

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE**  
**MATERIAIS – PPGCEM**

**ANDERSON SOUZA DE MELO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSERÇÃO DO RESÍDUO DE CAL DE**  
**CARBURETO EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**

**MANAUS**

**2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE  
MATERIAIS – PPGCEM**

**ANDERSON SOUZA DE MELO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSERÇÃO DO RESÍDUO DE CAL DE  
CARBURETO EM PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais

**ORIENTADOR: PROFESSOR DR. MARCOS MARQUES DA SILVA  
PAULA**

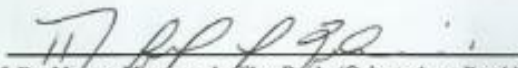
**CO-ORIENTADORA: PROFESSORA DRA. CONSUELO FROTA**

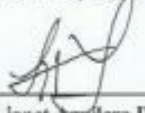
**MANAUS**

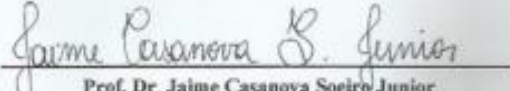
**2019**

Ata de Defesa Pública da dissertação de Mestrado do discente **ANDERSON SOUZA DE MELO**, do Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, realizada no dia 25 de novembro de 2019.

Às 14:00h do dia 25 de novembro de 2019 no Auditório do GEOTEC, no Setor Norte do Campus Universitário da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, foi realizada a Defesa de Dissertação de Mestrado do discente **ANDERSON SOUZA DE MELO**, intitulado *"Estudo da viabilidade da inserção do resíduo da cal de carbureto em pavimentação asfáltica"*, como parte final de seu trabalho para a obtenção de grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. A Banca Examinadora constituiu-se dos seguintes professores: Prof. Dr. Marcos Marques da Silva Paula (Orientador e Presidente - PPGCEM), Dra. Lianet Aguilera Dominguez (UFAM) e Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior (UFAM). Após a apresentação do trabalho, os examinadores fizeram as observações concernentes. Todas as sugestões da Banca Examinadora serão consideradas pelo aluno. Em seguida, a Banca Examinadora reuniu-se e concedeu o conceito APROVADO (aprovado/não-aprovado). Coordenação da Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, em Manaus, 25 de novembro de 2019.

  
 Prof. Dr. Marcos Marques da Silva Paula (Orientador e Presidente)  
 Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM/UFAM)

  
 Dra. Lianet Aguilera Dominguez  
 Universidade Federal do Amazonas - UFAM (PPGCEM/UFAM)

  
 Prof. Dr. Jaime Casanova Soeiro Junior  
 Universidade Federal do Amazonas - UFAM (Membro Externo)

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M528e	<p>Melo, Anderson Souza de Estudo da viabilidade da inserção do resíduo de cal de carbureto em pavimentação asfáltica / Anderson Souza de Melo. 2019 61 f.: il. color; 31 cm.</p> <p>Orientadora: Dr. Marcos Marque da Silva Paula Coorientadora: Dra. Consuelo Alves Frota Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.</p> <p>1. cal de carbureto. 2. propriedades mecânicas . 3. análises térmicas. 4. pavimentação. I. Paula, Dr. Marcos Marque da Silva II. Universidade Federal do Amazonas III. Título</p>
-------	--

*Dedico este trabalho a minha filha Isabelly dos Santos de Melo e aos meus pais Francisco Eladio Moreira de Melo e Odete Ferreira de Souza, por todo apoio e incentivo na busca do conhecimento, por sempre estarem ao meu lado, nos momentos mais difíceis da minha vida.*

*Dedico com toda gratidão e amor.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter concedido, saúde, inteligência, força, paciência, coragem e muita perseverança para enfrentar as dificuldades encontradas e concluir mais esta etapa da minha vida.

Aos meus pais, Francisco Eladio Moreira de Melo e Odete Ferreira de Souza, pelo amor, afeto, paciência, esforço que sempre fizeram para me proporcionar uma formação digna. A eles serei eternamente grato.

A minha esposa Ivanilde Cascais dos Santos que me deu força para esta caminhada e a minha filha Isabelly dos Santos de Melo.

Aos meus irmãos que me deram forças e ajudaram de forma direta ou indireta.

Ao Prof. Dr. Marcos Marques da Silva Paula, pela confiança, orientação, paciência e atenção que sempre dispões, me auxiliar e acreditar na realização deste trabalho.

A Profa. Consuelo Frota, pelo apoio, orientação e disponibilidade de todas as facilidades do Grupo de Pesquisa por ela liderado.

Aos membros do grupo Geotec da UFAM.

Ao corpo técnico da UFAM, pelo auxílio em análises.

Ao Professor Dr. Sérgio Michielon de Souza, do Laboratório LAMAT

Ao colega de mestrado Darbens Silvio Correia Junior, no auxílio do *software* Origin.

Aos colegas de mestrado Alex Gomes Pereira e Anne Karolynne Castro Monteiro.

Ao colega Engenheiro Civil Juliano Rodrigues Spínola.

Meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

Este estudo teve como objetivo geral avaliar o potencial de aproveitamento do resíduo industrial de cal de carbureto em substituição parcial a agregados minerais convencionalmente empregados na pavimentação asfáltica. Dessa forma, fez-se necessário uma caracterização granulométrica do resíduo de cal de carbureto que apresentou um diâmetro médio de 0,0053 mm, que corresponde a uma granulometria fina. A análise da composição química do cal de carbureto foi realizada empregando-se a técnica de fluorescência de raios x, no qual obtivemos a presença dos elementos cálcio (Ca) 96,038%, silício (Si) 1,765%, alumínio (Al) 0,700% e outros elementos, por exemplo, Mg e Fe e a técnica de difratometria de raios x, empregada na determinação das fases cristalinas. A principal fase observada foi a constituída por  $\text{Ca(OH)}_2$ , seguida de uma fase secundária de  $\text{CaCO}_3$ . A análise termogravimétrica (TGA/dTG) do cal de carbureto, mostrou perdas de massa em faixas características. No intervalo de 40,0 °C a 150,0 °C, observou-se três eventos térmicos, sendo o primeiro em 44,21 °C, o segundo em 74,16 °C e o terceiro em 146,0 °C. Este três eventos térmicos apresentam uma perda de massa de 1,798%. No intervalo de 350,0 °C a 550,0 °C, observou-se um evento térmico, sendo o pico máximo em 463,17 °C. Neste evento térmico, ocorreu uma perda de massa de 14,82%. No intervalo de 550,0 °C a 750,0 °C, observou-se um evento térmico, com pico máximo em 694,30 °C. Neste evento térmico ocorreu uma perda de massa de 9,419%. A análise por calorimetria exploratória (DSC), mostrou quatro picos endotérmicos. O evento térmico que apresentou um pico máximo em 696,71 °C foi devido à transformação da fase  $\text{Ca(OH)}_2$  em  $\text{CaO}$ . Os outros três eventos térmicos em 77,84 °C, 149,41 °C e 466,39 °C, estão relacionados à vaporização da água adsorvida e à decomposição de  $\text{CaCO}_3$  a  $\text{CaO}$ . Foram desenvolvidas três misturas asfálticas empregando-se 3,0%, 4,0% e 5,0% de resíduo de cal de carbureto, com intuito de avaliar sua propriedade mecânica, por meio da resistência à tração – RT. As misturas asfálticas de 3,0% e 4,0%, apresentaram melhores resultados comparados com cal de carbureto (5%) e o cimento portland (3,0%). Dessa forma, a utilização do cal de carbureto em composições asfálticas (3,0% e 4,0%), pode ser uma alternativa ao tipo de fíler tradicionalmente usado (cimento Portland) para a produção de misturas asfálticas.

**Palavras-chaves:** cal de carbureto, propriedades mecânicas, concreto asfáltico, reaproveitamento de resíduos.

## ABSTRACT

This study had the general objective of evaluating the potential of using the carbide lime industrial residue in partial replacement to mineral aggregates conventionally used in asphalt paving. Thus, it was necessary to have a granulometric characterization of the carbide lime residue, which presented an average diameter of 0.0053 mm, which corresponds to a fine particle size. The analysis of the chemical composition of the carbide lime was performed using the x-ray fluorescence technique, in which we obtained the presence of the elements calcium (Ca) 96.038%, 3.195% silicon (Si), 1.126% aluminum (Al) and other elements, for example, Mg and Fe and the x-ray diffraction technique, used in the determination of crystalline phases. The main phase observed was Ca (OH)<sub>2</sub>, followed by a secondary phase such as CaCO<sub>3</sub>. The thermogravimetric analysis (TGA / dTG) of the carbide lime identified mass losses in characteristic ranges. In the range of 40.0 °C to 150.0 °C and 146.0 °C, three thermal events were observed, the first at 44.21 °C, the second at 74.16 °C and the third at 146.0 °C. These three thermal events present a loss of mass of 1,798%. In the range of 350, 0 °C to 550.0 °C, a thermal event was observed, with the maximum peak at 463.17 ° C. In this thermal event, a mass loss of 14.82% occurred. In the range of 550, 0 °C to 750.0 ° C, a thermal event was observed, with the maximum peak being 694.30 ° C. In this thermal event, a mass loss of 9.419% occurred. Exploratory calorimetry (DSC) analysis showed four endothermic peaks. The thermal event that showed a maximum peak at 696.71 ° C was due to the transformation of the Ca (OH)<sub>2</sub>, phase into CaO. The other three thermal events at 77.84 ° C, 149.41 ° C and 466.39 ° C, which are related to the vaporization of adsorbed water and the decomposition of CaCO<sub>3</sub> to CaO. Three asphalt mixtures were developed using 3.0%, 4.0% and 5.0% of carbide lime residue, in order to evaluate its mechanical property, through the tensile strength - RT. Asphalt mixtures of 3.0% and 4.0%, showed better results compared to carbide lime (5%) and portland cement (3.0%). Thus, the use of carbide lime in asphalt compositions (3.0% and 4.0%), can be an alternative to the traditional filler type (Portland cement) for the production of asphalt mixtures.

**Keywords:** carbide lime, mechanical properties, asphalt concrete and reuse of waste.



### Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b>	Estrutura típica da estrutura do pavimento flexível.	19
<b>Figura 2.</b>	Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção.	22
<b>Figura 3.</b>	Classificação espectral das ondas eletromagnéticas.	23
<b>Figura 4.</b>	Difração de raios X por planos de átomos (A- A' e B - B').	24
<b>Figura 5.</b>	Organograma de ensaios realizados no desenvolvimento Experimental.	26
<b>Figura 6.</b>	Amostra de cal de carbureto em secagem ao ar.	28
<b>Figura 7.</b>	Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP 50/70.	28
<b>Figura 8.</b>	Peneiras utilizadas na análise granulométrica.	29
<b>Figura 9.</b>	Equipamento de fluorescência de raios X da PANalytical modelo Spsilon 3XL.	31
<b>Figura 10.</b>	Representação geométrica do equipamento de raio x da PANalytical modelo Empryrean.	32
<b>Figura 11.</b>	Compactador Marshall.	33
<b>Figura 12.</b>	A – Produto obtido no peneiramento grosso e B – Produto obtido no peneiramento fino.	36
<b>Figura 13.</b>	Curva granulométrica do cal de carbureto.	37
<b>Figura 14.</b>	Célula unitária CIF 37241 ICSD e CIF 37241 ICSD.	42
<b>Figura 15.</b>	Difratograma do cal de carbureto.	43
<b>Figura 16.</b>	Difratograma do cal de carbureto versus CIF 37241 ICSD e CIF 37241 ICSD.	44
<b>Figura 17.</b>	Análise termogravimétrica do cal de carbureto.	45
<b>Figura 18.</b>	Curva de DSC do cal de carbureto com dois principais eventos térmicos.	47
<b>Figura 19.</b>	Curva de DSC do cal de carbureto com quatro eventos térmicos.	47
<b>Figura 20.</b>	Curva de DSC do cal de carbureto dos eventos térmicos 1 e 2.	48
<b>Figura 21.</b>	Prensa Universal Testing Machine.	52
<b>Figura 22.</b>	Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.	53

**Lista de Tabelas**

<b>Tabela 1.</b>	Caracterização e procedimentos empregados para os materiais utilizados.	27
<b>Tabela 2.</b>	Dados do frasco volumétrico de “Le Chatelier”.	29
<b>Tabela 3.</b>	Amostras com percentual de produto ensaiado.	35
<b>Tabela 4.</b>	Análise granulométrica - ABNT 7181/2016.	37
<b>Tabela 5.</b>	Diâmetro das partículas em suspensão	39
<b>Tabela 6.</b>	Composição química do resíduo de cal de carbureto.	40
<b>Tabela 7.</b>	Resultados da espectrometria de fluorescência de raios x do cal de carbureto.	41
<b>Tabela 8.</b>	Temperaturas para os eventos térmicos referentes ao cal de carbureto.	45
<b>Tabela 9.</b>	Temperaturas para os eventos térmicos referentes ao cal de carbureto para DSC.	48
<b>Tabela 10.</b>	Dosagem Cimento (referência).	50
<b>Tabela 11.</b>	Dosagem alternativa de cal carbureto.	51
<b>Tabela 12.</b>	Parâmetros Marshall da dosagem referência	51
<b>Tabela 13.</b>	Resultados do ensaio de resistência à tração (RT)	52

## LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS,

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Material
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Acetileno
CA	Concreto asfáltico
CaO	xido de cálcio
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CC	Cal de carbureto
CCR	Resíduo de carbureto de cálcio
CIF	Crystallographic Information File
CPA	Camada porosa de atrito
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DRX	Difratometria de raios x
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
ES	Especificação de serviço
FRX	Fluorescência de raios x
ICSD	Inorganic Crystal Structure Database
ME	Método de ensaio
SMA	Matriz pétrea asfáltica
TGA	Análise termogravimétrica
UCS	Compressive strength
V <sub>a</sub>	Volume de vazios
VFA	Relação betume-vazios
VMA	VMA - Vazios do agregado mineral
G <sub>m</sub>	Massa específica aparente
G <sub>mm</sub>	Massa específica máxima medida

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
	2.1 Objetivo geral	
	2.2 Objetivos Específicos	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
	3.1 Resíduo industrial - cal de carbureto	16
	3.2 Pavimentação asfáltica	18
	3.3 Misturas asfálticas	19
	3.4 Dosagem de mistura asfálticas – método Marshall	21
	3.5 Caracterização do material	21
	3.5.1 Difração de raios x (DRX)	21
	3.5.2 Fluorescência de raios x (FRX)	23
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>24</b>
	4.1 Materiais	25
	4.1.1 Coleta do resíduo industrial (cal de carbureto)	25
	4.1.2 Ligantes asfálticos	26
	4.1.3 Outros agregados	26
	4.2 Métodos	27
	4.2.1 Análise granulométrica	27
	4.2.2 Massa específica real do material pulverizado (ASTM C188/17)	27
	4.2.3 Caracterização físico-química	28
	4.2.4 Análise química - fluorescência de raios x (FRX)	28
	4.2.5 Difração de raios x (DRX)	29
	4.2.6 Análise termogravimétrica (TGA/DTG)	30
	4.2.7 Dosagem - Método Marshall	30
	4.2.8 Ensaio Mecânicos	31
	4.2.9 Resistência à tração (RT) por compressão diametral	31
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>33</b>
	5.1 Análise granulométrica	33
	5.2 Massa específica real do material pulverizado (ASTM C 188/17)	36
	5.3 Análise química - fluorescência de raios x (FRX)	36
	5.4 Difração de raios x (DRX)	37
	5.5 Análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial	39
	5.6 Caracterização mecânica	45
	5.6.1 Dosagem das misturas asfálticas	45
	5.6.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral	46
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A indústria química tem grande participação no Polo Industrial de Manaus (PIM), sendo um dos segmentos mais promissores em termos de oportunidades de negócios. Contudo, as empresas encontram uma grande dificuldade no descarte de resíduos gerados durante sua produção.

Os processos industriais geram produtos a partir de matérias primas essenciais para o atendimento de nossas necessidades, mas também são fontes geradoras de subprodutos e resíduos potencialmente prejudiciais ao meio ambiente (TOLEDO, 2017). Embora a indústria seja de importância fundamental à economia do país, a quantidade e/ou a periculosidade dos resíduos sólidos que são produzidos podem ter consequências irremediáveis (TOLEDO, 2017).

O crescimento das atividades industriais, no Brasil e especialmente em Manaus, Amazonas, vem acontecendo continuamente ao longo das últimas décadas, sendo acompanhado pelo aumento dos problemas de ordem ambiental, principalmente os relacionados à disposição no meio ambiente dos resíduos gerados por tais atividades, uma vez que o processo produtivo das indústrias acaba gerando um passivo ambiental.

O resíduo de cal de carbureto é um subproduto da produção do gás acetileno, por meio da reação química entre o carbureto de cálcio e a água. Segundo CONSOLI (2003), o cal de carbureto apresenta características semelhantes às cales comercializadas, uma vez que é composta por óxido de cálcio hidratado e possui alto potencial para ser utilizado como aglutinante na estabilização de solos.

Sabe-se que a disposição inadequada dos resíduos oriundos da produção industrial provocou o surgimento de áreas contaminadas e degradadas ambientalmente. No entanto, o estudo de novos materiais torna-se fundamental no processo de melhoria de descarte dos resíduos. Com isso, a incorporação do resíduo do cal de carbureto na pavimentação regional, visa sobretudo, obter produtos que melhorem o desempenho dos pavimentos.

Segundo SALDANHA *et al.* 2018, a cal de carbureto pode ser reciclada devido a suas propriedades químicas e físicas, podendo ser utilizada em diferentes processos, tais como a agricultura, em indústrias, em estações de tratamento de água, na construção civil e em Engenharia Geotécnica para a estabilização de solos.

Estes processos podem reduzir drasticamente o impacto gerado pelo descarte do resíduo em aterro e redução da necessidade de explorar minas de calcário. Um exemplo da redução do impacto ambiental gerada pela utilização da cal de carbureto é que para cada tonelada de cal produzida, são geradas 1,1 toneladas de dióxido de carbono e são consumidos 240 litros de água. (MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, 2009).

SAID & TAIB (2009), verificou uma melhoria na compressão irrestrita pela adição de até 12,0% de cal de carbureto. DU et al; 2011, analisou o desempenho de solo natural estabilizado com cal de carbureto e cal virgem, baseando em força e durabilidade.

JOEL & EDEH, 2013, tratou um solo laterítico com cal de carbureto e analisou sua resposta mecânica com relação ao índice de suporte Califórnia - *California Bearing Ratio* (CBR) e UCS teste e verificou que a adição de 10% de cal de carbureto melhorou significativamente a resposta mecânica deste solo.

Deste modo, a incorporação deste resíduo de cal de carbureto surge como uma potencial alternativa ambiental para esse rejeito. Este reaproveitamento profere-se sobretudo a redução e/ou minimização de rejeitos no meio ambiente, reciclagem de despejos visando sua recuperação e/ou formação de subprodutos rentáveis.

Portanto, este estudo foi desenvolvido pautado na avaliação da viabilidade da inserção deste resíduo industrial (cal de carbureto), que visa desenvolver e contribuir com soluções tecnológicas inovadoras, baseando-se na perspectiva sustentável do uso dos resíduos industriais gerados da produção industrial do gás acetileno ( $C_2H_2$ ).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar o uso do resíduo industrial de cal de carbureto em substituição parcial a agregados minerais convencionalmente empregados na pavimentação asfáltica.

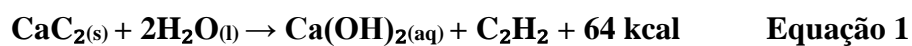
### **2.2 Objetivos Específicos**

- ❖ Caracterizar o resíduo de cal de carbureto no que tange à curva de distribuição granulométrica e sua consistência por meio do ensaio de granulometria, executados conforme NBR 7181:2016, Solo - Análise Granulométrica.
- ❖ Analisar a composição química do cal de carbureto empregando a técnica de fluorescência de raios x (FRX).
- ❖ Determinar a estrutura cristalina do cal de carbureto, empregando a técnica de difratometria de raios x (DRX).
- ❖ Caracterizar as propriedades térmicas do cal de carbureto empregando as técnicas de TGA e DSC.
- ❖ Preparar uma mistura asfáltica empregando diferentes percentuais de resíduo de cal de carbureto (3,0%, 4,0% e 5,0%).
- ❖ Determinar a resistência à tração - RT da mistura asfáltica incorporando resíduo industrial de cal de carbureto.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Resíduo industrial - cal de carbureto

O cal de carbureto (CL) ou resíduo de carbureto de cálcio (CCR) é um subproduto do gás de acetileno ( $C_2H_2$ ) produzido pela hidrólise de carboneto de cálcio ( $CaC_2$ ) (SALDANHA *et al.* 2018), como segue a equação química:



O CCR é composto de hidróxido de cálcio [ $Ca(OH)_2$ ] com pequenas quantidades de carbonato de cálcio ( $CaCO_3$ ), óxido de silício ( $SiO_2$ ) e outros óxidos metálicos e é gerado como uma lama durante o processo de produção de gás acetileno (SALDANHA *et al.* 2018).

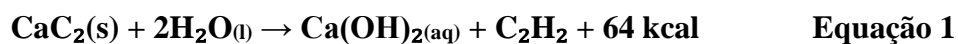
Segundo MARKET RESEARCH STORE (2015), a produção mundial de gás acetileno foi de aproximadamente 500.000 toneladas em 2014, com uma geração de aproximadamente 1.423.000 toneladas de CCR correspondentemente como desperdício, e espera-se que cresça 3% até 2020. Na China, a produção de CCR é de aproximadamente 100.000 toneladas/ano, enquanto a Tailândia produz 20.000 toneladas/ano (MARKET RESEARCH STORE, 2015; HORPIBULSUK *et al.* 2015; DU *et al.* 2011).

O Brasil tem capacidade para produzir 12.000 toneladas/ano de gás acetileno por meio de plantas industriais localizadas em oito estados. No entanto, apenas 6.000 toneladas/ano são produzidos atualmente, gerando cerca de 17.100 toneladas de CL por ano (SALDANHA *et al.* 2018). De modo geral, o mercado tem disponível dois tipos de cal: a hidratada e a de carbureto, sendo a cal hidratada subdividida em: calcítica, dolomítica e magnesiana (CARDOSO *et al.* 2009).

Cal viva:



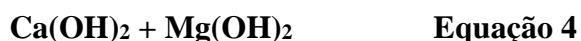
Cal calcítica hidratada:



Cal dolomítica ou magnesiana, monohidratada:



Cal dolomítica ou magnesiana, dihidratada:



A cal calcítica possui limites de óxido de magnésio (MgO) de até 12%, já a magnesiana possui valores de MgO entre 12% e 24% e as cales com valores superiores a 24% de MgO são classificadas como cal dolomíticas (CALTEC, 2017b). As reações e formulações químicas



clássicas destas cales, apresentadas por NÚÑEZ (2007), são descritas acima por (SALDANHA *et al.* 2018).

Em relação à mineralogia, sabe-se que quando a rocha calcária possuir majoritariamente minerais calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a cal a ser obtida será calcítica. No entanto, se as porcentagens de minerais dolomita ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) forem altas, serão formadas cales magnesianas ou dolomíticas (CALTEC, 2017b).

As cales hidratadas possuem cor branca e são apresentadas em forma de pó (NÚÑEZ, 2007). O cal de carbureto (ou hidróxido de cálcio) é formado por meio da reação química entre o carbureto de cálcio e a água para a produção de gás acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) (CARBOXI GASES, 2018; SALDANHA *et al.* 2018).

O cal de carbureto possui alto potencial poluidor, devido a sua alcalinidade, no entanto também possui elevada reatividade quando misturado com cinzas, produzindo reações cimentantes (THOMÉ, 1999). Possui cor cinza com tom azulado e apresenta-se em forma pastosa (60 a 70% do material em fase líquida). Aproximadamente 80% dos produtores de gás acetileno armazenam a cal em reservatórios externos formando lagoas de sedimentação (RAMASAMY *et al.* 2002).

Estudos acerca de pavimentação empregando cal como agente estabilizante de solos em camadas granulares e como fíler em misturas asfálticas para melhorar a adesividade vêm sendo realizados. Conforme, ARAÚJO *et al.* 2016, estudou o efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas. Este autor concluiu que, a adição de 2% de cal melhora a adesividade na interface ligante asfáltico/agregado, não apresentando perda de resistência à tração se comparada às misturas sem e com menor quantidade de cal.

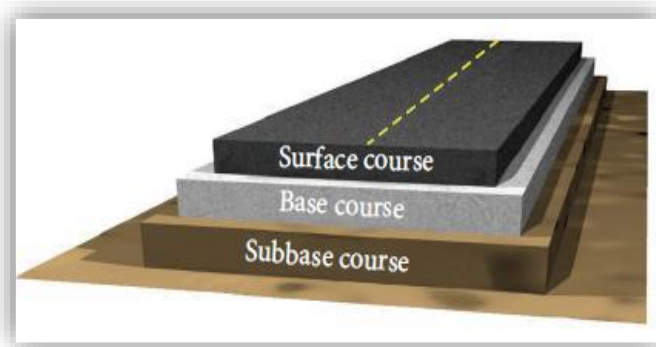
Segundo LITTLE *et al.* 2006, a incorporação da cal em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade do agregado com o ligante e enrijecer o ligante asfáltico e a própria mistura, retarda o trincamento, altera favoravelmente a cinética da oxidação e interage com produtos da oxidação, reduzindo seus efeitos deletérios.

Estudo com o cal do carbureto não é algo recente, vem de anos atrás, como por exemplo, WANG e HANDY, 1966 em sua pesquisa estabilizaram uma argila altamente plástica com cal de carbureto e obtiveram resultados superiores ao obtidos com cales convencionais. CONSOLI *et al.* 2001, estudou o comportamento de solos artificialmente cimentados com a utilização de cal de carbureto e cinza volante obtendo ganhos significativos de resistência e rigidez no material.

### 3.2 Pavimentação asfáltica

O pavimento corresponde a uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, além da função de propiciar aos usuários, a melhoria nas condições de rolamento dos veículos, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI *et al.* 2008).

HAMED (2010), afirma que os pavimentos asfálticos rodoviários podem ser definidos como camadas de asfalto construídas ligadas sobre uma base granular. Devido a isso, a estrutura total do pavimento sofre deflexão por conta das cargas do tráfego, o que dá a esse tipo de elemento a denominação de pavimento flexível. É, pois, uma estrutura composta de várias camadas de materiais, que é dividida em camada de revestimento asfáltico, base e sub-base, como mostrado na Figura 1.



**Figura 1:** Estrutura típica da estrutura do pavimento flexível

**Fonte:** Mashaan, 2014

Segundo GUO *et al.*, 2016, o asfalto possui composição química complexa, com propriedades viscosas e elásticas que variam fortemente com o tempo e com a temperatura. Pesquisadores vêm aplicando vários tipos de modificadores para melhorar o desempenho dos materiais asfálticos. Até agora os principais tipos de modificadores são polímeros (SBS, borracha e resina), agentes anti-trincas (cinzas de cal, saponina alcalina e agente de acoplamento) fibras (como fibras de aço, de madeira, de basalto, de poliestireno, de vidro e de carbono) e *filler* (cinza de carvão, enxofre, diatomita e sílica).

A configuração de uma estrada pavimentada baseia-se em uma ou mais camadas de material, em que cada uma possui a função de distribuir a carga. A camada inferior deve ser mais larga e a camada superior, por estar exposta a maiores solicitações, necessita ser de material mais resistente (COOK, 2013).

### 3.3 Misturas asfálticas

O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo, cujo principal componente é o betume. Sua extração pode ser feita na natureza em rochas asfálticas e em lagos naturais, ou por meio de técnicas de processamento do petróleo. São comumente utilizados em serviços de impermeabilização e juntamente com agregados para a produção de misturas asfálticas. No Brasil, o asfalto é conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e é definido como um produto semissólido à temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (BERNUCCI *et al*, 2008).

Segundo CARVALHO (2018), o uso do CAP em pavimentação é um dos mais importantes entre todas as suas aplicações, e isso se deve ao fato de ser um material aglomerante, com grande adesividade, proporcionando forte união dos agregados e permitindo flexibilidade controlável. Este é impermeável, durável e resiste à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, podendo ainda ser utilizado com ou sem aditivos. Por consequência, na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se como revestimento uma mistura de ligantes asfálticos com agregados minerais, de vários tamanhos.

Para garantir uma mistura com um bom desempenho e resistente aos esforços de contato pneu-pavimento é necessária uma distribuição granulométrica adequada ao tipo de mistura asfáltica. De acordo com BERNUCCI *et al.* (2008) as misturas asfálticas à quente podem ser subdivididas pela graduação dos agregados e *filer*. Os três tipos mais usuais são:

**Tipo 1:** O concreto asfáltico (CA), possui graduação densa: curva granulométrica contínua e bem graduada e com poucos vazios.

**Tipo 2:** Camada porosa de atrito (CPA), possui graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase exclusivamente de um mesmo tamanho e com elevado volume de vazios com ar e, portanto, drenante, possibilitando a percolação de água no interior da mistura asfáltica.

**Tipo 3:** Matriz pétreo asfáltica (SMA) e Mistura sem agregado de certa duração (*gap-graded*), possui graduação descontínua: curva granulométrica dos grãos de maiores dimensões em quantidade dominante em relação aos grãos de dimensões intermediárias, completados por certa quantidade de finos, de forma a ter uma curva descontínua em certas peneiras e com um maior número de contatos entre os agregados graúdos, tornando o esqueleto mineral mais resistente à deformação permanente.

As misturas asfálticas podem ser classificadas em função da temperatura de aplicação subdividindo em quatro grupos: misturas frias, misturas semimornas, misturas mornas e misturas quentes. As misturas semimornas diferem da mistura morna pela temperatura de

mistura; se a temperatura de mistura na usina é abaixo de 100°C a mistura é semimorna (D'ANGELO *et al.* 2008).

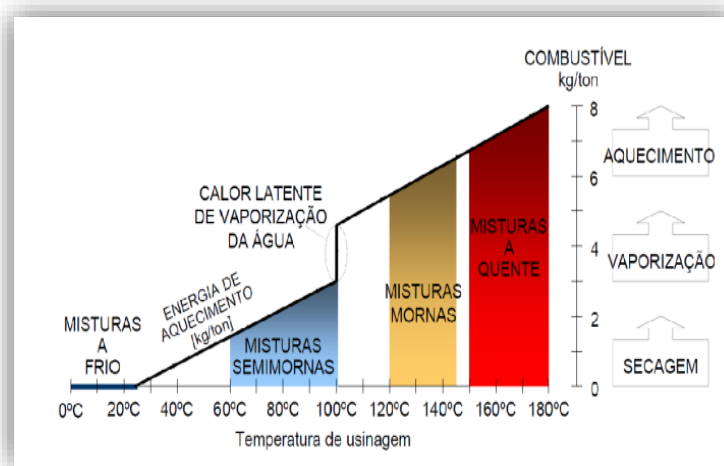
As misturas à frio são aquelas cujo ligante é a emulsão asfáltica ou asfalto diluído. Esse tipo de mistura é bastante utilizado no Brasil em revestimentos de vias urbanas sujeitas à baixo volume de tráfego, em camadas intermediárias e em serviços de regularização de revestimento. Estas são produzidas em temperatura ambiente entre 20 e 50°C e não é necessário aquecer o agregado.

As misturas semimornas e mornas são preparadas em temperaturas intermediárias das misturas à quente e à frio, geralmente são executadas com aquecimento parcial dos agregados. O intervalo de temperatura de produção das misturas mornas varia entre 20 a 30 °C abaixo da temperatura de produção da mistura quente.

As misturas à quente são produzidas a partir do aquecimento dos agregados e do ligante, sendo executadas a uma temperatura de mistura entre 150 e 180°C. Apresentam uma boa durabilidade, suportam bem o tráfego pesado e são menos suscetíveis à ação deletéria da água no processo de fabricação das misturas asfálticas.

Segundo (MOTTA, 2011), a energia consumida varia de acordo com o nível de aquecimento da mistura como pode ser visualizado na Figura 2, onde são apresentadas as misturas asfálticas em função da indicação do consumo de combustível em cada caso.

Ainda de acordo com a figura 2 para uma mistura a quente que apresente uma temperatura de mistura de aproximadamente 165°C, o consumo de combustível seria de 7,4 Kg/ton, ao mesmo tempo que para uma mistura morna com uma temperatura de mistura de 132°C o consumo de combustível seria de 6,0 Kg/ton. Logo, a mistura morna proporcionaria uma economia de combustível de 1,4 Kg/ton.



**Figura 2.** Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção  
**Fonte:** D'ANGELO *et al.*, 2008

### **3.4 Dosagem de mistura asfálticas – método Marshall**

O método Marshall é o método mais difundido no país em relação a dosagem de misturas asfálticas. O método foi desenvolvido nos Estados Unidos no fim da década de 1930 pelo Engenheiro Bruce G. Marshall do *Mississippi State Highway Department*. Difundido pelo mundo, é resultante dos estudos em pistas experimentais de aeroportos no Estado do Mississippi realizado pelo WES (*Waterways Experiment Station*) em 1948 a pedido do U. S. Army Corps of Engineers (NCHRP, 2011).

Segundo NASCIMENTO (2008), a dosagem Marshall se baseia principalmente em parâmetros volumétricos, que consideram a distribuição granulométrica dos agregados e sua influência nas misturas asfálticas de forma indireta.

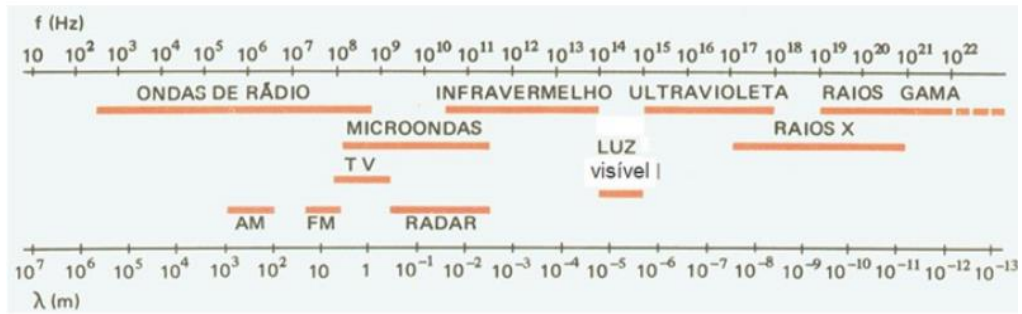
Desde a sua criação até os dias de hoje, o método é caracterizado pela seleção do ligante asfáltico e do agregado de modo a atender determinadas especificações de projeto. A compactação é realizada por impacto de um soquete padrão para obtenção de corpos de prova cilíndricos e que devem atender a certos limites quanto ao Vv e ao VMA, e em alguns casos também ao volume de vazios preenchido com ligante (VFA). Além disso, algumas agências estabelecem limites também quanto aos valores de estabilidade e de fluência (NCHRP, 2011).

No Brasil, a compactação Marshall ainda é a mais utilizada e consiste na aplicação de um número definido de golpes com um soquete que cai de uma altura pré-determinada sobre a amostra de mistura asfáltica dentro de um cilindro padronizado. É preconizada pelo método de ensaio ME 043 (DNER, 1995) que recomenda o esforço de compactação de 50 golpes para pressão de pneu até 7 kgf/cm<sup>2</sup> e de 75 golpes para a pressão de 7 kgf/cm<sup>2</sup> a 14 kgf/cm<sup>2</sup>. Não há no referido método de ensaio, nenhuma recomendação com relação à frequência de aplicação dos golpes. Esse aspecto se verifica, também, na norma técnica da ASTM D 5581 (ASTM, 2001), assim como nas especificações da AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) referentes ao método Marshall.

### **3.5 Caracterização do material**

#### **3.5.1 Difração de raios x (DRX)**

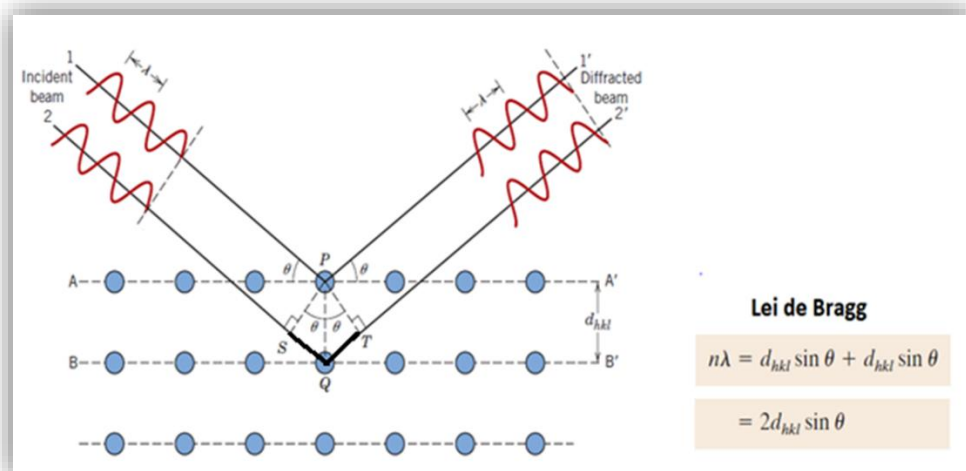
Sabe-se que os raios x são ondas eletromagnéticas que ocupam a região entre a radiação gama e os raios ultravioleta no espectro eletromagnético, caracterizando-se por possuir comprimento de onda da ordem de angstroms 0,1 a 100 Å (1 Å = 10<sup>-10</sup> m) e frequência acima de 10<sup>16</sup> hertz, conforme Figura 3.



**Figura 3.** Classificação espectral das ondas eletromagnéticas

**Fonte:** Khan academy, 2019

A difração de raios x (DRX) é o fenômeno de interação entre o feixe de raios x incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionado ao espalhamento coerente. A técnica consiste na incidência da radiação em uma amostra e na detecção dos fótons difratados, que constituem o feixe difratado. Em um material onde os átomos estejam arranjados periodicamente no espaço, característica das estruturas cristalinas, o fenômeno da difração de raios x ocorre nas direções de espalhamento que satisfazem a lei de Bragg (GOBBO, 2003 *Apud* CUNHA 2017), como mostra a Figura 4.



**Figura 4.** Difração de raios x por planos de átomos (A-A' e B-B')

**Fonte:** Callister & Rethwisch, 2012

Considerando dois planos paralelos A-A' e B-B' conforme figura 4, os quais possuem os mesmos índices de Miller h,k,l, e que estão separados por um espaçamento interplanar  $d_{hkl}$ , supondo que um feixe de raios x paralelo, monocromático e coerente com comprimento de onda  $\lambda$ , incida sob dois planos segundo um ângulo  $\theta$ . Dois raios deste feixe identificados como 1 e 2, são dispersos pelos átomos P e Q. Se a diferença entre os dois percursos 1-P-1' e 2-Q-2' (isto é,  $SQ + QT$ ) for igual a um número inteiro, n, de comprimentos de onda, uma interferência

construtiva dos raios dispersos 1' e 2' também ocorrerá em ângulo  $\theta$  em relação aos planos. Isso é condição para a difração (CALLISTER & RETHWISCH, 2012).

Podemos considerar o método de difração por pó como a melhor técnica para identificação de fases cristalinas, pois podemos fazer a distinção entre estados cristalinos e amorfos, identificação de soluções sólidas, além da análise de microestrutura (SOUZA, 2010).

Considerando a estrutura de um padrão típico de pó, esta pode ser descrita pelos seguintes componentes: posições, intensidades e formas de múltiplas reflexões de Bragg. Cada um dos três componentes contém informações sobre a estrutura cristalina do material, as propriedades da amostra e os parâmetros instrumentais (SONG *et al.* 2009).

### 3.5.2 Fluorescência de raios x (FRX)

A fluorescência de raios x é um tipo de análise elementar, no qual podemos determinar a composição química de materiais em gerais, tais como, sólidos, pós e líquidos, bem como espessura e composição de camadas, pós depositados em filtros e plásticos (SHIMADZU, 2018).

Considerando que os raios x são produto da colisão de elétrons com átomos, espectros de  $\lambda$  correspondentes aos raios x resultam do bombardeamento de um alvo selado sob alto vácuo, por um feixe de elétrons proveniente de um filamento aquecido (cátodo) (SHIMADZU, 2018).

A aplicação de uma diferença de potencial entre cátodo e ânodo faz com que os elétrons emitidos sejam acelerados, havendo impacto com o alvo. Dessa forma, as energias quantizadas ou os comprimentos de ondas são detectados para cada elemento presente, com isso, através da intensidade utilizada podemos determinar a concentração elementar (SHIMADZU, 2018).

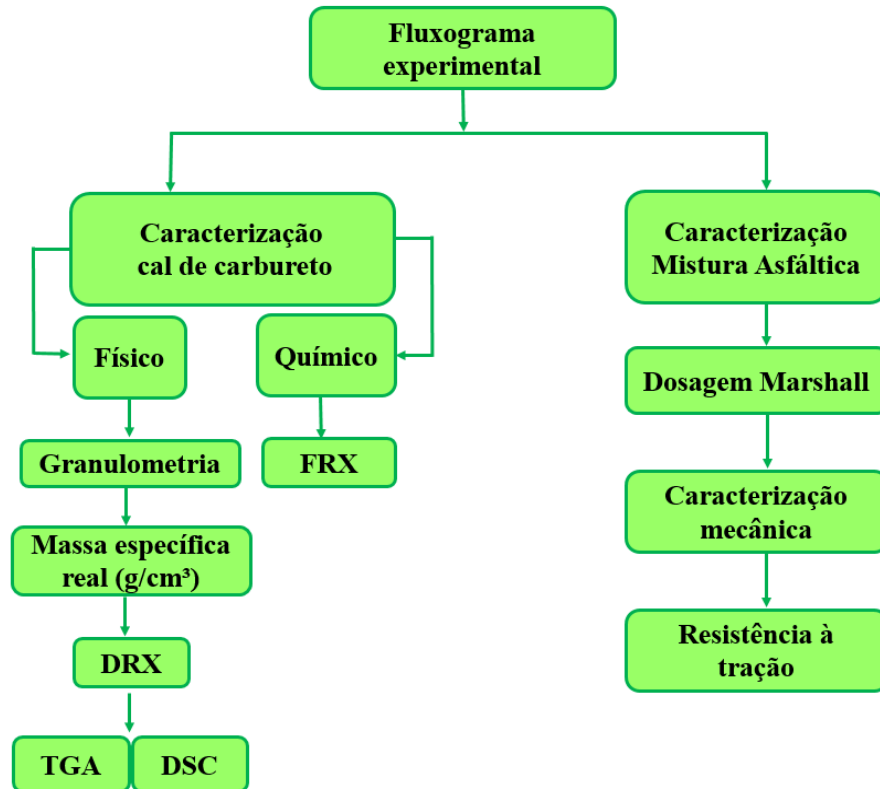
As vantagens das análises por fluorescência de raios x são: análises rápidas, não destrutivas, nenhum espectro é afetado pela ligação química, análises simples para elementos da mesma família, alta precisão, análises qualitativas simples, análises de filmes finos, fácil preparação de amostras e podem ser analisados de  $^4\text{Be}$  - Berílio ao  $^{92}\text{U}$  – Urânio (SHIMADZU, 2018).

Segundo SKOOG *et al.* 2010, durante a análise, uma amostra é irradiada por um feixe de raios x e elétrons das camadas (K, L, M) mais internas do átomo são retirados, gerando com isso uma vacância na camada. Para que o átomo novamente atinja sua condição de equilíbrio, um elétron das camadas mais externas tende a saltar quanticamente e ocupar a vacância deixada, gerando com isso, raios x característicos "fluorescentes" e que variam conforme a energia.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os procedimentos que foram utilizados durante a fase experimental da pesquisa. O fluxograma experimental está disposto na figura 5 e esquematiza os ensaios utilizados neste estudo.

Na Tabela 1, estão as técnica de caracterização e procedimentos empregados neste estudo.



**Figura 5.** Organograma de ensaios realizados no programa experimental  
**Fonte:** Autor, 2019

**Tabela 1.** Caracterização e procedimentos empregados para os materiais utilizados

<b>Caracterização</b>	<b>Procedimento</b>
Análise Granulométrica	NBR 7181/2017
Massa específica real	NBR 6474/2001
Análise química elementar	Fluorescência de raios x
Difração de raios x (estrutura cristalina e parâmetros da célula unitária)	Panalytical (Empyrean), com radiação de Cu-K $\alpha$ ( $\lambda=0,1541838$ nm)
TGA/DSC	Análises térmicas [ME 043 (DNER, 1995)] / [ASTM D 5581 (ASTM, 2001)]
Dosagem Marshall	
Resistência à tração (RT)	DNIT 136/2018

**Fonte:** Autor, 2019



## 4.1 MATERIAIS

### 4.1.1 Coleta do resíduo industrial (cal de carbureto)

O resíduo de cal de carbureto foi coletado na empresa Carboxi Indústria e Comércio de Gases Ltda, localizada na Rua Desembargador César do Rego, 897, Colônia Antônio Aleixo, Distrito Industrial II, Manaus (AM). Este resíduo é oriundo da produção industrial do acetileno ( $C_2H_2$ ).

O procedimento de coleta do cal de carbureto foi realizado de acordo com o preconizado na norma NBR 6457/16 Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.

Os procedimentos foram os seguintes:

- a) Coleta em campo;
- b) Exposição do resíduo ao ar para secagem prévia;
- c) Destorroamento;
- d) Secagem em estufa a  $120^{\circ}C/24$  h para reduzir o conteúdo de umidade a quase 0.5%.
- e) Separação do material, por peneiramento.

Foi coletada uma amostra representativa de 23 Kg de cal de carbureto em saco plástico. Em seguida, foi levada ao Laboratório de Solos (GEOTEC/UFAM) e colocada para secagem ao ar, conforme Figura 6 abaixo.



**Figura 6.** Amostra de cal de carbureto em secagem ao ar

**Fonte:** Autor, 2018

#### 4.1.2 Ligantes asfálticos

O ligante asfáltico utilizado neste estudo foi o CAP 50/70, mais utilizado na região Norte e foi doado ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC) pela Construtora e Pavimentação LTDA (ARDO). (Figura 7).



Figura 7. Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP 50/70  
Fonte: Autor, 2019

#### 4.1.3 Outros agregados

Os agregados utilizados neste estudo foram os seguintes.

- ❖ Agregados graúdos: brita 1 (4,75 mm a 19 mm) e brita 0 (0,15 mm a 12,5 mm).
- ❖ Agregados miúdos: areia (0,15 a 2,36 mm), pó de pedra (0,15 mm a 4,75 mm).
- ❖ Fíler: cimento portland e resíduo de cal de carbureto.

Estes insumos foram doados ao Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC) pela Construtora e Pavimentação LTDA (ARDO).

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Análise granulométrica

O resíduo industrial foi submetido a análise granulométrica de acordo com o preconizado na NBR 7181/2017: Solo – Análise Granulométrica, realizado no Laboratório de Solos (GEOTEC/UFAM). Foram utilizadas peneiras padrão para análise conforme Figura 8.



**Figura 8.** Peneiras utilizadas na análise granulométrica, com abertura mínima #2  
**Fonte:** Autor, 2018

### 4.2.2 Massa específica real do material pulverizado (ASTM C 188/17)

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Solos pertencente ao (GEOTEC/UFAM), de acordo com as metodologias do órgão estadunidense de normalização *American Society for Testing and Materials (ASTM)*.

As amostras de cal de carbureto foram avaliadas consoante a massa específica real ( $G_{sa}$ ), acompanhando a norma ASTM C188/17 - Density of Hydraulic Cement, sendo calculada pelas Equações 5 e 6.

$$M_c = M_t - M_a \quad \text{Equação 5}$$

$$\rho = M_c/V \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$M_c$  = massa do material (g);

$M_t$  = massa do frasco preenchido por líquido e o material (g);

$M_a$  = massa do frasco mais líquido para a primeira leitura do nível (g);

$\rho$  = massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$V$  = volume do líquido deslocado (mL).

Na Tabela 2, mostra os dados do frasco volumétrico de “Le Chatelier”.

<b>Volume aproximado do bulbo (mL)</b>	<b>Parte inferior do gargalo (mL)</b>	<b>Bulbo intermediário (L)</b>	<b>Parte superior do gargalo (mL)</b>
250	0 a 1 mL subdivido em 0,1 mL)	17	18 a 24 ml (subdividida em 0,1 ml)

**Tabela 2.** Dados do frasco volumétrico de “Le Chatelier”

Em síntese, este ensaio é executado conforme descrito abaixo.

- ❖ A amostra do cal de carbureto resultante do peneiramento fino # 150mm;
- ❖ Encheu-se o frasco com o líquido (querosene) até uma marca entre 0 e 1cm<sup>3</sup>, com auxílio do funil de haste longa;
- ❖ Secou-se o colo do frasco volumétrico na parte acima do nível do líquido com papel absorvente;
- ❖ Submeteu-se o frasco de *Le Chatelier* ao banho termorregulador até obtenção do equilíbrio térmico (mínimo de 30 min);
- ❖ Determinou-se a massa m de amostra a ser ensaiada, que deve ser suficiente para causar um deslocamento do líquido entre as marcas 18cm<sup>3</sup> e 24cm<sup>3</sup> (sugestão: m = 60g ± 0,01g);
- ❖ Colocou-se a amostra de cal de carbureto dentro do frasco; para isso utilizou se o funil de haste curta. Colocou-se em pequenas proporções, atentando para que não ocorresse aderência de cimento nas paredes internas do frasco, acima do nível do líquido;
- ❖ Submeteu-se o frasco a movimentos pendulares até que, voltando-se o frasco à posição vertical não subir mais borbulhas de ar;
- ❖ Efetuou-se a leitura do volume do líquido deslocado.

Após a coleta dos dados foram realizados os cálculos para devido resultado, conforme equações 5 e 6 acima.

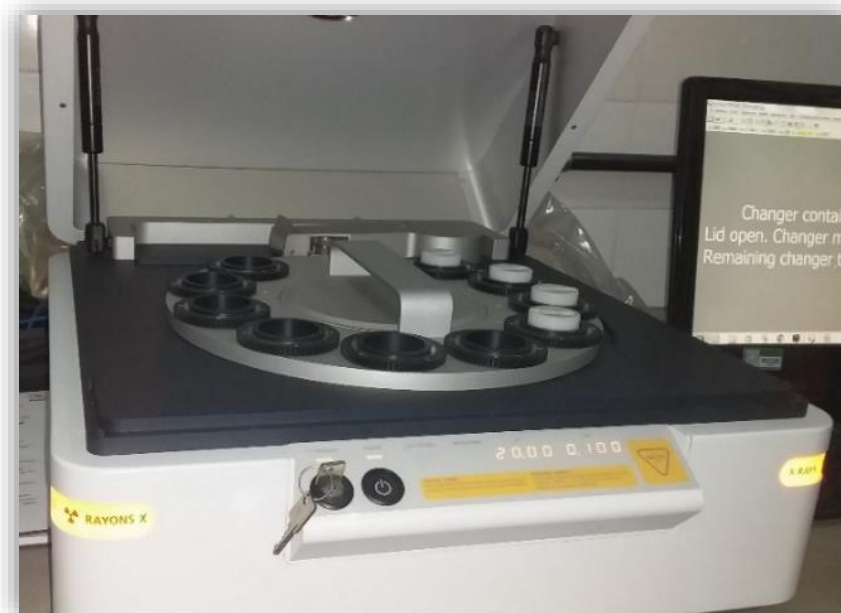
#### **4.2.3 Caracterização físico-química**

O resíduo industrial foi submetido a análise elementar por fluorescência de raios x (FRX), caracterização estrutural por difração de raios x (DRX), além de caracterização calorimétrica por termogravimetria (TGA) e calorimetria exploratória diferencial (DSC).

#### **4.2.4 Análise química - fluorescência de raios x (FRX)**

A medida de fluorescência de raios x (FRX), foi realizada com um espectrômetro PANalytical, modelo Spsilon 3XL, realizado no Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos (LAMAC/UFAM). Foi usado o método de energia dispersiva e na análise utilizou-

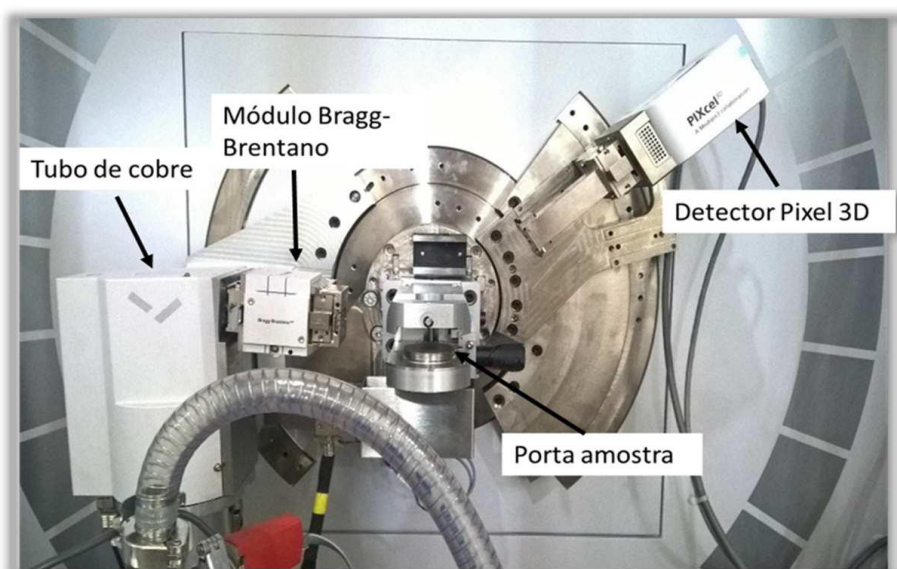
se 200 mg de amostra e fluxo de 0,5 L/min de He 99,996% (alta pureza). A Figura 10 ilustra o equipamento utilizada na análise.



**Figura 10.** Equipamento de fluorescência de raios x da PANalytical, modelo Spsilon 3XL  
**Fonte:** Autor, 2018

#### 4.2.5 Difração de raios x (DRX)

A medida de difração de raios x (DRX) foi realizada em um equipamento da Panalytical modelo Empréan com radiação de Cu-K $\alpha$  ( $\lambda=0,1541838$  nm), em uma faixa angular de  $2\theta$  de 10 - 100°. O passo e o tempo por passo foram 0,02° de  $2\theta$  e 60 s, respectivamente. A configuração geométrica básica do equipamento pode ser verificada na Figura 11.



**Figura 11.** Representação geométrica do equipamento de raio x da PANalytical modelo Empréan.  
**Fonte:** Melquíades, 2017

As preparações e medidas de DRX das amostras foram realizadas no Laboratório de Materiais (LabMat). Em seguida, os difratogramas obtidos foram submetidos a identificação de fases, através de comparações com os padrões (CIF - *Crystallographic Information Framework*) disponibilizados no banco de dados *Inorganic Crystal Structure Database* – ICSD.

#### **4.2.6 Análise termogravimétrica (TGA/dTG) e Calorimetria exploratória diferencial - DSC**

O comportamento térmico da amostra de cal de carbureto, foi realizado no equipamento de análises térmicas simultâneas da marca TA Instruments, modelo STD Q600, utilizando - se 10,0 mg de cal de carbureto, em um cadinho de alumina, em um intervalo de temperatura de 25 °C a 1100 °C a uma taxa de aquecimento de 10°C/min, com fluxo de gás de N<sub>2</sub> 5.0 (30 mL/min) para evitar a oxidação da amostra. Estas medidas foram realizadas no Laboratório de Ensaio Mecânicos (LEM-FT/UFAM).

A técnica de DSC utilizada foi por fluxo de calor, que consiste em utilizar a amostra e uma referência as quais são colocadas em cadinhos idênticos posicionados sobre um disco termoelétrico e aquecidos por uma fonte de calor. A diferença de temperatura entre a amostra e a referência em um dado instante é proporcional à variação da entalpia, capacidade calorífica (capacidade térmica), resistência térmica e fluxo de calor

#### **4.2.7 Dosagem - Método Marshall**

O desenvolvimento deste estudo abrangeu a composição de uma única faixa granulométrica [faixa C, conforme a ES 031 (DNIT, 2006) e ES 385 (DNER, 1999b)] para as misturas a quente, empregando-se os procedimentos de dosagem Marshall [ME 043 (DNER, 1995)].

As temperaturas de aquecimento dos materiais e de compactação das misturas, segundo exigências da ME (043 (DNER, 1995), ASTM D 5581 (ASTM, 2001), assim como nas especificações da AASHTO referentes ao método Marshall. O número de golpes no compactador Marshall adotado neste estudo correspondeu a 75 golpes por face, representativo da condição de tráfego pesado.



**Figura 12.** Compactador Marshall

**Fonte:** Autor, 2019

De forma resumida, a moldagem dos corpos de prova seguiu as seguintes etapas:

- ❖ Aqueceu-se os agregados e o ligante até atingirem as temperaturas de mistura, 170°C e 160°C, respectivamente;
- ❖ Após os agregados e o ligante atingirem as devidas temperaturas, misturou-se manualmente ambos e deixou-se a mistura repousando em uma estufa, previamente aquecida, na temperatura de compactação (155°C/2 h);
- ❖ Passadas 2 horas, moldou-se os corpos de prova (CP's) por compactação a quente empregando-se moldes cilíndricos metálicos, também aquecidos previamente para manter a temperatura de compactação da mistura.
- ❖ Por fim, os CP's repousaram ao ar livre por 24 horas e após esse período os mesmos foram desmoldados, medidos e pesados.
- ❖ Posteriormente a estes procedimentos, os CP's foram ensaiados empregando-se uma prensa *Universal Testing Machine* até a ruptura. Com isto, obteve-se os valores mecânicos de estabilidade e fluência, que são necessários para averiguar se as misturas estão dentro dos parâmetros exigidos pelo DNIT e também para verificar o teor de ligante das misturas.

#### **4.2.8 Ensaios Mecânicos**

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos de resistência à tração por compressão diametral, por meio de uma prensa *Universal Testing Machine*, pertencente ao grupo de pesquisa em Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas (GEOTEC/UFAM).

#### **4.2.9 Resistência à tração (RT) por compressão diametral**

Este ensaio foi realizado de acordo com o preconizado na norma DNIT 136/2018 - ME - Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por



compressão diametral - Método de ensaio e acompanhado pelo *software* UTS002 3.12 *Stress Strain Test*. Posteriormente calculou-se a RT em conformidade com a equação 7. Este ensaio determina a resistência à tração dos corpos de prova.

$$\sigma_R = \frac{2F}{\pi \cdot D \cdot H} \quad \text{Equação 7}$$

Sendo:

$\sigma_R$ : resistência à tração (MPa);

F: carga de ruptura (N);

D: diâmetro do corpo de prova (cm);

H: altura do corpo de prova (cm);

$\pi$ : 3,14.

Neste estudo determinou-se a resistência à tração ( $\sigma_R$ ) por compressão diametral em amostras cilíndricas. Segundo BERNUCCI *et al.* 2008, a resistência à tração ( $\sigma_R$ ) é um importante parâmetro para caracterizar materiais como concreto de cimento Portland e misturas betuminosas.

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga (BOCK, 2009).

Para a execução deste ensaio, foram moldados 12 corpos de prova, sendo 6 amostras de cada mistura com cal de carbureto e 6 amostras de cimento Portland, conforme Tabela 03.

**Tabela 03.** Amostras com percentual de produto ensaiado

AMOSTRA	COMPOSIÇÃO (%)	PRODUTO
CP1	3,000	CIMENTO PORTLAND
CP2	3,000	CIMENTO PORTLAND
CP3	3,000	CIMENTO PORTLAND
CP4	3,000	CAL DE CARBURETO
CP5	3,000	CAL DE CARBURETO
CP6	3,000	CAL DE CARBURETO
CP7	4,000	CAL DE CARBURETO
CP8	4,000	CAL DE CARBURETO
CP9	4,000	CAL DE CARBURETO
CP10	5,000	CAL DE CARBURETO
CP11	5,000	CAL DE CARBURETO
CP12	5,000	CAL DE CARBURETO



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise granulométrica

Conforme exposto na metodologia deste trabalho, a análise granulométrica é composta por peneiramento grosso e, após a sedimentação, o peneiramento fino.

A Figura 13 ilustra o produto obtido no peneiramento grosso (A) e o produto obtido no peneiramento fino (B) do cal de carbureto.



**Figura 13.** Produto obtido no peneiramento grosso (A) e produto obtido no peneiramento fino (B) do cal de carbureto.

**Fonte:** Autor, 2018

Os resultados da caracterização granulométrica, indicando os respectivos percentuais retidos para uma amostra de cal de carbureto são mostrados na Tabela 4 e na Figura 14. Estes ensaios foram realizados de acordo com o preconizado na norma ABNT 7181/2016 - Análise granulométrica.

**Tabela 4.** Análise granulométrica - ABNT 7181/2016

Peneira	Abertura (mm)	Material retido (g)	Material retido acumulado (g)	Sem defloculante (%)	Com defloculante (%)
2"	50,0	0,0	0,0	100,0	100,0
1 1/2"	38,0	0,0	0,0	100,0	100,0
1"	25,0	0,0	0,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	0,0	0,0	100,0	100,0
3/8"	9,5	0,0	0,0	100,0	100,0
4	4,8	1,9	1,9	92,1	96,1
10	2,0	20,0	21,9	13,3	35,0
16	1,2	7,9	7,9	11,0	27,3
30	0,6	9,7	17,6	11,0	19,7
40	0,4	4,0	21,6	12,0	17,8
60	0,3	2,7	24,3	13,0	16,9
100	0,2	15,6	39,9	9,6	15,8
200	0,0	15,7	55,6	9,5	10,8

**Fonte:** Autor, 2018 - Laboratório de Solo - GEOTEC/UFAM

A partir dos dados da Tabela 04, foi possível construir a curva granulométrica mostrada na Figura 14 abaixo.

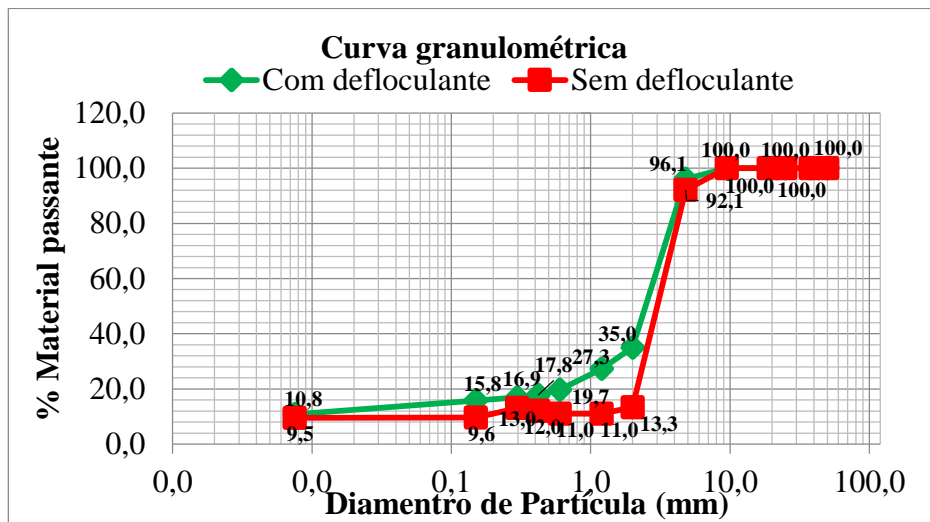


Figura 14. Curva granulométrica do cal de carbureto  
Fonte: Autor, 2018

Ao analisar a curva granulométrica por sedimentação, verificou-se que a amostra ensaiada com defloculante apresenta 35% das partículas com diâmetro entre 2,0 mm e 0,2 mm; entre 35 – 96,1% temos partículas com diâmetro 2,0 mm e 4,8 mm, entre 96,1 – 100% encontra-se partículas com diâmetros 4,8 mm – 50 mm.

A distribuição dos grãos do cal de carbureto foi calculado de acordo com a lei de Stokes, conforme norma ABNT 7181/2016 no seu item 5.4 “diâmetro das partículas de solo em suspensão”. Por meio da equação 8 e dados obtidos experimentalmente da Tabela 5, determinou-se o diâmetro de partículas  $d = 0,0053$  mm, o que caracteriza está cal de carbureto com granulometria tipicamente fina. Convém lembrar que a granulometria é característica essencial para estudo das dosagens em misturas asfálticas.

$$d = \sqrt{\frac{1800 \mu}{\rho_s - \rho_{md}} \times \frac{z}{t}}$$

Equação 8

Sendo:

d: diâmetro máximo das partículas (mm);

$\mu$ : coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio ( $g \times s/cm^2$ );

z: altura de queda das partículas, com resolução de 0,1 cm, correspondente à leitura do densímetro (cm);

t: tempo de sedimentação (s);

$\rho_s$ : massa específica dos grãos do solo ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_{md}$ : massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio ( $\text{g/cm}^3$ ).

**Tabela 5.** Diâmetro das partículas em suspensão

<b>Diâmetro das partículas em suspensão</b>						
<b>t(s)</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b><math>\mu</math> (<math>\text{g} \times</math> <math>\text{s/cm}^2</math>)</b>	<b>z (cm)</b>	<b><math>\rho_s</math> (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	<b><math>\rho_{md}</math> (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	<b>d (mm)</b>
30	30	$8,16 \times 10^{-6}$	1,048	2,655	1,000	0,0176
60	30	$8,16 \times 10^{-6}$	1,046	2,655	1,000	0,0124
120	30	$8,16 \times 10^{-6}$	1,044	2,655	1,000	0,0087
240	30	$8,16 \times 10^{-6}$	1,030	2,655	1,000	0,0061
480	30	$8,16 \times 10^{-6}$	1,029	2,655	1,000	0,0043
900	30	$8,16 \times 10^{-6}$	1,019	2,655	1,000	0,0032
1800	29	$8,34 \times 10^{-6}$	1,010	2,655	1,000	0,0023
3600	29	$8,34 \times 10^{-6}$	1,005	2,655	1,000	0,0016
7200	29	$8,34 \times 10^{-6}$	1,004	2,655	1,000	0,0011
28800	29	$8,34 \times 10^{-6}$	1,003	2,655	1,000	0,0006
86400	28	$8,52 \times 10^{-6}$	1,002	2,655	1,000	0,0003
<b><math>\Sigma d</math> (mm)</b>						<b>0,0053</b>

**Fonte:** Autor, 2018 - Laboratório de Solo - GEOTEC/UFAM

Em seu estudo, SALDANHA *et al.* 2018, realizou o ensaio granulométrico por meio da técnica de difração a laser, cuja distribuição de tamanho do grão do cal de carbureto apresentou um diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) = 0,003 mm. Em outro estudo, PHETCHUAY *et al.*; 2014, obteve um diâmetro efetivo ( $D_{10}$ ) = 0,004 mm.

O método ASTM C997 (ASTM 2010) estabelece limite padrão nas porcentagens de máximo retidas em peneiras #30=0,60 mm e #200=0,075 mm ser 3 e 25%, respectivamente, para ser satisfatória para uso em aplicações de estabilização de solo. SALDANHA *et al.* 2018, encontrou diâmetro efetivo nas peneiras #30=0,60 mm e #200=0,075 mm, o que corresponde a 4,9 e 23,2% de resíduos retidos nas peneiras, respectivamente.

### 5.2 Massa específica real do material pulverizado (ASTM C 188/17)

As amostras de cal de carbureto foram avaliadas consoante a massa específica real (Gsa), acompanhando a norma ASTM C188/17 - Density of Hydraulic Cement.

O ensaio for realizado em triplicata e obteve-se uma massa específica ( $\rho$ ) do cal de carbureto com  $\rho = 2,655 \text{ g/cm}^3$ .

### 5.3 Análise química - fluorescência de raios x (FRX)

Na fluorescência de raios x por energia dispersiva foi possível determinar a composição química do cal de carbureto, cujos resultados são apresentados na Tabela 6. O

**Tabela 6.** Composição química do resíduo de cal de carbureto determinada empregando-se a técnica de fluorescência de raios x.

Elemento	Composição (%)	Elemento	Composição (%)
Ca	96,038	Sr	0,063
Si	1,765	Ti	0,059
Al	0,700	Mg	0,059
Fe	0,486	Sn	0,007
Cl	0,327	Zr	0,004
S	0,198	Mn	0,002
P	0,148	Cu	0,001
Ag	0,142		

Fonte: Autor, 2018 (LAMAC/UFAM)

Na análise química elementar por espectrometria de fluorescência de raios x (XRF) indicou a presença dos elementos cálcio (Ca) 96,038%, silício (Si) 1,765%, alumínio (Al) 0,700%, ferro (Fe) 0,486%, cloro (Cl) 0,327% e outros elementos, por exemplo, Mg, P, Ag e S, conforme a Tabela 6.

Em seu estudo, SALDANHA *et al* 2018, identificou o cálcio (Ca) 74,000%, silício (Si) 3,100%, e menos de 1% de outros óxidos, como por exemplo,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . As composições químicas são geralmente semelhantes em vários estudos do cal de carbureto. Destaca-se, ainda, que as características da cal são influenciadas pelo método escolhido para a fabricação do gás acetileno (AYECHE; HAMDAOUI, 2012).

A Tabela 7 sumariza os resultados de fluorescência de raios x deste estudo, comparando-os aos achados em estudos anteriores sobre cal de carbureto (HORPIBULSUK *et al.* 2013; VICHAN & RACHAN 2013; JIANG *et al.* 2016; SALDANHA *et al.* 2018). Pode-se observar que a composições químicas geralmente são semelhantes em vários estudos.

**Tabela 7.** Espectroscopia de fluorescência de raios x do resíduo cal de carbureto

<b>Substância química</b>	<b>Presente neste estudo (Composição%)</b>	<b>Vichan and Rachan, 2013 (Composição%)</b>	<b>Jiang et al, 2016 (Composição%)</b>	<b>Saldanha et al, 2018 (Composição%)</b>
<b>Ca</b>	96,038	83,100	68,990	96,000
<b>Si</b>	1,765	5,710	2,840	3,100
<b>Al</b>	0,700	2,610	2,160	0,460
<b>Fe</b>	0,486	0,720	0,150	0,260
<b>Mg</b>	0,059	0,800	0,120	0,720
<b>Na</b>	ND	0,290	ND	ND
<b>K</b>	ND	ND	ND	ND

Nota: ND – não detectado

Fonte: SALDANHA *et al.* 2018 e adaptada pelo autor

Neste estudo foi encontrado 96,020% de óxido de cálcio (CaO), no qual seguiu de acordo com o preconizado na norma ASTM C25 (ASTM 2011). Segundo a ASTM C977 (ASTM 2010) recomenda-se que mais de 90% de óxido de cálcio (CaO) esteja presente no cal de carbureto para que seja usado em aplicação de estabilização de solo. Assim, o cal de carbureto neste estudo está dentro das exigências da norma standard ASTM C977 (ASTM 2010).

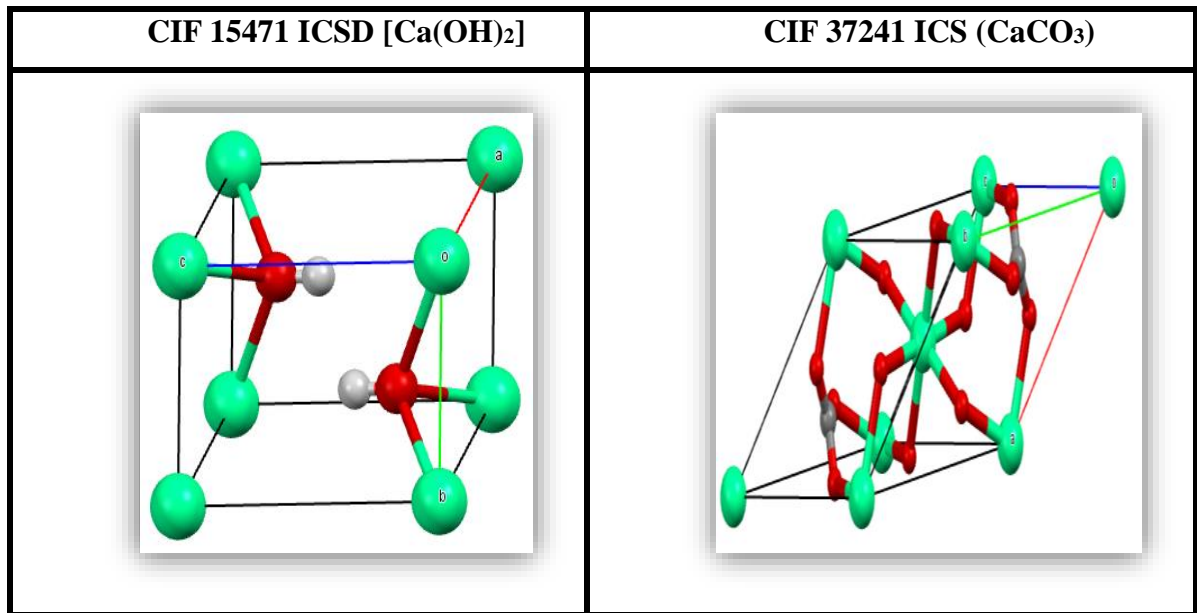
#### **5.4 Difração de raios x (DRX)**

O difratograma de raios x da amostra registrado no intervalo de  $2\theta = 10$  a 100 graus, foram comparados aos padrões cristalográficos conhecidos como CIF (*Crystallographic Information File*) e também comparados a base de dados ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*).

Com isso, foi possível identificar as fases cristalinas, baseado nas posições dos picos e nas distâncias interplanares. Finalmente, pudemos determinar a estrutura cristalina do cal de carbureto empregado neste estudo.

Com os arquivos CIF obtidos na base de dados foi possível a utilização do software Mercury para identificar e gerar os modelos de estrutura cristalina das fase cristalográficas presentes na amostra. Os CIF's, juntamente com os dados da amostra foram utilizados na plotagem dos gráficos, realizada por meio do programa *Origin 2016*.

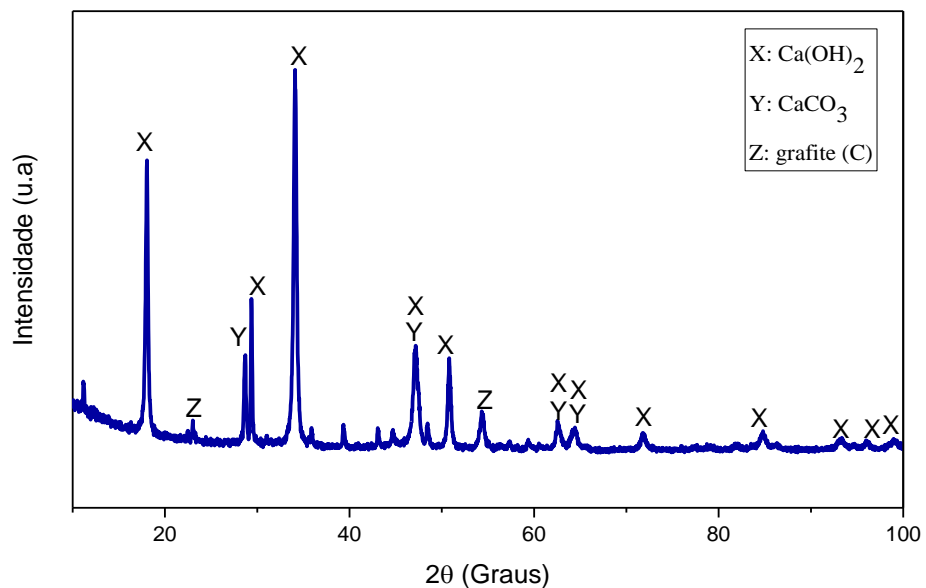
A Figura 15, ilustra a célula unitária CIF 37241 ICSD [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] e CIF 15471( $\text{CaCO}_3$ ) obtido do *software* Mercury.



**Figura 15.** Célula unitária CIF 15471 ICSD e CIF 37241 ICSD

Fonte. Autor (Mercury)

Os constituintes minerais foram determinados por análise de difração de raios x (DRX). A Figura 16, mostra o difratograma do cal de carbureto.

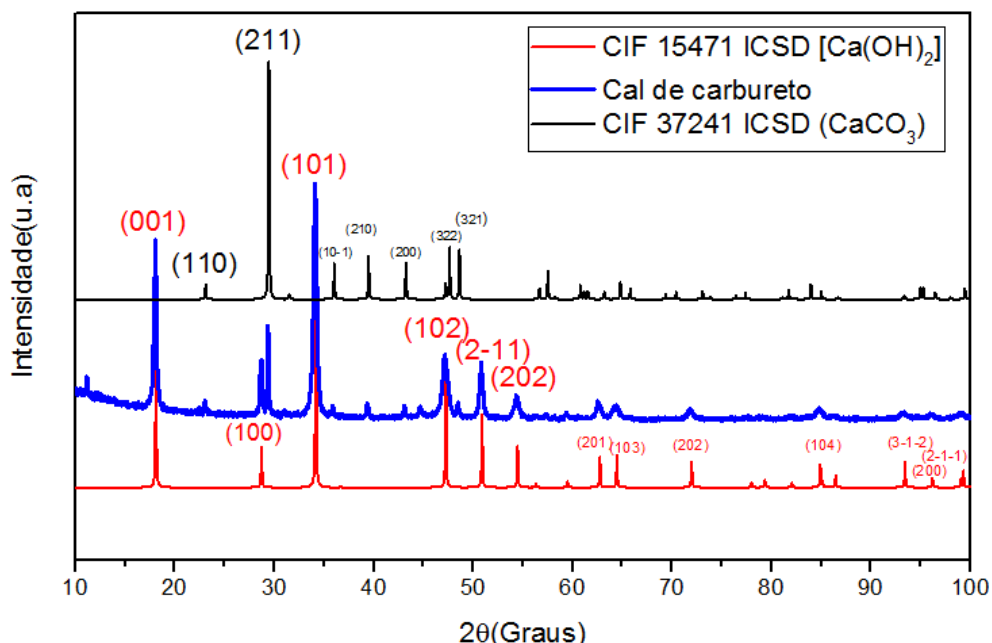


**Figura 16.** Difratograma do cal de carbureto

Fonte: Autor, 2018

Estes resultados mostram a presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , como a fase cristalina principal, ( $\text{CaCO}_3$ ) em quantidade secundária e também a presença de grafite (C). Segundo Vichan & Rachan, 2013, em seu estudo mostrou a presença de [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ], como a fase cristalina principal, ( $\text{CaCO}_3$ ) em quantidade secundária e grafite (C) como minerais dominantes que também foram relatados em cal de carbureto estudados por SALDANHA *et al*, 2018 e Vichan & Rachan, 2013.

Através dos cartões do CIF (*Crystallographic Information File*) 37241 ICSD [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] e 15471( $\text{CaCO}_3$ ), obtidos da base de dados ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*), foi realizado um comparativo da fase cristalina do cal de carbureto, conforme mostra a Figura 17.



**Figura 17.** Difratograma do cal de carbureto versus CIF 37241 ICSD e CIF 15471 ICSD  
**Fonte:** Autor, 2018

Analisando a Figura 17, observa-se que o cartão CIF 15471 ICSD apresenta informações, cujo o difratograma mostra os máximos de difração referentes aos planos (0 0 1) em  $2\theta = 18,07^\circ$ ; (1 0 1) em  $2\theta = 34,21^\circ$ ; (2 -1 1) em  $2\theta = 50,96^\circ$ ; (2 0 2) em  $2\theta = 72,15^\circ$ ; (1 0 4) em  $2\theta = 85,07^\circ$ ; (3 -1 -2) em  $2\theta = 95,74^\circ$ ; (3 0 0) em  $2\theta = 96,17^\circ$  e (2 -1 4) em  $2\theta = 99,39^\circ$ , referente à fase cristalina principal de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . A fase secundária de  $\text{CaCO}_3$  foi observada no plano (1 0 0) em  $2\theta = 28,97^\circ$ , e nos planos (1 0 2) em  $2\theta = 47,33^\circ$ , (2 0 1) em  $2\theta = 62,67^\circ$  e (1 0 3) em  $2\theta = 64,48^\circ$ , associado ao  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

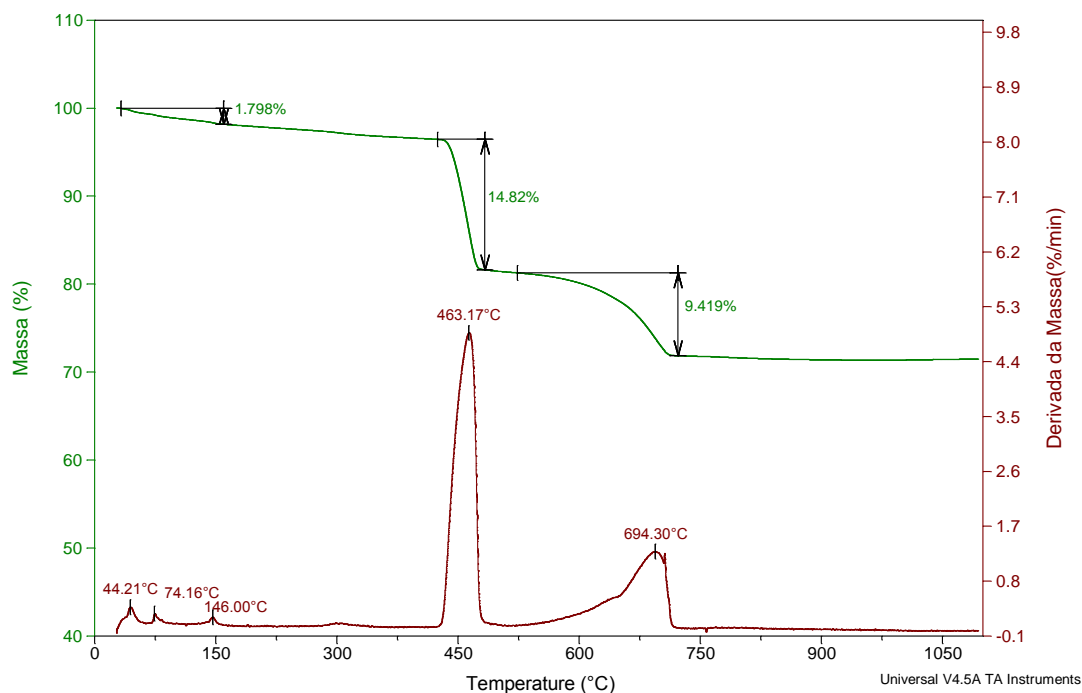
O cartão CIF 37241 ICSD padrão de difração de raios x é característico do sistema cristalino trigonal, grupo espacial:  $\mathbf{R} - \mathbf{3} \mathbf{c} \mathbf{R}$  (167), parâmetros de rede:  $a = b = c = 6,36 \text{ \AA}$ ,  $\alpha = \beta = \gamma = 46,1^\circ$ , volume da cela unitária:  $121,86 \text{ \AA}^3$ . Em relação ao cartão CIF 15471 ICSD padrão de difração de raios x é característico do sistema cristalino: Trigonal, grupo espacial:  $\mathbf{P} - \mathbf{3} \mathbf{m} \mathbf{1}$  (164), parâmetros de rede:  $a = b = 3,5853(7) \text{ \AA}$ ,  $c = 4,895(3) \text{ \AA}$ ,  $\alpha = \beta = 90,0^\circ$  e  $\gamma = 120,0^\circ$ , volume da cela unitária:  $54,49 \text{ \AA}^3$ .

### 5.5 Análise termogravimétrica e calorimetria exploratória diferencial

As análises termogravimétricas (TGA/dTG) foram realizadas para avaliar o comportamento térmico do cal de carbureto, bem como para avaliar quantitativamente a presença de hidróxido de cálcio [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Na curva TG

observa-se o decaimento da massa (%), que correspondente ao processo de decomposição dos componentes em função do aumento de temperatura no intervalo de (10°C a 1100°C). Nas curvas de dTG verificam-se os picos das perdas de massa através de uma derivativa da massa (%) por tempo (min).

Na Figura 18, temos as curvas de TG/dTG do cal de carbureto, assim como as temperaturas observadas para os eventos térmicos da respectiva amostra.



**Figura 18.** Termograma do cal de carbureto  
**Fonte:** Autor, 2019

**Tabela 8.** Temperaturas para os eventos térmicos referentes ao cal de carbureto

Evento	T <sub>máx</sub> dTG (°C)	Perda de Massa (%)	Resíduo (%)
	43,21		
1	74,16	1,798	
	146,00		75,761
2	463,17	14,82	
3	694,30	9,419	

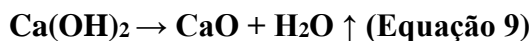
No termograma da Figura 18 e conforme a Tabela 8, ocorrem três eventos característicos. No intervalo de 40,0 °C a 150,0 °C observou-se três eventos térmicos, sendo o primeiro em 44,21 °C, o segundo em 74,16 °C e o terceiro em 146,0 °C. Este três eventos térmicos apresentam uma perda de massa de 1,798%.

No intervalo de 350,0 °C a 550,0 °C, observou-se um evento térmico com pico máximo em 463,17 °C. Neste evento térmico, ocorreu uma perda de massa de 14,82%. No intervalo de



550,0 °C a 750,0 °C, observou-se um evento térmico, sendo que o pico máximo em 694,30 °C. Neste evento térmico, ocorreu uma perda de massa de 9,419%.

Essas perdas de massa corresponderam à vaporização da água, devido à decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$  em  $\text{CaO}$  (equação 9) e na decomposição de  $\text{CaCO}_3$  em  $\text{CaO}$  (equação 10). A principal perda de peso de 14,82% relacionada à transformação do precursor de  $\text{Ca(OH)}_2$  na fase  $\text{CaO}$  foi bem correspondida à perda de peso calculada da Equação. (10).



Segundo MIRGHIASI *et al.* 2014, em seu estudo identificou através da termogravimétrica (TG), também três perdas de peso em 43 a 375 °C, 375 a 480 °C e 480 a 650 °C, regiões próximas ao encontrado neste estudo. MIRGHIASI *et al.* 2013, observa-se que tens à vaporização da água, à decomposição de  $\text{Ca(OH)}_2$  em  $\text{CaO}$  e na decomposição de  $\text{CaCO}_3$  em  $\text{CaO}$ , respectivamente e que a principal perda de massa de 25% relacionada à transformação do precursor de  $\text{Ca(OH)}_2$  na fase  $\text{CaO}$  foi bem correspondida à perda de massa calculada.

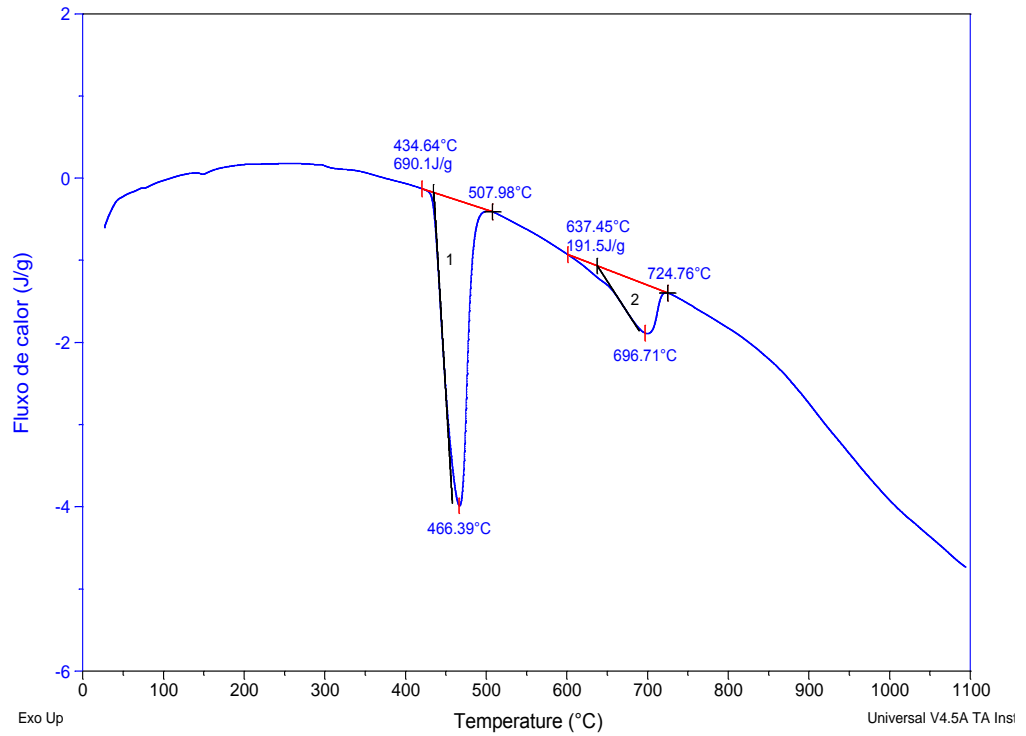
LIU *et al.* 2018, observou uma perda de peso em 410 – 470 °C, no qual verifica-se a decomposição do  $\text{Ca(OH)}_2$ . Isto também ocorre semelhantemente, por meio da equação 10, onde foi obtido a decomposição  $\text{CaCO}_3$ .

Segundo, SALDANHA *et al.*, 2018, o cal de carbureto consiste em 81,0% de  $\text{Ca(OH)}_2$ , 9,40% de  $\text{CaCO}_3$ . Cardoso *et al.*, 2009, relataram 7,30% de  $\text{CaCO}_3$  em seu estudo, que indica que o cal de carbureto usado neste estudo apresentou maior grau de carbonatação, possivelmente devido às diferenças na quantidade de tempo exposto ao ar durante o meia período após a produção.

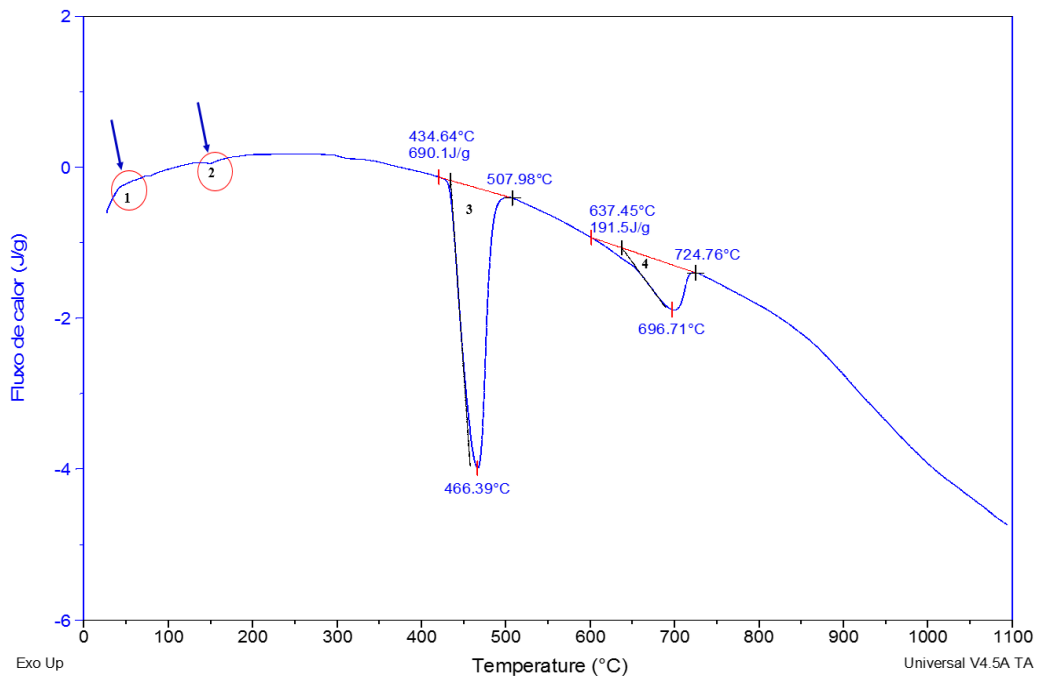
Esses resultados demonstram que o cal de carbureto usado neste estudo atende ao limite padrão ASTM C977 (ASTM 2010) de 5% de dióxido de carbono para a cal utilizada, por exemplo, na estabilização do solo.

DAUD *et al.* 2016, observou uma perda de massa secundária entre 400 - 500 °C e uma perda de massa principal é observada entre 500 - 700 °C. A perda de massa entre 400 - 500 °C é atribuída a decomposição parcial de  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{CaO}$ , enquanto transformação completa para  $\text{CaO}$  só acontece na segunda fase (acima de 500 °C).

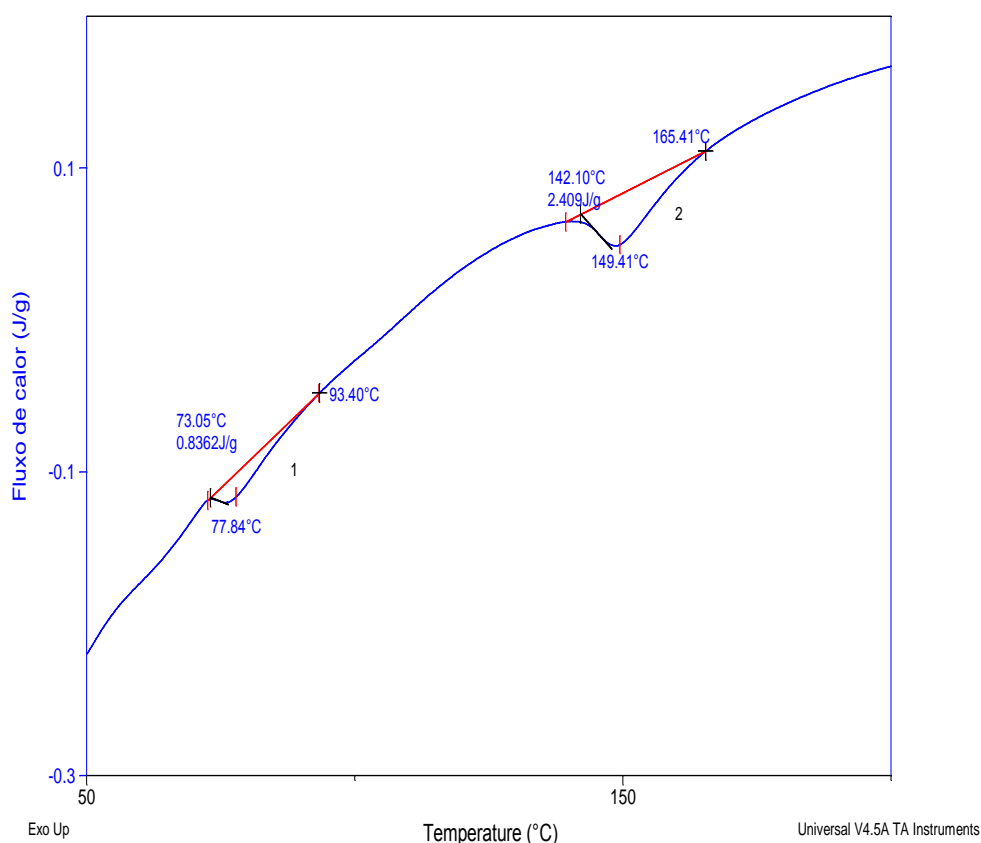
Na Figura 19 temos a curva de DSC do cal de carbureto, assim como as temperaturas observadas para os eventos térmicos da respectiva amostra. A partir da análise de DSC pode-se observar dois eventos térmicos característicos para cal de carbureto. No entanto, fazendo uma verificação mais detalhada, observa-se quatro eventos térmicos, conforme que podem ser vistos nas Figuras 20 e 21. A Tabela 9 resume os resultados referentes a cada evento térmico.



**Figura 19.** Curva de DSC do cal de carbureto com dois principais eventos térmicos  
**Fonte:** Autor, 2019



**Figura 20.** Curva de DSC do cal de carbureto com quatro eventos térmicos  
**Fonte:** Autor, 2019



**Figura 21.** Curva de DSC do cal de carbureto dos eventos térmicos 1 e 2.

**Fonte:** Autor, 2019

**Tabela 9.** Temperaturas para os eventos térmicos referentes ao cal de carbureto por DSC

Pico	T <sub>onset</sub> (°C)	T <sub>pic</sub> (°C)	T <sub>endset</sub> (°C)	ΔH (J/g)	Tipo de reação
1	73,05	77,84	93,4	0,84	Endotérmica
2	142,10	149,41	165,41	2,41	Endotérmica
3	434,64	466,39	507,98	690,10	Endotérmica
4	637,45	696,71	724,76	191,50	Endotérmica

A análise por calorimetria exploratória (DSC) (Figura 19), mostrou quatro picos endotérmicos. O evento térmico 3 apresentou um pico maior a 696,71 °C que foi atribuído à transformação da fase Ca(OH)<sub>2</sub> em CaO (Equação 9).

Os três eventos térmicos em 77,84 °C, 149,41 °C e 466,39 °C, que estão relacionados à vaporização da água adsorvida e à decomposição de CaCO<sub>3</sub> a CaO, respectivamente, estando de acordo com os resultados do TG. De acordo com os resultados do DSC, a temperatura de decomposição do CaCO<sub>3</sub> (696,71 °C) é maior que o Ca(OH)<sub>2</sub> (466,39 °C).

Portanto, a temperatura de calcinação do precursor foi considerada 696,71 °C. Também uma altura muito baixa nos primeiros eventos térmicos confirma pequenas quantidades de CaCO<sub>3</sub> na fase Ca(OH)<sub>2</sub>.

Segundo LIU *et al.* 2018, em seu estudo observou três eventos térmicos. Sendo o primeiro em aproximadamente 100 °C. O segundo evento térmico em aproximadamente 410 a 470 °C, onde o Ca(OH)<sub>2</sub> desidratou, como determinado pela equação 4. O terceiro evento térmico em aproximadamente 650 a 800 °C, quando o CaCO<sub>3</sub> é decomposto, como determinado pela equação 5.

MIRGHIASI *et al.* 2014, identificou três picos endotérmicos. O pico maior à 463,8 °C foi devido à transformação da fase Ca(OH)<sub>2</sub> em CaO e dois pequenos picos a cerca de 100,0 °C e 650,0 °C, que estavam relacionados à vaporização da água e à decomposição de CaCO<sub>3</sub> a CaO, respectivamente.

Desta forma, estes resultados estão de acordo com análise termogravimétrica realizado em seu estudo. Sendo assim, foi observado a temperatura de decomposição do CaCO<sub>3</sub> (650 °C) é maior que o Ca(OH)<sub>2</sub> (463,8 °C). Por conseguinte, a temperatura de calcinação do precursor foi considerada 650,0 °C. E também uma baixa do terceiro pico demonstra que pequenas quantidades de CaCO<sub>3</sub> na fase Ca(OH)<sub>2</sub>.

DAUD *et al.* 2016, verificaram em seu estudo dois eventos térmicos. O primeiro evento térmico (reação endotérmica) ocorreu em 450 °C, devido a decomposição do Ca(OH)<sub>2</sub> em CaO e segundo evento térmico entre 700 a 750 °C, referente a temperatura de decomposição do CaCO<sub>3</sub>.

De acordo com MARTIN *et al.*, 2018, o ensaio de DSC acompanha os efeitos do calor em um determinado material, associados a mudanças de fase ou reações químicas em função da temperatura. A técnica de calorimetria exploratória diferencial possibilita a construção de uma curva do fluxo de calor (mW) pela temperatura (°C), onde é possível analisar a decomposição térmica dos compostos existentes na amostra.

Em matrizes cimentícias, o ensaio de calorimetria diferencial (DSC) não é empregado quantitativamente, mas sim para identificação de fases. Este experimento é utilizado para confirmar a presença das fases cristalinas encontradas em outros experimentos, como por exemplo, o ensaio de difração de raios x (LOTHENBACH *et al.* 2016).

## 5.6 Caracterização mecânica

### 5.6.1 Dosagem das misturas asfálticas

A especificação de referência para dosagem do concreto asfáltico adotada foi a especificação de serviço DNIT ES 031/2006 (DNIT, 2006a), que define a sistemática a ser empregada na execução de camada do pavimento flexível de estradas de rodagem, pela confecção de mistura asfáltica a quente em usina apropriada utilizando ligante asfáltico, agregados e material de enchimento (fíler).

A faixa “C” foi escolhida por ser destinada à camada de rolamento, que é a aplicação mais comum das misturas asfálticas produzidas em usinas locais para pavimentação na cidade de Manaus.

Os agregados minerais apresentam os seguintes resultados de massas específicas da brita 1 e brita 0 dos agregados graúdos alcançaram 2,55 g/cm<sup>3</sup> e 2,71 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A areia apresentou massa específica real de 2,20 g/cm<sup>3</sup>. Quanto ao pó de pedra obteve-se um valor igual a 2,75 g/cm<sup>3</sup>.

A caracterização do cimento Portland e cal de carbureto utilizados denotaram massas específicas reais de 2,93 g/cm<sup>3</sup> e 2,65 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Com relação aos valores da massa específica máxima medida foi de  $G_{mm} = 2,35$ , massa específica aparente de mistura asfáltica compactada  $G_{mb} = 2,25$  g/cm<sup>3</sup> e o teor de ligante de projeto de 5,20%.

Nas Tabelas 10 e 11, são apresentados os dados referente as dosagem de referência e a alternativa.

**Tabela 10.** Dosagem Cimento (referência)

Componente	Percentual (%)
Brita 1	14,3
Brita 0	28,4
Pó de pedra	25,4
Fíler (cimento <i>portland</i> )	3,0
Areia	23,7
CAP	5,2
Total	100,0

**Tabela 11.** Dosagem alternativa de cal carbureto

Componente	Dosagens percentual (%)		
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>
Brita 1	14,3	13,8	14,2
Brita 0	28,4	27,9	28,4
Pó de pedra	25,4	25,6	24,6
Fíler (cal de carbureto)	3,0	4,0	5,0
Areia	23,7	23,5	23,6
CAP	5,2	5,2	5,2
Total	100,0	100,0	100,0

Em relação aos parâmetros Marshall da mistura asfáltica referência, a média dos seus resultados constam na Tabela 11. Ao avaliá-los, verifica-se que, em relação ao ensaio de resistência à compressão diametral e à estabilidade Marshall, a composição evidencia-se adequada para emprego em camadas de ligação e rolamento, frente os limites preconizados pela ES 031/2006 (DNIT).

No entanto, quanto aos valores de Vv e RBV, mostra-se mais tecnicamente adequada para aplicação em camada de rolamento. Por último, tem-se o valor do VAM um pouco abaixo do mínimo aceitável, conforme o Tamanho Máximo Nominal (TMN) do agregado igual a 19 mm.

**Tabela 12.** Parâmetros Marshall da dosagem referência.

Propriedade	Média dos resultados			Limites ES
	1 <sup>a</sup> Dosagem (3,0%)	2 <sup>a</sup> Dosagem (4,0%)	3 <sup>a</sup> Dosagem (5,0%)	031/2006 (DNIT) Camada de Rolamento
Estabilidade (N)	655,00	649,00	651,00	500 (mínimo)
RT (MPa)	0,86	0,85	0,60	0,65 (mínimo)
Vv (%)	3,70	3,90	4,10	3 – 5 (intervalo)
VAM (%)	15,20	15,10	15,80	15 (mínimo)
RBV (%)	76,00	79,00	75,00	75 – 82 (intervalo)

### 5.6.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios mecânicos de Resistência à Tração por Compressão Diametral, por meio de prensa *Universal Testing Machine*, pertencente ao Grupo de pesquisa em Geotecnia da Universidade Federal do Amazonas (GEOTEC/UFAM).

Neste estudo, a resistência à tração (RT) foi avaliada por meio de ensaio de carregamento estático por compressão diametral, segundo as recomendações da norma DNIT 136/2018 - ME. A Figura 22 ilustra o equipamento utilizado e o ensaio de RT sendo realizado em um CP pertencente a uma das misturas asfálticas deste estudo.

Os CPs ensaiados foram moldados em laboratório e submetidos a um condicionamento prévio mínimo de 4 horas à temperatura de 25 °C.



**Figura 22.** Prensa Universal Testing Machine  
Fonte: Autor, 2019

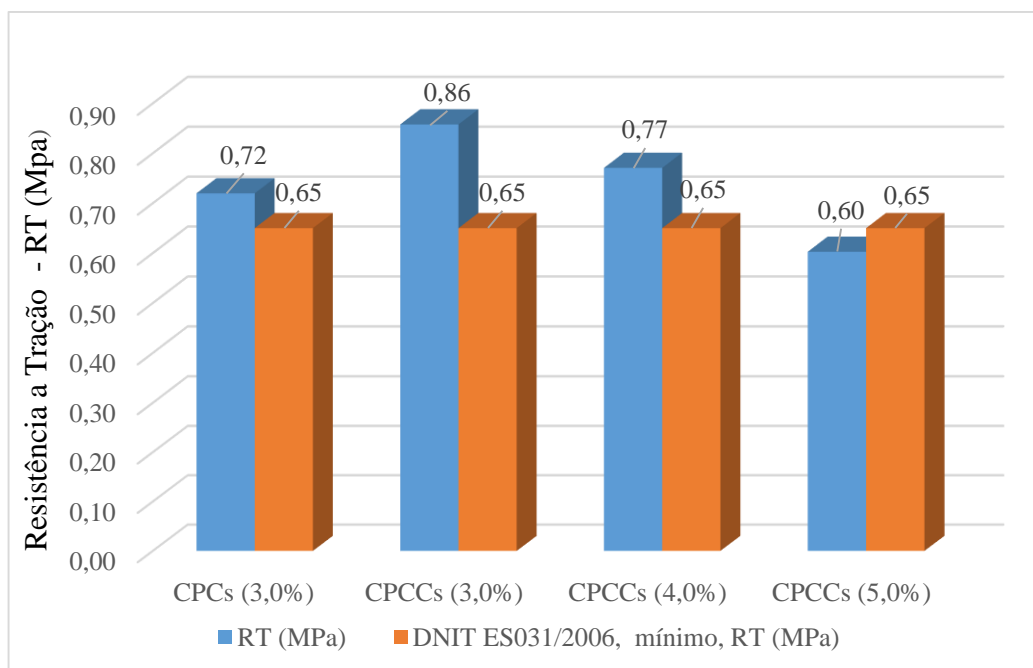
Na tabela 13 e figura 23, são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração (RT) encontrados para cada CPs por teor analisado 3,4 e 5, % de cal de carbureto e 3% de fíler - cimento.

**Tabela 13.** Resultados do ensaio de resistência à tração (RT)

MÉDIA AMOSTRA	MÉDIA DOS RESULTADOS				DNIT ES031/2006, mínimo, RT (MPa)
	FORÇA AXIAL MÁX (kN)	D (cm)	H (cm)	RT (MPa)	
CPCs (3,0%)	7,665	10,17	6,67	<b>0,72</b>	0,65
CPCCs (3,0%)	9,077	10,17	6,63	<b>0,86</b>	0,65
CPCCs (4,0%)	8,544	10,14	6,96	<b>0,77</b>	0,65
CPCCs (5,0%)	6,377	10,13	6,65	<b>0,60</b>	0,65

**Legenda:**

CPCs (3,0%) - Fíler (cimento portland);  
 CPCCs (3,0%) - Fíler (cal de carbureto);  
 CPCCs (4,0%) - Fíler (cal de carbureto);  
 CPCCs (5,0%) - Fíler (cal de carbureto).



**Figura 23.** Resultados do ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral  
**Fonte:** Autor, 2019

Observa-se que os valores de RT do cal de carbureto (3 e 4%) foram melhores comparados com do cal de carbureto (5%) e o cimento Portland (3%). Entretanto, os resultados indicam que (3 e 4% de cal de carbureto) os valores atenderam ao limite mínimo preconizado pela Norma do DNIT ES031/2006, que deve ser de, no mínimo, 0,65 MPa (a 25°C) em misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento.

Os valores encontrados estão no intervalo de 0,59 a 0,89 Mpa, estão compatíveis com valores típicos de misturas asfálticas a quente recém moldadas, que são da ordem de 0,5 a 2,0 MPa (BERNUCCI *et al.* 2006). Dessa forma, verificou-se que o cal de carbureto pode ser utilizado como substituto do cimento Portland, de acordo com o parâmetro analisado.

Em seu estudo SALDANHA *et al.* 2018 enfatiza que a cal de carbureto possui potencial de utilização similar as cales hidratadas vendidas comercialmente além de ter um forte apelo ambiental. SAUSEN, (2019), trabalhou com 1% e 2% de cal carbureto, no qual obteve uma média 1,03 Mpa (1% de cal carbureto) e 1,20 Mpa (2% de cal de carbureto). Neste estudo, observa-se que com a adição de 1% de cal de carbureto, houve uma queda de aproximadamente 10% (0,11 MPa) na resistência à tração, porém, ao adicionar 2% de cal, houve um aumento de 16,5% (0,17 MPa) em relação a resistência à tração apresentada pela mistura 1%CAL e 5% (0,06 MPa) em relação a mistura referência.

Comparando as adições de outros tipos de cales, os resultados discordam, em partes, de resultados obtidos por outros autores. Em partes pois houve um decréscimo da RT apenas em uma das misturas (1% cal), enquanto a outra obteve um crescimento. Esta redução da resistência



com a incorporação de cal pode ser em decorrência da propriedade que a cal de carbureto possui de aglomerar-se com facilidade após um determinado tempo, o que teria causado um acréscimo no volume de vazios dos CP's, fazendo com que os mesmos perdessem resistência.

Segundo, GRANICH (2010), adicionou à misturas de ligantes asfálticos 1 e 2% de cal calcítica e 2% de cal dolomítica, obtendo um crescimento da resistência à tração de 9,2%, 5% e 16,7%, respectivamente. Entretanto, Castro (2011), obteve um decréscimo da resistência à tração de aproximadamente 18,5% ao incorporar 1% de cal calcítica e 16,5% ao incorporar 1% de cal dolomítica.

Castro (2011), o decréscimo nos valores obtidos nos ensaios de resistência à tração após a incorporação da cal pode estar atrelado a uma possível incorreção de aproveitar-se do mesmo projeto de misturas, empregando materiais de diferentes características na mesma.

## 6 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo principal avaliar o uso do resíduo de cal de carbureto em substituição parcial de agregados minerais convencionais empregados na pavimentação asfáltica.

Os resultados obtidos levaram as seguintes conclusões:

- i. O resíduo de cal de carbureto mostra resultados promissores frente ao fíler convencional.
- ii. Os resultados dos ensaios mecânicos evidenciaram desempenho satisfatório das misturas asfálticas com cal de carbureto em comparação a composição convencional.
- iii. Tal conclusão contribui para ratificar que a utilização do cal de carbureto em composições asfálticas pode ser uma alternativa ao fíler tradicional (cimento Portland) para a produção de misturas asfálticas.

## **7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Com o objetivo de melhor avaliar o desempenho mecânico de concretos asfálticos com cal de carbureto, sugerem-se para futuros trabalhos:

- a) Analisar as propriedades mecânicas de acordo com a Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (Creep Dinâmico);
- b) Efetuar as dosagens pelo método Superpave;
- c) Executar e monitorar trechos experimentais com misturas asfálticas tendo a participação do cal de carbureto, visando aferir a relação laboratório-campo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T19. **Standard Method of Test for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate**, 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457-2016, **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, Brazil, 2016.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181-2017. **Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, Brazil, 2017.

ARAÚJO V, T, F., BRANCO, V, T, F., LIMA, D, M., CAVALCANTE, R, M. Avaliação ambiental da utilização de solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP) em misturas asfálticas. **TRANSPORTES**, v. 24, n. 2, p. 77-8, 2016.

ARAUJO, V.M.C.; CASTELO BRANCO, V.T.F.C; LIMA, D.M.; CAVALCANTE, R.M. Avaliação ambiental da utilização de solo contaminado por derivados de petróleo (SCDP) em misturas asfálticas. **Transportes**, v. 24, n. 2, p. 77-87, 2016.

ASTM. “**Standard specification for quicklime and hydrated lime for soil stabilization.**” ASTM C977, West Conshohocken, PA, 2010.

AYECHE, R.; HAMDAR, O. Valorization of carbide lime waste, a by-product of acetylene manufacture, in wastewater treatment. **Desalination and Water Treatment**, v. 50, n. 1-3, p. 87-94, 2012.

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 501p. 2008.

CALLISTER, W, D; RETHWISCH, D, G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8 edição, LTC, Rio de Janeiro, 2012.

CALTEC. **Cal Dolomítica x Cas Calcítica x Cal Magnésiana**. Curitiba, Brasil, 2017b. Disponível em: < <http://caltec.com.br/cal-dolomitica-cal-calcitica-vs-cal-magnesiana/> >. Acessado em: 09/08/2018.

CARDOSO, F. A., FERNANDES, H. C., PILEGGI, R. G., CINCOTTO, M. A., V. M. “Carbide lime and industrial hydrated lime characterization.” **Powder Technol.**, 195(2), 143–149, 2009.

CARVALHO, J. R. **Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil e ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2018.

CASTRO, S. F. **Misturas asfálticas com incorporação de cal: Análise volumétrica e mecânica**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vila de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. 2010. 177p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. 2010.

CONSOLI, N.C. **Processamento e utilização geotécnica de resíduos**. In: SIMPÓSIO Brasileiro de Geotecnia Ambiental – REGEO, [S.I.]. Anais... [S.I.]: [s.n.], 2003. P. 497-510, 2003.

COOK, J. R.; PETTS, R. C.; ROLT, J. **Low Volume Rural Road surfacing and Pavements**, a guide to good practice, June 2013.

CULLITY, B. D.; STOCK, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**, 3 ed, Upper Saddle River: Prentice Hall, 678 p, 2011.

CUNHA, J, S, C. **Estudo de Compósitos Poliuretânicos Reforçados com Fibras de Malva**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Am, 2017.

DAUD, F, D, M; VIGNESH, K; SREEKANTAN, S; MOHAMED, A, R; KANG, M; KWAK, B. **Ca(OH)<sub>2</sub> nano-pods: investigation on the effect of solvent ratio on morphology and CO<sub>2</sub> adsorption capacity**. **Royal Society of Chemistry**. v. 6, p. 36031–36038, 2016.

DNER-ME 043/95. **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. 1995

DNIT 136/2010-ME. **Pavimentação asfáltica: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. 2010.

DU, Y. J., ZHANG, Y. Y., AND LIU, S. Y. “Investigation of strength and California bearing ratio properties of natural soils treated by calcium carbide residue.” **Geo-Frontiers-2011, ASCE, Reston, VA**, 2011.

GOBBO, L. A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios X e quantificação por refinamento de Rietveld**. (Dissertação de Mestrado)-Universidade de São Paulo, São Paulo. 157p, 2003.

GRANICH, A. R. **Análise do desempenho de misturas asfálticas com adição de cal: Um estudo de caso**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – UNIJUÍ – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2010.

GUO, X; SUN, M; DAI, W; CHEN, S. “Performance Characteristics of Silane Silica Modified Asphalt”. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2016.

HAMED, F. K. M. **Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete**, Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2010.

HORPIBULSUK, S., PHETCHUAY, C., CHINKULKIJNIWAT, A., CHOLAPHATSORN, A. “Strength development in silty clay stabilized with calcium carbide residue and fly ash.” **Soils Found.**, 53(4), 477–486, 2013.

IONASHIRO, M. G. **Fundamentos da Termogravimetria Análise Térmica Diferencial Calorimetria Exploratória Diferencial**. Giz Editorial, p. 10–45, 2004.

JIANG, N. J., DU, Y. J., LIU, S. Y., WEI, M., HORPIBULSUK, S., ARULRAJAH, A. “Multi-scale laboratory evaluation of the physical, mechanical and microstructural properties of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue.” **Can. Geotech. J.**, 53(3), 373–383, 2016.

JOEL, M., & EDEH, J. E. Soil modification and stabilization potential of calcium carbide waste. **Adv. Mater. Res.**, 824, 29–36, 2013

LITTLE, D; E, Epps, J, A. Epps. **The benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt**. Report for National Lime Association, 2006, 80p. Journal. 21p, 2014.

LIU, X; NIU, D; LI, X; LV, Y. Effects of  $\text{Ca}(\text{OH})_2 - \text{CaCO}_3$  concentration distribution on the pH and pore structure in natural carbonated cover concrete: A case study. **Construction and Building Materials**. v. 186, p. 1276–1285, 2018.

LUCAS, E. F. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica**. [s.l.] E-papers, 2001.

MARKET RESEARCH STORE. “Acetylene gas market for chemical production, welding & cutting and other applications: Global industry perspective, comprehensive analysis and forecast, 2014–2020.” **Market Research Store Rep.**, Deerfield Beach, FL, 110, 2015.

MARTINS, R. O. G.; ALVARENGA, R. de C. S. S.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, A. F. de; MENDES, B. C. AZEVEDO, A. R. G. **Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test**. **Construction and Building Materials**. v. 159, p. 261-268, 2018.

MARTINS, R. O. G.; ALVARENGA, R. DE C. S. S.; PEDROTI, L. G.; OLIVEIRA, A. F. DE; MENDES, B. C. AZEVEDO, A. R. G. **Assessment of the durability of grout submitted to accelerated carbonation test**. **Construction and Building Materials**. v. 159, p. 261- 268, 2018.

MASHAAN, N. S; HASSAN, A; KARIM, M. R.; ABDELAZIZ, M. A Review on Using Crumb Rubber in Reinforcement of Asphalt Pavement. **The Scientific World Journal**. v. 2014, p. 21, 2014.

MELQUÍADES, M, O. **Caracterização estrutural, térmica e óptica da solução Sólida  $\text{Sn}_{34}$ ,  $\text{Se}_{33}$ ,  $\text{S}_{33}$  via síntese mecânica**. Dissertação (Mestrado em ciência e engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

MIRGHIASI, Z; BAKHTIARI, F; DAREZERESHKI, E; ESMAEILZADEH, E. Preparation and characterization of CaO nanoparticles from  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  by direct thermal decomposition method. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 20, p. 113–117, 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). **Recommended mixture based on dissipate energy concept**. Washington, D.C, p. 285, 2001.

NÚÑEZ, W. P. **Notas de Aula de Estabilização de Solos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

PHETCHUAY, C., HORPIBULSUK, S., SUKSIRIPATTANAPONG, C., DISFANI, M. M. “Calcium carbide residue: Alkaline activator for clay-fly ash geopolymer.” **Constr. Build. Mater.**, 69(Oct), 285–294, 2014.

PIERSON, H. O. **Handbook of Carbon, Graphite, Diamonds and Fullerenes - Processing, Properties and Applications**. Noyes Publications, 1994.

RAMASAMY, P., PERIATHAMBY, A., IBRAHIM, S. “Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration.” **Waste Manage. Res.**, 20(6), 536–540, 2002.

SALDANHA, R. BECK; FILHO, C. S; MALLMANN, J, H, E, C; CONSOLI, N, C & ASCE, K, R, R,F. Physical–Mineralogical–Chemical Characterization of Carbide Lime: An Environment-Friendly Chemical Additive for Soil Stabilization. **Journal. Mater. Civ. Eng.**, 30(6): 06018004, 2018.

SAID, J. M., & TAIB, S. N. L. Peat stabilization with carbide lime. UNIMAS E: **J. Civ. Eng.**, 7(1), 1–6, 2009.

RAMASAMY, P., PERIATHAMBY, A., IBRAHIM, S. Carbide sludge management in acetylene producing plants by using vacuum filtration.” **Waste Manage. Res.**, 20(6), 536–540, 2002.

SAUSEN, L, M. **Desempenho mecânico de misturas asfálticas convencionais com adição de cal de carbureto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil). UNIJUI - Universidade regional do Noroeste do Estado do Rio Grande Do Sul, 2019.

SCRIVENER, K.; SNELLINGS R.; LOTHENBACH B. A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials. **London, Chapter 5**, 2016.

SILVA, A, L. **Caracterização mineralógica por difração de raios x e determinação de terras raras por icp-ms de rochas da região sul da Bahia**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

SKOOG, T, A; DOUGLAS A.; HOLLER, F. JAMES; NIEMAN, **Princípios de Análise Instrumental**, 6a edition. Porto Alegre -Brazil: Bookman, 2010.

SONG, Y; et al., “**Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials**,” Powder Diffr., vol. 940, no. 1997, pp. 669–678, 2009.

SOUZA, S. M. **Estudo dos efeitos de altas pressões na liga nanoestruturada Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> produzida por mecano - síntese**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

THOMÉ, A. **Comportamento de fundações superficiais apoiadas em aterros estabilizados com resíduos industriais**. 1999. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

TOLEDO, J, M, S. **Avaliação físico-química da utilização de areias descartadas de fundição na fabricação de pavimento intertravado de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, 2017.

VICHAN, S., RACHAN, R. “Chemical stabilization of soft Bangkok clay using blend of calcium carbide residue and biomass ash.” **Soils Found**, 53(2), 272–281, 2013.

WANG, J. W. H.; HANDY, R. L. **Evaluation of carbide waste lime for soil stabilization. Engineering Experiment Station**. Iowa State University. Ames, United States, 1966.

[www.carboxigases.com.br](http://www.carboxigases.com.br). Acessado em 09/05/2018.

[www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br). Acessado em 10/08/2018.

[www.shimadzu.com.br](http://www.shimadzu.com.br). Acessado em 30/05/2018.