

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS

Departamento de Engenharia Química

Ana Júlia Santana Senna

Bianka Alexandrino de Oliveira

Júlia Maria Andrade Guerra

**PROJETO DE UMA PLANTA PILOTO PARA PRODUÇÃO DE MATERIAL  
ATIVADO ALCALINAMENTE A PARTIR DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

Belo Horizonte  
2021

Ana Júlia Santana Senna  
Bianka Alexandrino de Oliveira  
Júlia Maria Andrade Guerra

**PROJETO DE UMA PLANTA PILOTO PARA PRODUÇÃO DE MATERIAL  
ATIVADO ALCALINAMENTE A PARTIR DE ESCÓRIA DE ALTO-FORNO**

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Graduação de Engenharia Química da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial exigido para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Me. Leonardo Mitre

Belo Horizonte  
2021

## RESUMO

O concreto é um derivado do cimento Portland de vasta aplicação que possui aditivos como britas, areia e água. Na construção de fábricas e em armazéns de produtos inflamáveis, é demandada a utilização de um material que possui resistência mecânica sob condições de elevadas temperaturas. Em incêndios, o concreto sofre perda de água e assim, perda em sua resistência e elasticidade, causando fragilidade na estrutura física. Nesse contexto, os materiais ativados alcalinamente, materiais sólidos obtidos por meio de uma polimerização inorgânica alcalina de materiais ricos em aluminossilicatos, vêm se mostrando como um material auxiliar para aplicação. Dessa forma, o presente trabalho desenvolveu um projeto de uma planta piloto para a produção de um material ativado alcalinamente a base de escória de alto-forno, um subproduto do processo de produção de ferro gusa rico em aluminossilicatos. Para tal, foi realizado o escalonamento da planta, com projeto conceitual e básico englobando *layout* da planta, capacidade produtiva, além de uma análise dos custos de equipamentos e matéria-prima, finalizando com a identificação de segurança do processo e análise F.O.F.A.. Foi possível apurar o orçamento para investimento inicial na planta e a sua possibilidade de aplicação para testes de produtos similares, finalizando com a constatação de demanda desse projeto no mercado.

Palavras-Chave: Escalonamento. Planta Piloto. Ativação alcalina. Escória de alto-forno.

## ABSTRACT

Concrete is a derivative of Portland cement of wide application that has additives such as gravel, sand and water. The use of a material that has mechanical resistance under high temperature conditions is of great importance in the construction of factories and warehouses for flammable products, for example. In fires, concrete suffers loss of water and thus loss of strength and elasticity, causing fragility in the physical structure. In this context, alkali-activated material, solid materials obtained through an alkaline inorganic polymerization of materials rich in aluminosilicates, has proved to be an interesting aid for application in civil constructions. The present work developed a pilot plant project to produce a blast furnace slag alkali-activated material. Blast furnace slag is a by-product of the pig iron production process rich in aluminosilicates. Therefore, the present paper scaled the plant including a conceptual and basic project that encompass the plant *layout*, productive capacity, analysis of equipment and raw material costs, identification of process safety issues and finally a SWOT analysis. The budget for the initial investment was made, also the verification of application of the plant for testing other products in the same area, in addition it was concluded the demand for this project in the market.

Keywords: Scaling. Pilot Plant. Alkaline Activation. Blast Furnace Slag.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Estrutura tridimensional dos polissilatos .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2 – Modelo conceitual para a geopolimerização .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 3 – Geopolímero expandido para produção de painéis isolantes térmicos .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 4 – Modelo de fluxo macro de materiais .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 5 – Diagrama de blocos da produção do material ativado alcalinamente .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 6 – Quadro modelo para análise F.O.F.A. ....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 7 – Fluxograma geral do processo .....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 8 – Carta de interligações preferenciais: parte administrativa da planta .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 9 – Carta de interligações preferenciais: parte produtiva da planta .....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 10 – <i>Layout</i> final proposto .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 11 – Mapofluxograma do <i>layout</i> .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 12 – Mapeamento do fluxo de matérias-primas .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 13 – Mapeamento do fluxo produtivo .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 14 – Equipamentos para teste de compressão sob temperatura .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 15 – Análise F.O.F.A. (S.W.O.T.) .....</b>	<b>56</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Legenda dos critérios de relacionamentos.....</b>	<b>24</b>
<b>Tabela 2 – Composição da escória de alto-forno em percentual mássico .....</b>	<b>27</b>
<b>Tabela 3 – Comparativo da escória de alto-forno (Brasil e Índia).....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 4 – Comparativo da escória de alto-forno: Índia e Brasil após adição de 16,5% de Metacaulim .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 5 – Proposta de matérias primas .....</b>	<b>42</b>
<b>Tabela 6 – Proposta de equipamentos para a planta piloto .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 7 – Proposta de equipamentos laboratoriais .....</b>	<b>49</b>
<b>Tabela 8 – Proposta de suprimentos operacionais .....</b>	<b>51</b>
<b>Tabela 9 – Valores da razão de propriedades do concreto com agregados silicosos e calcáreos.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 10 – Valor em kg das matérias-primas .....</b>	<b>60</b>

## **LISTA DE QUADROS**

<b>Quadro 1 – Classificação dos níveis de maturidade pelo sistema TRL .....</b>	<b>22</b>
<b>Quadro 2 – Descrição das áreas da planta piloto e suas finalidades.....</b>	<b>34</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

CP – Cimento Portland

DMA/PA – Densidade aparente e porosidade

DRX – Difractometria de raio-x

EPI – Equipamento de Proteção Individual

FISPQ – Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico

F.O.F.A. – Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças

FRX – Espectrômetro de fluorescência de raio-X

MPa – Mega Pascal

PUC – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

RCTA – Resistência a compressão à temperatura ambiente

RFTA – Resistência a flexão à temperatura ambiente

RCQ – Resistência a compressão à quente

SLP – *Systematic Layout Planning*

SNIC – Sindicato Nacional da Indústria do Cimento

S.W.O.T. – *Strenghts, Weaknesses, Opportunities e Threats*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>12</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Cimento Portland .....</b>	<b>13</b>
3.1.1 <i>Composição e propriedades .....</i>	<i>13</i>
3.1.2 <i>Normas de resistência ao fogo para edificações.....</i>	<i>14</i>
<b>3.2 Geopolímero .....</b>	<b>15</b>
3.2.1 <i>Conceito e propriedades.....</i>	<i>15</i>
3.2.2 <i>Mecanismos de ativação.....</i>	<i>16</i>
3.2.3 <i>Ativadores alcalinos .....</i>	<i>17</i>
3.2.4 <i>Escória de alto-forno.....</i>	<i>18</i>
3.2.5 <i>Vantagens do geopolímero .....</i>	<i>19</i>
3.2.6 <i>Possíveis aplicações .....</i>	<i>20</i>
<b>3.3 Escalonamento de Processos.....</b>	<b>21</b>
3.3.1 <i>Planta Piloto.....</i>	<i>21</i>
3.3.2 <i>Projeto Conceitual e Básico .....</i>	<i>23</i>
3.3.2.1 <i>Layout .....</i>	<i>23</i>
3.3.2.2 <i>Processos operacionais .....</i>	<i>24</i>
<b>3.4 Avaliação Estratégica .....</b>	<b>25</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Escalonamento do Processo .....</b>	<b>26</b>
4.1.1 <i>Projeto Conceitual e Básico .....</i>	<i>27</i>
4.1.1.1 <i>Layout .....</i>	<i>27</i>
4.1.1.2 <i>Processos operacionais .....</i>	<i>28</i>
4.1.1.3 <i>Avaliação ambiental e de segurança do processo.....</i>	<i>29</i>
<b>4.2 Avaliação Estratégica .....</b>	<b>30</b>
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1 Escalonamento de Processos.....</b>	<b>31</b>
5.1.1 <i>Projeto Conceitual e Básico .....</i>	<i>33</i>
5.1.1.1 <i>Layout .....</i>	<i>33</i>
5.1.1.2 <i>Processos operacionais .....</i>	<i>39</i>
5.1.1.2.1 <i>Memorial descritivo.....</i>	<i>39</i>
5.1.1.2.2 <i>Levantamento das matérias-primas .....</i>	<i>42</i>
5.1.1.2.3 <i>Levantamento dos equipamentos.....</i>	<i>43</i>
5.1.1.3 <i>Avaliação ambiental e de segurança do processo.....</i>	<i>53</i>
5.1.1.3.1 <i>Hidróxido de sódio .....</i>	<i>54</i>
5.1.1.3.2 <i>Silicato de sódio.....</i>	<i>54</i>
5.1.1.3.3 <i>Segurança de processos .....</i>	<i>55</i>
<b>5.2 Avaliação Estratégica .....</b>	<b>56</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>58</b>

<b>7 TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>60</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do cimento, sua formulação e aplicações na construção civil passaram por grande evolução para se chegar ao seu processamento e composição atual. O primeiro material de maior durabilidade era constituído de uma mistura de argamassa de argila e cal com cinzas vulcânicas produzida pelos romanos. Foi apenas em 1824 que o cimento Portland (CP) teve sua patente registrada na Inglaterra, obtendo esse nome devido a suas propriedades e cor similares às rochas da ilha britânica de mesmo nome (BATTAGIN, 2016).

Um dos derivados do cimento de maior aplicação é o concreto, material que tem como base o cimento e a adição de agregados graúdos (britas) e miúdos (areia), além da água (PETRUCCI; PAULON, 1998). A adição de agregados acarreta na melhora da resistência à compressão, tornando esse fator o principal para avaliação da qualidade do concreto. Outra característica desejável é a durabilidade, fator que depende da constância das propriedades do material com o decorrer do tempo e sob ações de condições externas (ZHANG, 2010).

Desse modo, um dos grandes fatores relevantes para a construção de estruturas de viadutos e fábricas de diversos setores, além de galpões de armazenamento de produtos inflamáveis, é a resistência do material sob condição de elevadas temperaturas. Em incêndios, materiais como o concreto sofrem perda de água na forma de vapor devido a sua composição de cimento hidratado. Com isso, há perdas consideráveis de resistência e do módulo de elasticidade do composto, causando extrema fragilidade na estrutura da edificação (SAXENA; KUMAR; SINGH, 2017). Portanto, faz-se necessária a avaliação de novos materiais que apresentem maior resistência ao fogo, para aplicações em edificações e outras estruturas.

Nesse contexto, os materiais ativados alcalinamente, que estão sendo estudados e aplicados recentemente no Brasil, vêm se mostrando como um auxiliar promissor na aplicação em estruturas da área de construções. Suas propriedades se destacam pela sua resistência ao fogo, ao ataque ácido e à compressão, além de apresentar um endurecimento e tempo de cura rápidos, bem como facilidade de moldagem (VAZ, 2011; LAMEIRAS *et al.*, 2018).

Dessa forma, tendo em vista a deficiência de materiais presentes no mercado atual que atendam às condições especiais na engenharia civil, o presente trabalho objetiva o desenvolvimento de um projeto de uma planta piloto de testes mecânicos da produção de um material ativado alcalinamente com resistência ao fogo, à base de escória de alto-forno, baseado em um estudo feito anteriormente em plano laboratorial. O escalonamento da produção considera as implicações práticas desse processo e de custos iniciais de equipamentos e matérias-primas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O objetivo geral do presente trabalho é executar o dimensionamento de uma planta piloto de testes mecânicos da produção de um material ativado alcalinamente de composição conhecida, desenvolvido à base de escória de alto-forno e com propriedades de resistência ao fogo.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Avaliar as propriedades da escória de alto-forno como matéria-prima para produção de um material ativado alcalinamente.
- Realizar o escalonamento dos dados do estudo.
- Elaborar um projeto da planta piloto da produção do material.
- Avaliar o projeto, os custos de equipamentos e matérias-primas a serem utilizadas no processo.
- Identificar questões ambientais e de segurança do processo.
- Realizar uma avaliação estratégica através de uma análise S.W.O.T.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Cimento Portland

##### 3.1.1 Composição e propriedades

O Cimento Portland, de acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), pode ser definido como um material com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que em contato com a água, adquire a formação de uma fase plástica com posterior endurecimento e aumento de sua resistência mecânica. Esse aglomerante hidráulico é obtido pela moagem de clínquer e adição de gesso, possuindo também variações nas porcentagens de escória de alto-forno, material pozolânico (matéria orgânica fossilizada ou rochas vulcânicas) e material carbonático (ZHANG, 2010).

O clínquer é resultado da calcinação de materiais calcários e argilosos, constituídos essencialmente de óxido de cálcio (CaO), popularmente conhecido como cal virgem, dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) e óxido de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), além de outros componentes em menores quantidades como óxido férrico e carbonato de magnésio. As diferentes variações em sua composição resultam em diferentes propriedades, dando origem às classificações do cimento do CP-I ao CP-V, existindo ainda as classificações pelo incremento de aditivos à massa e variações quanto às classes de resistências de 25, 32 e 40 MPa (FRANÇA, 2002).

As principais propriedades do cimento que caracterizam a sua aplicação em grande escala na construção civil, são a trabalhabilidade da massa, tempo de cura, resistência à compressão, impermeabilidade e a resistência aos agentes agressivos. Cimentos com adição de escória de alto-forno, por exemplo, adquirem maior durabilidade e resistência final, enquanto a incorporação de pozolânicos fornece maior impermeabilidade (ABCP, 2002; BYE; LIVESEY; STRUBLE, 2011).

Sabe-se que o concreto, material composto por cimento e agregados (brita, areia, cascalho), atende a diversas demandas de construções atualmente. Todavia, em situações de elevadas temperaturas, seus constituintes reagem de formas distintas, ocasionando perda de resistência mecânica, esfarelamento e fissuras nas estruturas, podendo levar à desintegração e rompimento do material (MORALES; CAMPOS; FAGANELLO, 2011). Dessa maneira, sua aplicação em edificações que necessitem de maior resistência ao fogo em casos de acidente, se torna limitada.

### *3.1.2 Normas de resistência ao fogo para edificações*

No contexto de estruturas submetidas a incêndios e à altas temperaturas, segundo o Corpo de Bombeiros, elementos estruturais devem suportar determinada carga durante um incêndio para que seja possível a retirada dos ocupantes do local, a execução das operações de combate ao incêndio e a minimização dos danos causados à edificação (CBMMG, 2005). Para isso, existem as normas técnicas como a NBR 14432:2001, atualizada em 2011, que trata das exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos e a NBR 15200:2012 que aborda o dimensionamento das estruturas de concreto atendendo às exigências da NBR 14432:2001. Outra norma relevante para a construção civil é a NBR 14323:2013, que especifica os requisitos para projetos de estruturas de aço e mistas de concreto em casos de incêndio de edificações cobertas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015).

O incêndio em construções é um evento destrutivo governado por fatores como tempo de exposição e o aumento de temperatura. Na fase intermediária do incêndio, momento em que as estruturas de concreto sofrem maiores danos e perda de resistência mecânica, a temperatura usualmente está acima de 300 °C. Segundo estudos, o descolamento de placas de concreto em condição de incêndio, ocorre com 30 minutos à exposição de temperaturas, que variam entre 250 °C e 400 °C (MORALES; CAMPOS; FAGANELLO, 2011). Dessa maneira, se torna relevante o estudo de novos substituintes do cimento e do concreto que possibilitem agregação de maior resistência ao fogo, tornando viável a segurança de locais com maiores riscos de danos, principalmente quando se trata de áreas industriais com alturas superiores à 23 metros e em setores como o de produção de cereais, farinhas, tintas e solventes (chegam a possuir carga de incêndio de 4.000 MJ/m<sup>2</sup>) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011).

Sendo assim, em busca do desenvolvimento de novas tecnologias, os materiais ativados alcalinamente se tornaram uma alternativa promissora para aplicação. Estudos realizados até o presente momento, revelam que esses materiais submetidos a elevadas temperaturas são capazes de manter suas propriedades mecânicas apesar da redução do seu conteúdo de água. Além disso, não liberam fumos ou degradam com a queima (PINTO, 2006).

## 3.2 Geopolímero <sup>1</sup>

### 3.2.1 Conceito e propriedades

Atualmente, a transformação de resíduos industriais está em constante estudo. Dentre esses materiais, é possível destacar aqueles que possuem sílica e alumina em suas composições, como os subprodutos gerados nas indústrias de cimento, mineração e siderúrgicas, por exemplo. Teoricamente, qualquer material composto por essas duas substâncias, podem ser ativados alcalinamente. Dentro dessa classe de materiais ativados alcalinamente, tem-se o geopolímero (ABDEL-GHANI; ELSAYED; ABDELMOIED, 2018).

O geopolímero foi inicialmente definido por Joseph Davidovits por volta dos anos 70 como uma classe de materiais sólidos obtidos por meio de uma polimerização inorgânica alcalina de materiais ricos em aluminossilicatos (ANDRADE; HOUMARD; AGUIAR, 2019). Davidovits foi quem utilizou pela primeira vez o termo “geopolímero”, adotando também a terminologia “polissialatos”, sendo essa, abreviatura de poli-silico-aluminatos (LIVI, 2013).

Existem estudos que apontam ter sido encontrado geopolímero nas pirâmides Egípcias, no Coliseu e no Panteão em Roma, demonstrando a resistência que esse material exibe ao longo dos anos (VAZ, 2011). No Brasil, os estudos sobre o geopolímero são recentes, sendo eles, pouco explorados. Em sua maioria abordam a utilização de rejeitos de mineração, escórias de alto-forno e cinzas pesadas de procedências diversas como material de partida para a obtenção do geopolímero (LIVI, 2013).

O geopolímero possui várias aplicações em diferentes áreas, sendo a principal delas, como um material complementar ao cimento Portland, com o diferencial de apresentar benefícios ambientais e de características mecânicas do material (SANTA, 2012). Nos primeiros anos de vida útil, os geopolímeros tendem a ter altas resistências à compressão, à ataques ácidos e à elevadas temperaturas. Ademais, possuem baixa condutividade térmica e permeabilidade, deixando ainda mais amplas as possibilidades de aplicação do material (LIVI, 2013).

Davidovits dividiu os geopolímeros em três classes de acordo com suas estruturas tridimensionais amorfas a semicristalinas, que se baseiam em uma rede de tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e

---

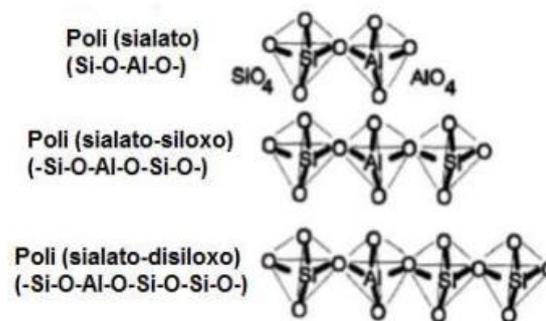
<sup>1</sup> A distinção da nomenclatura entre “materiais ativados alcalinamente” e “geopolímeros” gera controvérsias na literatura. Segundo a classificação do professor Joseph Davidovits, os ligantes ativados por álcali que possuem percentual de cálcio em sua composição, se distinguem dos materiais geopoliméricos. Entretanto, devido às semelhantes propriedades, o material tratado neste trabalho terá em seu referencial abordado o termo como geopolímero (MOTORWALA *et al.*, 2016).

$AlO_4$  ligados entre si por um átomo de oxigênio (Figura 1) (ANDRADE, HOUMARD; AGUIAR, 2019). Além disso, para ele, os geopolímeros não possuem composição estequiométrica, mas podem ser descritos por uma fórmula empírica (Equação 1), sendo que, sua geopolimerização é análoga à das zeólitas (minerais que possuem estrutura porosa) (DAVIDOVITS; DAVIDOVICS, 1991).

$$M_n [-(SiO_2)_z - Al_2O_3]_n \cdot w H_2O \quad (1)$$

Onde, M é o metal alcalino ou alcalino-terroso,  $n$  é o grau de polimerização,  $w$  é o número de moléculas de água e  $z$  pode ter valores entre 1 e 3.

**Figura 1 – Estrutura tridimensional dos polissilatos**



Fonte: Andrade, Houmard e Aguiar (2019).

### 3.2.2 Mecanismos de ativação

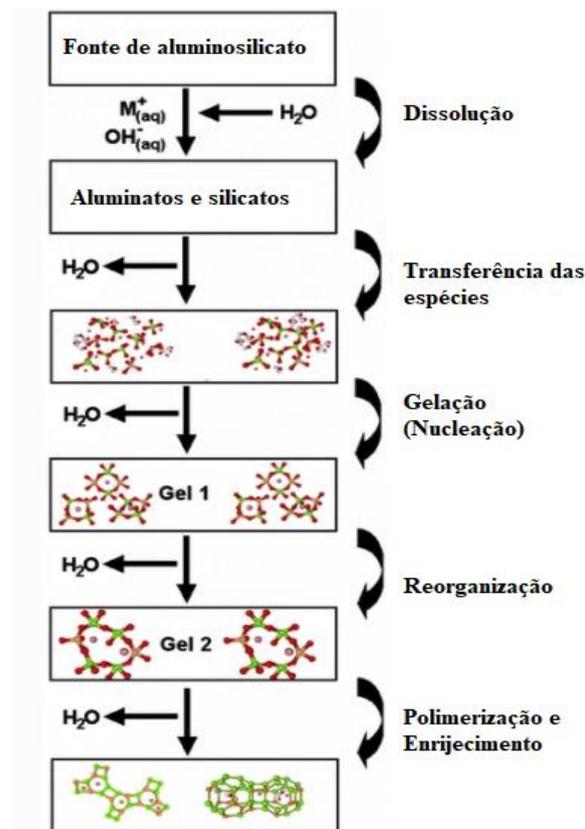
A geopolimerização inorgânica é feita em cinco etapas, sendo elas, dissolução, transferências das espécies, gelação (nucleação), reorganização e, polimerização e enrijecimento (Figura 2). O processo é essencialmente exotérmico em função da elevada alcalinidade do meio (DUXSON *et al.*, 2007).

A primeira etapa é realizar uma ativação alcalina. É através da elevada alcalinidade que ocorre a dissolução do silício e do alumínio por hidrólise das partículas. Depois dessa etapa, uma mistura de silicatos, aluminatos e aluminossilicatos é gerada em forma de gel após ser submetida à certa concentração. Essa transferência das espécies é denominada gelação ou nucleação (LIVI, 2013). Por fim, irá ocorrer a reorganização do sistema caracterizado pela formação de uma rede tridimensional de aluminossilicatos (DUXSON *et al.*, 2007). A estrutura é então condensada (etapa de polimerização e enrijecimento), formando um material cimentício (LIVI, 2013).

É importante ressaltar que a água é apenas o meio reacional na etapa de dissolução e é

liberada nas demais. Sendo assim, torna-se necessário uma análise das variáveis que influenciam as propriedades do material, como temperatura e a concentração da solução alcalina, capaz de alterar a viscosidade da solução. Estudos mostram, por exemplo, que o excesso de íons  $\text{OH}^-$  no meio pode diminuir a resistência mecânica do material final (PALOMO; GRUTZECK; BLANCO, 1999).

**Figura 2 – Modelo conceitual para a geopolimerização**



Fonte: Adaptado de Duxson *et al.* (2007).

### 3.2.3 Ativadores alcalinos

Dentre os materiais necessários para a produção de um geopolímero, os ativadores alcalinos (soluções alcalinas de alta concentração) são essenciais. Sua função, como referenciado no item 3.2.2, é reagir com aluminossilicatos, produzindo assim uma estrutura condensada e endurecida (VASSALO, 2013; VAZ, 2011). Basicamente, esse é um processo em que, por meio de um ambiente fortemente alcalino, constituintes de aluminossilicatos (sílica e alumina) reagem entre si e se organizam em uma estrutura com baixa presença de cálcio e que gera grande resistência mecânica, o que compõe o geopolímero (PINTO, 2006).

Segundo Palomo, Grutzeck e Blanco (1999), em relação ao fenômeno da ativação, um ponto muito importante é a concentração da solução alcalina. Essa solução geralmente é de NaOH ou KOH, sendo o NaOH a uma concentração de 12M mais reativa, com uma ativação mais rápida e que gera um material com valores de resistência maiores, do que se usado KOH a 18M. Segundo o autor, a ativação com KOH 18 M apresenta efeitos adversos que interferem no processo devido à alta concentração de  $\text{OH}^-$  no meio, quando comparada ao NaOH 12 M, o que gera uma menor resistência mecânica no material formado. Ademais, destaca-se o fato de que o KOH apresenta um preço consideravelmente mais alto do que o preço do NaOH. Segundo o laboratório Meta Química, de Santa Catarina, o preço de 1 kg de hidróxido de potássio PA chega a ser duas vezes mais caro do que o preço de 1 kg de hidróxido de sódio PA. Além disso, aponta-se o fato de que ativações alcalinas contendo silicatos solúveis, como silicato de sódio ou silicato de potássio, ocorrem em taxas mais rápidas, desenvolvendo mais rapidamente uma resistência mecânica do que em um sistema contendo somente hidróxidos.

### 3.2.4 Escória de alto-forno

Dentre as possíveis fontes de aluminossilicatos para a produção de um material ativado alcalinamente, vários subprodutos industriais têm sido estudados e, entre eles, a escória de alto-forno se apresenta como uma possível opção. Ela é formada durante o processo de produção de ferro gusa em um alto-forno, no qual uma carga de minério de ferro desce ao longo da coluna e gases resultantes da queima de combustível sobem em contra corrente, gerando ferro gusa líquido, escória, gás de alto-forno e poeira. Então, a escória de alto-forno é o resultado da fusão de óxidos provenientes do minério de ferro, fundentes (calcário e dolomita) e de combustível, que ao atingirem altas temperaturas, reagem entre si, formando esse material (JÚNIOR, 2007).

De acordo com o resfriamento da escória, obtém-se dois subprodutos distintos: o primeiro, a escória cristalizada de alto-forno (ECAAF), e a granulada (EGAF). Os principais constituintes da escória de alto-forno são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Ao sair do alto-forno, a escória se encontra no estado líquido, na forma de um sobrenadante. Se o seu resfriamento for feito em velocidade elevada, processo chamado de granulação, a escória vai se solidificando e formando uma estrutura vítrea, sem uma organização simétrica cristalina. Sendo assim, essa EGAF apresenta potencial reatividade para uma ativação alcalina e então, para a produção de um material ativado alcalinamente (JÚNIOR, 2007; BRITO, 2018). Por outro lado, a escória líquida resfriada livremente (ECAAF) passa por um processo lento e natural de cristalização, não adquirindo propriedades de aglomerante hidráulico (ArcelorMittal, 2021).

Sobre a sua aplicação em materiais ativados alcalinamente, por ser uma fonte de aluminossilicatos, a escória de alto-forno é uma opção que vem sendo muito avaliada e aplicada para formar esse tipo de produto. Estudos apontam que é possível produzir materiais à base de escória de alto-forno em tempo curto, devido à presença de maior teor de óxido de cálcio (CaO), em temperatura ambiente. Além disso, esse material pode ser armazenado por um longo período, sem a sua reatividade se alterar a ponto de afetar significativamente o desempenho do produto final. Isso se deve ao fato de, por ser um material essencialmente amorfo, a perda de reatividade da escória não afeta de forma significativa a ativação alcalina, caso que não ocorre com o cimento Portland (BRITO, 2018).

Um dos fatores que devem ser observados quando utiliza-se a EGAF para produção de material ativado alcalinamente é a redução da porosidade aparente do material, o que favorece o aumento da resistência mecânica do produto final. Por outro lado, deve ser destacada uma especial atenção para a trabalhabilidade da massa, que se reduz devido ao aumento do teor de CaO e à redução do tempo de pega (KRETZER, 2020).

### 3.2.5 Vantagens do geopolímero

As estruturas geopoliméricas apresentam diversas vantagens que têm aumentado o incentivo à sua pesquisa e produção nas últimas décadas. Em primeiro lugar, um fator de grande interesse é a alta resistência mecânica, resistência ao ataque ácido e resistência ao fogo que o geopolímero possui. Somado a isso, esse material apresenta um endurecimento e tempo de cura rápidos, facilidade de moldagem e uma adesão interessante a substratos de vidro, aço, cimento e materiais cerâmicos (VAZ, 2011; GUIMARÃES *et al.*, 2018).

Além disso, o geopolímero apresenta benefícios ambientais como o fato de comportar bem em sua estrutura a presença de materiais residuais de outros processos da indústria, como por exemplo, escória de alto-forno, cinzas volantes, metacaulinita e rejeito de mineração. Sendo assim, ele se apresenta como uma destinação interessante para esses tipos de materiais (VAZ, 2011; GUIMARÃES *et al.*, 2018).

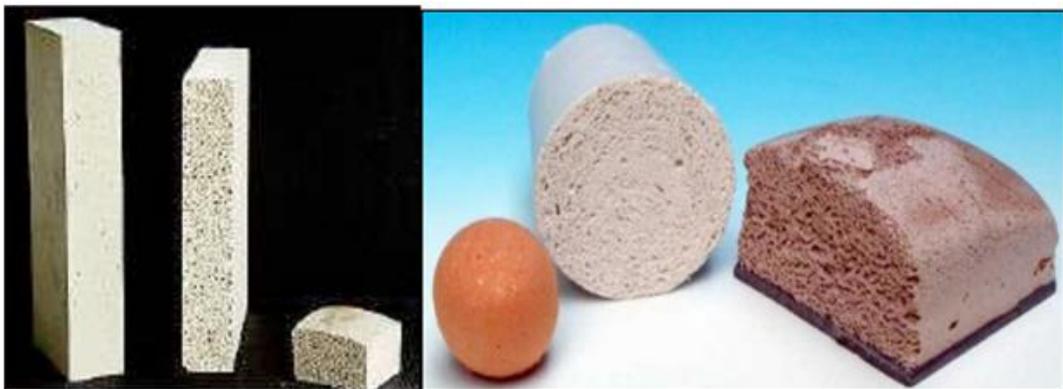
Ainda em relação ao seu impacto ambiental, analisando o seu ciclo de vida completo, o geopolímero se iguala em impacto ambiental com o cimento, devido aos efeitos pesados ao meio ambiente que a produção de silicato de sódio (parte da solução ativadora do processo) apresenta. No entanto, por precisar de menos silicato de sódio em sua produção, geopolímeros a base de cinzas volantes e escória granulada de alto-forno são menos poluentes do que os geopolímeros a base de metacaulinita, por exemplo (VAZ, 2011).

### 3.2.6 Possíveis aplicações

Apesar do campo de atuação do geopolímero ainda ser limitado por ser uma tecnologia recente, esse material já apresenta algumas aplicações ao redor do mundo. Sua atuação tem maior presença em países desenvolvidos, como por exemplo no Canadá, Austrália e países europeus, nos quais seu uso como concreto geopolimérico já vem sendo utilizado para reparações de rodovias, painéis pré-fabricados de edificações, blocos, refratários, obras de infraestrutura, entre outros (VASSALO, 2013; VAZ, 2011).

Além disso, materiais geopoliméricos com propriedades específicas vêm se tornando um interesse no setor de construção. Alguns exemplos dessas aplicações são geopolímeros resistentes ao fogo, como aqueles que mantêm as suas propriedades em temperaturas superiores a 400 °C, ao contrário dos cimentos tradicionais que perdem sua integridade estrutural, assim como os geopolímeros isolantes térmicos para produção de painéis (Figura 3) e revestimentos resistentes à altas temperaturas. Tais materiais podem ser utilizados, por exemplo, em aviões comerciais, plataformas marinhas e de transporte terrestre, além de construções industriais contendo materiais inflamáveis, dos quais uma estrutura com resistência ao calor é fundamental (VASSALO, 2013; VAZ, 2011).

**Figura 3 – Geopolímero expandido para produção de painéis isolantes térmicos**



Fonte: Davidovits (2002).

Outros estudos e aplicações interessantes do geopolímero são apontados pela empresa Geo-Pol (2013). Um exemplo citado se encontra na China, onde já existem indústrias fabricando painéis para fachada corta-fogo. Nos Estados Unidos, na década de 90, foram produzidos ladrilhos para pavimentação a partir de geopolímeros, utilizando escória de aciaria. Outro estudo também apontado pela Geo-Pol a se destacar foi publicado na Suécia em 2012,

sobre a confecção de uma pílula à base de geopolímero, para administração oral de drogas potentes. Isso se torna possível, pois sendo o geopolímero resistente ao ataque ácido, ele demora a ser digerido no corpo humano, e sendo microporoso, libera as drogas lentamente no sistema, tornando-se uma aplicação interessante desse material.

### **3.3 Escalonamento de Processos**

O processo de criação de um novo produto passa por diversas etapas, como a construção da ideia, o desenvolvimento do material e do processo em escala laboratorial, seguido pelo dimensionado e execução da planta piloto, para que seja possível levantar pontos de fragilidade e inviabilidade, seguido das devidas correções e ajustes. Essas etapas são definidas como o escalonamento da tecnologia que levam à viabilidade do processo produtivo (SILVA *et al.*, 2019).

#### *3.3.1 Planta Piloto*

Uma planta piloto tem como característica principal ser uma planta de teste com uma escala superior aos testes realizados em laboratórios. Quando aumenta-se a quantidade produzida, aspectos de engenharia relacionados à transferência de massa e de energia, assim como o fluxo de matérias-primas, dimensão de equipamentos e movimentação de cargas, modificam-se e imprevistos que não acontecem no laboratório podem ocorrer na indústria. Por esse motivo, é de suma importância a instalação de uma planta na escala piloto antes de iniciar as produções industriais, já que, ela é essencialmente uma planta de testes com uma produção final em maior quantidade em relação ao laboratório. É na fase piloto que se tem também o desenvolvimento de tecnologias necessárias para a indústria (SILVA *et al.*, 2019).

De modo geral, as tecnologias devem ser desenvolvidas, avaliadas e enquadradas de forma técnica para se obter uma classificação em níveis de maturidade. A EMBRAPA (2018) utiliza da escala TRL (Technology Readiness Levels, em tradução livre Nível de Preparação da Tecnologia) que divide os níveis de 1 à 9, como mostra o Quadro 1. A partir da análise e definição do nível em que um projeto se encontra, é possível avançar para as próximas etapas.

**Quadro 1 – Classificação dos níveis de maturidade pelo sistema TRL**

Nível	Descrição
1	Princípios básicos observados e reportados.
2	Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada.
3	Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica ou experimental.
4	Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais básicos de laboratório.
5	Validação em ambiente relevante de componentes ou arranjos experimentais com configurações físicas finais.
6	Modelo do sistema/subsistema protótipo de demonstrador em ambiente relevante. A tecnologia está em fase de teste sem alcançar a escala final.
7	Protótipo do demonstrador do sistema em ambiente operacional.
8	Sistema totalmente completo, testado, qualificado e demonstrado.
9	Sistema já operado em todas as condições, extensão e alcance.

**Fonte: Adaptada de EMBRAPA (2018).**

De acordo com o Guia Prático de Escalonamento de Tecnologias (2019), a planta piloto é a última etapa do escalonamento e simula condições de um conjunto de sistemas que sejam suficientemente próximos à execução do processo em uma planta industrial. A produção nesta etapa ainda é reduzida, porém não a descaracteriza em relação às condições da indústria, pois é a partir dela que se analisa os riscos de engenharia envolvidos no processo.

Inicialmente, a avaliação da capacidade produtiva é de grande importância para a determinação da quantidade máxima de produto que a planta pode produzir, visando a diminuição de desperdícios. Além disso, essa avaliação também leva em consideração a disponibilidade financeira e de matérias-primas e o tamanho do mercado atual (SILVA *et al.*, 2019; ROSA, 2013).

Apesar de ser ainda uma etapa de desenvolvimento, a planta piloto busca validar e entender a escala industrial, definindo parâmetros, equipamentos e custos operacionais, sendo necessário traçar os seus projetos conceitual e básico antes da sua execução em campo. Além disso, inclui-se nesta etapa a logística do processo e identificação dos seus pontos críticos, como questões ambientais e de segurança. Por fim, áreas de estocagem dos materiais e os rejeitos gerados no processo são também projetados e, na maioria dos casos, a quantidade de projeção para a escala varia de quilogramas à centenas de quilos, podendo ser definido na fase de preparo (projeto) da planta (EMBRAPA, 2018; SILVA *et al.*, 2019).

### 3.3.2 Projeto Conceitual e Básico

Apresentando como ponto inicial um projeto de *layout*, o projeto conceitual é a primeira etapa do escalonamento de uma planta piloto, em que se garante o melhor funcionamento e desempenho da empresa a partir da avaliação das operações unitárias envolvidas no processo. Ele pode ser definido como o procedimento no qual é realizado o planejamento do sistema produtivo, englobando a parte física da planta e sua operacionalidade, sendo analisada a administração, a parte comercial, o controle de qualidade do processo e os dados técnicos dos equipamentos necessários. Além disso, é avaliado o impacto que as atividades terão no desempenho da produção a longo prazo, visando o cumprimento dos objetivos planejados (BRASIL *et al.*, [2012]; SILVA, 2019; PAULEK, 2017).

Desse modo, segundo Silva *et al.* (2019), os pontos que englobam um projeto conceitual e básico são: o *layout* (arranjo físico da planta), os processos operacionais e a avaliação ambiental e de segurança do processo. Esses são importantes pontos para a organização e desempenho da planta piloto e que serão descritos a seguir.

#### 3.3.2.1 Layout

O *layout* pode ser definido como arranjar ou rearranjar a melhor disposição de um ambiente fabril, de modo a, otimizar a utilização do local e a logística relacionada à disposição de equipamentos, materiais e pessoas (MUTHER, 1978). Existem muitos tipos de métodos de planejamento de *layout*, sendo o mais comum entre eles o sistema SLP (*Systematic Layout Planning*), que é composto por quatro fases centrais para o planejamento de um arranjo físico. São elas a localização da área onde será instalada a planta, como a primeira fase, a segunda fase é o arranjo físico geral que estabelece a interrelação através de um macro *layout*, a terceira é o arranjo físico detalhado que tem como foco central a disposição dos equipamentos e máquinas a serem utilizados e por fim, a implantação como a quarta fase, no qual planeja-se a concretização do projeto e a instalação da planta (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2002).

Para melhor entendimento do processo em geral, é importante a realização de um fluxo macro de matérias, juntamente com um diagrama de fluxo e o diagrama de relacionamentos, conforme a Tabela 1, através de uma “carta de interligações preferenciais”, com a identificação por meio de letras das áreas relacionadas, de modo a integrar os serviços de produção e a relação entre as atividades, posicionando-as de maneira eficiente. Com isso, é possível ver de forma simples e geral como o processo de produção e sua logística é dispostos na planta. Além disso,

é possível prever quais serão as movimentações de materiais e suas cargas, e prevenir deslocamentos muito longos de materiais mais pesados, que podem causar acidentes ou ser prejudicial para os operadores e para o funcionamento do processo (ANDRES, 2003).

**Tabela 1 – Legenda dos critérios de relacionamentos**

A	Absolutamente necessário
E	Muito importante
I	Importante
O	Pouco importante
U	Desprezível
X	Indesejável

**Fonte: Adaptado de Andres (2003).**

### 3.3.2.2 Processos operacionais

Em seguida, os processos operacionais se referem à execução das atividades da planta, sendo identificados os procedimentos que serão realizados, os materiais e equipamentos necessários e as suas especificações técnicas. Basicamente, é a descrição de cada etapa das atividades da planta, desde o recebimento da matéria-prima, à fabricação do produto, até a venda da mercadoria ou prestação de serviço (SILVA *et al.*, 2019).

Outro aspecto importante nesta fase do processo de desenvolvimento, é a quantificação, pesquisa dos custos e disponibilidade da matéria-prima no mercado diante dos fornecedores para ser possível a realização de uma estimativa básica do operacional da planta (SILVA *et al.*, 2019). Além disso, é importante destacar aspectos ambientais e de segurança do processo baseados na FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos) dos produtos químicos utilizados. A ficha é elaborada em conformidade com a Norma Técnica NBR-14.725 da ABNT e contém informações como identificação do produto, medidas de segurança, riscos ao fogo, propriedades físico-químicas, informações ecotoxicológicas e dados gerais, além de aspectos ambientais como informações de neutralização e disposição final, demanda bioquímica de oxigênio, dentre outras (ABTLP, 2021). Desse modo, é possível adotar métodos de manuseio e estocagem dos materiais de forma a atuar de maneira preventiva.

### 3.4 Avaliação Estratégica

Existem várias metodologias para o desenvolvimento de um planejamento estratégico, sendo que todas visam a definição dos objetivos estratégicos. Contudo, uma ferramenta clássica na administração é a análise S.W.O.T., um instrumento fácil que objetiva identificar os pontos fortes e fracos do projeto, a fim de melhorar a sua eficiência e competitividade, reparando as falhas encontradas (NAKAGAWA, 2015).

Segundo Nakagawa (2015), a análise S.W.O.T. pode ser empregada de várias maneiras, podendo ser utilizada como caráter de autoconhecimento, análise contextual e como guia para determinação de um plano de ação. A sigla S.W.O.T. vem da língua inglesa para *Strengths* (Forças), *Weaknesses* (Fraquezas), *Opportunities* (Oportunidades) e *Threats* (Ameaças). Com base na tradução da sigla do inglês para o português, S.W.O.T. se transformou em F.O.F.A., que é um acrônimo para Forças, Oportunidades, Fraquezas e Ameaças.

A análise F.O.F.A. engloba os aspectos favoráveis e desfavoráveis do projeto, dos empreendedores e do mercado. Nakagawa (2015), afirma que a ferramenta Matriz F.O.F.A. é razoavelmente simples, sendo que a parte mais dificultosa é a identificação dos reais pontos negativos e positivos da organização em si e as mais relevantes oportunidades e ameaças no ambiente competitivo no qual o negócio está inserido.

## 4 METODOLOGIA

Para a realização do projeto do dimensionamento da planta piloto de testes de um material ativado alcalinamente com resistência ao fogo, a partir da escória de alto-forno, foram analisadas e implementadas diferentes etapas de construção dessa planta. Essas etapas são apresentadas a seguir: o escalonamento da planta, com o dimensionamento da tecnologia do plano laboratorial para um plano macro, a execução do projeto conceitual e básico, além do levantamento dos custos dos equipamentos e da matéria-prima e a identificação de questões ambientais e de segurança do processo. Como todo projeto novo a ser implantado trás desafios, é importante que seja feita também, uma avaliação estratégica do negócio, com o objetivo de analisar seus pontos positivos e negativos por meio de uma análise F.O.F.A. (S.W.O.T.).

### 4.1 Escalonamento do Processo

É na etapa de execução da planta piloto que os gargalos de engenharia do processo em análise se tornam evidentes, por isso é essencial observar uma maturidade adequada para que problemas relacionados às etapas laboratoriais não sejam o foco neste ponto. Sendo assim, é preciso escalonar os resultados já testados para que se adequem a um processo com condições suficientemente próximas à planta industrial.

Os dados utilizados para a produção do material ativado alcalinamente a partir de escória de alto-forno tomaram como base o artigo “Fire resistant properties of alumino silicate geopolymer cement mortars” desenvolvido na Índia e publicado em 2017. Os resultados encontrados para a produção do material foram satisfatórios para valores em massa das misturas em torno de 920,0 gramas. Dessa maneira, o projeto até esta etapa pode ser classificado com maturidade nível 5 segundo a classificação da EMBRAPA (2018), estando pronto para avançar à etapa 6 que prevê “Modelo do sistema/subsistema protótipo de demonstrador em ambiente relevante”, validando a etapa de projetos para escalonamento da planta piloto.

Outro ponto a ser destacado, segundo Saxena, Kumar e Singh (2017), ao realizar testes com diferentes bases (cinzas volantes, escória granulada de alto-forno e argila calcinada), para formar os materiais ativados alcalinamente resistentes ao fogo, os resultados foram muito promissores com uma base de escória de alto-forno. As resistências do material foram em torno de 45 MPa à 600 °C e 23 MPa a 800 °C, valores estes que deverão ser testados ao produzir o material na etapa de execução da planta piloto.

Sabendo que a próxima etapa são os projetos conceitual e básico, foi necessário estimar

a base de produção do material pela planta piloto, podendo variar de dezenas a milhares de quilogramas. Levando em consideração a capacidade produtiva definida, foram avaliados os seguintes aspectos: o tipo de produto, a disponibilidade de matéria-prima e o tamanho das instalações (SILVA *et al.*, 2019; ROSA, 2013). Além disso, vale ressaltar que o produto a ser fabricado na indústria consistirá em pré-moldados devido ao rápido tempo de secagem e cura do material.

O dimensionamento das quantidades de cada matéria-prima foi projetado pela produção mensal e de acordo com a proporção de 5:15:2:1 de escória de alto-forno, areia, silicato de sódio e hidróxido de sódio, respectivamente (SAXENA; KUMAR; SINGH, 2017). A Tabela 2 retirada do artigo base, fornece os percentuais mássicos da composição da escória de alto-forno utilizada, podendo encontrar algumas variações para a EGAF disponível no Brasil, pela modificação da região de produção, sendo este fator um ponto a ser avaliado na planta piloto.

**Tabela 2 – Composição da escória de alto-forno em percentual mássico**

Componentes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
% em massa	34,96	18,76	0,71	34,70	9,21	0,68

Fonte: Adaptado de Saxena, Kumar e Singh (2017).

#### 4.1.1 Projeto Conceitual e Básico

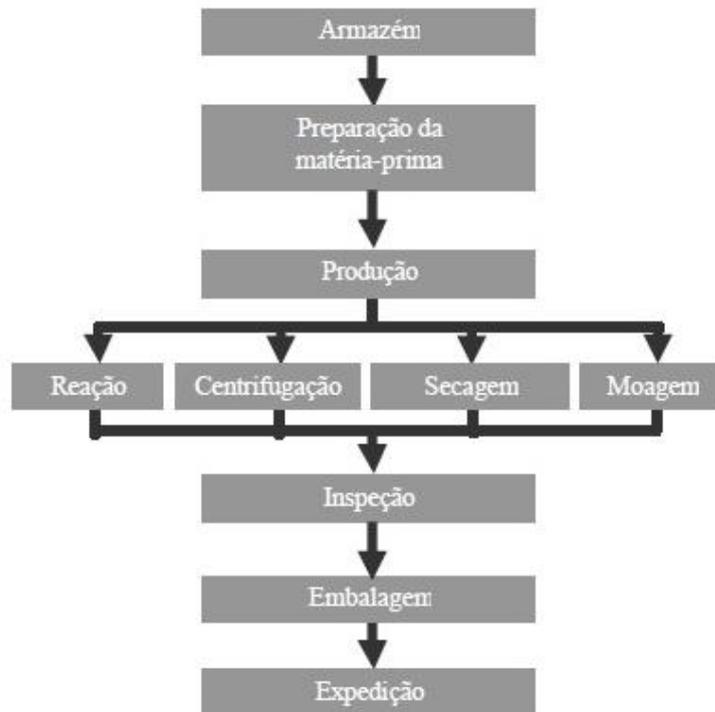
Após a definição dos fatores principais da planta piloto contidos no cálculo da capacidade produtiva e no escalonamento inicial das proporções do produto, foi realizado um projeto conceitual e básico de todo o sistema produtivo. Ele envolveu as etapas de: *layout*, processos operacionais e avaliação ambiental e de segurança tanto operacional quanto dos processos.

##### 4.1.1.1 Layout

Primeiramente, foi desenvolvido um *layout* da planta através do método SLP, no qual foram feitas apenas as fases 1 a 3. Não foi executada a fase 4 que é de implementação da planta. A fase 1 foi caracterizada por estimar a localização da área em que foi desenvolvido o arranjo físico. Já as fases 2 e 3, tratam da execução de um arranjo físico funcional por processo geral e detalhado, no qual foi estabelecido a localização individual das máquinas e equipamentos

utilizados, assim como a disposição geral da instalação, como a localização de corredores, armazéns, salas, banheiros e laboratórios. Ainda dentro deste tópico, está presente um fluxograma com o fluxo macro de materiais, modelo exemplo da Figura 4, e um diagrama de fluxo traçado diretamente sobre a planta, juntamente com o diagrama de relacionamentos.

**Figura 4 – Modelo de fluxo macro de materiais**

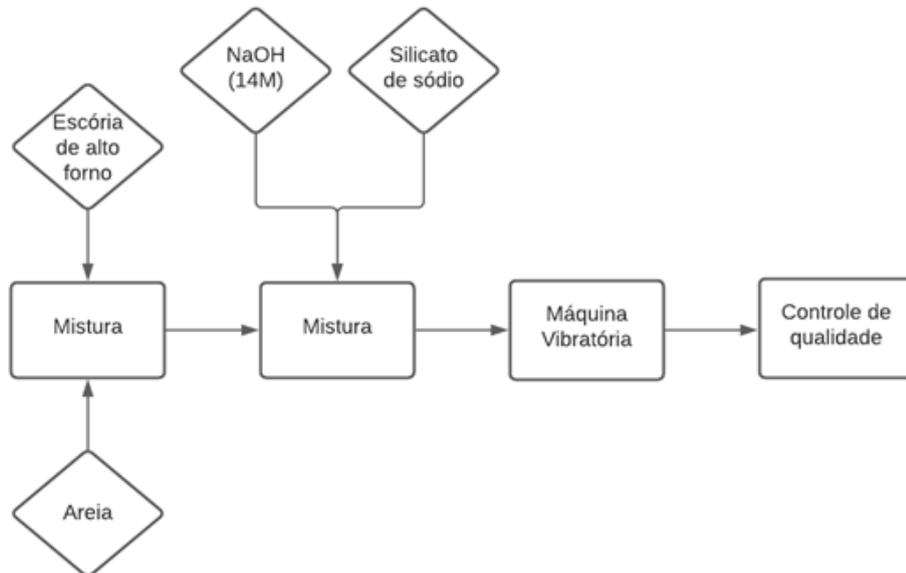


Fonte: Andres (2003).

#### 4.1.1.2 Processos operacionais

Com o intuito de exemplificar e especificar os componentes da planta após a produção do *layout*, foi preciso avaliar as etapas de equipamentos e matérias-primas. Por ser uma planta de caráter inovador, esses equipamentos foram analisados a partir do processo de produção do material em escala laboratorial, como descreve o diagrama de blocos da Figura 5.

**Figura 5 – Diagrama de blocos da produção do material ativado alcalinamente em escala laboratorial**



Fonte: Adaptado de Saxena, Kumar e Singh (2017).

Para uma melhor especificação dos processos, foi utilizado o memorial descritivo percorrendo o *layout* identificando os fluxos de pessoas, matérias-primas e processo de produção. Já os procedimentos para identificação das matérias-primas e equipamentos (laboratoriais, processos e auxiliares), foi esquematizado por meio de tabela com a identificação das cotações realizadas, assim como marca e dimensões seguindo o estimado para capacidade produtiva. Por fim, a análise consistiu na avaliação do custo básico inicial para investimento da planta.

#### 4.1.1.3 Avaliação ambiental e de segurança do processo

Como parte integrante do procedimento de uma planta piloto, a avaliação ambiental foi realizada por meio da identificação das legislações vigentes referentes a um processo produtivo em escala industrial, assim como a avaliação qualitativa de possíveis partes da planta que podem ser geradoras de resíduos ou rejeitos nocivos ao meio ambiente. Ao identificar esses pontos, foram avaliadas quais são as medidas necessárias para o tratamento de tais partes do processo.

Por fim, a análise de riscos e da segurança do processo foi avaliada. Foram realizadas recomendações para boa execução do processo como forma de engenharia preventiva, objetivando riscos de possíveis acidentes.

## 4.2 Avaliação Estratégica

Foi realizado um planejamento estratégico por meio de uma análise F.O.F.A (S.W.O.T), com o objetivo de identificar as Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças do projeto. A avaliação foi feita em quadrantes segundo o modelo de Sebrae (2013).

**Figura 6 – Quadro modelo para análise F.O.F.A.**

	<b>Fatores internos (controláveis)</b>	<b>Fatores externos (incontroláveis)</b>
<b>Pontos fortes</b>	<b>F</b> ORÇAS	<b>O</b> PORTUNIDADES
<b>Pontos fracos</b>	<b>F</b> RAQUEZAS	<b>A</b> MEAÇAS

Fonte: Sebrae (2013).

## 5 RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir do pressuposto e do artigo base para a produção do material ativado alcalinamente, as análises propostas foram executadas. Vale ressaltar que todos os dados visam o planejamento de engenharia de uma planta piloto. Testes para a produção em escala industrial serão prioridades na planta física, etapa posterior a este trabalho.

### 5.1 Escalonamento de Processos

A maturidade do processo está adequada para dar seguimento ao escalonamento da produção, já que foi alcançada uma situação ideal em termos de testes em laboratório e foram obtidos bons resultados segundo o estudo do artigo base do projeto, dos autores de Saxena, Kumar e Singh (2017). Além disso, a avaliação de que o material produzido em laboratório do artigo encontra-se em conformidade com as normas de resistência à temperatura, está presente no Apêndice A.

Para avaliar o material e suas propriedades, estima-se uma produção de cerca de 40 kg por batelada, com base no estudo de Muhammad Faheem *et al.* (2013). Levando em consideração a análise química da escória de alto-forno do material da Índia, é necessária a análise comparativa do material em relação à escória do Brasil, local do presente estudo. A ArcelorMittal, multinacional produtora de aço que atua na região, possui a geração da EGAF como um subproduto da produção de ferro gusa (MAIA, 2016). De acordo com o site da companhia, a escória gerada na Unidade de Tubarão (Espírito Santo), possui composição similar à descrita na Índia, como mostra a Tabela 3.

**Tabela 3 – Comparativo da escória de alto-forno (Brasil e Índia)**

Componentes	Índia % em massa	Brasil % em massa
SiO <sub>2</sub>	34,96	33,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,76	12,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,71	0,45
CaO	34,70	41,60
MgO	9,21	7,95

Fonte: Adaptado de Saxena, Kumar e Singh (2017).

Os valores mássicos de sílica e alumina presentes na amostra do Brasil apresentaram redução em 1,31% e 6,34%, respectivamente, se comparado ao valor do material de estudo na Índia. Já a presença de óxido de cálcio é acrescida em 6,9%, valor este que pode ser considerado uma alteração desfavorável em relação ao produto final, pois a presença elevada do teor de CaO é um dos problemas da utilização da escória de alto-forno como matéria-prima para a produção de material ativado alcalinamente (GEO-POL).

O fator de preocupação é devido ao aumento relativo da alcalinidade livre, criando os alcalis KOH e NaOH que não são absorvidos estruturalmente, podendo estar presentes na superfície do material e, conseqüentemente, gerar toxicidade no produto. Por outro lado, o material vem sendo estudado devido a suas propriedades de aumento de resistência no material ativado alcalinamente, principalmente nos primeiros anos após sua produção (HARDJITO; RANGAN, 2005).

Para testes iniciais de aplicação na planta piloto, observa-se relativa similaridade entre as matérias-primas. A avaliação dos efeitos adversos gerados no produto final necessitaria de análise em planta e possível ajuste com a inserção de metacaulim. Esse material calcinado é fonte de aluminossilicatos, amplamente utilizado para sintetizar materiais geopoliméricos (BRITO, 2018).

Uma proposta para esse ajuste com incremento de metacaulim (52% SiO<sub>2</sub>, 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 8% de impurezas) é a inserção de 16,5% em massa do novo aditivo para que as proporções da escória brasileira se aproxime da composição original da escória indiana (Apêndice B). Assim, as novas diferenças dos percentuais mássicos entre a escória do artigo base e a brasileira seriam: 1,95% de SiO<sub>2</sub>, 1,44% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,49% de CaO. Os novos percentuais se encontram na Tabela 4.

**Tabela 4 – Comparativo da escória de alto-forno: Índia e Brasil após adição de 16,5% de Metacaulim**

Componentes	Índia % em massa	Brasil % em massa
SiO <sub>2</sub>	34,96	36,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,76	17,32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,71	0,37
CaO	34,70	34,21
MgO	9,21	6,54

**Fonte: Próprio autor.**

### 5.1.1 Projeto Conceitual e Básico

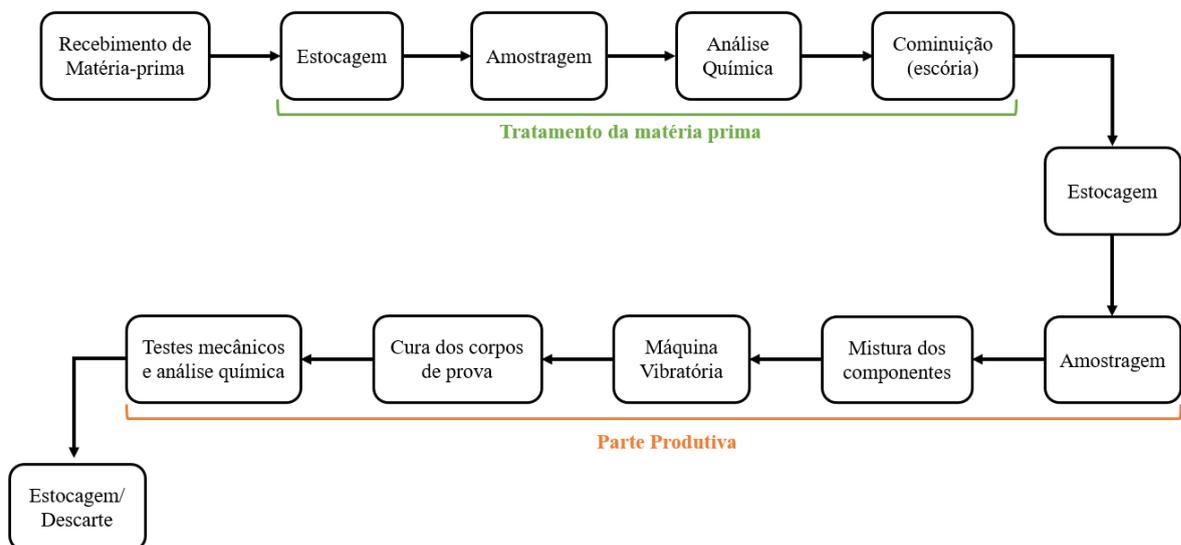
Visando um melhor desempenho e execução da planta foi realizado o seu projeto conceitual e básico. A seguir são descritas as etapas de: *layout*, capacidade produtiva e processos operacionais.

#### 5.1.1.1 Layout

O processo de definição do *layout* se iniciou na fase 1, de escolha de um local arbitrário de fácil acesso ao fornecimento da escória e próximo a uma região industrial. Baseado nisso foi definido que a planta piloto se encontrará em um parque industrial próximo à empresas fornecedoras de escória de alto-forno em Minas Gerais. Essa localização é estratégica para a utilização de seus serviços por outras indústrias da região, facilitando possíveis terceirizações. O endereço específico dependerá do investimento e da indústria interessada no projeto.

Em seguida, foram feitas as fases 2 e 3, de arranjo físico geral e detalhado da planta piloto, sendo definidas todas as interligações entre as partes da planta, além de sua disposição e infraestrutura geral. O processo de escolha do *layout* seguiu o método SLP, que contém a fase inicial de mapeamento do fluxograma dos processos (Figura 7). Em seguida, para melhor esclarecimento de cada área escolhida para a planta piloto, foi feita a descrição e suas respectivas finalidades (Quadro 2).

**Figura 7 – Fluxograma geral do processo**



Fonte: Próprio autor.

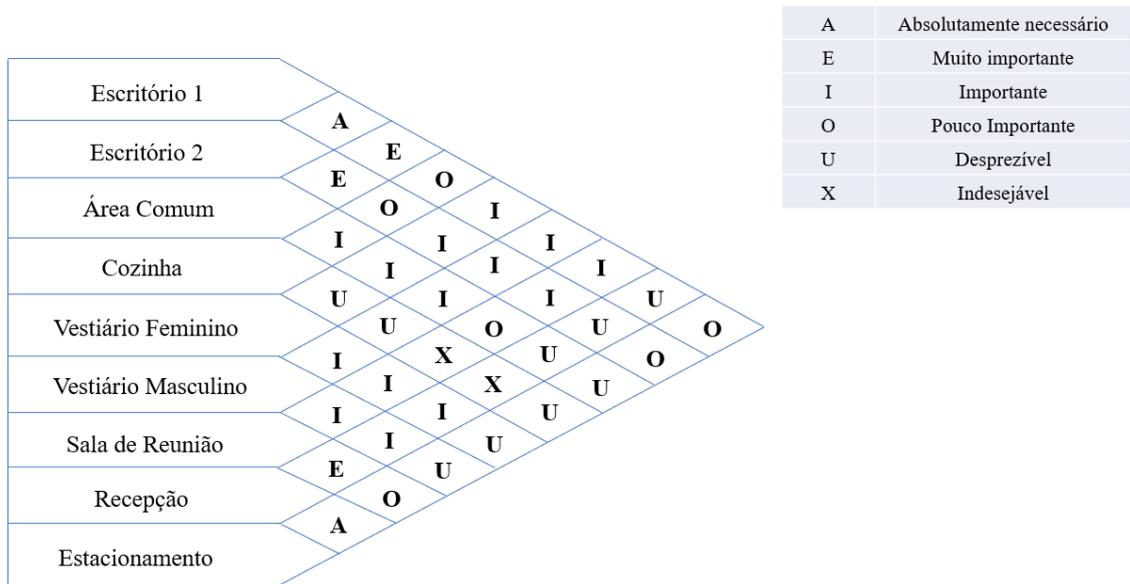
**Quadro 2 – Descrição das áreas da planta piloto e suas finalidades**

<b>Área</b>	<b>Finalidade</b>
Escritório 1	Resolução de questões administrativas
Escritório 2	Resolução de questões administrativas
Área comum	Área para confraternizações e pequenas reuniões
Cozinha	Alimentação
Vestiário Feminino	Necessidade básica
Vestiário Masculino	Necessidade básica
Sala de reunião	Reuniões da equipe e com possíveis clientes e fornecedores
Recepção	Recepção de clientes e entrada de funcionários
Estacionamento	Estacionamento de veículos dos funcionários e dos clientes
Laboratório de Análise Química e Granulométrica	Caracterização e análises diversas das matérias-primas
Laboratório de Equipamentos	Laboratório climatizado para utilização do DRX (Difratometria de raio-x) e FRX (Espectrômetro de fluorescência de raio-X)
Laboratório - Testes	Testes mecânicos com os corpos de prova produzidos
Área de Paramentação	Paramentação de EPI's (Equipamentos de Proteção Individual) para entrada da parte produtiva
Almoxarifado 1	Estocagem de matéria-prima
Almoxarifado 2	Estocagem de produtos de teste
Câmara úmida	Cura dos corpos de prova
Área de produção	Cominuição da matéria-prima e produção do material
Área de amostragem	Pesagem e amostragem das matérias-primas

**Fonte: Próprio autor.**

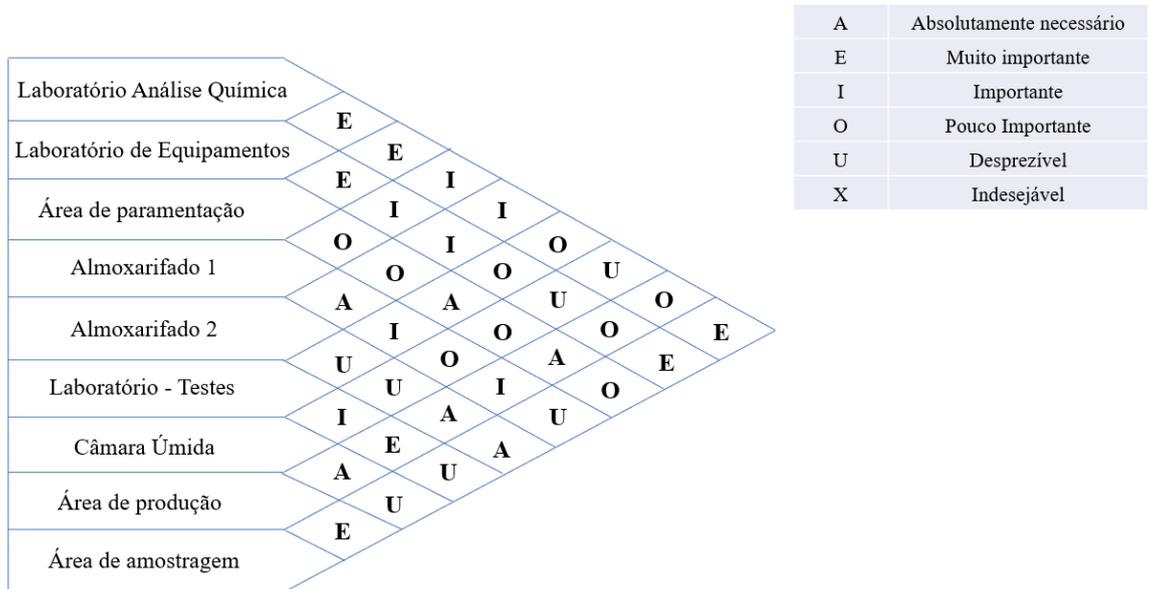
Definido o fluxograma geral da planta e as partes que compõem a sua estrutura, foi realizado em seguida a análise qualitativa dessas áreas definidas, por meio da carta de interligações preferenciais, para a definição dos relacionamentos e proximidades que as partes administrativas terão entre si (Figura 8) e para a definição das relações e proximidades entre as partes produtivas, laboratoriais e de armazenamento (Figura 9). Este procedimento seguiu o critério de relacionamentos tal como apresentado na Tabela 1 deste trabalho.

**Figura 8 – Carta de interligações preferenciais: parte administrativa da planta**



Fonte: Próprio autor.

**Figura 9 – Carta de interligações preferenciais: parte produtiva da planta**



Fonte: Próprio autor.

Alguns pontos a serem destacados nessa etapa é a definição de que as salas de laboratório se encontrarão próximas, assim como terão fácil acesso à parte de estoque da planta, para facilitar o fluxo de materiais. Além disso, foi definida uma área de paramentação de EPI's,

colocada em um local anterior à entrada na parte produtiva da planta, para garantir que todos que entrem na área de produção estejam adequadamente paramentados. Por fim, foi definido que a área administrativa e de acesso comum dos funcionários e clientes não terá um contato direto com as áreas laboratoriais e produtivas, para evitar possíveis acidentes de trabalho.

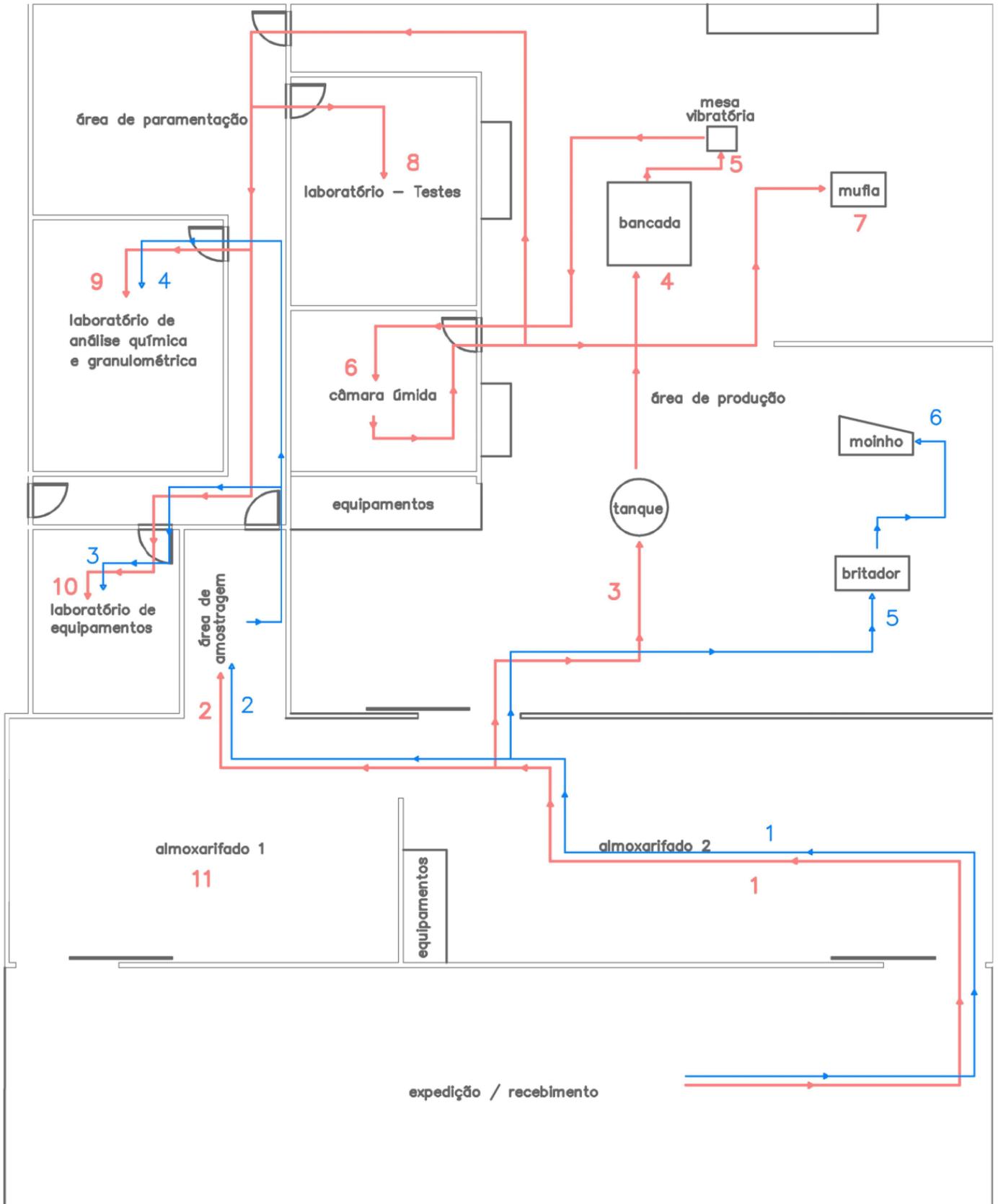
Sendo assim, após a realização de todas essas etapas de definições das áreas da planta e como elas relacionam entre si, é apresentado o *layout* final proposto para a planta piloto (Figura 10). Em seguida, é apresentado o seu mapeamento dos fluxos da matéria prima, desde a sua chegada, análise química, utilização na produção, até o seu descarte final (Figura 11).

**Figura 10 – Layout final proposto**



**Fonte: Próprio autor.**

Figura 11 – Mapofluxograma do layout



Fonte: Próprio autor.

### 5.1.1.2 Processos operacionais

Após a definição do *layout*, foi realizada a etapa de processos operacionais, que se descreve a seguir. Nesta parte do projeto foi desenvolvido o memorial descritivo da planta piloto, contendo os fluxos de pessoas e processos. Além disso, foram avaliados os equipamentos e matérias-primas, através da definição de fornecedores e de preços disponíveis no mercado.

#### 5.1.1.2.1 Memorial descritivo

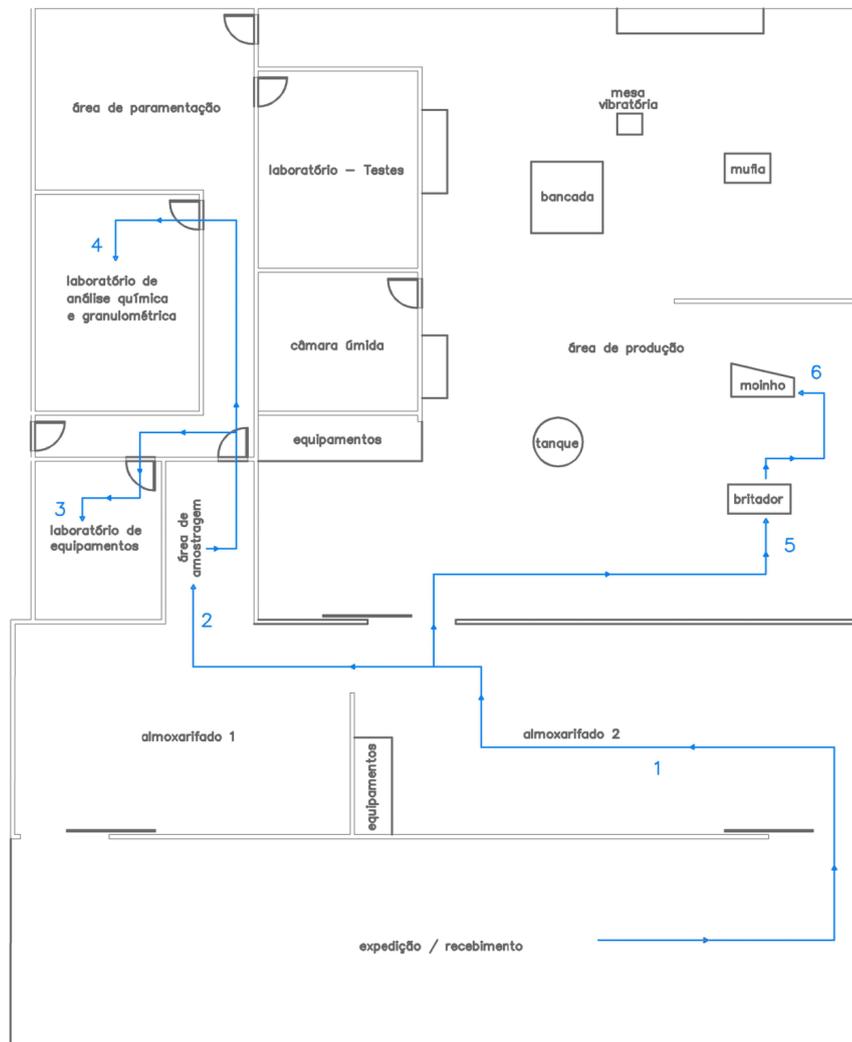
Inicialmente, o primeiro fluxo a ser abordado é o de pessoas que pode variar dentro da planta e, por isso, será apenas descrito e para melhor entendimento, é possível acompanhá-lo na Figura 10. O fluxo de pessoas trata da movimentação de funcionários e convidados da portaria às áreas de testes e de produção. Inicialmente estará disponível um estacionamento para entrada de veículos comuns e comunicação direta com a recepção. Obtendo autorização para entrar na planta, a pessoa poderá seguir para duas áreas distintas: área social ou planta piloto.

A área social possuirá dois escritórios, além de uma sala de reuniões, cozinha, vestiário e área comum para lanches e confraternizações. Seguindo para a planta piloto, é necessário encaminhar-se para a área de paramentação, na qual haverá armário com separação individual dos equipamentos de EPI's demandados e respectivos à cada área de atuação. Além disso, nessa região existirá estoque controlado de materiais como luvas, capacete, óculos de segurança, protetor auricular, entre outros. Lembrando que toda e qualquer pessoa que entre na área de testes e produção deverá estar devidamente paramentada para circular na região.

Para melhor controle químico dos processos e para aprovação da matéria-prima, assim como a posterior alteração da formulação do produto em casos necessários, todo material recebido deve passar por controle de qualidade das matérias-primas. O fluxo desse processo está representado pela linha azul na Figura 12.

Os caminhões recebidos desembarcam o material na área denominada "recebimento". São encaminhadas ao almoxarifado 2 para armazenamento e prosseguimento com a realização dos testes iniciais. Amostras serão retiradas na área de amostragem (linha 2) e em seguida encaminhadas aos respectivos testes necessários como: análise mineralógica (linha 3), química e granulométrica (linha 4). Para as matérias-primas que necessitem de cominuição, como pode ser o caso da EGAF, após a amostragem é preciso encaminhar à área de produção para passagem pelo circuito de britador e moinho (linhas 5 e 6). Com a aprovação da matéria-prima, ela estará liberada para testes do produto que devem ser programados entre pesquisadores na planta piloto.

**Figura 12 – Mapeamento do fluxo de matérias-primas**



**Fonte: Próprio autor.**

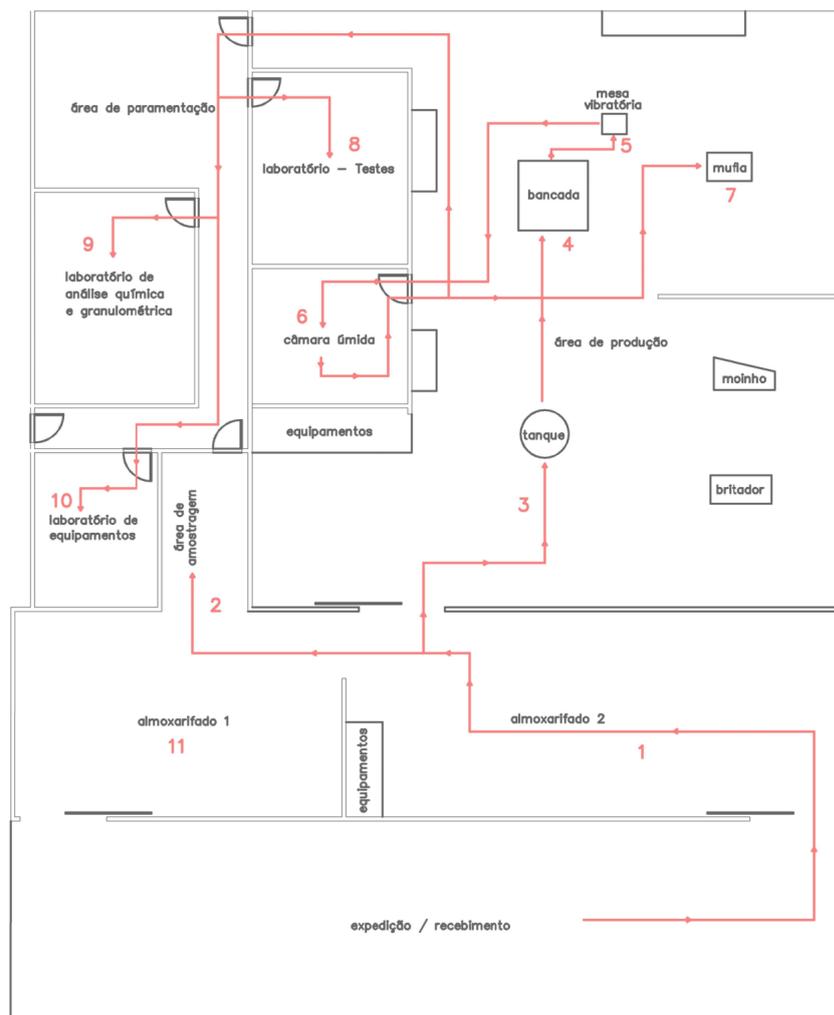
Com a regularização do material em estoque, o fluxo que se segue está representado pela linha vermelha na Figura 13. Saindo da área de estocagem (almoxarifado 2), as matérias-primas serão pesadas e separadas na área de amostragem (linhas 1 e 2), seguindo para a área produtiva da planta, na qual a redução da granulometria da matéria-prima será realizada. Em seguida, começará o processo de teste com utilização do tanque de mistura (linha 3). Caso algum material precise passar por secagem, deverá ser encaminhado para a estufa também presente nessa área.

A bancada auxiliar (linha 4) servirá para manuseio e fabricação dos corpos de prova, que podem necessitar da mesa vibratória para homogeneizar o material e promover a retirada de bolhas de ar (linha 5). Neste ponto, o produto passará pelo processo de cura na câmara úmida por prazo a ser definido na programação do teste e em seguida pode ser necessário o uso da mufla para secagem do produto (linhas 6 e 7).

Para casos de armazenamento provisório do produto, existem prateleiras nas laterais da área produtiva. Os testes laboratoriais posteriores nesta etapa dependerão da solicitação. Estarão disponíveis: testes físicos e mecânicos como RCTA e RFTA presentes no laboratório de testes (linha 8); análise química, granulométrica, densidade e porosidade (DMA/PA) nos laboratórios nas linhas 9 e 10, sendo o primeiro para preparo de bancada e o segundo para execução no equipamento que deve estar presente em ambiente climatizado. Por fim, ainda no laboratório de equipamentos (linha 10), poderá ser realizada a identificação das fases minerais contidas no produto através do teste de difratometria de raio-x (DRX).

Após realização dos testes, os materiais que precisarem ser armazenados devem ser encaminhados ao almoxarifado 1 (número 11). O descarte deverá ser realizado de forma seletiva em bags na região externa da planta não contida no *layout*, evitando possibilidade de contaminação posterior ao meio ambiente. Os caminhões para retirada do material descartado poderão estacionar na área de expedição.

**Figura 13 – Mapeamento do fluxo produtivo**



Fonte: Próprio autor.

### 5.1.1.2.2 Levantamento das matérias-primas

Para a fase de execução dos processos operacionais da planta piloto, foi realizado o levantamento das matérias primas necessárias, assim como as suas especificações técnicas e a cotação de preços desses materiais (Tabela 5), tomando como base os fornecedores tradicionais e preços vigentes no mês de maio de 2021. Além disso, foi colocada a proposta de adição de metacaulim na produção, como apresentado no Apêndice B.

**Tabela 5 – Proposta de matérias primas**

<b>Matéria-prima</b>	<b>Finalidade</b>	<b>Fornecedor</b>	<b>Especificações</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Cotação de preço</b>
Hidróxido de sódio	Ativação alcalina	Getex	Hidróxido de Sódio comercial - 99 %	50 kg	R\$ 342,50
Silicato de sódio	Ativação alcalina	New Química	Silicato de sódio líquido neutro	50 L	R\$ 1.395,00
Areia Fina	Agregado miúdo / Fonte de SiO <sub>2</sub>	PURA SÍLICA	Areia peneirada com granulometria abaixo de 5.52mm	Saco de 20 kg	R\$ 4,39
Metacaulim <sup>2</sup>	Aumento da durabilidade e resistência	TERRHA	Constituído principalmente por sílica e alumina	Saco de 20 kg	R\$ 60,00

**Fonte: Próprio autor.**

<sup>2</sup> O metacaulim é colocado como sugestão neste projeto, a fim de se aumentar os níveis de sílica e alumina, assim como reduzir os níveis de cálcio na mistura, considerando os percentuais mássicos. Além disso, é proposta a realização de testes com a utilização desse componente na própria planta, para avaliação de sua eficácia e utilização no material ativado alcalinamente. Ressalta-se o fato de que, segundo o professor Davidovits, o geopolímero de escória de alto-forno com a utilização de metacaulim em sua composição apresenta melhores resistências do que o material sem este aditivo.

Por meio da cotação realizada, foram escolhidos os fornecedores com melhor custo dentro dos padrões demandados para a produção. A EGAF poderá ser obtida através de sistema de doação, compra ou mesmo parcerias com empresas que desejam o melhor aproveitamento deste subproduto. Ele é comumente destinado à indústrias cimenteiras devido ao teor de óxido, mas o mercado possui alta demanda do produto primário (ferro-gusa) e, por isso, a obtenção da EGFA como matéria-prima é facilitada.

Através da proporção mássica de 5:15:2:1 de escória de alto-forno, areia, silicato de sódio e hidróxido de sódio, é possível determinar que a areia é a matéria-prima com maior demanda, se apresentando na proporção com o valor de 15. Entretanto, é também o de menor custo, podendo ser obtida por R\$ 4,39 o saco de 20 kg. Por outro lado, nota-se o elevado custo do silicato de sódio, fato este que advém da demanda do material na indústria de cosméticos, que possui alto retorno financeiro. Todavia, o produto de densidade 1,70 g/cm<sup>3</sup> (FISPQ Silicato de Sódio, 2011) é vendido em galões de 50 L e, de acordo com a proporção estabelecida do produto, seria utilizado apenas cerca de 1,77 L para produção de uma batelada de 35 kg total.

Sendo assim, para as quantidades fornecidas de compra no mercado e considerando a capacidade produtiva máxima de 40 kg por batelada, estima-se que o custo de investimento em matéria-prima de acordo com a formulação do artigo é inicialmente de R\$ 1.746,28. Este valor não contém a obtenção da EGAF e o custo de investimento no metacaulim para ajuste da composição de CaO. O total não seria acrescido significativamente para a produção de mais bateladas, mesmo com a compra de R\$ 60,00 por saco de 20 kg do metacaulim, já que seria necessária apenas a reposição da matéria-prima mais barata (areia). Vale ressaltar que os preços apresentados para as matérias-primas são de varejo, podendo futuramente ser feita uma cotação com preços de atacado, o que reduziria o valor deste investimento.

#### 5.1.1.2.3 Levantamento dos equipamentos

Na fase de execução dos processos operacionais da planta piloto, foi também realizado o levantamento dos equipamentos necessários, suas especificações técnicas e a cotação de preços desses materiais, também tomando como base os fornecedores tradicionais e preços vigentes e disponibilizados no mês de maio de 2021. A Tabela 6 apresenta a proposta de equipamentos referentes à parte produtiva da planta piloto, já a Tabela 7 apresenta a proposta de equipamentos da parte laboratorial e a Tabela 8 dos demais suprimentos operacionais necessários na planta.

Tabela 6 – Proposta de equipamentos para a planta piloto

Equipamento	Finalidade	Marca e modelo	Especificação técnica	Cotação de preço
Misturador de Argamassa Trifásico 	Balde plástico giratório para a mistura dos componentes do material ativado alcalinamente	FINITI MF - 40	Sistema de mistura composto por hélice e pá raspadora em aço.  Capacidade útil: 20 a 30 L (de acordo com a característica do material)	R\$ 5.500,00
Moinho de bolas 	Cominuição de materiais sólidos para moagem até 325 mesh	PAVITEST Tipo SONNEX BARRAS I-4205	Volume: 47 L interno com capacidade para até 14 kg/batelada  Acompanha: Carga de campos moedores e tampa em chapa dupla de aço 1045	Valor não disponibilizado
Britador de Rolos 	Cominuição de partículas para serem moídas posteriormente	Marca: Topsize	Rolos 250x152, abertura 1,0 a 16mm; 2 motores 220 v trifásico com gaveta para recolhimento de amostras e comando elétrico central	RS 47.800,00

<p>Máquina de Ensaios Mecânicos</p> 	<p>Realização de ensaios de tração, compressão, flexão, cisalhamento, entre outros</p>	<p>KRATOS SÉRIE KE</p>	<p>Capacidade: 10.000 kgf</p>	<p>Valor não disponibilizado</p>
<p>Forno Mufla Industrial</p> 	<p>Realização de ensaios de aquecimento dos corpos de prova</p>	<p>SANCHIS Fornos Industriais Modelo E</p>	<p>Temperatura: até 1200°C Dimensões: 600 x 600 x 900 (A x L x P) mm</p>	<p>R\$ 39.900,00</p>
<p>Mesa Vibratória</p> 	<p>Assentamento do material nos moldes, para retirada de possíveis bolhas</p>	<p>SEBASTIÃO DF</p>	<p>Dimensões: 80 x 50 cm Altura: 80 cm</p>	<p>R\$1.950,00</p>

<p>Balança industrial</p>  A photograph of a Toledo industrial platform scale. It features a large, flat, rectangular weighing platform supported by four legs. A vertical column rises from the center of the platform, topped with a digital display screen and a control panel.	<p>Balança eletrônica de bancada. Pesagem de materiais na planta</p>	<p>TOLEDO Ref.: 2099013</p>	<p>Capacidade: 300 Kg</p>	<p>R\$ 1.529,90</p>
---	--	---------------------------------	---------------------------	---------------------

Fonte: Próprio autor.

Com relação à cotação dos equipamentos da área produtiva, estima-se inicialmente o valor de R\$ 96.679,90 para investimento, ainda sem agregar os valores do moinho de bolas SONNEX e da prensa KRATOS. Por se tratarem de empresas com necessidade de cotação a longo prazo, não foi obtida resposta ábil. O valor inicial, por se tratar de uma planta é esperado e devem ser avaliados outros fatores mais específicos para aplicação como materiais resistentes à alcalinidade do meio, visando a durabilidade destes, mesmo com aumento do valor inicialmente.

Por outro lado, o produto ativado alcalinamente possui como principal propriedade a sua capacidade de resistir mecanicamente à elevadas temperaturas, por isso a sua viabilidade de aplicação em determinadas áreas da construção civil na qual a segurança é um dos requisitos primordiais em situações extremas. Para tal, é demandado o teste de resistência à compressão sob temperatura, como descrito pelo artigo base.

Equipamentos de compressão à temperatura ambiente (conhecido como teste de RCTA) são comuns em locais como universidades, centros de pesquisas e plantas piloto. Entretanto, o teste de compressão à quente (RCQ) precisa de equipamento mais específicos, ou mesmo projetos que envolvem o seu desenvolvimento direto no local de aplicabilidade. Devido à característica do teste, são encontrados alguns equipamentos da área de materiais refratários para simular a resistência à compressão, ambos presentes na Figura 14.

**Figura 14 – Equipamentos para teste de compressão sob temperatura**



a) RUL 421 G/6/G – Marca Netzsch



b) HMOR 422 D/3/G – Marca Netzsch

Fonte: Grupo NETZSCH (2021).

O teste executado pelo equipamento RUL (Refractoriness under load – refratariedade sob carga) é operado através de software e segue as normas ISO 1893 – *Refractoriness under load* – e ISO 3187 – *Creep in compression* (ruptura sobre compressão). É possível determinar a taxa de aumento da temperatura em razão do tempo, criando assim uma curva de aquecimento e resfriamento sob um valor de carga fixa. Já o HMOR investiga o módulo de ruptura (MOR) de material cerâmico refratário também com o auxílio de software, sendo possível alcançar valores de temperatura acima de 1500°C. O teste é especificado pela ISO 5013 e alcança 50 MPa (Grupo NETZSCH, 2021).

Por serem equipamentos específicos e que necessitam do auxílio de software, com treinamento para operação e alto uso de tecnologia, os valores correspondentes para compra são elevados. Os testes similares observados até o momento, como no artigo base, utilizam fornos projetados e desenvolvidos diretamente na planta e necessitam de investimento inicial também elevado. O projeto da planta piloto visa operações necessárias que forneçam os resultados do produto para sua devida aprovação e qualificação para produção em escala industrial, por isso, vê-se a demanda do teste RCQ. O ideal neste caso é inicialmente a terceirização do método que poderia ser encaminhado para institutos de pesquisa ou parceria com outras empresas.

Tabela 7 – Proposta de equipamentos laboratoriais

Equipamento	Finalidade	Marca e modelo	Especificação técnica	Cotação de preço
Balança semi-analítica 	Determinação mássica de amostras com precisão de 0,001	MARTE CIENTÍFICA AD 330	Carga máxima: 330 g Sensibilidade e reprodutibilidade: 0,001 g Classe de exatidão: II Possui 3 unidades de pesagem: g, Kg e Ct Temperatura de trabalho: de 10 a 40°C	R\$ 2.930,00
Difratorômetro de raio-X (DRX) 	Análise cristalográfica com identificação das fases de materiais minerais	Thermo Fisher ARL EQ-100 X-ray Diffractometers	Foco 50 x 50µm Dois pratos padrões de amostras diâmetro 14mm x 0.2 mm Dimensões: 545 x 585 x 680 (A x L x P) mm	R\$ 605.000,00
Estufa 	Estufa para secagem de materiais	MYLABOR + SS ESTUFA DIGITAL	Volume: 85 litros Dimensões: 450 x 450 x 420 mm	R\$ 3.351,04

<p>Peneiras granulométricas</p> 	<p>Ensaio granulométrico dos materiais sólidos utilizados na produção</p>	<p>Marca: Abronziinox</p>	<p>Diâmetro Interno: <math>\pm 20,5</math> cm          Altura <math>\pm 5</math> cm          A malha pode variar de 2,5 a 635 mesh</p>	<p>Preço a partir de R\$ 222,71 podendo variar de acordo com a malha</p>
<p>Agitador Eletromagnético</p> 	<p>Ensaio granulométrico dos materiais sólidos utilizados na produção</p>	<p>Marca: Lab1000</p>	<p>Timer Digital de 0 a 99 min;          Capacidade para 6 peneiras de 2 polegadas de altura, mais a tampa e o fundo; (peneiras com diâmetro de 3", 5" ou 8");          Reostato para controle das vibrações, eletromagnético com frequência de 60 vezes / segundo;</p>	<p>R\$ 7.330,00</p>
<p>Espectrômetro de fluorescência de raio-X (FRX)</p> 	<p>Caracterização e quantificação de elementos químicos</p>	<p>Malvern Panalytical EPSILON 1</p>	<p>Instrumento de XRF de bancada, utilizado na análise de elementos primários e secundários e elementos-traço da tabela periódica, desde o sódio até o amerício.</p>	<p>Valor não disponibilizado</p>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Proposta de suprimentos operacionais

Equipamento	Finalidade	Marca e modelo	Especificação técnica	Cotação de preço
<p>Misturador elétrico</p> 	Misturador elétrico para agitação dos materiais contidos e armazenados em bombonas.	Cortag HM180	Contém: 01 misturador e 02 batedores Dimensões: 25 x 32 x 59 cm (AxLxP) Peso: 8,30 kg 1800 Watts	R\$ 729,90
<p>Paletes</p> 	Apoio e transpote de produtos em massa	Paletes de Pino Padrão	Dimensões: 1000x800x140 mm	Novo: varia em torno de R\$ 50,00 Usado: varia em torno de R\$ 10,00
<p>Paleteira Hidráulica</p> 	Para transporte e descolamento de paletes	680 MM Worker	Capacidade de 2,5 toneladas. Elevação máxima: 200 mm Comprimento do garfo: 1150 mm Altura total (cabo): 1186mm Altura mínima: 85 mm	R\$ 1.699,99
<p>Molde para corpo de prova</p> 	Moldagem dos corpos de prova do material ativado alcalinamente	L-S-M-30 5x10	10 unidades Dimensões: 5x10 cm	R\$1.216,00

<p>Carrinho para transporte de materiais</p> 	<p>Transporte de materiais (recebimento e armazenamento de matérias-primas)</p>	<p>FERCAR</p>	<p>Dimensões: 115 x 35 x 60 cm          Pintura eletrostática          Capacidade: 200 Kg          Capacidade da alavanca: 80 Kg          Dimensão da base: 35 x 20 cm</p>	<p>R\$ 379,90</p>
<p>Bombona</p> 	<p>Armazenamento de materiais líquidos</p>	<p>TF50</p>	<p>Capacidade: 50L nominal / 53L real</p>	<p>R\$ 175,00</p>
<p>Tanque vertical</p> 	<p>Armazenamento vertical</p>	<p>WebPlástico TQ100BRV</p>	<p>Capacidade: 100L          Acompanha duas conexões de 1/2" BSP localizadas duas na parte superior do tanque e uma no pé do tanque usada para abastecimento do gerador ou saída do líquido armazenado.</p>	<p>R\$ 530,00</p>

Fonte: Próprio autor.

Equipamentos laboratoriais são extremamente importantes para dois aspectos da planta: a homologação das matérias-primas para a produção e a avaliação do produto gerado nos testes. Como esperado, observa-se um valor elevado do equipamento de análise mineralógica (Thermo Fisher – ARL EQ-100) e o mesmo deve ser esperado com o modelo para análise química (Malvern Panalytical – EPSILON 1) que atende as análises desejadas. O valor da cotação inicial é de R\$ 13.833,75, sem a estimativa de preço do FRX (Malvern Panalytical – EPSILON 1) não disponibilizado em tempo ábil para o presente estudo e do DRX, já que o preço para execução em uma planta inicial é considerável e o teste pode ser cogitado para terceirização.

O suporte e transporte dos materiais na planta também foi considerado e o orçamento inicial esperado para esses suprimentos é de R\$ 7.251,69. O valor leva em consideração a estimativa de compra de 15 paletes novos para estocagem dos materiais/produtos sem contato direto com o chão, evitando a possibilidade de contaminação e absorção de umidade. Além disso, o valor agrega 20 unidades de corpos de prova cilíndricos para moldes, 2 carrinhos para transporte de materiais internamente, 1 tanque vertical para armazenamento do silicato de sódio, auxiliando no manuseio através da torneira presente no tanque, 2 bombonas para estoque de material líquido, 1 paletaria hidráulica e 1 misturador elétrico, essencial para manutenção das matérias-primas que estiverem em estoque por mais tempo sem uso, permitindo a homogeneização destas ao longo do tempo diretamente nas bombonas. Uma avaliação mais profunda com a definição de compra das matérias-primas dos fornecedores pode posteriormente causar alteração nas quantidades estimadas dos itens de suprimentos, algo esperado, tendo em vista até mesmo a definição de alocação da planta e o espaço a ser disponibilizado.

Por fim, esperasse um valor total base para início das operações básicas da planta de R\$ 119.511,62. Somado a esse valor, seria necessário posteriormente uma análise aprofundada para as instalações, além de custo de pessoal e energético, considerando-se a presença de equipamentos para cominuição que acarretam esses custos.

#### 5.1.1.3 Avaliação ambiental e de segurança do processo

A avaliação ambiental e de segurança dos processos da planta piloto se inicia nos materiais utilizados em sua produção e nas possíveis periculosidades que eles podem apresentar tanto ao meio ambiente, como aos trabalhadores. Visando tal análise, foi avaliada a FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico) das matérias-primas que apresentam maior capacidade de serem perigosas, segundo a norma NBR 14725-4:2009, sobre a confecção de uma FISPQ.

Além disso, para todos os produtos e equipamentos listados nessa seção é importante que estejam de acordo com a norma NBR 26, que prevê as normas de sinalização de segurança sobre produtos e equipamentos. Essa norma indica que cada produto químico, equipamento e instalação industrial deve conter as indicações sobre suas características principais e periculosidades, por meio de cores indicativas da natureza desse material, acompanhada dos sinais convencionais ou da identificação por palavras. Além disso, a mistura de produtos químicos deverá conter uma rotulagem com as propriedades perigosas relacionadas à mistura.

#### 5.1.1.3.1 Hidróxido de sódio

Primeiramente, o hidróxido de sódio é um material utilizado para a ativação alcalina e que contém coloração branca, se apresenta no estado sólido e é inodoro. Segundo a sua FISPQ, ao entrar em contato com a pele, essa substância pode causar queimaduras graves, sendo necessário lavar muito bem o local lesionado e ter o cuidado em não inalar ou ingerir o material. Além disso, seu armazenamento deve ser feito em um ambiente limpo e seco, à temperatura ambiente, sendo mantido em uma embalagem bem fechada. Vale ressaltar que em durante o processo reacional a reação é de caráter exotérmico com grande liberação de calor por ser altamente alcalina. Desse modo, é necessária a utilização de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) apropriados ao manuseio do hidróxido de sódio, sendo recomendada a utilização de: luvas de nitrilo, máscara, para a proteção respiratória e óculos, para a proteção dos olhos (FISPQ Hidróxido de Sódio, 2009).

Por fim, o descarte desse material deve ser feito adequadamente, sem ser descartado em pias, sanitários, ou em outras redes de águas residuais, evitando assim o efeito prejudicial que essa substância pode gerar a organismos aquáticos, além do perigo de contaminação de águas utilizadas por pessoas também. Sendo assim, esse material deve seguir as normas locais de controle do meio ambiente, em relação ao seu tratamento e disposição (FISPQ Hidróxido de Sódio, 2009).

#### 5.1.1.3.2 Silicato de sódio

O silicato de sódio neutro, substância utilizada na ativação alcalina, é um líquido turvo, de coloração acinzentada, esverdeada a rósea e que é inodoro. Esse material não deve entrar em contato com quem o manuseia, devido ao fato de que pode causar queimaduras graves em contato com a pele, olhos, ou ao ser inalado, podendo gerar danos ao sistema respiratório ou se

for ingerido, podendo causar danos gastrointestinais e nas membranas mucosas. Caso alguma dessas situações ocorra, a vítima deve ir para um local arejado, remover as roupas e sapatos contaminados, além de lavar com água em abundância o local atingido (FISPQ Silicato de Sódio, 2011).

Seu armazenamento deve ser em um local fresco, bem ventilado e com piso resistente à corrosão, sendo mantido em recipientes bem fechados e separado de materiais incompatíveis. Desse modo, é necessária a utilização de EPI's apropriados ao seu manuseio, sendo recomendada a utilização de: luvas protetoras impermeáveis de neoprene ou borracha natural, para proteção das mãos; máscara, para a proteção respiratória e óculos, para a proteção dos olhos (FISPQ Silicato de Sódio, 2011).

Ademais, apesar do produto não ser inflamável, o silicato de sódio apresenta perigo ao meio ambiente devido à sua corrosividade, sendo necessário então o descarte adequado desse material. Por fim, mesmo que não seja classificado como perigoso para a vida aquática, esse material pode acumular-se em espécies que utilizam a sílica como material estrutural, a exemplo das algas diatomáceas e as esponjas de silício. Desse modo, na administração dessa substância, é importante que sejam cumpridas as suas normas de descarte, armazenamento e manipulação (FISPQ Silicato de Sódio, 2011).

#### 5.1.1.3.3 Segurança de processos

Durante a confecção do *layout* da planta piloto foram definidos certos critérios visando uma melhor segurança dos colaboradores que estarão operando a planta. Primeiramente, foi definido que as salas de laboratórios se encontrarão próximas, assim como terão fácil acesso à parte de estoque da planta, o que facilita o fluxo de materiais e evita perigos relacionados ao transporte de produtos químicos perigosos e de bombonas e/ou tanques pesados. Além disso, foi definida a existência de uma área de paramentação de EPI's colocada em um espaço anterior ao acesso da parte produtiva, para garantir que todos que entrem nessa área estejam devidamente paramentados.

Já a parte produtiva ficou com uma área de tamanho adequado para todo o processo e com acessos somente à área de paramentação, à câmara úmida e ao almoxarifado. Vale destacar que a área produtiva é ampla e com teto elevado, visando uma melhor dissipação de som gerado pelo moinho e britador, evitando possíveis problemas de audição que tais equipamentos podem gerar por produzirem sons muito altos, além da utilização de protetores de ouvido. Por fim, a parte de acesso comum das pessoas, recepção e área administrativa ficou separada das partes

produtivas e de testes, visando evitar problemas de segurança do trabalho. Isso é devido à existência de equipamentos e produtos químicos que requerem profissionais para manuseá-los adequadamente, sendo definido que somente funcionários treinados e orientados teriam acesso a essas partes da planta.

Através do estudo realizado para regularização das normas e das demandas dos processos quanto à segurança ambiental e operacional, foi possível concluir que o uso preventivo de EPI's, concomitante à treinamento da equipe e as devidas especificações para instalações da planta são de extrema necessidade para redução do riscos de acidentes e contaminações. A utilização de carrinhos para transporte de materiais dentro da planta, é outro fator importante para a segurança a longo prazo de risco ocupacional que também deve ser prevenido. Por fim, destaca-se que externamente ao *layout* proposto deverá ser alocado um chuveiro de descontaminação para casos de acidentes, além dos bags para descarte e destinação adequados dos materiais na parte interna da planta, deverão ser instaladas pias para constante higienização.

## 5.2 Avaliação Estratégica

Realizou-se uma análise dos fatores internos que afetam a planta (forças e fraquezas) e dos fatores externos (oportunidades e ameaças), com o intuito de avaliar os pontos positivos e negativos do projeto (Figura 15).

**Figura 15 – Análise F.O.F.A. (S.W.O.T.)**

	Fatores Internos	Fatores Externos
Pontos Fortes	<p><b>Forças</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inovação tecnológica do produto</li> <li>• Possibilidade de diversificação de produtos na planta</li> <li>• Reaproveitamento de um coproduto (via ambiental)</li> </ul>	<p><b>Oportunidades</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abertura no mercado para novos negócios</li> <li>• Matérias-primas disponíveis no país</li> <li>• Possibilidade de formação de novas parcerias</li> </ul>
Pontos Fracos	<p><b>Fraquezas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de aprimoramentos do projeto da planta piloto</li> <li>• Necessidade de terceirização de alguns testes mecânicos</li> <li>• Custo alto do investimento inicial</li> </ul>	<p><b>Ameaças</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesquisa ainda em ascensão no país</li> <li>• Alto custo do silicato de sódio</li> <li>• Alta demanda da escória (EGAF) no mercado</li> </ul>

Fonte: Próprio autor.

Ao analisar as forças do projeto, é importante destacar a inovação tecnológica do produto que é diferenciado, já que, possui uma alta resistência ao fogo, além de ser produzido através de um subproduto industrial, tendo assim, um viés ambiental em sua reutilização. Outro ponto a se destacar, é a viabilidade da produção de outros tipos de materiais que utilizam das mesmas estruturas dispostas no projeto, aumentando assim, as possibilidades de produção da planta.

Em contra partida, existe uma necessidade de aprimoramento do projeto, já que ainda não está definido para quem ele será vendido, onde será implantado, estudos das partes elétricas ou hidráulicas que não foram discutidos, assim como, um levantamento geral de custos e de funcionários necessários para o funcionamento da planta, características que seriam bem abordadas ao efetuar um plano de negócios do projeto, por exemplo. Existe também um custo elevado inicial, fazendo com que a planta seja um bom investimento para uma empresa já consolidada e que busca um retorno financeiro com o material, como poderia ser o caso de indústrias de produção de ferro-gusa ou mineradores, já que, atualmente, estuda-se a aplicabilidade de geopolímero à base de rejeito de mineração. Outro ponto a ser levado em consideração é a necessidade de terceirizar alguns dos testes mecânicos propostos por indisponibilidade de equipamentos e elevado custo inicial.

Ao analisar os pontos fortes dos fatores externos, tem-se uma baixa concorrência da produção do produto no mercado brasileiro, além disso, existe uma grande disponibilidade das matérias-primas no país. Materiais ativados alcalinamente são possíveis de serem produzidos através de diversas fontes diferentes, mas nem todas elas são encontradas no Brasil, o que não é o caso do artigo base utilizado, no qual os reagentes propostos estão disponíveis no país e são de fácil obtenção. É importante destacar também, a possibilidade de conseguir parceiros para investir e utilizar a planta, visto que, ela pode ser utilizada para produção e testes de outros produtos correlacionados.

Por fim, pode-se destacar como ameaças, a concorrência pela EGAF, uma vez que ela é requisitada por outras indústrias, além do alto custo do silicato de sódio que possui um preço 24,55% mais alto ao ser comparado com o hidróxido de sódio, por exemplo, que é a segunda matéria-prima mais cara. Além disso, a pesquisa no Brasil sobre materiais ativados alcalinamente ainda está em ascensão, fazendo com que, exista uma certa limitação de informações para a produção do produto.

## 6 CONCLUSÃO

Após a realização do projeto e as estimativas iniciais realizadas para a construção da planta piloto para a produção de um material ativado alcalinamente, foi possível observar fatores que impactam diretamente no investimento inicial e na objetivação da planta. Por se tratar de um material inovador que vem sendo estudado para entrada no mercado, é viável o estabelecimento de parcerias para a execução do projeto tanto em termos de execução de testes, nos quais os equipamentos possuem alto valor de investimento inicial, como o DRX, RCQ e possivelmente o FRX, quanto para a produção de outros materiais ativados alcalinamente da mesma categoria e não especificamente o produto a base de escória de alto-forno. Ressalta-se também o fato da proposta da planta inicialmente ser para testes em materiais ativados alcalinamente, podendo posteriormente ser feita uma proposta de produção própria de manufaturados da planta, abrangendo até outros tipos de materiais ativados alcalinamente.

O proposto *layout* abrangeu desde o fluxograma geral do processo à sua disposição final, integrando a circulação de pessoas e materiais na planta, visando o melhor aproveitamento do espaço, dos recursos e evitando possibilidades de acidentes no local. Caso seja concretizado a terceirização inicial de alguns testes de alto valor agregado, o *layout* deverá passar por alterações ou mesmo a destinação das salas disponibilizadas dos testes para outros recursos.

Com a análise F.O.F.A foi possível observar que o projeto é relevante no cenário atual de Minas Gerais, por ser um estado com grandes indústrias siderúrgicas e mineiradoras, que podem se interessar pelo projeto e fornecer a EGAF. Além disso, conclui-se a importância de inovar o mercado com produtos diferenciados e com um viés ambiental, e que podem sempre agregar cada vez mais a pesquisa no país.

Ressalta-se que, para um estudo avançado, é preciso a execução de um plano de negócios que abranja os custos de construção, levantamento de pessoas e definição do mercado. Ademais, o tema aborda um produto inovador, com demanda para aplicação, de alta tecnologia e que necessita de estudo em escala piloto para viabilizar os riscos de engenharia dos processos a serem estabelecidos em escala industrial. No Brasil, observa-se o crescente incentivo para aplicação de materiais geopoliméricos e fontes de matérias-primas naturais que promovam a reutilização desse material à base de rejeitos ou subprodutos industriais. Sendo assim, o presente estudo é relevante no cenário atual e pode acarretar em futuras pesquisas e inovações na área de materiais ativados alcalinamente no Brasil, assim como pode incentivar a sua maior aplicação e industrialização.

## 7 TRABALHOS FUTUROS

Através de todos os estudos realizados no presente trabalho, juntamente com a pesquisa de mercado inicial para cotação de produtos e equipamentos essenciais na formulação da planta piloto de produção do material ativado alcalinamente a partir de escória de alto-forno, é possível sugerir trabalhos a serem realizados posteriormente. O intuito é a complementação deste, assim como uma pesquisa aprofundada de mercado para a viabilização do projeto e a captação de investimentos realizados através de um plano de negócios.

Em termos técnicos, vê-se necessário o estudo de desenvolvimento de equipamentos específicos como o forno para teste de compressão à quente. Com base em outras empresas e no material utilizado para a formulação do produto, observou-se o desenvolvimento deste equipamento *in loco* para a realização dos testes. De acordo com a pesquisa de mercado, o valor é possivelmente inferior aos testes de equipamentos já disponíveis. Outros testes ainda poderiam ser sugeridos, como o de reação triboquímica para análise de desgaste do material, que estará exposto em ambiente aberto por longo período de tempo e a possibilidade de estudo para substituição da areia por rejeito, devido à semelhança na composição, além do caráter acadêmico.

Por fim, destaca-se a possibilidade de terceirização de algumas etapas altamente dispendiosas em um primeiro momento para uma planta piloto nova, como de equipamentos de análises química. A cotação com empresas que prestam esse serviço é importante, já que o orçamento inicial pode sofrer significativa alteração. Além disso, é proposto que, após a etapa do projeto de planta piloto for concluída e avaliada a sua aplicação, é possível que o projeto avance para uma proposta de empresa com produção em escala industrial, incentivando o uso e a pesquisa relacionada aos materiais ativados alcalinamente no Brasil.

## REFERÊNCIAS

ABCP. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7.ed. São Paulo, 2002, 28p. (BT-106).

ABDEL-GHANI, N. T.; ELSAYED, H. A.; ABDELMOIED, S. Geopolymer synthesis by the alkali-activation of blastfurnace steel slag and its fire-resistance. **HBRC Journal**, v. 14, n. 2, p. 159–164, 2018.

ArcelorMittal Brasil. **Escória de alto-forno**. Disponível em:

<<https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno#:~:text=A%20composi%C3%A7%C3%A3o%20qu%C3%ADmica%20das%20Esc%C3%B3rias,TiO2%2C%20enxofre%2C%20entre%20outros>> Acesso em: 05 de abr. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Dossiê Técnico: **Proteção contra incêndios em edificações**. São Paulo, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações** - Procedimento. Rio de Janeiro, apêndice B. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14725-4: Produtos químicos — Informações sobre segurança, saúde e meio ambiente. Parte 4: Ficha de informações de segurança de produtos químicos (FISPQ)** - Procedimento. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio** - Procedimento. Rio de Janeiro. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA DE PRODUTOS QUÍMICOS. **ABTLPO**, 2021. FISPQ – Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Disponível em: <<http://www.abtlp.org.br/index.php/produtos-perigosos/fispq/>>. Acesso em: 04 de jun. 2021.

ANDRES, G. **Planejamento do arranjo físico de uma indústria química**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

ANDRADE, B.; HOUMARD, M.; AGUIAR, M. T. **Estudo da obtenção de geopolímero a partir de aluminossilicato sintetizado via sol-gel**. Belo Horizonte, 2019.

BATTAGIN, A. F. Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. [s.l.] Martins Fontes, 2016. v. 2.

BRASIL, Angela *et al.* **PLANO DE NEGÓCIO: Uma ferramenta com múltiplas aplicações**. AEMS - Faculdades Integradas de Três Lagoas, Curso de Administração. [2012]. Disponível em: <[http://www.aems.com.br/conexao/edicaoatual/Sumario-2/downloads/2013/3/1%20\(82\).pdf](http://www.aems.com.br/conexao/edicaoatual/Sumario-2/downloads/2013/3/1%20(82).pdf)> Acesso em: 19 out. 2020.

BRITO, W. S. **Ativação alcalina para a produção de geopolímeros a partir de resíduo**

**industrial**. 2018. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém. 2018.

BYE, G.; LIVESEY, P.; STRUBLE, L. **Portland Cement**. 3. ed. London: ICE Publishing, 2011.

CBMMG – Corpo de Bombeiro Militar de Minas Gerais. Segurança estrutural das edificações. 2005, p. 1–14.

DAVIDOVITS, J.; DAVIDOVICS, M. **Geopolymer: ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites**, 1991.

DAVIDOVITS, J. **30 Years of Successes and Failures in Geopolymers Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs**. Geopolymer 2002 Conference, Melbourne, Austrália, 2002.

DUXSON, P. *et al.* Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

EMBRAPA. Manual sobre o Uso da Escala TRL / MRL. **Embrapa**, p. 44, 2018.

ENIT - Escola Nacional de Inspeção do Trabalho, Secretaria de Trabalho, Governo Federal. **NR 26 – Sinalização de Segurança**. Atualizado 2015.

FRANÇA, E. P. **Tecnologia básica do concreto**. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2002. v. 3.

FERREIRA, Thales Eduardo de Moraes. **Dimensionamento das capacidades da caldeira a vapor e torre de resfriamento para o sistema de utilidades de uma planta química**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Industrial Química). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena. Lorena, 2012.

**Ficha de informação de segurança de produto químico – FISPQ**. Hidróxido de sódio. Disponível em: <[https://www.farmacia.ufmg.br/wp-content/uploads/2018/10/FISPQ-Hidroxido-de-Sodio\\_LABSYNTH-6.pdf](https://www.farmacia.ufmg.br/wp-content/uploads/2018/10/FISPQ-Hidroxido-de-Sodio_LABSYNTH-6.pdf)> . Acesso em: 10 mai. 2021.

**Ficha de informação de segurança de produto químico – FISPQ**. Silicato de sódio neutro. Disponível em: <<https://cloud.cnpqc.embrapa.br/igu/category/s12-administracao/c42-gestao/administracao/srh/fispq/laboratorios/silicato%20de%20sodio.pdf>> . Acesso em: 10 mai. 2021.

GEO-POL. **Aplicação de geopolímero à base de cálcio com escória de alto-forno, uma revisão**. Disponível em: < <http://www.geopolymer.com.br/> >. Acesso em: 07 abr 2021.

GEO-POL. **Webinar Primavera 2013: Princípios básicos da ciência geopolimérica, Parte I**. 2013. Disponível em: < <http://www.geopolymer.com.br/> >. Acesso em: 26 set 2020.

GUIMARÃES, A. C. P. D.; DE OLIVEIRA, M. F. M.; DA SILVA, J. P. C.; LAMEIRAS, F. S. Obtenção de geopolímero com adição de rejeito de mineração depositado na barragem de candonga (Rio Doce – MG, Brasil). **CLB-MCS 2018, 3º Congresso Luso-Brasileiro Materiais de Construção Sustentáveis**, Coimbra, 14-16 fev. 2018. Centro de

Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN, Belo Horizonte, 2018.

HARDJITO, D.; RANGAN, B. **Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete**. Research Report - Curtin University of Technology. Austrália, 2005.

JUMRAT, S; CHATVEERA, B; RATTANADECHO, P. Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar. **International Communications in Heat and Mass Transfer**. Vol. 38, p. 242-248, 2011.

JÚNIOR, D. S. de S. **Estudo do comportamento de escórias de alto-forno a carvão vegetal produzidas a partir de ativação à quente**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2007.

KRETZER, Manuela Bazzani. Argamassas com cimento geopolimérico à base de metacaulim, cinza volante e escória granulada de alto forno ativado por solução alcalina de silicato. **Dissertação de mestrado, UDESC**. Joinville, 2020.

LIVI, C. N. Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio. [s.l.] **Universidade Federal de Santa Catarina**, 2013.

MAIA, A.L.F.. **Escória granulada como material cimentício para melhoria dos parâmetros de durabilidade**. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia de Materiais – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MORALES, G.; CAMPOS, A.; FAGANELLO, A. M. P. A ação do fogo sobre os componentes do concreto. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 32, n. 1, p. 47–55, 2011.

MOTORWALA, Ammar; SHAH Vineet; KAMMULA, Ravishankar; NANNAPANENI, Praveena; RAIJIWALA, D.B. Review on alkali-activated fly ash based geopolymer concrete. **Materials Science Forum**, v. 841, n. 1, p. 162–169, 2016.

MUHAMMAD FAHEEM, M. T. et al. Development of pilot plant for novel geopolymer brick making machine. **Advances in Environmental Biology**, v. 7, n. SPEC. ISSUE 12, p. 3611–3616, 2013.

MUTHER, R.. **Planejamento do layout: Sistema SLP**. São Paulo, Edgar Blücher, 1978.

NAKAGAWA, Marcelo. **Ferramenta: Análise SWOT (Clássico)**. São Paulo: Estratégia e gestão, 2015.

Grupo NETZSCH. **NETZSCH Thermal Analysis**, 2021. HMOR 422 D/3, Apparatus for testing MOR. Disponível em: < <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/refractory-testing/hmor-422-d3/>>. Acesso em: 29 abr 2021.

Grupo NETZSCH. **NETZSCH Thermal Analysis**, 2021. RUL/CIC 421, Apparatus for determining refractoriness under load. Disponível em: < <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/br/produtos-solucoes/testes-de-refratarios/rulcic-421/>>. Acesso em: 29 abr 2021.

NITA, Clovis; JOHN, Vanderley Moacyr. **Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa**. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2007.

PALOMO, A.; GRUTZECK, M. W.; BLANCO, M. T. Alkali-activated fly ashes a cement for the future. **Cement and Concrete Research** **29**. pp 1323-1329, 1999.

PAULEK, Emanuele Casagrande. **Plano de negócio para abertura de uma distribuidora de componentes e perfis para esquadrias na cidade de Chapecó – SC**. 2017. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Administração, Universidade Federal da Fronteira Sul, Chapecó, 2017.

PETRUCCI, E. G. R.; PAULON, V. A. **Concreto de Cimento Portland**. 13. ed. São Paulo: Editora Globo. 1998.

PINTO, A. T. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. Geo-Pol, Geopolymer System. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, 2006. Disponível em: < <http://www.geopolymer.com.br/> >. Acesso em: 25 set 2020.

ROSA, Cláudio Afrânio. **Como elaborar um plano de negócios**. Brasília: Núcleo de Comunicação, 2013. 164 p. SEBRAE. Disponível em: <[https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/COMO%20ELABORAR%20UM%20PLANO\\_baixa.pdf](https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/COMO%20ELABORAR%20UM%20PLANO_baixa.pdf)>. Acesso em: 18 out

SANTA, R. A. A. Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a partir de cinzas pesadas oriundas da queima do carvão mineiral. [s.l.] **Universidade Federal De Santa Catarina Centro Tecnológico Departamento De Engenharia Química E Engenharia De Alimentos Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Química**, 2012.

SANTOS, L. B. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. **Soc. nat. (Online)**, v. 23, n. 1, p. 77–94, 2011.

SAXENA, S. K.; KUMAR, M.; SINGH, N. B. Fire resistant properties of alumino silicate geopolymer cement mortars. **Materials Today: Proceeding**, v. 4, n. 4, p. 5605–5612, 2017.

SEBRAE (Brasília). **Como Elaborar um Plano de Negócios**. Brasília: [s. n.], 2013.

SILVA, A. G. DA *et al.* Guia prático de escalonamento de tecnologias. p. 128, 2019.

SILVA, Marcia Viana da. **Plano de negócio de uma sementeira**. Relatório de Estágio Supervisionado Obrigatório. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia. Recife, novembro, 2019.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.

VASSALO, E. A. de S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. 2013. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2013.

VAZ, L.; GOMES, J. Estudo do efeito de adjuvantes em geopolímeros obtidos de resíduos de minas. [s.l.] **Universidade da Beira Interior Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura**, 2011.

ZHANG, H. **Building materials in civil engineering**. Sawaton, Cambridge: Science Press Beijing, 2010.

## APÊNDICE A

A NBR 15.200:2004 aborda sobre o projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Nessa norma é informado que um material a base de concreto, quando submetido a uma compressão axial em elevadas temperaturas deve ter a alteração de suas propriedades segundo a Tabela 9.

**Tabela 9 – Valores da razão de propriedades do concreto com agregados silicosos e calcáreos**

Temperatura do concreto, $\theta$ °C	Agregado silicoso		Agregado calcáreo	
	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{ck}$	$E_{c,\theta}/E_c$
1	2	3	4	5
20	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,95	0,90	0,97	0,94
300	0,85	0,72	0,91	0,83
400	0,75	0,56	0,85	0,72
500	0,60	0,36	0,74	0,55
600	0,45	0,20	0,60	0,36
700	0,30	0,09	0,43	0,19
800	0,15	0,02	0,27	0,07
900	0,08	0,01	0,15	0,02
1.000	0,04	0,00	0,06	0,00
1.100	0,01	0,00	0,02	0,00
1.200	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15.200:2004

A tabela fornece dados da razão entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas ( $f_{c,\theta}$ ) sobre a resistência à compressão do concreto em uma situação normal ( $f_{ck}$ ). Além disso fornece a razão de módulo de elasticidade do concreto com a mesma lógica de razão da resistência. Ou seja, a tabela fornece o módulo de elasticidade do concreto comprimido variável pela temperatura ( $E_{c,\theta}$ ), sobre o módulo de elasticidade do concreto em uma situação normal ( $E_c$ ).

Importante ressaltar que os valores de razão de resistência para o concreto submetido à compressão a uma temperatura de 800°C é 0,15 para o concreto com agregado silicoso e 0,27 para o concreto com agregado calcáreo. Ou seja, na temperatura de 800°C o concreto com agregados silicosos chegou a ter 15% de sua resistência inicial e o concreto com agregados calcáreos obteve uma relação de 27%. Desse modo, comparado ao material ativado alcalinamente do artigo base desse projeto, que atingiu em 800°C uma resistência a compressão de 23 MPa, é perceptível que ele esteja bem adequado às normas de resistência ao fogo pré-estabelecidas pela NBR 15.200, já que não chegou nem a 15% e nem a 27% de sua resistência inicial à temperatura ambiente, mantendo 57,2% dela a uma temperatura de 800°C.

## APÊNDICE B

Com o intuito de reduzir o percentual mássico de óxido de cálcio contido no subproduto da indústria siderúrgica e, dessa forma, agregar maior teor de aluminossilicato no material ativado alcalinamente, propõe-se a adição de metacaulim. Segundo explicitado anteriormente, o metacaulim considerado para os cálculos possui os seguintes percentuais: 52% SiO<sub>2</sub>, 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 8% de impurezas (NITA; JOHN, 2007).

A proposta acontece a partir da utilização do composto no material ativado alcalinamente, devido à sua melhoria nas propriedades do produto, como aumento da resistência à compressão e aumento do tempo de pega. Inicialmente, utilizou-se a base de cálculo estimada para a produção na planta piloto no valor mássico de 40kg. Sabendo que a proporção mássica do produto da planta é de respectivamente 5:15:2:1 de escória de alto-forno, areia, silicato de sódio e hidróxido de sódio, encontrou-se o valor correspondente em quilogramas e a fração de cada matéria-prima, presente na Tabela 10.

**Tabela 10 – Valor em kg das matérias-primas**

Componentes	kg	Fração correspondente
Escória de alto-forno	8,70	0,217
Areia	26,09	0,652
Silicato de sódio	3,48	0,087
Hidróxido de sódio	1,74	0,043

Fonte: Próprio autor.

O valor de 8,70 kg da escória do Brasil possui um equivalente à 41,60% de óxido de cálcio (CaO) em sua composição, o que na base escolhida equivale a 3,62 kg de CaO. Desse modo, deseja-se mudar a composição para em torno de 34,70% de óxido de cálcio do total da escória, pois essa é a composição aproximada de CaO na escória do artigo base. Para isso, fez-se o seguinte cálculo:

$$\frac{3,62 \text{ kg} \times 100}{34,70} = 10,425 \text{ kg} \quad (1)$$

Esse valor corresponde ao valor final de massa que a mistura teria caso a composição dos 3,62 kg de CaO representassem 34,70% do todo, o que resultou em um total de 10,425 kg, o que aumentaria a massa do sistema em 1,725 kg, valor esse que seria a parte ativa do metacaulim, com a finalidade de aumentar a composição de aluminossilicatos. Além disso, como existe ainda um valor adicional de componente não identificado no metacaulim, correspondente

à 8% de sua composição, a massa final adicional é de 1,88 kg.

A partir do valor da massa adicional, calculou-se o quanto seria acrescido dos componentes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , encontrando-se respectivamente 0,75 g e 0,98 g. Obtendo-se esses novos valores, foram recalculados os percentuais mássicos da escória, que estão presentes na Tabela 5 deste trabalho. Sendo assim, obteve-se nesse ajuste o valor de composição de CaO corresponde à 34,21%, próximo ao esperado inicialmente, para se igualar à composição presente na escória do artigo base.