

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MICHELE DO PRADO DA ROSA**

**CONCRETO ALTERNATIVO PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

**São Leopoldo**

**2020**

MICHELE DO PRADO DA ROSA

**CONCRETO ALTERNATIVO PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil, pelo Curso de  
Engenharia Civil da Universidade do Vale  
do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Professor Ms. Fabiano da Silva Jorge

São Leopoldo

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, quero agradecer ao meu orientador que, em nenhum momento, me deixou ficar abalada pelas minhas emoções, em diversos instantes tive a sensação que não iria conseguir, que sabia pouquíssimo sobre o assunto ou tudo que estava planejando dava errado. Soube me tranquilizar e me mostrar um novo caminho para pesquisar e, com isto, me orientar novamente. Trocamos de materiais por inúmeros motivos... Já na última fase, devido à disponibilidade da matéria-prima, foi optado por uma nova troca, que devido à pandemia dificultou em conseguir a quantidade ideal. Sempre estive lá para me dar total suporte e me motivar a dar continuidade ao trabalho. Agradeço imensamente a você Fabiano, por tudo que fez para que esta monografia fosse concluída. E claro, obrigada por toda a sua paciência comigo.

Agradeço a minha família por estar sempre me apoiando, incentivando, às vezes brincando que sempre tenho de escolher o caminho mais difícil e por suportar a distância a qual fomos obrigados a nos submeter para que eu pudesse finalizar minha graduação. Agradeço muito a minha amiga de anos Cristiane Oliveira, que teve papel fundamental neste trabalho e na minha vida emocional. Agradeço também ao meu amor, Gabriel, por sempre estar junto comigo, me apoiar, incentivar, por me cobrar a escrita e os ensaios, além de estar sempre me dando suporte; agradeço a tua família por não medir esforços em deixar eu usar a casa deles levando os materiais, fazendo protótipos dos corpos de prova e por sempre deixar as portas abertas para eu ficar, realizar meus estágios próximos a eles, finalizar os estudos e meu trabalho de conclusão. Agradeço a minha amiga Taís Klein pela ajuda com os gráficos e apoio emocional e a minha amiga Renata Schneider pela correção ortográfica e formatação do trabalho.

Agradeço aos meus chefes Adriano e Daniel, que foram sempre compreensivos e flexíveis com minhas demandas da faculdade. Agradeço ao Diogo e ao Edson da InterCement Cympor por disponibilizar a cinza volante para este estudo. Agradeço a Olinda do grupo Carollo pela disponibilidade dos agregados, assim como o engenheiro Henrique.

E por fim, agradeço a Deus, por me permitir viver isto e agregar conhecimento ao longo destes quase 7 anos de faculdade.

“Os analfabetos do século 21 não serão aqueles que não sabem ler e escrever, mas aqueles que não conseguem aprender, desaprender e reaprender”. (Alvin Toffler)

## RESUMO

Com o intuito de encontrar um concreto alternativo para pavimentação rodoviária, foi-se em busca de materiais capazes de serem reaproveitados e/ou extraídos do meio natural com facilidade. Para a confecção do concreto alternativo, escolheu-se o cimento álcali-ativado como ligante para a mistura. Executou-se ensaios em laboratórios para caracterizar a matéria prima (cinza volante) para então confeccionar o cimento álcali-ativado que serviu de ligante para os agregados, sendo substituído 100% do ligante asfáltico e do cimento Portland nas amostras. Os mesmos foram enquadrados como faixa "C" do DNIT e, posteriormente, dosados e acrescentados ao ligante. As amostras deste estudo tiveram como base a cinza volante ativada com uma solução de hidróxido de sódio, variando entre 12 e 16mol, o ativador alcalino e a relação entre solução ativadora e cinza volante de 0,50 e 0,55 (em massa), bem como a utilização de uma cura térmica de 65°C e 85°C respectivamente, e, os agregados para as 2 molaridades foram adicionados em proporções. Além disso, realizaram-se amostras para ensaios de estabilidade e fluência Marshall, resistência à compressão e à tração na flexão, ensaiando 3 corpos de prova para cada idade de ensaio (1, 3 e 7 dias). Evidenciou-se grande potencial das amostras de 16mol com resistências satisfatórias em todos os ensaios realizados. Entretanto, nas amostras de 12mol foi possível verificar um decréscimo de resistência ao longo dos dias no ensaio de resistência à tração na flexão, sendo necessário aprofundar os estudos para entender o comportamento destas amostras quando submetidas a este tipo de esforço. Com os resultados obtidos, verificou-se o grande potencial do cimento álcali-ativado para uso em pavimento rodoviário, precisando, no entanto, de uma análise mais aprofundada para obter novos parâmetros afim de encontrar a dosagem ideal que atenda as normas vigentes da pavimentação rodoviária.

**Palavras-chave:** Pavimentação; Cimento álcali-ativado; Cinza Volante.

## RESUMO

In order to find an alternative concrete for road paving, it was in search of materials able to be reused and/or extracted from the natural environment with ease. For the manufacture of alternative concrete, the alkali-activated cement was chosen as the binder for the mixture. It was necessary to carry out tests in laboratories to characterize the raw material (flying gray) to then make the alkali-activated cement that served as a binder for the aggregates, 100% of asphalt binder and Portland cement being replaced. They were framed as the "C" band of the DNIT and then dosed and added to the binder. The samples in this study were based on the steering wheel gray activated with a sodium hydroxide solution, ranging from 12 to 16mol, the alkali activator and the ratio of activator solution to steering wheel gray of 0.50 to 0.55 (by mass), as well as the use of a thermal cure of 65°C and 85°C respectively, and aggregates for the 2 molarities were added in proportions. In addition, samples were performed for Marshall stability and fluency tests, compression and tensile strength in bending, testing 3 test bodies for each test age (1, 3 and 7 days). High potential of samples of 16mol with satisfactory resistance was demonstrated in all tests carried out. However, in the samples of 12mol it was possible to verify a decrease in resistance over the days in the tensile strength test in bending, and further studies are necessary to understand the behavior of these samples when subjected to this type of effort. With the results obtained, the great potential of the alkali-activated cement for use in road pavement was verified, however, requiring a more in-depth analysis to obtain new parameters in order to find the ideal dosage that meets the current road pavement standards.

**Palavras-chave:** Pavement; Alkali-activated cement; Fly ash.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemática das camadas de um pavimento e suas tensões solicitantes.....	16
Figura 2 - Classificação dos revestimentos.....	17
Figura 3 - Camadas dos Pavimentos Rígidos e Flexíveis.....	18
Figura 4 - Aplicações dos cimentos álcali-ativados.....	26
Figura 5 - Fluxograma de Metodologia.....	27
Figura 6 - Cinza Volante.....	28
Figura 7 - Diluição do hidróxido de sódio com água e mistura do ativador com CV..	30
Figura 8 - CPs Prismáticos e Cilíndricos.....	33
Figura 9 - Moldagem dos CPs Marshall.....	34
Figura 10 - Cura Térmica 65°C e 85°C.....	34
Figura 11 - Prensa MTS Landmark.....	36
Figura 12 - Ensaio de Compressão.....	37
Figura 13 - Prensa EMIC DL 200.....	38
Figura 14 - Amostra com absorção de umidade.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tolerância da granulometria dos agregados do concreto asfáltico .....	20
Tabela 2 - Estrutura química da cinza de carvão mineral .....	23
Tabela 3 – Laudo Técnico do Hidróxido de Sódio.....	29
Tabela 4 - Granulometria dos Agregados .....	31
Tabela 5 - Composição Química da CV .....	39
Tabela 6 – Peso e dimensões CPs de 12mol.....	41
Tabela 7 – Peso e dimensões CPs de 16mol.....	42
Tabela 8 – Massa específica 12 mol .....	43
Tabela 9 – Massa específica 16 mol .....	44
Tabela 10 – Peso específico 12 mol .....	45
Tabela 11 – Peso específico 16 mol .....	46
Tabela 12 – Estabilidade (kgf) – 12mol.....	47
Tabela 13 – Fluência (mm) – 12mol.....	47
Tabela 14 – Estabilidade (kgf) – 16mol.....	48
Tabela 15 – Fluência (mm) – 16mol.....	48
Tabela 16 – Resistência à Compressão (MPa) – 12mol .....	50
Tabela 17 – Resistência à Compressão (MPa) – 16mol .....	50
Tabela 18 – Resistência à Compressão (MPa) do cimento Portland em função do seu tipo e classe adaptado da NBR 16697:2018 .....	52
Tabela 19 - Resistência à Tração na Flexão (MPa) – 12mol .....	52
Tabela 20 - Resistência à Tração na Flexão (MPa) – 16mol .....	53



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Moldagem.....	32
Quadro 2 – Ensaio.....	32

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Curva Granulométrica Individual.....	31
Gráfico 2 – Curva Granulométrica da Estabilização dos Agregados.....	32
Gráfico 3 – Estabilidade Marshall.....	49
Gráfico 4 – Fluência Marshall.....	49
Gráfico 5 - Resistência à Compressão Axial .....	51
Gráfico 6 – Resistência à Tração na Flexão.....	53

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
CP	Corpo de Prova
CV	Cinza Volante
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
HS	Hidróxido de Sódio
LCVMat	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
Si	Silicato

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	TEMA.....	14
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA .....	14
1.3	OBJETIVOS.....	14
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
1.4	JUSTIFICATIVA.....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
2.1	PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS .....	16
<b>2.1.1</b>	<b>Ligantes Asfálticos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Agregados</b> .....	<b>19</b>
2.2	CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO OU GEOPOLÍMERO .....	21
<b>2.2.1</b>	<b>Principais Materiais Aluminossilicatos</b> .....	<b>22</b>
2.2.1.1	Metacaulim.....	22
2.2.1.2	Pozolanas Naturais .....	22
2.2.1.3	Resíduos Sólidos Industriais.....	23
2.2.1.4	Cinza Volante.....	24
<b>2.2.2</b>	<b>Ativadores Alcalinos</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Reações de Ativação</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Campos de Aplicação</b> .....	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
3.1	CINZA VOLANTE .....	27
<b>3.1.1</b>	<b>Caracterização Química</b> .....	<b>28</b>
3.2	ATIVADOR.....	28
<b>3.2.1</b>	<b>Dosagem</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Preparação</b> .....	<b>29</b>
3.3	CORPO DE PROVA .....	30
<b>3.3.1</b>	<b>Dosagem dos Agregados</b> .....	<b>30</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Moldagem</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Cura térmica</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Ensaio Físicos</b> .....	<b>35</b>
3.3.4.1	Massa Específica .....	35

3.3.4.2	Peso Específico .....	35
<b>3.3.5</b>	<b>Ensaio Mecânico</b> .....	<b>35</b>
3.3.5.1	Estabilidade Marshall - Estabilidade e Fluência .....	35
3.3.5.2	Resistência à Compressão .....	36
3.3.5.3	Resistência à Tração na Flexão.....	37
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>39</b>
4.1	CINZA VOLANTE .....	39
<b>4.1.1</b>	<b>Características químicas</b> .....	<b>39</b>
4.2	CORPO DE PROVA .....	40
<b>4.2.1</b>	<b>Ensaio físico</b> .....	<b>40</b>
4.2.1.1	Massa específica .....	42
4.2.1.2	Peso específico.....	44
<b>4.2.2</b>	<b>Ensaio mecânico</b> .....	<b>46</b>
4.2.2.1	Estabilidade Marshall – Estabilidade e Fluência .....	47
4.2.2.2	Resistência à Compressão Axial .....	49
4.2.2.3	Resistência à Tração na Flexão.....	52
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>55</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	55
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>57</b>
	<b>ANEXO A – LAUDO TÉCNICO DO ENSAIO DE FRX DA CV</b> .....	<b>59</b>
	<b>ANEXO B – LAUDO TÉCNICO HIDRÓXIDO DE SÓDIO</b> .....	<b>60</b>
	<b>ANEXO C – GRANULOMETRIA, ABSORÇÃO E DENSIDADE DOS AGREGADOS</b> .....	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em todos os lugares do mundo existe uma infinidade de quilômetros de extensão de obras de infraestrutura de transportes. Os pavimentos rodoviários servem para o conforto e segurança do usuário, onde movimentam-se sob elas grandes tráfegos de veículos de passeios e cargas. Estes pavimentos podem ser divididos em duas categorias básicas de comportamento: rígidos ou flexíveis (concreto de cimento Portland ou concreto asfáltico, respectivamente). Para tal conforto e segurança é necessário ter uma excelente qualidade na camada de rolamento, ou camada de revestimento. Entretanto, para Bernucci *et al.* (2008), existe uma vasta gama de pavimentos no Brasil que possuem baixo conforto em sua camada de rolamento. Esta afirmação pode ser explicada pois anualmente o número de veículos de passeio e de transporte tem crescido em alta velocidade, demandando pavimentos com qualidade superior aos executados.

Com a procura de duplicações, implantações e restaurações de rodovias aumentando, por vezes o insumo do revestimento flexível (ligante asfáltico) encontra-se em baixo nível nas refinarias e, conseqüentemente, nas usinas de concreto asfáltico. Da mesma maneira que o concreto asfáltico que tem como base o petróleo, que é de fonte natural não renovável e utilizamos em grandes proporções, segundo Mehta e Monteiro (2014) o cimento Portland é comumente utilizado em obras de construção civil, ao qual perde no ranking de materiais consumidos pelo ser humano apenas para a água, com a necessidade de alta produção do mesmo, haverá o aumento da produção e liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no meio ambiente.

A importância de realizar estudos capazes de encontrar um concreto alternativo capaz de ser utilizado como pavimento rodoviário aumenta a cada dia, visando sempre a reutilização de materiais para que não haja agressão ao meio ambiente quando estes são extraídos ou produzidos.

O cimento álcali-ativado ou popularmente conhecido como cimento geopolímero, vem sendo bastante utilizado em trabalhos científicos para a potencialização de tecnologias sustentáveis. Um dos materiais destacados para a produção deste cimento é a cinza volante, resíduo este provindo das usinas de geração de energia (termelétricas).

## 1.1 TEMA

Esta pesquisa visa encontrar um concreto alternativo para a composição das camadas de pavimentos flexíveis ou rígidos ao qual analisa-se o cimento álcali-ativado. Sendo desenvolvido dois traços estudo para as análises mecânicas e físicas dos mesmos.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O estudo serve para explorar o material álcali-ativado com cinza volante como um possível revestimento rodoviário, conforme o comparativo a respeito das deformações mecânicas com as camadas de revestimento dos pavimentos flexíveis e rígidos já conhecidos, não o analisando em aspectos financeiros. O presente trabalho limita-se a análise química da cinza volante utilizada e aos ensaios mecânicos dos traços realizados como resistência a estabilidade e fluência Marshall, resistência à compressão e a resistência à tração na flexão, ensaios físicos de massa e peso específico.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Produzir um concreto alternativo para uso em pavimentos rodoviários e ou urbanos através da utilização de um cimento álcali-ativado como ligante.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) caracterizar a cinza volante como ativador alcalino;
- b) dosar as misturas do concreto alternativo manipulando como ligante o cimento álcali-ativado;
- c) analisar os parâmetros mecânicos obtidos das misturas de concreto alternativo.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Por vezes, conforme observado em canteiros de obras, empresas se vêm dependentes das refinarias para abastecer as usinas de asfalto com petróleo e então, produzir o cimento asfáltico de petróleo (CAP) forjando a produção a diminuir o seu ritmo de serviço até normalizar o suprimento.

Levando-se em consideração que o petróleo é extraído de uma fonte natural e que sua quantidade de extração aumenta diariamente, é de suma importância à preocupação com o acúmulo disponível para atender todas as demandas de materiais pétreos. Declarando este um de seus problemas futuros, a tentativa de encontrar materiais que sejam capazes de promover um sistema de ligante alternativo é de grande procura, visando que o produto final tenha um desempenho mecânico semelhante ou melhor para receber e absorver as cargas de rolamento, bem como uma vida útil igual ou superior aos pavimentos já existentes.

Observando não só os calçamentos rodoviários, mas também a construção civil no geral, pesquisas por materiais alternativos que não tragam tantas agressões ao meio ambiente e que não sejam extraídas de fontes naturais não renováveis estão evoluindo rapidamente e, em alta escala. Baseado em diversos estudos, este trabalho acadêmico pretende encontrar um concreto alternativo para pavimento rodoviário utilizando um cimento álcali-ativado, que, segundo Pinto (2006), este tipo de material é mais resistente mecanicamente e apresenta maior vida útil em relação aos concretos fabricados com cimento Portland.



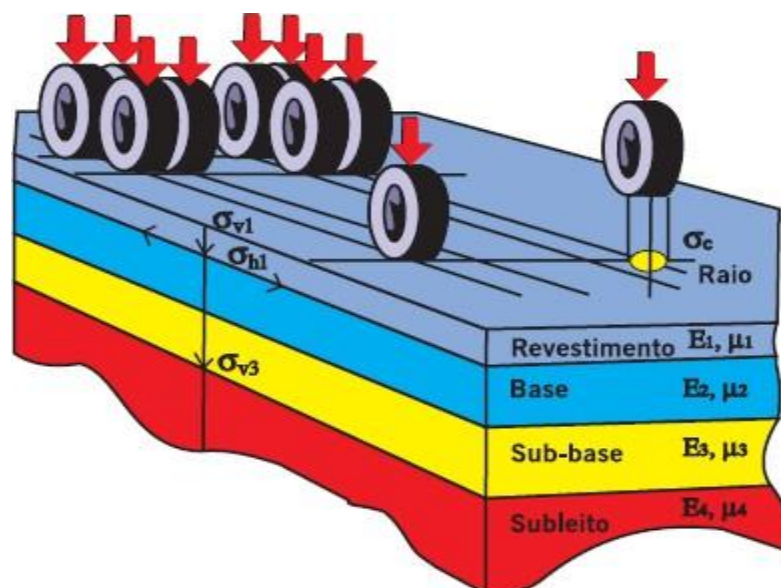
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Antes de tudo, faz-se necessário compreender os pavimentos rodoviários que abordam os ligantes asfálticos e seus agregados, bem como o cimento álcali-ativado ou geopolímero, que traz os principais materiais aluminossilicatos, ativadores alcalinos, reações de ativação e os campos de aplicação que compõem este estudo, de acordo com diversos pesquisadores. Uma vez que é essencial ter um embasamento sobre pavimentação e cimento álcali-ativado para assim, verificar a viabilidade dos ensaios.

### 2.1 PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Para trafegar com mais conforto e segurança, emprega-se uma técnica capaz de resistir a cargas transferidas pela circulação de veículos, mais conhecida como pavimento, na qual baseia-se em finitas camadas construídas sobre uma terraplenagem. (BERNUCCI *et al.*, 2008). Nessa linha de pensamento, a Figura 1 representa as solicitações de cargas que as finitas camadas recebem e transferem:

Figura 1 - Esquematização das camadas de um pavimento e suas tensões solicitantes



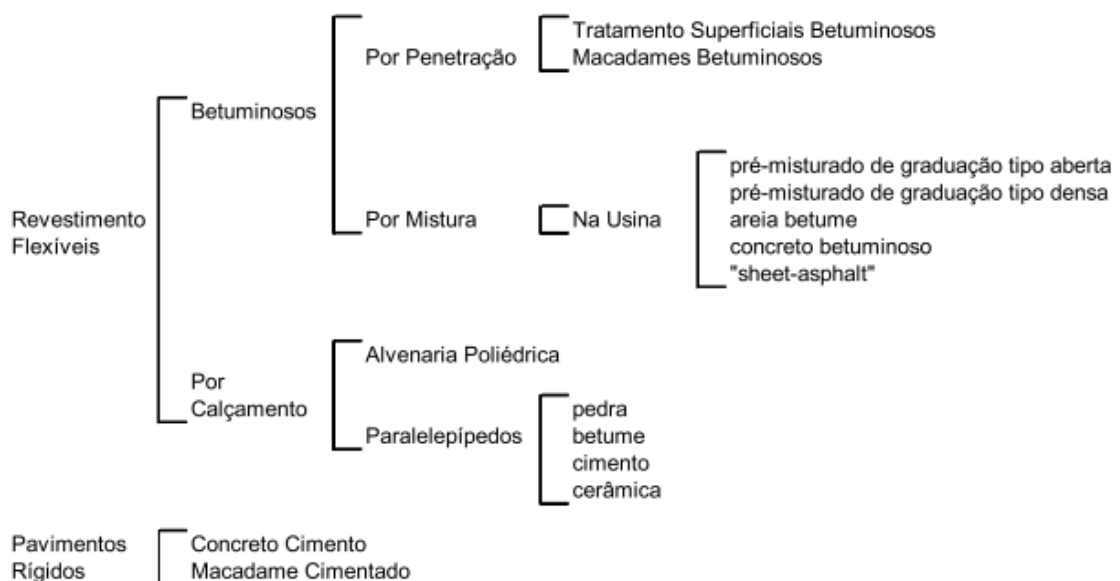
Fonte: Adaptado de Bernutti *et al.*, (2008).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, DNIT (2006), os pavimentos rodoviários são classificados como:

- **Flexível:** São caracterizados por sofrerem grandes deformações elásticas quando carregados, e com isso, as cargas são dispostas nas camadas com carregamentos parecidos. Exemplo: Uma camada de brita graduada como base revestida apenas com uma crosta asfáltica;
- **Semi-Rígido:** São aqueles que têm em sua camada de base um material ligante cimentício, como o solo melhorado com cimento, revestido por uma demão asfáltica;
- **Rígido:** São capazes de absorver em sua camada de revestimento, quase totalmente, as tensões quando aplicado o carregamento. A mesma contém alta rigidez em relação às camadas inferiores. Exemplo: Pavimento de cimento Portland.

Com base nisso, a Figura 2 esquematiza a classificação dos pavimentos:

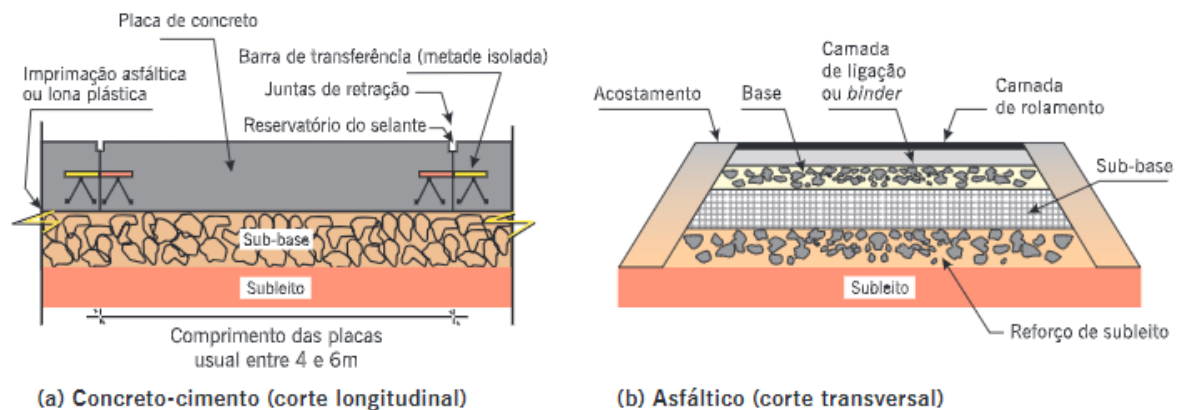
Figura 2 - Classificação dos revestimentos



Fonte: DNIT (2006).

A camada responsável por transmitir as cargas de tráfego para as camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e dar conforto para os usuários da via é conhecida como revestimento asfáltico. (Bernucci, *et al.*, 2008). A Figura 3 localizada na página posterior apresenta todas em corte os pavimentos:

Figura 3 - Camadas dos Pavimentos Rígidos e Flexíveis



Fonte: Bernucci *et al.* (2008).

### 2.1.1 Ligantes Asfálticos

O asfalto na pavimentação é comumente empregado, pois ele funciona como um ligante betuminoso na união dos agregados minerais, deixando a camada mais flexível, impermeável, resistente a ação de alguns ácidos, álcalis e sais. Dependendo da classificação em relação às suas propriedades físicas, o asfalto é titulado como CAP - cimento asfáltico de petróleo, e logo após recebe uma numeração. (Bernucci *et al.*, 2008). Segundo a Norma DNIT 095/2006 – EM, são classificados em:

- CAP-30/45;
- CAP-50/70;
- CAP-85/100;
- CAP-150/200.

As propriedades físicas que determinam o CAP, segundo o autor, seriam semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelásticos a temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. Para ele, existem no mercado brasileiro os seguintes ligantes asfálticos:

- Cimentos asfálticos de petróleo (CAP);
- Asfaltos diluídos (ADP);
- Emulsões asfálticas (EAP);
- Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- Asfaltos modificados por polímero - AMP ou por borracha de pneus - AMB;

- Agentes rejuvenescedores - AR e ARE.

### 2.1.2 Agregados

Os agregados são materiais que não possuem uma forma ou volume definido, apresentam tamanho e propriedades essenciais para a fabricação de argamassas e concretos ao se juntarem com algum ligante. São derivados de areia, pedregulhos, rochas minerais (natural ou britadas) e podem ser recicláveis. A sua classificação possui desempenhos variados, pois dependem de questões geológicas, mineralógicas, químicas, granulométricas, entre outros. Com isso, são classificados quanto a natureza, tamanho e granulometria. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

São classificados como natural, artificial e reciclado:

- **Agregados naturais:** São os encontrados na natureza e utiliza-se o processo convencional de desmonte, escavação e dragagem. Na pavimentação são usados conforme retirados ou passam pelo procedimento de britagem. As rochas naturais podem ser de quatro tipos diferentes: ígneas, metamórficas, sedimentares e pedregulhos;

- **Agregados artificiais:** São originários dos resíduos de processos industriais, normalmente da indústria siderúrgica, como escória de alto-forno e de aciaria. Podem também ser fabricados, cujos exemplos são a argila calcinada e a argila expandida, que atingem um alto desempenho;

- **Agregados reciclados:** Tem sua origem em produtos finais de outros processos que chegaram ao final da sua vida útil. Podem ser relacionados como reciclados a borracha de pneus triturada, fresagem de pavimentos antigos, resíduos de construção civil, etc. Porém, para serem utilizados, esses produtos precisam atender a especificações básicas semelhantes à dos agregados naturais, além de especificações particulares. Os resíduos da construção civil podem se apresentar de forma muito heterogênea, o que demanda estudos específicos para sua utilização.

O tamanho destes materiais para mistura asfáltica correta é dividido nos seguintes grupos:

- **Graúdo:** Material retido na peneira número 10, ou seja, materiais maiores de 2mm, como britas, cascalhos, etc;

- **Miúdo:** Material retido na peneira número 200 e passante na peneira número 10, possuem tamanho maiores de 0,075mm e menores que 2mm. Exemplos desse grupo são pó de brita e areia;

- **Material de enchimento (fíler):** Material correspondente a peneira de número 200 e 65% dos agregados são menores que 0,075mm. Cal hidratada e cimento são os exemplares.

A granulometria dos agregados interfere diretamente no resultado do comportamento do revestimento asfáltico, influenciando na rigidez, durabilidade, trabalhabilidade... Essa distribuição granulométrica é analisada pelo processo de peneiramento, onde o material seco é fracionado em uma sequência de peneiras com aberturas de malhas progressivamente menores. Com isso, é determinado a massa que ficou em cada peneira e comparada com a massa total da amostra. Logo, a distribuição granulométrica dos agregados auxilia na determinação de diferentes tipos de misturas asfálticas a serem utilizadas. (Bernucci *et al.*, 2008).

A respeito sobre esse contexto, a Tabela 1 destaca:

Tabela 1 – Tolerância da granulometria dos agregados do concreto asfáltico

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,80	100	-	-	-
1 1/2"	38,10	95 -100	100	-	± 7%
1"	25,40	75 – 100	95 -100	-	± 7%
3/4"	19,10	60 – 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,70	-	-	80 – 100	± 7%
3/8"	9,50	35 – 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,80	25 – 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,00	20 – 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 – 32	10 - 32	8 – 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 – 20	8 - 20	4 – 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 – 8	3 - 8	2 – 10	± 2%

Fonte: Adaptado de DNIT031/2006-ES

## 2.2 CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO OU GEOPOLÍMERO

Os geopolímeros são parte de um grupo de materiais que possuem características cimentícias. Na sua composição apresenta-se produtos naturais ou industriais diversos, desde que esses elementos apresentem grande teor de aluminossilicatos amorfos ou semicristalinos e tenham sofrido tratamento térmico, tornando-os mais reativos com uma fonte alcalina. (BOCA SANTA, 2012). Segundo Davidovits (1978), o qual introduziu pela primeira vez a tecnologia utilizando os geopolímeros em substituição do cimento Portland, o mesmo ajuda na redução da emissão de CO<sub>2</sub>.

Para a fabricação deste cimento, uma possível fonte são resíduos que contenham uma quantidade elevada e adequada de Silício (Si) e Alumínio (Al) em sua forma amorfa à semicristalina e, quando combinados com o líquido alcalino – no qual pode ser hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio –, formam o geopolímero. (BHARATH, 2017).

Quando submetidos à aceleração de endurecimento, sua estrutura fica mais amorfa ou pouco cristalina, transformando os vazios de sua composição com dimensões muito pequenas. Se este processo for realizado a uma temperatura elevada, contrapondo com a temperatura ambiente, a estrutura do geopolímero torna-se mais densa, fechando ainda mais seus poros e a convertendo quase impermeável, "em condições de pressão normal". (PINTO, 2004).

No que tange aos aglomerantes, de acordo com Pinto (2006), conforme pesquisa de Glukhovsky, o mesmo propôs uma sugestão de ligantes as quais chamou de solo-cimentos. Este ligante baseia-se em uma quantidade significativamente de álcalis, podendo ou não ter a presença de cálcio na mistura. Estes materiais capazes de formar o ligante devem ser a base de óxido de sílica (SiO<sub>2</sub>), óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e são álcali-ativados com hidróxido de sódio ou de potássio, como observa-se nas equações abaixo:

- Solúveis de metais: Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O
- Ricos em cálcio: Na<sub>2</sub>O-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

Os principais ativadores são o hidróxido de potássio, hidróxido de sódio, carbonato de potássio e silicato de potássio. O uso da ativação alcalina com as escórias para o desenvolvimento de um hidrato estável somente é possível se o ph

das soluções ativadoras for acima de 12, sendo que a união das escórias com substâncias ácidas (ph menor que 2) apontam que os hidratos encontrados não apresentam estabilidade. (PINTO, 2006).

### **2.2.1 Principais Materiais Aluminossilicatos**

Como potenciais álcali-ativados tem-se as escórias, cinzas volantes e vulcânicas, as mesmas sofrem alteração térmica elevada em sua formação, arquitetando estruturas mais amorfas. (PINTO, 2004).

A ativação alcalina pode acontecer de várias maneiras distintas. Uma delas e, inclusive, a mais usada são as escórias de alto forno. Tem-se também o emprego de escórias industriais e a ativação por aluminossilicatos sem o uso de cálcio, por exemplo: os caulins, que, com a ajuda da temperatura e pressão passam pelo processo de desidroxilação, onde a temperatura auxilia na acomodação molecular melhorando as combinações. (PINTO, 2006).

#### **2.2.1.1 Metacaulim**

O metacaulim atinge-se a partir de alterações químicas das rochas felspáticas e quando submetidas a altas temperaturas fazem com que o material tenha sua estrutura cristalina amorfa. (PINTO, 2004).

A partir dos resultados de difração de raios X identificou-se que na fase amorfa o metacaulim possui em sua composição sílica, alumina, entre outros; e, como principais elementos químicos o quartzo, caulinita, muscovita e hematita. Caracteriza-se como um material reativo e contém características pozolânicas, uma destas propriedades foi possível identificar a partir da coroa amorfa encontrada no difratograma do metacaulim. (MEDINA, 2011).

Nas palavras do autor acima, o metacaulim e o hidróxido de cálcio quando misturados com água geram um composto hidratado muito parecido com o do cimento Portland. Entretanto, o metacaulim absorve o hidróxido de cálcio enquanto o cimento Portland hidratado gera hidróxido de cálcio.

#### **2.2.1.2 Pozolanas Naturais**

Segundo Belaidi *et al.* (2012), diversos estudos mostram que a pozolana natural tem sido amplamente usada como um substituto para o cimento Portland em

muitas aplicações, por causa das suas propriedades vantajosas que incluem: redução de custos e troca de calor, diminuição da permeabilidade e a resistência química elevada.

Este material tem sua origem em minerais vulcânicos e em rochas, onde o resfriamento do magma tem aluminossilicatos em excesso, gerando-se uma estrutura vítrea desordenada e reativa no ponto de vista químico. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

### 2.2.1.3 Resíduos Sólidos Industriais

Geralmente, cinzas vulcânicas e algumas cinzas volantes têm baixo teor de cálcio, estabelecendo que a utilização destas cinzas como ligante em cimento Portland seja pouco provável, por exemplo. (PINTO, 2004).

Para Conte *et al.* (2011), é possível obter geopolímeros a partir de cinzas pesadas da queima de carvão mineral, cuja Tabela 2 abaixo, descreve-a estrutura química do material, o único tratamento necessário no resíduo é a diminuição do tamanho das partículas.

Tabela 2 - Estrutura química da cinza de carvão mineral

Óxido	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	PF
(%massa)	57,9	22,8	4,1	2,1	1,4	1,1	0,4	0,3	9,6

Fonte: Adaptado de Conte *et al.*, (2011).

A cinza se forma a partir de um processo termelétrico que promove a conversão de carvão fóssil em energia através da combustão. Este dinamismo é o responsável pela geração de energia elétrica que é vital para o desenvolvimento econômico e social da sociedade. Ela pode vir de diversas matrizes, como: hidrelétrica, eólica, biocombustíveis, etc. Contudo, o uso de energias convencionais como o carvão fóssil apresenta a vantagem de não depender de nada, além da tecnologia necessária e adequação ambiental, diferentemente da hidroeletricidade que deriva das chuvas ou da eólica que provém dos ventos.

Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), a maioria das cinzas originadas da queima de carvão mineral no Brasil pode ser classificada como resíduo Classe II A não inerte, apesar de apresentar somente duas das cinco propriedades utilizadas como fator de classificação de resíduos sólidos, que são a corrosividade e toxicidade.



Os resíduos originados nos processos de utilização termelétrica dos carvões minerais, genericamente denominados cinzas, podem ser classificados em três categorias:

- **Escórias:** São originadas pela queima do carvão granulado em grelhas fixas e móveis, e, retiradas pelo fundo das fornalhas após serem resfriadas com água. Apresentam granulometria grosseira com alto teor de carbono não queimado (10 a 20%). Devido ao seu peso, não podem ser arrastadas por meio hidráulico;
- **Cinzas de fundo ou Cinzas pesadas:** São partículas de granulometria mais grossa que se alojam no fundo das fornalhas, onde normalmente são transportadas por arraste hidráulico até a bacia de decantação. São originadas da queima de carvão pulverizado contendo teores de carbono não queimado na ordem de 5 a 10%;
- **Cinzas leves ou Cinzas volantes:** São constituídas de partículas extremamente finas (menor que 0,15mm) arrastadas pelos próprios gases de combustão produzidos nas fornalhas, podendo ser retidas por sistemas de captação como filtros de tecido, ciclones, etc.

#### 2.2.1.4 Cinza Volante

A cinza volante manipulada nesta monografia foi obtida através da InterCement Cympor, empresa ao qual adquiriu-se a cinza a partir da Braskem situada na cidade de Triunfo (no Polo Petroquímico). Rohde (2016) relata que a empresa utiliza o carvão CE-5000, onde 32,5% são cinzas e 0,73% de enxofre. O carvão é queimado em três caldeiras possuindo um consumo de 280t/hora, com o propósito de geração de energia elétrica e vapor, 24 horas por dia. As cinzas apresentam uma proporção de 86% (cinza volante) e 14% (cinza de fundo), sendo produzidos 8.000t/mês de cinza volante e 1.100t/mês de cinza de fundo.

Este material é destinado para a fábrica de cimento InterCement, localizada em Nova Santa Rita. A corporação possui dois projetos de destinação das cinzas volantes para a fabricação de tijolos; um deles com a empresa Petzi (em Triunfo) que recebe cerca de 245t/mês de cinza úmida transformando-a em 87.500 unidades de tijolos ao mês. Já o segundo projeto é fichado com a empresa de André Koff (em Viamão), onde recebe 980t/mês de cinza úmida fabricando cerca de 350.000 unidades de tijolos por mês. (ROHDE, 2016).

### **2.2.2 Ativadores Alcalinos**

Os álcali-ativados são resultantes da hidratação de aluminossilicato com substâncias alcalinas. Para ter melhores resultados químicos, deve-se fazer com que o aluminossilicato sofra alguma alteração térmica antes da reação, deixando sua estrutura cristalina mais amorfa. Os álcali-ativados possuem, em sua composição, basicamente: hidróxido, sais de ácidos ou sais silicatos. (PINTO, 2004).

Pinto (2006) explica que o principal material utilizado no ativador precisa ser analisado; no caso, o potencial na composição química juntamente com o grau de finura, pois esses itens são essenciais para a reação de ativação. Tem-se como predominantes ativadores que possuem ligantes geopoliméricos: hidróxidos de sódio ou potássio, carbonato de sódio e silicatos de sódio ou potássio.

Para o material ser um potencial ativador, pode-se ajustar a composição química dos mesmos para que eles possam adquirir um potencial ativador, já que, alguns dispõem altas quantidades de sílica e alumina. Deste modo, ocorrendo conseqüentemente o ajuste do óxido de sódio. (PINTO, 2006).

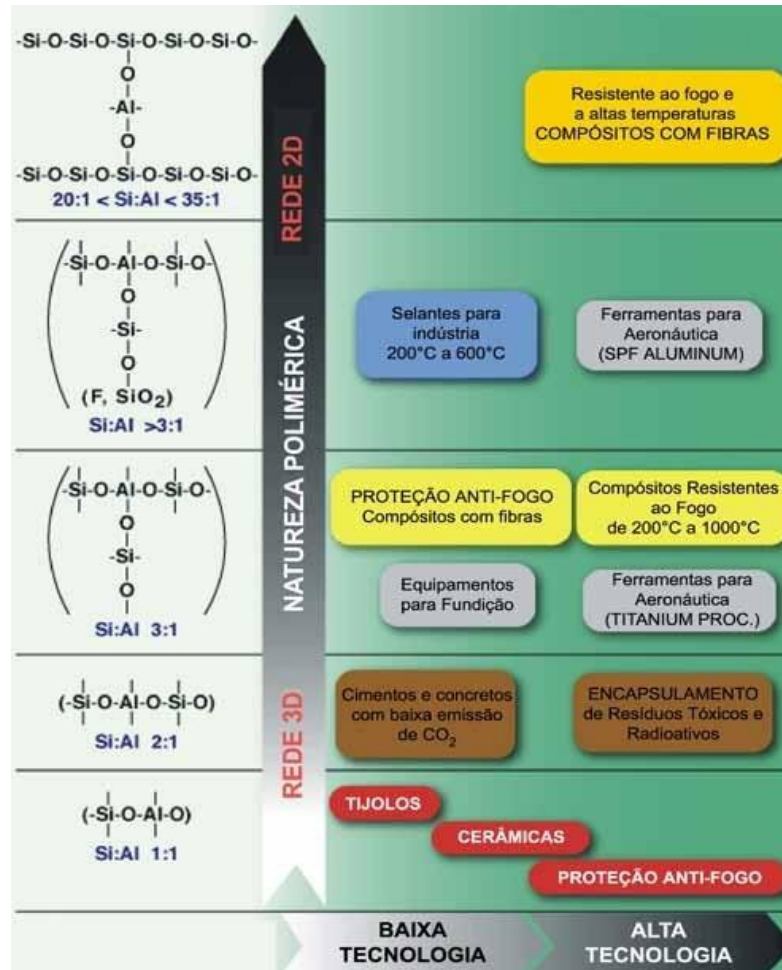
### **2.2.3 Reações de Ativação**

A policondensação é um método no qual os tetraedros de  $\text{SiO}_4$  e  $\text{AlO}_4$  são unidos para o compartilhamento de oxigênios, resultando na ativação alcalina. A formação da estrutura alcalina se dá com o auxílio dos íons alcalinos que exercem a função de equilibrar as cargas negativas que estão sobrando. Essas cargas resultam da troca da coordenação do oxigênio com o alumínio, logo, ambos demonstram as características dos ligantes. (PINTO, 2006).

### **2.2.4 Campos de Aplicação**

Os ligantes geopolímeros são capazes de apresentar grandes resistências mecânicas e um bom comportamento quando submetido ao fogo, bem como resistência relacionada à temperatura, podendo ser considerados um material rígido. (PINTO, 2004). A respeito disso, a Figura 4 situada na próxima página, exemplifica a ideia do autor:

Figura 4 - Aplicações dos cimentos álcali-ativados



Fonte: Adaptado de Pinto (2006).

Encerrando-se a fundamentação teórica, no capítulo posterior, será exibida a metodologia de pesquisa do presente estudo.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os métodos utilizados para a execução do concreto alternativo para revestimento flexível ou rígido, bem como os ensaios necessários para a análise e comparação do material. Conforme o fluxograma da Figura 5 abaixo, destacam-se os seguintes aspectos:

Figura 5 - Fluxograma de Metodologia



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

#### 3.1 CINZA VOLANTE

A cinza volante manuseada neste trabalho foi fornecida pela empresa InterCement Cypmor, na qual a mesma obteve-a através da extração do carvão mineral usada nas caldeiras de vapor da empresa Braskem. Não se faz necessário a moagem do material, pois ela foi fornecida moída, como mostra a Figura 6 localizada na página seguinte.

Então, optou-se pela CV como o material precursor para a reação, visto que é rica em óxido de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), itens confirmados a partir da caracterização química realizada com a CV utilizada no presente trabalho.

Figura 6 - Cinza Volante



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

### 3.1.1 Caracterização Química

O ensaio para a caracterização química da amostra foi realizado por meio do espectrômetro modelo EDX-720 no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, onde foi analisado qualitativamente e quantitativamente os elementos químicos presentes na CV aplicado pelo laudo técnico do ensaio de fluorescência de raios X (FRX). (vide Anexo A).

## 3.2 ATIVADOR

### 3.2.1 Dosagem

Com base nos estudos de Livi (2013), foram escolhidas duas molaridades com razão de solução ativadora por CV distintas, a amostra A de 0,50 para 12mol e amostra B de 0,55 para 16mol.

Amostra A – 12mol (230g de solução):

- Água: 51,81g;
- Hidróxido de Sódio: 24,87g;
- Cinza Volante: 153,37g.

Amostra B – 16mol (230g de solução):

- Água: 46,75g;
- Hidróxido de Sódio: 29,92g;

- Cinza Volante: 153,34g.

Em concreto de cimento Portland é usualmente utilizado relação 1:3 de água/aglomerante e 0,55 relação água/cimento para a classe de agressividade ambiental III segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015), entretanto em cimento alcali-ativado a água é utilizada para a diluição da molaridade do hidróxido de sódio e consequentemente dar fluidez ao material. Assim como no cimento asfáltico não é utilizado água na mistura, pois o CAP é diluído quando aquecido entre 107°C a 177°C conforme DNIT (2006).

### 3.2.2 Preparação

O ativador da matriz cimentícia é composto por cinza volante e hidróxido de sódio que foram diluídos a uma molaridade de 12mol e 16mol com água de abastecimento público (água potável), atendendo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009).

Para realizar esta matriz, foi manipulado o hidróxido de sódio em micro pérola P.A. (NaOH) da empresa Neon Comercial, tendo o teor de pureza de 99,20% e a massa molecular igual a 40g/mol. O laudo técnico do produto foi disponibilizado pela própria companhia (Anexo B) e está apresentado abaixo na Tabela 3.

Tabela 3 – Laudo Técnico do Hidróxido de Sódio

<b>Determinação</b>	<b>Especificação</b>	<b>Resultado</b>
<b>Teor</b>	≥ 97,00%	99,20%
<b>Ferro (Fe)</b>	≤ 10ppm	10ppm
<b>Aparência</b>	= Micro pérola branca	Micro pérola branca
<b>Cloreto (Cl)</b>	≤ 0,005%	0,005%
<b>Potássio (K)</b>	≤ 0,03%	0,03%
<b>Sulfato (SO4)</b>	≤ 30ppm	30ppm
<b>Cálcio (Ca)</b>	≤ 0,01%	0,01%
<b>Níquel (Ni)</b>	≤ 20ppm	20ppm
<b>Mercúrio (Hg)</b>	≤ 0,1ppm	0,1ppm
<b>Magnésio (Mg)</b>	≤ 50ppm	50ppm
<b>Metais pesados (como Ag)</b>	≤ 10ppm	10ppm
<b>Carbonato (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)</b>	≤ 1,0%	0,20%

Fonte: Neon Comercial (2020)

Inicialmente, foram postos na cuba da argamassadeira a água e o hidróxido de sódio que foram misturados manualmente por 30 segundos, após esse tempo, acrescentou-se a CV e repetido o mesmo processo, porém, por 45 segundos, como mostra a Figura 7:

Figura 7 - Diluição do hidróxido de sódio com água e mistura do ativador com CV



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

### 3.3 CORPO DE PROVA

#### 3.3.1 Dosagem dos Agregados

De acordo com as tolerâncias determinadas pelo DNIT (2006) e os ensaios de caracterização física (Anexo C), já realizados pelo grupo Carollo (Britagem Montenegro LTDA), empresa na qual disponibilizou os agregados para este estudo, que são de origem basáltica e absorção média obtida através da fração passante na peneira 1" e retida na peneira nº10 (Hidrostático) equivalente a 1,5% assim como a densidade aparente e densidade real média de 2,84 e 2,97, respectivamente, e a densidade real média igual a 2,948 na fração passante na peneira nº10 e retida na peneira nº200 (Picnômetro).

A dosagem dos agregados foi feita seguindo os resultados apresentados a partir do ensaio de granulometria realizado pelo grupo Carollo e calculando-o para que o percentual ideal fosse enquadrado com as especificações da granulometria da Faixa C segundo *DNIT 031/2006-ES* para compor a camada de revestimento, com isto foi realizado a estabilização granulométrica dos agregados ao qual resultou em 25% de brita 3/4", 26% de brita 3/8" e 49% de pó de brita.

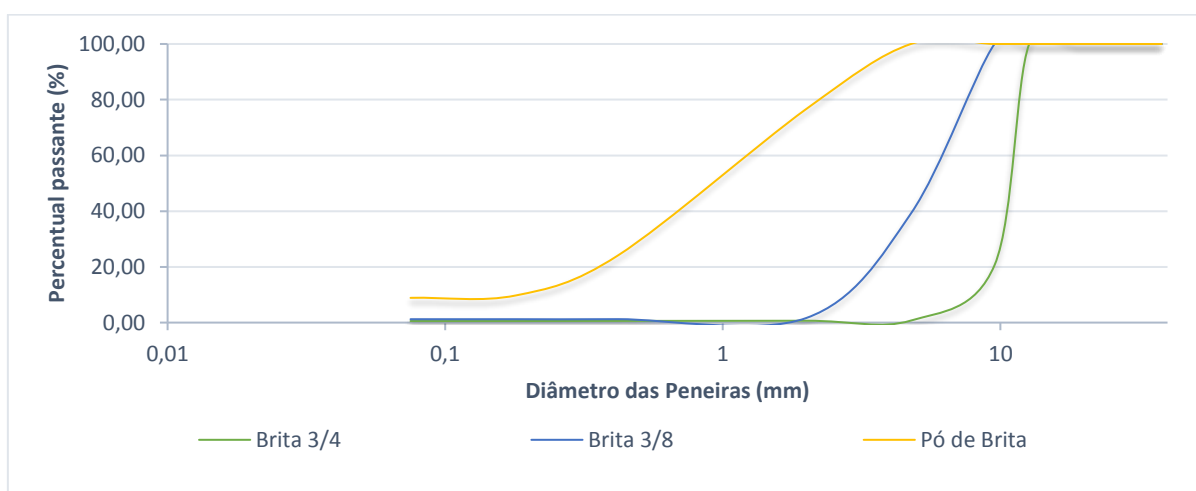
Na Tabela 4 é possível verificar os limites máximos e mínimos da faixa, assim como a linha de referência e a curva encontrada pela dosagem calculada. O Gráfico 1 apresenta a curva granulométrica individual dos agregados utilizados assim como no Gráfico 2 apresenta a curva granulométrica da estabilização dos agregados.

Tabela 4 - Granulometria dos Agregados

Composição		25,0	26,0	49,0	100	Especificação		Referência
Peneira	(mm)	BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ DE BRITA	FAIXA C	Min.	Máx.	
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,0	100	100	100
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,0	100	100	100
3/4"	19,05	100,00	100,00	100,00	100,0	100	100	100
1/2"	12,7	100,00	100,00	100,00	100,0	80	100	90
3/8"	9,525	20,61	100,00	100,00	80,2	70	90	80
Nº 4	4,76	0,73	39,13	100,00	59,4	44	72	58
Nº 10	2	0,66	1,66	76,68	38,2	22	50	36
Nº 40	0,42	0,60	1,24	24,16	12,3	8	26	17
Nº 80	0,18	0,57	1,22	9,76	5,2	4	16	10
Nº 200	0,075	0,57	1,22	8,88	4,8	2	10	6

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

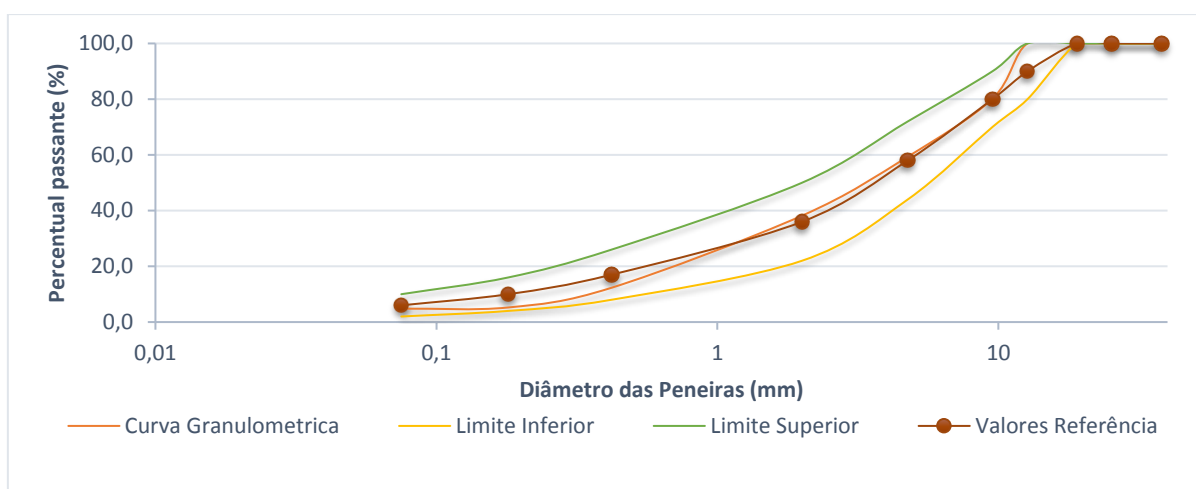
Gráfico 1 – Curva Granulométrica Individual



Fonte: Elaborada pela autora (2020).



Gráfico 2 – Curva Granulométrica da Estabilização dos Agregados



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

### 3.3.2 Moldagem

Foram misturados os agregados juntamente com a solução ativadora na proporção de 3/4. Esta etapa foi produzida no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMC) da Unisinos.

Os Quadros 1 e 2, expõe, respectivamente, os modelos de corpos de provas moldados assim como os tipos de ensaios realizados para cada molde e quantidade ensaiada. Foram moldados 3 CPs para serem rompidos nas idades de 1, 3 e 7 dias e para cada molaridade das amostras.

Quadro 1 – Moldagem

	<b>Cilíndrico</b>	<b>Prismático</b>	<b>Marshall</b>
<b>Tamanho (cm)</b>	5x10	4x4x16	10x6,35
<b>Quantidade</b>	3	3	3

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Quadro 2 – Ensaios

	<b>Cilíndrico</b>	<b>Prismático</b>	<b>Marshall</b>
<b>Ensaio de Compressão</b>	3		
<b>Ensaio de Tração na Flexão</b>		3	
<b>Estabilidade e Fluência</b>			3

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Depois da preparação do ativador, acrescentaram-se os agregados no composto, incorporando-os manualmente por 2 minutos ou até homogeneizar a mistura. Os moldes foram devidamente umedecidos com o desmoldante Desmol Betoneira, óleo mineral, oferecido pelo laboratório e a moldagem foi realizada em duas camadas, a cada uma foram efetuados 10 golpes com um soquete cilíndrico para argamassa.

Nas Figuras 8 e 9 situadas na próxima página, sucessivamente, demonstram que nos CPs cilíndricos e prismáticos, utilizou-se a mesa vibratória na frequência número 7 por 30 segundos para adensamento, já para os CPs Marshall, foi aplicado o soquete Marshall em 3 golpes apenas.

Figura 8 - CPs Prismáticos e Cilíndricos



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Figura 9 - Moldagem dos CPs Marshall



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

### 3.3.3 Cura térmica

O procedimento de cura térmica, nas primeiras horas, auxilia no aumento de resistência do cimento álcali-ativado. Conforme estudos realizados por Livi (2013), as temperaturas ideais de cura térmica dos CPs de 12mol são de 65°C e de 85°C aos de 16mol, ambas com duração de 22 horas na estufa em temperatura constante.

Para este trabalho, usaram-se as temperaturas das pesquisas da autora acima, como mostra a Figura 10 abaixo e, logo depois das 22 horas, foram passados para uma estufa a 40°C por 1 hora. Com o intuito de completar as 24 horas para desmoldagem, retiraram-se as amostras da estufa e foram deixadas em clima ambiente por mais 1 hora.

Figura 10 - Cura Térmica 65°C e 85°C



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

### **3.3.4 Ensaios Físicos**

#### **3.3.4.1 Massa Específica**

Este tipo de ensaio visou conhecer a massa específica da mistura compactada, sendo ela a razão entre a massa total da mistura e seu volume. A determinação consiste na pesagem do corpo de prova seco, logo após a desmoldagem dele, assim como do volume com base na altura, largura e espessura média medida. Ou seja, a massa da amostra dividida pelo volume representa a massa específica.

#### **3.3.4.2 Peso Específico**

O mesmo ensaio, desejou conhecer o peso específico da mistura compactada, sendo ela a razão entre a força peso e seu volume. Deste modo, a massa total da amostra, multiplicada pela força gravitacional e dividida pelo volume, representa o seu peso específico.

### **3.3.5 Ensaios Mecânicos**

Os ensaios mecânicos foram realizados nas idades de 1, 3 e 7 dias conforme descrito na NBR 16697 (ABNT, 2018) para a caracterização e comparação ao cimento Portland e ao cimento asfáltico, os ensaios aos 28 dias não foram realizados devido o tempo disposto do laboratório pela pandemia de Covid-19.

#### **3.3.5.1 Estabilidade Marshall - Estabilidade e Fluência**

Este ensaio foi adaptado e executado com base na Norma do DNIT (1995) os CPs foram moldados em um molde Marshall de 10cm de diâmetro e 8cm de altura, onde foi aplicada uma carga no corpo de prova constante com taxa de carregamento de 5cm/min. No momento em que ocorreu a instabilidade no corpo de prova pelo fato do mesmo ter rompido, o ensaio foi finalizado.

O valor da carga aplicado até o momento da ruptura foi considerado como a estabilidade Marshall, expressa em kgf e o deslocamento vertical no momento de ruptura é denominado de fluência, sendo expresso em mm. Este ensaio foi efetuado na prensa MTS Landmark, ilustrada na Figura 11, no Laboratório de Ensaios

Mecânicos da Unisinos, na qual foram rompidos 3 CPs em 1, 3 e 7 dias para cada molaridade operada.

Figura 11 - Prensa MTS Landmark



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

### 3.3.5.2 Resistência à Compressão

Segundo a NBR 7215:2019 (ABNT, 2019), o princípio deste método de ensaio consiste em determinar a resistência à compressão do cimento Portland com CPs cilíndricos de dimensões iguais a 5cm de diâmetro por 10cm de altura. Foi aplicado uma carga vertical constante até a ruptura da amostra.

Figura 12 - Ensaio de Compressão



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Este ensaio, como pode ser visto na figura 12 acima, foi realizado na prensa EMIC PCE100 do Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos e, foram rompidos 3 CPs em 1, 3 e 7 dias para cada molaridade utilizada.

### 3.3.5.3 Resistência à Tração na Flexão

Para este ensaio, foram moldados CPs prismáticos de 4x4x16cm e ensaiados com uma taxa de carregamento de (50 +/- 10) N/s até o momento de sua fissura. A resistência foi calculada a partir da equação (1) conforme descrito na NBR 12142:2010:

$$f_{ct,f} = \frac{F \times L}{b \times d^2} \quad (1)$$

Onde:

$f_{ct,f}$  = Resistência à tração na flexão (MPa);

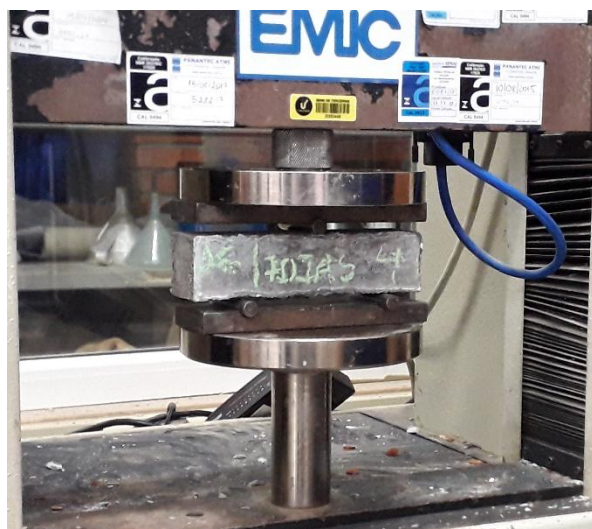
F = Força máxima aplicada verticalmente e registrada na máquina (N);

L = Distância do vão entre os apoios (mm);

b = Largura média do corpo de prova (mm);

d = Altura média do corpo de prova (mm).

Figura 13 - Prensa EMIC DL 200



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Desta maneira, o ensaio foi realizado na prensa EMIC DL 2000, demonstrada na Figura 13, tendo como capacidade de carga 2000kgf, no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos. Foram quebrados 3 CPs em 1, 3 e 7 dias para cada molaridade usada.

No próximo capítulo, serão exibidos os dados analisados e interpretados deste estudo.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo consiste na apresentação e análise dos resultados obtidos através da repercussão dos ensaios e a comparação deles com os parâmetros normativos vigentes, além de estudos já realizados. O mesmo está dividido em 2 subcapítulos: a cinza volante e o corpo de prova.

### 4.1 CINZA VOLANTE

#### 4.1.1 Características químicas

Após o ensaio de FRX, conforme a Tabela 5 situada abaixo, verificou-se a composição química da CV utilizada, tendo na sua característica elevado nível de Si e Al com percentuais de 41,41% e 18,07%, respectivamente, ao qual enquadra-se como material precursor para que ocorra a álcali-ativação.

Tabela 5 - Composição Química da CV

Elemento	Percentual
Na <sub>2</sub> O	-
MgO	1,15%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,07%
SiO <sub>2</sub>	41,41%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14%
SO <sub>3</sub>	0,63%
K <sub>2</sub> O	1,62%
CaO	2,18%
TiO <sub>2</sub>	1,04%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,35%
L.O.I <sup>1</sup>	2,37%

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

<sup>1</sup> O percentual de L.O.I. representa o valor da perda de CO<sub>2</sub> ao fogo a temperatura de 1000°C.



Em vista disso, conforme demonstra a Figura 4 deste estudo (vide pág. 26) com a relação encontrada de Si:Al de 2,3, notou-se que o material geopolímero em questão tem seu campo de aplicação em cimentos com baixos teores de CO<sub>2</sub> e no encapsulamento de resíduos tóxicos e radioativos, na qual ressalta-se sua grande importância equivalente aos cuidados ambientais. Portanto, apura-se que a partir da relação encontrada, sua ligação é do tipo polisiloxossilato.

Finalizada a etapa de cinza volante, iniciam-se os resultados acerca do corpo de prova, conforme será apresentado no próximo subcapítulo.

## 4.2 CORPO DE PROVA

### 4.2.1 Ensaio físicos

Para os ensaios físicos a seguir, foram utilizados nos cálculos dos mesmos as dimensões e pesos conferidos com paquímetro digital e balança digital apresentados na Tabela 6 e 7 nas páginas seguintes.

Tabela 6 – Peso e dimensões CPs de 12mol

	<b>Dias</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Seção (mm)</b>	<b>Seção (mm)</b>	
<b>Prismático</b>	<b>1 dia</b>	512,00	162,00		40,17	39,98	
		506,70	161,10		40,97	40,37	
		476,40	161,20		39,95	39,39	
	<b>3 dias</b>	513,50	161,00		41,28	40,77	
		517,00	161,09		40,41	41,25	
		518,80	160,50		41,16	41,01	
	<b>7 dias</b>	515,30	163,00		40,14	40,97	
		527,00	162,40		40,59	41,23	
		515,30	162,00		40,06	41,10	
	<b>Cilíndrico</b>	<b>1 dia</b>	391,70	100,41	50,12		
			385,20	99,24	49,49		
			385,70	99,84	49,24		
<b>3 dias</b>		403,20	100,74	50,33			
		387,50	101,51	49,82			
		394,30	100,56	49,57			
<b>7 dias</b>		388,40	100,34	49,58			
		396,50	100,11	49,61			
		388,00	100,60	49,67			
<b>Marshall</b>		<b>1 dia</b>	1291,30	80,12	101,17		
			1290,80	79,56	101,36		
			1291,30	79,46	101,49		
	<b>3 dias</b>	1301,20	80,48	102,29			
		1311,40	80,48	101,62			
		1282,20	79,31	101,22			
	<b>7 dias</b>	1279,80	79,15	101,58			
		1300,10	80,02	102,02			
		1287,00	79,77	101,73			

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 7 – Peso e dimensões CPs de 16mol

	<b>Dias</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Diâmetro (mm)</b>	<b>Seção (mm)</b>	<b>Seção (mm)</b>
<b>Prismático</b>	<b>1 dia</b>	512,00	161,00		40,25	40,67
		517,00	161,09		39,61	39,60
		515,30	162,00		39,95	39,39
	<b>3 dias</b>	512,50	162,00		40,31	40,86
		507,00	161,00		40,97	40,37
		520,60	162,00		41,29	40,74
	<b>7 dias</b>	519,00	161,30		40,11	40,73
		517,20	161,10		40,12	41,20
		510,50	161,20		40,05	41,91
<b>Cilíndrico</b>	<b>1 dia</b>	391,70	100,88	49,85		
		387,50	100,85	49,96		
		394,30	100,64	49,81		
	<b>3 dias</b>	405,30	101,52	50,24		
		397,70	100,64	49,84		
		393,10	101,75	50,56		
	<b>7 dias</b>	384,90	100,07	49,71		
		400,90	100,46	49,66		
		396,80	100,85	50,34		
<b>Marshall</b>	<b>1 dia</b>	1291,30	79,33	101,17		
		1295,30	79,47	101,38		
		1297,60	80,56	101,49		
	<b>3 dias</b>	1294,90	79,56	101,35		
		1303,20	79,98	101,33		
		1291,10	79,87	101,66		
	<b>7 dias</b>	1283,90	78,96	101,34		
		1263,00	78,65	101,46		
		1288,30	80,04	102,17		

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

#### 4.2.1.1 Massa específica

As Tabelas 8 e 9 apresentam as massas específicas e as médias das mesmas para cada tipo de CP e molaridade moldada, é possível verificar que os valores foram bem aproximados, sendo assim, não tendo variações bruscas em decorrência da temperatura utilizada de cura, nem mesmo com a relação à solução ativadora por CV.

Tabela 8 – Massa específica 12 mol

	Dias	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Prismático	1 dia	1,968	1,920	0,026	1,37%
		1,902			
	3 dias	1,878			
		1,895			
		1,926			
		1,915			
		1,922			
		1,939			
		1,932			
		1,978			
Cilíndrico	1 dia	2,018	2,008	0,029	1,42%
		2,029			
	3 dias	2,012			
		1,959			
		2,032			
		2,005			
		2,049			
		1,991			
		2,005			
		Marshall			
2,009					
3 dias	1,967				
	2,009				
	2,009				
	1,995				
	1,988				
	1,985				

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 9 – Massa específica 16 mol

	Dias	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa específica média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	
Prismático	1 dia	1,943	1,950	0,054	2,77%	
		2,047				
	3 dias	2,022				
		1,921				
		1,904				
		1,911				
		1,970				
		1,942				
		7 dias				1,887
						1,990
Cilíndrico	1 dia	1,961	1,994	0,040	1,99%	
		2,011				
	3 dias	2,014				
		2,026				
		1,925				
		1,982				
		2,061				
		7 dias				1,977
						2,025
		Marshall				1 dia
1,991						
3 dias	2,017					
	2,020					
	1,992					
	2,016					
	7 dias		1,986			
			1,963			

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

#### 4.2.1.2 Peso específico

As Tabelas 10 e 11 apresentam os pesos específicos e as médias das mesmas para cada tipo de CP e molaridade moldada, é possível analisar que o material em estudo tem seu peso específico menor que o do concreto que é usualmente encontrado como 24000N/m<sup>3</sup>.

Tabela 10 – Peso específico 12 mol

	<b>Dias</b>	<b>Peso específico (N/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso específico médio (N/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
<b>Prismático</b>	<b>1 dia</b>	19303,82	<b>18832,61</b>	<b>258,41</b>	<b>1,37%</b>
		18657,47			
		18425,84			
	<b>3 dias</b>	18591,02			
		18890,00			
		18788,05			
		18858,11			
	<b>7 dias</b>	19024,56			
		18954,64			
		19400,83			
<b>Cilíndrico</b>	<b>1 dia</b>	19799,46	<b>19699,20</b>	<b>279,71</b>	<b>1,42%</b>
		19901,61			
		19739,62			
	<b>3 dias</b>	19214,17			
		19932,62			
		19672,47			
		20104,53			
	<b>7 dias</b>	19527,48			
		19670,19			
		19724,69			
<b>Marshall</b>	<b>1 dia</b>	19706,11	<b>19596,10</b>	<b>146,73</b>	<b>0,75%</b>
		19300,97			
		19709,15			
	<b>3 dias</b>	19709,44			
		19573,30			
		19499,94			
		19471,15			

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 11 – Peso específico 16 mol

	<b>Dias</b>	<b>Peso específico (N/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Peso específico médio (N/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
<b>Prismático</b>	<b>1 dia</b>	19060,18	<b>19125,30</b>	<b>530,17</b>	<b>2,77%</b>
		20077,08			
	<b>3 dias</b>	19831,96			
		18844,76			
		18680,11			
		18745,55			
		19321,24			
		19053,46			
	<b>7 dias</b>	18513,37			
		19520,21			
<b>1 dia</b>		19232,62			
		19728,29			
<b>3 dias</b>	19760,20	<b>19561,36</b>	<b>388,44</b>	<b>1,99%</b>	
	19874,45				
	18881,69				
	19441,76				
	<b>7 dias</b>				20216,04
					19397,01
<b>Marshall</b>	<b>1 dia</b>	19865,25	<b>19652,53</b>	<b>206,62</b>	<b>1,05%</b>
		19807,22			
		19531,04			
	<b>3 dias</b>	19790,41			
		19819,20			
		19536,88			
		19776,97			
	<b>7 dias</b>	19485,99			
		19259,83			

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

#### 4.2.2 Ensaio mecânicos

Nos ensaios mecânicos a seguir é possível observar oscilações entre os resultados encontrados nas amostras do terceiro dia, essas oscilações podem ter tido influência por algumas formações de gotículas de água na superfície dos CPs, com isto é possível verificar que ocorreu o fenômeno conhecido como eflorescência, no qual indicam que as amostras continuaram reagindo ao longo dos dias absorvendo umidade do meio ao qual se encontravam, como mostra a Figura 14 a seguir.

Figura 14 - Amostra com absorção de umidade



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

#### 4.2.2.1 Estabilidade Marshall – Estabilidade e Fluência

As Tabelas 12 e 13 apresentam os resultados dos CPs ensaiados e os valores médios obtidos após o ensaio de estabilidade e fluência Marshall das amostras com 12mol, assim como o desvio padrão e coeficiente de variação de cada ensaio.

Tabela 12 – Estabilidade (kgf) – 12mol

	<b>1 dia</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>
<b>Marshall 1 (kgf)</b>	5.517,70	9.305,56	9.752,19
<b>Marshall 2 (kgf)</b>	3.592,17	9.388,97	8.211,70
<b>Marshall 3 (kgf)</b>	7.228,49	10.841,66	9.295,05
<b>Média (kgf)</b>	<b>5.446</b>	<b>9.845</b>	<b>9.086</b>
<b>DV</b>	<b>1.819,2</b>	<b>863,8</b>	<b>791,2</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>33,4%</b>	<b>8,8%</b>	<b>8,7%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 13 – Fluência (mm) – 12mol

	<b>1 dia</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>
<b>Marshall 1 (mm)</b>	2,11	2,93	2,20
<b>Marshall 2 (mm)</b>	3,21	3,61	3,02
<b>Marshall 3 (mm)</b>	2,46	2,79	4,08
<b>Média (mm)</b>	<b>2,6</b>	<b>3,1</b>	<b>3,1</b>
<b>DV</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,9</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>21,7%</b>	<b>14,1%</b>	<b>30,3%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Conforme visto, a estabilidade ao longo dos dias para as amostras com 12mol tiveram um ganho de resistência média de 80,78% entre os dias 1 e 3, entretanto



reduziu em 7,71% entre os dias 3 e 7. Entretanto a fluência teve um aumento de 19,83% entre as médias dos dias 1 e 3, e dos dias 3 e 7 a média da fluência se manteve a mesma.

As Tabelas 14 e 15 apresentam os resultados dos CPs ensaiados e os valores médios obtidos após o ensaio de estabilidade e fluência Marshall das amostras com 16mol, assim como o desvio padrão e coeficiente de variação de cada ensaio.

Tabela 14 – Estabilidade (kgf) – 16mol

	<b>1 dia</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>
<b>Marshall 1 (kgf)</b>	9.867,83	9.135,88	10051,89
<b>Marshall 2 (kgf)</b>	9.669,80	9.115,48	10897,95
<b>Marshall 3 (kgf)</b>	8.683,94	9.621,98	8801,51
<b>Média (kgf)</b>	<b>9407</b>	<b>9291</b>	<b>9917</b>
<b>DV</b>	<b>634,1</b>	<b>286,7</b>	<b>1054,7</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>6,7%</b>	<b>3,1%</b>	<b>10,6%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Tabela 15 – Fluência (mm) – 16mol

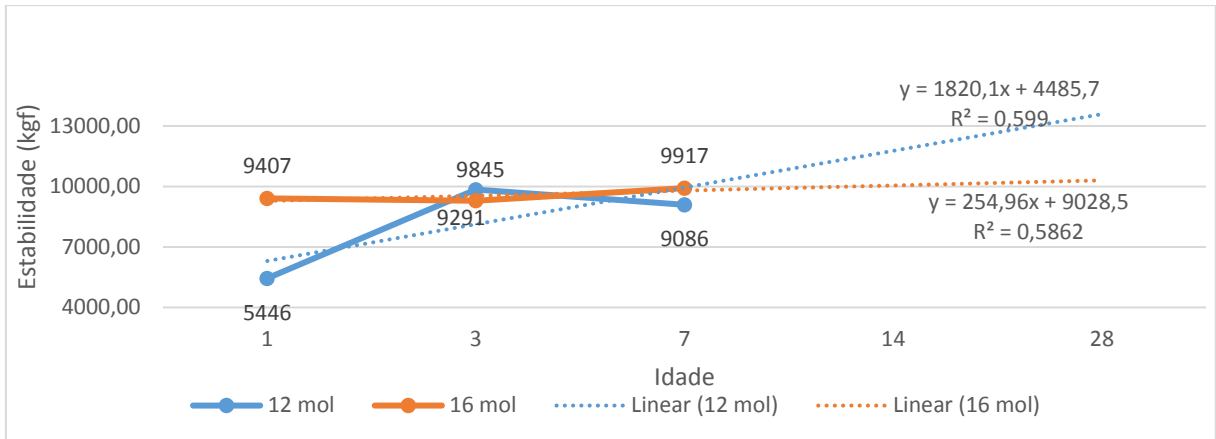
	<b>1 dia</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>
<b>Marshall 1 (mm)</b>	3,00	3,13	2,15
<b>Marshall 2 (mm)</b>	2,20	3,08	2,94
<b>Marshall 3 (mm)</b>	2,02	2,85	2,38
<b>Média (mm)</b>	<b>2,4</b>	<b>3,0</b>	<b>2,5</b>
<b>DV</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,4</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>21,5%</b>	<b>5,0%</b>	<b>16,2%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Neste caso a estabilidade ao longo dos dias para as amostras com 16mol tiveram uma perda de resistência média de 1,23% entre os dias 1 e 3, e teve um aumento de 6,74% entre os dias 3 e 7. A fluência sofreu variações, teve um aumento de 25,38% entre as médias dos dias 1 e 3, e dos dias 3 e 7 a média da fluência teve uma perda de 17,41%.

Os Gráficos 3 e 4 apresentam uma comparação dos valores médios obtidos após cada ensaio com 12 e 16mol.

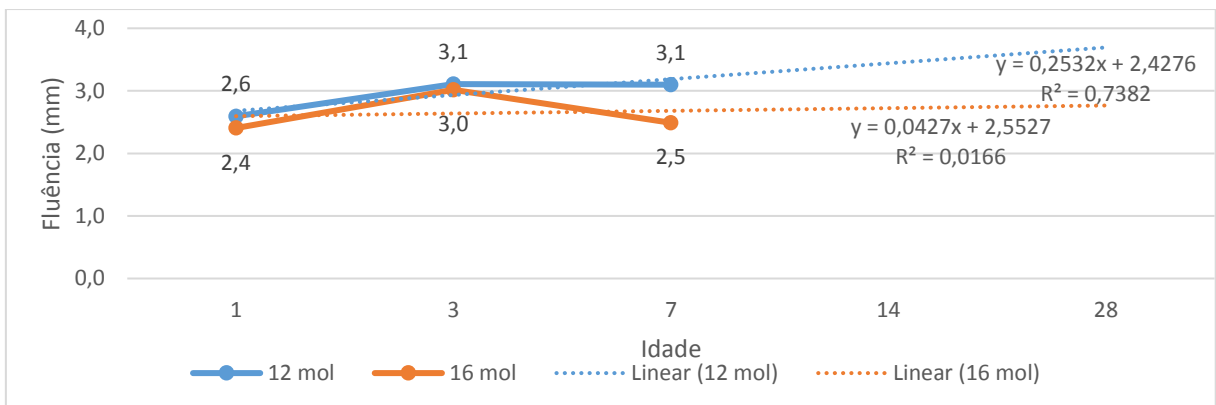
Gráfico 3 – Estabilidade Marshall



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Com base na Norma do DNIT 031/2006-ES ao qual determina no mínimo uma estabilidade de 500kgf para a camada de rolamento, tanto as amostras de 12mol quanto as de 16mol atendem ao mínimo requerido, entretanto para o ensaio de fluência não se tem parâmetro normativo específico, mas os valores obtidos foram bem próximos com os encontrados em outras literaturas sobre revestimentos de concreto asfáltico como as médias das amostras de referências de Tomazelli (2020) ao qual encontrou como fluência valores entre 2,3mm a 4,2mm.

Gráfico 4 – Fluência Marshall



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

#### 4.2.2.2 Resistência à Compressão Axial

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos após o ensaio de resistência à compressão para as amostras de 12mol, assim como suas respectivas médias, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 16 – Resistência à Compressão (MPa) – 12mol

	<b>1 dia</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>
<b>Cilíndrico 4 (MPa)</b>	13,19	9,48	10,15
<b>Cilíndrico 5 (MPa)</b>	12,15	8,51	13,33
<b>Cilíndrico 6 (MPa)</b>	12,80	5,01	15,88
<b>Média (MPa)</b>	<b>12,7</b>	<b>7,7</b>	<b>13,1</b>
<b>DV</b>	<b>0,5</b>	<b>2,3</b>	<b>2,9</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>4,1%</b>	<b>30,6%</b>	<b>21,9%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Para as amostras com 12mol foi observado uma perda de resistência média de compressão entre os dias 1 e 3 de 39,70% e um ganho entre os dias 3 e 7 de 71,15%.

Tabela 17 – Resistência à Compressão (MPa) – 16mol

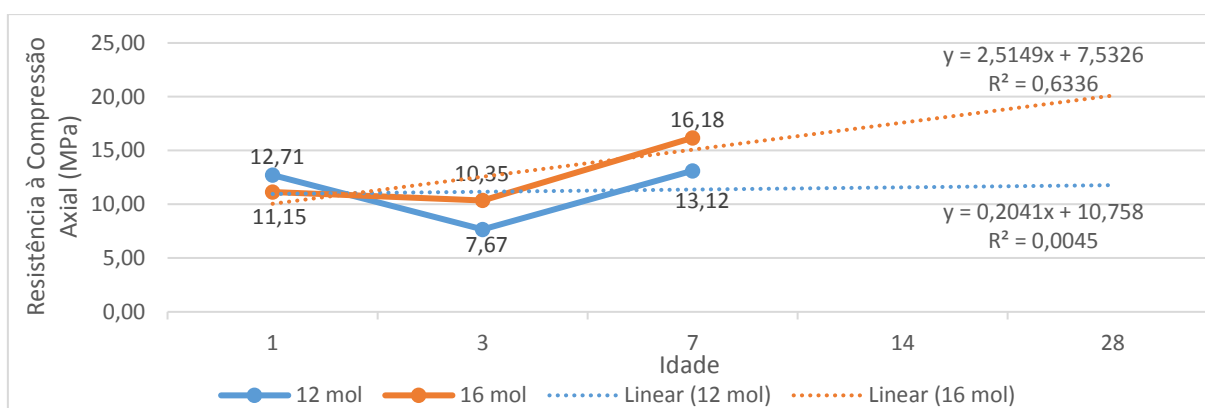
	<b>1 dia</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>
<b>Cilíndrico 1 (MPa)</b>	14,87	8,43	18,06
<b>Cilíndrico 2 (MPa)</b>	9,49	10,05	16,67
<b>Cilíndrico 3 (MPa)</b>	9,09	12,58	13,81
<b>Média (MPa)</b>	<b>11,2</b>	<b>10,4</b>	<b>16,2</b>
<b>DV</b>	<b>3,2</b>	<b>2,1</b>	<b>2,2</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>29,0%</b>	<b>20,2%</b>	<b>13,4%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

A Tabela 17 apresentou as resistências obtidas nas idades de 1, 3 e 7 dias assim como as médias de compressão das amostras com 16mol, desvio padrão e coeficiente de variação, e com isto é possível perceber uma perda de resistência entre os dias 1 e 3 de 7,15% e um ganho entre os dias 3 e 7 de 56,28%.

No Gráfico 5 é possível observar que a resistência à compressão inicial das amostras de 16mol são mais baixas do que as de 12mol, entretanto, aos 7 dias as amostras de 16mol são capazes de resistir mais a compressão do que as de 12mol.

Gráfico 5 - Resistência à Compressão Axial



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Conforme estudos realizados por Livi (2013), as amostras com molaridade igual a 12, relação solução ativadora por cinza volante igual a 0,50 e temperatura de cura térmica de 65°C, entretanto sem agregado, foi obtido valores de resistência compressão próximos a 12,5MPa entre os dias 1, 3 e 7. Já para as amostras de 16mol (cura térmica de 85°C e solução ativadora por CV de 0,55) os resultados de resistência foram de 20,62MPa em 1 dia aumentando ainda mais entre os dias 3 e 7. Quando verificado com os valores obtidos no presente estudo, é possível verificar grande semelhança de resistências.

Em comparação com a resistência à compressão especificadas na Tabela 18 é possível determinar que as amostras de 12mol não se enquadram a nenhuma classe em relação ao cimento Portland, entretanto as amostras com 16mol poderiam ser enquadradas como classe 25 do cimento Portland. Assim como seguindo a linha de pendência, foi estimado o valor de 77,95 MPa para as amostras de 16mol e 16,47 MPa para as amostras de 12mol, embora a linha de tendência indica resultados positivos para as amostras de 16mol, o valor do  $R^2$  não é suficiente para qualquer afirmação, se faz necessário realizar ensaios aos 28 dias para maior precisão dos mesmos.

Tabela 18 – Resistência à Compressão (MPa) do cimento Portland em função do seu tipo e classe adaptado da NBR 16697:2018

<b>Sigla</b>	<b>Classe</b>	<b><u>1 Dia</u></b>	<b><u>3 Dias</u></b>	<b><u>7 Dias</u></b>
<b>CP I CP I-S</b>	25	-	≥ 8,0	≥ 15,0
<b>CP II-E CP II-F CP II-Z</b>	32	-	≥ 10,0	≥ 20,0
	40	-	≥ 15,0	≥ 25,0
<b>CP III CP IV</b>	25	-	≥ 8,0	≥ 15,0
	32	-	≥ 10,0	≥ 20,0
	40	-	≥ 12,0	≥ 23,0
	ARI	≥ 8,0	≥ 8,0	≥ 8,0

Fonte: Adaptado da NBR 16697:2018

#### 4.2.2.3 Resistência à Tração na Flexão

A Tabela 19, apresenta os resultados obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão para os dias 1, 3 e 7 dias assim como os resultados médios, desvio padrão e coeficiente de variação das amostras de 12mol, entretanto, é possível observar que as mesmas sofreram perda de resistência aos longos dos dias 1-3 e 3-7 de 28,18% e 34,30% respectivamente.

Tabela 19 - Resistência à Tração na Flexão (MPa) – 12mol

	<b><i>1 dia</i></b>	<b><i>3 dias</i></b>	<b><i>7 dias</i></b>
<b>Prismático 1 (MPa)</b>	3,78	2,93	1,89
<b>Prismático 2 (MPa)</b>	4,51	2,29	1,42
<b>Prismático 3 (MPa)</b>	3,46	3,23	2,24
<b>Média (MPa)</b>	<b>3,9</b>	<b>2,8</b>	<b>1,8</b>
<b>DV</b>	<b>0,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,4</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>13,7%</b>	<b>17,0%</b>	<b>22,4%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

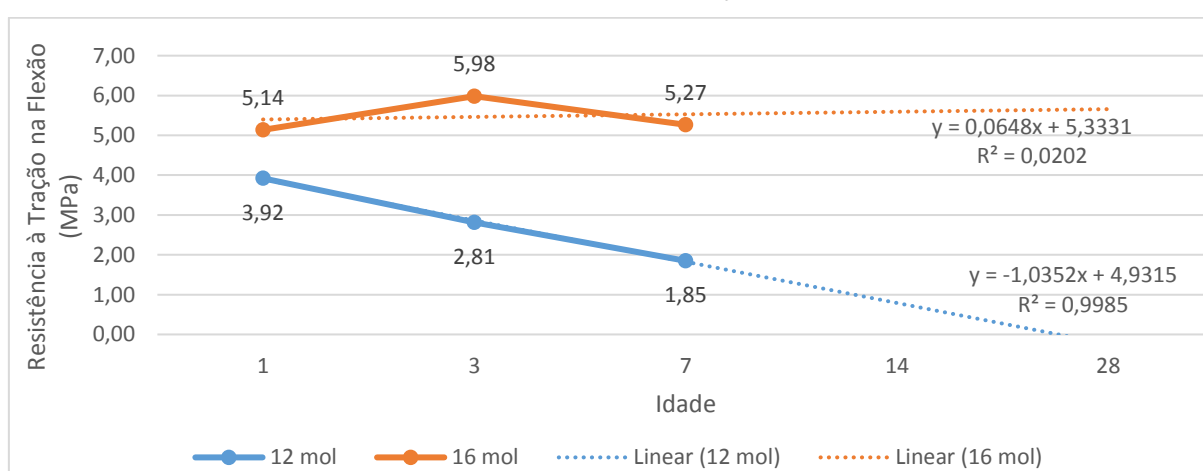
Entretanto, na Tabela 20 é possível verificar um aumento de resistência média de 16,47% entre os dias 1 e 3, e um decréscimo de 11,97% da resistência entre os dias 3 e 7 das amostras de 16mol.

Tabela 20 - Resistência à Tração na Flexão (MPa) – 16mol

	<b>1 dia</b>	<b>3 dias</b>	<b>7 dias</b>
<b>Prismático 4 (MPa)</b>	5,01	6,59	5,26
<b>Prismático 5 (MPa)</b>	4,12	5,89	5,57
<b>Prismático 6 (MPa)</b>	6,29	5,48	4,97
<b>Média (MPa)</b>	<b>5,1</b>	<b>6,0</b>	<b>5,3</b>
<b>DV</b>	<b>1,1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,3</b>
<b>Coeficiente de Variação (%) (CV)</b>	<b>21,3%</b>	<b>9,4%</b>	<b>5,6%</b>

Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Gráfico 6 – Resistência à Tração na Flexão



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

Segundo especificado no Manual de Pavimentos Rígidos (2005), a resistência característica à tração na flexão é geralmente definida na ordem de 4,5MPa aos 28 dias, com isto, é possível observar com a linha de tendência do gráfico as amostras de 12mol resultariam em um resultado negativo, ao qual não seria possível passar por este ensaio aos 28 dias.

Segundo Livi (2013), que realizou os estudos com a matriz cimentícia sem os agregados, os resultados de resistência à tração na flexão das argamassas testadas, obtiveram valores flutuantes, não seguindo uma linha de tendência de comportamento, para as amostras curadas a 65°C, entretanto para as amostras de 12mol e solução ativadora por CV igual a 0,50 os resultados obtidos ficaram próximos a 1,5 e 2MPa entre os dias 1, 3 e 7 e se mantendo próximo a 1,5 aos 28 dias. Já para as amostras curadas a 85°C (16mol e solução ativadora por CV de 0,55) os valores de resistência ficaram entre 3,5 a 5MPa nas idades de 1, 3 e 7 dias, tendo sua curva crescente nestas idades, entretanto chegando próximo a 4,25MPa

aos 28 dias o que nos mostra a variabilidade da resistência das mesmas neste ensaio, não sendo possível determinar uma tendência de crescimento ou decréscimo.

Finalizada a etapa de análise e interpretação dos resultados, encerra-se este trabalho com as considerações finais, comentando-se os principais resultados encontrados, apontando-se as limitações do estudo e indicando-se as sugestões de novas pesquisas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cinza volante demonstra ser um grande potencial para a utilização no cimento álcali-ativado juntamente com os agregados. Entretanto, algumas amostras tiveram perda de resistência ao longo dos dias no ensaio de resistência à tração na flexão, sendo necessário aprofundar os estudos para compreender o seu comportamento quando submetidas a este esforço e em contato com a umidade do ar, assim como é indispensável a realização de mais ensaios relacionados a resistência à compressão axial e estabilidade e fluência, com maior tempo de cura para aprovar a viabilidade das amostras.

De acordo com os resultados obtidos, averiguou-se os potenciais de cada amostra em cada tipo de carregamento de ensaio e, com isto, a análise do potencial de enquadramento como camada de pavimento rodoviário para as amostras.

Apesar disso, notou-se oscilações de resistências durante os ensaios, precisando-se examinar os estudos em um intervalo de tempo maior para entender seus ganhos e perdas, bem como buscar outros ensaios que possam caracterizar outras funções importantes para a pavimentação rodoviária. Com a realização das preparações, concluiu-se um grande potencial nas amostras de 16mol como pavimentação rodoviária.

Os ensaios físicos de densidade máxima aparente, teórica, e volume de vazios não foram efetuados, pelo fato de não ser conhecido o comportamento do material quando em contato com a água.

### 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas informações acima, sugere-se alguns assuntos para trabalhos futuros, objetivando encontrar uma dosagem ideal que atenda as normas vigentes para pavimentação rodoviária:

- a) identificar os fatores que influenciaram nas oscilações dos resultados de resistência no período;
- b) avaliar potencial da mistura quando submetido à ataques químicos (como gasolina e diesel);



- c) estimar o material empregando os simuladores de tráfego como a perda por umidade induzida, sondando sua eficiência como revestimento rodoviário;
- d) verificar o material quanto a deformação permanente, vida de fadiga e módulo de resiliência;
- e) mensurar o material quando submetido à altas temperaturas;
- f) realizar possíveis dosagens a fim de sanar a utilização da cura térmica nas primeiras horas.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos Sólidos - classificação. Rio de Janeiro, ABNT, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 12655:2015**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1:2009**: Água para amassamento do concreto. Parte 1 - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 16697:2018**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215:2019**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, ABNT, 2019.

BELAIDE, A. S. E.; AZZOUZ, L.; KADRI, E.; KENAI, S. **Effect of natural pozzolana and marble powder on the properties os self-compacting concrete**. 2012. Construction and Building Materials.

BERNUCCI, L.B.; CERATTI, J. A. P.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J.B.. **Pavimentação Asfáltica**: formação básica para engenheiros. PETROBRAS, ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.

CONTE, V. BISSARI, E.S., UGGIONI, E., BERNARDIN, A.M. 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 2011, Porto de Galinhas, PE, Brasil  
Livi, C. N. Desenvolvimento de pasta de geopolímeros a base de cinza volante e hidróxido de sódio, 2013. **Dissertação** (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE.  
DNIT 095/2006 – EM. **Cimentos asfálticos de petróleo**: especificação de material, 2006.

\_\_\_\_\_. NORMA 031/2006. **Pavimentos flexíveis** – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. NORMA 043/1995. **Misturas betuminosas a quente** – ensaio Marshall – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **Manual de pavimentação**. 2006.

MEDINA, E. A. **Pozolanicidade do Metacaulim em Sistemas Binários com Cimento Portland e Hidróxido de Cálcio**, 2011. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**. Microestrutura, propriedades e

Materiais. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2008.

\_\_\_\_\_. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Professional Publishing, 2014.

PINTO, A.T. **Sistemas Ligantes Obtidos por Activação do Metaculino**. 2004. Dissertação (Doutorado) - Universidade do Minho, Portugal, 2004.

\_\_\_\_\_. **Introdução ao Estudo dos Geopolímeros**. 2006. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real (Portugal), 2006.

ROHDE, G. M. **Quantificação das Cinzas de Carvão Fóssil Produzidas no Brasil**, 2016. Boletim Técnico – Porto Alegre: Cientec, 2016.

TOMAZELLI, C. **Produção de Concreto Asfáltico com Adição de Resíduos Plásticos**, 2019. Monografia de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2019.

## ANEXO A – LAUDO TÉCNICO DO ENSAIO DE FRX DA CV

Sample : EDX2782 ATC410  
 Operator: Alini  
 Comment : Cinza volante de carvão - Michele Rosa  
 Group : Fly Ash  
 Date : 2020-10-06 10:16:04

### Measurement Condition

```
-----
Instrument: EDX-720  Atmosphere: Vac.  Collimator: 10(mm)  Spin: Off
-----
Analyte      TG kV  uA      FI  Acq. (keV)  Anal. (keV)  Time(sec)  DT(%)
-----
Na           Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  0.84- 1.24  Live- 99  40
Mg           Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  1.05- 1.45  Live- 99  40
Al           Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  1.29- 1.69  Live- 99  40
Si           Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  1.54- 1.94  Live- 99  40
P            Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  1.81- 2.21  Live- 99  40
S            Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  2.11- 2.51  Live- 99  40
K            Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  3.11- 3.51  Live- 99  40
Ca           Rh 15  647-Auto  ----  0 - 20  3.49- 3.89  Live- 99  40
Ti           Rh 50  61-Auto  ----  0 - 40  4.30- 4.70  Live- 100  40
Fe           Rh 50  61-Auto  ----  0 - 40  6.20- 6.60  Live- 100  40
-----
```

### Quantitative Result

```
-----
Analyte      Result      (Std.Dev.)  Proc.-Calc.  Line  Int. (cps/uA)
-----
====[No. 1 Layer]====< Layer1  >=====
Layer1      6.000 um    (-----)  Fix          -----
C3H6       100.000 %   (-----)  Fix          -----
====[Base]=====< Base  >=====
Na2O       ND %        ( 0.114)  Quan-EC     NaKa      0.0000
MgO        1.150 %    ( 0.017)  Quan-EC     MgKa      0.0173
Al2O3      18.071 %   ( 0.043)  Quan-EC     AlKa      2.0308
SiO2       41.412 %   ( 0.047)  Quan-EC     SiKa      8.3487
P2O5       0.139 %    ( 0.009)  Quan-EC     P Ka      0.0030
SO3        0.633 %    ( 0.002)  Quan-EC     S Ka      0.1666
K2O        1.620 %    ( 0.004)  Quan-EC     K Ka      1.6199
CaO        2.178 %    ( 0.005)  Quan-EC     CaKa      2.1564
TiO2       1.042 %    ( 0.005)  Quan-EC     TiKa      4.3275
Fe2O3      4.348 %    ( 0.008)  Quan-EC     FeKa      51.2668
L.O.I     2.370 %    (-----)  Fix          -----
-----
```

## ANEXO B – LAUDO TÉCNICO HIDRÓXIDO DE SÓDIO

**NEON**

## LAUDO DO PRODUTO

Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda  
 CNPJ: 00.327.149/0003-41 I.E.: 073.313.766-10  
 Rua Ernesto Joaquim de Souza, 575  
 CEP: 08555-805 - Chácara Primavera, Suzano-SP  
 Tel: (11) 2219-9999 Fax: (11) 2219-9999

Nome: Hidróxido de Sódio em Micro Pérola P.A. 1000 g Lote: 50497

Nome	Hidróxido de Sódio em Micro Pérola P.A.	Número CAS	1310-73-2
		Nro. de Lote	50497
Fórmula Molecular	NaOH	Fabricação	02/01/2019
Peso Molecular	40,00	Validade	01/01/2023

Determinação	Especificação	Resultado
Teor	$\geq 97,0 \%$	99,20 %
Ferro (Fe)	$\leq 10 \text{ ppm}$	10 ppm
Aparência	= Micro pérola branca	Micro pérola branca
Cloreto (Cl)	$\leq 0,005 \%$	0,005 %
Potássio (K)	$\leq 0,03 \%$	0,03 %
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	$\leq 30 \text{ ppm}$	30 ppm
Cálcio (Ca)	$\leq 0,01 \%$	0,01 %
Níquel (Ni)	$\leq 20 \text{ ppm}$	20 ppm
Mercúrio (Hg)	$\leq 0,1 \text{ ppm}$	0,1 ppm
Magnésio (Mg)	$\leq 50 \text{ ppm}$	50 ppm
Metais pesados (como Ag)	$\leq 10 \text{ ppm}$	10 ppm
Carbonato (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	$\leq 1,0 \%$	0,2 %

Obs: \* Produto classificado como reagente analítico, uso para laboratório de controle de qualidade e fins industriais.  
 \* Proibida a venda para menores de 18 anos.  
 \* Ref. Bibliográfica: ACS 11ª Edição. Página 642 a 644.  
 NFe Nro.: 95470 - CNPJ: 14308988000165 - Nome: Fabiano da Silva de Andrade e Cia Ltda  
 Endereço: Rua Dr Bruno de Andrade, 414 Sala B - Centro - Montenegro/RS

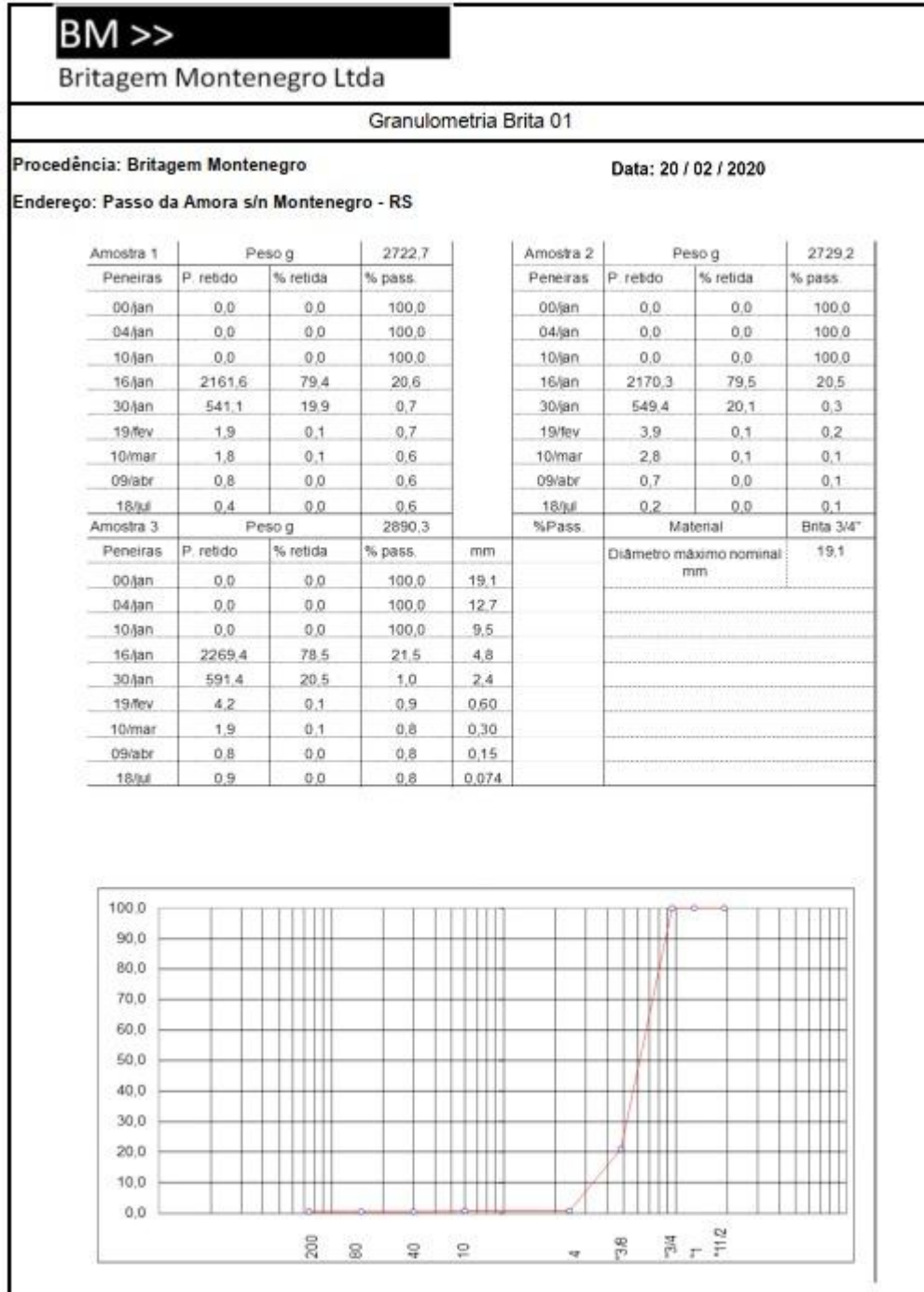


Alexandre Oliveira (CRQ 04264809-IV Reg.)

Responsável Técnico

Observações Gerais

## ANEXO C – GRANULOMETRIA, ABSORÇÃO E DENSIDADE DOS AGREGADOS



**BM >>**

Britagem Montenegro Ltda

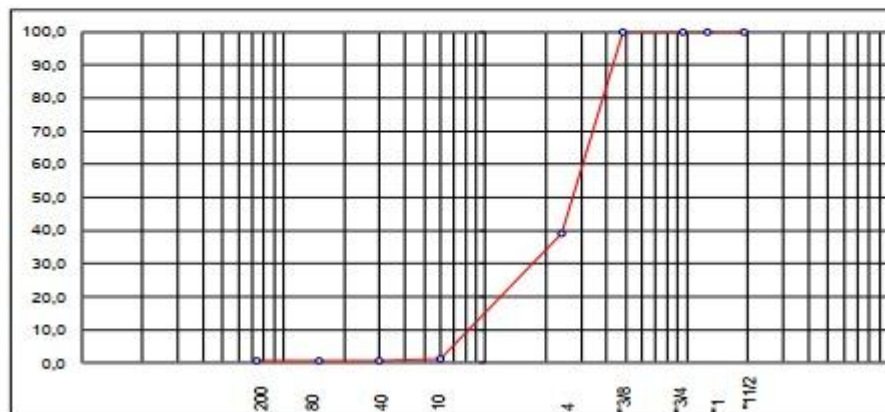
## Granulometria Pedrisco

Procedência: Britagem Montenegro

Data: 20 / 02 / 2020

Endereço: Passo da Amora s/n Montenegro - RS

Amostra 1				Amostra 2			
Peso g			1891,3	Peso g			1498,3
Penelras	P. retido	% retida	% pass.	Penelras	P. retido	% retida	% pass.
00/jan	0,0	0,0	100,0	00/jan	0,0	0,0	100,0
04/jan	0,0	0,0	100,0	04/jan	0,0	0,0	100,0
10/jan	0,0	0,0	100,0	10/jan	0,0	0,0	100,0
15/jan	0,0	0,0	100,0	15/jan	0,0	0,0	100,0
30/jan	1151,3	60,9	39,1	30/jan	898,5	60,0	40,0
19/fev	708,6	37,5	1,7	19/fev	578,4	38,6	1,4
10/mar	8,0	0,4	1,2	10/mar	8,9	0,6	0,8
09/abr	0,4	0,0	1,2	09/abr	0,6	0,0	0,8
18/jul	0,4	0,0	1,2	18/jul	0,4	0,0	0,8
Amostra 3				Amostra 2			
Peso g			2090,5	%Pass.	Material	Pedrisco	
Penelras	P. retido	% retida	% pass.	mm	Diâmetro máximo nominal	9,5	
00/jan	0,0	0,0	100,0	19,1	mm		
04/jan	0,0	0,0	100,0	12,7			
10/jan	0,0	0,0	100,0	9,5			
15/jan	0,0	0,0	100,0	4,8			
30/jan	1289,7	61,7	38,3	2,4			
19/fev	789,3	37,8	0,6	0,60			
10/mar	9,1	0,4	0,1	0,30			
09/abr	0,5	0,0	0,1	0,15			
18/jul	0,4	0,0	0,1	0,074			



BM &gt;&gt;

Britagem Montenegro Ltda

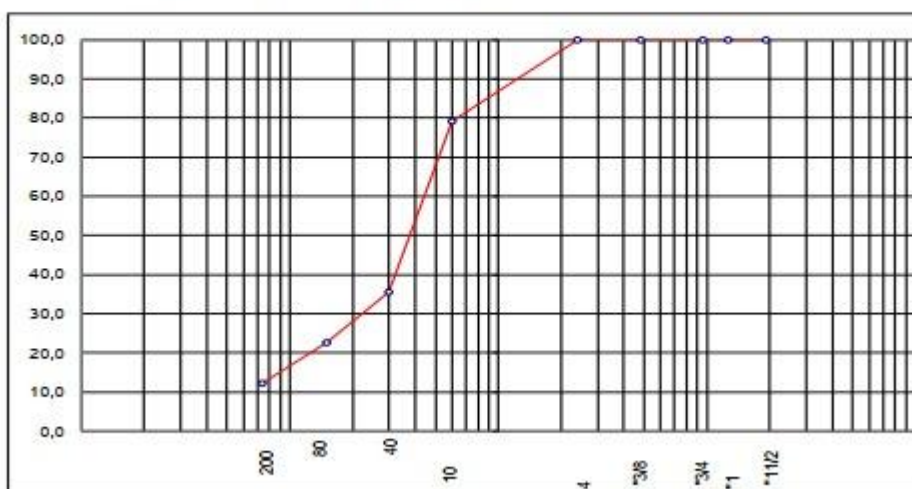
## Granulometria Pó de Pedra

Procedência: Britagem Montenegro

Data: 20 / 02 / 2020

Endereço: Passo da Amora s/n Montenegro - RS

Amostra 1				Amostra 2					
Peso g			625,9	Peso g			890,8		
Penelras	P. retido	% retida	% pass.	Penelras	P. retido	% retida	% pass.		
00/jan	0,0	0,0	100,0	00/jan	0,00	0,0	100,0		
04/jan	0,0	0,0	100,0	04/jan	0,00	0,0	100,0		
10/jan	0,0	0,0	100,0	10/jan	0,00	0,0	100,0		
16/jan	0,0	0,0	100,0	16/jan	0,00	0,0	100,0		
30/jan	0,0	0,0	100,0	30/jan	0,00	0,0	100,0		
19/fev	134,1	21,4	78,6	19/fev	180,90	20,3	79,7		
10/mar	299,8	47,9	30,7	10/mar	410,80	46,1	33,6		
09/abr	76,5	12,2	18,5	09/abr	120,80	13,6	20,0		
18/jul	40,0	6,4	12,1	18/jul	76,80	8,6	11,4		
Amostra 3			Peso g	578,4	%Pass.			Material	Pó de pedra
	P. retido	% retida	% pass.	mm				Diâmetro máximo nominal	4,8
	0,0	0,0	100,0	19,1				mm	
	0,0	0,0	100,0	12,7					
	0,0	0,0	100,0	9,5					
	0,0	0,0	100,0	4,8					
	0,0	0,0	100,0	2,4					
	121,2	21,0	79,0	0,60					
	212,9	36,8	42,2	0,30					
	75,1	13,0	29,3	0,15					
	91,9	15,9	13,4	0,074					





BM &gt;&gt;

Britagem Montenegro Ltda

## Densidade dos Agregados

Procedência: Britagem Montenegro

Data: 10 / 02 / 2020

Endereço: Passo da Amora s/n Montenegro - RS

Fração Passante na peneira 1ª retida na peneira Nº 10 ( Hidrostático )				
Ensaio	Pesos	1	2	3
Peso do agregado saturado e superficialmente seco	PH	894,6	933,1	1116,8
Peso do agregado imerso	PI	585,1	608,8	730,1
Peso do agregado seco	PS	881,9	918,2	1099,9
$DA = \frac{PS}{PH-PI}$	Densidade aparente Densidade do agregado seco Bulk Specific Gravity	2,849	2,831	2,844
$DR = \frac{PS}{PS-PI}$	Densidade Real Dens.da parcela impermeável do agregado Apparet Specific Gravity	2,971	2,968	2,974
$A = \frac{PH-PS}{PS} * 100$	Absorção %	1,4	1,6	1,5
Densidade aparente Média	Densidade Real Média	2,840	2,970	Absorção Média 1,5
Fração passante na peneira Nº 10 e retida na peneira Nº 200 ( Picnômetro ) DNER ME 84-84				
Ensaio	Picnômetro			
		1	2	
A - Peso do picnômetro vazio		123,20	123,20	
B - Peso do picnômetro + água		642,65	643,10	
C - Peso do picnômetro + amostra		372,71	323,1	
D - Peso do picnômetro + amostra + água		805,28	774,1	
Densidade real		2,872	2,901	
Fórmula $\frac{C-A}{(B-A)-(D-C)}$	Densidade rel média	2,887		
Fração passANTE na peneira Nº 200 ( Le Chatelier ) DNER - ME 85 - 64				
Le Chatelier	1	2		
Leitura Depois	20,75	20,60		
Leitura Antes	0,40	0,25		
Volume do líquido deslocado	20,35	20,35		
Peso da amostra	60,0	60,0		
Densidade Real	2,948	2,948		
Densidade Real média	2,948			