

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR**  
**FABIANO RODRIGUES DE SOUSA JUNIOR**

**ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA EM VBA – EXCEL PARA SIMULAÇÃO DO  
PROCESSO DE SECAGEM E EFICIÊNCIA TÉRMICA NA MOAGEM DE  
CIMENTO PORTLAND EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

**FORMIGA**  
**2018**

CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
FABIANO RODRIGUES DE SOUSA JUNIOR

ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA EM VBA – EXCEL PARA SIMULAÇÃO DO  
PROCESSO DE SECAGEM E EFICIÊNCIA TÉRMICA NA MOAGEM DE CIMENTO  
PORTLAND EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Química do UNIFOR-  
MG, como requisito parcial para obtenção do  
título de bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Rosiene Gonzaga de Jesus  
Pimenta

**FORMIGA**  
**2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca UNIFOR-MG

S725 Sousa Júnior, Fabiano Rodrigues de.  
Elaboração de um programa em VBA-Excel para simulação do  
processo de secagem e eficiência térmica na moagem de cimento portland  
em uma indústria cimenteira / Fabiano Rodrigues de Sousa Junior. – 2018.  
82 f.

Orientadora: Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia  
Química)-Centro Universitário de Formiga-UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Programa VBA-EXCEL. 2. Moagem. 3. Cimento. I. Título.

CDD 624.1834

Catalogação elaborada na fonte pela bibliotecária  
Rosana Guimarães Silva – CRB6-3064

Fabiano Rodrigues de Sousa Junior

ELABORAÇÃO DE UM PROGRAMA EM VBA – EXCEL PARA SIMULAÇÃO DO  
PROCESSO DE SECAGEM E EFICIÊNCIA TÉRMICA NA MOAGEM DE CIMENTO  
PORTLAND EM UMA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Química do UNIFOR-MG,  
como requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



Prof<sup>a</sup> Roslene Gonzaga de Jesus Pimenta  
Orientadora



Prof. D.r. Alex Magalhães de Almeida  
UNIFOR-MG



Prof. M.e. Samuel da Silva Ribeiro  
UNIFOR-MG

Formiga, 14 de Novembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, especialmente aos meus pais, Mirian Sousa Castro e Fabiano Rodrigues de Sousa, por todo o apoio e incentivo.

Aos colegas de estágio da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN, em especial Nickson Bueno, Vilmar Alves e Ícaro Toledo, por todo apoio e incentivo.

A todos os professores, que ao longo de minha vida acadêmica contribuíram para a minha formação, em especial a minha orientadora Rosiene Gonzaga de Jesus Pimenta.

A Deus, ao qual todos devemos a dádiva da existência, por ter me dado coragem e sabedoria para cumprir esta jornada.

## RESUMO

A indústria necessita cada vez mais otimizações para redução de custos, incluindo reduções de consumo energético. A indústria de cimentos é uma das que mais consomem energia elétrica e térmica no mundo, com isso a necessidade cada vez maior de se ter um aproveitamento energético. O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver um programa em VBA-Excel, para simulação e eficiência térmica em uma moagem de cimento, que calcule a vazão. Para isso realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre o tema, elaborou-se a modelagem matemática e adaptou-se a mesma para o Excel juntamente com sua ferramenta Visual Basic for Applications. Foram apresentadas todas as entradas necessárias para os cálculos da vazão de gases no moinho de cimento, a temperatura de ebulição da água no interior do moinho de cimento, os calores específicos das matérias-primas utilizadas para produção do cimento portland tipo F – 32, as taxas de transferência de calor do gás quando entra e sai do moinho, a taxa de transferência de calor consumido pelas matérias-primas, taxa de transferência de calor perdida por convecção e radiação no moinho de cimento, a vazão de ar falso que incorpora no sistema e a relação ar/material, sendo o mesmo validado pelos cálculos manuais realizados pelo autor. Todas as janelas do programa foram apresentadas. Os resultados do programa compatibilizaram com os resultados obtidos pelos cálculos manuais. O programa se demonstrou ágil, trazendo maior comodidade ao usuário. Ao final realizou-se uma comparação com o resultado da relação ar/material, em relação aos valores ideais determinados por uma fabricante de moinhos.

Palavras-chave: Programa VBA-EXCEL. Moagem. Cimento.

## **ABSTRACT**

The industry needs more and more optimizations to reduce costs, including reductions in energy consumption. The cement industry is one of the industries that most consume electric and thermal energy in the world, with this the increasing need to have an energetic use. The present work has the objective of developing a program in VBA-Excel, for simulation and thermal efficiency in a cement mill, that calculates the flow. For this, a bibliographic research was done on the subject, the mathematical modeling was elaborated and adapted the same for Excel along with its tool Visual Basic for Applications. All inputs required for calculations of the gas flow in the cement mill, the boiling temperature of the water inside the cement mill, the specific heats of the raw materials used for the production of portland type F-32 cement, the heat transfer rates of the gas as it enters and leaves the mill, the heat transfer rate consumed by the raw materials, heat transfer rate lost by convection and radiation in the cement mill, the false air flow that it incorporates into the system and the air / material relation, being the same one validated by the manual calculations realized by the author. All program windows have been displayed. The results of the program were compatible with the results obtained by manual calculations. The program proved to be agile, bringing greater convenience to the user. At the end, a comparison was made with the result of the material air ratio, in relation to the ideal values determined by a mill manufacturer.

Keywords: VBA-EXCEL Program. Milling. Cement

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxograma do processo de produção do cimento.....                              | 15 |
| Figura 2 - Principais métodos de empilhamento. ....  | 19 |
| Figura 3 - Fluxo de material e gases em um sistema de forno rotativo.....                  | 22 |
| Figura 4 - Forno de Clínquer .....   | 23 |
| Figura 5- Esquema geral de um moinho de rolos .....  | 25 |
| Figura 6 - Moinho Loesche LM 60.4.....   | 26 |
| Figura 7 - Moinho de rolos PFeiffer .....  | 26 |
| Figura 8 - Eclusa de alimentação .....   | 27 |
| Figura 9 - Rolos M e S .....   | 28 |
| Figura 10 - Mesa de moagem .....   | 28 |
| Figura 11 - Classificador dinâmico Loesche.....  | 30 |
| Figura 12 - Fluxo de Moagem e Estrutura de um Moinho Vertical .....                        | 31 |
| Figura 13 – Interior de um filtro de mangas .....  | 32 |
| Figura 14: Tubo de Pitot e sua medições.....   | 33 |
| Figura 15: Exemplo de medição de velocidade de um fluido.....                              | 34 |
| Figura 16 - Circuito de Moagem.....  | 43 |
| Figura 17 - Entrada de gases do moinho e Saída de gases do Filtro.....                     | 44 |
| Figura 18 - Tubo de pitot e ponto de análise.....  | 44 |
| Figura 19 - Elaboração do UserForm2.....   | 48 |
| Figura 20-Balanço de Massa .....   | 49 |
| Figura 21 - Planilha 1: Vazão do gás.....  | 50 |
| Figura 22 - Planilha 2: Cp's das matérias-primas .....                                     | 51 |
| Figura 23 - Planilha 3: Taxas de transferência de calor e Perdas de Calor.....             | 51 |
| Figura 24 - Planilha 4: Vazão das matérias primas.....                                     | 52 |
| Figura 25 - Planilha 5: Temperatura de ebulição da água.....                               | 52 |
| Figura 26 - Tela Inicial da planilha .....   | 53 |
| Figura 27 - Tela de inserção dados do moinho.....  | 53 |
| Figura 28 - Tela de inserção de dados referente ao moinho.....                             | 55 |
| Figura 29 - Menu de inserção de dados para cálculo das perdas por convecção e radiação ... | 56 |
| Figura 30 - Tela do Filtro.....  | 56 |
| Figura 31 - Menu de inserção das pressões dinâmicas .....                                  | 57 |
| Figura 32 - Tela do moinho Validação .....   | 60 |



## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- Tipos de cimentos e composições.....                                   | 24 |
| Tabela 2 - Consumo térmico no moinho de Cimento.....                             | 49 |
| Tabela 3 - Pressões Dinâmicas no duto de saída de gases do filtro de mangas..... | 58 |
| Tabela 4 - Entradas utilizadas para o programa e cálculos manuais.....           | 59 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

$\mu\text{m}$  – Micrometros

VBA – Visual Basic for Applications

CaO – Oxido de Cálcio

MgO – Oxido de Magnésio

FSC – Fator de Saturação da cal

MS – Modulo de Sílica

MA – Modulo de Alumínio

$\dot{m}$  – Vazão mássica

$V$  – Velocidade

$\dot{V}_m$  – Velocidade média

$\rho$  – Densidade

$\dot{V}$  – Vazão volumétrica

$A$  – Área

$C_p$  – Calor específico

$T$  – Temperatura

$E$  – Taxa de energia

$\dot{Q}$  – Taxa de transferência de calor

$P$  – Pressão

$e_s$  – Pressão de saturação

$h$  – Coeficiente de transferência de calor

$h_{nat}$  – Coeficiente de convecção natural

$v$  – Velocidade do ar na superfície do material

$e$  – Exponencial de reflexão do impacto do vento

$D$  – Diâmetro do objeto analisado

$\alpha$  – Fator de visão

$\epsilon$  – Emissividade da superfície

$\sigma$  – Coeficiente de Stefan Boltzmann

$\pi$  – Valor de Pi

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <b>11</b> |
| <b>2 OBJETIVOS .....</b>  | <b>13</b> |
| <b>2.1 Objetivo Geral .....</b>                                 | <b>13</b> |
| <b>2.2 Objetivos Específicos.....</b>                           | <b>13</b> |
| <b>3 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>                              | <b>14</b> |
| <b>3.1 Produção de cimento portland .....</b>                   | <b>14</b> |
| <b>3.1.1 Principais matérias-primas da Farinha de Cru.....</b>  | <b>16</b> |
| <b>3.1.1.1 Calcário .....</b>                                   | <b>16</b> |
| <b>3.1.1.2 Argila .....</b>                                     | <b>16</b> |
| <b>3.1.1.3 Minério de Ferro.....</b>                            | <b>17</b> |
| <b>3.1.1.4 Areia.....</b>                                       | <b>17</b> |
| <b>3.1.2 Principais matérias-Primas do Cimento .....</b>        | <b>17</b> |
| <b>3.1.2.1 Gesso .....</b>                                      | <b>17</b> |
| <b>3.1.2.2 Escória de Alto Forno .....</b>                      | <b>18</b> |
| <b>3.1.2.3 Pozolana.....</b>                                    | <b>18</b> |
| <b>3.1.2 Fluxo de produção do Clínquer.....</b>                 | <b>19</b> |
| <b>3.1.2.1 Britagem das matérias-primas .....</b>               | <b>19</b> |
| <b>3.1.2.2 Pré – homogeneização do calcário .....</b>           | <b>19</b> |
| <b>3.1.2.3 Moagem da farinha de cru.....</b>                    | <b>20</b> |
| <b>3.1.2.4 Torre de Ciclones.....</b>                           | <b>21</b> |
| <b>3.1.2.5 Forno Rotativo .....</b>                             | <b>23</b> |
| <b>3.1.2.6 Moagem de Cimento.....</b>                           | <b>24</b> |
| <b>3.2 Moagem Vertical de Rolos .....</b>                       | <b>25</b> |
| <b>3.2.1 Eclusa de alimentação .....</b>                        | <b>26</b> |
| <b>3.2.2 Rolos moedores .....</b>                               | <b>27</b> |
| <b>3.2.3 Mesa de moagem.....</b>                                | <b>28</b> |
| <b>3.2.4 Classificador dinâmico .....</b>                       | <b>29</b> |
| <b>3.2.5 Funcionamento de um Moinho Vertical de Rolos .....</b> | <b>30</b> |
| <b>3.3 Filtro de Mangas.....</b>                                | <b>32</b> |
| <b>3.4 Determinação de vazão de fluidos.....</b>                | <b>32</b> |
| <b>3.5 Balanços de Massa .....</b>                              | <b>35</b> |
| <b>3.6 Balanço de Energia.....</b>                              | <b>35</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>3.7 Pressão de vapor .....</b>  | <b>36</b> |
| <b>3.7 Cálculo dos calores específicos do clínquer, calcário e gesso.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>3.8 Determinação de perdas de energia por convecção em moinhos de cimento .....</b>                                   | <b>37</b> |
| <b>3.9 Determinação de perdas de energia por radiação em moinhos de cimento .....</b>                                    | <b>38</b> |
| <b>3.9 Modelagem e Simulação de Processos .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>3.5.1 Microsoft EXCEL e o Visual Basic for Applications – VBA.....</b>  | <b>39</b> |
| <b>4. METODOLOGIA.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>4.1 Balanço de massa do circuito de moagem .....</b>  | <b>46</b> |
| <b>4.3 Balanço de energia do circuito de moagem .....</b>  | <b>47</b> |
| <b>4.4 Elaboração do programa de simulação do processo de secagem e eficiência térmica</b>                               | <b>48</b> |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>49</b> |
| <b>5.1 O Programa.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>5.2 Validação do programa.....</b>  | <b>58</b> |
| <b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>62</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>63</b> |
| <b>APÊNCICE A – RELATÓRIO EMITIDO PELO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO<br/>PROCESSO DE SECAGEM E EFICIÊNCIA TÉRMICA.....</b>    | <b>66</b> |
| <b>APÊNCICE B – RESULTADOS EMITIDOS PELO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO<br/>DO PROCESSO DE SECAGEM E EFICIÊNCIA TÉRMICA .....</b> | <b>67</b> |
| <b>APÊNCICE C – CÁLCULOS REALIZADOS A MÃO PELO AUTOR.....</b>  | <b>68</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade cada vez maior de corte de gastos nas indústrias, tem influenciado os engenheiros e gestores a cada vez mais otimizarem seus processos, para serem mais eficientes produtivamente e economicamente. A eficiência de um processo pode estar associada ao controle operacional, maquinário adequado e escala de produção, fatores que exigem testes e amplas pesquisas para que se possa satisfazer todas as expectativas vindas dos clientes e também dos empresários e acionistas da industrial no geral. A simulação de processos é uma ótima ferramenta tanto para quem está visando a otimização como também está pretendendo criar um processo novo, pois com ela você prevê resultados, erros e possíveis melhorias (CHWIF, 2010).

A indústria de cimentos é uma das que mais consomem energia no mundo. Segundo Katsioti<sup>1</sup> et al. (2009, apud ATMACA, KANOGLU, 2012, p. 1), cerca de 2% de toda a energia produzida no mundo é usado para moagem de materias, sendo que 65% da energia elétrica consumida na indústria cimenteira é destinada a moagem de carvão, matéria primas e clínquer. A indústria cimenteira cresce por ano cerca de 4,44%, com cerca de 2.293,3 milhões de toneladas de cimento produzido no ano de 2005 (PAULA, 2009).

Moinhos verticais ou de rolos são comumente usados na moagem de cimentos, pois proporcionam uma grande eficiência na redução granulométrica do clínquer e outros materiais aditivos ao cimento, tal equipamento contém inúmeras variáveis que influenciam na eficiência da moagem (LOESCHE, 2016). A simulação auxilia em estimar valores, ajuda a melhorar a qualidade de um produto, estimando e analisando resultados obtidos por ela (CHWIF 2010).

O presente estudo visa elaborar uma modelagem e simulação do processo de secagem e eficiência térmica de um moinho de rolos, usualmente chamado de moinho vertical, usado para a moagem de cimento em uma indústria cimenteira situada em Arcos, centro oeste de Minas Gerais, com intuito de obter-se uma ferramenta que irá ajudar no controle do processo de moagem, através de seus resultados verificar quais das variáveis deverão ser ajustadas no processo, poder fazer um melhor controle energético do processo e através da obtenção dos resultados da simulação e a análise em campo, reduzir os desgastes do circuito de moagem devido ao mau controle das variáveis.

---

<sup>1</sup> KATSIOTI M., TSAKIRIDIS P., GIANNATOS P., TSIBOUKI Z., MARINOS J. **Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance.** Construction and Building Materials, 2009.

Para este trabalho foi escolhido o VBA – EXCEL, como programa de simulação, por ser um programa que está disponível em grande parte das empresas, faculdades e computadores, oferecendo uma grande gama de aplicações que podem ser realizados pela interface do VBA, sendo também um programa de fácil interface com grandes funções, que podem facilitar muito o trabalho de um engenheiro (GOMEZ, 2009).

Este trabalho se justifica por apresentar uma ferramenta que agilizará a rotina de engenheiros e técnicos em análises de eficiência térmica, balanços de massas e balanços de energia, contendo uma interface de fácil entendimento, evitando a realização de inúmeros cálculos manuais e conversões de unidades.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Elaborar um programa em VBA - EXCEL para simulação do processo de secagem e eficiência térmica na moagem vertical de cimento portland em uma indústria cimenteira.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Descrever a modelagem matemática utilizada para elaboração do programa em VBA-EXCEL.
- Elaborar um programa em VBA – EXCEL que calcule a vazão de gases no moinho de cimento, a temperatura de ebulição da água no interior do moinho de cimento, os calores específicos das matérias-primas utilizadas para produção do cimento portland tipo F – 32, as taxas de transferência de calor do gás quando entra e sai do moinho, a taxa de transferência de calor consumido pelas matérias-primas, taxa de transferência de calor perdida por convecção e radiação no moinho cimento, a vazão de ar falso que incorpora no sistema e a relação ar/material.
- Apresentar um exemplo prático do uso do programa.
- Apresentar as vantagens e desvantagens da utilização do programa.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção serão demonstradas, as bases teóricas para elaboração deste trabalho, retiradas de literaturas existentes, como artigos acadêmicos, normas técnicas, trabalhos de conclusão de curso, dissertação de mestrados e teses de doutorado.

#### 3.1 Produção de cimento portland

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), o cimento pode ser descrito de forma simples como, “um pó fino com propriedades aglomerantes aglutinantes ou ligantes, que endurece sob ação da água. ”, sendo esse o material mais usado e necessitado na construção civil.

Tem-se no mercado dois tipos de processo de produção de cimento: processo úmido e o processo a seco; sendo o processo a seco o mais usado, suas características são: a mistura de matérias-primas são moídas a seco, e a alimentação do forno ocorre com matéria-prima em pó, os gases do forno rotativo são reaproveitados nas moagens para secagem das mesmas, proporcionando uma diminuição no gasto energético (GAUTO E ROSA,2011).

Este trabalho irá focar no processo de produção a seco, devido a ser o processo usual pela empresa escolhida como objeto de estudo.

Segundo Gauto e Rosa (2011) o processo de fabricação de cimento a seco, tem-se como principais matérias primas a argila, o calcário e uma pequena quantidade de compostos que contenham ferro.

De forma geral o processo de fabricação do cimento a seco é descrito abaixo:

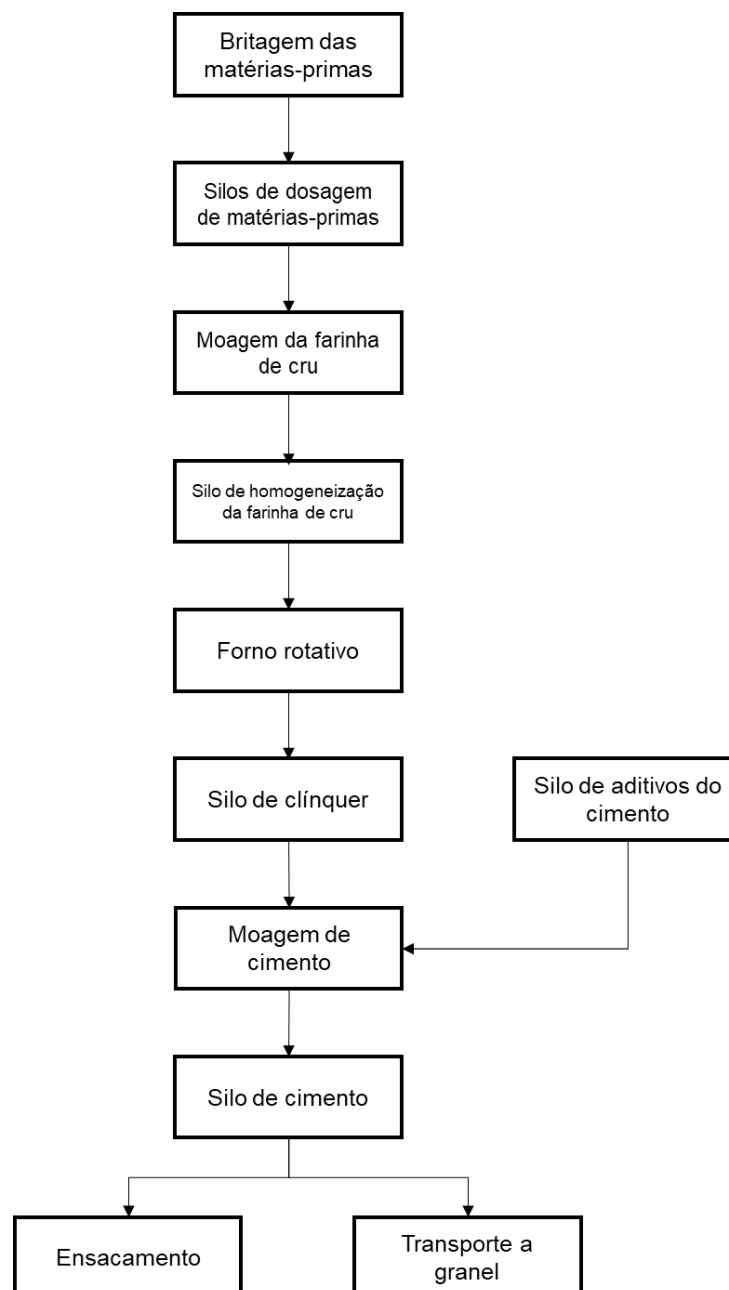
As matérias-primas são extraídas das minas, em sequência são britadas e misturadas em determinadas proporções. A mistura contendo 90% de calcário e 10% de argila, aproximadamente, chamada de farinha de cru, passa por moagem em moinho de bolas, rolos ou barras, onde se processa o início da mistura das matérias-primas e ao mesmo tempo sua pulverização. A mistura crua é homogeneizada em silos verticais de grande porte, por meio de processos pneumáticos e por gravidade. Dos silos de homogeneização, a farinha é introduzida em um forno, depois de passar por pré aquecedores (equipamento que aproveitam o calor dos gases provenientes do forno e promovem o aquecimento do material). No forno rotativo, a mistura é calcinada à temperatura de 1450 °C, que resulta em um material designado clínquer, que ao sair do forno é resfriado. O clínquer é reduzido a pó por meio da moagem, juntamente com gesso e outros aditivos. Junto com o clínquer, adições de gesso, escória de ferro,



pozolana e o próprio calcário, compõem os diversos tipos de cimento. Essas substâncias são estocadas separadamente, antes de entrarem no moinho de cimento. O cimento produzido é armazenado em silos e, depois ensacados (GAUTO E ROSA, 2011, p.263).

A FIG.1 demonstra um fluxograma exemplificando de forma simplificada o processo de produção do cimento.

Figura 1 - Fluxograma do processo de produção do cimento



Os próximos tópicos descreveram mais detalhadamente o processo produtivo da fabricação do Cimento Portland.

### **3.1.1 Principais matérias-primas da Farinha de Cru**

A farinha de cru é composta basicamente de calcário e argila, podendo-se adicionar outros compostos para correção dos componentes necessários como areia, bauxita e minério de ferro (Zamperi,1989). Os tópicos seguintes detalharão as principais matérias-primas da farinha de cru.

#### **3.1.1.1 Calcário**

De acordo com a ABCP (2002) o calcário é a principal matéria-prima do clínquer, sendo usado em proporção de 75% - 80% em relação as outras matérias-primas que dão origem ao cimento portland. Segundo Alves e Matos, (2005, p.327) o calcário é uma rocha que apresenta em sua composição química o CaO, MgO, contendo também algumas impurezas como argilominerais e aluminossilicatos, de acordo com essas composições o calcário pode ser classificado entre calcita (composição de  $\text{CaO} \geq 56\%$ ), dolomita (composição de  $\text{CaO} \leq 30,4\%$  e  $\text{MgO} \geq 21,95\%$ ).

O calcário também é uma matéria-prima utilizada na moagem final do cimento, podendo chegar a teores de 25% em massa da composição final do cimento ABCP (2002).

A extração do calcário pode ser feita por minas de lavra a céu aberto ou subterrânea. A empresa escolhida como objeto de estudo, conta com uma mina de lavra a céu aberto, sendo dividida em bancadas, as quais cada uma contém um calcário com teores diferentes de CaO e MgO. Com base na escolha da bancada, é feito o desmonte através de detonações com explosivos. As rochas são direcionadas a uma sequência de britadores, para que o calcário seja diminuído a uma granulometria desejada, sendo posteriormente encaminhado as esteiras transportadoras que levarão calcário aos silos de dosagem da “farinha de cru”.

#### **3.1.1.2 Argila**

Segundo Andrade, Moura e Queiroz (2017, p.4), “a argila é um mineral que apresenta tamanho inferior a 2  $\mu\text{m}$  em uma rocha sedimentar, é composta de silicatos de alumínio hidratados, óxido de ferro, alumínio e silício”, sendo um composto de muita importância para

o cimento, devido aos vários compostos presentes que são necessários para a fabricação de um clínquer de qualidade. Uma argila rica em FeO e SiO<sub>2</sub> fara com que tenha menos necessidade de acrescentar areia e minério de ferro, uma vez que seja necessário somente o teor estipulado pela receita da farinha de cru.

#### 3.1.1.3 Minério de Ferro

O minério de ferro é um mineral ou uma associação de minerais que contem óxidos hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (MINERAÇÃO VALE). Segundo Lima (2011), minério de ferro é utilizado somente para suprir as deficiências da argila em relação ao teor de FeO na “farinha de cru”.

A empresa escolhida como objeto de estudo usa e compra o minério de ferro de fornecedores da região, sendo armazenada em pilhas a céu a aberto, sendo posteriormente direcionadas para as esteiras transportadoras que levam ao silo de dosagem da composição da “farinha de cru”.

#### 3.1.1.4 Areia

A areia é usada para correção de Si na composição da farinha de cru (ZAMPERI,1989). Ela é um material cuja sua composição é em quase sua totalidade formada de SiO<sub>2</sub> podendo chegar em cerca de 99 % (LUZ e LINS 2005, p.107).

### 3.1.2 Principais matérias-Primas do Cimento

#### 3.1.2.1 Gesso

Segundo Lima (2011) o gesso está presente em jazidas sedimentares chamadas de evaporitos sob a forma de gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), hemi-hidrato ou bassanita (CaSO<sub>4</sub>.1/2H<sub>2</sub>O) e anidrita (CaSO<sub>4</sub>), sendo a mais usada na indústria cimenteira a gipsita. O gesso é usado como um aditivo para a formulação final do cimento, sendo misturado juntamente com o clínquer e outros aditivos dependendo do tipo de cimento portland (CP), sendo ele o responsável por regular o tempo de maleabilidade do cimento após mistura com a água. Este fato se dá pois as moléculas de gesso formam uma espécie de película, que envolve as partículas de cimento, retardando seu endurecimento devido a hidratação.

O gesso é um material com alto teor de água livre (BALTAR, BASTO E LUZ, 2005). O gesso é um material impactante no processo de secagem dentro da moagem de cimento, por conter um alto teor de umidade.

### 3.1.2.2 Escória de Alto Forno

De acordo com Costa (2006), a escória de alto forno é uma rocha metamórfica do tipo silicítica. A escória de alto forno contém vários compostos químicos, dentre eles estão o óxido de silício  $\text{SiO}_2$ , óxido de alumínio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , óxido de cálcio  $\text{CaO}$ , óxido de magnésio  $\text{MgO}$ , óxido de ferro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sendo estes constituintes de 95% da massa da escória de alto forno. A escória de alto forno contém propriedades hidráulicas, que são desejadas para a indústria cimenteira. Segundo Lima, (2011, p.19), “a escória de alto forno contém propriedades aglomerantes, só que estas propriedades não são ativadas pela água e sim pelo hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  proveniente da hidrólise do  $\text{CaO}$ , ajudando assim na resistência final do cimento”. A escória de alto forno é usada apenas em alguns tipos de cimento portland, sendo eles: CPI-S, CPII-E e CP-III.

A escória de alto forno usada na empresa escolhida como objeto de estudo, contém um alto teor de umidade, devido a ser estocada em montes a céu aberto, se tornando uma das matérias-primas impactantes no processo de secagem dentro da moagem de cimento.

### 3.1.2.3 Pozolana

Segundo Melhotra<sup>2</sup> e Mehta (1996 apud CORDEIRO e DÉ SIR, 2010, p. 1) materiais pozolânicos são compostos silicosos ou sílico-aluminosos que finamente moídos e em presença de água, reagem com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. No mercado existem vários materiais que possuem propriedades pozolânicas, dentre eles estão a cinza volante, sílica ativa, cinza de casca de arroz, bagaço de cana de açúcar e solos argilosos submetidos a altas temperaturas e moagem adequada (CORDEIRO e DÉ SIR, 2010).

---

<sup>2</sup> Melhotra M.V., Mehta K.P., Pozzollanic and cementitious materials, Gordon and Breach Publ., Amsterdam, Holanda, 1996, p.191.

### 3.1.3 Fluxo de produção do Clínquer

De acordo com Zampieri (1989), existem dois tipos de produção de cimento portland, o processo via úmida e o via seca. Este trabalho irá especificar o processo produtivo da Indústria escolhida como objeto de estudo, cujo processo se caracteriza por via seca.

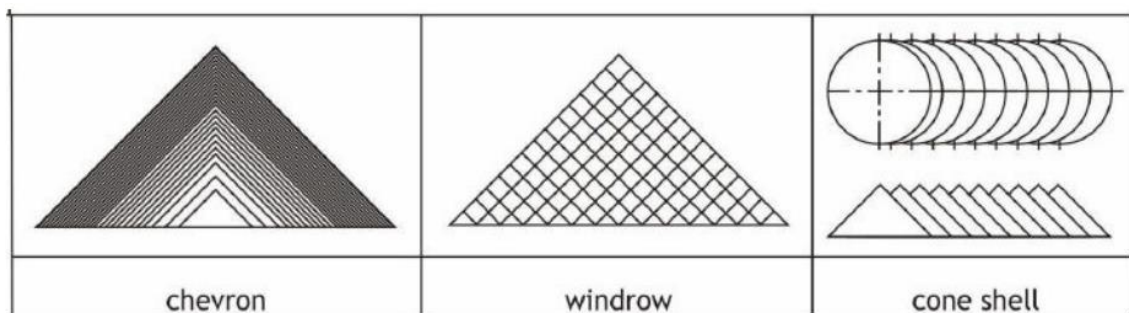
#### 3.1.3.1 Britagem das matérias-primas

Após feito o desmonte do calcário na mina, o mesmo é transportado por caminhões para uma tremonha, e em seguida passa por um britador, para que possa sofrer a diminuição granulométrica. Após a diminuição granulométrica o calcário é encaminhado para as esteiras transportadoras. A empresa escolhida como objeto de estudo conta com analisadores de composição química, que analisam em tempo real o calcário que passa pela esteira, agilizando todo o processo de fabricação da farinha de cru e dando uma confiabilidade maior em relação a composição do calcário.

#### 3.1.3.2 Pré – homogeneização do calcário

Consiste em uma técnica que visa ter uma maior homogeneidade do calcário que foi extraído, facilitando na dosagem dos aditivos e possibilitando uma independência da extração da mina e a moagem de farinha de cru. Os métodos mais utilizados para pré-homogeneização de matérias primas são: Chevron, Windrow e cone shell (GUARANYYS et al., 2008). A FIG.2 demonstra as formas de empilhamento Chevron, Windrow e Cone Shell respectivamente.

Figura 2 - Principais métodos de empilhamento.



Fonte 1: GUARANYYS et al., 2008

A empresa escolhida como objeto de estudo usa o método Chevron. Seus benefícios são um custo total de instalação menor do que os métodos windrow e cone shell, possibilita adição materiais corretivos, sendo sua desvantagem a segregação granulométrica na seção transversal da pilha (GUARANYNS et al., 2008).

### 3.1.3.3 Moagem da farinha de cru

As matérias-primas calcário, argila, minério de ferro e areia após processadas por seus tratamentos de britagem são armazenadas em silos para a dosagem e posterior formação da farinha de cru. Cada matéria-prima é armazenada em seu respectivo silo, sendo elas o calcário, argila, minério de ferro e areia.

Para dosagem das matérias-primas da farinha de cru, as indústrias de cimento seguem um controle de três parâmetros, Fator de Saturação da cal (FSC), Modulo de Sílica (MS) e o Modulo de Alumina (MA), os quais são definidos pela relação dos compostos químicos das matérias-primas, que seguem as seguintes equações (ZAMPIERI,1989).

$$FSC = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,2 Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \quad (1)$$

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

Os fatores de FSC, MS e MA geralmente situam-se entre 0,90 a 0,99 para o FSC, 2,4 a 2,7 para o MS e 1,4 a 1,6 para o MA (ZAMPIERI,1989). Estes valores podem variar de processo para processo, por serem afetados uma série de fatores, um exemplo é o tipo de combustível que será usado no forno. Após feito a dosagem das matérias-primas, as mesmas seguem para o processo de moagem.

A empresa escolhida como objeto de estudo, conta com um software de monitoramento on-line, o QCX, que faz o controle da composição da farinha de cru, a partir dos resultados do analisador on-line. O software QCX compara os valores dos resultados do analisador on-line, dependendo do resultado o mesmo atua sobre as balanças dosadoras de cada silo, deixando o

conjunto de matérias-primas com a composição estipulada por um set point, que leva em consideração os fatores de FSC, MS e MA. As matérias-primas são transportadas pelas esteiras até o moinho de rolos (moagem vertical) onde são moídas, dando origem a farinha cru, após a moagem a farinha é transportada para o silo de homogeneização.

#### 3.1.3.4 Torre de Ciclones

A partir de 1950 as indústrias cimenteiras começaram a adaptar seus processos para a utilização de pré-aquecedores, que são equipamentos que aproveitam os gases quentes que são gerados pelo forno rotativo, com o intuito de pré-aquecer a farinha de cru (Shin-Ike, 2013).

O pré-aquecedor utilizado na indústria escolhida como objeto de estudo é a torre de ciclones. Para um reaproveitamento e limpeza dos particulados dos gases quentes gerados pelo forno rotativo, utiliza-se a torre de ciclones, onde a farinha passa por um processo de ciclonagem conforme (FIG. 3). A farinha é alimentada ao topo da torre de ciclones conforme a mesma passa pelos estágios da torre de ciclone, o calcário ( $\text{CaCO}_3$ ) presente em sua composição entra em um processo de descarbonatação (perda de  $\text{CO}_2$ ), devido a troca térmica do fluxo contra-corrente com os gases que estão a aproximadamente  $805^\circ\text{C}$  (GAUTO E ROSA, 2011). A equação 4 a seguir demonstra o processo de descarbonatação do  $\text{CaCO}_3$ .

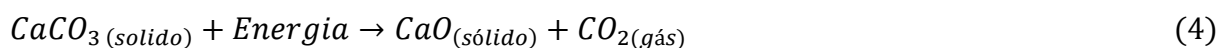
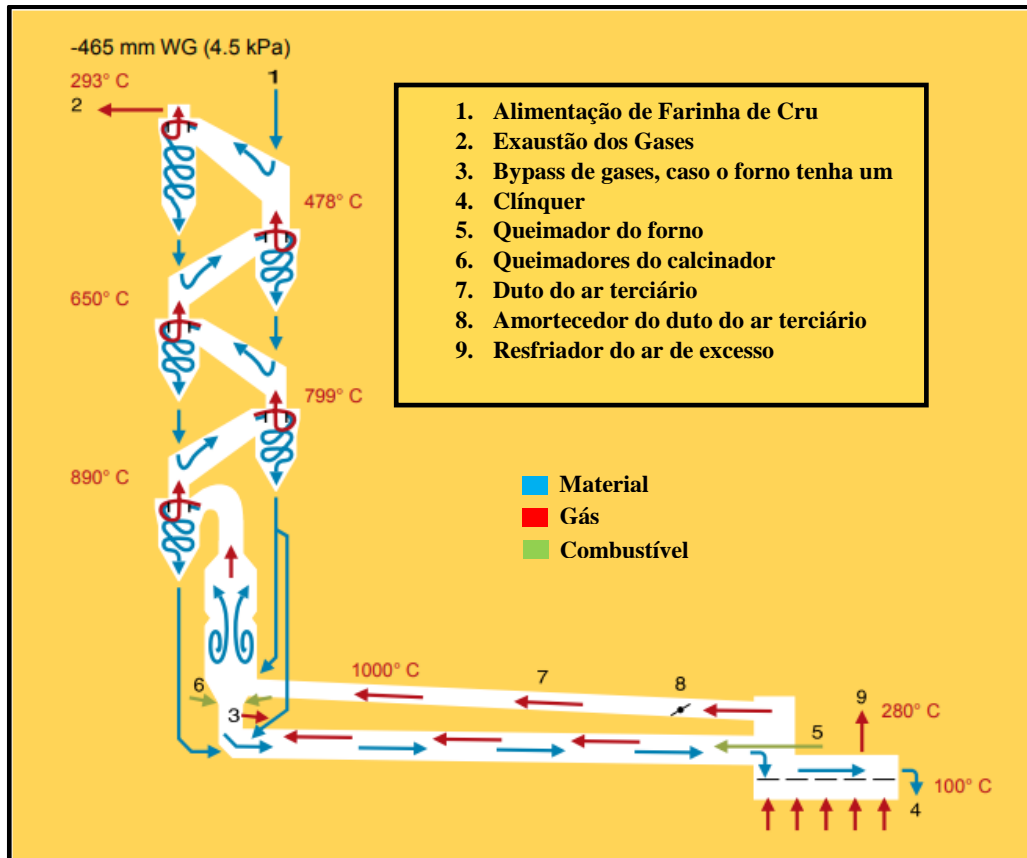
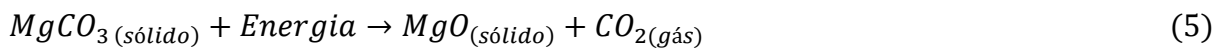


Figura 3 - Fluxo de material e gases em um sistema de forno rotativo



Fonte: FLSmidth, 2011

Segundo Gauto e Rosa (2011), além da descarbonatação do calcário, ocorrem mais duas reações na torre de ciclones, que são a decomposição do carbonato de magnésio, e a desidroxilação das argilas. A decomposição do carbonato de magnésio  $MgO$  ocorre a aproximadamente  $340^{\circ}C$ . A equação 5 a seguir demonstra o processo de decomposição do carbonato de magnésio.



Para que haja o fluxo contra-corrente são necessários grandes exaustores na saída de gases da torre de ciclones, proporcionando esta integração energética. Segundo Gauto e Rosa (2011), esta reação de descarbonatação é uma das principais para a obtenção do clínquer, devido ao grande consumo de energia necessária para a sua realização e à influência sobre a velocidade de deslocamento de material no forno.

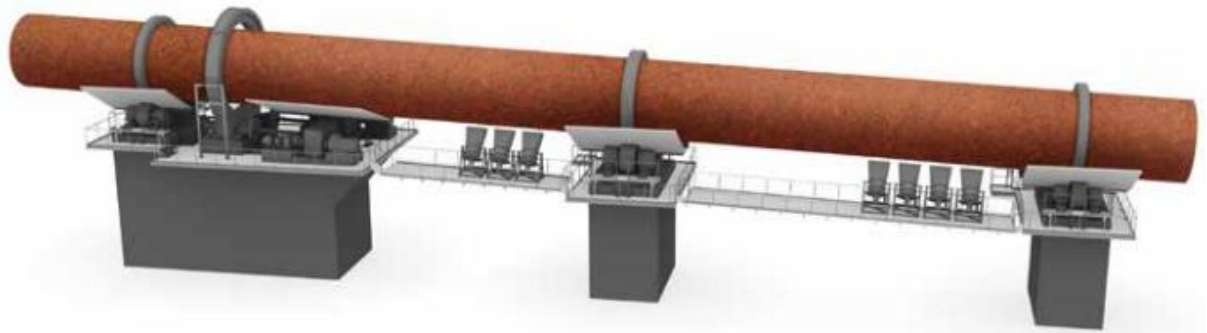


De acordo com Gauto e Rosa (2011), cerca de 94% da descarbonatação ocorre até o estágio final das torres de ciclones que contém pré-calcinadores, demonstrando que esta integração energética é de suma importância em termos energéticos.

### 3.1.3.5 Forno Rotativo

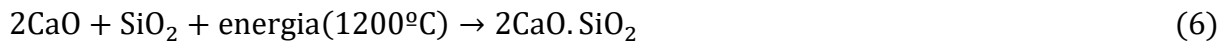
Segundo Gauto e Rosa (2011), o forno rotativo em uma indústria cimenteira é o coração da fábrica, nele é onde ocorrerá as reações de formação dos silicatos, que são os principais componentes do cimento. A FIG.4 demonstra um forno rotativo utilizado na indústria cimenteira.

Figura 4 - Forno de Clínquer

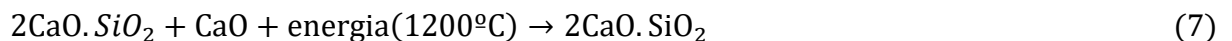


Fonte: FLSMIDTH, 2014

Segundo Gauto e Rosa (2011), a formação dos silicatos se inicia em temperaturas de aproximadamente 900°C. O primeiro silicato a se formar é o  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ , usualmente chamado de  $\text{C}_2\text{S}$  ou belita. A reação de formação do  $\text{C}_2\text{S}$  é demonstrada na equação 6 a seguir:



Segundo Gauto e Rosa (2011), a formação do silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), usualmente chamado de  $\text{C}_3\text{S}$  ou alita, se inicia entre 1200 °C e 1400°C dando origem também a alguns compostos que são  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  e  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ . A equação 7 a seguir demonstra a reação de formação do silicato tricálcico:



Segundo Lima (2011), o conjunto de todos os produtos gerados pelas reações citadas formam o clínquer. A última etapa da produção de clínquer é o resfriamento, sendo ela dividida em duas partes (Zampieri, 1989). Zampieri (1989) cita que a primeira parte do resfriamento ocorre com o clínquer com a temperatura de 1450 °C para 1250 °C, saindo da zona final de queima do forno para a boca de saída de material do mesmo. A segunda parte com o clínquer com a temperatura de 1250 °C para 100°C ocorre em resfriadores industriais, sendo esta última parte do processo de resfriamento de suma importância para obtenção de um clínquer de qualidade (ZAMPIERI, 1989).

### 3.1.3.6 Moagem de Cimento

O processo de moagem e do tipo de cimento se inicia nos silos de clínquer e matérias-primas. As matérias-primas são gesso, escória de alto forno, pozolana e calcário. De acordo com o tipo de cimento a ser produzido utilizam certos tipos de matérias-primas. A TAB.1 demonstra os tipos de cimentos disponíveis no mercado e suas respectivas composições de cada matéria-prima.

Tabela 1- Tipos de cimentos e composições

| Sigla   | Tipo                     | Componentes (% em massa)             |                                 |                     |                                 |
|---------|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------------|
|         |                          | Clínquer+ Sulfatos de Cálcio (gesso) | Escória Granulada de Alto Forno | Material Pozolânico | Material Carbonático (Calcário) |
| CP I    | Comum                    | 95-100                               | 0                               | 0-5                 | 0                               |
| CP I-S  | Comum                    | 90-94                                | 0                               | 0                   | 6-10                            |
| CP II-E | Composto                 | 51-94                                | 6-34                            | 0                   | 0-15                            |
| CP II-Z | Composto                 | 71-94                                | 0                               | 6-14                | 0-15                            |
| CP II-F | Composto                 | 75-89                                | 0                               | 0                   | 11-25                           |
| CP III  | Alto-Forno               | 25-65                                | 35-75                           | 0                   | 0-10                            |
| CP IV   | Pozolânico               | 45-85                                | 0                               | 15-50               | 0-10                            |
| CP V    | Alta resistência Inicial | 90-100                               | 0                               | 0                   | 0-10                            |

Fonte: NBR 16697: 2018

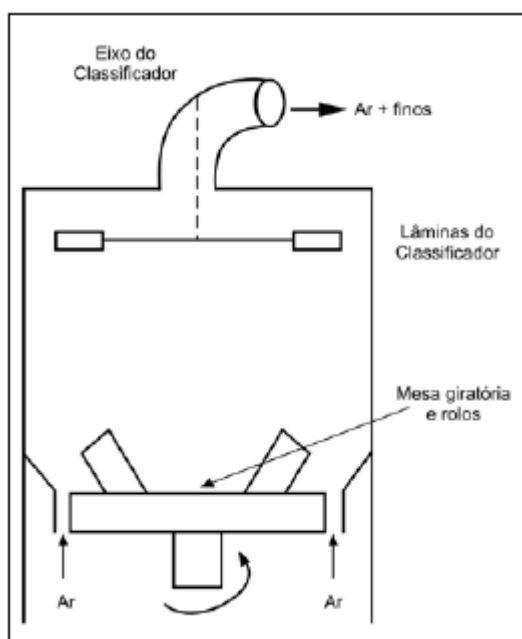
De acordo com o tipo de cimento a ser produzido, as matérias-primas do cimento juntamente com o clínquer, são alimentados à moagem de cimento, onde são moídos, dando origem ao cimento portland. Após a moagem, o cimento é direcionado para seus respectivos

silos. A expedição deste cimento pode ser através de sacarias ou a granel, dependendo da exigência do cliente.

### 3.2 Moagem Vertical de Rolos

Segundo Figueira, Luz e Almeida (2010) o moinho de rolos é constituído por uma mesa giratória e sobre ela localizam-se os rolos estacionários que giram sobre seu eixo, os quais exercem uma pressão sobre a mesa, fazendo com que o material sofra o processo de moagem. O material cominuído é arrastado verticalmente pelo ar ou gás injetado no moinho, que vão em direção ao classificador, o material retido pelo classificador precipita-se sobre a mesa, reiniciando o ciclo de moagem, até atingir a granulometria de corte do classificador. A FIG.5 demonstra o esquema geral de um moinho de rolos.

Figura 5- Esquema geral de um moinho de rolos



Fonte: PERCI, 2003

Na indústria cimenteira o moinho de rolos é bastante usado como sistema de moagem. No ano de 2002, Figueira, Luz e Almeida relata que um único fabricante de moinhos de rolos registrou o fornecimento de 275 unidades para moagem de farinha de cru para a indústria cimenteira. As FIG.6 e 7 demonstram moinhos verticais de fabricantes diferentes.

Figura 6 - Moinho Loesche LM 60.4



Fonte: LOESCHE, 2016

Figura 7 - Moinho de rolos PFeiffer



Fonte: PFEIFFER, 2018

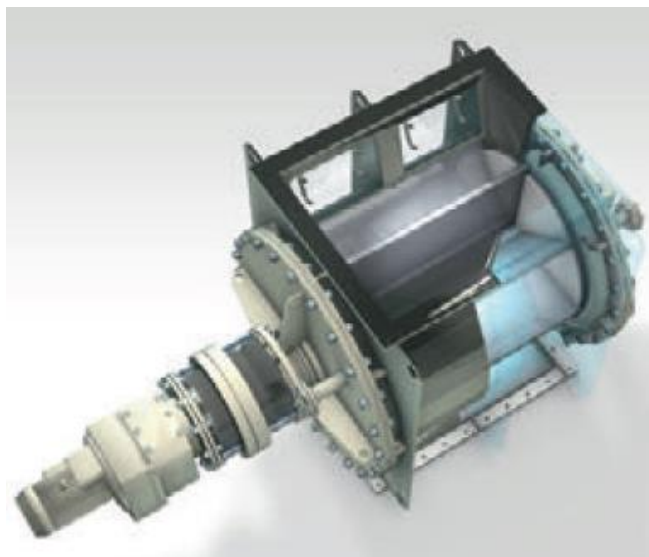
Os tópicos a seguir irão demonstrar o funcionamento e os principais componentes de um moinho vertical de rolos da fabricante Loesche modelo LM 53.3+3 CS, ao qual foi escolhido como objeto de estudo.

### **3.2.1 Eclusa de alimentação**

A alimentação do moinho é feita em bateladas através de uma eclusa, ela é composta por um motor, que faz com que gire suas aletas liberando o material a ser moído na calha de

alimentação, que o direciona a mesa de moagem. A FIG 8 demonstra um modelo de eclusa para moinhos da Loesche (LOESCHE, 2012).

Figura 8 - Eclusa de alimentação



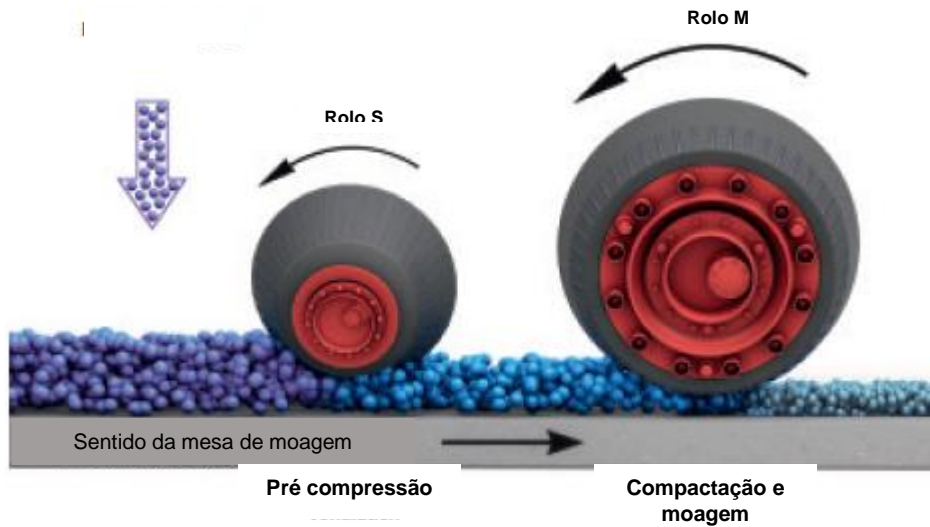
Fonte: LOESCHE, 2016

A eclusa controla a vazão de alimentação do moinho através de sua rotação. A rotação da eclusa é alterada com o aumento da velocidade do motor. Um fator importante para o uso de uma eclusa no moinho vertical de rolos é que ela fornece uma vedação para que não entre ar frio vindo do sistema de alimentação anterior a eclusa, pois o moinho trabalha com pressões negativas (LOESCHE, 2012).

### 3.2.2 Rolos moedores

A primeira ferramenta do moinho para a moagem do material são os rolos. Os moinhos verticais podem conter rolos M, os quais são responsáveis pela moagem em si, e os rolos S, que são responsáveis pela preparação da camada a ser moída. A FIG. 9 demonstra como os rolos M e S trabalham dentro do moinho (LOESCHE, 2012).

Figura 9 - Rolos M e S



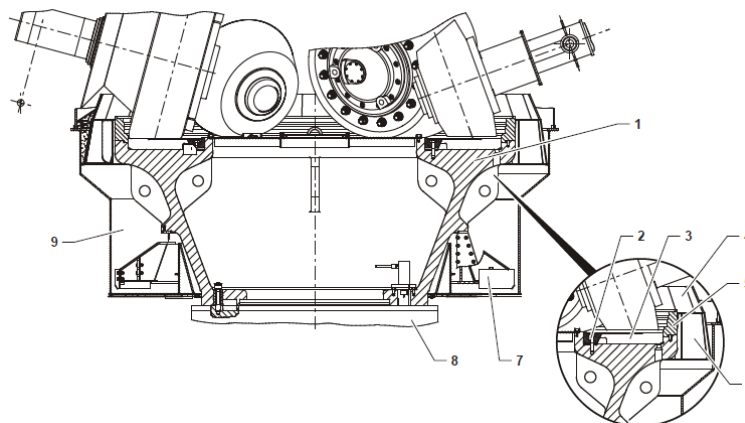
Fonte: LOESCHE, 2016

Devido ao peso e a força exercida pelo sistema hidráulico, o rolo M é responsável pela moagem do material, ao qual o rolo S é encarregado de preparar (LOESCHE, 2012).

### 3.2.3 Mesa de moagem

A mesa de moagem é a segunda ferramenta de moagem do moinho, ela faz o papel de formar o leito de moagem, onde os rolos aplicam forças cisalhantes ao material a ser moído. A FIG. 10 demonstra a mesa de moagem e seus componentes (LOESCHE, 2012).

Figura 10 - Mesa de moagem



Fonte: LOESCHE, 2012

Legenda:

|   |
|---|
| 1 - Corpo básico da mesa                  |
| 2 - Anel de aperto                        |
| 4 - Anel de blindagem                     |
| 5 - Anel de acumulação                    |
| 6 - Coroa de pás                          |
| 7 - Raspadeira                            |
| 8 - Flange de conexão ao sistema do motor |
| 9 - Canal anular                          |

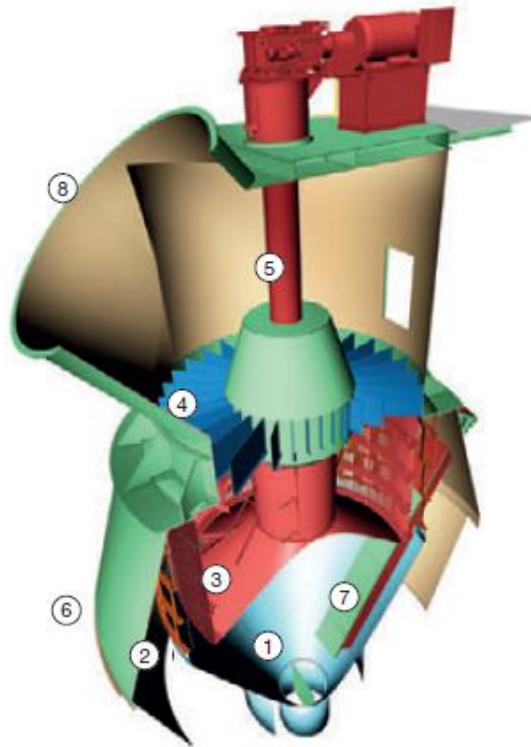
O anel de acumulação tem uma importante tarefa de moldar a altura da camada de moagem, sendo que quanto mais alto uma camada de moagem, maior será seu consumo energético, isso levando em consideração uma mesma granulometria de saída. (LOESCHE, 2012).

A coroa de pás fica localizada atrás dos rolos, como demonstra a FIG. 10, sendo ela a responsável por produzir a circulação das partículas com o direcionamento dos gases quentes vindos do canal anular (LOESCHE, 2012).

### **3.2.4 Classificador dinâmico**

O classificador dinâmico fica localizado logo acima da mesa de moagem, ele tem a principal função de fazer o controle granulométrico do moinho. A FIG 11 demonstra a estrutura de um classificador dinâmico (LOESCHE, 2012).

Figura 11 - Classificador dinâmico Loesche



Fonte: LOESCHE, 2016

Legenda :

|  |
|--|
| 1 - Cone de retorno                        |
| 2 - Aletas Guia                            |
| 3 - Rotor com lâminas classificadoras      |
| 4 - Retificador de Vortice                 |
| 5 - Eixo do rotor                          |
| 6 - Chapas de proteção e vedação do moinho |
| 7 - Calha de alimentação                   |
| 8 - Saída de gases e material cominuído    |

O classificador separa partículas na faixa de  $\mu\text{m}$ , o material moído localizado na mesa de moagem sobe devido ao fluxo de gases interno, sendo levado até o classificador, que está em alta rotação permitindo somente o material com a granulométrica adequada ser levado até a saída de material (LOESCHE, 2012).

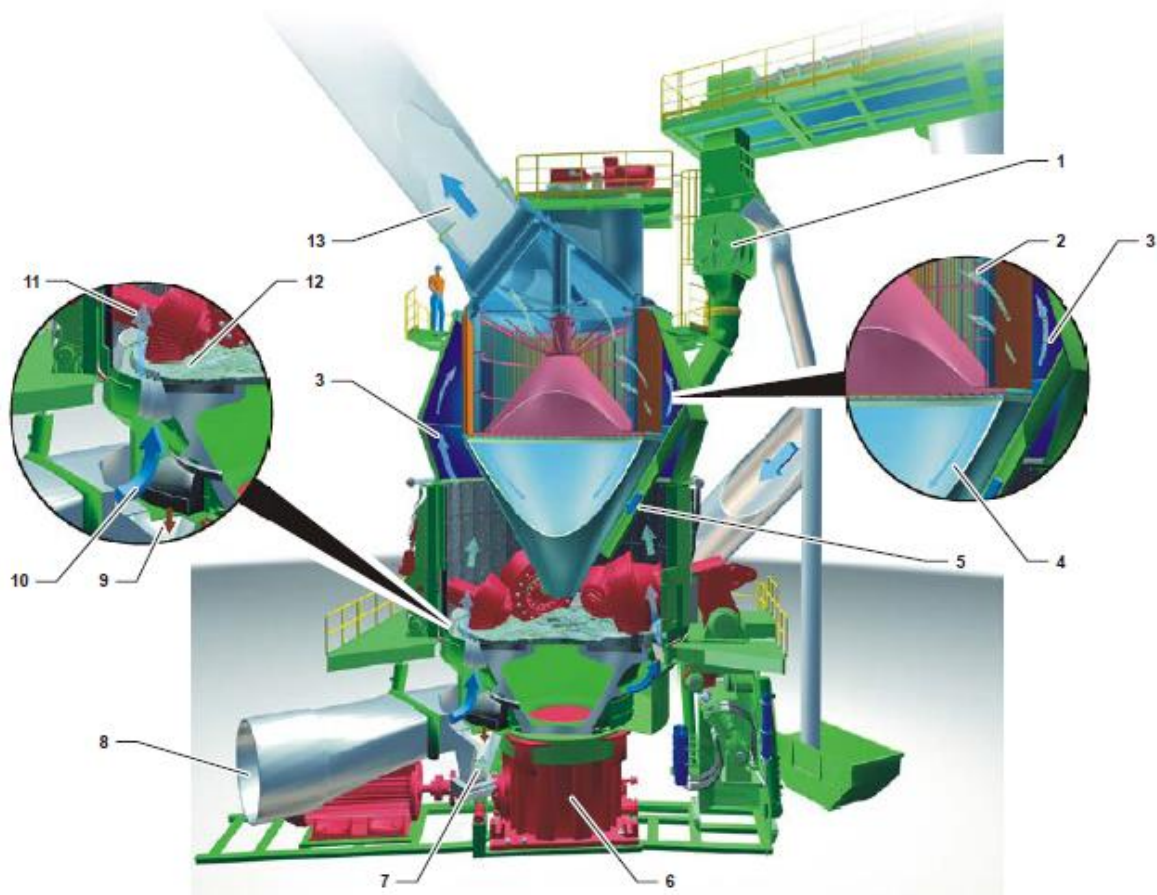
### 3.2.5 Funcionamento de um Moinho Vertical de Rolos

Um moinho vertical de rolos contém uma série de componentes os quais foram apresentados nos tópicos anteriores. Para um melhor entendimento do processo de



funcionamento do moinho a FIG 12 demonstra a estrutura de moinho e seus principais componentes (LOESCHE, 2012).

Figura 12 - Fluxo de Moagem e Estrutura de um Moinho Vertical



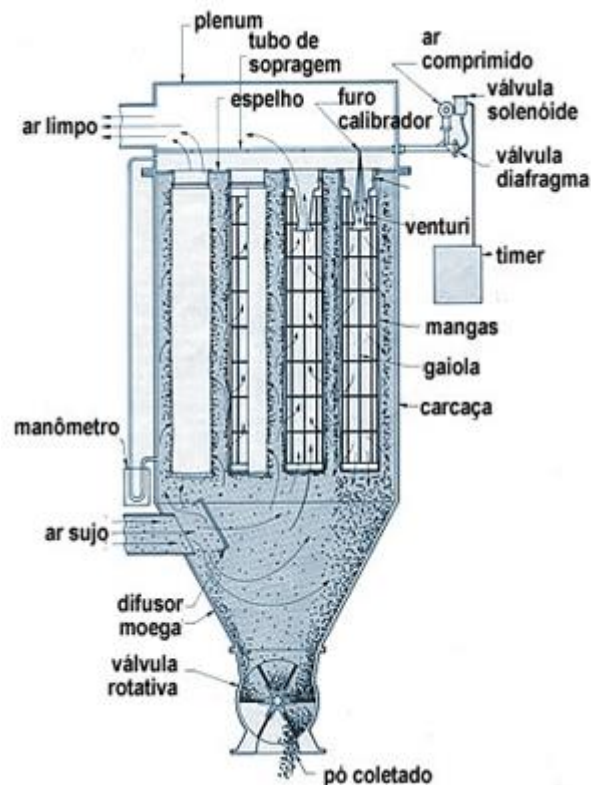
Fonte: LOESCH,2016

A alimentação do moinho se inicia pela eclusa (item número 1 da FIG. 12) que alimenta o moinho em bateladas, sendo encaminhada pela calha de alimentação até o centro da mesa de moagem (item número 12 da FIG. 12), a qual está em rotação, a força centrífuga faz com o material seja direcionado aos rolos, onde são cominuídos pela força do rolo M sobre a mesa de moagem. O material moído é direcionado para a borda da mesa, sendo levados para a coroa de pás, sendo captado e levado ao classificador dinâmico, o material que não atingiu a granulometria adequada, colide nas laminas do separador e perde velocidade, sendo direcionados a calha de realimentação do moinho (item número 5 da FIG. 12). O fluxo de gás provindo de um aquecedor ou de um sistema de integração energética de um forno rotativo passa pela tubulação de gases (item número 5 da FIG.12) (LOESCHE, 2012).

### 3.3 Filtro de Mangas

Filtros de mangas são equipamentos cuja finalidade é separar partículas existentes em gases industriais (OLIVEIRA, 2015). A FIG. 13 demonstra a estrutura de um filtro de mangas.

Figura 13 – Interior de um filtro de mangas



Fonte: DELTA DUCON, (2018)

Em indústrias cimenteiras os filtros de mangas são utilizados em moinhos de cimentos e farinha de cru para separação do material, ao qual foi moído, e para limpeza dos gases (OLIVEIRA, 2015).

### 3.4 Determinação de vazão de fluidos

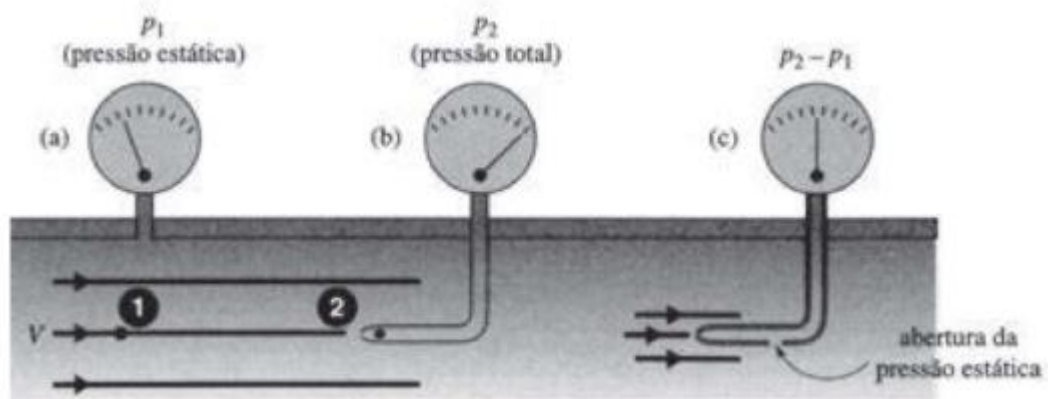
Segundo White (2002), primeiramente, para determinação da vazão de fluidos em tubulações, deve-se fazer a caracterização dos fluidos pela medição das propriedades locais, integradas e globais. Segundo Schneider (2011), as propriedades locais podem ser termodinâmicas, como pressão, temperatura e massa específica, que definem os estados do fluido, conseqüentemente sua velocidade; as propriedades integradas são as vazões em massa

e volumétrica; já as propriedades globais são aquelas relativas à visualização de todo o campo de escoamento.

Há no mercado vários equipamentos para a determinação da vazão de fluidos, como por exemplo flutuadores, sensores rotativos, sonda de Prandtl, anemômetro de fio quente e tubos de pitot (SCHNEIDER,2011). Este trabalho aprofundará na utilização de tubos de pitot, para a determinação da velocidade e vazão dos fluidos.

O tubo de pitot é um equipamento utilizado para medir a pressão estática, que é também chamada de pressão manométrica de uma tubulação, e a pressão total no ponto ao qual foi colocado em relação a tubulação (SCHNEIDER,2011). A FIG.14 demonstra um tubo de pitot e quais medições ele realiza.

Figura 14: Tubo de Pitot e suas medições



Fonte: POTTER, 2009, p.89

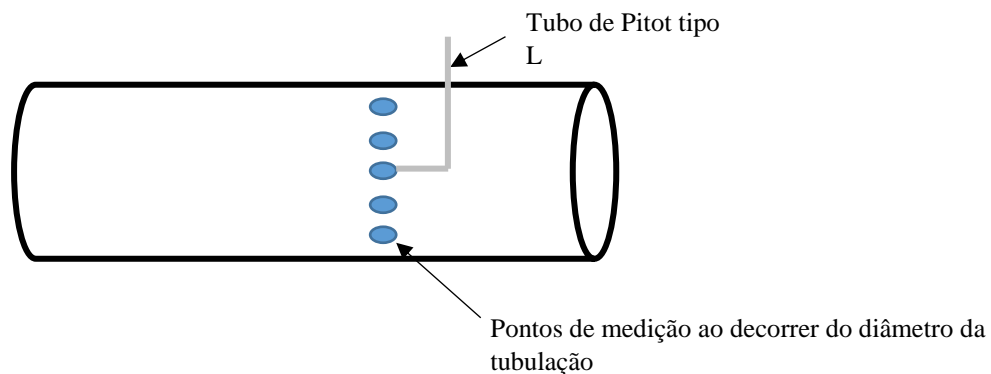
Através da equação de Bernoulli (Equação nº8), é possível determinar a velocidade do fluido no determinado ponto de medição ao qual o tubo de pitot foi inserido, (POTTER, 2009). A equação 8, a seguir demonstra a equação de Bernoulli já rearranjada para a determinação da velocidade de um fluido não viscoso (POTTER, 2009):

$$V = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 - P_1)} \quad (8)$$

sendo  $V$  a velocidade do fluido,  $\rho$  a massa específica do fluido,  $P_2$  a pressão total medida pelo tubo de pitot e  $P_1$  a pressão estática ou manométrica também medida pelo tubo de pitot.

De acordo com Schneider (2011), para a determinação da vazão, realiza-se a medição da velocidade em vários pontos em relação ao diâmetro do tubo, para assim obter-se uma velocidade média do fluido no tubo. A FIG.15 exemplifica os pontos de medição para um maior entendimento.

Figura 15: Exemplo de medição de velocidade de um fluido



Fonte: Próprio Autor (2018)

A velocidade média poder ser encontrada pela equação 9 a seguir SCHNEIDER (2011):

$$V_m = \sum \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n} \quad (9)$$

onde  $V_m$  é a velocidade média,  $V_1$  é a velocidade no ponto 1,  $V_2$  a velocidade no ponto 2 consequentemente até o último ponto de medição ao qual chamamos de  $V_n$ .

Após o cálculo da velocidade média é possível calcular a vazão volumétrica e mássica pelas equações 10 e 11 a seguir (SCHNEIDER,2011):

$$\dot{V} = V_m * A \quad (10)$$

$$\dot{m} = \rho * V_m * A \quad (11)$$

onde  $\dot{V}$  é a vazão volumétrica,  $\dot{m}$  a vazão mássica,  $V_m$  a velocidade média do fluido medida no tubo,  $A$  a área da circunferência do duto e  $\rho$  a densidade do fluido.

### 3.5 Balanços de Massa

Segundo Himmelblau e Riggs (2017, Cap.3) “O balanço de massa nada mais é que a aplicação da lei de conservação de massa: Matéria não é criada nem destruída”. Ainda segundo HIMMELBLAU e RIGGS (2017), um balanço de massa pode ser expressado de forma geral pelas equações 12 e 13 demonstrada a seguir:

$$\text{Acúmulo do sistema de } t1 \text{ a } t2 = Q_{nt} \text{ no sistema em } t2 - Q_{nt} \text{ no sistema em } t1 \quad (12)$$

$$\text{Entrada} - \text{Saída} + \text{Geração} - \text{Consumo} = \text{Acúmulo} \quad (13)$$

As equações 12 e 13 define que o acúmulo é toda unidade de massa ou de mols que se acumulou no sistema durante um intervalo de tempo, as Entradas e Saídas são todas as unidades de massa ou de mols que entra e sai do sistema, já os fatores de Geração e Consumo estão relacionados a processos que contenham reações, englobando uma geração de um produto e o consumo de um reagente (HIMMELBLAU; RIGGS, 2017). Segundo UTLU et al. (2005), o balanço geral de massa pode ser expressado pela equação 14.

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sai} \quad (14)$$

Em que  $\dot{m}_{ent}$  é o somatório das vazões mássicas na entrada do sistema e  $\dot{m}_{sai}$  é o somatório das vazões mássicas na saída do sistema.

### 3.6 Balanço de Energia

Segundo Himmelblau e Riggs (2017, cap. 9.2.1), calor (Q) é “ a quantidade líquida de calor transferido para ou do sistema ao longo de um intervalo fixo de tempo”, sendo  $\dot{Q}$  a quantidade de calor por unidade de tempo. Segundo HIMMELBLAU e RIGGS (2017), a entalpia é quantidade de energia por unidade massa do material, tendo seu valor em função da temperatura e pressão do processo.

Segundo Tipler e Mosca (2011), quando um corpo mais quente entra em contato com um corpo mais frio, o calor é transferido do mais quente para o mais frio, fazendo com que a temperatura do corpo mais frio aumente até que um equilíbrio seja alcançado. A quantidade de

calor necessária para elevar a temperatura de uma substancia pode ser calculada pela equação 15 demonstrada a seguir (TIPLER; MOSCA, 2011 p. 600):

$$Q = m * C_p * (T_f - T_i) \quad (15)$$

Onde Q é a quantidade de energia em kj ou kcal, m a massa da substância,  $C_p$  o calor específico da substância em kj/kg\*K ou kcal/kg\*K,  $T_f$  a temperatura a qual a substância ira chegar em K e  $T_i$  a temperatura inicial da substância em K

Segundo ÇENGEL E BOLES (2013, p. 227), o balanço geral de energia pode ser expressado pela equação 16 e 17.

$$\sum \dot{E}_{ent} = \sum \dot{E}_{sai} \quad (16)$$

Ou

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m}\theta = \dot{Q}_{sai} + \dot{W}_{sai} + \sum_{sai} \dot{m}\theta \quad (17)$$

Onde  $\dot{Q}_{ent}$  é o calor transferido para o sistema,  $\dot{W}_{ent}$  é o trabalho realizado pelo sistema, e  $\sum_{ent} \dot{m}\theta$  o somatório da energia cinética e potencial.

### 3.7 Pressão de vapor

Para tratar gases que compõem a atmosfera, Dalton propôs a lei das pressões parciais de Dalton, segundo esta lei, a pressão atmosférica pode ser decomposta em pressões parciais exercidas por cada gás que compõe a atmosfera, como demonstra a equação 18 (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008).

$$P_{atm} = P_{N_2} + P_{O_2} + P_{Ar} + P_{CO_2} + \dots + e_a \quad (18)$$

Tetens em 1930 propôs a equação 19, que descreve a variação da pressão parcial máxima de vapor d'água em função da temperatura de uma parcela de ar (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008).

$$e_s = 0,6108 * 10^{\frac{(7,5 * T_{ar})}{(237,3 + T_{ar})}} \quad (19)$$

Sendo que  $e_s$  é a pressão de saturação do ar (Kpa) e  $T_{ar}$  é a temperatura do ar em °C.

### 3.8 Cálculo dos calores específicos do clínquer, calcário e gesso

De acordo com a Lafarge (2010), para determinação do calor específico ( $C_p$ ) do clínquer utiliza-se a equação 21 e para o calcário e o gesso utiliza-se a equação 20, demonstradas a seguir:

$$C_p = A + (B * T * 10^{-6}) + (C * T^{-2} * 10^{-9}) \quad (20)$$

$$C_p = a + b * T + c * T^2 + d * T^{-2} \quad (21)$$

Sendo a,b,c e d constantes de correlação para o cálculo dos  $C_p$ 's do gesso e calcário em kcal/kg\*k, T a temperatura inicial do material e A,B,C e D são constantes de correlação para o cálculo do  $C_p$  do clínquer em kcal/kg \* °C

### 3.9 Determinação de perdas de energia por convecção em moinhos de cimento

Segundo Çengel e Ghajar (2012), convecção é um mecanismo de transferência de calor através de fluídos na presença de movimento de sua massa. Ainda segundo Çengel e Ghajar (2015, p.391), a convecção pode ser caracterizada em convecção natural e convecção forçada, sendo que a convecção forçada o fluído é forçado através de uma bomba ou ventilador a escoar sobre a superfície, em contrapartida a convecção natural todo movimento do fluido é causado por meios naturais.

Segundo LAFARGE (2010), a determinação das perdas por convecção, podem ser calculadas através da aplicação da equação 22 demonstrada a seguir.

$$\dot{Q}_{Convecção} = h * A * (T_{Casco} - T_{ambiente}) \quad (22)$$

Sendo  $h$  o coeficiente de transferência de calor em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ,  $A$  a área superficial do moinho em  $m^2$ ,  $T_{Casco}$  a temperatura no casco do moinho,  $T_{ambiente}$  a temperatura do ambiente a qual o material estava submetido.

Ainda segundo LAFARGE (2010), o coeficiente de transferência de calor pode ser calculado pela equação 23, demonstrada a seguir.

$$h = h_{nat} * (1 + 0,57 * v)^e \quad (23)$$

Sendo  $h$  o coeficiente de transferência de calor,  $h_{nat}$  o coeficiente de convecção natural,  $v$  a velocidade do ar na superfície do material em m/s,  $e$  o exponencial de reflexão do impacto do vento.

LARFARGE (2010), propõe que  $h_{nat}$  pode ser calculado pela equação 24 demonstrada a seguir.

$$h_{nat} = 1,18 * \left( \frac{(T_{superfície} - T_{ambiente})}{D} \right)^{0,25} \quad (24)$$

Sendo  $h_{nat}$  o coeficiente de convecção natural,  $T_{superfície}$  a temperatura da superfície do objeto analisado em K,  $T_{ambiente}$  a temperatura do ambiente a qual o material está exposto em K e  $D$  o diâmetro do objeto analisado.

### 3.10 Determinação de perdas de energia por radiação em moinhos de cimento

A radiação segundo ÇENGEL e GHAJAR (2012), é um dos mecanismos de calor que não exige a presença de um suporte de material, ou seja, não exige contato, sendo a que ocorre mais rapidamente quando comparadas com a convecção e condução.

Çengel e Ghajar (2012, p.699), define que “O tipo de radiação eletromagnética pertinente à transferência de calor é a radiação térmica, emitida como resultado das transições de energia de moléculas, átomos e elétrons da substância”.

Segundo LAFARGE (2010), as perdas de energia por radiação podem ser calculadas através da equação 25 demonstrada a seguir.



$$\dot{Q}_{\text{radiação}} = \alpha * \epsilon * \sigma * A * (T_{\text{superfície}}^4 - T_{\text{ambiente}}^4) \quad (25)$$

Sendo  $Q_{\text{radiação}}$  a perda por radiação em Watts,  $\alpha$  é o fator de visão,  $\epsilon$  a emissividade da superfície,  $\sigma$  é o coeficiente de Stefan Boltzmann em  $\text{w/m}^2 * \text{K}^4$ ,  $A$  a área superficial do objeto analisado em  $\text{m}^2$ ,  $T_{\text{superfície}}$  a temperatura da superfície do objeto em K e  $T_{\text{ambiente}}$  a temperatura do ambiente ao qual o objeto está submetido em K.

### 3.11 Modelagem e Simulação de Processos

Modelos são classificados entre físicos e matemáticos. Um modelo matemático é a representação abstrata da realidade por equações, e um modelo físico pode ser um protótipo ou plantas piloto (GARCIA, 2013).

Segundo Eykhoff,<sup>3</sup>(1974 apud GARCIA, 2013 p. 19) um modelo matemático “é uma representação dos aspectos essenciais de um sistema, que apresenta conhecimento de sistema em forma utilizável “. Uma equação ou o conjunto de equações que compõe um modelo, tem como objetivo ser uma aproximação do processo real, com tudo não há como abranger todas as características ou variáveis que tal processo possui. Para realização de um modelo, deve-se levar em conta o tempo e o esforço gasto contra seus futuros benefícios, para assim decidir o início do processo de pesquisa (GARCIA, 2013).

Para a simulação de processos existe no mercado inúmeras ferramentas que facilitam os cálculos e auxiliam no processo de elaboração de um modelo matemático e em sua simulação. Dentre as ferramentas disponíveis no mercado podemos citar o Simulink/Matlab, Engineering Equation Solver (EES), Octave, Visual Basic for Application do Excel (VBA).

#### 3.11.1 Microsoft EXCEL e o Visual Basic for Applications – VBA

Segundo Pinto (2011, p.5) “O Microsoft Excel é uma poderosa folha de cálculo que dispõe de inúmeras ferramentas para tratamento, simulação, análise, partilha e proteção de dados”, sendo uma enorme ferramenta para engenheiros, técnicos, analistas, professores entre outros.

---

<sup>3</sup> EYKHOFF, P. **System Identifications**: Parameter and State Estimation. London, John Wiley & Sons, 1974

O VBA (Visual Basic for Applications) é uma linguagem de programação que está disponível em quase todos computadores, sendo utilizada em todos os programas do pacote office, dando a eles uma enorme ferramenta para a solução de problemas que facilitaram a vida do usuário (GOMEZ, 2009).

Gomez (2009) em sua obra cita algumas das vantagens de se usar o VBA no Excel:

1. Poupar tempo: Substituindo o teclado e o mouse em muitas operações;
2. Reduzir erro: é possível incluir rotinas de validação de dados, avisos e prompts contextualizados, etc;
3. Forçar padrões: na maioria das organizações, a padronização dos processos é importante para maximizar a produtividade;
4. Integração com outras aplicações: muitos dos cálculos necessários em diferentes aplicações (não necessariamente dentro do pacote Office) podem ser realizados dentro do excel e depois processados na mesma aplicação ou numa terceira (desde que todos os aplicativos suportem a linguagem VBA).

#### 4. METODOLOGIA

O trabalho se classifica como uma pesquisa de campo, de natureza quali-quantitativa, através de um estudo de caso em uma indústria cimenteira, tendo como objetivo principal elaborar um programa em VBA – EXCEL específico para simulação do processo de secagem e eficiência energética em um moinho de cimento, que receberá as seguintes entradas:

- Vazão mássica de matérias-primas do cimento
- Vazão de injeção de água no leito de moagem
- Temperatura das matérias-primas na entrada do moinho
- Temperatura do cimento produzido
- Pressões dinâmicas e pressão estática no duto de saída de gases do filtro do circuito de moagem
- Temperatura do gás na saída de gases do filtro do circuito de moagem
- Entalpia dos gases nas condições de entrada do moinho
- Entalpia dos gases nas condições de saída do filtro do circuito de moagem
- Entalpia da água na temperatura de ebulição indicada no próprio programa
- Porcentagem de “Ar Falso”<sup>4</sup> no sistema
- Pressão Interna no moinho
- Emissividade da chaparia do moinho
- Área superficial do moinho
- Temperatura do casco do moinho
- Temperatura ambiente
- Diâmetro do moinho
- Velocidade do ar sobre o casco do moinho
- Exponencial de Reflexão
- Altura do moinho

Com as entradas citadas acima o programa tem o intuito de calcular os seguintes itens:

- Velocidade do gás na saída do filtro de mangas

---

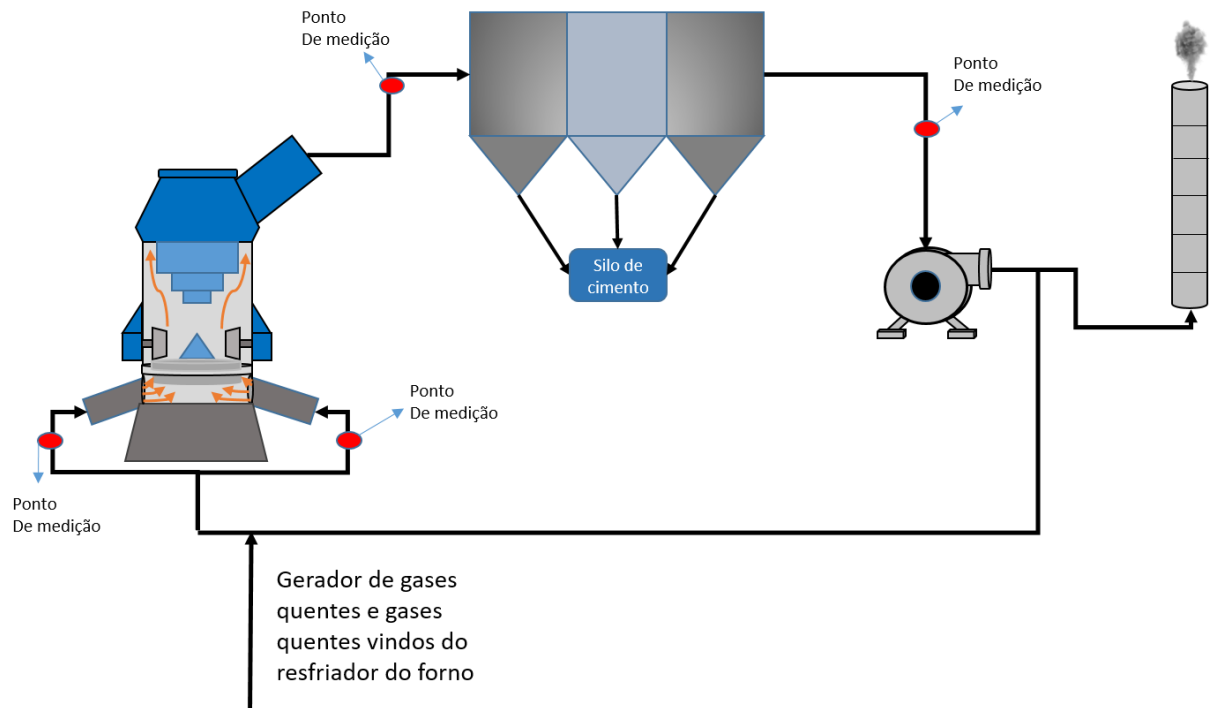
<sup>4</sup> Ar falso é o termo dado a vazão de ar a temperatura ambiente que entra no sistema de moagem por falta de uma vedação adequada no mesmo, roubando calor do gás de entrada.

- Vazão mássica do gás na saída do filtro de mangas
- Vazão mássica do gás na entrada do moinho de cimento
- Vazão de “ar falso” que entra no sistema
- Taxa de transferência de calor do gás na entrada do moinho
- Taxa de transferência de calor do gás na saída do filtro de mangas
- Calor específico do calcário, gesso e do clínquer
- Taxa de transferência de calor consumida pelas matérias-primas para saírem com a temperatura do cimento
- Quantidade de energia necessária para evaporar a água de injeção no leito de moagem, juntamente com a umidade das matérias-primas, considerando a umidade de saída do cimento.
- A taxa de transferência de calor a qual o gás na saída se encontra
- Quantidade de energia perdida por convecção
- Quantidade de energia perdida por radiação
- Quantidade de energia perdida por “ar falso”

A pesquisa científica requer inúmeras técnicas para obtenção de informações, que irão dar sustentação ao resultado final. Com isso o levantamento de dados de variadas fontes é de extrema importância, em qualquer dos métodos ou técnicas a serem utilizadas no estudo. Neste trabalho, realizou-se inicialmente uma pesquisa bibliográfica para conhecimento das temáticas em questão, culminando no referencial teórico deste trabalho.

Em seguida, foram realizados, acompanhamentos no processo de moagem na empresa escolhida como objeto de estudo, onde foi observado primeiramente qual moagem exige um maior controle do teor de umidade em seu produto de saída, sendo definido que a realização da simulação do processo de secagem será com base no funcionamento da moagem de cimento. A FIG.16 demonstra de forma esquematizada o circuito de moagem e a localização dos pontos de medição disponíveis.

Figura 16 - Circuito de Moagem

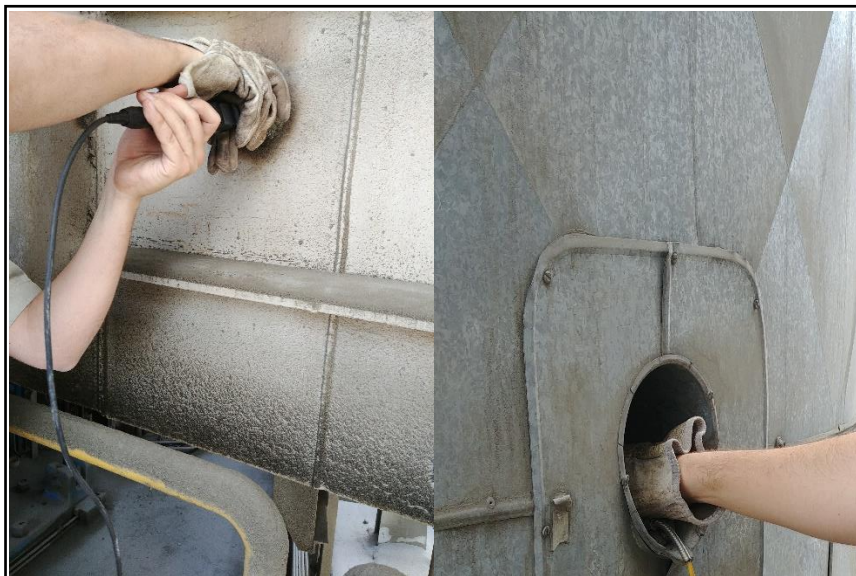


Fonte: Próprio Autor (2018)

Para realização da modelagem matemática e realização do balanço de energia e massa, foi realizado medições de temperatura bulbo seco e úmido, umidade e pressão no circuito de moagem do respectivo moinho de cimento.

Realizou-se as medições de temperatura e umidade com o analisador multifuncional Testo modelo 400. Foram analisadas as temperaturas de bulbo seco, bulbo úmido e umidade da entrada de gases do moinho e saída de gases do filtro pertencente ao circuito de moagem do moinho de cimento. A FIG. 17 demonstra a entrada de gases do moinho e saída de gases do filtro, respectivamente, no momento das análises de temperatura e umidade.

Figura 17 - Entrada de gases do moinho e Saída de gases do Filtro



Fonte: Próprio Autor (2018)

As entalpias dos gases na entrada do moinho e na saída do filtro do circuito de moagem foram consultadas no software EES – Engineering Equation Solver, com base na pressão manométrica, temperatura de bulbo úmido e umidade.

Para determinação da vazão de gases no sistema, realizou-se a medição da pressão estática e pressões dinâmicas no duto de saída de gases do filtro do circuito de moagem do moinho de cimento. Para determinação destas pressões usou-se um tubo de pitot tipo S cujo seu coeficiente de correção é de 0,82 e um medidor de pressão Testo, modelo 312-2. A FIG. 18 demonstram o tubo de pitot e duto ao qual foi realizado a medição.

Figura 18 - Tubo de pitot e ponto de análise



Fonte: Próprio Autor (2018)

Com os resultados das pressões dinâmicas, pressão estática e temperatura, realizou-se a determinação da velocidade dos gases no interior da tubulação de saída do filtro do circuito de moagem, utilizando a equação 8 demonstrada no referencial teórico deste trabalho multiplicado pelo fator de correção do tubo pitot, dando origem a equação 26.

$$V = 0,85 * \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_2 - P_1)} \quad (26)$$

A densidade do gás foi consultada no ESS, nas condições de temperatura, umidade e pressão manométricas medidas anteriormente. Após a determinação da velocidade dos gases no interior do tubo, determinou-se a área da seção transversal da tubulação, ao qual foi determinada a velocidade dos gases. Utilizando-se a equação 27 determinou-se a área da seção transversal da tubulação.

$$A = \pi * \frac{D^2}{4} \quad (27)$$

Sendo A área da seção transversal,  $\pi$  o valor de PI e D o diâmetro da tubulação.

Para determinação da vazão de gases do duto utilizou-se a equação 28, que é a multiplicação das equações 16 e 17

$$\dot{V} = V * A \quad (28)$$

Após realizadas as medições de temperatura, pressão, umidade e vazão, analisou-se a vazão de entrada de matérias-primas no moinho de cimento, para verificar qual a quantidade de água estava sendo alimentada ao moinho no instante ao qual realizou-se as medições de temperatura, pressão, umidade e vazão. Esta análise das vazões mássicas das matérias-primas do cimento foi realizada através de um software de acompanhamento do processo produtivo da empresa escolhida como objeto de estudo, ao qual contém um banco de dados das vazões mássicas das matérias-primas em base úmida.

A moagem de cimento conta com a injeção de água em seu leito de moagem, para otimizar a sua eficiência de moagem. A vazão desta água de injeção do leito de moagem

também foi determinada através do software de acompanhamento do processo da empresa. Esta água que é injetada também deve ser contabilizada no balanço de energia e massa, devido a necessidade da retirada da água do material no interior do moinho. Para determinação da umidade de cada matéria-prima que deve ser secada, o laboratório da empresa escolhida como objeto de estudo realiza análises periódicas, com os resultados destas análises, pode-se determinar a quantidade de água contida nas matérias-primas para serem inseridas no balanço de massa e energia.

Para determinação das perdas por convecção e radiação, mediou-se a temperatura da superfície do moinho com o termômetro infravermelho Texto modelo XXX. A área superficial do moinho cimento fornecida pela empresa analisada é de 429,311 m<sup>2</sup>, sendo considerado a velocidade do ar sobre o moinho de 2,22 m/s.

Depois de determinado a quantidade de água no interior do moinho, a umidade do gás de entrada e saída do circuito de moagem e a vazão de gás na saída de gases do filtro do circuito de moagem, passou-se para o próximo passo que é a realização do balanço de massa e energia do circuito de moagem. Para elaboração do balanço de massa e energia tomou-se algumas considerações, sendo elas:

- Sistema considerado como estacionário.
- Possibilidade de energia cinética e potencial de entrada e saída dos materiais são insignificantes.
- Nenhum calor é transferido para o sistema a partir do exterior.
- O gás utilizado no circuito de moagem é ar atmosférico levando em conta o teor de umidade ao qual o mesmo se encontra.
- O cimento produzido pelo circuito de moagem é o CPII-F-32.

#### **4.1 Balanço de massa do circuito de moagem**

Para elaboração do balanço de massa utilizou-se a equação 14, sendo os seguintes itens as entradas do sistema:

- Vazão mássica de calcário
- Vazão mássica de gesso
- Vazão mássica de clínquer



- Vazão mássica dos gases na entrada de gases do moinho
- Vazão mássica da umidade das matérias-primas
- Vazão mássica da injeção de água no leito de moagem
- Vazão de “ar falso” no sistema

Os itens a seguir são os itens que foram considerados como a saída do sistema:

- Vazão mássica de cimento
- Vazão mássica de saída de gases no filtro do circuito de moagem
- Vazão mássica de vapor d’água

Para determinação da vazão de entrada de gases utilizou-se a equação 29 demonstrada abaixo:

$$\dot{V}_{ent} = \dot{V}_{saída} - \dot{V}_{H_2O} \quad (29)$$

Sendo  $\dot{V}_{ent}$  a vazão mássica de gás na entrada do moinho,  $\dot{V}_{saída}$  a vazão mássica de gás na saída de gases do filtro do circuito de moagem, e  $\dot{V}_{H_2O}$  a soma da vazão de água nas matérias-primas e a vazão de injeção de água no leito de moagem

#### 4.2 Balanço de energia do circuito de moagem

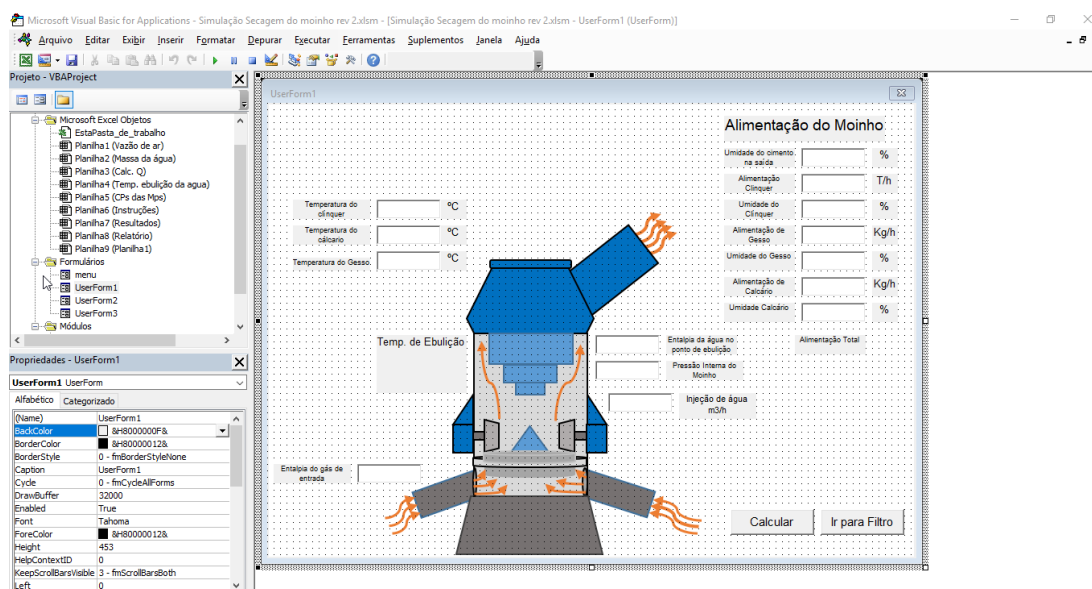
Para elaboração do balanço de energia utilizou-se a equação 15, sendo analisado os seguintes itens

- Taxa de transferência de calor do gás que entra no sistema
- Consumo de energia para evaporação da água contida no sistema
- Consumo de energia das matérias-primas para atingir a temperatura de saída do cimento
- Perda de energia por condução e convecção
- Perda de energia por ar falso

### 4.3 Elaboração do programa de simulação do processo de secagem e eficiência térmica

Para elaboração do programa de simulação do processo de secagem e eficiência térmica em uma moagem de cimento, utilizou-se o software Microsoft Excel versão 2016. Elaborou-se 7 planilhas, sendo 5 planilhas onde foram inseridas todas as formulas para os cálculos das vazões dos gases, temperatura de ebulição da água, calores específicos das matérias-primas do cimento e determinação da massa de água no sistema. Uma planilha para a tela inicial do programa e uma planilha para a emissão do relatório final. Utilizou-se também a interface VBA do Excel, para a elaboração dos 4 menus do programa, através da programação de UserForms. A FIG. 18 demonstra uma etapa da elaboração do UserForm2, no VBA.

Figura 19 - Elaboração do UserForm2



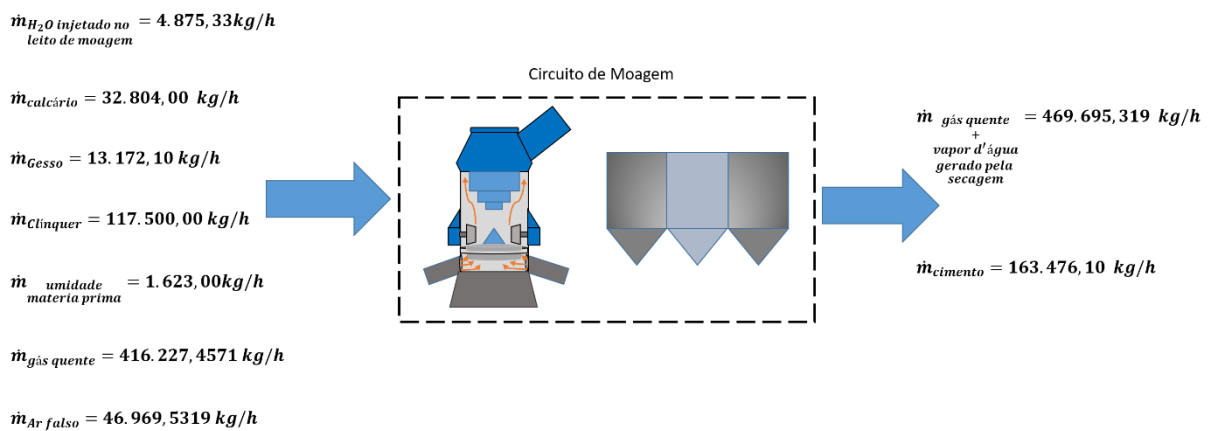
Fonte: Próprio Autor (2018)

Após concluída a elaboração do programa de simulação e eficiência térmica do moinho de cimento, foi realizada a validação dos dados obtidos pelo programa em relação aos cálculos manuais efetuados pelo autor, baseados no referencial teórico analisando e corrigindo eventuais erros.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A realização de balanços de massas é de suma importância para o entendimento, e o desenvolvimento de qualquer processo produtivo. Com as análises de pressão estática, dinâmica, temperatura dos gases, verificação das vazões mássicas de clínquer, gesso, calcário e com os resultados laboratoriais de umidade das matérias-primas, descritos na metodologia deste trabalho, realizou-se o balanço de massa (Equação 14), demonstrado da FIG.20.

Figura 20-Balanço de Massa



Fonte: Próprio Autor (2018)

Após a determinação das vazões mássicas que entram e saem do sistema de moagem, demonstrados na FIG.20, tornou-se possível a realização das determinações das taxas de transferência de calor (Equação 16), obtendo-se os dados apresentados na TAB.2.

Tabela 2 - Consumo térmico no moinho de Cimento

| Consumo térmico no Moinho de cimento  |                       |
|---|-----------------------|
| Taxa de transferência de calor do gás de entrada do moinho                      | 132.984.672,5000 kJ/h |
| Taxa de transferência de calor do gás de saída do moinho                        | 125.737.436,9000 kJ/h |
| Calor necessário para evaporar a água   | 1.930.653,8430 kJ/h   |
| Calor transferido para o gesso  | 597.987,9653 kJ/h     |
| Calor transferido para o clínquer   | 1.380.834,7250 kJ/h   |
| Calor transferido para o calcário   | 1.488.486,2660 kJ/h   |
| Energia consumida por ar falso  | 2.613.525,3630 kJ/h   |
| Energia perdida por Radiação  | 249.627,4063 kJ/h     |
| Energia perdida por Convecção   | 91.881,1400 kJ/h      |
| Energia perdida por convecção e radiação em dutos do sistema e filtro de mangas | 824.892,7344 kJ/h     |

Fonte: Próprio Autor (2018)

Os dados apresentados na TAB.2 foram calculados somente para se obter a modelagem matemática a qual foi utilizada para a elaboração do programa de eficiência térmico. No decorrer deste tópico de resultados e discussão será demonstrada uma análise realizada em campo cujos resultados serão discutidos.

No próximo tópico será demonstrado o programa de simulação do processo de secagem e eficiência térmica em um moinho de cimento, demonstrando-se suas principais características e funções

## 5.1 O Programa

Para realização do programa de simulação da secagem e eficiência térmica em moinho de cimento necessitou-se de toda a modelagem matemática apresentada na metodologia deste trabalho. As equações necessárias para os cálculos da vazões e taxas de transferência de calor citadas na metodologia deste trabalho, que serão a saída (resultado) do programa, foram inseridas em 5 planilhas, cada uma com um objetivo de cálculo diferente. A FIG. 21, 22, 23, 24 e 25 demonstram as 5 planilhas criadas no EXCEL para elaboração do programa de simulação da secagem e eficiência térmica no moinho de cimento.

Figura 21 - Planilha 1: Vazão do gás

The screenshot shows the 'Vazão do gás' worksheet in Excel. The data is organized into several tables:

| Parâmetros               |          |                            |
|--------------------------|----------|----------------------------|
| Parâmetro                | Valor    | Unid.                      |
| Coef. Pior               | 0,82     | adimensional               |
| Conet. dos Gases         | 83,14    | mbar·L/K <sup>2</sup> ·mol |
| Dens. Molecular          | 28,9824  | g/mol                      |
| Densidade do gás         | 0,7372   | kg/m <sup>3</sup>          |
| Diâmetro do Duto         | 3,96     | m                          |
| Área do duto             | 12,383   | m <sup>2</sup>             |
| P. Estática no duto      | 54,35    | mbar                       |
| P. Atmosférica           | 926,8743 | mbar                       |
| P. Absoluta              | 872,5243 | mbar                       |
| Alimentação do moinho    | 200000   | kg/h                       |
| Altitude                 | 712      | m                          |
| Temperatura Ambiente     | 28,3     | °C                         |
| Temperatura do gás       | 84,2     | °C                         |
| Área útil do moente rini | 4,2424   | m <sup>2</sup>             |
| At. Iner do circuito     | 0,035    |                            |

| Composição do Ar              |        |        |  |
|-------------------------------|--------|--------|--|
| Composição Base no Base Umida |        |        |  |
| CO <sub>2</sub>               | 15,00% | 12,68% |  |
| O <sub>2</sub>                | 8,30%  | 7,52%  |  |
| CO                            | 0,00%  | 0,00%  |  |
| N <sub>2</sub>                | 76,70% | 64,30% |  |
| H <sub>2</sub> O              | 15,50% | 13,10% |  |

| Pressões dinâmicas em mbar |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                            | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| A                          | 1,5 | 1,4 | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 1   | 0,9 | 0,8 |
| B                          | 1   | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 1,6 |

| Velocidade dos gases |        |         |         |        |        |
|----------------------|--------|---------|---------|--------|--------|
| 16,3805              | 15,825 | 14,0274 | 14,0744 | 12,688 | 13,375 |
| 13,3748              | 14,027 | 14,6512 | 14,6519 | 14,65  | 15,243 |
|                      |        |         |         |        | 14,027 |
|                      |        |         |         |        |        |
|                      |        |         |         |        |        |
|                      |        |         |         |        |        |

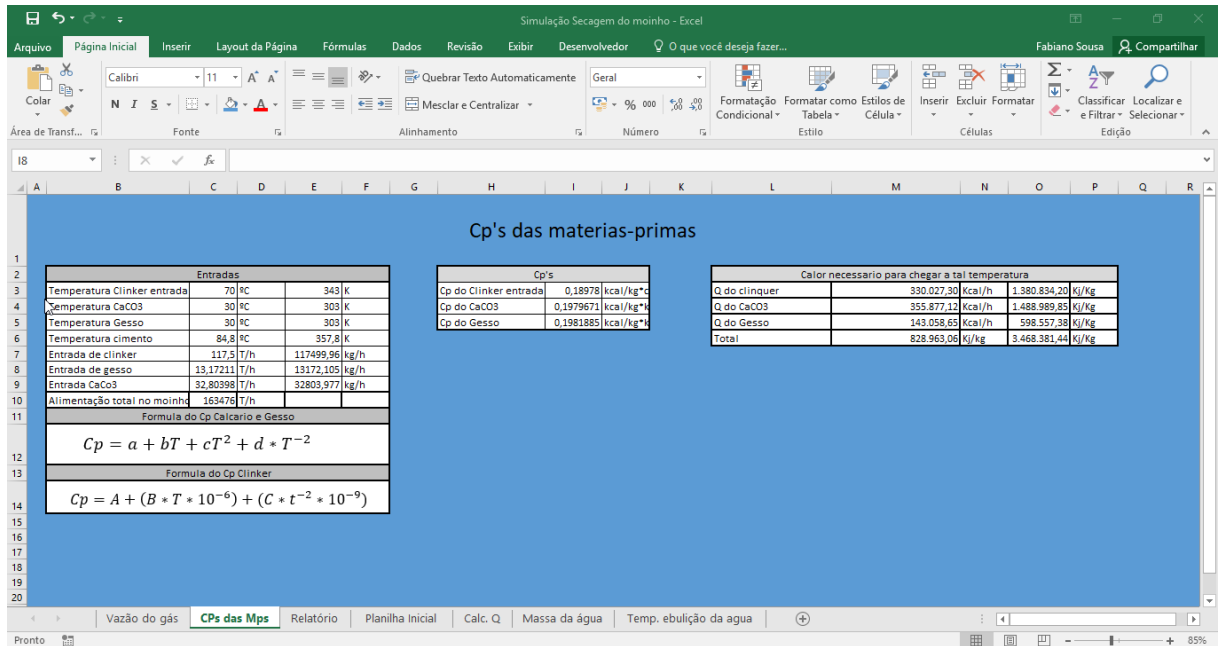
  

| Cálculos                        |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Velocidade dos gases            | 14,29273 m/s                |
| P. Dinâmica média               | 111,8288 Pa                 |
| Vazão de gás no tubo            | 633280 m <sup>3</sup> /h    |
| V. de gases sem ar              | 633280 m <sup>3</sup> /h    |
| Velocidade dos gases no anel de | 41,465 m/s                  |
| Vazão mássica                   | ***** kg/h                  |
| Vazão a/material                | 2,33427 m <sup>3</sup> /Ton |

Quantidades Pdts: 75

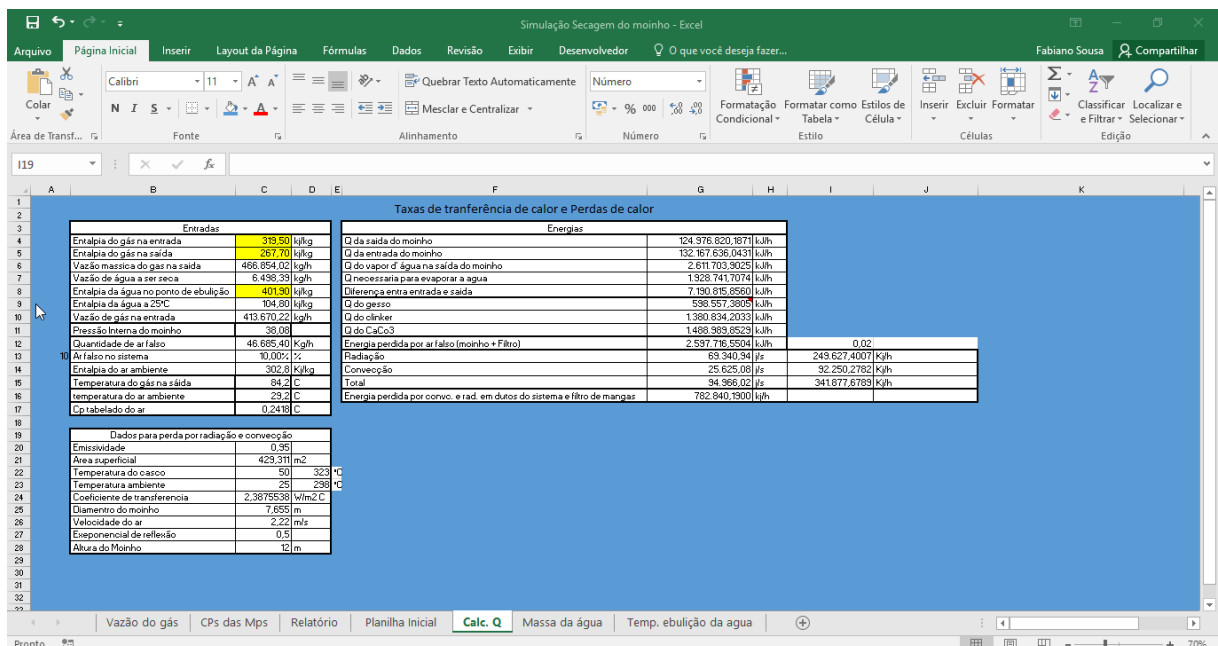
Fonte: Próprio Autor (2018)

Figura 22 - Planilha 2: Cp's das matérias-primas



Fonte: Próprio Autor (2018)

Figura 23 - Planilha 3: Taxas de transferência de calor e Perdas de Calor



Fonte: Próprio Autor (2018)

Figura 24 - Planilha 4: Vazão das matérias primas

**Vazão de materias-primas e água**

| Produção do Moinho         |        |      | Injeção de água no moinho         |        |                |
|----------------------------|--------|------|-----------------------------------|--------|----------------|
| Parâmetro                  | valor  | und. | Parâmetro                         | valor  | und.           |
| Produção cimento + umidade | 100,0  | T/h  | Injeç. em m <sup>3</sup>          | 4,89   | m <sup>3</sup> |
| Umidade cimento            | 0,0%   |      | Vazão massica de H <sub>2</sub> O | 4875,3 | kg/h           |
| Produção seca              | 100,0  | T/h  |                                   |        |                |
| Água nas matérias primas   | 0,0    | T/h  |                                   |        |                |
| Alimentação umida          | 163,5  | T/h  |                                   |        |                |
| % umidade do cimento       | 10,00% | %    |                                   |        |                |

|          | Receita | Produção Umida | Umidade | Alimentação Seca | Água | Proporção da entrada de água | Produção umida | Água a ser secada |
|----------|---------|----------------|---------|------------------|------|------------------------------|----------------|-------------------|
| Cinquent | 73%     | 117,73         | 0,3354  | 117,49396        | 0,2  | 14,2%                        | 0,00           | 0,23              |
| Calçário | 25%     | 33,084         | 0,846%  | 32,80398         | 0,3  | 17,3%                        | 0,00           | 0,28              |
| Gesso    | 2%      | 14,2651        | 7,791%  | 13,17211         | 1,1  | 68,6%                        | 0,00           | 1,11              |
| Total    |         | 165,0991       |         | 163,47604        | 1,6  |                              | 0,0            | 1,6231            |

|                 |             |      |                           |            |
|-----------------|-------------|------|---------------------------|------------|
| Umidade Cimento | 6,498332392 | Kg/h | m de água n evap clínquer | 0,32104833 |
| Energia retida  | 1.930,67    | KJ   | m de água n evap Calçário | 1,12115171 |
|                 |             |      | m de água n evap clínquer | 4,45615235 |
|                 |             |      | umidade                   |            |
|                 |             |      |                           | 0,1954     |
|                 |             |      |                           | 0,8464     |
|                 |             |      |                           | 7,7913     |

|                               |         |      |
|-------------------------------|---------|------|
| H <sub>2</sub> O a ser secado | 8438,33 | kg/h |
|-------------------------------|---------|------|

Fonte: Próprio Autor (2018)

Figura 25 - Planilha 5: Temperatura de ebulição da água

**Temperatura de ebulição da água**

| Pressão dentro do moinho | P. abs.  | P em Kpa |
|--------------------------|----------|----------|
| 38,082                   | 888,7929 | 88,87929 |

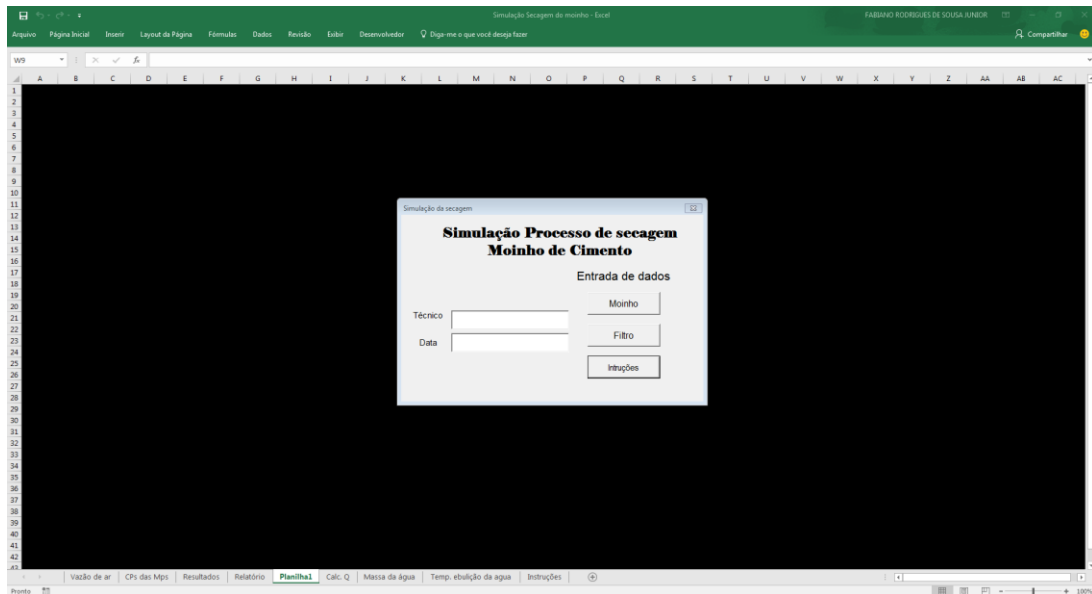
  

|  |          |    |
|--|----------|----|
| Temperatura de ebulição da água dentro do moinho | 95,92876 | °C |
|--|----------|----|

Fonte: Próprio Autor (2018)

Foram elaborados 5 menus, utilizando-se a ferramenta “UserForms” do VBA do Excel, com intuito de criar uma interface entre a planilha e o usuário, facilitando e agilizando a inserção de dados no conjunto de planilhas. A FIG. 26 demonstra a tela inicial da planilha, ao qual o usuário irá inserir seu nome, a data e irá escolher quais dados deseja inserir primeiramente.

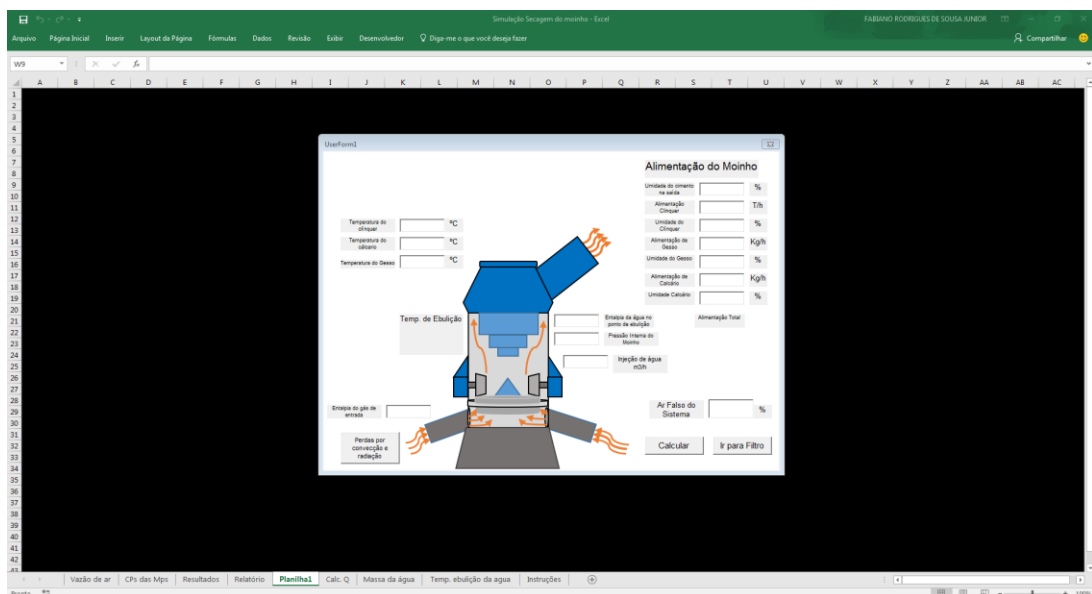
Figura 26 - Tela Inicial da planilha



Fonte - Próprio Autor (2018)

Nesta tela o usuário responsável pelas análises, irá inserir o seu nome e a data da realização da análise. Os botões moinho e filtro irão direcionar o usuário para as telas de inserção dos dados que são demonstradas pelas FIG. 27 e FIG.30.

Figura 27 - Tela de inserção dados do moinho



Fonte - Próprio Autor (2018)

A tela de inserção de dados demonstrado pela FIG. 27, será o local onde o usuário irá inserir os seguintes dados:

- Umidade desejada no cimento em %
- Alimentação de clínquer em T/h
- Umidade de entrada do clínquer em %
- Alimentação de calcário em T/h
- Umidade de entrada do calcário %
- Alimentação de Gesso em T/h
- Umidade de entrada do Gesso em T/h
- Temperatura do clínquer, calcário e gesso em °C
- Entalpia da água no ponto de ebulição em kJ/kg
- Pressão interna do moinho
- Injeção de água no leito de moagem do moinho em m<sup>3</sup>/h
- Ar falso no sistema em %
- Entalpia do gás de entrada do moinho em kJ/kg

Com inserção da pressão interna do moinho, já será demonstrada automaticamente a temperatura de ebulição da água no interior do moinho na própria tela, como demonstra a FIG. 28. Assim que inserido as vazões mássicas das matérias-primas, será demonstrada também na tela a vazão total de matérias-primas que entram no moinho no momento da análise, como demonstra a FIG. 28.



Figura 28 - Tela de inserção de dados referente ao moinho

UserForm1

Alimentação do Moinho

Umidade do cimento na saída  %

Alimentação Clínquer  T/h

Umidade do Clínquer  %

Alimentação de Gesso  T/h

Umidade do Gesso  %

Alimentação de Calcário  T/h

Umidade Calcário  %

Temperatura do clínquer  °C

Temperatura do calcário  °C

Temperatura do Gesso  °C

Temp. de Ebulição da água: 95,7481511052624

Entalpia da água no ponto de ebulição

44 Pressão Interna do Moinho

Injeção de água m3/h

Alimentação total no Moinho: 300Kg/h

Entalpia do gás de entrada

Perdas por convecção e radiação

Ar Falso do Sistema  %

Calcular Ir para Filtro

Fonte - Próprio Autor (2018)

Após serem inseridos todos os dados referente a tela do moinho, deverão ser inseridos os dados para cálculo por convecção e radiação através de seu respectivo botão “ Perdas por convecção e radiação” demonstrado na FIG. 28 sendo indicado por uma seta. Os dados para cálculo da perda por convecção radiação do moinho são:

- Emissividade do material do moinho
- Área superficial do moinho em  $m^2$
- Temperatura do casco do moinho em  $^{\circ}C$
- Diâmetro do moinho em m
- Velocidade do ar sobre o moinho em m/s
- Exponencial de reflexão
- Altura do moinho

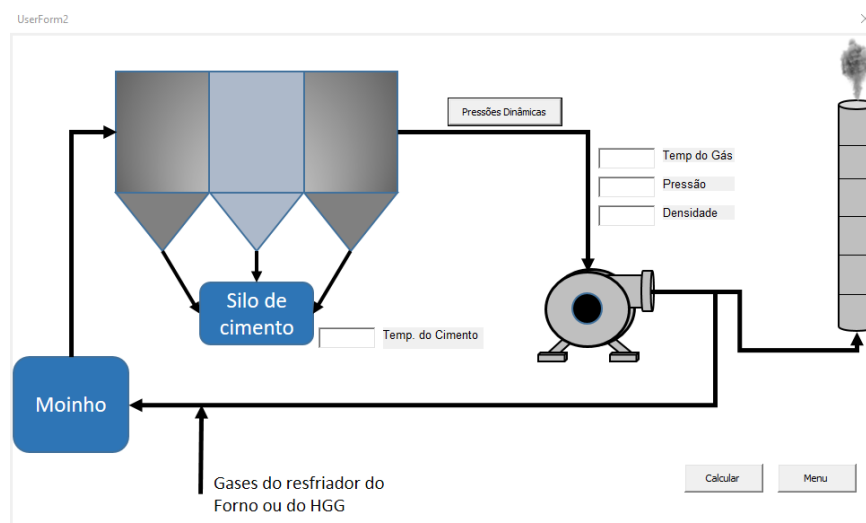
A FIG. 29 mostra a tela de inserção de dados para cálculo da perda de energia por convecção e radiação.

Figura 29 - Menu de inserção de dados para cálculo das perdas por convecção e radiação

Fonte - Próprio Autor (2018)

Após serem inseridos todos os dados referente a tela do moinho deve-se ir para a tela do filtro, através do botão “Ir para filtro”. A FIG. 30 demonstra a tela do filtro.

Figura 30 - Tela do Filtro



Fonte - Próprio Autor (2018)

Nesta tela deverão ser inseridos os seguintes itens:

- Temperatura do gás na saída do filtro em °C
- Pressão estática no duto de saída de gases do filtro em mbar
- Densidade do gás nas condições do gás no duto de saída de gases do filtro em  $\text{kg/m}^3$
- Temperatura do cimento em °C

Após a inserção de dados da tela do filtro deve ser inserida as pressões dinâmicas, acessando o menu através do botão “Pressões dinâmicas” localizado na própria tela do filtro, como mostra a FIG.30. A FIG. 31 exhibe o menu de inserção das pressões dinâmicas.

Figura 31 - Menu de inserção das pressões dinâmicas

The screenshot displays a software interface with a main window titled 'UserForm2' and a sub-window titled 'UserForm3'.

**UserForm2:**

- Contains a blue button labeled 'Moinho'.
- Has a 'Pressões Dinâmicas' button and a 'Temp do Gás' input field.
- Includes a diagram of a filter and duct system with arrows indicating flow.
- At the bottom, there are 'Calcular' and 'Menu' buttons.

**UserForm3: Pressões Dinâmicas no duto de saída do Filtro**

|                   | Ponto 1              | Ponto 2              | Ponto 3              | Ponto 4              | Ponto 5              | Ponto 6              | Ponto 7              | Ponto 8              |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Posição 1 no duto | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |
| Posição 2 no duto | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

Atenção: As pressões devem ser inseridas em mbar.

Buttons: OK, Limpar

Fonte – Próprio Autor (2018)

Após a inserção de todos os dados referentes a tela do filtro e as pressões dinâmicas, o programa já contém todos os dados necessários para o cálculo das taxas de transferências de calor e vazões mássicas. Ao clicar em calcular, o programa demonstrará a planilha de resultados, onde será demonstrado um relatório com os resultados dos cálculos para análise e impressão. Um exemplo de relatório gerado pelo programa está disponível no APÊNDICE A deste trabalho.

A escolha das unidades utilizadas, foi realizada pensando em quais unidades os dados coletados em campo estarão disponíveis, sendo a própria planilha que realizará todas as conversões para as respectivas unidades das formulas utilizadas, visando maior comodidade ao usuário.

## 5.2 Validação do programa

Para validação e análise dos resultados, foram realizadas análises de pressão dinâmica, estática, temperatura de bulbo úmido, bulbo seco, umidade dos gases no duto de saída de gases do filtro de mangas do circuito de moagem, além da medição da temperatura da superfície do moinho. Também foram verificadas as vazões mássicas das matérias-primas, bem como suas respectivas umidades, com intuito de serem as entradas do programa e também os dados necessários para os cálculos realizados a mão pelo autor.

Para realização da validação do programa foram utilizados os dados de entrada descritos nas TAB. 3 e 4 os quais são resultados das análises mencionadas no parágrafo anterior.

Tabela 3 - Pressões Dinâmicas no duto de saída de gases do filtro de mangas

| Pressões dinâmicas no duto de saída de gases do filtro de mangas |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pontos no duto   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
| Posição no duto  |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 1  | 1,50 | 1,40 | 1,10 | 1,10 | 0,90 | 1,00 | 0,90 | 0,80 |
| 2  | 1,00 | 1,10 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,30 | 1,10 | 1,60 |

Fonte: Próprio Autor (2018)

Tabela 4 - Entradas utilizadas para o programa e cálculos manuais

| Parâmetro  | Valor   | Unidade           |
|--|---------|-------------------|
| Temperatura do Clínquer                              | 70      | °C                |
| Temperatura do Calcário                              | 30      | °C                |
| Temperatura do Gesso                                 | 30      | °C                |
| Umidade do Cimento na saída                          | 0,1     | %                 |
| Alimentação de Clínquer                              | 117,73  | T/h               |
| Umidade do clínquer                                  | 0,1954  | %                 |
| Alimentação de Gesso                                 | 14,2851 | %                 |
| Umidade do Gesso                                     | 7,7913  | %                 |
| Alimentação de Calcário                              | 33,084  | T/h               |
| Umidade do calcário                                  | 0,8464  | %                 |
| Entalpia da água no ponto de ebulição                | 401,9   | kJ/kg             |
| Pressão Interna no moinho                            | 38,082  | mbar              |
| Injeção de água no leito de moagem                   | 4,89    | m <sup>3</sup> /h |
| Ar Falso no sistema                                  | 10      | %                 |
| Entalpia do gás de entrada                           | 319,5   | kJ/kg             |
| Emissividade   | 0,95    |                   |
| Área superficial do Moinho                           | 429,311 | m <sup>2</sup>    |
| Temperatura do Casco                                 | 50      | °C                |
| Temperatura ambiente                                 | 29,2    | °C                |
| Diâmetro do moinho                                   | 7,655   | m                 |
| Velocidade do ar sobre o casco do moinho             | 2,22    | m/s               |
| Exponencial de reflexão                              | 0,5     |                   |
| Temperatura de saída do cimento                      | 84,8    | °C                |
| Temperatura do gás na saída do filtro de mangas      | 84,2    | °C                |
| Pressão estática no duto de saída de gases do filtro | 54,35   | mbar              |
| Entalpia do gás na saída do filtro de mangas         | 319,5   | kJ/kg             |

Fonte: Próprio Autor (2018)

Com a inserção dos dados na tela do moinho, o programa resultou nos resultados de temperatura de ebulição da água e vazão total de alimentação, demonstrados na FIG.32

Figura 32 - Tela do moinho Validação

UserForm1

**Alimentação do Moinho**

|                             |         |     |
|-----------------------------|---------|-----|
| Umidade do cimento na saída | 0,1     | %   |
| Alimentação Clínquer        | 117,73  | T/h |
| Umidade do Clínquer         | 0,1954  | %   |
| Alimentação de Gesso        | 14,2851 | T/h |
| Umidade do Gesso            | 7,7913  | %   |
| Alimentação de Calcário     | 33,084  | T/h |
| Umidade Calcário            | 0,8464  | %   |

Temperatura do clínquer: 70 °C  
 Temperatura do calcário: 30 °C  
 Temperatura do Gesso: 30 °C

Temp. de Ebulição da água: 95,9287561663978

Entalpia da água no ponto de ebulição: 401,9  
 Pressão Interna do Moinho: 38,082  
 Injeção de água m3/h: 4,89

Alimentação total no Moinho: 185,0991Kg/h

Entalpia do gás de entrada: 319,5  
 Perdas por convecção e radiação

Ar Falso do Sistema: 10 %

Calcular Ir para Filtro

Fonte: Próprio Autor (2018)

O relatório juntamente com os resultados emitidos pelo programa está disponível no APÊNDICE B. Com os resultados obtidos pelo programa e pelos cálculos manuais constatou-se que os resultados obtidos pelo programa compatibilizaram com resultados manuais demonstrados no APÊNDICE C.

O resultado de 2.613.525,37 kJ/h “roubado” pelo ar falso no sistema, demonstra o quão importante é uma vedação adequada do sistema. Se comparada a soma das energias transferidas para as matérias-primas, para água, perdas por radiação e convecção em relação a quantidade de energia transferida para o ar falso é equivalente a 46 % dessas energias, sendo o maior consumo energético no moinho de cimento analisado.

O programa e os cálculos manuais realizados pelo autor resultaram na relação ar/material de 2,8449 kg de gás por kg de matéria-prima alimentada no moinho de cimento. Segundo LOESCHE (2012), o valor ideal da relação ar/material para moinhos verticais é de

$3,0 \frac{\text{kg de gás}}{\text{kg de material}}$ , sendo aceitável a operação do moinho com valores entre  $2,5 \frac{\text{kg de gás}}{\text{kg de material}}$ , e  $3,5 \frac{\text{kg de gás}}{\text{kg de material}}$ .

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho atendeu seu objetivo de elaborar um programa no Excel utilizando a interface VBA, para simulação do processo de secagem e eficiência térmica na moagem vertical de cimento.

A utilização do programa de simulação do processo de secagem e eficiência térmica do moinho de cimento, é uma ferramenta que proporciona ao usuário maior segurança, agilidade e comodidade por conter uma interface intuitiva, onde ele apenas irá lançar dados obtidos em campo sem a necessidade de conversões de unidades ou a elaboração de uma elevada quantidade de cálculos manuais.

O programa foi validado, pelo autor, através da comparação dos resultados obtidos no programa e os cálculos realizados por ele a mão, através de uma análise realizada em campo na empresa escolhida como objeto de estudo.

Recomenda-se que o usuário, tenha um conhecimento prévio sobre o funcionamento de uma moagem de cimento, bem como suas variáveis, para que ele possa analisar os resultados emitidos pelo programa de maneira correta e eficiente. A leitura do referencial teórico deste trabalho é suma importância para que o usuário possa usar o programa de forma correta e aproveitar todos os recursos que ele dispõe.

É de enorme importância o acompanhamento e análise dos circuitos de moagem para verificação de sua eficiência. Podemos citar parâmetros importantes como quantidade de ar falso no sistema e relação ar material. A quantidade de ar falso pode nos demonstrar uma perda de energia térmica, como também energia elétrica, pois todo esse ar falso está sendo puxado pelo sistema de exaustão da moagem de cimento, que poderia estar em uma potência de consumo menor. A relação ar pano pode nos demonstrar a quantidade de gás por kg de matéria-prima alimentada no moinho de cimento, demonstrando de uma forma simples quanto quilograma de gás está sendo usado, para que se possa fazer o araste e a secagem da matéria-prima.



## REFERÊNCIAS

- ALVEZ, J.; MATOS, S. Calcário e Dolomito. In LUZ, A.; LINS, F. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM –MCT, 2005. Cap. 15, p. 327 – 350.
- ANDRADE, J.; MOURA, M.; QUEIROZ, M. Análise da Produção de Cimento Portland. **Revista Pensar**, Belo Horizonte. Disponível em: <[http://revistapensar.com.br/direito/pasta\\_upload/artigos/a263.pdf](http://revistapensar.com.br/direito/pasta_upload/artigos/a263.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2018.
- ATMACA A.; KANOGLU M. Reducing energy consumption of a raw mill in cement industry. **Energy**, Gaziantep, v.42 p. 261-269, abr. 2012.
- ÇENGEL A. Y.; BOLES A. M. **Termodinâmica**. 7ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- ÇENGEL A. Y.; GHAJAR J. A. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem Prática**. 4ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de Eventos discretos: Teoria e Aplicação**. 3ª ed. São Paulo: Editora do Autor, 2010.
- CORDEIRO C. G.; DÉ SIR M. J. Potencial de argila caulínica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, v. 56, p. 71-76, 2010. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/30551/000774700.pdf?sequence=1&isAllOwed=y>>. Acesso em: 09 set. 2018.
- COSTA, C. M. **Características e Desempenho da Escória de Alto Forno como Agregado para Utilização em Camadas Granulares de Pavimentos**. Ln: Reunião Anual de Pavimentação, 37ª, 2006, Goiânia. Disponível em: <<http://www.solocap.com.br/trabalhotecnico002.pdf>> Acesso em 01 maio 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2012 Brasília. **Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento**. Brasília: CNI, 2012.
- DELTA DUCON. Filtro de Mangas. **Filtro de Mangas**. Disponível em: <<http://www.filtrodemangas.com>>. Acesso em: 1 mar. 2018.
- FIGUEIRA, H.; LUZ, A.; ALMEIDA, S. Britagem e Moagem. In LUZ, A.; SAMPAIO, J.; FRANÇA, S. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM –MCT, 2010. Cap. 4, p. 143 – 214.
- FLSMIDTH. Brochures. **Rotary Kilns For Cement Plants**. Disponível em: <<http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20kilns%20and%20firing/Rotarykilnsforcementplants.pdf?force=1>>. Acesso em: 06 maio 2018.

FLSMIDTH. Brochures. **Preheater Calciner Systems**. Disponível em: <  
<http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20kilns%20and%20firing/PreheatercalcinersystemsV2.pdf?force=1>> . Acesso em: 06 maio 2018.

GARCIA C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. 2ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2013

GÓMEZ, L. A. **Excel para Engenheiros**. 1ª ed. Florianópolis: Visual Books, 2009.

GAUTO M.; ROSA, G. **Processos e Operações Unitárias da Indústria Química**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2011.

GUARANY B. L. A. C. et al. Principais métodos de estocagem de minério de ferro: Uma abordagem teórica. **Perspectivas Online: Ciências Exatas e Engenharia**, Campos dos Goytacazes 04 de setembro de 2013.

HIMMELBLAU M. D.; RIGGS B. J. **Engenharia Química Princípios e Cálculos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

LAFARGE S.A. **Cement Process Engineering Vade-Mecum**. 2010.

LIMA, A. B. **O Processo Produtivo do cimento Portland**. 2011. 38 p. Monografia (Curso de Especialização em Recursos Mineraiis) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

LUZ, A.; LINS, F. Calcário e Dolomito. In \_\_\_\_\_ **Rochas e Mineraiis Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM –MCT, 2005. Cap. 15, p. 107 - 126.

LOESCHE. **Manual do operador: Loesche Moinho e Classificador**. Rev. A. Dusseldorf, 2012.

LOESCHE. Brochures. **Loesche Mills For Cement Raw Material**. Disponível em: <  
<https://www.loesche.com/sites/default/files/list-content/brochure/2017-08/154-Loesche-mills-for-cement-raw-material-E-2016.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

LOESCHE. Brochures. **Loesche Mills For Cement and Granuleted Blast Furnace Slag**. Disponível em: <  
<https://www.loesche.com/sites/default/files/list-content/brochure/2017-08/143-LOESCHE-Mills-for-cement-and-granulated-blast-furnace-slag-E-2016.pdf>> . Acesso em: 08 jun. 2018.

LOESCHE. Brochures. **Loesche Mills For Solid Fuels Coal Mill**. Disponível em: <  
<https://www.loesche.com/sites/default/files/list-content/brochure/2017-08/132-Loesche-Mills-for-Solid-Fuels-Coal-Mill-E-2016.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2018.

MARIN, F.; ASSAD E.; PILAU, F. **Clima e ambiente: introdução à climatologia para ciências ambientais**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2008

MARQUES, D. M. et al. A comprovação da relação volume x variância na homogeneização da sílica em minério de ferro. **Rem: Rev. Esc. Minas**, Ouro Preto, v. 63, n. 2, p. 355-361, June 2010. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-44672010000200021&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672010000200021&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 31 maio 2018.

MINERAÇÃO VALE. Sobre a Vale. **A produção do Minério de Ferro: entenda como se forma o nosso principal produto**. Disponível em:

<<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/a-producao-minerio-de-ferro-entenda-forma-principal-produto.aspx>>. Acesso em: 1 mar. 2018.

OLIVEIRA M. F. **Estudo do Efeito Eletrostático na Filtração de Partículas de Cimento em Filtros de Mangas**. 2015. 99 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

PAULA G. L. **Análise Termoeconômica do Processo de Produção de Cimento Portland com Co-processamento de Misturas de Resíduos**. 2009. 182 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

PEREIRA C. C. **Estudo de confiabilidade de um resfriador de grelhas utilizado em indústrias cimenteiras**. 81 p. Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2012.

PINTO, P. M. **Microsoft Excel 2010**. Famalicão: Centro Atlântico, Ltda 2011.

POTTER, C. M.; WIGGERT, C. D. **Mecânica dos Fluidos**. 1 ed. São Paulo: Cengage Learning 2009

SHIN-IKE, K. V. **Estudo da Instalação de um Instrumento Wireless no Monitoramento de uma Torre de ciclones de Indústria Cimenteira**. 2013. 134 p. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013

SHREVE N. R.; BRINK JR. A. J. **Indústria de processos químicos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC 2014.

SCHNEIDER, S. P. **Medição de velocidade e Vazão de fluidos**. 6ª ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2011.

TIPLER A. P.; MOSCA G. **Física para cientistas e engenheiros: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica**. Vol. 1. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

ZAMPIERI, A. V. **Mineralogia e Mecanismos de Ativação e Reação das Pozolanas de Argilas Calcinadas**. 1989. 212 p. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

## APÊNCICE A – RELATÓRIO EMITIDO PELO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM E EFICIÊNCIA TÉRMICA

### RELATÓRIO

**Responsável técnico:**

**Data:**

Tabela de caracterização das materias Primas

| Materias Primas | Vazão | Und | Umidade | Und | Cp usado | Und       | Calor Consumido | Und  |
|-----------------|-------|-----|---------|-----|----------|-----------|-----------------|------|
| Clínquer        |       | T/h | 0,00195 | %   |          | kcal/kg*c |                 | Kj/h |
| Calcário        |       | T/h | 0,00846 | %   |          | kcal/kg*k |                 | Kj/h |
| Gesso           |       | T/h | 0,07791 | %   |          | kcal/kg*k |                 | Kj/h |

#### Entalpias Usadas

|   | Valor | Und   |
|---|-------|-------|
| Gás de entrada do moinho                  |       | kg/kg |
| Gás na saída de gases do filtro de mangas |       | kg/kg |
| Água a 25 °C                              |       | kg/kg |
| Água a 95,928756 °C                       |       | kg/kg |

#### Consumo Energético

|  | Valor | Und  |
|--|-------|------|
| Consumo energético gasto na secagem              |       | kJ/h |
| Perda de energia térmica por convecção           |       | kJ/h |
| Perda de energia térmica por radiação            |       | kJ/h |
| Perda de energia por ar falso no filtro e moinho |       | kJ/h |
| Perda de energia por ar falso no filtro em %     |       | %    |

#### Características do moinho usadas para cálculo da perda de energia por Convecção e Radiação

|                               | Valor | Und                |
|-------------------------------|-------|--------------------|
| Emissividade                  |       |                    |
| Area superficial              |       | m <sup>2</sup>     |
| Temperatura do casco          |       | °C                 |
| Temperatura ambiente          |       | °C                 |
| Coefficiente de transferencia |       | W/m <sup>2</sup> C |
| Diamentro do moinho           |       | m                  |
| Velocidade do ar              |       | m/s                |
| Exeponencial de reflexão      |       |                    |

| Relação Ar/ Material |   |
|----------------------|---|
| Valor                | Unidade   |
|                      | $\frac{kg \text{ de gás}}{kg \text{ de material alimentado}}$ |

#### Gases de entrada e saída

|   | Valor | Und  |
|---|-------|------|
| Energia do gás na entrada do moinho         |       | kJ/h |
| Energia do gás na saída do Filtro de mangas |       | kJ/h |

#### Observações

---



---



---



---



---



---



---

## APÊNCICE B – RESULTADOS EMITIDOS PELO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM E EFICIÊNCIA TÉRMICA

### RELATÓRIO

**Responsável técnico:**

Fabiano R. Sousa Junior

**Data:**

22/10/2018

Tabela de caracterização das materias Primas

| Materias Primas | Vazão     | Und | Umidade | Und | Cp usado    | Und       | Calor Consumido | Und  |
|-----------------|-----------|-----|---------|-----|-------------|-----------|-----------------|------|
| Clinker         | 117,49996 | T/h | 0,00195 | %   | 0,18978     | kcal/kg*c | 1.380.834,20    | Kj/h |
| Calcário        | 32,803977 | T/h | 0,00846 | %   | 0,197967093 | kcal/kg*k | 1.488.989,85    | Kj/h |
| Gesso           | 13,172105 | T/h | 0,07791 | %   | 0,198188464 | kcal/kg*k | 598.557,38      | Kj/h |

#### Entalpias Usadas

|   | Valor  | Und   |
|---|--------|-------|
| Gás de entrada do moinho                  | 319,50 | kg/kg |
| Gás na saída de gases do filtro de mangas | 267,70 | kg/kg |
| Água a 25 °C                              | 104,80 | kg/kg |
| Água a 95,928756 °C                       | 401,90 | kg/kg |

#### Consumo Energético

|  | Valor        | Und  |
|--|--------------|------|
| Consumo energético gasto na secagem              | 1.928.741,71 | kJ/h |
| Perda de energia térmica por convecção           | 73.303,02    | kJ/h |
| Perda de energia térmica por radiação            | 211.823,84   | kJ/h |
| Perda de energia por ar falso no filtro e moinho | 2.613.525,37 | kJ/h |
| Perda de energia por ar falso no filtro em %     | 45,99%       |      |

#### Características do moinho usadas para cálculo da perda de energia por Convecção e Radiação

|                               | Valor    | Und                |
|-------------------------------|----------|--------------------|
| Emissividade                  | 0,95     |                    |
| Area superficial              | 429,311  | m <sup>2</sup>     |
| Temperatura do casco          | 50       | °C                 |
| Temperatura ambiente          | 29,2     | °C                 |
| Coefficiente de transferencia | 2,280258 | W/m <sup>2</sup> C |
| Diamento do moinho            | 7,655    | m                  |
| Velocidade do ar              | 2,22     | m/s                |
| Exeponencial de reflexão      | 0,5      |                    |

| Relação Ar/ Material |   |
|----------------------|---|
| Valor                | Unidade   |
| 2,844928478          | $\frac{kg \text{ de gás}}{kg \text{ de material alimentado}}$ |

#### Gases de entrada e saída

|   | Valor       | Und  |
|---|-------------|------|
| Energia do gás na entrada do moinho         | 132984598,7 | kJ/h |
| Energia do gás na saída do Filtro de mangas | 125737386,7 | kJ/h |

#### Observações

---



---



---



---



---



---

## APÊNCICE C – CÁLCULOS REALIZADOS A MÃO PELO AUTOR

### \*Dados coletados em campo

> Ponto de medição: Duto de saída de gases do filtro de mangas.

Temperatura dos gases:  $84,2^{\circ}\text{C}$

Pressão estática no duto:  $54,4$  na posição 1  
 $54,3$  na posição 2

Umidade do gás:  $15,5\%$

Temperatura de bulbo úmido:  $49,6^{\circ}\text{C}$

Temperatura de bulbo seco:  $86,7^{\circ}\text{C}$

Pressões Dinâmicas no duto:

| Pontos no<br>Posição<br>no duto | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |      |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 1                               | 1,5 | 1,4 | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 0,8 | mbar |
| 2                               | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,3 | 1,1 | 1,6 | mbar |

> Ponto de medição: Duto de entrada de gases do moinho de cimento.

Temperatura de bulbo úmido:  $51,6^{\circ}\text{C}$

Temperatura de bulbo seco:  $112,1^{\circ}\text{C}$

Umidade:  $5,3\%$

\*Dados coletados no software de acompanhamento do processo produtivo e laboratório da empresa

> Vazão de Matérias-Primas

Clinker:  $117,73 \text{ t/h}$  umidade do clinker:  $0,1954\%$

Calcário: 33,084 t/h umidade do calcário: 0,8464%

Gesso: 14,2851 t/h umidade do gesso: 7,7913%

\* Dados Coletados no EES

Entalpia do gás na saída de gases do filtro de mangas: 267,70 kJ/kg

Entalpia do gás na entrada de gases do moinho: 319,5 kJ/kg

Entalpia da água a 25 °C: 204,8 kJ/kg

Entalpia da água a 95,93 °C: 401,9 kJ/kg

Vazão de água no leito de moagem: 4,89 m<sup>3</sup>/h

Pressão Interna do moinho: 38,082 mbar

Temperatura do clínguer: 70 °C

Temperatura do calcário: 30 °C

Temperatura do gesso: 30 °C

Temperatura do cimento: 84,80 °C

## \* Cálculos

Velocidade dos gases no duto de saída do filtro de mangas

> Velocidades na posição de medição  $\perp$  conforme tabela de pressões dinâmicas.

Fórmula:  $V = \text{coeficiente do pitot} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \text{Pressão Dinâmica em } \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\text{Densidade em } \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}}} = \text{m/s}$

fator de conversão de mbar para  $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$  utilizado foi: 98,06

Coefficiente do tubo de pitot: 0,82

Densidade calculada no EES:  $0,7462 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

$$V_{p1} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 147,09}{0,7462}} = 16,2814 \text{ m/s}$$

$$V_{p2} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 137,284}{0,7462}} = 15,7294 \text{ m/s}$$

$$V_{p3} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 107,866}{0,7462}} = 13,9426 \text{ m/s}$$

$$V_{p4} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 107,866}{0,7462}} = 13,9426 \text{ m/s}$$

$$V_{p5} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 88,254}{0,7462}} = 12,6115 \text{ m/s}$$



$$V_{p6} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 98,06}{0,7462}} = 13,2937 \text{ m/s}$$

$$V_{p7} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 88,254}{0,7462}} = 12,6115 \text{ m/s}$$

$$V_{p8} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 78,448}{0,7462}} = 11,8903 \text{ m/s}$$

> Velocidades na posição de medição 2 conforme tabela de pressões dinâmicas

$$V_{p1} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 98,06}{0,7462}} = 13,2937 \text{ m/s}$$

$$V_{p2} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 107,866}{0,7462}} = 13,9426 \text{ m/s}$$

$$V_{p3} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 117,672}{0,7462}} = 14,5627 \text{ m/s}$$

$$V_{p4} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 117,672}{0,7462}} = 14,5627 \text{ m/s}$$

$$V_{p5} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 117,672}{0,7462}} = 14,5627 \text{ m/s}$$

$$V_{p6} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 127,478}{0,7462}} = 15,1572 \text{ m/s}$$

$$V_{p7} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 107,866}{0,7462}} = 13,9426 \text{ m/s}$$

$$V_{p8} = 0,82 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 156,896}{0,7462}} = 16,8154 \text{ m/s}$$

> Cálculo da velocidade média.

$$\text{Fórmula: } V_m = \frac{\sum V_{p1} + V_{p2} + \dots + V_{pn}}{n}$$

$$\sum V_p = (16,2814 + 15,7294 + 13,9426 + 13,9426 + 12,6115 + 13,2937 + 12,6215 + 11,8903 + 13,2937 + 13,9426 + 14,5627 + 14,5627 + 14,5627 + 15,1572 + 13,9426 + 16,8154)$$

$$\sum V_p = 227,1426 \text{ m/s}$$

$$V_m = \frac{227,1426 \text{ m/s}}{16} = 14,1964 \text{ m/s}$$

> Cálculo da área da seção transversal do duto de saída de gases do filtro de mangas.

$$\text{Fórmula: } \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

→ Diâmetro do duto: 3,96 m

$$A = \frac{\pi \cdot 3,96^2}{4} = 12,3163 \text{ m}^2$$

> Cálculo da vazão de gases no duto de saída do filtro de mangas

$$\text{Fórmula: } \dot{V} = V_m \cdot A$$

$$\dot{V} = 14,1964 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 12,3163 \text{ m}^2$$

$$\dot{V} = 174,8471 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Transformando para  $\text{m}^3/\text{h}$

$$174,8471 \cdot 3600 = 629.449,6368 \text{ m}^3/\text{h}$$

> Cálculo da vazão mássica de gases no duto de saída de gases do filtro de mangas

Fórmula:  $\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho$

Densidade =  $0,7462 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$$\dot{m} = 629.449,6368 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 0,7462 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 469.695,319 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

> Determinação da quantidade de água no sistema.

Fórmula:  $\dot{m}_{\text{do material}} \cdot U_{\text{umidade do material}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O do clínquer}} = 117,73 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 1,954 \cdot 10^{-3} = 0,23 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O do calcário}} = 33,084 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 8,464 \cdot 10^{-3} = 0,28 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O do gesso}} = 14,2851 \frac{\text{t}}{\text{h}} \cdot 77,913 \cdot 10^{-3} = 1,113 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

$$\dot{V} \text{ da injeção de H}_2\text{O no leito de moagem} = 4,89 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Para cálculo da vazão mássica da quantidade de  $H_2O$  no leito de moagem considerou-se a  $\rho_{H_2O} = 997 \frac{kg}{m^3}$

$$\dot{m} = 4,89 \frac{m^3}{h} \cdot 997 \frac{kg}{m^3} = 4.875,33 \frac{kg}{h}$$

> Determinação da vazão mássica de gases na entrada do moinho.

→ Considerando que o gás na saída do filtro de mangas é constituído apenas de ar atmosférica com sua umidade inicial, mais o vapor d'água gerado pela secagem no interior do moinho, e mais o ar falso que entrou no sistema.

$$\dot{m}_{\text{gás que entra no sistema}} = \dot{m}_{\text{gás na saída do sistema}} - \dot{m}_{\text{ar falso}} - \dot{m}_{H_2O \text{ que entra no sistema}}$$

$$\dot{m}_{\text{gás que entra no sistema}} = 469695,319 - (469695,319 \cdot 0,10) - 6498,33$$

$$\dot{m}_{\text{gás na entrada do moinho}} = 416227,4571 \frac{kg}{h}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \dot{m}_{H_2O \text{ que entra no sistema}} &= \dot{m}_{H_2O \text{ de injeção no leito de moagem}} + \dot{m}_{H_2O \text{ gesso}} + \dot{m}_{H_2O \text{ calcário}} \\ &+ \dot{m}_{H_2O \text{ clínquer}} \end{aligned}$$

## \*Balanço Energético

> Energia do gás de entrada do moimbo

Fórmula:  $\dot{Q} = \dot{m} \cdot H$

→ A entalpia do gás de entrada foi determinada com o software EES

$$\dot{Q} = 416227,4571 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 319,50 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 132984672,5 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

> Energia do gás de saída do filtro de mangas

→ Entalpia do gás de saída foi determinada com o software EES

$$\dot{Q} = 469695,319 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 267,70 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 125.737.436,9 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

> Determinação da temperatura do ponto de ebulição da água pela equação de Dalton

$$\text{Fórmula } T = \frac{237,3 \ln \frac{e_s}{A}}{17,3 - \ln \frac{e_s}{A}} =$$

$e_s$  = Pressão ao qual o fluido está submetido  
 $A$  = Constante 0,6108 Kpa

$$T = \frac{237,3 \ln \left( \frac{88,88}{0,6108} \right)}{17,3 - \ln \left( \frac{88,88}{0,6108} \right)} = 95,929 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entalpias da água calculadas no EES

$$H \text{ da água a } 25^\circ\text{C} = 104,80 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$H \text{ da água a } 95,929 = 401,9 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

> Energia necessária para evaporar a água

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \text{ que entra no sistema} \cdot (H_{\text{H}_2\text{O}} \text{ na temperatura que entra no sistema} - H_{\text{H}_2\text{O}} \text{ na temp. de ebulição})$$

$$\dot{Q} = 6498,33 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot (401,9 - 104,80) \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q} = 1930653,843 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

> Determinação dos Cp's das matérias-primas

Fórmula para o Gesso e Calcários:

$$C_p = a + bT + c \cdot T^2 + d \cdot T^{-2}$$

Fórmula para o Clínquer

$$C_p = A + (B \cdot T \cdot 10^{-6}) + (C \cdot T^{-2} \cdot 10^{-9})$$

→ Os termos a, b, c e d são constantes para a faixa de temperatura, disponível no material de apoio da empresa analisada.

$$C_{p \text{ clínquer}} = 0,186 + (54 \cdot 70 \cdot 10^{-6}) + (0 \cdot 70 \cdot 10^{-9})$$

$$C_{p \text{ clínquer}} = 0,18978 \text{ Kcal/Kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$C_{p \text{ calcário}} = 2,49575 \cdot 10^{-4} + (5,23529 \cdot 10^{-5} \cdot 303) + (0 \cdot 303^2) + (-6,19443 \cdot 10^{-3}) \cdot (303^{-2}) = 0,1979 \text{ Kcal/Kg} \cdot \text{K}$$

$$C_{p \text{ gesso}} = 1,16776 \cdot 10^{-4} + (2,68688 \cdot 10^{-4} \cdot 303) + (0 \cdot 303^2) + (0 \cdot 298^{-2}) = 0,198 \text{ Kcal/Kg} \cdot \text{K}$$

Energia necessária para elevar a temperatura das matérias-primas até a temperatura de saída do cimento.

Fórmula:  $\dot{Q} = \dot{m}_{\text{matéria-prima seca}} \cdot C_{p \text{ matéria-prima}} \cdot (T_f - T_i)$

$$\dot{Q}_{\text{clínquer}} = 1170500,00 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 0,18978 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot (8480 - 70) ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q}_{\text{clínquer}} = 330027,42 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q}_{\text{clínquer}} = 330027,42 \cdot 4,184 = 1380834,725 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q}_{\text{calcário}} = 32804 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 0,1979 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot (357,8 - 303) \text{K}$$

$$\dot{Q}_{\text{calcário}} = 355756,7557 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q}_{\text{calcário}} = 355756,7557 \cdot 4,184 = 1488486,266 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

$$\dot{Q}_{\text{gesso}} = 13172,1 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 0,198 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg} \cdot \text{K}} \cdot (357,8 - 303) \text{K}$$

$$\dot{Q}_{\text{gesso}} = 142922,5538 \cdot 4,184 = 597987,9653 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$

> Energia perdida por ar falso:

$$\dot{m}_{\text{ar falso}} = \dot{m}_{\text{gás na saída do filtro}} \cdot \% \text{ de ar falso}$$

→ % de ar falso é estimado em torno de 10% pela empresa analisada.

$$\dot{m}_{\text{ar falso}} = 469695,13 \cdot 10\% = 46969,513 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

→ Cp do ar atmosférico foi retirado do material de suporte da empresa analisada.

$$\dot{Q} = 46969,513 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot 0,2418 \frac{\text{kcal}}{\text{Kg} \cdot \text{°C}} \cdot (84,2 - 29,2) \text{°C}$$

$$\dot{Q} = 624647,5534 \cdot 4,184 = 2613525,363 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}$$



> Perdas por convecção e radiação

Convecção

$$Q_{\text{convec.}} = h \cdot A \cdot (T_{\text{casco}} - T_{\text{ambiente}})$$

→ Área Superficial do moimho =  $429,311 \text{ m}^2$

→  $h = h_{\text{nat}} \cdot (1 + 0,57V)^e$

V = Velocidade do ar na Superfície

e = expoente de reflexão do Vento

$$h_{\text{nat}} = 1,18 \cdot ((T_{\text{casco}} - T_{\text{ambiente}}) / D)^{0,25}$$

D = Diâmetro do moimho

→ Considerando o fator característico de dimensionamento como o diâmetro do moimho:

$$h_{\text{nat}} = 1,18 \cdot ((T_{\text{casco}} - T_{\text{ambiente}}) / D)^{0,25}$$

$$h_{\text{nat}} = 1,18 \cdot ((50 - 29,2) / 7,655)^{0,25}$$

$$h_{\text{nat}} = 1,515$$

$$h = 1,515 \cdot (1 + 0,57 \cdot 2,22)^{0,5}$$

$$h = 2,2803$$

$$Q_{\text{convec.}} = 2,2803 \cdot 429,311 \cdot (50 - 25)$$

$$Q_{\text{convec.}} = 20362,3238 \text{ W}$$

Passando para  $\text{Kg/h}$   $\rightarrow W = \text{J/s}$

$$Q_{\text{convec.}} = \frac{20362,3238 \text{ J/s} \cdot 3600}{1000} = 73.304,3655 \text{ Kg/h}$$

Radiação

$$Q_{\text{rad.}} = \alpha \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{\text{casco}}^4 - T_{\text{ambiente}}^4)$$

A emissividade considerada foi 0,95 do ferro, consultada no material de apoio da empresa analisada.

$\sigma$   $\rightarrow$  Constante de Stefan Boltzmann sendo considerada como  $5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$\alpha$  = Fator de visão foi considerado 1

$$Q_{\text{rad.}} = 1 \cdot 0,95 \cdot (5,6703 \cdot 10^{-8}) \cdot 429,311 \cdot (323^4 - 302,2^4)$$

$$Q_{\text{rad.}} = 58839,9559 \text{ W}$$

Transformando em  $\text{Kg/h}$

$$Q_{\text{rad.}} = \frac{58839,9559 \cdot 3600}{1000} = 211823,8413 \text{ Kg/h}$$

$$\text{Razão Ar/material} = \frac{\dot{m}_{\text{gás na saída do filtro}}}{\dot{m}_{\text{materiais-primas do cimento}}}$$

$$\text{Razão Ar/material} = \frac{469695,319 \text{ Kg/h}}{165099,1 \text{ Kg/h}} = 2,8449$$