)	167,13	131,22	146,41	151,60	118,79
Consumo lenha/ produto acabado (st/ton)	0,38	0,30	0,33	0,28	0,27
Energia térmica gerada (KWh)	1.615,51	1.268,37	1.415,24	1.201,62	1.148,21

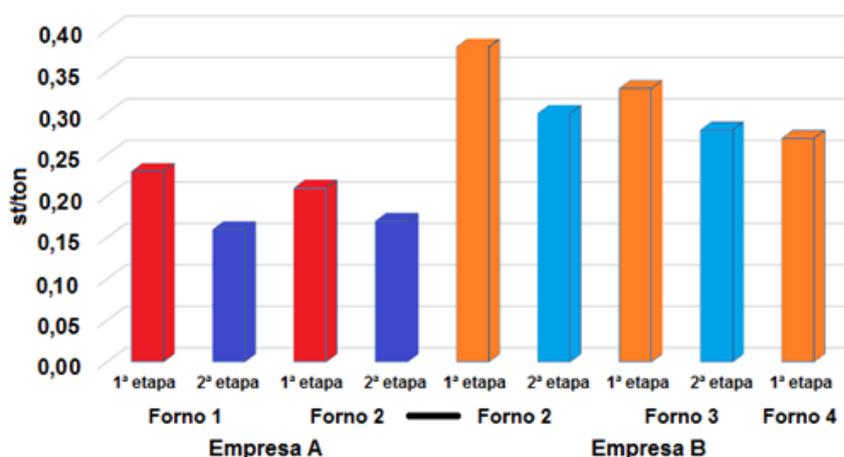
Fonte: Autor

Para calcular a energia gerada (KWh) pelo combustível foi necessário o conhecimento dos seguintes parâmetros:

- Capacidade do forno (ton);
- Peso de um metro da lenha (kg);
- Consumo da lenha da batelada (st/batelada e kg/batelada);
- Consumo de lenha/tonelada de gesso (st/ton e kg/ton);
- Tempo da fornada (min);
- Consumo de lenha/tempo de batelada (st/h e kg/h)
- PCI da lenha (kcal/kg)

A Figura 23 representa o consumo de lenha por tonelada de produto acabado dos fornos pertencentes as empresas A e B. O cavaco é o combustível utilizado pela empresa B, podendo ser oriundo de lenha nativa proveniente de plano de manejo ou de eucalipto. De acordo com as medições realizadas no local, 880 kg de lenha nativa produz 820 kg de cavaco. Já para o eucalipto, 1 ton produziu 940 kg de cavaco.

Figura 23 – Consumo de lenha por tonelada de gesso produzido



Fonte: Autor

Analisando o consumo de lenha da Empresa A, observamos que a mesma consumiu menor quantidade de lenha por produto acabado em relação a Empresa B, no entanto, a queima por cavaco é mais homogênea, o que propicia uma maior eficiência no processo de calcinação, menor tempo de batelada e melhor qualidade do produto final.

4.3 DIAGNOSTICO DOS GASES DA CHAMINÉ

Os gases da combustão nos indicam a eficiência da queima. Quando há altos teores de O_2 , implica excesso de ar utilizado na combustão. O percentual de CO pode indicar falta de ar, excesso de combustível, funcionamento inadequado ou defeito de combustão, ou seja, combustão incompleta. Já a taxa de conversão do carbono (CO_2) deve ser próximo ao valor estequiométrico para baixos teores de excesso de ar (SOUZA, 2006).

Para determinar a energia térmica perdida pelos gases de combustão expelidos pela chaminé foram considerados os seguintes parâmetros:

- Tempo de funcionamento do forno (*h/dia*);
- Temperatura ambiente e na saída dos gases pela chaminé ($^{\circ}C$);
- Velocidade do gás na chaminé (*m/s*);
- Diâmetro e área da chaminé (*m*) e (m^2);
- Densidade do ar na temperatura da saída dos gases pela chaminé (kg/m^3);
- C_p na temperatura da saída dos gases pela chaminé ($kJ/kg.K$);

- PC dos gases (kJ/kg);
- Vazão dos gases (m^3/h).

Na tabela 7 estão dispostas as informações referentes as medições dos gases de combustão expelidos pela chaminé e a energia térmica perdida, além de apresentar a quantidade de lenha consumida nessa perda e o custo gerado.

Tabela 7 – Informações sobre as perdas de calor pela chaminé nas empresas A e B

Empresa	Fornos		Indicadores			
			Temperatura chaminé ($^{\circ}C$)	Energia térmica perdida (KWh)	Consumo lenha/cavaco (<i>st ou ton/mês</i>)	Economia: lenha/mês ($R\$$)
A	1	Inicial	320	279	146 <i>st</i>	9.359,00
	2	Final	380	282	98 <i>st</i>	6.060,00
B	2	Inicial	805	317	53,74 <i>ton</i>	8.847,56
		Final	649	386	74,96 <i>ton</i>	11.961,85
	3	Inicial	700	415	70,38 <i>ton</i>	11.587,07
		Final	675	372	72,17 <i>ton</i>	11.516,17
	4	Inicial	369	439	74,45 <i>ton</i>	12.256,43

Fonte: Autor

Durante as medições dos gases da combustão nas Empresa A e B, observou-se que a fumaça apresentava aspecto branco apenas em alguns momentos, no entanto, na maioria das vezes foi observado a saída de fumaça preta, ou seja, a reação de combustão apresentou-se incompleta. Esse problema provavelmente pode estar relacionado com a grande quantidade de fuligem na chaminé, o que pode ter provocado alguma alteração no regulador da vazão, pois a velocidade dos gases se apresentou com média de 6,00 m/s para a Empresa A nas duas visitas de medições. Para a Empresa B, a valores encontrados foram de 6,00 m/s para a visita inicial e 7,00 m/s para as medições finais. A média da temperatura ambiente nas empresas foi de 30 $^{\circ}C$.

4.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELAS PAREDES DOS FORNOS

Para calcular a perda de energia gerada pelas paredes do forno (KWh) foi considerado os seguintes parâmetros, analisando as especificidades de cada parede (fornalhas, enforna, desenforna e parede completa, oposta as fornalhas):

- Espessura, altura e largura das paredes do forno (m);
- Área vazada (fornalha, enforna e desenforna) (m^2);

- Tempo de funcionamento do forno (*h/dia*);
- Temperatura interna e externa do forno ($^{\circ}\text{C}$);
- k (condutibilidade térmica) do tijolo refratário (W/m/K);
- PCI da lenha (kcal/kg);
- PC dos gases de combustão (kJ/kg).

Na tabela 8 estão dispostas as informações referentes as perdas de energia gerada pelas paredes do forno.

Tabela 8 – Perdas de energia nas paredes do forno das empresas A e B

Empresa	Fornos		Quantidade de calor transferido – Perdas (KWh)			
			Paredes			
			Fornalhas	Enforna	Desenforna	Oposta
A	1	Etapa 1	19,14	9,21	9,21	10,23
	2	Etapa 2	19,34	9,31	9,31	9,79
B	2	Etapa 1	12,22	7,74	7,74	12,58
		Etapa 2	12,78	8,10	8,10	13,16
	3	Etapa 1	11,11	7,03	7,03	11,44
		Etapa 2	11,48	7,27	7,27	11,82
	4	Etapa 1	12,13	7,68	7,68	12,49

Fonte: Autor

De acordo com a tabela 8, as perdas em termos de energia são bem maiores nas paredes das fornalhas e opostas a ela, quando comparadas as paredes de enforna e desenforna do gesso. Na Empresa A, a proporção de perda de energia nas paredes das fornalhas e oposta a ela em relação as paredes de enforna e desenforna é na proporção de 29% para os dois fornos. Já na Empresa B, a relação é de 36% para os fornos 2 e 3 na 1ª etapa e de 38,5% e 36,4% para os fornos 2 e 3 na 2ª etapa, respectivamente. Já o forno 4 apresentou uma perda de energia de 33% em relação as paredes. Na tabela 9 encontramos a perda de calor expelida pelas paredes em combustível, seja lenha em toras ou em cavaco.

Tabela 9 – Quantitativo de lenha relacionada as perdas de energia nas paredes do forno das empresas A e B

Empresa	Fornos		Economia: lenha – Perdas (st/mês)				Total
			Paredes				
			Fornalhas	Enforna	Desenforna	Oposta	
A	1	Etapa 1	10,0	4,8	4,8	5,3	24,9
	2	Etapa 2	6,7	3,2	3,2	3,4	16,5
B	2	Etapa 1	5,7	3,6	3,6	5,9	18,8
		Etapa 2	6,0	3,8	3,8	6,1	19,7
	3	Etapa 1	5,2	3,3	3,3	5,3	17,1
		Etapa 2	5,4	3,4	3,4	5,5	17,7
	4	Etapa 1	5,7	3,6	3,6	5,8	18,7

Fonte: Autor

Diante da análise da tabela 9, observamos que os fornos da Empresa A apresentam uma perda mensal de 25 st, em relação aos dados coletados na 1ª visita e de 16,5 st/mês para a análise realizada na 2ª visita de medições, o que representa uma economia de 8,5 st/mês. Já na Empresa B, não houve redução nas perdas de energia gerada pelas paredes do forno, onde sua representação mensal foi de 19 st, 17 st e 19 st para os fornos 2, 3 e 4 na primeira visita e de 20 st e 18 st para os fornos 2 e 3, respectivamente para a 2ª visita de medições. Na Tabela 10 encontramos a perda de calor expelida pelas paredes em valor monetário, o que implica os custos decorridos dessa perda.

Tabela 10 – Custo das perdas de energia nas paredes do forno das empresas A e B

Empresa	Fornos		Economia mensal – Perdas (R\$)				Total
			Paredes				
			Fornalhas	Enforna	Desenforna	Oposta	
A	1	Etapa 1	640,52	308,21	308,21	342,36	1.599,30
		Etapa 2	414,10	199,26	199,26	209,66	1.022,28
B	2	Etapa 1	344,51	218,16	218,16	354,75	1.135,58
		Etapa 2	394,88	250,06	250,06	406,62	1.301,62
	3	Etapa 1	313,10	198,27	198,27	322,40	1.032,04
		Etapa 2	354,71	224,62	224,62	365,25	1.169,20
	4	Etapa 1	341,89	216,51	216,51	352,05	1126,96

Fonte: Autor

Em termos monetários, a Empresa A apresenta um custo mensal total com as perdas de transferência de energia pelas paredes de R\$ 1.599,30 para as condições da 1ª etapa e de R\$ 1.022,28 para as condições referente a 2ª visita de medições. No

entanto, houve redução de R\$ 577,02 entre o consumo entre as visitas. Já na Empresa B, os custos referentes a transferência de energia pelas paredes para o forno 2 foi de R\$ 1.135,58 para a 1ª etapa e de R\$ 1.301,67 para a 2ª etapa. Para o forno 3 foi de R\$ 1.032,08 para a 1ª etapa e de R\$ 1.169,83 para a 2ª etapa e para o forno 4 foi de R\$ 1.127,00 para a 1ª visita de medições.

4.5 EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS FORNOS

Na indústria e na agricultura estão condicionadas pelo estado atual do potencial energético. Os gastos com energia determinam a eficiência da produção. Com isso, o aumento do consumo de energia torna mais importante a eficiência de aproveitamento do combustível e a diminuição de prejuízos provocados por impurezas produzidas na combustão. O melhor aproveitamento de um combustível estar diretamente relacionada a temperatura teórica da combustão, a determinação do excesso ótimo de ar na fornalha e ao controle de qualidade da combustão, pois a permanência das empresas no mercado comercial está inteiramente interligada ao potencial energético da mesma, sua otimização e eficiência (VLASSOV, 2001).

Como nesses tipos de forno a queima é indireta e o calor gerado pela biomassa não entra em contato direto com a gipsita, mas é transmitido através de um cilindro metálico que se encontra no centro da câmara de combustão, o processo se torna menos eficiente o que ocasiona muitas perdas de calor através das chaminés e paredes. Portanto, a determinação da determinação da eficiência térmica dos fornos considerou as perdas de calor gerados pela chaminé, pelas paredes do forno e a energia gerada pela queima do combustível. Na tabela 11 estão apresentados a eficiência térmica dos fornos em relação ao combustível utilizado e a umidade relacionada.

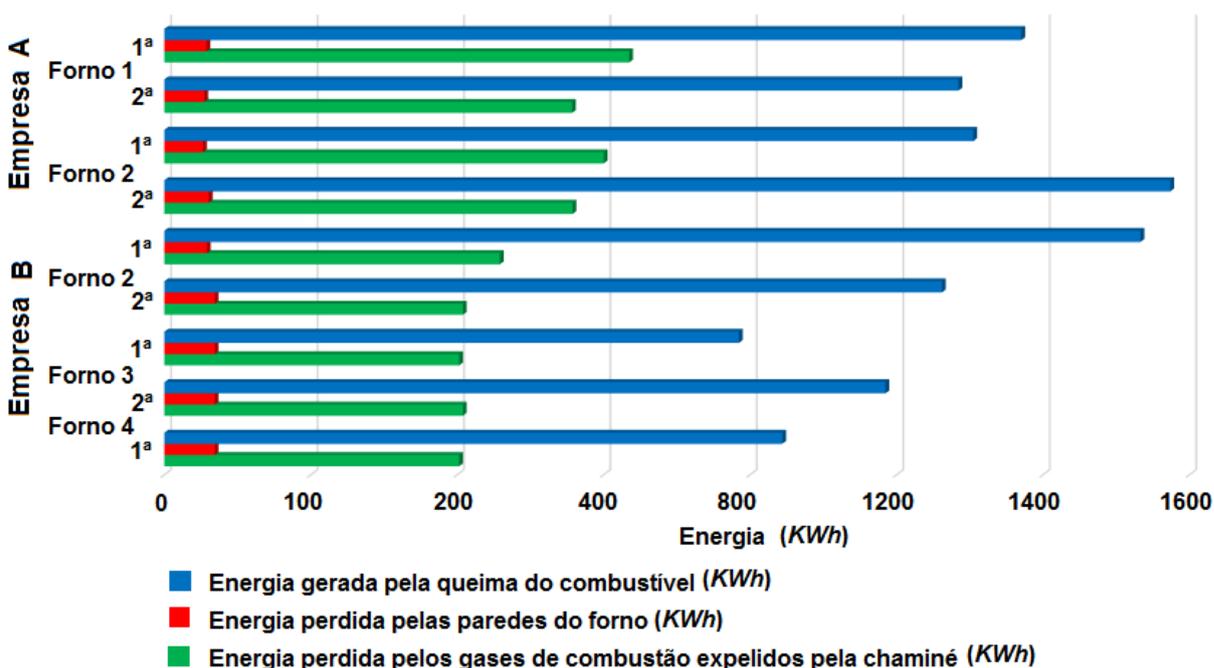
Tabela 11 – Energia gerada pelas paredes do forno, gases de combustão, consumo do combustível e eficiência dos fornos referente as visitas de medições *in situ*

Empresa	Fornos	Perdas de calor na Chaminé (KWh)	Perdas de calor nas paredes (KWh)	Energia gerada pela queima (KWh)	Eficiência do forno (%)	
A	1	Etapa 1	279	47,79	876,60	37
		Etapa 2	282	47,74	1.023,02	32
	2	Etapa 1	279	47,79	814,90	40
		Etapa 2	282	47,74	1.102,92	30
B	2	Etapa 1	317	40,28	1.615,51	22
		Etapa 2	386	42,14	1.268,37	34
	3	Etapa 1	415	36,61	1.415,24	32
		Etapa 2	372	37,84	1.201,62	34
	4	Etapa 1	439	39,98	1.148,21	42

Fonte: Autor

A figura 24 representa a energia gerada pela queima dos combustíveis e pelas perdas pelos gases de combustão e pelas paredes do forno.

Figura 24 – Energia gerada e consumida em KWh



Fonte: Autor

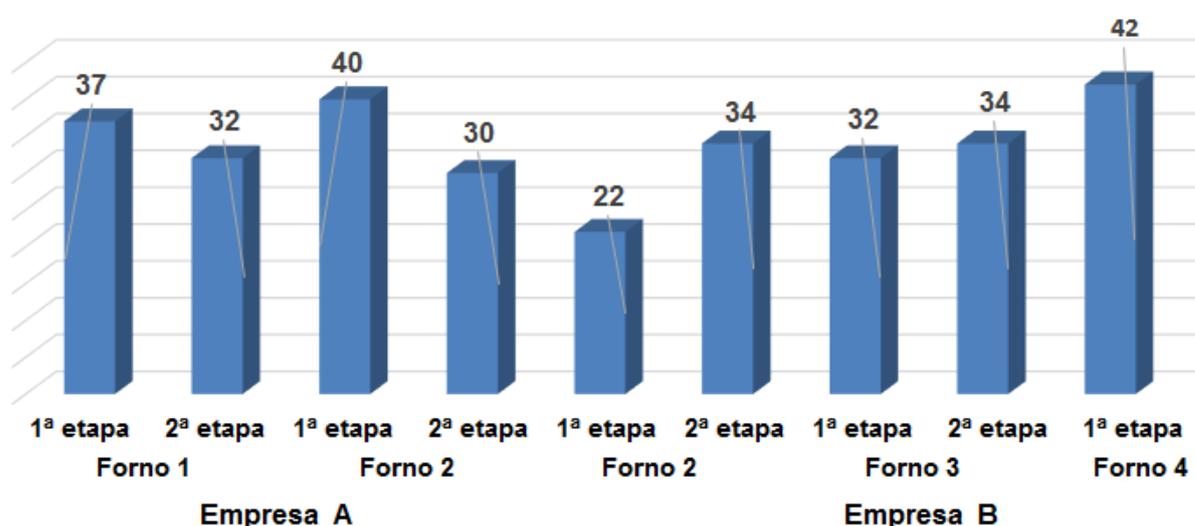
A eficiência energética dos fornos foi calculada pela seguinte fórmula matemática.

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{\text{Energia consumida}}{\text{Energia gerada}} \times 100$$

$$\text{Eficiência (\%)} = \left[1 - \frac{(\text{Energia perdida pela chaminé} + \text{Energia perdida pelas paredes})}{\text{Energia gerada}} \right] \times 100$$

Esse cômputo da eficiência térmica de cada forno implica que parte do calor gerado pelo consumo da matriz energética (eficiência térmica) foi absorvido no processo de desidratação da gipsita e que o calor restante foi perdido através dos gases da chaminé e paredes do forno. A figura 25 representa a eficiência dos fornos em cada etapa de medições.

Figura 25 – Eficiência térmica dos fornos



Fonte: Autor

O processo de fabricação de gesso consome uma grande quantidade de energia térmica obtida através da combustão da biomassa renovável. No entanto, a média de aproveitamento da energia utilizada no processo de calcinação é de aproximadamente 50%, devido as perdas de energia através da chaminé e das paredes do forno. Essa perda de energia aumenta os custos da produção do gesso e dificulta a competitividade das empresas no mercado comercial.

Segundo Peres et al., (2008) a eficiência térmica varia de 9,4% para lenha em forno tipo panela até 45% no forno rotativo (tubular) com óleo BPF. Isto significa um consumo de 1.638 a 342 *Mcal* por tonelada de gesso produzida. Já a PROJETEC (2010), indica que os fornos tubulares podem chegar a 63,42% de eficiência, com óleo BPF, ou seja consumo de apenas 243 *Mcal* por tonelada de gesso produzida.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas análises realizadas nos fornos das empresas A e B, observamos que ambos os fornos precisam de melhorias para tornar o processo de calcinação eficiente. Foi observado que a temperatura dos gases da combustão é muito alta, acima de 300°C, isso implica aumento da energia térmica pedida pela chaminé. Outro ponto de investigação é o tipo de material refratário utilizado nas câmaras de combustão, pois em alguns momentos das medições, foram observadas temperaturas superiores a 60°C nas paredes do forno.

Em relação a lenha utilizada, foi notório a melhor qualidade da combustão quando a umidade foi reduzida de 51% para 35,5%, pois o melhor aproveitamento do combustível está diretamente relacionada a temperatura teórica da combustão, a determinação do excesso ótimo de ar na fornalha e ao controle de qualidade da combustão. Pois, todos os cálculos de rendimento, eficiência de queima, são dados com base no PCI de um combustível que depende diretamente da umidade (SOUZA, 2006).

Os resultados da eficiência dos fornos analisados não corroboram com os valores obtidos por Peres et al., (2008), quando indica que a eficiência térmica nos fornos rotativos tubulares é de 45% utilizando óleo BPF como combustível, pois diante dos resultados, essa eficiência foi obtida utilizando lenha em toras e índices superiores com a utilização de cavaco como combustíveis. Os dados se assemelham aos obtidos PROJETEC (2010), no entanto, utilizando a lenha como combustível.

É notória a necessidade de melhoria nos fornos pertencentes às empresas estudadas, principalmente, nos pontos enumerados por Henriques Jr. (2013), como a recuperação de calor, que poderá proporcionar uma economia de energia de 5%, utilizando os gases de exaustão nos fornos para pré-aquecer o ar de combustão. Na implantação de um sistema de monitoramento da calcinação, que economizará 3% do combustível, por não trabalhar com uma alimentação de energia acima da quantidade necessária; no isolamento térmico, como a instalação de refratários de melhor qualidade ou fibra cerâmica. Essa implantação pode reduzir as perdas de calor pelas paredes do forno em torno de 5%. E por fim, a utilização de cavaco que poderá promover uma economia de 15% por propiciar uma queima mais homogênea.

6. REFERÊNCIAS

ADENE/ATECEL. **Eficiência energética e busca de alternativas. VI Seminário Nacional de Arranjos Produtivos Locais de Base Mineral – APL do Gesso em Pernambuco**, SINDUSGESSO/SEBRAE, 2006.

BENACHOUR, M.; PERES, L. S.; SANTOS, V. A., **Gesso: aplicação na construção civil**. Recife: Editora Bagaço, 2001. 135 p.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F. F. e LUZ, A. B. **Rochas & Minerais industriais: Gipsita**. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

BALTAR, C. A. M.; BASTOS, F.F.; LUZ, A. B. **Diagnóstico do polo gesseiro de Pernambuco (Brasil) com ênfase na produção de gipsita para fabricação de cimento**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Departamento de Engenharia de Minas. Recife, 2004.

DNPM, Anuário Mineral Brasileiro–AMB. DIDEM – Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, 2013.

EMBRAPA. **Aumento da Oferta de Matéria-prima de Base Florestal Sustentável para o Desenvolvimento Sócio-econômico da Região do Araripe**. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Petrolina. 2006.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed., São Paulo: Atlas, 2008.

HENRIQUES JR., M. F. **Potencial de financiamento de eficiência energética: nos setores de cerâmica e gesso no Nordeste**. Instituto Nacional de Tecnologia/MCTI/Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2013.

LIMA FILHO, H. J. B.; **Tratamento dos Resíduos de Gesso da Construção e da Demolição – RCD para a Produção de Gesso Beta Reciclado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Programa de Mestrado em Engenharia Química. Recife, 2010.

LYRA SOBRINHO, A C P; AMARAL, A.J.R.; DANTAS, J.O.C.; DANTAS, J.R.A. **Gipsita**. Balanço Mineral Brasileiro. Brasília. 2001.

MELO, R. A. D. P. **Estudo do efeito de aditivos nas propriedades do gesso alfa produzido em meio aquoso**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Programa de Mestrado em Engenharia Química. Recife, 2013.

MUNHOZ, M. L. S. C., RENOFIO, A., **Uso da gipsita na construção civil e adequação para a P+L**, XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguaçu- PR, 2007.

OLIVEIRA, F. M. C., OLIVEIRA, BORGES, L. E. P., MELO, E. B., BARROS, M. L. S. C., **Características Mineralógicas e Cristalográficas da Gipsita do Araripe**, Holos 5. 2012, p. 71.

PEREIRA, E. B. **Perfil Analítico da Gipsita**. Ministério das Minas e Energias. Departamento Nacional da Produção Mineral. Rio de Janeiro. Boletim, 1973.

PERES, L.; BENANCHOUR, M.; SANTOS, V. A., **Gesso: Produção e Utilização na Construção Civil**. Recife: Sebrae, 2008.

PROJETEC. Estudo de viabilidade técnico-econômica do processo de produção e logística do gesso fabricado a partir da gipsita do Araripe de Pernambuco. Relatório Final. 2010.

REIGELHAUPT, E. M. e PAREYN, F. G. C., **A questão energética e o manejo florestal da Caatinga**. In: Gariglio, M. A. et al. organizadores. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. p. 65 – 75. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

RIBEIRO, A. S. **Produção de Gesso Reciclado a partir de resíduos oriundos da Construção civil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba - UFPB. Programa de Mestrado em Engenharia Urbana. João Pessoa, 2006.

SHINOHARA, A. H.; OLIVEIRA, M. A. C. **A experiência com gás natural/GLP no polo gesseiro do Araripe, PE**. Cerâmica v. 60 nº. 354 São Paulo, abr./jun, 2014.

SOUZA, M. E. A. O. **Estudo de um processo de combustão de gás totalflex para calcinação da Gipsita em regiões remotas**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFPE-Recife, 2006

VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A., **Eficiência Energética: fundamentos e aplicações**. 1ª ed. Elektro. Universidade Federal de Itajubá. EXCEN. Fupai, Campinas-SP, 2012.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmara de combustão**. ed. UFPR: Curitiba, 2001