



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**RAFAEL DE SOUZA GUIMARÃES**

**ANÁLISE DE REQUISITOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DE PAVERS DE CONCRETO  
GEOPOLIMÉRICO**

Projeto de Graduação apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil. Área de concentração: Universidade Federal do Ceará.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos

FORTALEZA - CE

2021



**RAFAEL DE SOUZA GUIMARÃES**

**ANÁLISE DE REQUISITOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DE PAVERS DE  
CONCRETO GEOPOLIMÉRICO**

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 11 / 02 / 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Orientador

---

Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcelo Silva Medeiros Júnior

Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

O complicado período em que este trabalho foi iniciado e desenvolvido, devido à pandemia de Covid-19 em seu segundo ano, tornou o percurso mais turbulento, de forma que o apoio e as oportunidades dadas pelas pessoas que nos são mais próximas foram essenciais para o andamento do projeto e para a saúde mental. Dessa forma, primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, sobretudo minha mãe e meus avós, pelo apoio imensurável durante essa primeira etapa do projeto, tanto nos dias mais difíceis e atarefados quanto nas folgas, saibam que os amo muito e são fundações da minha vida.

Serei profundamente grato ao meu orientador, professor Lucas Babadopulos, pela oportunidade de trabalhar com ele ativamente nesse curto período, mas que já foi de grande aprendizagem e amadurecimento. Certamente, uma das razões para o andamento exponencial desse projeto foi devido a sua competência e a sua disponibilidade.

Gostaria de agradecer a todos os integrantes do grupo de pesquisa em Reologia de Materiais (ReoM), que o Professor Lucas me apresentou, pelas reuniões proveitosas e críticas construtivas que propiciaram grandes melhorias durante o andamento do projeto. Do grupo, destaco um grande agradecimento para Lucas Benício, pelo grande auxílio e parceria no acompanhamento do trabalho.

Grande agradecimento à OCS Mineração e Empreendimentos, por participar da pesquisa e esclarecer vários aspectos da produção e melhorias que puderam ser analisadas e aplicadas ao futuro produto.

Agradeço à professora Verônica, encarregada da disciplina de Projeto de Graduação, pela enorme compreensão e gentileza durante o processo, pelas críticas necessárias e pelo conhecimento sobre o método científico que é essencial para o desenvolvimento de uma monografia de graduação.

Finalmente, obrigado a todos que contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

## RESUMO

No contexto de pavimentos intertravados, o *paver* de concreto à base de cimento Portland já é um produto estabelecido comercialmente. Enquanto isso, há pressão pela busca por alternativas produtivas mais sustentáveis do que o emprego do cimento Portland como ligante. Isto posto, um material alternativo ao cimento Portland que seja viável ambientalmente e economicamente, teria potencial para ser competitivo. O ligante álcali-ativado, também conhecido na literatura como ligante geopolimérico, é produzido usando principalmente resíduos industriais, como escórias e cinzas, adicionados de ativadores alcalinos, como o silicato de sódio. Os resíduos mencionados agem como precursor, que, devidamente ativado, produz material que endurece, adere a agregados, e ganha resistência, podendo vir a cumprir a função do cimento Portland nos *pavers*. Contudo, informações técnicas sobre esses novos ligantes para o desenvolvimento de *paver* de concreto geopolimérico ainda são escassas, dificultando o desenvolvimento do novo produto e gerando insegurança para investimentos no desenvolvimento do mesmo. Este trabalho buscou esclarecer e analisar os requisitos técnicos e os custos para que o novo produto seja competitivo no mercado. A metodologia se fundamentou na investigação e no detalhamento do processo de fabricação de *pavers* convencionais, de forma a realizar um levantamento de custos e uma identificação de gargalos produtivos técnicos e/ou econômicos que possam ser explorados com o desenvolvimento do novo produto, composto especificamente por escória de aciaria BOF e cinzas volantes como precursores, além de silicato solúvel e hidróxido de sódio como ativadores. Foi ainda realizada uma pesquisa de opinião, com projetistas e executores de pavimento intertravado de concreto convencional, com o intuito de avaliar possíveis melhorias que devessem ser implementadas para que o novo produto seja competitivo. Ademais, foi conduzida a estruturação dos custos de um *paver* geopolimérico. Foi observado que há espaço mercadológico para o produto, tendo em vista seu viés sustentável e sua viabilidade técnica, desde que alguns ajustes de produção sejam feitos. Foi validada a hipótese de que a eliminação da vibroprensagem, necessária em *pavers* convencionais, tem potencial para tornar o produto mais viável. Contudo, devido ao elevado preço dos ativadores alcalinos, ainda é necessário um ganho de escala na produção para que o preço do novo produto se equipare aos blocos convencionais. Outra possibilidade de melhoria de produto seria a diminuição do teor de ligante geopolimérico, que tende a reduzir o custo final do produto e tornar seu preço mais acessível.

**Palavras-chave:** *Paver*. Ligante Álcali-Ativado. Geopolímero. Engenharia de Requisitos.

## ABSTRACT

In the context of interlocking pavements, Portland cement-based concrete paver is already a commercially established product. Meanwhile, there is pressure to search for more sustainable production alternatives than using Portland cement as a binder. That said, an alternative material to Portland cement that is environmentally and economically viable would have the potential to be competitive. The alkali-activated binder, also known in the literature as geopolymer binder, is produced using mainly industrial waste, such as slag and ash, added with alkaline activators, such as sodium silicate. The mentioned residues act as a precursor, which, when properly activated, produces material that hardens, adheres to aggregates, and gains strength, and may fulfill the role of Portland cement in pavers. However, technical information about these new binders for the development of geopolymer concrete paver are still scarce, making the development of the new product difficult and generating insecurity for investments in its development. This work sought to clarify and analyze the technical and economic requirements for the new product to be competitive in the market. The methodology was based on the investigation and detailing of the manufacturing process of conventional pavers, in order to carry out a cost survey and an identification of technical and/or economic production bottlenecks that can be explored with the development of the new product, composed specifically by BOF steel slag and fly ash as precursors, in addition to soluble silicate and sodium hydroxide as activators. An opinion survey was also carried out with designers and contractors of conventional concrete interlocked pavement, with the aim of evaluating possible improvements that should be implemented for the new product to be competitive. Furthermore, the structuring of the costs of a geopolymeric paver was conducted. It was observed that there is market space for the product, in view of its sustainable bias and its technical feasibility, provided that some production adjustments are made. The hypothesis was validated that the elimination of vibro-pressing, necessary in conventional pavers, has the potential to make the product more viable. However, due to the high price of alkaline activators, it is still necessary to gain scale in production so that the price of the new product is equivalent to conventional blocks. Another possibility for product improvement would be the reduction of the geopolymeric binder content, which tends to reduce the final cost of the product and make its price more accessible.

**Keywords:** Paver. Alkali-Activated Binder. Geopolymer. Requirements Engineering.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferença entre materiais álcali-ativados e geopolímeros e indicação do escopo da nomenclatura sugerida por Davidovits (2013) e adotada neste trabalho.....	12
Figura 2 – Peça de concreto para pavimento intertravado ou paver.....	16
Figura 3 – Ilustração da composição do concreto convencional e do concreto geopolimérico.....	21
Figura 4 – Diferença da emissão de CO <sub>2</sub> entre concreto convencional e concreto geopolimérico .....	22
Figura 5 – Hierarquia de Requisitos .....	25
Figura 6 – Comportamento do concreto seco em relação à adição de água.....	27
Figura 7 – <i>Paver</i> de concreto de cimento Portland .....	27
Figura 8 – Corpo-de-prova prismático de ligante geopolimérico.....	29
Figura 9 – Corpo-de-prova cúbico de ligante geopolimérico.....	29
Figura 10 – Fotografia de corpo-de-prova cúbico rompido em ensaio de compressão.....	30
Figura 11 – Espaçadores de juntas nos pavers.....	36

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Variação do preço do bloco em função da variação do teor de ligante álcali-ativado .....	40
Gráfico 2 – Custo agregado ao bloco pela atividade de vibroprensagem em função da produção diária de blocos (que reduz o custo por bloco para um tempo de vida útil e de manutenções fixos).....	43
Gráfico 3 – Custo agregado ao bloco pela atividade de vibroprensagem em função do ciclo de vida do equipamento (que reduz o custo por bloco para produção e manutenções fixas) .....	44



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites aceitáveis de compressão para pavers em diferentes países .....	18
Tabela 2 – Limites aceitáveis de absorção de água para pavers em diferentes países .....	18
Tabela 3 – Consumo de materiais do concreto geopolimérico .....	30
Tabela 4 – Representação de composição de serviços .....	33
Tabela 5 – Média de custos unitários de materiais do concreto convencional .....	37
Tabela 6 – Composição de custos do concreto convencional desconsiderando a vibroprensagem .....	37
Tabela 7 – Custos de ativadores (cotações em toneladas) e precursores do ligante álcali-ativado .....	39
Tabela 8 – Custos de ativadores (cotações de venda para laboratórios, havendo espaço para melhores negociações) e precursores do ligante álcali-ativado .....	39
Tabela 9 – Composição de custos do paver de concreto geopolimérico .....	40
Tabela 10 – Demonstração do Custo Anual Equivalente da máquina de vibroprensa para ciclo de vida de 10 anos .....	42
Tabela 11 – Composição de custos da vibroprensa .....	42
Tabela 12 – Comparação do custo unitário entre os blocos sem vibroprensagem .....	43
Tabela 13 – Comparação do custo unitário entre os blocos com vibroprensagem .....	43
Tabela 14 – Orçamento de processos: paver de concreto convencional desconsiderando a vibroprensagem (cujo custo deve estar embutido no valor do bloco) .....	45
Tabela 15 – Orçamento de processos: paver de concreto geopolimérico .....	46
Tabela 16 – Orçamento de processos: paver de concreto convencional incluindo custo de vibroprensagem .....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CHI	Custo Hora Improdutivo
CHP	Custo Hora Produtivo
CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CNS	<i>China National Standards</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP V – ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
CSP	Companhia Siderúrgica do Pecém
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
IAbr	Instituto Aço Brasil
MU	Massa Unitária
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
RCD	Resíduo de Construção e Demolição
SA	<i>Standards Australia</i>
SEINFRA – CE	Secretaria da Infraestrutura
SINDUSCON – MG	Sindicato da Indústria da Construção Civil de Minas Gerais

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. PROBLEMÁTICA DE PESQUISA E QUESTÕES MOTIVADORAS .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Problema de Pesquisa.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Questões Motivadoras .....</b>	<b>14</b>
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>15</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1 <i>Pavers</i> .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.1 Utilização no Escopo Atual .....</b>	<b>15</b>
<b>4.1.2 Principais Propriedades e Ensaio .....</b>	<b>16</b>
<b>4.1.3 Critérios e Requisitos Técnicos .....</b>	<b>17</b>
<b>4.2 Geração de Resíduos Industriais no Escopo Estadual .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2.1 Cinzas Volantes .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2.2 Escória de Aciaria BOF.....</b>	<b>20</b>
<b>4.3 Concreto Geopolimérico .....</b>	<b>20</b>
<b>4.3.1 Ligante Álcali-Ativado e Cimento Geopolimérico.....</b>	<b>20</b>
<b>4.3.2 Utilização de Resíduos nos Pavimentos Intertravados.....</b>	<b>21</b>
<b>4.3.3 Principais Propriedades e Ensaio .....</b>	<b>22</b>
<b>4.4 Desenvolvimento de Produto e Engenharia de Requisitos.....</b>	<b>23</b>
<b>4.4.1 Conceituação e Planejamento do Produto.....</b>	<b>23</b>
<b>4.4.2 Pesquisa Qualitativa para Desenvolvimento de Produto .....</b>	<b>24</b>
<b>4.4.3 Definição e Priorização de Requisitos.....</b>	<b>25</b>
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>26</b>
<b>5.1 MATERIAIS .....</b>	<b>26</b>

5.1.1 <i>Paver</i> de Concreto de Cimento Portland .....	26
5.1.2 <i>Paver</i> de Concreto Geopolimérico Protótipo.....	28
5.2 MÉTODOS.....	31
5.2.1 Entrevistas com Empresas Locais/Projetista .....	31
5.2.2 Levantamento de Custos Unitários dos Materiais e Processos.....	32
5.2.3 Análise de Resultados Obtidos .....	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	35
6.1 Entrevistas .....	35
6.2 Composição de Custos.....	37
6.2.1 Materiais Constituintes do Concreto Convencional.....	37
6.2.2 Materiais Constituintes do Concreto Geopolimérico .....	38
6.2.3 Influência do Custo com Vibroprensagem no Custo Global dos Blocos.....	41
6.2.4 Composição de Serviços .....	44
7. CONCLUSÃO.....	48
7.1 Principais Contribuições da Pesquisa.....	48
7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros .....	49
REFERÊNCIAS .....	50
APÊNDICE .....	53

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo o instituto britânico Chatham House (2018), o cimento é responsável por cerca de 8% da emissão de CO<sub>2</sub> no mundo, e, segundo o último Acordo de Paris estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), as emissões anuais relacionadas ao cimento deverão ser reduzidas em pelo menos 16% até 2030. É evidente a necessidade de materiais alternativos na construção civil, principalmente no que diz respeito a materiais cimentícios. Por conta disso, a literatura vem apontando para uma substituição parcial do cimento, como o uso de resíduos industriais na fabricação de produtos de concreto. Isso está igualmente alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) por meio do objetivo número 12 – consumo e produção responsáveis (ODS, 2015).

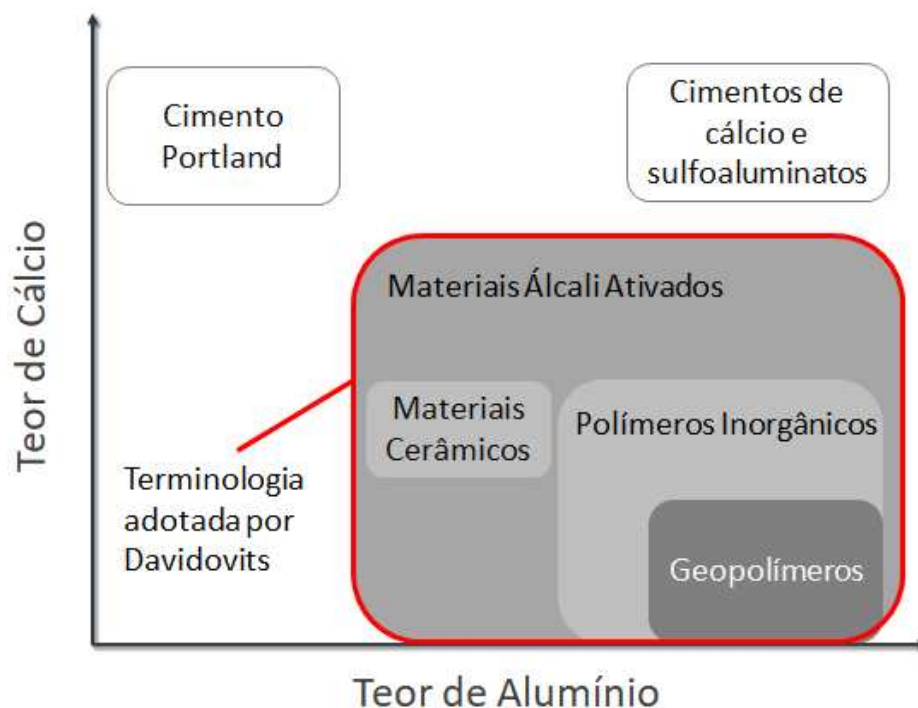
No contexto rodoviário, a crescente utilização de *pavers*, decorrente de algumas características do produto, como o menor custo de manutenção e a melhor infiltração de água, se comparado ao revestimento asfáltico, abre caminho para alternativas produtivas para esse componente dos pavimentos (Muller, 2005). Uma das alternativas é o uso de resíduos para substituir os materiais cimentícios, já que com a abertura das termelétricas do Pecém, no estado do Ceará, a produção de cinzas volantes chega a ser, na capacidade máxima, de 900 toneladas diárias (Rohde, 2016), e com a Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), a produção de escórias de aciaria tipo BOF, ainda pouco utilizadas, pode chegar a 90kg por tonelada de aço (CSP, 2016).

A utilização desses compostos é viabilizada através do conceito de ligantes álcali-ativados (também conhecidos como ligantes geopoliméricos, mesmo quando não há polimerização), tendo em vista que o Cimento Portland é um material que ganha resistência por reações de hidratação, os ligantes álcali-ativados ou geopolímeros obtêm resistência por reações de ativação alcalina, que consomem resíduos industriais. De acordo com Davidovits (2013): a produção de um cimento álcali-ativado requer um material rico em alumino silicato e um ativador alcalino. Por conseguinte, com a grande geração de resíduos industriais e uma nova forma de destinação a esses materiais, segundo a Administração Federal Rodoviária do Departamento de Transporte dos EUA (FHWA):

“A produção de cimentos geopoliméricos versáteis e de baixo custo que podem ser misturados e endurecidos como o cimento Portland representa uma mudança de jogo avançada, revolucionando a construção de infraestrutura de transporte e da indústria da construção.” (FHWA, 2010 apud DAVIDOVITS, 2013, p. 41).

Contudo, há uma divergência no que diz respeito à nomenclatura de ligantes álcali-ativados e geopolímeros que merece ser tratada neste trabalho. Pela classificação de Davidovits (2013), os geopolímeros são materiais inorgânicos obtidos pela reação de alumínio silicatos com ativadores alcalinos, classificando-os como uma única grande classe, com comportamento que se apresenta como algo entre o dos materiais cerâmicos e o dos materiais poliméricos. Todavia, segundo Van Deventer *et al.* (2009), que utilizam o termo Mistura Álcali-Ativada para a maior classe, os geopolímeros se encontram dentro de um menor escopo, sendo diferenciados pelo menor teor de cálcio nos alumínio silicatos, tratando o termo geopolímero de maneira mais cativa para quando há reações de polimerização que justifiquem o emprego do termo. Neste trabalho, apesar do maior rigor de classificação de materiais adotado por Van Deventer *et al.* (2009), será utilizado o termo geopolímero sugerido por Davidovits (2013) devido ao maior conhecimento do termo, visando a um maior alcance do trabalho, mas é relevante estabelecer com clareza essa diferença de nomenclatura. A Figura 1 a seguir ilustra os diferentes grupos de ligantes com seus respectivos teores de alumínio e cálcio. O círculo em vermelho ilustra a terminologia adotada por Davidovits (2013), que engloba os materiais álcali-ativados e os considera como geopolímeros, mesmo que não haja polimerização.

Figura 1 – Diferença entre materiais álcali-ativados e geopolímeros e indicação do escopo da nomenclatura sugerida por Davidovits (2013) e adotada neste trabalho



Fonte: Adaptado de Rakhimova *et al.* (2018)

Finalmente, sublinha-se que, no processo de desenvolvimento de um novo produto (PDP), o viés sustentável da produção tem sido um dos aspectos que tem sido enfatizado nos últimos anos. Segundo Akkari & Carpi (2019, p. 12), “a sustentabilidade é um fator crescente no desenvolvimento de produtos, tanto no que diz respeito ao tipo de matéria prima utilizada bem como se o processo de fabricação causa algum impacto ambiental.”

Portanto, um material alternativo que venha a explorar essas lacunas, ou com uma substituição parcial de materiais cimentícios ou mesmo para uso em substituição integral ao cimento Portland seria de grande valia nesse contexto. Esse pode ser o caso do uso de ligantes álcali-ativados (geopolímeros) em substituição ao cimento Portland. Contudo, informações para o desenvolvimento de *paver* de concreto geopolimérico ainda são escassas na literatura.

## **2. PROBLEMÁTICA DE PESQUISA E QUESTÕES MOTIVADORAS**

A busca por alternativas produtivas faz parte do desenvolvimento da engenharia e, no contexto de pavimentos intertravados, apesar do *paver* de concreto convencional ser um produto já estabelecido comercialmente, há algumas lacunas no processo de produção a serem exploradas, por exemplo. Já que o material consiste em concreto pré-fabricado de consistência seca, a necessidade de uma vibro-prensagem é inerente ao processo que o torna mais viável, se comparado ao concreto autoadensável, e o equipamento para o processo de vibro-prensagem possui alto custo, talvez podendo ser dispensado com uso de materiais diferentes do concreto seco atualmente empregado em *pavers* convencionais. Além disso, a redução do uso de ligante do tipo cimento Portland pode ser vista como uma necessidade para os produtores de *pavers*.

### **2.1 Problema de Pesquisa**

O problema que será abordado neste trabalho é a ausência de informações técnicas necessárias para investimentos no desenvolvimento de *pavers* geopoliméricos.

### **2.2 Questões Motivadoras**

- a) Em que etapas se concentram os principais problemas produtivos de *pavers* de concreto convencional que podem ser melhorados com uso de outros ligantes?
- b) Um *paver* de concreto geopolimérico será capaz de contornar esses problemas?
- c) Quais são os requisitos econômicos e técnicos para que esse produto seja competitivo?



### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar requisitos técnicos e custos para desenvolvimento de *pavers* de concreto geopolimérico.

#### 3.2 Objetivos Específicos

De modo a alcançar o objetivo geral deste trabalho, serão necessários os seguintes objetivos específicos:

- Investigar a estrutura de custos de *pavers* convencionais
- Compor a estrutura de custos do *paver* geopolimérico proposto
- Definição de requisitos para viabilidade técnica e econômica

### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 4.1 *Pavers*

##### 4.1.1 Utilização no Escopo Atual

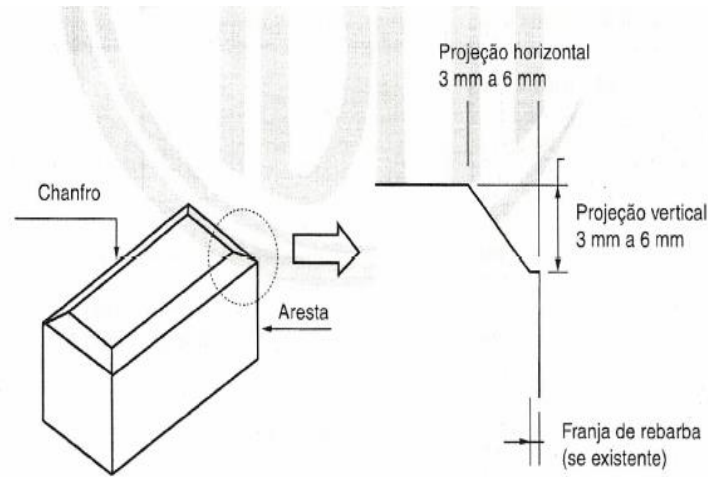
Os pavimentos intertravados são utilizados há muito tempo, com origem nos pavimentos revestidos com pedras na Mesopotâmia há quase 5.000 anos a.C. e muito utilizados pelos romanos entre 1.000 a.C. e 500 d.C. (ABCP, 2010). Atualmente, esse modelo de pavimentação vem apresentando boas vantagens em relação aos seus concorrentes, tais como a rápida liberação do tráfego devido à facilidade de manutenção, além de usos urbanos com benefícios como a redução de velocidades médias e de distâncias de frenagem (JUNIOR, 2007).

A definição, de acordo com a NBR 9781(2013):

“piso intertravado é um pavimento flexível cuja estrutura é formada por uma camada de base (ou base e sub-base), seguida por camada de revestimento constituída por peças de concreto justapostas em uma camada de assentamento e cujas juntas entre as peças são preenchidas por material de rejuntamento e o intertravamento do sistema é proporcionado pela contenção.”

A Figura 2 representa a análise dimensional para uma peça de bloco de pavimento intertravado (*paver*).

Figura 2 – Peça de concreto para pavimento intertravado ou paver



Fonte: NBR 9781 (2013)

#### 4.1.2 Principais Propriedades e Ensaio

Os pavimentos intertravados de concreto convencional, segundo Fernandes (2016), utilizam Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI) na produção. A razão é que o material apresenta algumas vantagens se comparado aos outros tipos de cimento, tais como a desforma mais rápida, aumentando a produção e dispensando maiores espaços para estocagem, e o aspecto da cura térmica. A cura térmica pode ser esclarecida pelo motivo de que os pavimentos intertravados secam no pátio e o ganho de resistência após cerca de uma semana (tempo normal de cura dos blocos) é aproximadamente nulo.

No que diz respeito aos agregados graúdos utilizados em *pavers* podem ser decorrentes do britamento de rochas, cascalhos ou seixos rolados. Segundo Wiebbeling (2015), normalmente são utilizadas britas entre 19mm e 12,5mm, sobretudo devido à aderência com o ligante.

De acordo com Petterman (2006), os fabricantes utilizam areias médias, com módulos de finura variando entre 2,5 e 3,2, evitando areias grossas que dificultam a compactação devido à interferência das partículas. Ademais, é preconizado ressaltar que quanto mais fina é a areia, mais lisa será a superfície do *paver*. Contudo, há tendência de se

observar uma perda da resistência ou o aumento do consumo de cimento. Segundo Fernandes (2006), a razão para esse fenômeno seria que, com o aumento da finura, maior superfície de grãos precisa ser recoberta pelo cimento (aumento da superfície específica média dos agregados).

No processo de fabricação, a água deve estar isenta de substâncias que possam prejudicar as reações de hidratação do cimento. No que diz respeito à vibro-prensagem, segundo Silva (2020), nas misturas mais secas o equipamento pode dar uma falsa sensação de rendimento. A razão seria que as peças estão mais soltas e preenchem as fôrmas com facilidade, contudo, por resistirem ao processo de compactação, os blocos encaminham-se a exigir um equipamento com mais capacidade de energia de compactação.

Entre os ensaios comumente realizados em *pavers*, são citados na literatura técnica vários aspectos que o *paver* deve ser avaliado, tais como análise dimensional, absorção de água, retração, resistência à compressão, abrasão, entre outros (FERNANDES, 2016). Contudo, a norma brasileira NBR 9781/2013 prioriza os ensaios de resistência à compressão, absorção de água e a resistência à abrasão, sendo estes que terão maior ênfase no trabalho para definição de critérios normativos.

Segundo a NBR 9781/2013, o ensaio de compressão consiste na avaliação da resistência do corpo-de-prova à diferentes quantidades de pressão de uma prensa. Já a absorção de água é a diferença de massa percentual após o corpo saturado ser depositado em uma estufa durante um período de 24h, para poder, enfim, ser medida a massa de água absorvida. O ensaio de abrasão, que é um ensaio facultativo, consiste na medição da cavidade da face do corpo-de-prova em contato com um disco que rotaciona.

#### **4.1.3 Critérios e Requisitos Técnicos**

Nos aspectos de dimensionamento de acordo com a norma NBR 9781/2013, as peças de concreto devem ter uma resistência característica à compressão de 35 MPa, para tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha; e 50MPa para tráfego de veículos especiais e maiores solicitações. No quesito de absorção de água, a peças devem apresentar valor médio menor ou igual a 6%, não sendo admitido nenhum valor singular maior que 7%. Já a resistência à abrasão consiste na análise da cavidade máxima em milímetros da face do bloco após o corpo de prova ser submetido a um disco rotativo. O máximo tolerável sendo igual a 23mm para tráfego de pedestres e veículos leves, e igual a 20mm para tráfego de veículos especiais capazes de causar efeitos de abrasão mais

agravantes. Abaixo, seguem as Tabelas 1 e 2 contendo diretrizes de alguns países no que diz respeito à exigência de resistência à compressão e de absorção de água, respectivamente, em blocos de pavimentos intertravados.

Tabela 1 – Limites aceitáveis de compressão para pavers em diferentes países

Normas	Tipo de tráfego	Variável	Limites Admissíveis (MPa)
ABNT NBR 9781 (2013) (Brasil)	Veículos especiais ou cargas que provocam maiores efeitos de abrasão	Valor Característico	$\geq 50$
	Veículos comerciais		$\geq 35$
ASTM C936 (2018) (Estados Unidos)	Qualquer tráfego	Valor Médio	$\geq 35$
		Valor Individual	$\geq 50$
CSA A231.2 (2014) (Canadá)	Qualquer tráfego	Valor Médio	$\geq 50$
		Valor Individual	$\geq 45$
CNS GB 28635 (2012) (China)	Qualquer tráfego	Valor Médio	$\geq 30$
		Valor Individual	$\geq 25$
SA AS/NZS 4456.4 (2003) (Austrália)	Veículos especiais ou cargas que provocam maiores efeitos de abrasão	Valor Característico	$\geq 60$
	Veículos comerciais		$\geq 25$
	Ciclovias e Estacionamentos		$\geq 15$

Fonte: Adaptado de Silva (2020).

Tabela 2 – Limites aceitáveis de absorção de água para pavers em diferentes países

Normas	Variável	Limites Admissíveis (%)
ABNT NBR 9781 (2013)(Brasil)	Valor Médio	$\leq 6,0$
	Valor Individual	$\leq 7,0$
ASTM C936 (2018)(Estados Unidos)	Valor Médio	$\leq 5,0$
	Valor Individual	$\leq 7,0$
CEN EN 1338 (2003)(União Européia)	Valor Médio	$\leq 6,0$
	Valor Individual	$\leq 6,0$
CNS GB 28635 (2012)(China)	Valor Médio	$\leq 6,5$
	Valor Individual	$\leq 6,5$
BIS IS 15658 (2006)(Índia)	Valor Médio	$\leq 6,0$
	Valor Individual	$\leq 7,0$

Fonte: Adaptado de Silva (2020)

É possível observar algumas diferenças entre os limites aceitáveis entre alguns países, algumas diferenças podendo ser explicadas por questões climáticas. Canadá e Estados Unidos possuem invernos mais severos, propiciando formação de gelo nas estradas, afetando, dessa forma, a durabilidade das fixação das peças, segundo Rodrigues (1984).

Já no Brasil, os limites normativos são mais elevados, já que não levam em conta uso dos blocos de pavimento intetravado em casos de solicitações menores, como praças, pátios, ciclovias e calçadas. No contexto da absorção de água, os valores entre os requisitos são muito próximos. Isso evidencia que fatores climáticos não serviram como indicadores na durabilidade dos blocos de pavimento intetravado.

## **4.2 Geração de Resíduos Industriais no Escopo Estadual**

### **4.2.1 Cinzas Volantes**

A formação das cinzas se dá ela combustão direta do carvão fóssil, o qual é uma matéria-prima sólida, composta por duas frações intrinsicamente misturadas, uma orgânica, constituída por material volátil e carbono, e uma inorgânica, constituída por argilas, quartzos, carbonatos, etc. (SILVA, 2011).

Na queima do carvão são gerados os seguintes tipos de cinzas (Rohde *et al.*, 2006):

- Cinza volante – constituída por partículas extremamente finas (100% com dimensão inferior a 0,15mm), transportada pelo fluxo dos gases da combustão, coletada nos filtros, ciclones mecânicos ou precipitadores eletrostáticos ou, ainda, lançada na atmosfera;
- Cinza pesada – é mais pesada e de granulometria mais grossa que a cinza leve, caindo no fundo das fornalhas e gaseificadores, de modo frequente sendo retirada por um fluxo de água;
- Escória – é a cinza originada na queima ou gaseificação do carvão granulado em grelhas móveis. Retirada pelo fundo da fornalha após ser resfriada com água. Frequentemente, apresenta granulometria grosseira e blocos sinterizados, tendo teores de carbono não queimado entre 10 e 20%.

No Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), no estado do Ceará, estão localizadas duas das principais termelétricas do Estado (Pecém I e Pecém II), no município de São Gonçalo do Amarante. Segundo Araújo (2018) e Alcântara (2018), foram produzidas nos anos de 2017 e 2018, respectivamente, 447 e 381 toneladas de cinzas diariamente, sendo que 40% foram realocadas e reutilizadas em uma empresa cimenteira e 60% armazenadas no

próprio pátio da usina, o que direciona a busca por novos meios de aproveitamento desse material, como a utilização em *pavers* de concreto geopolimérico.

#### **4.2.2 Escória de Aciaria BOF**

A aciaria é uma usina siderúrgica com o propósito de produzir aço na forma de produtos semiacabados. No processo de fabricação de aço em um conversor a oxigênio (*Basic Oxygen Furnace*, BOF), a sucata e o ferro gusa no estado líquido são adicionados, para posteriormente ser introduzida uma lança injetando oxigênio em alta velocidade. O oxigênio e a cal virgem são utilizados para a eliminação de elementos indesejados no aço, como teor de carbono, silício e fósforo. Por fim, é gerado o aço e a escória que ficam separados devido à diferença de densidade.

No que concerne à escória, com a produção de aço no estado do Ceará chegando a 2,8 milhões de toneladas por ano, segundo o Instituto Aço Brasil (2021), IABr, há uma produção de 150kg de escória BOF para cada tonelada de aço produzida (SILVA *et al.*, 2016), que ilustra uma grande quantidade de material que pode ser reaproveitada em outros produtos. Ademais, de acordo com o IABr (FREITAS, 2018), no ano de 2015, o destino de aplicação das escórias foi o seguinte: 46% para bases de pavimentos rodoviários, 2% para produção de cimento, 1% para uso agrônômico, 41% para nivelamento de terrenos e 11% em outras destinações. Desses destinos, apenas 2% foram direcionados aos aterros, minimizando impactos ambientais, até porque, de acordo com a norma brasileira NBR 10.004/2004, esse resíduo encontra-se na classe II-A, resíduos não perigosos e não inertes, sendo assim obrigados ao processo de reciclagem, como recomendado pela resolução 448/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (JUNIOR, 2012).

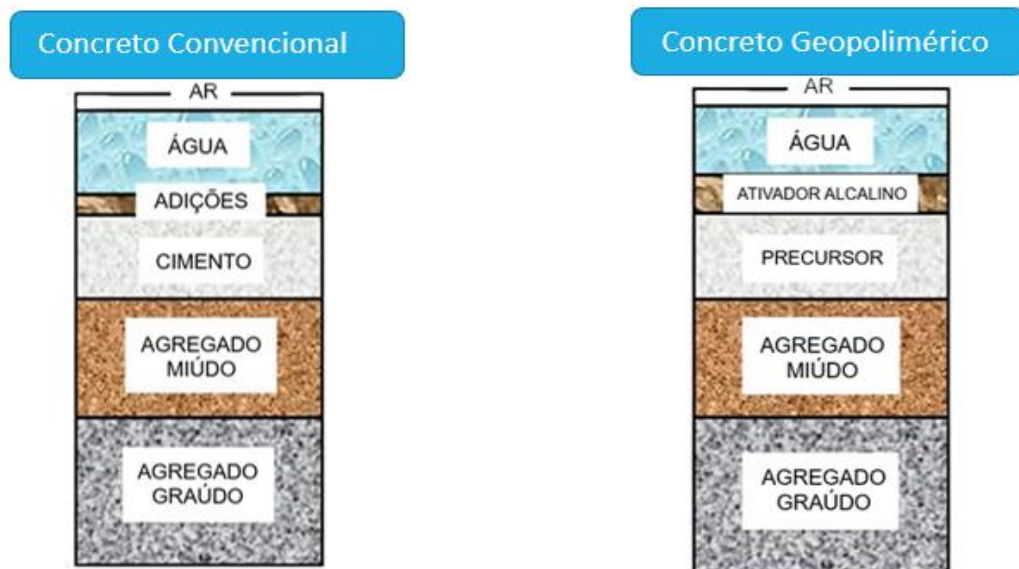
### **4.3 Concreto Geopolimérico**

#### **4.3.1 Ligante Álcali-Ativado e Cimento Geopolimérico**

Um concreto geopolimérico, segundo Davidovits (2013), é composto pelas mesmas fases de um concreto convencional: agregado graúdo, agregado miúdo, ligante e água, mas com a substituição do cimento Portland por uma combinação de ativador alcalino (silicato solúvel, NaOH<sub>2</sub>, etc.) com precursor rico em alumino silicatos. Estes podem ser cinzas volantes, cinzas de casca de arroz, escória de alto-forno, etc, de modo que ocorra uma ativação alcalina e o material ganhe resistência através do consumo desses resíduos. Esses

ligantes costumam possuir cura mais rápida que o cimento do tipo Portland, já que alcançam grande parte de sua resistência em um período de 24h (DAVIDOVITS, 2013). A Figura 3 a seguir ilustra a estrutura em termos de distribuição volumétrica dos dois materiais

Figura 3 – Ilustração da composição do concreto convencional e do concreto geopolimérico



Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2020)

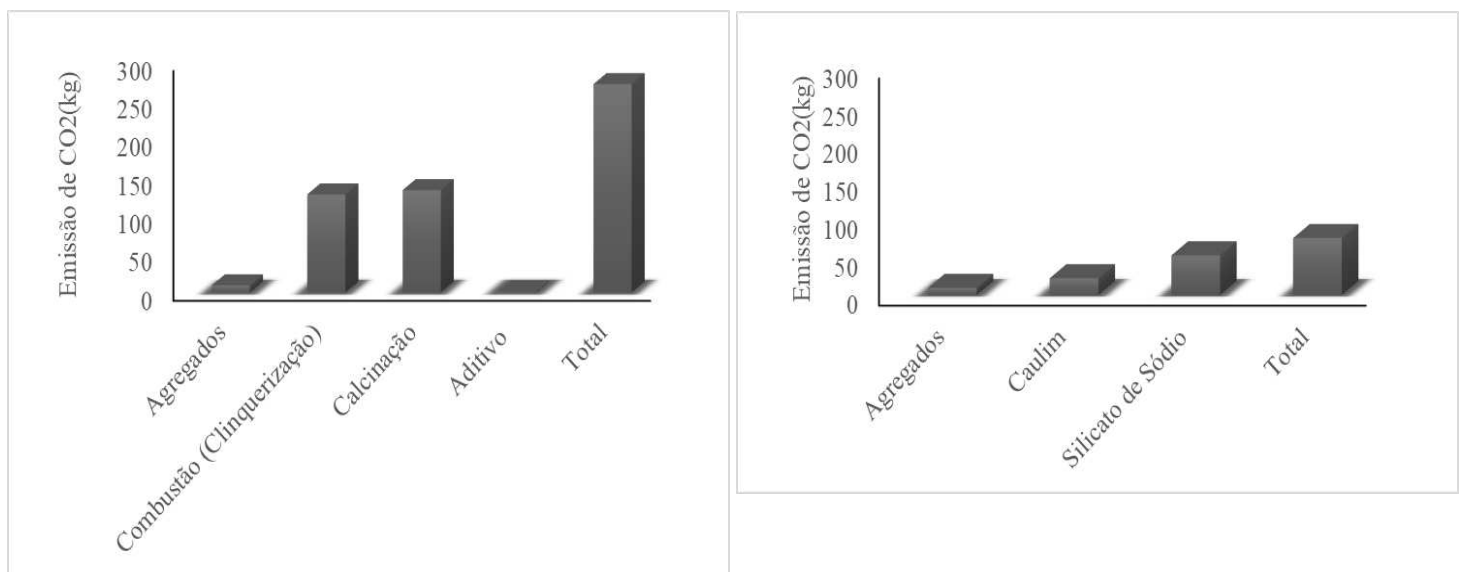
#### 4.3.2 Utilização de Resíduos nos Pavimentos Intertravados

Existem vários resíduos que podem ser utilizados como precursores dos ligantes geopoliméricos, mas como o objeto de estudo deste trabalho será composto por escória BOF e cinzas volantes, o estudo de artigos que são compostos, na maioria, por esses materiais, serão priorizados. As cinzas possuem várias origens, seja da queima da casca de arroz, do bagaço da cana-de-açúcar ou carvão mineral (SILVA, 2020), isso ilustra que há uma constante busca pela reutilização dessas cinzas.

### 4.3.3 Principais Propriedades e Ensaios

Entre as vantagens que o concreto geopolimérico pode apresentar em comparação ao concreto convencional, é possível citar uma maior resistência em pequenas idades, rápido tempo de pega, segundo Wang (1991), a ocorrência do tempo de pega ocorre logo após 15 minutos. Outras vantagens são a boa resistência a ataques químicos e altas temperaturas, além da menor emissão de CO<sub>2</sub> no processo de produção. Contudo, entre as desvantagens é importante salientar que alguns ativadores possuem custo elevado, a variação da composição química dos resíduos ricos em alumino silicatos exige mais cuidado com a preparação dos mesmos. Finalmente, é importante notar que há um aspecto de regionalização desses resíduos, que não são disponíveis em qualquer localidade. Abaixo, a Figura 4 apresenta a discrepância da pegada de carbono entre os dois materiais, chegando a uma diferença de 72,4%.

Figura 4 – Diferença da emissão de CO<sub>2</sub> entre concreto convencional e concreto geopolimérico



Fonte: Adaptado de Borges, Lourenço, Foureaux e Pacheco (2014).

Entre os ensaios mais utilizados, segundo Phillip *et al.* (2021), na Índia, em um *paver* geopolimérico composto por cinza volante, escória granulada de alto forno e resíduos de telhas de cerâmica substituindo o agregado graúdo, foram realizados ensaios de compressão aos 28 dias, tração e absorção de água. Em outro estudo também realizado na Índia, composto por metacaulim e nanosílica (LINCY *et al.*, 2020) foram realizadas análises de densidade, resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão. É notória a



similaridade com os ensaios utilizados pela norma brasileira de *pavers* convencionais. Porém, sublinha-se que, como o material apresenta diferentes propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido, é necessário atentar para outros aspectos, tais como a resistência a ataques químicos e permeabilidade, de acordo com os mesmos autores.

## 4.4 Desenvolvimento de Produto e Engenharia de Requisitos

### 4.4.1 Conceituação e Planejamento do Produto

No que concerne ao desenvolvimento de produto, para Wheelwright & Clark (1992 *apud* SILVA, 2002), o processo é dividido em várias fases ou etapas, de forma a melhorar a compreensão da estrutura completa. Essas fases, segundo os autores são: conceituação; planejamento e especificação; desenvolvimento; teste e avaliação, liberação do produto. Este trabalho encontra-se na fase de conceituação, já que pretende fornecer requisitos para que um produto seja viável frente a um que já está estabelecido no mercado. Para Akkari & Carpi (2019):

“Podemos definir um produto como sendo um conjunto de requisitos produzido e disponibilizado para compra aos clientes, com o objetivo de atender uma ou mais necessidades do mercado, agregando valor e gerando benefícios ao consumidor.”

No levantamento de necessidades e definição de requisitos, desenvolvido originalmente na área de Engenharia de *Softwares*, há vários métodos que podem ser utilizados, tais como a “*User’s Journey*” (jornada do usuário) e a “*Backlog Building*” (acumulação de pendências). Para outras áreas, como a utilidade desenvolvida é um produto físico, os métodos são simplificados, já que existem aspectos de um *software* que não são necessários a um produto físico.

Segundo Caroli *et al.* (2020), *User’s Journey* consiste em uma descrição textual breve de uma pequena parte da funcionalidade desejada por um usuário final, por exemplo: quais melhorias o cliente ou o próprio projetista gostariam de encontrar no produto ou no processo de produção, quais “dores” poderiam ser evitadas ou contornadas na fabricação. Já *Backlog Building*, consiste no trabalho acumulado, ou o que já foi desenvolvido até aquele momento, para determinado produto. Pode-se citar a priorização de atualizações, as melhorias, dentro de uma ordem lógica, onde os principais fatores são o valor, o custo e os riscos relacionados a se realizar determinada mudança. (Caroli *et al.*, 2020).

Ademais, o gerenciamento de requisitos de um novo produto tem se tornado cada vez mais complexo na indústria, juntamente à evolução da complexidade dos produtos. A ausência de informações técnicas e de requisitos nos estágios iniciais do desenvolvimento de um novo produto pode acarretar a um mau funcionamento e até mudanças completas posteriores no material.

#### **4.4.2 Pesquisa Qualitativa para Desenvolvimento de Produto**

Uma entrevista é “o encontro entre duas pessoas a fim de que uma delas obtenha informações sobre determinado assunto, mediante uma conversação de natureza profissional” (Marconi & Lakatos, 1999). Consiste, então, em uma obtenção de informações verbais acerca do tema do projeto. Entre os tipos de entrevistas, pode-se citar

- Estruturada: o entrevistador segue um roteiro pré-estabelecido, com a intenção de receber respostas dos entrevistados às mesmas perguntas;
- Semiestruturada: composta por perguntas abertas e fechadas, que podem ser respondidas dentro de uma conversação informal, além de se permitir delimitar o volume de informações, delimitando-se dentro do tema
- Não Estruturada: o entrevistador tem liberdade para desenvolver cada situação em qualquer direção

Em uma pesquisa de mercado, há dois tipos de entrevista, de acordo com Lodi (1986). A primeira utiliza um questionário e aborda uma amostra determinada do público, de forma a atender o mercado pelo ponto de vista dos clientes. A segunda é a que mantém conversações informais com autoridades, experts e formadores de opinião, com intuito de avaliar a perspectiva de mercado pelos fornecedores do serviço ou produto. Esta última requer do entrevistador certo conhecimento acerca do tema, bom julgamento e obter o máximo de respostas em uma entrevista

Entre os objetivos da entrevista, de acordo com Selltiz (1965), que poderão ser abordados nesse projeto, estão a averiguação de “fatos” (verificação de hipóteses) e a determinação de opiniões sobre os “fatos” e condutas atuais ou passadas sobre determinadas situações.

Ademais, segundo Duarte (2004), para a realização de uma boa entrevista, é necessário que o pesquisador tenha os objetivos muito bem definidos; que ele conheça, com alguma profundidade, o contexto em que pretende realizar sua investigação; exista algum

nível de informalidade, sem jamais perder os objetivos que levaram a buscar aquele sujeito específico como fonte de material para a investigação e coleta de dados.

#### 4.4.3 Definição e Priorização de Requisitos

Segundo Chen e Zeng (2006), o número de requisitos de um produto pode ser enorme e é necessária uma priorização desses requisitos de acordo com uma ordem de relevância. Os requisitos podem ser divididos nas seguintes oito categorias: leis naturais; leis sociais e regulamentadoras; limitações técnicas; custo, tempo e recursos; funções básicas; funções estendidas; controle excepcional; conexão com usuário. A Figura 5 demonstra a hierarquia desses requisitos conforme Chen e Zeng (2006).

Figura 5 – Hierarquia de Requisitos



Fonte: Adaptado de Chen e Zeng (2006)

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada no desenvolvimento deste projeto será fundamentada na investigação e no detalhamento do processo de *pavers* convencionais, principalmente, de forma a realizar um levantamento de custos e possíveis “gargalos” produtivos que possam ser explorados pela estruturação dos custos de um *paver* geopolimérico.

### 5.1 MATERIAIS

#### 5.1.1 *Paver* de Concreto de Cimento Portland

O *paver* de concreto convencional é utilizado neste projeto, como referência para comparação e como produto a ser equiparado ao concreto geopolimérico protótipo, já que o composto a ser desenvolvido precisa ser tecnicamente e economicamente compatível com o bloco de concreto que já se encontra estabelecido no mercado atual. Quanto à geometria, o *paver* analisado possui 10 cm de comprimento, 20 cm de altura e 8 cm de espessura.

O traço do concreto a ser adotado será um similar ao traço utilizado por empresas de blocos de pavimento intertravado da cidade de Fortaleza, também utilizado por Silva (2020) para análise de viabilidade econômica. O traço unitário em massa do concreto convencional em questão é:

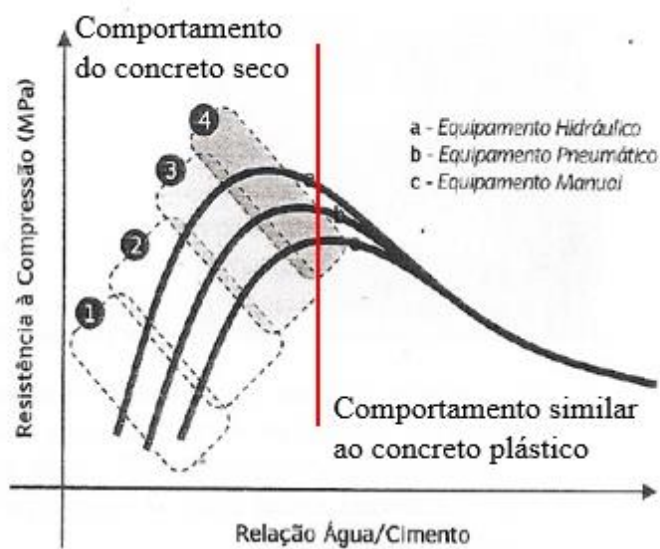
$$1,00 : 4,66 : 1,97 : 0,45 : 0,63$$

(cimento : areia média : brita 4,75-12,5 mm : brita 9,5-25 mm : fator água/cimento)

O traço pode justificado de acordo com Rodrigues (1984), que cita que as propriedades mecânicas de concretos secos (de abatimento de tronco de cone nulo ou quase nulo e aspecto seco, muitas vezes tratado como concreto “farofa) nem sempre são equivalentes às dos concretos plásticos. Como a relação água cimento é relativamente menor se comparada que em concretos plásticos, inserir maiores quantidades de água em alguns casos pode proporcionar ganhos na trabalhabilidade da mistura que permitem melhor compactação, o que ocasiona menor número de vazios no interior do concreto, e, portanto, aumento na resistência à compressão, como é ilustrado na Figura 6. Ou seja, há um desvio quanto ao que se espera em concretos plásticos quanto ao aumento da relação água/cimento (*a/c*), que costuma ser regida por equações da lei de Abrams (o aumento de *a/c* provocando diminuições na resistência).

Entre os parâmetros dos agregados, será utilizada uma areia com massa unitária de  $1470,5 \text{ kg/m}^3$  e índice de vazios de 42%; brita 4,75-12,5 com massa unitária de  $1406,7 \text{ kg/m}^3$  e índice de vazios igual a 46,3%; brita 9,5-25mm com massa unitária de  $1487,25 \text{ kg/m}^3$  e índice de vazios igual a 43,4%. Após a compactação, o aspecto de um *paver* de concreto convencional é aproximado ao do apresentado na Figura 7.

Figura 6 – Comportamento do concreto seco em relação à adição de água



- ① Região 1 - Mistura muito seca, não há água suficiente para hidratar todo o cimento.
- ② Região 2 - Mistura seca, há água para o cimento mas o equipamento tem dificuldade para adensar.
- ③ Região 3 - Mistura na umidade adequada para a produção (umidade ótima).
- ④ Região 4 - Mistura muito úmida, difícil alimentar, cria rebarbas e deforma as peças.

Fonte: Adaptado de Fernandes, 2016.

Figura 7 – *Paver* de concreto de cimento Portland



Fonte: <https://alfablock.com.br/pavimento-intertravado/paver-10x20x8-alto>. Acesso em 25/01/2022.

### 5.1.2 Paver de Concreto Geopolimérico Protótipo

O ligante do concreto geopolimérico proposto será constituído de 25% de escória de aciaria BOF e 75% de cinzas volantes como precursores, silicato solúvel ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) como iniciador da reação e hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) para fornecimento de um meio alcalino para a reação. O hidróxido de sódio possui  $1,305 \text{ g/cm}^3$  de densidade em solução de  $10 \text{ mol/L}$ , e o silicato solúvel possui  $1,583 \text{ g/cm}^3$  de densidade, em solução preparada industrialmente.

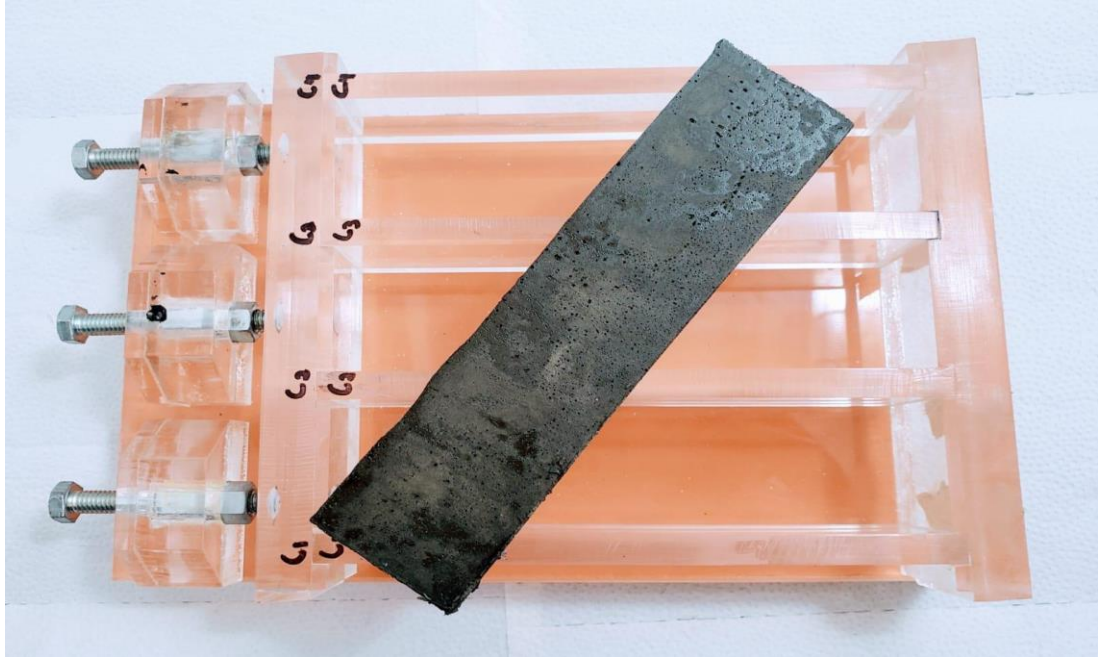
Abaixo seguem ilustrações de corpos de prova do ligante geopolimérico (Figuras 8 e 9), bem como o rompimento dos mesmos em ensaios de compressão (Figura 10), realizados em pesquisas de caracterização de ligantes álcali-ativados paralelas a este trabalho que focam em concretos álcali-ativados para *pavers*.

Ademais, os parâmetros de dosagem do concreto geopolimérico (BENÍCIO, 2022), na Tabela 3 a seguir, fornecem dos dados do consumo de insumos por metro cúbico de concreto. Isso servirá de base para a composição de custos desse produto posteriormente. Será utilizado o menor teor de pasta para os cálculos de insumos (BENÍCIO, 2022), com o intuito, posteriormente, de avaliar também a influência do teor de pasta no custo do produto. Isso porque o excesso de pasta não terá função estrutural após a reação, podendo causar excesso de vazios e aumento da quantidade de água no material.

Além disso, vale ressaltar que o concreto geopolimérico possui um endurecimento bastante rápido, se comparado ao concreto convencional (DAVIDOVITS, 2013). No cenário de *pavers*, por necessitar de fôrmas, a princípio o concreto geopolimérico poderia ser comparado ao *paver* dormido, por exemplo, que necessita de um tempo nas fôrmas para ganhar resistência.

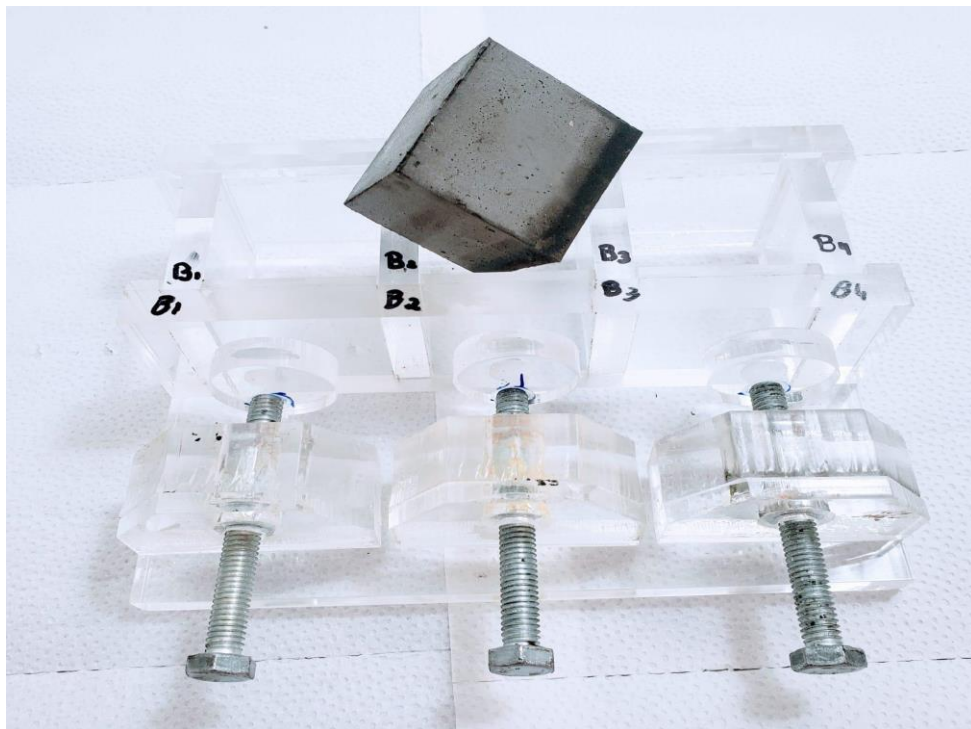
Contudo, a reação de ganho de resistência pela ativação alcalina é rápida (e por vezes, violenta, sendo recomendado a utilização de equipamento de proteção individual para os funcionários), e o *paver* geopolimérico tem uma tendência de uma maior produtividade se comparado ao *paver* dormido, visando a competição, dessa forma, com o *paver* prensado. Isto posto, para um processo de produção em larga escala, seria necessário maquinário de movimentação do produto, de forma a otimizar a produção e a estocagem.

Figura 8 – Corpo-de-prova prismático de ligante geopolimérico



Fonte: Benício, 2022

Figura 9 – Corpo-de-prova cúbico de ligante geopolimérico



Fonte: Benício, 2022

Figura 10 – Fotografia de corpo-de-prova cúbico rompido em ensaio de compressão



Fonte: Benício, 2022

Tabela 3 – Consumo de materiais do concreto geopolimérico

<b>Dosagem de Concretos Álcali-Ativados</b>						
<b>Teor de Pasta (%)</b>	<b>CV (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>BOF (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>NaOH (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Areia(kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Brita 9,5 - 25 mm (kg/m<sup>3</sup>)</b>
0,32	236,7	236,7	64,3	148,7	612,4	804,4

Fonte: Adaptado de Benício (2022)



## 5.2 MÉTODOS

### 5.2.1 Entrevistas com Empresas Locais/Projetista

Por meio de uma pesquisa de mercado, utilizando uma entrevista semiestruturada com projetistas executivos de *pavers*, averiguou-se o processo produtivo de *pavers* de concreto convencional, tanto para o levantamento de custos como para obter informações sobre os problemas mais comuns do processo construtivo. Segue, abaixo o questionário utilizado para pesquisa qualitativa.

1. Quais ensaios são, de fato, utilizados para o controle de qualidade do concreto antes da moldagem dos *pavers*?
2. Quais ensaios são utilizados para o controle de qualidade dos *pavers* de concreto após a desmoldagem dos *pavers*?
3. Quais são os principais desafios tecnológicos enfrentados pela sua empresa na produção e na execução de blocos de pavimento intertravado com concretos secos?
4. Se pudesse, o que você mudaria no processo de produção e execução dos *pavers*?
5. Quais etapas do processo produtivo possuem maior custo, e, portanto, beneficiariam mais de modificações?
6. Haveria benefício em redução da necessidade de vibração?
7. Haveria prejuízo no incremento de necessidade de estocagem? A que limite?
8. Estamos desenvolvendo um novo produto. Quais aspectos você gostaria que pudessem ser implementados neste novo material, tendo como ponto de partida o *paver* de concreto de cimento Portland utilizado atualmente?

### 5.2.2 Levantamento de Custos Unitários dos Materiais e Processos

Foi realizada uma investigação de custos unitários dos materiais e processos necessários para produção e execução de *pavers* convencionais. Isso foi conduzido tanto utilizando informações de tabelas públicas utilizadas em obras quanto utilizando informações de mercado. Desse modo, buscou-se propor uma estrutura de custos dos materiais e processos para o *paver* geopolimérico em estudo, contatando fornecedores dos materiais que o compõe bem como revisando na literatura em produtos similares.

Para o cálculo da composição de insumos e de processos, foram utilizadas tabelas com base na SEINFRA (Secretaria da Infraestrutura), já que é uma das principais referências de engenharia de custos no País, e descrevem detalhadamente os insumos e mão de obra necessários na execução desse serviço.

No cálculo de insumos para o concreto convencional foi utilizado o traço do concreto fornecido e calculado o consumo de cada material através das Equações 1 e 2 de Helene e Terzian (1992).

$$C = \frac{1000 - ar}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + a/c} \quad (1)$$

$$C_{mat} = C \times P_{mat} \quad (2)$$

Onde:

C: consumo de cimento por metro cúbico de concreto adensado (kg/m<sup>3</sup>);

C<sub>mat</sub>: consumo dos materiais componentes do concreto (kg/m<sup>3</sup>);

ar: teor de ar incorporado e/ou aprisionado do concreto por metro cúbico (dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>);

γ<sub>c</sub>: massa específica do cimento (kg/dm<sup>3</sup>);

γ<sub>a</sub>: massa específica do agregado miúdo (kg/dm<sup>3</sup>);

γ<sub>p</sub>: massa específica do agregado graúdo (kg/dm<sup>3</sup>);

a: relação de agregado miúdo, em função do cimento, no traço;

p: relação de agregado graúdo, em função do cimento, no traço;

a/c: fator água/cimento;

P<sub>mat</sub>: relação do material componente do concreto, em função do cimento, no traço.

A Tabela 4 a seguir, é mostrado um exemplo da composição de serviços sem desoneração utilizada pela SEINFRA (2021). Na primeira coluna das tabelas da SEINFRA, é apresentado um Código, que é a numeração didática para o engenheiro de orçamentos enumerar as linhas do orçamento em ordem crescente. Na segunda coluna, que abrangem os Componentes, é apresentada uma descrição teórica detalhada do item a ser calculado. Na terceira coluna, a Unidade é apresentada a depender do item a ser calculado, podendo ser em horas, metros cúbicos, litros, etc. A quarta coluna apresenta o coeficiente de consumo, que deve ser multiplicado pelo Preço, este a ser levantado através da pesquisa de preços no mercado local, e, dessa forma, obter um preço médio.

Tabela 4 – Representação de composição de serviços

C4917 - PISO INTERTRAVADO TIPO TIJOLINHO (20X10X8) CM 35 MPA, COR CINZA - COMPACTAÇÃO MECANIZADA - M <sup>2</sup>					
EQUIPAMENTOS (CHORARIO)		UNID ADE	COE FICI ENTE	PREÇO	TOTAL
I0612	COMPACTADOR DE PLACA VIBRATORIA HP 7 (CHI)	H	0,1211	29,5707	3,5810
I0725	COMPACTADOR DE PLACA VIBRATORIA HP 7 (CHP)	H	0,0055	44,2749	0,2435
MÃO DE OBRA				TOTAL	3,8245
I0445	CALCETEIRO	H	0,2531	23,17	5,8643
I2543	SERVENTE	H	0,2531	17,14	4,3381
MATERIAIS				TOTAL	10,2025
I0109	AREIA MÉDIA	M <sup>3</sup>	0,0568	67,5	3,8340
I2403	PÓ DE PEDRA	M <sup>3</sup>	0,0087	60,46	0,5260
I9104	BLOQUETE/PISO INTERTRAVAO DE CONCRETO - MODELO RETANGULAR/TIJOLINHO/PAVER/HOLANDES/PARALELEPÍPEDO, 20 CM X 10 CM, E = 8 CM, RESISTÊNCIA DE 35 MPA (NBR 9781), COR NATURAL	M <sup>2</sup>	1,003	42,69	42,8181
				TOTAL	47,1781

Fonte: SEINFRA (2021)

É possível observar que os custos processuais de aplicação para *pavers* de concreto convencional e de concreto geopolimérico tendem a ser equivalentes, não devendo haver efeito do tipo de material constituinte do *paver* na dificuldade de construir o pavimento intertravado. Portanto, a diferença de custo entre os dois se dará pelo custo unitário a ser calculado a um traço específico de concreto de cimento Portland, que serve como referência de preço para o traço utilizado na pesquisa para o concreto geopolimérico.

Dessa maneira, a lógica de cálculo de custos adotada para cada etapa do cálculo processual foi de que o custo total equivale à multiplicação de um Coeficiente por um Custo Unitário pela Quantidade de Unidades. O coeficiente, por sua vez, depende de convenções coletivas das diversas categorias profissionais, do salário mínimo e da pesquisa de preço de insumos no mercado. Tal processo é repetido para cada linha na tabela de custos, que corresponde ao custo de uma dada parte do material a ser fabricado. Ao final do cálculo total de todas as linhas, o somatório dessas linhas será o custo total do orçamento.

No cálculo da influência do custo da máquina de vibroprensagem, foi feita uma análise de sensibilidade envolvendo o custo anual equivalente ao investimento inicial da máquina, ao custo de operação e ao custo da manutenção periódica, assim como a produção anual de blocos e o tempo de vida útil da máquina. Tais fatores influenciam o custo por bloco de concreto convencional além de serem parâmetros que envolvem algum nível de incerteza e que são cruciais para a viabilidade do material alternativo (concreto geopolimérico, para o qual se planeja dispensar a vibroprensagem).

O custo anual equivalente pode ser calculado de acordo com as Equações 3 e 4, a seguir:

$$CAE = \frac{VPL}{A} \quad (3)$$

$$A = \frac{1 - \frac{1}{(1+i)^t}}{i} \quad (4)$$

Onde:

CAE: custo anual equivalente;

VPL: valor presente líquido;

A: fator de anuidade do valor presente;

i: taxa mínima de atratividade;

t: período.

### 5.2.3 Análise de Resultados Obtidos

Posteriormente, foram comparados os resultados obtidos entre os dois produtos (*paver* de concreto convencional e *paver* de concreto geopolimérico) nos aspectos técnicos e nos custos, utilizando a norma brasileira ABNT NBR 9781 (2013), os principais ensaios realizados e os *pavers* de concreto seco como pontos de referência, assim como foram

avaliadas as possíveis lacunas do processo produtivo que possam ser aprimoradas. Buscou-se verificar se as melhorias podem ser aplicadas no *paver* protótipo, dentro das limitações do material por ele composto.

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **6.1 Entrevistas**

Os resultados das pesquisas de opiniões foram ao encontro das hipóteses de desenvolvimento deste projeto, conforme pode ser observado nas respostas transcritas resumidamente no Apêndice. Foram feitas duas entrevistas, uma com um engenheiro voltado para projetos de pavimentos intertravados; e outra com um fabricante de blocos intertravados, que também fornece agregados para construção civil.

A primeira pesquisa não pôde fornecer informações a respeito dos processos de produção, mas quanto à análise de requisitos técnicos, as informações foram de grande valia. Como esperado, a norma NBR 9781/2013 que versa sobre pavimentos intertravados é o principal parâmetro referencial a ser seguido nos projetos de pavimentos intertravados, já que ainda não existe uma norma de concretos geopoliméricos. Internacionalmente, os parâmetros seguidos também advêm de normas regulamentadoras para blocos de pavimento intertravado.

Ademais, outros fatores levantados como importantes para a avaliação do bloco foram a inspeção visual e avaliação dimensional, além dos ensaios da NBR 9781/2013 (resistência à compressão, absorção de água e resistência à abrasão). Uma particularidade dos blocos no município de Fortaleza, citada pelo entrevistado, foi a ausência do uso de espaçadores de juntas nos *pavers*, apresentados na Figura 12 a seguir, critério este que deve ser levado em conta para o novo produto a ser desenvolvido, mas que também pode ser empregado o produto convencional.

Figura 11 – Espaçadores de juntas nos pavers



Fonte: Manual do Pavimento Intertravado

A segunda entrevista, com o fabricante de *pavers*, pôde esclarecer os aspectos remanescentes acerca da fabricação do material. Um aspecto relevante da entrevista foi a questão do uso de cimento Portland. Com a alta dos preços desse material durante a pandemia da Covid-19, o entrevistado sublinhou que a substituição, mesmo que parcial, de materiais cimentícios do processo de produção pode tornar o concreto geopolimérico competitivo, além do viés ambiental. É claro, isso dependerá dos preços que se poderá trabalhar com tais materiais. Sublinha-se que, em algumas regiões, já houve um aumento de 50,79% entre fevereiro de 2020 e fevereiro de 2021, segundo o Sindicato da Indústria da Construção Civil (Sinduscon-MG)

A questão do custo com vibroprensagem é relacionada à produtividade. Há um interesse ligado à produtividade em se utilizar concreto seco compactado por vibroprensagem. Em comparação ao *paver* virado (em que as formas são desmoldadas virando-as sobre uma superfície), por exemplo, o *paver* prensado possui uma produtividade 4 vezes maior (FERNANDES, 2013). Isto posto, a etapa mais cara do processo produtivo é justamente a vibroprensagem. Segundo o entrevistado, a máquina possui um valor de cerca de 1 milhão de euros (cerca de R\$ 6.353.500,00 – em conversão direta com valor do câmbio consultado em 13/01/2022).

É válido ressaltar que este valor varia a depender do porte da máquina, tendo em vista que existem vários tipos de vibroprensa no mercado, variando aspectos relacionados à produtividade e à potência de prensagem. Portanto, em produções de baixa ou média escala, o preço do maquinário é bem menor.

O concreto geopolimérico tem o potencial de dispensar a vibroprensagem, desde que tenha suas propriedades reológicas e de ganho de resistência adaptadas a esta aplicação. Sendo assim, o produto pode ser viável dentro do aspecto da fabricação. Isso dependerá dos custos relativos com materiais e processos, o que é investigado adiante.

## 6.2 Composição de Custos

### 6.2.1 Materiais Constituintes do Concreto Convencional

Para a composição de custos do concreto convencional, foi realizada uma pesquisa de preços dos insumos básicos (materiais constituintes) no mercado local, partindo do traço apresentado na seção de Materiais. A Tabela 5 a seguir apresenta os preços unitários dos materiais, e a Tabela 6 apresenta o consumo dos materiais, os valores médios utilizados, o custo por metro quadrado e o custo unitário dos blocos de concreto de cimento Portland, considerando apenas os materiais envolvidos (não a vibroprensagem).

Tabela 5 – Média de custos unitários de materiais do concreto convencional

Custos Unitários		
<b>Cimento</b>	0,7	R\$/kg
<b>Areia</b>	91,00	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Brita 4,75-12,5mm</b>	86,00	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Brita 9,5-25mm</b>	76,19	R\$/m <sup>3</sup>

Fonte: Autor

Tabela 6 – Composição de custos do concreto convencional desconsiderando a vibroprensagem

Traço em Massa		Consumo dos materiais		Custo de Materiais por m <sup>3</sup> de concreto		
<b>Cimento</b>	1	243,1	kg/m <sup>3</sup>	Cimento	168	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Areia</b>	4,66	1132,9	kg/m <sup>3</sup>	Areia	71,10	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Brita 4,75-12,5mm</b>	1,97	478,9	kg/m <sup>3</sup>	Brita 12,5	29,00	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Brita 9,5-25mm</b>	0,45	109,4	kg/m <sup>3</sup>	Brita 19	5,81	R\$/m <sup>3</sup>
<b>A/C</b>	0,63	153,2	kg/m <sup>3</sup>	Total =	273,91	R\$/m <sup>3</sup>
				Custo/m <sup>2</sup> =	21,91	R\$/m <sup>2</sup>
				Custo Unitário =	0,438	R\$/bloco

Fonte: Autor

É possível observar que o cimento é o material com maior influência no custo com materiais dos blocos. O material ligante ocupa cerca de 61% do valor total para o traço utilizado. O agregado miúdo foi responsável por 25% e por fim, as britas compõem 14% do total.

### **6.2.2 Materiais Constituintes do Concreto Geopolimérico**

Na estruturação de custos do concreto geopolimérico, apresentados nas Tabela 6 e 7, primeiramente foi feita a pesquisa dos insumos básicos (materiais constituintes) para preparação do ligante álcali-ativado. Em seguida, na Tabela 8, o custo do concreto álcali-ativado, que também contém agregados, é calculado utilizando-se os resultados de custos do ligante álcali-ativado.

Os ativadores hidróxido de sódio (NaOH) e silicato solúvel ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) são produtos químicos industriais a serem adquiridos por compra. Esses materiais alcalinos possuíram grande divergência de preços quando cotados em maiores quantidades pelos fornecedores de produtos químicos, chegando a haver uma diferença de dez vezes do valor para pequenas compras. Por um lado, isso tem potencial de inviabilizar o concreto geopolimérico nos casos de cotações mais elevadas, mas, por outro, fica evidente que negociações podem, com ganho de escala, viabilizar o material. No presente trabalho, foram utilizados preços condizentes com produções em larga escala cotadas diretamente com fabricantes para melhor representar a viabilidade da produção do produto. No futuro, pode haver expectativa de se obter negociações relativamente melhores.

Os precursores do concreto geopolimérico são as cinzas volantes e as escórias de aciaria, advindos da termelétrica do Pecém e da Companhia Siderúrgica do Pecém (CSP), respectivamente, em que há grande produção dos resíduos utilizados neste e em trabalhos paralelos. Os preços da cinza volante e a escória de aciaria também foram pesquisados no mercado nacional e, por fim, realizou-se uma média dos preços dos resíduos. Vale ressaltar também que a produção de cinzas e escória segue um padrão altíssimo no mercado local, em toneladas por mês. Sublinha-se que negociações de uso desses materiais em parceria com as empresas também parecem vias legítimas para viabilização do *paver* de concreto geopolimérico.



Tabela 7 – Custos de ativadores (cotações em toneladas) e precursores do ligante álcali-ativado

<b>Ligante Álcali Ativado</b>							
<b>Material</b>	<b>Custos Unitários</b>					<b>Média (R\$/kg)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	R\$ 3,75	R\$ 0,10	R\$ 3,9	-	-	2,58	1,76
NaOH (kg)	R\$ 0,20	R\$ 3,00	R\$ 0,10		-	1,10	1,34
Cinza Volante (kg)	R\$ 0,05	R\$ 0,16	R\$ 0,35	R\$ 0,22	R\$ 0,13	0,18	0,10
Escória BOF (kg)	R\$ 0,20	-	-	-	-	0,20	0,00

Fonte: Autor

Tabela 8 – Custos de ativadores (cotações de venda para laboratórios, havendo espaço para melhores negociações) e precursores do ligante álcali-ativado

<b>Ligante Álcali Ativado</b>							
<b>Material</b>	<b>Custos Unitários</b>					<b>Média (R\$/kg)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	R\$ 215,00	R\$ 300,77	-	-	-	257,89	42,89
NaOH (kg)	R\$ 24,28	R\$ 15,44	R\$ 26,00	R\$ 39,00	-	26,18	8,42
Cinza Volante (kg)	R\$ 0,05	R\$ 0,16	R\$ 0,35	R\$ 0,22	R\$ 0,13	0,18	0,10
Escória BOF (kg)	R\$ 0,20	-	-	-	-	0,20	0,00

Fonte: Autor

Tabela 9 – Composição de custos do paver de concreto geopolimérico

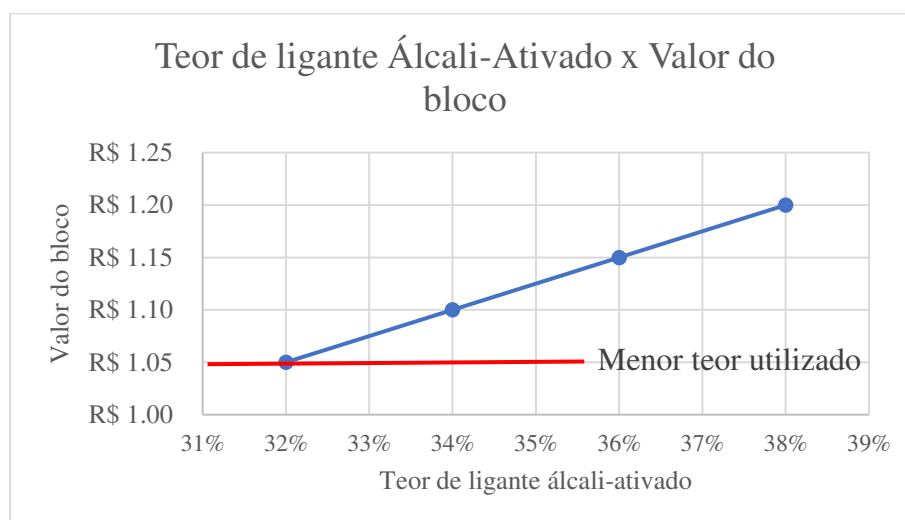
Composição de Custos Concreto Geopolimérico				
Material	Consumo dos materiais		Custo de Materiais por m <sup>3</sup> de concreto	
<b>Cinza Volante</b>	355,05	kg/m <sup>3</sup>	65,12	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Escória BOF</b>	118,35	kg/m <sup>3</sup>	23,67	R\$/m <sup>3</sup>
<b>NaOH</b>	64,3	kg/m <sup>3</sup>	70,73	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub></b>	148,7	kg/m <sup>3</sup>	384,14	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Areia</b>	612,4	kg/m <sup>3</sup>	38,43	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Brita 4,75-12,5mm</b>	533,9	kg/m <sup>3</sup>	32,33	R\$/m <sup>3</sup>
<b>Brita 9,5-25mm</b>	804,4	kg/m <sup>3</sup>	42,71	R\$/m <sup>3</sup>
	<b>Total =</b>		657,13	R\$/m <sup>3</sup>
	<b>Custo/m<sup>2</sup> =</b>		59,74	R\$/m <sup>2</sup>
	<b>Custo Unitário =</b>		1,19	R\$/bloco

Fonte: Autor

É notória a diferença de custos entre os dois blocos (comparando-se as médias esperadas de custo com materiais constituintes por bloco), onde o valor do concreto geopolimérico chegou a ser mais que o dobro do concreto convencional. Isso se dá principalmente por conta do custo dos ativadores alcalinos, que, apesar da redução de valor ao adquiri-los em larga escala, o valor dos ativadores é responsável por aproximadamente 70% do custo total dos blocos.

O Gráfico 1 a seguir ilustra a influência do preço do teor de ligante ao preço do bloco, utilizando quatro teores de ligantes, fornecidos por Benício (2022), como citado na seção de Materiais. Pode-se perceber que a variação é aproximadamente linear, com valor de 1,05 R\$/bloco para o menor teor de ligante álcali-ativado utilizado.

Gráfico 1 – Variação do preço do bloco em função da variação do teor de ligante álcali-ativado



Fonte: Autor

Os resíduos ocuparam apenas 13% do valor total de custo dos materiais constituintes e, dependendo do fornecedor local, o valor pode sofrer reduções ainda maiores. Por fim, os agregados compõem cerca de 18% do custo total, que é uma parcela menor se comparado ao concreto convencional, principalmente devido ao alto custo do ligante álcali-ativado (devido aos custos com ativadores alcalinos) e menor consumo de agregado miúdo.

### **6.2.3 Influência do Custo com Vibroprensagem no Custo Global dos Blocos**

Conforme já mencionado, a questão da vibroprensagem na produção dos blocos é um fator determinante de viabilidade econômica. O alto valor do equipamento, bem como da manutenção periódica para extensão da sua vida útil tornam a comparação entre o concreto convencional e o concreto geopolimérico desiguais, caso seja desconsiderado seu processo de produção. Ou seja, considerando apenas insumos, o bloco de concreto geopolimérico pode parecer mais caro, mas deve-se ter em mente que se trata de um material que pode dispensar a vibroprensagem.

Por conta disso, foi realizada uma pesquisa do tempo médio de manutenção dessas máquinas juntamente às empresas fornecedoras, assim como do seu valor médio dessas manutenções. Foi considerada, para a análise de produção constante, uma geração de 2500 blocos por dia e o tempo estimado para operação e manutenção com custo na ordem de R\$ 80.000,00 foi de 2 anos.

Ademais, foi feita uma análise de sensibilidade através do custo anual equivalente do investimento da máquina, operação e manutenções periódicas, ilustrado nas Tabelas 9, 10 e no Gráfico 2. No Gráfico 2, foi calculado o custo anual equivalente e, posteriormente, dividido pela produção anual de blocos fixa, apenas variando o ciclo de vida, que influencia diretamente no aumento das despesas. É possível analisar que o custo da vibroprensagem pode variar a cerca de 20 a 40%, para o recorte de ciclo de vida entre 10 e 20 anos, do custo unitário do bloco com materiais constituintes e com processo de vibroprensagem, desconsiderando mão-de-obra e o lucro em cima do produto.

Na análise utilizando a variação da capacidade de produção do equipamento, utilizando um ciclo de vida fixo de 10 anos, para o pico de produção máxima de 31.250 blocos por dia (dado fornecido por empresa local), o valor agregado ao bloco foi de aproximadamente R\$ 0,10, ilustrado no Gráfico 2.

Tabela 10 – Demonstração do Custo Anual Equivalente da máquina de vibroprensa para ciclo de vida de 10 anos

<b>Custo Anual Equivalente</b>	
i =	10%
ANO	Custos
Investimento	-6353500
1	0
2	-80000
3	0
4	-80000
5	0
6	-80000
7	0
8	-80000
9	0
10	-80000
VPL (R\$) =	-6587578,75
CAE =	-R\$ 1.072.098,10

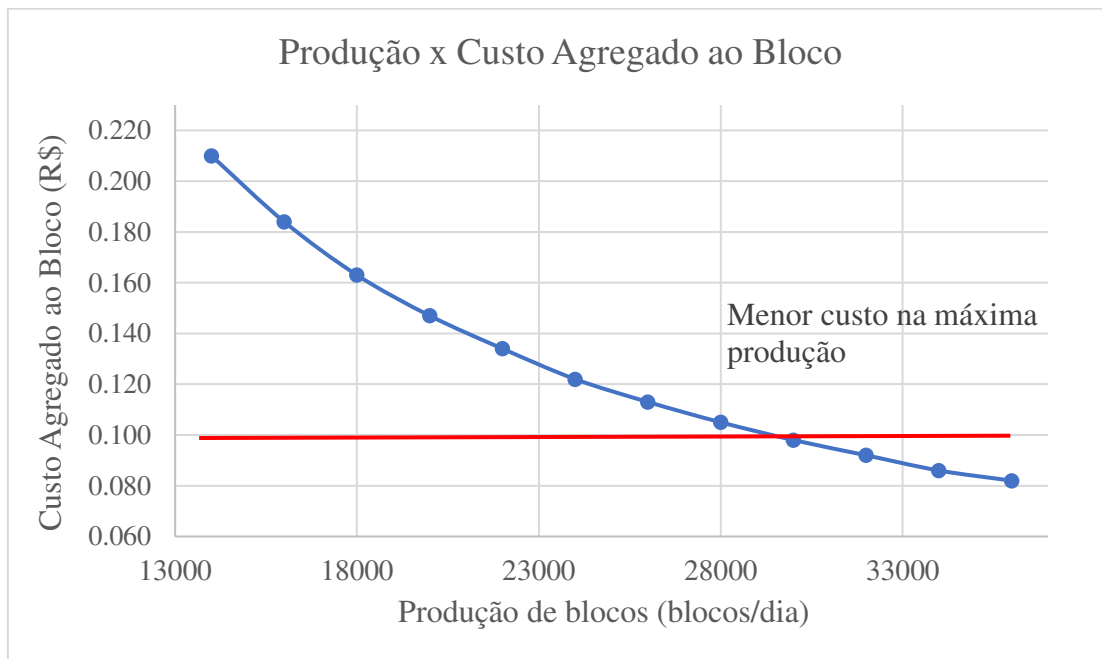
Fonte: Autor

Tabela 11 – Composição de custos da vibroprensa

<b>Análise de Custo Vibroprensa</b>	
Ano (dias)	365
Tempo de Vida Máquina (anos)	10
Custo Máquina (R\$)	6353500
Produção (blocos/dia)	31250
Tempo Recomendado Manutenção (anos)	2
Tempo Médio Manutenção (dias)	730
Custo Manutenção (R\$)	80000
CAE =	R\$ 1.072.098,10
Produção Total (blocos)	11406250
Custo Agregado ao Bloco (R\$/bloco)	0,0940

Fonte: Autor

Gráfico 2 – Custo agregado ao bloco pela atividade de vibroprensagem em função da produção diária de blocos (que reduz o custo por bloco para um tempo de vida útil e de manutenções fixos)



Fonte: Autor

As Tabelas 11 e 12 fornecem os resultados da análise comparativa entre os dois blocos, com e sem a consideração da vibroprensa. Inicialmente, a diferença entre os blocos era de 139,91%, sendo o concreto geopolimérico mais caro. Considerando a vibroprensagem, a diferença foi de 97,88%.

Tabela 12 – Comparação do custo unitário entre os blocos sem vibroprensagem

<b>Análise Comparativa sem vibroprensa</b>			
<b>Unidade</b>	<b>Conc. Conv.</b>	<b>Conc. Geopoli.</b>	<b>Diferença (%)</b>
<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	275,16	657,96	139,12%
<b>R\$/m<sup>2</sup></b>	22,01	59,81	
<b>R\$/bloco</b>	0,440	1,053	

Fonte: Autor

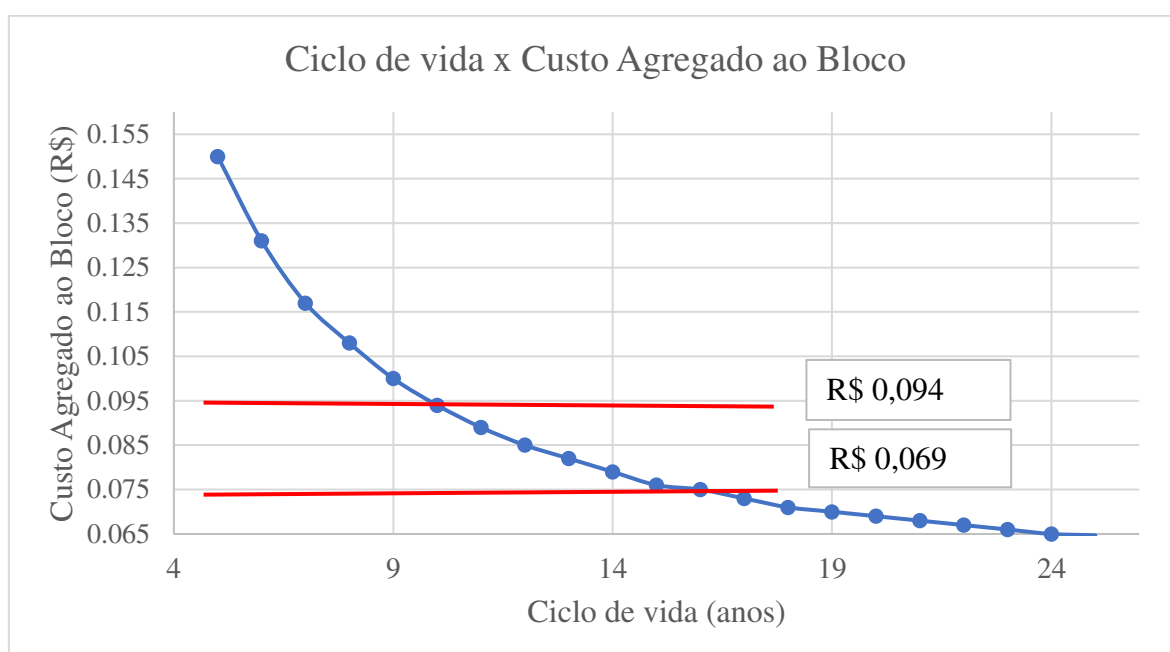
Tabela 13 – Comparação do custo unitário entre os blocos com vibroprensagem

<b>Análise Comparativa com vibroprensa</b>			
<b>Unidade</b>	<b>Conc. Conv.</b>	<b>Conc. Geopoli.</b>	<b>Diferença (%)</b>
<b>R\$/m<sup>3</sup></b>	332,50	657,96	97,88%
<b>R\$/m<sup>2</sup></b>	26,60	52,64	
<b>R\$/bloco</b>	0,532	1,053	

Fonte: Autor

Através da variação do custo anual equivalente em função do ciclo de vida do equipamento, foi possível montar o Gráfico 3, onde o custo agregado para o recorte entre 10 e 20 anos de idade, que foram os tempos médios de ciclo de vida adotados para a máquina de vibroprensagem, obtidos através das entrevistas mencionadas na Seção de Métodos e também através de uma pesquisa no mercado nacional. A influência no valor foi menor se comparada à variação da produção, chegando ao máximo de R\$ 0,094, para o tempo de vida útil de 10 anos.

Gráfico 3 – Custo agregado ao bloco pela atividade de vibroprensagem em função do ciclo de vida do equipamento (que reduz o custo por bloco para produção e manutenções fixas)



Fonte: Autor

#### 6.2.4 Composição de Serviços

Para exemplificar uma aplicação utilizando serviços padronizados de pavimentação com *pavers*, nas Tabelas 13 e 14 abaixo, foi utilizada a tabela da SEINFRA mais recente (2021) sem desoneração e o valor do bloco obtido na Seção 6.2.1 Materiais Constituintes do Concreto Convencional. Além disso, foi considerado que há drenagem superficial adequada e que o lençol d'água subterrâneo está a, no mínimo, 1,50 m de profundidade em relação ao greide de regularização.

Tabela 14 – Orçamento de processos: paver de concreto convencional desconsiderando a vibroprensagem (cujo custo deve estar embutido no valor do bloco)

<b>Composição de Serviços sem Vibroprensa</b>					
<b>Concreto Convencional</b>					
<b>Área Unitária</b>				<b>1</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Cód</b>	<b>Componentes</b>	<b>Unid.</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Custo Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
1	Calceteiro	h	0,2531	R\$ 23,17	R\$ 5,86
2	Servente	h	0,2531	R\$ 17,14	R\$ 4,34
3	Areia Média	m <sup>3</sup>	0,005	R\$ 67,50	R\$ 0,34
4	Pó de Pedra	m <sup>3</sup>	0,05	R\$ 60,46	R\$ 3,02
5	Bloco de Concreto para pavimento intertravado 6 faces - tráfego leve (comprimento: 100mm/espessura: 80mm/largura: 200mm)	Unid.	32	R\$ 0,44	R\$ 14,02
6	Compactador de placa vibratória HP 7 (CHI)	h	0,1211	R\$ 29,57	R\$ 3,58
7	Compactador de placa vibratória HP7 (CHP)	h	0,0055	R\$ 44,27	R\$ 0,24
				Encargos Sociais =	Incluso
				BDI =	0,00
				<b>Valor do m<sup>2</sup>:</b>	<b>R\$ 31,17</b>

Fonte: Autor

Tabela 15 – Orçamento de processos: paver de concreto geopolimérico

<b>Composição de Serviços sem Vibroprensa</b>					
<b>Concreto Geopolimérico</b>					
<b>Área Unitária</b>				<b>1</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Có d</b>	<b>Componentes</b>	<b>Unid .</b>	<b>Coefficient e</b>	<b>Custo Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
1	Calceteiro	h	0,2531	R\$ 23,17	R\$ 5,86
2	Servente	h	0,2531	R\$ 17,14	R\$ 4,34
3	Areia Média	m <sup>3</sup>	0,005	R\$ 67,50	R\$ 0,34
4	Pó de Pedra	m <sup>3</sup>	0,05	R\$ 60,46	R\$ 3,02
5	Bloco de Concreto Geopolimérico para pavimento intertravado 6 faces - tráfego leve (comprimento: 100mm / espessura: 80mm / largura: 200mm)	Unid.	32	R\$ 1,195	R\$ 38,23
6	Compactador de placa vibratória HP7 (CHI)	h	0,1211	R\$ 29,57	R\$ 3,58
7	Compactador de placa vibratória HP7 (CHL)	h	0,0055	R\$ 44,27	R\$ 0,24
				Encargos Sociais =	Incluso
				BDI =	0,00
				<b>Valor do m<sup>2</sup>:</b>	<b>R\$ 55,38</b>

Fonte: Autor

Pela composição dos serviços, é possível notar que os blocos compõem a maior parcela da estrutura de custos, igual a R\$ 14,02 por metro quadrado, com 45% do valor total no concreto convencional. Já o concreto geopolimérico possui um valor de R\$ 38,23 por metro quadrado, com o valor do bloco correspondendo a cerca de 70% do custo total da aplicação. A diferença entre as duas composições de serviço foi de 62,76%. Vale ressaltar que as etapas de aplicação, assim como a mão de obra foram similares para os dois casos, tornando o preço do bloco o único diferencial entre os dois métodos.

Ademais, foi estruturada a composição de custos utilizando os valores encontrados com a vibroprensagem no bloco de concreto convencional, ilustrada na Tabela 14. A parcela da composição do bloco é igual a aproximadamente 50% do custo total da



aplicação, sendo igual a R\$ 17,28 por metro quadrado. A diferença entre as duas composições considerando o custo agregado pela vibroprensagem foi de 47,66%, acarretando uma diminuição de aproximadamente 15% comparada à composição que desconsidera o custo do equipamento.

Tabela 16 – Orçamento de processos: paver de concreto convencional incluindo custo de vibroprensagem

<b>Composição de Serviços com Vibroprensa</b>					
<b>Concreto Convencional</b>					
<b>Área Unitária</b>				<b>1</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Cód</b>	<b>Componentes</b>	<b>Unid.</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Custo Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
1	Calceteiro	h	0,2531	R\$ 23,17	R\$ 5,86
2	Servente	h	0,2531	R\$ 17,14	R\$ 4,34
3	Areia Média	m <sup>3</sup>	0,005	R\$ 67,50	R\$ 0,34
4	Pó de Pedra	m <sup>3</sup>	0,05	R\$ 60,46	R\$ 3,02
5	Bloco de Concreto para pavimento intertravado 6 faces - tráfego leve (comprimento: 100mm/espessura: 80mm/largura: 200mm)	Unid.	32,00	R\$ 0,54	R\$ 17,28
6	Compactador de placa vibratória HP 7 (CHI)	h	0,1211	R\$ 29,57	R\$ 3,58
7	Compactador de placa vibratória HP7 (CHP)	h	0,0055	R\$ 44,27	R\$ 0,24
				Encargos Sociais =	Incluso
				BDI =	0,00
				<b>Valor do m<sup>2</sup>:</b>	<b>R\$ 34,42</b>

Fonte: Autor

## 7. CONCLUSÃO

### 7.1 Principais Contribuições da Pesquisa

É visto que há espaço no mercado para o concreto geopolimérico, levando em consideração o argumento sustentável do produto, que consome resíduos que antes seriam destinados a aterros ou outros tipos de armazenamento. Contudo, o alto custo dos ativadores, sobretudo do silicato solúvel, é um dos desafios de mercado para o uso do material. É notório que um dos requisitos necessários no aperfeiçoamento deste produto é a busca pela diminuição do teor de pasta geopolimérica, sem que haja perdas na trabalhabilidade e nos aspectos técnicos do bloco, tais como a resistência e a absorção de água.

Outra contribuição da pesquisa foi a confirmação de que a hipótese da necessidade de dispensa da vibroprensagem foi validada. Ainda assim, além dessa confirmação, ainda há outras reduções de preços e insumos que se farão necessárias para tornar o produto mais viável, por exemplo, na negociação de seu insumo mais caro: os ativadores alcalinos.

Apesar de, no cenário atual de preços tornar o produto mais viável, não se tenha o mesmo patamar de custos entre o *paver* de concreto geopolimérico (cerca de 1,20 R\$/bloco, com custo finalizado de cerca de R\$ 55,38/m<sup>2</sup> de revestimento construído) e *paver* de concreto de cimento Portland (cerca de 0,54 R\$/bloco, com custo finalizado de cerca de 34,42 R\$/m<sup>2</sup>), acredita-se que há uma tendência de viabilização por meio da negociação dos preços dos insumos, do aumento que se vem observando nos custos com cimento Portland, e na melhoria técnica do *paver* de concreto geopolimérico por meio da redução dos teores de pasta, por exemplo.

Além disso, uma das vantagens do concreto geopolimérico é a sua alta resistência em pequenas idades e rápido tempo de pega, propiciando a estocagem do material que já dispensaria a vibroprensagem, além da proposta de valor atrelada ao uso de resíduos, o que pode justificar maiores investimentos com o material.

No que concerne aos resíduos, é tanto reponsabilidade da construção civil, de buscar produtos inovadores, que agreguem valor e reduzam os custos, quanto também das empresas que geram resíduos siderúrgicos e termelétricos a destinação mais nobre dos mesmos. Em uma produção em larga escala, também é possível um acordo com as indústrias energéticas de forma a conciliar os dois vieses: o da inovação da construção civil e o da

destinação de resíduos, e dessa forma, reduzir ainda mais os custos das cinzas e escória associadas ao material.

## 7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para futuros projetos envolvendo pesquisa em concreto geopolimérico, a primeira sugestão é a análise de viabilidade ambiental, a depender dos resíduos utilizados como precursores do ligante álcali-ativado. Tais resíduos podem liberar elementos nocivos ao meio tais em que se encontram, ao solo ou ao lençol freático, tais como cromo, fluoreto, sulfato (BARROS, 2015), e, portanto, ensaios de lixiviação e a avaliação do percolado, como recomendado pelas normas NBR 10005/2004 e NBR 10006/2004, seriam mandatórios para garantir que a quantidade de substâncias esteja dentro dos padrões normativos.

Além disso, a continuidade da pesquisa após a análise dos requisitos desenvolvida neste trabalho seria a aplicação do bloco de concreto geopolimérico em algum trecho de pavimento intertravado: um meio-fio, um pátio ou um estacionamento. A aplicação propicia avaliar de forma mais esmiuçada as questões processuais da aplicação desse *paver*, bem como diferentes características que podem ser englobadas a este material, como diferentes colorações e geometrias.

Por último, recomenda-se a busca da utilização de outros resíduos locais que podem ser utilizados como precursores do ligante álcali-ativado. Foi visto que a geração de resíduos no âmbito da construção civil é alarmante, no Reino Unido, por exemplo, um terço da composição dos aterros é oriundo de resíduos da construção civil (HEYWOOD, 2015).

Desta forma, o reaproveitamento de resíduos que possam ser consumidos em uma ativação alcalina, desde que possuam boa trabalhabilidade, alto ganho de resistência inicial e demais requisitos particulares para que sejam competitivos no mercado, seria de grande valia do ponto de vista ambiental, técnico e econômico.

## REFERÊNCIAS

- ALCANTARA, M. R. G. **Estudo da utilização de cinzas pesadas de termoeletricas para produção de blocos de concreto para pavimentos intertravados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- AKKARI, ALESSANDRA; J. R. (2019). **Desenvolvimento de Produto**. 1 ed. Londrina: Educacional, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9781: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.
- BARBOSA, M. R. **Caracterização geoambiental da escória de aciaria de cinco estados brasileiros**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.
- BENÍCIO, L. R. A. **Caracterização de misturas álcali-ativadas à base de cinza volante e escória de aciaria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- BORGES, P. H. R.; LOURENÇO, T. M. F.; FOUREAUX, A. F. S.; PACHECO, L. S. **Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II)**. Ambiente Construído, Porto Alegre, 2014.
- CAROLI, PAULO; ÁGUIAR, FÁBIO. **Product backlog Building – Conceção de um product backlog efetivo**. 1 ed. Editora Caroli, 2020.
- DAVIDOVITS, JOSEPH. **Geopolymer Cement a review**, publicado em Geopolymer Science and Technics, Technical Paper #21, Geopolymer Institute Library, www.geopolymer.org, 2013.
- DE FREITAS, S. M. A. C. **Escória de Aciaria: Caminhos para uma Gestão Sustentável**. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- DUARTE, R. **Entrevistas em pesquisas qualitativas**. Educar, n.24, p. 213-225, 2004.
- FERNANDES, I. **Blocos e Pavers: Produção e Controle de Qualidade**. Ribeirão Preto: Ed. Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2016.
- HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Ed. Pini Ltda, 1992
- JUNIOR, I. J. A. **Pavimento intertravado como ferramenta de moderação do tráfego nos centros comerciais de travessias urbanas – Estudo de Caso Guaiúba – CE**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- JÚNIOR, L. A. B. P. **Fabricação de cimento Portland contendo mistura de escória de aciaria LD e resíduo de granito**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Instituto Federal do Espírito Santo, 2012.
- LEHNE, J; PRESTON, F. **Making Concrete Change: Innovation in Low-Carbon Cement and Concrete**. Chatham House: Londres, 2018. Disponível em <<https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>> Acesso em: 14 ago. 2021.
- LINCY, A; VELKENEDY, R. **Experimental optimization of metakaolin and nanosilica composite for geopolymer concrete paver blocks**. International Federation for Structural Concrete, 2020.
- LODI, J. B. **A entrevista: teoria e prática**. 5 ed. São Paulo: Pioneira, 1986.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**. 3. Ed. São Paulo: Atlas, 1999.

MULLER, R. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PETTERMANN, Rodrigo. **Avaliação do desempenho de blocos de concreto para pavimentação com Metacaulim e Sílica ativa**. 2006, 71 f. Monografia (Pós-Graduação) – Programa Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

PORTLAND, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO. **Manual de Pavimento Intertravado: Passeio Público**. São Paulo. 2010.

PHILIP, SARA; C P, ARCHANA. **A review on effects of ceramic tile waste as partial replacement of coarse aggregate on geopolymer paver block**. Sustainability, Agri, Food and Environmental Research, 2021.

PROVIS, J. L.; VANDEVENTER, J. S. J. (Ed.). **Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications**. Elsevier, 2009.

RAKHIMOVA, N.; RAKHIMOV, R. (2018). **Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials – a review**. Journal of Materials Research and Technology. 8. 10.1016/j.jmrt.2018.07.006.

RATHAN, A. S.; ARAVINDA, S. V.; SUNITHA, V. **Mechanical and structural performance evaluation of pervious interlocking paver blocks**. Elsevier, 2021.

RODRIGUES, P. P. F. **Parâmetros de dosagem do concreto**. São Paulo: Ed. ABCP, 1984.

ROHDE, G. M.; MACHADO, C. S. **Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil**. Porto Alegre: Cientec, 2016 (Boletim Técnico, 36).

SELLTIZ, C.; WRIGHTSMAN, L. S.; COOK, S. W. **Métodos de pesquisa das relações sociais**. São Paulo: Herder, 1965.

SILVA, B. M. C.; CUNHA, A.A.; MENDES, J.J.; SOLÉ, R. A. L.; VON KRUGUER, F. L.; ARAÚJO; F. G. S. **Caracterização tecnológica de escória de aciaria**. In Seminário de Aciaria, 47, 2016, Rio de Janeiro. **Anais do 47º Seminário de Aciaria: ABM Week**, p. 248-255.

SILVA, M. V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SILVA, S.L. **Proposição de um modelo para caracterização das conversões do conhecimento no processo de desenvolvimento de produtos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São José dos Campos, 2002.

SILVA, W. B. C. **Análise da viabilidade da fabricação de blocos intertravados de pavimentos de concreto com uso de resíduos de termelétrica e de agregados reciclados da construção civil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

VASCONCELOS, S. D. **Avaliação da heterogeneidade de cinzas de carvão mineral advindas da termelétrica Energia Pecém e sua aplicação em camadas granulares de pavimentos**. 2016. 122 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016.

WANG, SHAO DONG (1991) **Review of recent research on alkali-activated concrete in china**. Magazine of Concrete Research.

WIEBBELLING, P. O. G. **Pavimento com blocos intertravados de concreto: estudo de caso na UNIVATES**. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2015.

ZHANG, P; WANG, K; LI, Q; WANG, J; LING, Y. **Fabrication and Engineering Properties of Concretes Based on Geopolymers/Alkali-activated Binders - A Review**. Journal of Cleaner Production, 2020.

## APÊNDICE

Respostas dos questionários realizados:

### 1. Projetista

**1. Quais ensaios são de fato utilizados para o controle de qualidade do concreto antes da moldagem dos *pavers*?**

A NBR 9781/2013 não especifica ensaios antes da moldagem.

**2. Quais ensaios são utilizados para o controle de qualidade dos *pavers* de concreto após a desmoldagem dos *pavers*?**

Inspeção visual, avaliação dimensional, absorção de água, resistência à compressão e a resistência à abrasão conforme NBR 9781/2013

**3. Quais são os principais desafios tecnológicos enfrentados pela sua empresa na produção e na execução de blocos de pavimento intertravado com concretos secos?**

Trabalho com projeto de pavimentos intertravados, então especificamos que o bloco pronto alcance os requisitos de projeto.

**4. Se pudesse, o que você mudaria no processo de produção e execução dos *pavers*?**

**5. Quais etapas do processo produtivo possuem maior custo, e, portanto, beneficiariam mais de modificações?**

**6. Haveria benefício em redução da necessidade de vibração?**

Atentar para que consiga atender os requisitos mínimos requeridos pela norma.

**7. Haveria prejuízo no incremento de necessidade de estocagem? A que limite?**

- 8. Estamos desenvolvendo um novo produto. Quais aspectos você gostaria que pudessem ser implementados neste novo material, tendo como ponto de partida o *paver* de concreto de cimento Portland utilizado atualmente?**

Acredito que uma das deficiências dos blocos produzidos atualmente no município de Fortaleza trata-se de que em alguns casos os blocos não possuem espaçadores de juntas.

## 2. Fabricante

- 1. Quais ensaios são de fato utilizados para o controle de qualidade do concreto antes da moldagem dos *pavers*?**
- 2. Quais ensaios são utilizados para o controle de qualidade dos *pavers* de concreto após a desmoldagem dos *pavers*?**

Absorção de água, resistência à compressão e a resistência à abrasão conforme NBR 9781/2013

- 3. Quais são os principais desafios tecnológicos enfrentados pela sua empresa na produção e na execução de blocos de pavimento intertravado com concretos secos?**

Competir com empresas maiores, ou empresas menores em projetos de menor escala.

- 4. Se pudesse, o que você mudaria no processo de produção e execução dos *pavers*?**

Diminuir o uso do cimento.

- 5. Quais etapas do processo produtivo possuem maior custo, e, portanto, beneficiariam mais de modificações?**

Vibroprensagem.



**6. Haveria benefício em redução da necessidade de vibração?**

A máquina que possuímos, de origem espanhola, custa cerca de 1 milhão de euros, portanto, um produto que dispense o uso da vibração seria interessante.

**7. Haveria prejuízo no incremento de necessidade de estocagem? A que limite?**

Não há um espaço próprio para estoque de materiais, existe uma prateleira que dependeria das condições de resistência inicial do material.

**8. Estamos desenvolvendo um novo produto. Quais aspectos você gostaria que pudessem ser implementados neste novo material, tendo como ponto de partida o *paver* de concreto de cimento Portland utilizado atualmente?**

Com os preços de cimento subindo, a diminuição do teor de material cimentício por algum aditivo ou outro produto já seria de grande valia.