

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

KIDNER ANGELINO PRÓSPERO

**USO DE LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO GERADA NO PROCESSO KRAFT
COMO MATERIAL DE ENCHIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE**

São Leopoldo

2022

KIDNER ANGELINO PRÓSPERO

**USO DE LAMA DE CARBONATO DE CÁLCIO GERADA NO PROCESSO KRAFT
COMO MATERIAL DE ENCHIMENTO EM CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A
QUENTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientadora: Profa. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo

São Leopoldo

2022

P966u Próspero, Kidner Angelino.

Uso de lama de carbonato de cálcio gerada no processo kraft como material de enchimento em concreto asfáltico usinado à quente./

Kidner Angelino Próspero. São Leopoldo - RS, 2022.

99 f. il.

Orientadora: Prof. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo.

Dissertação (mestrado), Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo - RS, 2022.

1.Construção Civil - Concreto. 2. Concreto asfáltico – Processo Kraft do Vale do Rio dos Sinos. 3. Carbonato de cálcio. II. Título 4. Papel e celulose. I. Universidade do Vale do Rio Sinos. II. Título.

CDD: 691

RESUMO

As massas asfálticas usinadas a quente são produtos amplamente utilizados nas camadas de revestimento nos pavimentos rodoviários. A utilização de resíduos sólidos na composição dessas massas tem o potencial de proporcionar ganho tanto econômico quanto ambiental não só para o setor no qual são gerados, como também, em setores como o da construção civil, principalmente, quando esses resíduos industriais são basicamente constituídos de material inorgânico. O objetivo geral desse trabalho foi avaliar a viabilidade técnica da utilização de lama de carbonato de cálcio gerada no processo KRAFT como material de enchimento na produção de mistura asfáltica betuminosa usinada a quente. Na metodologia utilizada, baseada nas respectivas normas em vigor, determinou-se o traço de referência da mistura asfáltica com base na dosagem Marshall, aferindo-se o teor de cimento asfáltico de petróleo (CAP) e também, o percentual de resíduo (lama de carbonato de cálcio) que melhor se ajustaria ao traço. Foram testadas misturas com 2%, 3% e 4% de lama de carbonato de cálcio. Para os parâmetros de estabilidade e fluência os resultados não apresentaram diferença estatística significativa, apesar de aumentarem até certa quantidade de LCC inserido na mistura. Já para o percentual de vazios e relação betume-vazios os valores apresentaram melhora estatisticamente comprovada, inclusive verificada ainda pela análise das imagens por lupa, onde na mistura com 4% apareceu indícios de exsudação do CAP, indicando assim a possibilidade de diminuição do percentual de CAP na sua composição, demonstrando, dessa forma, potencial para o seu uso como material de enchimento em misturas asfálticas usinadas a quente.

Palavras-chave: Concreto Betuminoso Usinado a Quente. Processo *Kraft*. Lama de Carbonato de Cálcio. Papel e Celulose.

ABSTRACT

The use of solid waste in hot-machined asphalt concrete has the potential to provide an economic gain not only for the sector in which they are generated, but also in sectors such as civil construction, especially when these industrial wastes have basically constituted of inorganic material. The general objective of this work was to evaluate the technical feasibility of using calcium carbonate slurry, generated in the KRAFT process, as a filling material, in the production of hot-machined bituminous asphalt mixture. In the methodology used, based on the respective regulations in force, the reference trace of the asphalt mixture was determined based on the Marshall dosage, measuring the optimal content of petroleum asphalt cement (PAC) and also the percentage of residue (sludge of calcium carbonate) that would best fit the trace. Mixtures with 2%, 3% and 4% calcium carbonate slurry were tested. For the stability and creep parameters, the results did not show a statistically significant difference, despite increasing up to a certain amount of LCC inserted in the mixture. As for the percentage of voids and bitumen-voids ratio, the values showed a statistically proven improvement, even verified by the analysis of the images using a magnifying glass, where in the mixture with 4% there were signs of exudation from the CAP, thus indicating the possibility of decreasing the percentage of voids. CAP in its composition, thus demonstrating its potential for use as a filler in hot-machined asphalt mixtures.

Keywords: Hot Machined Bituminous Concrete. Kraft Process. Calcium Carbonate Slurry. Paper And Cellulose.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Constituintes do asfalto: asfaltenos e maltenos (saturados, aromáticos, resinas)	20
Figura 2 – Problemas de desempenho do CAP: condições de tráfego e erro de projeto. (a) deformação permanente; (b) desagregação devido a baixa adesão entre o CAP e agregados; (c) trincamento por fadiga; e (d) trincamento térmico.	22
Figura 3 – Problemas de desempenho do CAP: ação da água.....	23
Figura 4 - Produção brasileira e principais produtores de celulose	32
Figura 5 - Processo <i>Kraft</i> de produção de celulose.....	33
Figura 6 - Fluxograma 1A. Produção de Celulose e melt.....	35
Figura 7 - Fluxograma 1B. Recuperação Química e Geração dos Resíduos Estudados	36
Figura 8 - Lama de carbonato de cálcio	43
Figura 9 - Agregados.....	44
Figura 10 - Peneiras e agitador para peneiramento	47
Figura 11 - Curva granulométrica dos agregados (massa passante).....	51
Figura 12 - Curva granulométrica da mistura sem lama de carbonato de cálcio.....	53
Figura 13 - Curva granulométrica para traço com 2% de lama de carbonato de cálcio	54
Figura 14 - Curva granulométrica para traço com 3% de lama de carbonato de cálcio	55
Figura 15 - Curva granulométrica para traço com 4% de lama de carbonato de cálcio	55
Figura 16 - Curva de regressão para Estabilidade do CBUQ sem utilizar o resíduo e variando o teor de CAP	57
Figura 17 - Curva de regressão para Fluência CBUQ sem utilizar o resíduo e variando o teor de CAP.....	57
Figura 18 - Indicação Visual do ponto de intersecção entre percentual de CAP escolhido e os correspondentes valores para as variáveis Estabilidade e Fluência .	58
Figura 19 – Corpos de prova confeccionado com e sem LCC utilizados no experimento	62
Figura 20- Corpo de prova inserido em anel para rompimento Marshall.....	64

Figura 21 – Gráfico de barras para valores médios e desvio-padrão da variável Estabilidade para cada percentual de LCC	70
Figura 22 – Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável Estabilidade	70
Figura 23 – Resultado do Software SISVAR para o teste de ANAVA na variável Estabilidade.....	72
Figura 24 – Gráfico de barras para valores médios e desvio-padrão da variável Fluência para cada percentual de LCC	74
Figura 25 – Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável fluência	75
Figura 26 – Resultado teste ANAVA para variável Fluência	76
Figura 27 – Gráfico de barras para valores médios da variável Percentual de vazios para cada percentual de LCC.....	78
Figura 28 - Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável percentual de vazios	80
Figura 29 – Resultado teste ANAVA para variável Percentual de vazios.....	81
Figura 30 – Gráfico de barras para valores médios da variável Relação Betume-vazios para cada percentual de LCC.....	84
Figura 31 – Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável relação betume-vazios	84
Figura 32 – Resultado teste ANAVA para variável Relação Betume-vazios	85
Figura 33 – Imagem por lupa da massa asfáltica Referência, sem adição de resíduo (Aumento de 3x).....	86
Figura 34 – Imagem por lupa da massa asfáltica com 2% de resíduo (Aumento de 3x)	87
Figura 35 – Imagem por lupa da massa asfáltica com 3% de resíduo (Aumento de 3x)	87
Figura 36 – Imagem por lupa da massa asfáltica com 4% de resíduo (Aumento de 3x)	87
Figura 37 – Imagens por lupa de amostras de um corpo de prova para cada percentual de LCC (Aumento de 3x).....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Ensaio realizados e respectivos materiais a serem estudados	45
Quadro 2 - Resumo dos traços de agregados do CBUQ	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Percentual de massa passante em peneira de malha.....	30
Tabela 2 – Produção de Celulose, Dregs, Grits e Lama de Cal no Brasil – 1970 a 2011	37
Tabela 3 – Limites para granulometria e percentuais do ligante asfáltico para cada faixa do pavimento asfáltico	51
Tabela 4 – Percentual de massa passante em cada peneira.....	52
Tabela 5 - Dosagem para o traço da mistura sem lama de carbonato de cálcio.....	52
Tabela 6 - Dosagem para traço com 2% de lama de carbonato de cálcio	53
Tabela 7 - Dosagem para traço com 3% de lama de carbonato de cálcio	54
Tabela 8 - Dosagem para traço com 4% de lama de carbonato de cálcio	55
Tabela 9 - Resultados do ensaio Marshall utilizados para determinação do teor de CAP	57
Tabela 10 - Massa dos materiais componentes de cada traço de CBUQ utilizado nos ensaios.....	58
Tabela 11 – Ensaio Marshall – Valores limites.....	60
Tabela 12 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço referência.....	61
Tabela 13 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço com 2% de LCC	61
Tabela 14 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço com 3% de LCC	62
Tabela 15 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço com 4% de LCC	62
Tabela 16 – Diâmetros e alturas dos corpos de provas de CBUQ.....	63
Tabela 17 – Volume e massa dos corpos de provas de CBUQ	63
Tabela 18 – Cálculo do ponto de máximo e do ponto máximo para a variável Estabilidade.....	66
Tabela 19 – Cálculo do ponto de mínimo e do ponto mínimo para a variável Fluência	66
Tabela 20– Cálculo do ponto de máximo e do ponto máximo para a variável Percentual de vazios	67

Tabela 21 – Cálculo do ponto de mínimo e do ponto mínimo para a variável Relação Betume-vazios.....	67
Tabela 22 – Valores das estatísticas descritivas para variável Estabilidade (em Kgf) obtidos no teste MARSHALL.....	68
Tabela 23 – Valores médios para variável Estabilidade.....	69
Tabela 24 – Valores das estatísticas descritivas para variável Fluência (em mm) obtidos no teste MARSHALL.....	73
Tabela 25 – Valores médios para variável Fluência.....	74
Tabela 26 – Valores das estatísticas descritivas para variável Percentual de vazios (%) obtidos no teste MARSHALL.....	77
Tabela 27 – Valores médios para variável Percentual de vazios.....	78
Tabela 28 – Valores descritivos para variável Relação Betume-vazios (%).....	82
Tabela 29 – Valores médios para variável Relação betume-vazios.....	83

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AN	Asfalto Natural
ANAVA	Análise de Variância
AP	Asfalto de Petróleo
BRACELPA	Associação Brasileira de Celulose e Papel
ADPt	Air Dried Pulp ton
C	Carbono
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAUQ	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
CBR	California Bearing Ratio
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à Quente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EUA	Estados Unidos da América
H	Hidrogênio
IBÁ	Industria Brasileira de Árvore
LCC	Lama de Carbonato de Cálcio
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
RBV	Relação entre Betume e Vazios
SAMI	Stress Absorbing Membrane Interlayer
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos
VAM	Vazios do Agregado Mineral

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 TEMA	14
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	14
1.3 PROBLEMA	14
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1 Objetivo Geral	15
1.4.2 Objetivos Específicos	15
1.5 JUSTIFICATIVA	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE	17
2.1.1 Componentes	19
2.1.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	20
2.1.1.1.1 Tipos de CAP	24
2.1.1.2 Agregados	25
2.1.1.3 Fíler	25
2.1.2 As camadas do revestimento asfáltico	29
2.2 INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE	30
2.2.1 Processo KRAFT	34
2.2.2 Resíduo do processo de caustificação: lama de carbonato de cálcio	38
2.3 USO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE EM MISTURAS ASFÁLTICAS	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 MATERIAIS	43
3.1.1 Lama de carbonato de cálcio	43
3.1.2 Agregados	43
3.1.3 Ligante (Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP)	44
3.2 MÉTODO.....	44
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS, RESÍDUO E CAP	47
3.2.1.1 Granulometria.....	47
3.2.1.2 Massa específica.....	48
3.2.2 DOSAGEM MARSHALL	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.2.2.1 Construção das curvas granulométricas dos agregados.....	50

3.2.1.2 Cálculo do teor de CAP	56
3.2.1.3 Confeção dos corpos de prova	58
3.2.3 Caracterização das misturas	60
3.2.3.1 Densidade teórica	60
3.2.3.2 Resistência Mecânica – Ensaio Marshall	62
3.2.3.3 Percentual de vazios na mistura	65
3.2.3.4 Relação betume vazios	65
3.2.3.5 Análise estatística dos dados	65
3.2.3.6 Avaliação visual de absorção de CAP pelo método da lupa	68
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1 ESTABILIDADE MARSHALL	68
4.2 FLUÊNCIA.....	73
4.3 PERCENTUAL DE VAZIOS NA MISTURA	77
4.5 ANÁLISE DAS IMAGENS POR LUPA	86
5 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS.....	90
APÊNDICES	95

1 INTRODUÇÃO

A sociedade e o poder público no Brasil estão cada vez mais demonstrando preocupação com o meio ambiente e com a deterioração crescente das estradas e rodovias, principais vias usadas para o transporte. Esse fato impulsiona os estudos da comunidade científica sobre o tratamento e disposição dos resíduos sólidos industriais e o melhoramento das propriedades das misturas asfálticas usadas nos pavimentos (IBÁ, 2019).

Nos últimos anos, as pesquisas sobre materiais que podem ser usados na pavimentação e sua utilização em misturas betuminosas têm sido mais frequentes no Brasil e no mundo. Esses estudos abarcam a eficácia da substituição de agregados minerais por agregados provenientes de resíduos sólidos como uma alternativa viável para a minimização do impacto ambiental causado pela eliminação de entulho em locais inadequados e para dar-lhes uma destinação útil e sustentável (IBÁ, 2019).

A indústria de celulose e papel é um dos maiores produtores de resíduos sólidos oriundos do processo de produção de sua matéria-prima obtida pelo processo chamado Kraft, que gera dregs, lama de carbonato de cálcio, grits, cinzas e lamas primária e secundária da estação de tratamento de efluentes. Nesse cenário, o desenvolvimento de misturas asfálticas utilizando agregados oriundos desses resíduos sólidos industriais é de grande interesse tanto para o setor empresarial, como para a sociedade (FOELKEL, 2013).

O uso desses resíduos sólidos como material de enchimento para produzir concreto asfáltico usinado a quente tem o potencial de proporcionar um ganho ambientalmente interessante devido à diminuição da disposição desses resíduos em aterros e à preservação dos recursos naturais usados como matéria prima na produção de pavimentos rodoviários, e ainda um ganho econômico para a indústria da pavimentação asfáltica com a diminuição de uso do CAP nas misturas e a possibilidade de substituição de material natural por um resíduo que, em tese é mais barato. Ainda para a indústria da celulose, oferecendo alternativa mais barata para disposição dos seus resíduos.

O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), possui composição semelhante ao concreto convencional (com agregados e aglomerantes), mas sua mistura é feita com cimento asfáltico de petróleo (CAP) (GOMES, SILVA; 2017).

Assim, é possível pensar na aplicação de agregado inorgânico para a composição do concreto asfáltico.

Tendo em conta a relevância do tema, o objetivo geral dessa pesquisa foi avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduo inorgânico, nomeadamente, lama de carbonato de cálcio, gerada no processo *Kraft*, na produção de mistura asfáltica betuminosa usinada a quente.

1.1 TEMA

A temática dessa pesquisa está relacionada à análise da viabilidade técnica da utilização de mistura asfáltica betuminosa usinada a quente, em particular, tendo como um dos seus componentes a lama de carbonato de cálcio, gerada no processo *Kraft* de produção de papel e celulose.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

A pesquisa foi realizada em escala laboratorial, na qual foi avaliada a viabilidade técnica da utilização de resíduo inorgânico Lama de Carbonato de Cálcio proveniente do processo *Kraft*, na produção de misturas asfálticas usinadas a quente.

1.3 PROBLEMA

Com o desenvolvimento dos processos produtivos industriais veio também a geração cada vez maior de resíduos com grande potencial de degradação ambiental. Paralelo a isto a ciência tem se debruçado em processos que possam utilizar tais resíduos na confecção de coprodutos, mantendo suas características iniciais, porém absorvendo a maior quantidade possível desses resíduos.

O processo de produção de papel e celulose é um dos que geram grande quantidade de resíduos, o que é um problema, principalmente em países com extensão geográfica pequena.

A construção de novas rodovias asfaltadas cada vez mais é uma necessidade, além da recuperação das existentes que, no Brasil tem revestimentos

que duram muito pouco tempo, muitas vezes por mau dimensionamento dos traços da massa asfáltica utilizada.

A utilização de uma quantidade adequada de material de enchimento contribui ainda para a diminuição de ligante (CAP) nas misturas asfálticas, o que pode levar a diminuição do valor gasto na produção, visto que o CAP é um material de caro.

Dessa forma, utilizar esses resíduos na confecção de misturas asfálticas é uma forma de contribuir para a disposição adequada de resíduos, bem como melhorar o consumo de CAP nas misturas e, e última análise, incentivar o uso de massas asfálticas em pavimentação rodoviária.

Diante do exposto, pôde-se formular o seguinte problema de pesquisa: é tecnicamente viável a utilização da lama de carbonato de cálcio, gerada pela indústria de papel e celulose como material de enchimento na composição de misturas asfálticas usinadas a quente para melhorar suas características mecânicas?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduo inorgânico, lama de carbonato de cálcio, gerado no processo Kraft, na produção de mistura asfáltica betuminosa usinada a quente.

1.4.2 Objetivos Específicos

I. Avaliar as características físicas dos agregados e do resíduo sólido e compará-las às especificidades do agregado a ser substituído;

II. Determinar a formulação com o teor adequado de CAP, com base na análise dos parâmetros de estabilidade e fluência do CBUQ produzido sem resíduo;

III. Avaliar a influência do resíduo nas propriedades físicas e mecânicas do CBUQ produzido com a substituição do material convencional.

1. 5 JUSTIFICATIVA

Esse trabalho justifica-se pela necessidade de valorização de resíduos sólidos da indústria de papel e celulose e produção de um concreto asfáltico usinado a quente mais sustentável, a partir do uso da lama de carbonato de cálcio como material de enchimento. A produção desse tipo de concreto é benéfica para o meio ambiente, uma vez que dá destinação final adequada para os resíduos sólidos da indústria de papel e celulose que outrora poderiam ser armazenados de forma a prejudicar o meio ambiente.

Do ponto de vista econômico, a utilização da Lama de Carbonato de cálcio como material de enchimento em massas asfálticas pode contribuir tanto para a indústria da construção civil, com produto mais barato, devido a substituição de um fíler mineral, por um material que outrora seria disposto em aterros, e uma possível diminuição do consumo de CAP nas misturas. Quanto para indústria de produção do papel e celulose, oferecendo uma alternativa viável para destinação dos seus resíduos.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa tem ainda o potencial de contribuir para a ciência, uma vez que ajuda a consolidar técnicas de verificação de desenvolvimento de novos coprodutos na área da engenharia civil rodoviária.

A contribuição tecnológica se dá devido a possibilidade de desenvolver um concreto asfáltico com melhores características mecânicas, como estabilidade, fluência, além de uma melhor relação betume vazios e percentual de vazios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO ASFÁLTICO USINADO A QUENTE

O concreto asfáltico usinado a quente ou concreto betuminoso usinado a quente (CAUQ OU CBUQ) é um tipo de revestimento bastante usado nos últimos tempos nas rodovias e nas vias urbanas do Brasil. Esse tipo de concreto, bem como todos os tipos de revestimentos possuem a função de receber as cargas dos veículos e distribuírem para as camadas inferiores. O CAUQ é a mistura asfáltica mais comum usada no país na construção do revestimento do pavimento, no que se inclui as capas de rolamento e a camada de ligação (GOMES; SILVA, 2017).

O CAUQ é um revestimento flexível com propriedade e qualidade como a estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade, a trabalhabilidade a diversas temperaturas e o preço vantajoso, assim, sua escolha decorre dos serviços e dos equipamentos da obra em questão. Dentre os revestimentos flexíveis, ele é o que possui qualidade mais elevada. Constitui-se da mistura de agregado e betume acertadamente equilibrado, satisfeitas as rigorosas especificações dessa produção. Esse revestimento é feito em usinas sob rigorosos controles de granulometria, teor de betume, transporte, aplicação e compressão. O concreto betuminoso, quando o seu ligante é o asfalto, tem sido preferido em vias expressas (BRANCO *et al.*, 2016).

O revestimento de concreto betuminoso, trata-se de um conjunto estável de densidade máxima e compõe-se numa mistura de pedra britada, areia e cimento asfáltico de petróleo (CAP). Essa mistura de agregados e do produto betuminoso é feita nas usinas fixas onde é submetida a aquecimento. O material que resulta dessa combinação é carregado quente em caminhões que o transportam para a obra. Há que se ter atenção para que a mistura não esfrie no decurso do transporte, porque o espalhamento e a compactação precisam ser feitos a quente (PINTO; PINTO, 2015).

Na mistura betuminosa, a granulometria do agregado é classificada em três frações. A primeira, agregado graúdo, é constituída geralmente de pedra britada ou seixo rolado com, no mínimo, uma face britada. A segunda, agregado miúdo, pode ser feita por areia, pó de pedra ou pela mistura de ambos. A terceira, o fíler, pode

ser composto de cimento, pó de pedra, pó de calcário e similares (BRANCO *et al.*, 2016).

Na aplicação do concreto asfáltico deve-se espalhar a mistura com a base já conformada na seção transversal desejada e com a espessura do projeto e as condições de drenagem ideais, para a execução usa-se máquinas apropriadas que distribuam a mistura na espessura pretendida. Essas máquinas compactam, nivelam e unem simultaneamente a mistura, além disso, medem de maneira automática a quantidade de material compactado produzindo uma superfície bem-acabada no nivelamento. Essa superfície é conservada após a compactação e ação do tráfego (PINTO; PINTO, 2015).

O material betuminoso deve ser distribuído apenas quando a camada de agregado estiver totalmente seca em toda a sua profundidade e quando a temperatura ambiente for maior que 10°C. (GOMES; SILVA, 2017).

De acordo com a legislação, a usina utilizada para esse tipo de revestimento deve possuir algumas características, dentre as principais está a capacidade de produzir misturas uniformes; deve ser equipada com unidade classificadora de agregados a qual distribui o material para os silos quentes e possuir um sistema de controle de temperatura com termômetro de mercúrio, termômetro com proteção metálica e graduação de 90°C a 210°C (BRASIL, 2005).

A temperatura mínima, dependendo da distância da usina à obra, não poderá ser inferior a 135°C. A mistura não poderá ser espalhada à temperatura inferior a 120°C. A mistura deverá ser efetuada em usina, nas quantidades e temperatura especificadas, até que todas as partículas do agregado estejam envolvidas pelo aglutinante betuminoso, tempo esse que será, no mínimo, de 30 segundos (GOMES; SILVA, 2017).

A utilização de usinas fixas permite a obtenção de um produto de melhor qualidade e mais uniforme. A mistura de diversos materiais exige um número de silos de entrada em função do número desses materiais. As janelas desses silos são devidamente calibradas para fornecer os materiais nas proporções previstas no projeto da mistura (DER/PR, 2005).

A execução das misturas na usina tem sido feita comumente com o uso de pedra britada para atender às condições impostas pelas especificações, no que tange à granulometria, na parte relativa ao agregado graúdo. Nesse caso, a base estabilizada pode receber a denominação de solo brita. A mistura é descarregada e

levada à pista em caminhões basculantes onde é despejada nos distribuidores, e daí para a pista, sendo em seguida compactada (GOMES; SILVA, 2017).

2.1.1 Componentes

O concreto asfáltico (CA) ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é uma mistura densa tradicional usada no Brasil. É resultado da mistura de agregados graúdos e miúdos, de material fino para enchimento (fíler) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP) que formam o mastique asfáltico. O fíler preenche os vazios dessa mistura e aumenta a viscosidade do material. O CAUQ denso possui de 2 a 4% de vazios e requer um rigoroso controle tecnológico. Os vazios da mistura evitam as trincas precoces devidas ocasionadas pela variação térmica diária ou deformações por fluência (PRIETO, 2016).

O controle tecnológico é rígido, no caso, a granulometria, teor de betume, estabilidade, vazios, temperatura e equipamentos precisam estar padronizados. O CA pode ser convencional, com CAP e agregados, ter o ligante asfáltico modificado por polímero, asfalto-borracha ou misturas de módulo elevado (PINTO; PINTO, 2015).

A camada asfáltica pode ser dividida em duas: a superficial (camada de rolamento) e a inferior (camada de ligação). No processo de fabricação do CBUQ os agregados entram em temperatura superior ao CAP para que ocorra o total envolvimento do ligante ao agregado. A mistura asfáltica possui temperatura de aplicação entre 107° C e 177° C, para assegurar o procedimento em uma pessoa responsável deve ficar atenta, pois caso a mistura alcance temperatura maior do que 177°C ocorre a oxidação antecipada do material (BRASIL, 2006).

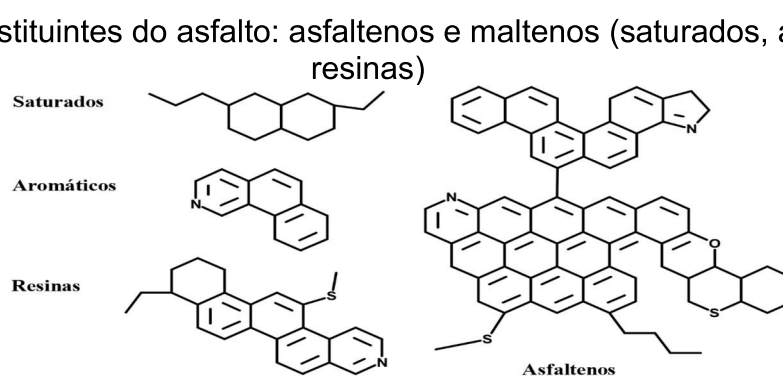
As misturas possuem vários tipos de acordo com a função e a aplicação a que se destinam, para isso varia-se o padrão granulométrico e as características mecânicas exigidas, dentre os padrões granulométricos são destacados a graduação densa (proporciona um esqueleto mineral com poucos vazios); a graduação aberta (a mistura asfáltica se torna drenante, pois permitirá a percolação de água em seu interior); a graduação descontínua (proporciona um esqueleto mineral com maior contato entre agregados graúdos) (PRIETO, 2016).

2.1.1.1 Cimento asfáltico de petróleo (CAP)

O asfalto tem referência de utilização desde o início da civilização, apesar de seu uso em construções desde a antiguidade, o uso em rodovias é mais recente, datado do século XIX. Nos Estados Unidos, o primeiro pavimento asfáltico foi construído em *New York*, em 1875. No Brasil, aproximadamente 95% das estradas pavimentadas possuem revestimento asfáltico, muito usado na pavimentação das cidades. As primeiras pavimentações asfálticas brasileiras foram feitas nas ruas do Rio de Janeiro, em 1908, nas quais empregaram asfalto natural em barris, importado de Trinidad (ROBERTS *et al.*, 2002).

O Cimento asfáltico de petróleo (CAP) é produzido a partir de uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo, que podem ser de origem natural, por causa da volatilização das substâncias de menor massa molar (asfalto natural - AN), ou de origem sintética, alcançado por destilação a vácuo do petróleo (asfalto de petróleo - AP). O principal componente do CAP é o betume, mas contém heteroátomos de oxigênio, enxofre, nitrogênio, traços de metais vanádio e níquel em anel porfirínico dos asfaltenos (GASTHAUER *et al.*, 2008).

A classificação do CAP está de acordo com sua solubilidade em asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos são compostos por uma fração insolúvel em n-heptano e solúvel em tolueno. Os maltenos são solúveis em n-heptano ou éter e possuem compostos saturados, aromáticos e resinas. A relação entre a composição de asfaltenos, maltenos e outros constituintes geram um efeito representativo nas propriedades viscoelásticas do CAP e, assim, no desempenho das misturas betuminosas que pavimentam as estradas (PIZZORNO, 2010). As estruturas que representam os compostos do CAP podem ser vistas na Figura 1, abaixo:



Fonte: GASTHAUER *et al.*, 2008

Uma estratégia não destrutiva para separar e quantificar os componentes do CAP é precipitar os asfaltenos com alcanos leves como pentano, n-hexano ou n-heptano. Os componentes da fração maltênica são, por conseguinte, separados com sílica gel, em cromatografia líquida, para esse fim usam-se eluentes com distintas polaridades (KLEIN, 2006).

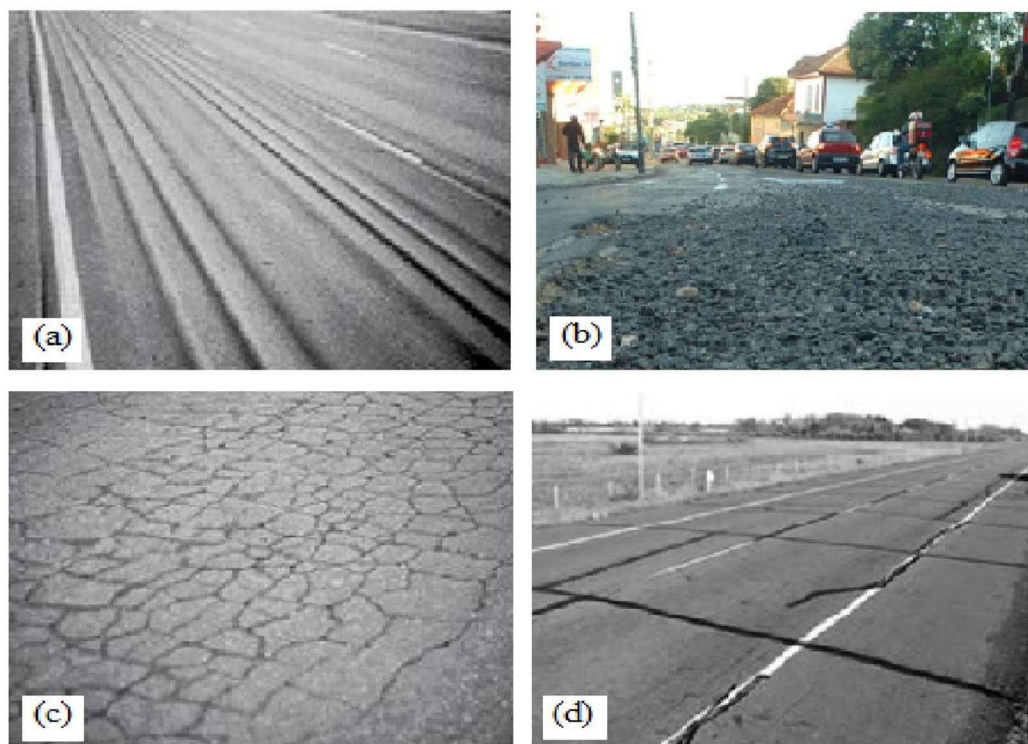
Pfeiffer (1940) realizou um estudo sobre o CAP e explicou que sua estrutura sofre mudanças físicas devidas às mudanças químicas ocorridas com o processo de oxidação ou envelhecimento que ocorrem durante o tempo de vida útil do pavimento. Esse envelhecimento pode ser simulado em laboratório, em estufa RTFOT e PAV.

Araújo *et al.* (2016) explicou que a oxidação do CAP causa aumento da consistência e pode reduzir substancialmente o tempo de vida do pavimento, particularmente em pesadas condições de tráfego. A umidade é outro fator que provoca o envelhecimento, a qual se manifesta por perda de coesão e de adesão entre o ligante e a superfície dos agregados. Essas considerações fundamentam a importância de compreender os mecanismos que governam o envelhecimento do CAP para se garantir o aumento da vida útil dos pavimentos. Lixing *et al.* (2011) corroborou esse estudo ao afirmar que o envelhecimento do revestimento é o principal fator de deterioração do pavimento asfáltico e das perdas nas propriedades físicas e mecânicas do ligante asfáltico.

O asfalto é uma mistura do cimento asfáltico do petróleo (CAP) com agregados minerais feita em usina adequada. Os agregados minerais usados são graúdos: a pedra, a escória ou o cascalho rolado, os britados nas granulometrias próprias; miúdos: a areia e/ou o pó de pedra, de granulometria adequada; material de enchimento: o fíler, o material mineral, pulverizado bem fino. O CAP é fundamental ao pavimento, pois faz a união dos agregados conferindo-lhes boas propriedades mecânicas (GRANDE *et al.*, 2009).

O tipo de CAP do pavimento deve suportar as condições do tráfego e do clima, assim, sua aplicação nas vias deve considerar suas propriedades, caso contrário, podem ocorrer problemas em campo, como os apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Problemas de desempenho do CAP: condições de tráfego e erro de projeto. (a) deformação permanente; (b) desagregação devido a baixa adesão entre o CAP e agregados; (c) trincamento por fadiga; e (d) trincamento térmico.



Fonte: FERNANDES, 2011

Na figura 2 (a) percebe-se uma deformação permanente ocasionada pela baixa rigidez e elasticidade do CAP. Na figura 2 (b) constata-se uma desagregação que ocorre por causa da baixa adesão entre CAP e agregado. Na figura 2 (c) tem-se o trincamento por fadiga gerado por carregamento excessivo. Na figura 2 (d) ocorreu o trincamento térmico, no qual a elasticidade foi baixa e o ligante foi submetido a baixas temperaturas. Assim, para que o CAP colocado em campo suporte condições externas (ação do homem e fatores climáticos) é preciso que possua propriedades adequadas. O desempenho do CAP pode ser melhorado por meio da ação de aditivos (FERNANDES, 2011).

Dos fatores externos que causam deformação o efeito deletério da água em pavimentos asfálticos é um dos principais, pois afeta rodovias em todo o mundo, no entanto, a deterioração da estrutura do pavimento consequente da ação da água não acontece de maneira isolada. Defeitos habituais, como a deformação permanente e o trincamento por fadiga agravam os problemas relacionados à presença da água na infraestrutura do pavimento (MEHRARA; KHODAI, 2013).

A seguir, a figura 3, mostra alguns defeitos nos pavimentos devidos à ação da água na estrutura do revestimento, dentre os quais estão as corrugações e o bombeamento de finos. Os afundamentos, panelas, deformação permanente e trincas não são iniciados pelo recaiamento da água, mas agravam-se em extensão e em severidade por causa dela e da umidade (ARAMBULA, 2007).

Figura 3 – Problemas de desempenho do CAP: ação da água



Fonte: RIBEIRO, 2011.

Para amenizar esses tipos de problemas, que podem ser observados na figura 3, distintos aditivos costumam ser inseridos no CAP para elevar o desempenho do ligante no pavimento. Concepa - Lapav (2007) apresentaram uma série de aditivos que podem ser usados no CAP para diminuir as temperaturas utilizadas para o aquecimento na construção do pavimento. O desempenho do CAP tem sido melhorado, também, pela adição de polímeros que aumentam as propriedades de elasticidade e rigidez. Polímeros são materiais viscoelásticos e dependentes do tempo e da temperatura, e suas propriedades são afetadas pela massa molar, estrutura química e distribuição da cristalinidade (CONCEPA - LAPAV, 2007).

Segundo Pizzorno (2010), a adição de polímeros possibilita elevação da coesão do CAP, redução da suscetibilidade térmica, redução da viscosidade à temperatura de mistura e de aplicação, além de melhoria da adesividade e redução do envelhecimento ou oxidação.

O CAP é um material viscoelástico a temperatura ambiente, possui pronunciadas propriedades de sólido elástico a baixas temperaturas e de líquido viscoso a altas temperaturas. As reações do CAP dependem do tempo do experimento e da temperatura a que é submetido. Se submetido a um elevado tempo de experimento a uma menor temperatura, produz o mesmo resultado de um experimento executado num curto período de tempo e a uma maior temperatura. Isso é designado de equivalência tempo-temperatura (MOREIRA, 2013).

2. 1. 1. 1.1 Tipos de CAP

O CAP é semissólido à temperatura ambiente e necessita de aquecimento para ter consistência apropriada ao envolvimento de agregados. Possui como característica a flexibilidade, a durabilidade, a aglutinação, a impermeabilidade e elevada resistência à ação da maioria dos ácidos, sais e álcalis (DNER, 1996).

Bernucci *et al.* (2010) explica que o CAP é semissólido a temperaturas baixas, viscoelásticos a temperatura ambiente e líquido a temperaturas altas. O CAP é o asfalto obtido especialmente para apresentar características adequadas ao uso na elaboração de revestimentos, podendo ser obtido pela destilação do petróleo em refinarias ou do asfalto natural encontrado em jazidas.

O CAP é o asfalto obtido a partir da refinação do petróleo com métodos específicos para ter qualidades necessárias ao uso em construções de pavimentos asfálticos. Para classificá-lo utiliza-se o índice de dureza determinado por meio do ensaio de penetração regularizado pela norma NBR 6576 (ABNT, 2007). O Instituto Brasileiro de Petróleo e o DNER especificam quatro tipos de CAP, em conformidade com seu potencial de penetração, são eles: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200 (BERNUCCI *et al.*, 2010).

A Resolução nº 19 de 2005, da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), sobre as novas especificações de CAP em todo o território nacional e em função da necessidade de atualização das especificações dos CAP's comercializados por diversas empresas e fabricantes, especificou que os cimentos asfálticos são classificados segundo a penetração e normalizados pela NBR 6576. Além disso, os produtores, importadores e distribuidores de CAP devem assegurar que a temperatura do produto não ultrapasse 177°C e não seja inferior a 40°C, durante o manuseio e o transporte e, o produto não apresente espuma quando aquecido até

177°C, durante o carregamento e o recebimento para a avaliação de contaminação pela presença de água (ANP, 2005; ABNT, 2007).

O CAP 50/70, utilizado nessa pesquisa, é recomendado para misturas usinadas a quente aplicadas em rodovias ou vilas urbanas de tráfego baixo a moderado. Ele possui baixa volatilidade, é solúvel em tricloroetileno e composto por asfaltenos, resinas e hidrocarbonetos de natureza predominantemente aromática (ANP, 2015).

2.1.1.2 Agregados

Conforme a ABNT NBR 9935 (2011), agregados são materiais granulares, na maior parte das vezes inertes, com dimensões adaptadas à preparação de argamassa ou concreto. Segundo dados do Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) (2019), os agregados atingem uma proporção de 90% e 95% dos materiais usados nas camadas asfálticas e 100% das camadas de base e sub-base. Esses dados ajudam a compreender a relevância dos materiais agregados nos pavimentos asfálticos.

Anitelli (2013) explica que as características dos agregados se distinguem no que se refere à mineralogia, à durabilidade, à sanidade, à absorção, à forma, à angularidade e à textura superficial, dentre outros atributos. Os conhecimentos das diferenças dos agregados são essenciais para a adequada escolha da mistura, pois uma característica afeta diretamente a ligação entre o asfalto e os demais constituintes da mistura a ser utilizada na pavimentação asfáltica.

Esse mesmo autor menciona que um agregado para ser considerado de boa qualidade precisa apresentar dureza e resistência, a fim de que garanta que as forças sobrepostas durante o tempo de execução do serviço do pavimento sejam absorvidas e distribuídas sem a ocorrência de alterações em suas características.

2.1.1.3 Fíler

O papel do fíler no comportamento de misturas asfálticas é o de preencher os vazios entre os agregados graúdos nas misturas e modificar as propriedades dos ligantes, pois age como parte ativa do mastique (ligante asfáltico, fíler e ar). Na fórmula, o mastique influencia a lubrificação das partículas de agregados maiores e

choca os vazios do agregado mineral, os atributos de compactação e o teor ótimo do ligante asfáltico (ANITELLI, 2013).

As particularidades do mastique interferem nas respostas mecânicas das misturas asfálticas e na sua trabalhabilidade. O processo de fadiga, devido ao crescimento de microfissuras no mastique, relaciona-se com as características do ligante asfáltico, com as propriedades do fíler e com a interação físico-química entre os dois. A firmeza do mastique induz as tensões desenvolvidas e interfere na resistência à fadiga quando submetido a temperaturas intermediárias, além disso, afeta a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica submetida a altas temperaturas, às tensões desenvolvidas e ao trincamento a baixas temperaturas (BARDINI *et al*, 2009).

O fíler é um material de enchimento mineral inerte em relação aos outros componentes da mistura asfáltica, finamente dividido, ao menos 65% é passa pela peneira de 0,075 mm de abertura de malha quadrada (DNER – EM 367/97). Santana (1995) define fíler como um material constituído de partículas minerais advindas dos agregados graúdos ou miúdos usados na mistura asfáltica; ou originário de outras fontes, como o pó calcário, a cal hidratada, o cimento Portland, dentre outros, que melhoraram o comportamento reológico, mecânico, térmico e de sensibilidade à água, quando seguidos os limites para granulometria e plasticidade.

O fíler é utilizado como material de enchimento dos vazios entre agregados graúdos e miúdos e contribui para o fechamento da mistura, já que modifica a trabalhabilidade, a resistência à água e a resistência ao envelhecimento do concreto asfáltico. Por causa do pequeno tamanho das partículas e das características de superfície, o fíler age como componente ativo manifestado nas propriedades da interface fíler e ligante asfáltico, logo, não é apenas um material inerte, como mostrado na definição geral do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER – EM 367/97) (BARDINI *et al.*, 2009).

Pode-se referir dois aspectos sobre a influência do fíler, o primeiro é que no mastique com fíler total todas as partículas do fíler ficam em suspensão no asfalto, ou seja, não se tocam, formando um mastique homogêneo. Segundo, no mastique com fíler ativo, parte do fíler se comporta como um agregado bastante fino com partículas se tocando, o que forma um esqueleto mineral; a outra parte fica em suspensão no ligante formando um mastique (MOTTA; LEITE, 2000).

A densificação e a rigidez de uma mistura asfáltica são influenciadas pela porcentagem de material passante na peneira de número 200 (0,075 mm de abertura), mas são influenciadas também pela forma, natureza e granulometria das partículas que estão abaixo desse diâmetro (MOTTA; LEITE, 2000). Se a maior parte do material de enchimento que passa nessa peneira é relativamente grossa, cumpre a função de preencher os vazios do esqueleto mineral, e então, diminui o índice de vazios, o que altera o teor ótimo de ligante asfáltico. Apesar disso, um fíler ultrafino de porcentagem significativa de material menor que 20 μm e com uma porção menor que 5 μm , tende a ser incorporado ao ligante asfáltico, formando uma película (mastique) que envolve as partículas de agregados miúdos e graúdos. Quando a porcentagem de material que passa na peneira aumenta, os vazios do esqueleto mineral diminuem, melhora-se a graduação e a trabalhabilidade da mistura asfáltica aumenta. Acima de certo nível, quanto maior a porcentagem passante na peneira, os finos passam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, pois diminuem os contatos entre as partículas grossas e alteram a capacidade de compactação (BARDINI *et al.*, 2009).

Dentre os aspectos físico-químicos da interação de fíler e ligante asfáltico, a intensidade de absorção é o mais importante fator que caracteriza o fíler. Mas, ele também pode ser caracterizado conforme o seu tipo: graduação, textura superficial, superfície específica, forma dos grãos, dentre outros; natureza: composição mineralógica e atividade físico-química que afetam a afinidade com o ligante asfáltico e concentração na mistura (BARDINI *et al.*, 2009).

Motta e Leite (2000) discutem que quando a quantidade de ligante aumenta mais do que o índice de vazios Rigden, as partículas perdem o contato entre si e a quantidade adicional de ligante favorece a lubrificação entre as partículas. Se a quantidade livre de ligante asfáltico diminuir, a rigidez da mistura aumenta. Na relação fíler e ligante, quanto mais fino o fíler, menor é a ligação entre eles, porque o volume livre de ligante provoca o aumento da espessura de recobrimento das partículas dos agregados, assim, a razão do volume de ligante livre pelo volume total de ligante possui efeito representativo na rigidez do mastique.

Para evitar os danos causados pelo excesso ou pela ausência de fíler estabeleceu-se como parte das especificações de dosagem de misturas asfálticas a razão em massa entre o fíler mineral e o ligante asfáltico, chamada de *dust proportion*, nesse caso, o que se recomenda são os valores de 0,6 a 1,8 para todo

tipo de mistura. Estabeleceu-se, também, valores de relação entre betume e vazios (RBV) em função do volume de tráfego, esses valores foram relativamente mais baixos do que os adotados no Brasil (BARDINI *et al.*, 2009).

O uso de fíler é importante para aumentar a uniformidade na consistência e na suscetibilidade térmica da mistura que podem surgir de eventuais irregularidades na produção de ligantes asfálticos e na confecção da massa asfáltica. O fíler preenche os vazios e aumenta a viscosidade, diminuindo a penetração do ligante asfáltico. No asfalto, o fíler ativa-o, espessando-o e encorpendo-o, e faz com que o mastique tenha maior viscosidade que o ligante asfáltico correspondente. Concomitantemente, ocorre o aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento da resistência aos esforços de cisalhamento (estabilidade) do módulo de rigidez e da resistência à tração na flexão. Quanto menor o tamanho da partícula de fíler, maior a incorporação do mineral no ligante, o que aumenta a rigidez da mistura (MOTTA; LEITE, 2000).

Dentre os fíleres calcário, cimento Portland e pó de pedra, o calcário apresentou, o menor tamanho de partícula e o cimento Portland o tamanho intermediário. Observou-se que os corpos de prova preparados com fíler calcário apresentaram módulos e valores de resistência à tração mais elevados do que os obtidos com os demais tipos de fíleres que tinham granulometria mais grossa. Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram o efeito da granulometria do fíler na rigidez da mistura betuminosa, já que quanto menor o tamanho de partícula do fíler, maior a incorporação do mineral no ligante, isso aumenta a rigidez da mistura (MOTTA; LEITE, 2000).

Soares e Cavalcante (2001) estudaram o fíler de areia de campo, pó de pedra, pó calcário, cal hidratada, carbonato de magnésio e cimento Portland e concluíram que o aumento do teor de fíler aumenta a resistência à tração, mas, em relação ao teor de ligante asfáltico de projeto, apenas ocorre mudança quando se modifica o teor de fíler, ou seja, quanto maior o teor de fíler, menor o teor de ligante.

Em outro estudo acerca da influência do uso do fíler originário da britagem de concreções lateríticas e da cal, percebeu-se que a origem da laterita e o tipo de fíler usado foram decisivos nas propriedades mecânicas das misturas. As amostras com fíler laterítico evidenciaram um comportamento superior ao das misturas com cal em relação a resistência à tração e à fadiga, apesar de o tipo de fíler não ter influência sobre a resistência à deformação permanente (BARDINI *et al.*, 2009).

2.1.2 As camadas do revestimento asfáltico

As misturas asfálticas usinadas a quente em usinas formam camadas que são resultados do preparo a quente. Constituem-se de misturas homogêneas em quantidades adequadas de agregados minerais graduados e material asfáltico, que são espalhadas e comprimidas a quente sobre a base imprimada ou sobre a camada de regularização com CBUQ (AGETOP, 2018).

O concreto asfáltico é utilizado para compor as camadas superiores da pavimentação, a diferença identificada na mistura a quente dos agregados encontra-se ligada aos valores dos diâmetros dos minerais e ao enchimento do material ligante nos tipos de CAUQ (VILA BETUME, 2021).

O CAUQ é comumente utilizado em camadas de revestimento. Primeiro, como revestimento asfáltico em uma só camada ou capa (essa mistura deverá demonstrar estabilidade e flexibilidade conciliáveis com o desempenho elástico da estrutura e estado de rugosidade que promovam segurança ao tráfego, considerando as condições do clima e de simetria diversas (AGETOP, 2018).

Segundo, como revestimento asfáltico, é utilizado em duas camadas: a camada superior é designada camada de rolamento ou capa e a inferior é denominada camada de ligação ou Binder (AGETOP, 2018). O CAUQ na faixa B possui uma espessura grossa, é um tipo de pavimento ideal para a fabricação da camada de ligação em vias urbanas e rodovias. A camada de ligação é a camada que está abaixo da capa asfáltica e apresenta agregados minerais com maior diâmetro de graduação, maior porcentagem de vazios, menor presença de material fíler como enchimento e ligante betuminoso.

A camada de nivelamento ou reperfilagem, é a terceira, nela é usada uma mistura de agregados de graduação fina com a finalidade de corrigir deformações das superfícies de um revestimento já antigo, ao mesmo tempo, viabiliza a selagem das fendas presentes. Por último, o CAUQ é empregado como Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI), ou seja, como camadas delgadas do pavimento feitas com a finalidade de amortecer ou abrandar as tensões das superfícies dos pavimentos (AGETOP, 2018). A tabela 1 indica as faixas granulométricas A, B e C para a camada de ligação.

Tabela 1 - Percentual de massa passante em peneira de malha

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerância
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,08	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 3%

FONTES: AGETOP, 2018

2.2 INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Nos últimos séculos a indústria de papel e celulose teve estágios de crescimento, maturação e declínio em diferentes economias. Suas etapas variaram conforme o crescimento do mercado, dos recursos e das tecnologias disponíveis. Hoje, seu desenvolvimento é relativamente incremental e previsível, com mudanças lentas no domínio da indústria global (OJALA *et al.*, 2013).

O papel surgiu na China, no início do século II, e era fabricado a partir de córtex de plantas e tecidos velhos. Entre os árabes, foi bastante difundida e eles instalaram a primeira fábrica de papel da Europa, no século XII, apesar desse histórico, essa invenção demorou a chegar no Ocidente. A cerca da matéria prima para a fabricação de papel, somente no século XIX a madeira passou a ser a principal matéria prima. Nessa mesma época surgiu uma demanda maior desse material para a impressão de livros, jornais, dentre outros produtos (OSÓRIO, 2007).

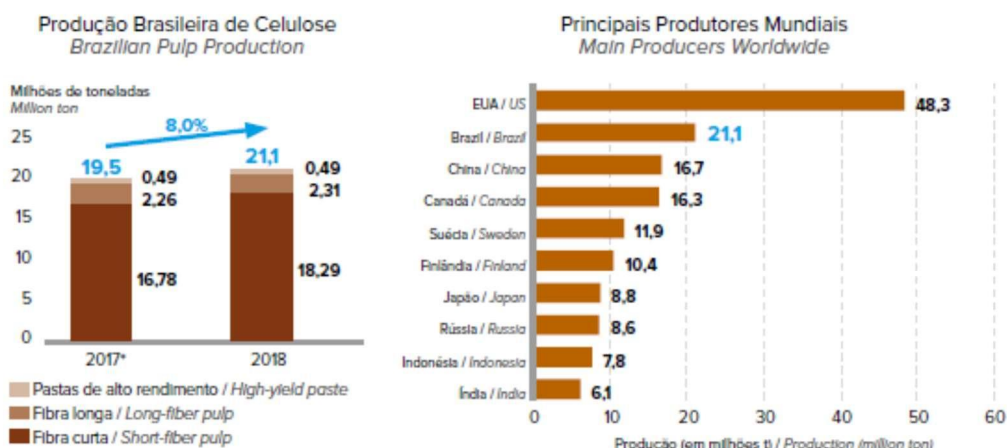
A indústria de papel e celulose tem uma história mais atual e com crescimento diminuto até 1950 no Brasil. Nas décadas posteriores, houve um crescimento na indústria, devido aos incentivos fiscais e à fixação de volumes mínimos de produção para a obtenção de financiamento. Nesse cenário, o uso de eucalipto como fonte de matéria-prima para a produção de celulose e papel foi um marco para a indústria e impulsionou a produção de celulose brasileira (ABRAF, 2013).

A indústria brasileira de papel e celulose seguiu as tendências internacionais da globalização industrial, para isso, a procura e o suprimento de matérias-primas foram elementos importantes na evolução (OJALA, *et al.*, 2013). Atualmente, a indústria de papel e celulose é de base, relativamente conservadora e intensiva em capital, recursos naturais e energia.

As fibras vegetais usadas na fabricação de papel e celulose são formadas por componentes químicos a base de Hidrogênio (H) e Carbono ©, os principais deles são a celulose, a hemicelulose e a lignina, que possuem aplicações dentro da *biobased industry*. Desse conjunto, a celulose é um polissacarídeo que tem longas cadeias lineares com alto grau de polimerização, constitui-se, assim, no principal componente das fibras vegetais que dá resistência mecânica. A hemicelulose é formada por uma mistura de polissacarídeos amorfos com grau de polimerização menor que o da celulose. A lignina é composta por polímero complexo de estrutura amorfa com componentes aromáticos e alifáticos e tem como finalidade conferir rigidez à estrutura. Sua concentração nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise (SILVA; JERÔNIMO, 2012).

Nesse contexto de produção de celulose, conforme a Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ (2019), em 2018, o Brasil tornou-se o segundo maior produtor mundial de celulose, ficando depois apenas dos Estados Unidos da América (EUA). As fibras curtas (eucalipto), as fibras longas (pinus) e a pasta de alto rendimento foram produzidas por processo químico, assim, foram 21,1 milhões de toneladas (o que representa um crescimento de 8,0% comparado ao ano de 2017). O volume para exportação chegou a 14,7 milhões de toneladas, denotando um aumento de 11,5% em relação a 2017; o volume usado no mercado interno resultou em 6,5 milhões de toneladas e a importação atingiu 180 mil toneladas, conforme Figura 4.

Figura 4 - Produção brasileira e principais produtores de celulose



FONTE: IBÁ, 2019

No que se refere a *biobased industry*, os componentes apresentados possuem diversas aplicações, separados ou em conjunto, a saber: a celulose, a hemicelulose e a lignina. A celulose e a hemicelulose podem ser convertidas em bioquímicos e biocombustíveis. A lignina possui poder energético e derivados com várias aplicações, como por exemplos: surfactantes e aglutinadores. Além disso, a madeira, é passível de sofrer processos termoquímicos capazes de convertê-la em biocombustíveis.

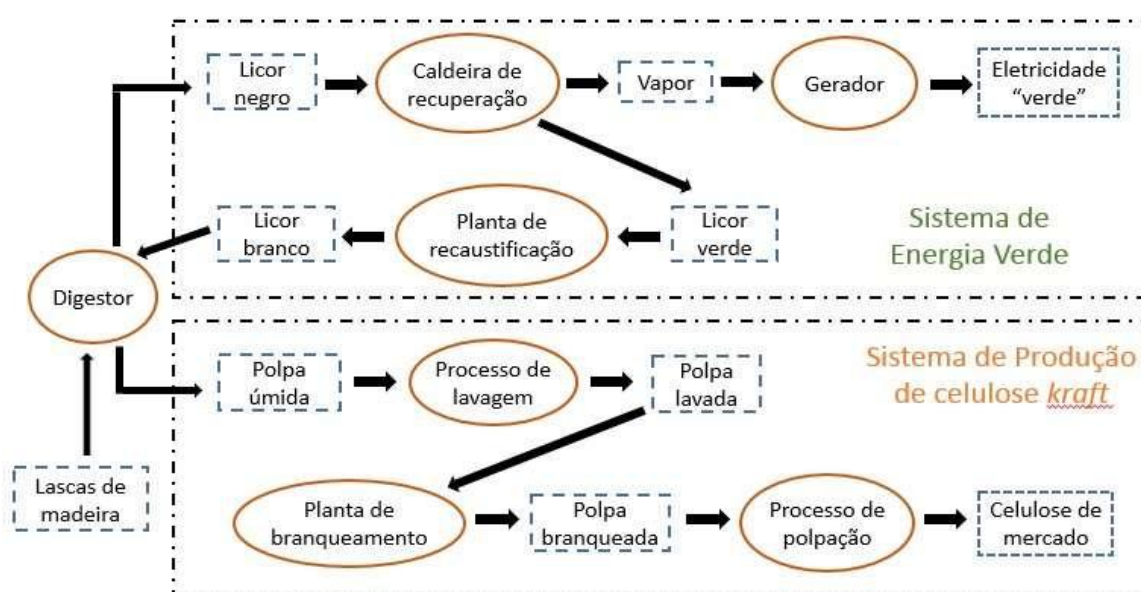
A produção da celulose inicia-se com a preparação da matéria-prima que consiste em descascar, cortar, remover o miolo. É nas rotas química e mecânica que a polpa celulósica é feita. A rota mecânica separa as fibras utilizando energia mecânica aplicada à matriz da madeira. Atualmente, polpas mecânicas são responsáveis por 20% de todo o material de fibras virgens (BRAJPAI, 2012).

O processo *Kraft* é dominante na indústria de papel e celulose (figura 5). Nesse processo há o cozimento, no qual os químicos ativos (licor branco) são o hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfito de sódio (Na₂S). A madeira passa pelo digestor e se mistura com o licor branco, então ocorre o cozimento. Após a reação, o licor negro (concentrado com lignina e químicos usados no processo) é lançado para a etapa de recuperação, que produz energia para a planta e o licor branco (recuperado) retorna ao processo. Após o cozimento, a celulose resultante é lavada e branqueada. Na produção de papéis, a etapa de branqueamento é que garante a qualidade. Aplica-se o processo *Kraft* em todas as espécies de madeira e a celulose

resultante dele tem propriedades de resistência mais elevadas do que a celulose obtida no processo sulfito (CELULOSE ONLINE, 2016).

A pasta celulósica é desagregada num equipamento chamado desagregador para iniciar o processo de produção de papel, a partir de folhas ou blocos. Posteriormente, a polpa de celulose precisa ser refinada. A refinação submete as fibras de celulose a uma reação de corte, esmagamento ou fibrilação. O grau de refinação varia conforme as características do papel que se quer fabricar. Após a refinação a pasta celulósica entra num tanque de mistura e a polpa de celulose é misturada outros componentes (minerais, químicos e aditivos) que farão parte das características do papel. Essa mistura sofre o processo de depuração (limpeza da massa ou retirada dos contaminantes ou fibras que não são desejáveis ao papel). O material rejeitado no depurador passa por uma peneira vibratória e retorna ao tanque da mesa plana para reprocessamento. A água desse processo é recirculada pela bomba de diluição e pela bomba de mistura, então, o excedente é devolvido ao desagregador. A seguir, a massa é direcionada para uma máquina de papel com várias seções e função de retirar a água na qual está os componentes do papel (fibras, minerais, colas, aditivos), e assim, produzir uma folha de largura, comprimento e espessura especificados (CASTRO, 2009).

Figura 5 - Processo *Kraft* de produção de celulose



Fonte: Adaptado de MERCER INTERNATIONAL GROUP, 2010.

2.2.1 Processo *KRAFT*

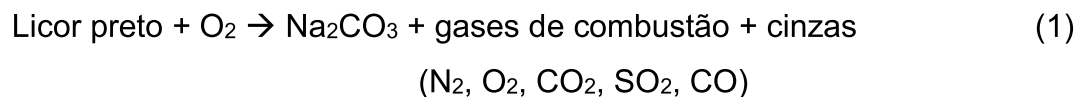
O processo *Kraft* é um importante processo alcalino de polpação que transforma as madeiras moles, duras e com alto teor de extrativos e até cascas numa solução alcalina a partir do hidróxido de sódio e sulfeto de sódio, denominada licor branco (WENZEL, 2012).

No setor de caustificação é possível recuperar até 97% dos reagentes e produzir com sobras a energia e vapor para a produção industrial com a queima da matéria orgânica do licor residual de cozimento, denominado licor negro. Esse licor é gerado na caldeira de recuperação. Sua origem deriva da madeira, pois, cerca de metade da massa dela é dissolvida, produzindo um material pastoso que é usado como biocombustível nas fábricas de celulose *Kraft* para a geração de energia. Esse combustível é abundante em matéria orgânica e compostos minerais como os sulfetos, os carbonatos, os hidróxidos, os potássios, os cloretos e o sódio queimados numa caldeira especial (a caldeira de recuperação) e gera energia térmica e elétrica para a produção de celulose (FOELKEL, 2011).

Fiorese (2009) descreveu em cinco etapas o processo *Kraft* de produção de celulose. A primeira etapa, o pátio de madeira, recebe troncos de 6 metros e seus produtos são farpas trituradas em condições propícias ao cozimento, biomassa a ser usada nas caldeiras, cascas e lascas menores que 3 mm. A segunda etapa, linha de pasta, recebe as aparas ou também conhecidos como cavacos para o cozimento e a deslignificação em solução alcalina forte, denominada licor branco; seus produtos são a polpa marrom e o licor preto. A terceira etapa, utilidades, recebe o licor negro e os seus produtos são a energia e os vapores advindos da queima do licor preto concentrado, com 20 a 40% de umidade, resultando em sais minerais fundidos, denominados *smelt*. A quarta etapa, caustificação, recupera os reagentes químicos do licor branco com a caustificação do licor verde, que é composto de *smelt* e sais minerais fundidos, resultado da queima do licor negro, dissolvido em licor branco fraco. Por fim, a secagem, que remove até 90% da umidade da polpa de celulose branqueada para corte, seguida pelo enfardamento e comercialização.

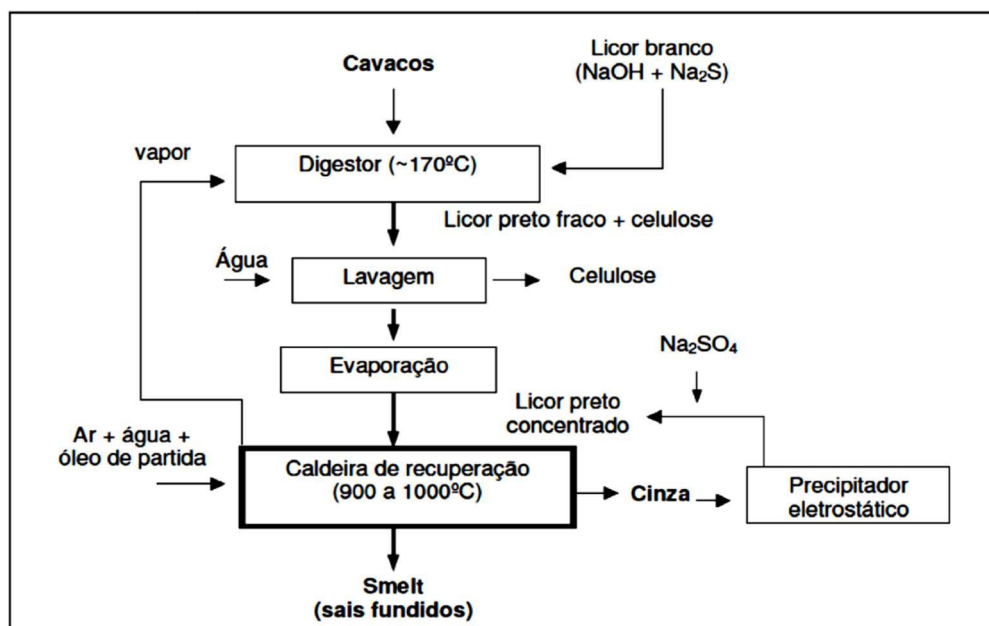
Martins (2006) menciona que as células da celulose são interligadas por material cimentante formado principalmente de lignina, elas podem ser separadas por uma dissolução seletiva com o reagente químico licor branco ($\text{Na(OH)}_2 + \text{Na}_2\text{S}$) que modifica as demais partes da célula. O cavaco e o licor branco sofrem uma

reação no digestor submetidos a uma temperatura média de 170 °C para que seja produzida a polpa *Kraft*. A evaporação e a concentração do licor preto fraco devem atender a no mínimo 58% antes de ser queimado em caldeira de recuperação. Esse autor representa a reação de combustão do licor preto na fórmula 2:



O fluxograma de produção de celulose e obtenção do Smelt é representado na Figura 6 (Fluxograma 1A), logo a seguir:

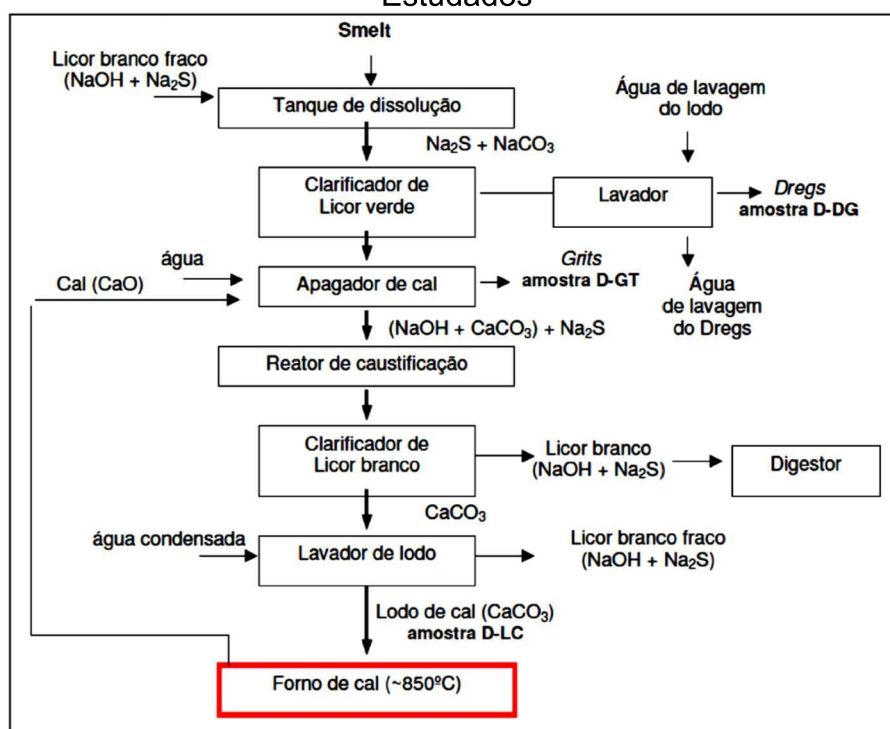
Figura 6 - Fluxograma 1A. Produção de Celulose e melt



Fonte: Martins (2006).

A recuperação dos reagentes químicos do processo *Kraft* de produção de celulose e a geração dos resíduos no setor de caustificação (dregs, grits e lama de cal) são apresentados na Figura 7 (Fluxograma 1B).

Figura 7 - Fluxograma 1B. Recuperação Química e Geração dos Resíduos Estudados



Fonte: Martins (2006).

Foelkel (2011) cita algumas obrigações tecnológicas das fábricas de produção *Kraft* de celulose, são elas: cozimento modificado com pré-impregnação dos cavacos, deslignificação com oxigênio, lavagem eficiente da polpa, caldeira de recuperação do tipo low odor ou odorfree, evaporação com multi estágios para cerca de 80% de sólidos no licor preto concentrado, secagem flash da lama de cal em forno, sistema de destilação de condensados e queima dos gases voláteis, e outros.

A geração de resíduos sólidos da recuperação química do setor de caustificação advindos da produção de celulose pode ser calculada com base nos estudos de Martins (2006), feito numa indústria paulista de celulose. Ele refere que a fração de geração dos resíduos em quilogramas (kg) por tonelada de pasta/celulose seca ao ar livre (Air Dried Pulp t-n - ADP_t), assim: 14,8 kg/ADP_t para os dregs, 16 kg/ADP_t para os grits e 12,3 Kg/ADP_t para a lama de carbonato de cálcio.

De acordo com dados do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC) o Brasil é o maior exportador mundial de celulose e o segundo maior produtor, ficando atrás apenas dos EUA (BRASIL, 2019). Os valores referentes à produção de celulose e de resíduos sólidos da recuperação química estão na tabela 2, a seguir:

Tabela 2 – Produção de Celulose, Dregs, Grits e Lama de Cal no Brasil – 1970 a 2011

Ano	Prod. Cel Brasil Milhões ton	Prod. Dregs Brasil Mil ton	Prod. Grits Brasil Mil ton	Prod. L. Cal Brasil Mil ton
1982	3,33	49,34	53,34	41
1983	3,46	51,16	55,31	42,52
1984	3,58	53,06	57,36	44,09
1985	3,72	55,02	59,48	45,73
1986	3,86	57,06	61,68	47,42
1987	4	59,17	63,96	49,17
1988	4,15	61,36	66,33	50,99
1989	4,3	63,63	68,78	52,88
1990	4,4	65,12	70,4	54,12
1991	4,68	69,32	74,94	57,61
1992	4,99	73,79	79,77	61,33
1993	5,31	78,55	84,92	65,28
1994	5,65	83,62	90,4	69,49
1995	6,01	89,01	96,23	73,98
1996	6,4	94,75	102,43	78,75
1997	6,82	100,86	109,04	83,83
1998	7,25	107,37	116,07	89,23
1999	7,72	114,29	123,56	94,99
2000	8,22	121,67	131,53	101,11
2001	8,75	129,51	140,02	107,64
2002	9,32	137,87	149,05	114,58
2003	9,92	146,76	158,66	121,97
2004	10,56	156,23	168,89	129,84
2005	10,4	153,92	166,4	127,92
2006	11,07	163,85	177,13	136,17
2007	12	177,6	192	147,6
2008	12,7	187,96	203,2	156,21
2009	13,3	196,84	212,8	163,59
2010	14,2	210,16	227,2	174,66
2011	14	207,2	224	172,2
Acumulado	247,43	3661,94	3958,85	3043,37

Fonte: BRACELPA 2013; Martins 2006

Na tabela 2, pode-se verificar os valores da produção brasileira de celulose, conforme informações divulgadas pela Associação Brasileira de Celulose e Papel – BRACELPA, em 2013. Constata-se que os valores da produção de celulose são apresentados em milhões de toneladas, já os resíduos sólidos gerados na fabricação foram apresentados em milhares (Mil) de toneladas.

2.2.2 Resíduo do processo de caustificação: lama de carbonato de cálcio

O Carbonato de Cálcio (CaCO_3) é insolúvel no licor branco e é removido no clarificador do licor branco, ele é chamado no processo de lama de cal. Essa é a etapa final do processo de recuperação química, assim sucede a clarificação do licor verde e ao apagamento da cal, o licor branco sobrenadante é mais uma vez utilizado no digestor para atacar a lignina e separá-la das fibras das farpas.

Martins (2006) aponta que a lama de cal é lavada para que se extraia o licor branco fraco, então é enviada ao forno de cal para que haja a reação de calcinação, dessa forma, após a calcinação, a cal volta a ser hidratada no apagador para posteriormente ocorrer a caustificação do licor verde. A reação desse processo é apresentada na equação 1:



A composição da lama de cal é de aproximadamente 97% de carbonato de cálcio (CaCO_3). A lama de cal possui partículas bastante finas de CaCO_3 que precipitam junto com pequenas quantidades variáveis de dregs não precipitado que é arrastado do clarificador de licor verde (MODOLO *et al.*, 2010).

A lama de cal entra no forno de cal, mas antes ela é processada, separada, lavada e filtrada. O objetivo é recuperar a maior parte do licor branco que acompanha a lama, oxidar o Na_2S residual e assim, aumentar seu teor seco. Quando a quantidade de impurezas presentes na lama é grande ou quando há excesso produzido, ele não é enviado para o forno de cal (SENAI-CETCEP, 2015).

A quantidade estimada de lama de cal gerada para cada tonelada de polpa de celulose seca ao ar livre é de 12,3 kg/ADPt, com base numa indústria paulista de papel e celulose. Considerando um crescimento médio anual de 7,5% na produção brasileira de celulose desde 1970, e a produção nacional de 14 milhões de toneladas em 2011, estima-se que o Brasil, em 40 anos, gerou e depositou em aterros industriais aproximadamente 3 milhões de toneladas de lama de cal da produção de celulose do processo *Kraft* (MARTINS, 2006; BRACELPA, 2012).

2.3 USO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE EM MISTURAS ASFÁLTICAS

A indústria de papel e celulose produz quantidades elevadas de resíduos sólidos, conforme estimativas, a produção de 550 toneladas de celulose resulta em aproximadamente 100 toneladas de resíduos (Modolo *et al.*, 2010). Esses resíduos inorgânicos podem ser reciclados, principalmente, os grãos e escórias, que são comumente descartados em aterros (MODOLO *et al.*, 2010).

Nesse contexto, a reciclagem, é um processo no qual se aplica um processamento a um dado material transformando-o num novo produto de forma a torná-lo útil. Nos últimos anos ocorreram esforços nas pesquisas sobre novas aplicações para resíduos sólidos industriais resultantes da produção de papel e celulose em concreto asfáltico. O uso de resíduos das indústrias na construção rodoviária, no que se inclui a fase de revestimento asfáltico, pode gerar benefícios ao reduzir a quantidade desses materiais para as formas convencionais de disposição e ao promover novos materiais de construção com propriedades significativas, na construção rodoviária chega a agregar valores ao que antes era apenas um material dispendioso (SANTOS *et al.*, 2019).

Na composição dos resíduos da produção de papel e celulose, as cascas representam 24%, a lama de cal 22%, os iodios 17%, grãos e escórias 14% e as cinzas 11% (NOLASCO *et al.*, 2000). Esses resíduos, de origem orgânica e inorgânica, ainda são destinados aos aterros sanitários, o que é um desperdício, levando em consideração a produção grandiosa de resíduos sólidos e o potencial e reciclagem dos resíduos da indústria de celulose, no que se inclui a lama de cal produzida na etapa de caustificação (SANTOS *et al.*, 2019).

Nesse sentido, avaliar o uso dos resíduos sólidos da indústria de papel na pavimentação assegura um desempenho aceitável para satisfazer os critérios de engenharia, do meio ambiente e da economia, uma vez que os resíduos não podem apresentar efeitos negativos ao desempenho dos pavimentos, não podem afetar a saúde dos trabalhadores durante a construção, nem dos usuários durante o uso, e, também não podem ameaçar o meio ambiente. Devido à grande importância da construção rodoviária para o comércio e para a mobilidade das pessoas, estudos criteriosos precisam existir para que não se permita que os pavimentos se tornem simplesmente um tipo de aterro sanitário.

O estudo a respeito do uso dos resíduos da indústria de papel e celulose na construção rodoviária ainda pode ser muito aprofundado. Atualmente, registram-se nessa esfera trabalhos como os de Modolo *et al.* (2010), Lathinen *et al.* (2001), Machado *et al.* (2004), Molina (2004) e Zhou (1999).

Zhou (1999) constatou que os teores de resíduos de papel e celulose adequados nas misturas equivalem a 10% e que as resistências mecânicas das misturas variam conforme a qualidade do solo. Os maiores valores foram observados em solos com maiores teores de argila. Nessa análise o esperado era que a lama de cal exibisse um comportamento semelhante ao da cal hidráulica quando utilizada na estabilização de solo com grandes quantidades de teores de argila pelo fato de este resíduo ter elevado teor de cálcio.

A influência do tempo de cura e da umidade de compactação se faz presente, visto que, tempos de cura maiores e teores de umidades inferiores ao estipulado aumentam a resistência das misturas. Em estudos referentes à toxicidade da lama de cal e cinza volante, estipulou-se que esses materiais podem ser classificados como não perigosos ao meio ambiente e que as concentrações de metais pesados eram inferiores às permitidas pelos regulamentos ambientais vigentes (ZHOU, 1999; ABNT, 2004).

Lathinen *et al.* (2001) expuseram resultados de uma pesquisa com cinzas volantes provenientes da queima da casca e serragem da produção de papel. Eles fizeram ensaios em laboratório e em campo e constataram que as cinzas volantes da indústria de papel podem servir para a estabilização de solos melhorando sua resistência e estabilidade. Essa pesquisa foi de sucesso para o desenvolvimento da nova mistura para a aplicação em construções rodoviárias de baixo volume de tráfego (LATHIEN *et al.*, 2001). Nesse estudo, analisaram-se ainda misturas de solo com resíduo da fabricação de celulose com alto teor de matéria orgânica e cinza volante. Embora a lama, como se averiguou, não possa ser utilizada isoladamente, por apresentar baixa resistência às cargas de tráfego veicular e às condições ambientais, em conjunto com o solo e a cinza volante desenvolveu resultados ótimos.

Molina (2004) desenvolveu um estudo no qual usou um resíduo da indústria de papel constituído por lama de cal e *dregs* na proporção de 10:1, respectivamente, e obteve como resultado que a adição desse resíduo não melhora as propriedades

mecânicas das misturas compactadas, havendo necessidade da adição de um estabilizante como a cal para melhorar suas características.

Nessa pesquisa, para as misturas de solo, resíduo e cal, Molina (2004) constatou transformações nos parâmetros de compactação semelhantes às misturas de solo e cal, com diminuição na massa específica seca máxima e aumento na umidade ótima. Observou-se ainda, o aumento contínuo das resistências mecânicas com o aumento no tempo de cura, devido às reações pozolânicas da cal e do resíduo com o solo desenvolvidas com o passar do tempo. A cerca da adição do resíduo, constatou-se um aumento da expansão das misturas, apesar disso, os valores de expansão permaneceram inferiores aos limites aceitáveis para a aplicação das misturas para camadas de base.

Machado *et al.* (2004) pesquisaram sobre a aplicação da lama de cal como aditivo químico para elevar a qualidade das características geotécnicas dos solos como uma solução tecnológica alternativa de baixo custo para rodovias florestais. Eles analisaram o desempenho geotécnico das misturas com o solo e com a lama de cal na construção rodoviária usando como parâmetros o California Bearing Ratio (CBR), os limites de consistência e os testes de permeabilidade. Esse estudo demonstrou o excelente potencial da lama de cal como estabilizante químico com um teor máximo de 25%.

Nas indústrias da construção civil, os resíduos como as misturas de grãos são admissíveis e estão prontos para serem testadas, esse resíduo é semelhante à brita já utilizada como agregado nos pavimentos rodoviários. Por outro lado, as escórias não podem ser aplicadas diretamente, pois possuem sais solúveis, por isso não se pode fazer uso da aplicação direta. Depois de passar pelo processo de lavagem, as misturas de escórias, conforme demonstrado em experimentos, possuem valores compatíveis com misturas de referência e atingem valores de estabilidade e fluência Marshall de acordo com o esperado (MODOLO *et al.*, 2010).

Modolo *et al.* (2010) descreve que a fábrica de papel e celulose tem a possibilidade de adequar uma fase de tratamento de seus resíduos sólidos em sua infraestrutura, isso promoveria a recuperação de sais residuais e da água utilizada no tratamento. Outro benefício da adoção dessa resolução constitui-se no fato de que os resíduos sólidos estariam aptos para serem utilizados em pavimentos rodoviários, conseqüentemente, seriam facilmente absorvidos pelo setor rodoviário devido a sua grande demanda.

Uma novidade no setor rodoviário é advinda das pesquisas sobre a utilização de lignina como filtro solar em asfaltos, isso tem refletido influências acadêmicas e tecnológicas na sociedade. Num trabalho publicado por Batista *et al.* (2018) foram apresentadas as vantagens da adição de lignina ao ligante asfáltico, enfatizando a resistência ao envelhecimento, a estabilidade térmica e o estudo reológico. Assim, foi desenvolvido um novo produto: o asfalto modificado com lignina.

Essa pesquisa teve grande relevância tecnológica com o início da produção de lignina em escala industrial desde 2019 no Brasil. Os ligantes modificados com lignina mostraram valores de penetração inferiores ao ligante convencional, pois apresentaram maior resistência ao risco e menores deformidades. A lignina tornou superior a resistência do asfalto ao trincamento térmico a temperaturas até -12 °C (BATISTA *et al.*, 2018).

A pesquisa de Lins (2019) resultou na produção de um concreto asfáltico com ligante asfáltico modificado com 1%, 4% e 6% de lignina originária da indústria de papel e celulose. No ligante asfáltico com 4% de lignina constatou-se maior estabilidade Marshall, o que indicou maior resistência à trilha de roda.

Os resíduos de papel e celulose possuem propriedades, que se comparados a agregados mais habituais possuem o mesmo potencial de uso em pavimentos asfálticos. Assim, os grãos e escórias podem ser valorizados como matéria prima na indústria de produção de asfalto. Os grãos podem ser testados de modo direto como um agregado para os pavimentos, ou seja, as misturas de grãos são admissíveis e aptas para serem investidas em escala industrial (MODOLO *et al.*, 2010).

Já as escórias apresentam sais solúveis que impossibilitam sua aplicação direta no desenvolvimento da fabricação, mas após sua lavagem, as misturas de escórias apresentam valores análogos se comparados às combinações de referência, assim podem atingir a estabilidade Marshall e valores de fluxo em conformidade com o esperado. (MODOLO *et al.*, 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e as etapas do programa experimental adotados no desenvolvimento da pesquisa. Será exposto de forma detalhada como se desenvolveu cada etapa do programa experimental, com vistas a alcançar todos os objetivos específicos da pesquisa e, ao final, o objetivo geral.

3.1 MATERIAIS

Os materiais que foram utilizados são os descritos a seguir.

3.1.1 Lama de carbonato de cálcio

O resíduo utilizado foi a Lama de carbonato de cálcio (LCC) figura 8 fornecida pela empresa Vida-e (localizada no estado do RS, Brasil).

Figura 8 - Lama de carbonato de cálcio



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.2 Agregados

Os agregados graúdos utilizados foram as britas 3/4" (Brita 1) e a 3/8" (Brita 0) de origem granítica. O agregado miúdo foi o pó de pedra, também granítico, que apresentou granulometria graduada o suficiente para atingir também a faixa equivalente ao filer (passando, inclusive, na peneira de n° 200). Por esse fato, não foi necessária a utilização de um filer específico, mas sim o recuperado dos finos do pó de pedra.

Figura 9 - Agregados



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.3 Ligante (Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP)

O CAP utilizado no desenvolvimento do trabalho foi o 50/70. Adquirido na indústria, no estado do Rio Grande do Sul.

3.2 MÉTODO

A pesquisa foi desenvolvida em escala laboratorial nas dependências da UNISINOS em São Leopoldo -RS. A metodologia está dividida em 3 etapas:

Etapa 1 – Caracterização dos agregados e resíduo;

Etapa 2 – Dosagem dos traços

Etapa 3 – Caracterização da mistura asfáltica.

O quadro a seguir traz um resumo de todos os ensaios que foram realizados, e os correspondentes materiais estudados em cada ensaio:

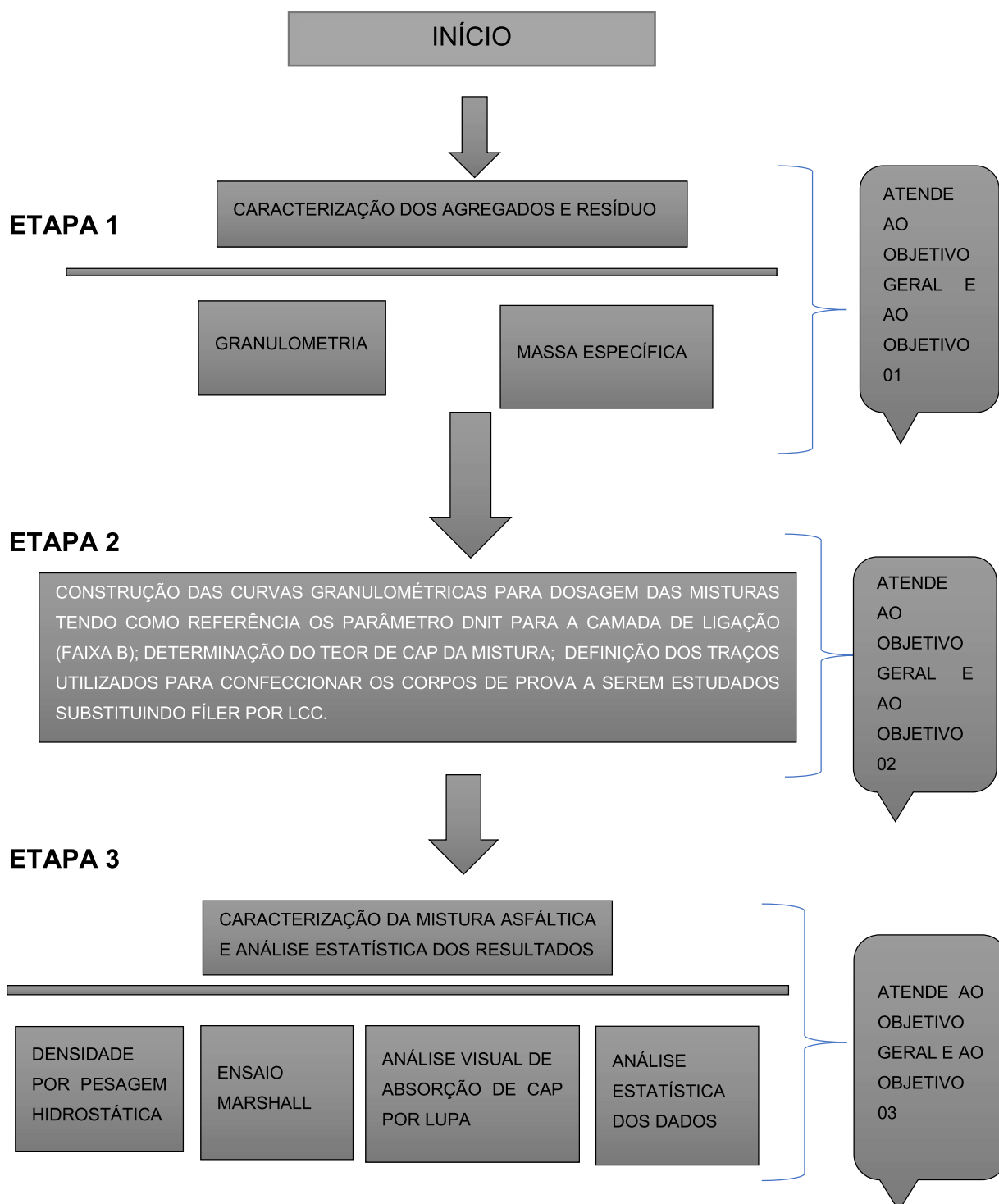
Quadro 1 - Ensaaios realizados e respectivos materiais a serem estudados

ENSAIOS REALIZADOS	MATERIAS ESTUDADOS NO ENSAIO
Granulometria	Agregados; lama de Cal.
Massa específica por pesagem hidrostática	Agregado graúdo
Massa específica por picnometria	Pó de pedra
Massa específica por picnometria a gás hélio	Lama de carbonato
Rompimento MARSHALL	Corpo de prova da mistura asfáltica com e sem resíduo
Densidade por pesagem Hidrostática	Corpo de prova da massa asfáltica com e sem resíduo
Análise de absorção de CAP por lupa	Corpo de prova da massa asfáltica com resíduo

Fonte: Elaborado pelo autor

O fluxograma 1, a seguir, descreve a ordem seguida para execução dos experimentos, bem como a quais objetivos os resultados obtidos atenderam:

FLUXOGRAMA 1 – Etapas do programa experimental relacionadas a cada objetivo específico



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1 Caracterização dos agregados, resíduo e CAP

3.2.1.1 Granulometria

A análise granulométrica dos materiais envolvidos no estudo, teve como finalidade determinar as características dos agregados a fim de formular o traço da mistura obedecendo as regras inerentes às faixas de trabalho determinadas pela norma DNIT – ES 031/2006 (Pavimentos Flexíveis – Especificações de Serviço).

Os equipamentos utilizados e as peneiras adotadas para a execução do peneiramento estão representados na figura 10. As amostras foram secas em estufa, com temperatura de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ e, após esfriar à temperatura ambiente, foi determinada a sua massa total. Adotou-se peneiramento mecânico em agitador para os agregados britados e peneiramento manual para o resíduo, seguindo as especificações da norma DNER – ME 083/1998, (Agregados – Análise Granulométrica). Para a brita 1 (3/4”) foi utilizada uma amostra de aproximadamente 5,0 kg e, para a brita 0 (3/8”) foi ensaiado uma amostra de 3,0 kg. Já para o pó de pedra, utilizou-se uma amostra de 1300 g.

Figura 10 - Peneiras e agitador para peneiramento



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1.2 Massa específica

Massa específica é a relação entre a quantidade de matéria (massa) e o volume de uma determinada amostra. Para a determinação da massa específica e da absorção de água de agregados graúdos, foi utilizada a metodologia da norma NBR NM 53 (ABNT, 2009). Após eliminar o material passante na peneira de 4,75 mm, o material foi lavado para remover o pó ou outro material da superfície.

A quantidade da amostra ensaiada, é estabelecida pela norma em função da sua dimensão máxima característica. O material foi submerso em água à temperatura ambiente por um período de 24 horas. Em seguida, a amostra foi retirada da água e enxugada com o auxílio de um pano absorvente, eliminando a água visível, mas mantendo a umidade das partículas. Imediatamente, o material foi pesado, determinando a massa do agregado saturado com superfície seca (m_s).

Na sequência, o material foi inserido em um cesto de arame e submerso em água para a obtenção da massa em água (m_a). Após, foi secada a amostra em estufa até a massa constante e pesada para a obtenção da massa do agregado seco (m).

A norma NBR NM 53 (ABNT, 2009) também traz as seguintes definições e equações para o cálculo dos resultados:

- Massa específica real: relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluídos os vazios permeáveis, conforme Equação 1;
- Massa específica aparente: relação entre a massa seca e o volume aparente do agregado, que inclui o volume do agregado sólido mais o volume dos poros superficiais contendo água (Equação 2);
- Massa específica efetiva: relação entre a massa seca do agregado e o seu volume efetivo constituído pelo volume do agregado sólido e o volume dos poros permeáveis à água que não foram preenchidos pelo asfalto (Equação 3);
- Absorção de água: aumento da massa do agregado, devido ao preenchimento dos seus poros por água, expresso como percentagem de sua massa seca (Equação 4).

$$G_{sa} = \frac{m}{m - m_a}$$

(1)

Onde:

G_{sa} = massa específica real, em g/cm³

m = massa do agregado seco

m_a = massa do agregado submerso em água

$$G_{sb} = \frac{m}{m_s - m_a}$$

(2)

Onde:

G_{sb} = massa específica aparente, em g/cm³

m = massa do agregado seco

m_s = massa do agregado saturado com superfície seca, em g

m_a = massa do agregado submerso em água

$$G_{se} = \frac{G_{sa} + 2G_{sb}}{3}$$

(3)

Onde:

G_{se} = massa específica efetiva, em g/cm³

G_{sa} = massa específica real, em g/cm³

G_{sb} = massa específica aparente, em g/cm³

$$a = \frac{m_s - m}{m}$$

(4)

Onde:

a = absorção de água, em %

m = massa do agregado seco

m_s = massa do agregado saturado com superfície seca

Para o pó de pedra, o método utilizado foi o de Picnometria, conforme norma DNER – ME 084/95. Já para a Lama de Carbonato de cálcio, o método utilizado foi o da Picnometria a gás hélio.

No caso do CAP 50/70, foi utilizada a especificação comercial, que informou uma massa específica de 1,045 g/cm³.

Os resultados obtidos nesses testes estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Massas específicas dos materiais

	MASSA ESPECÍFICA SECA (g/cm ³)	MASSA ESPECÍFICA CONDIÇÃO SATURADA SUPERFÍCIE SECA (g/cm ³)	MASSA ESPECÍFICA APARENTE (g/cm ³)	ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)
BRITA 1	2,856	2,792	2,757	1,265
BRITA 0	2,878	2,752	2,684	2,505
PÓ DE PEDRA	2,796	-----	-----	-----
LCC	2,609	-----	-----	-----
CAP 50/70	1,045	-----	-----	-----

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2 Dosagem Marshall

3.2.2.1 Construção das curvas granulométricas dos agregados

Com base na curva granulométrica dos agregados e da Lama de Cal, foram determinadas as curvas granulométricas das misturas com intuito de definir os percentuais de cada material na composição da formulação das misturas asfálticas. Observou-se que, para os materiais estudados, a faixa do pavimento mais adequada a ser adotada seria a faixa B, estabelecida na norma DNIT – ES 031/2006.

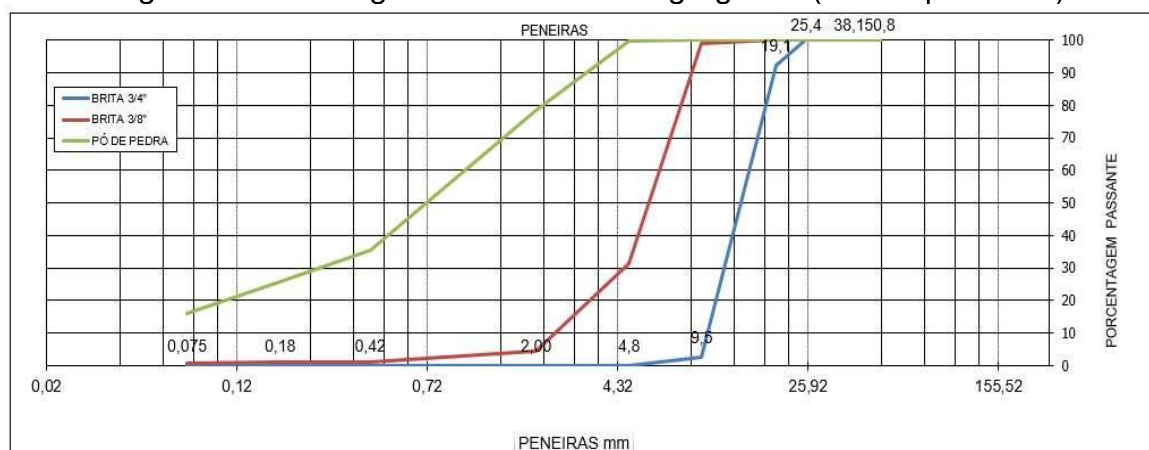
Tabela 3 – Limites para granulometria e percentuais do ligante asfáltico para cada faixa do pavimento asfáltico

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 1/2"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
3/4"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 28	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: DNIT- ES 031/2006

Preliminarmente os resultados do ensaio de peneiramento trouxeram os dados a seguir:

Figura 11 - Curva granulométrica dos agregados (massa passante)



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a informação da massa retida em cada peneira da série utilizada, passou-se a determinar os percentuais passante, dados estes que posteriormente foram utilizados para comparação e adequação da curva, obedecendo aos limites constantes na Tabela 4.

Tabela 4 – Percentual de massa passante em cada peneira

Série de peneiras		pó de pedra		Brita 3/8" (zero)		Brita 3/4" (01)		Lama de cal	
		VALORES PASSANTES		VALORES PASSANTES		VALORES PASSANTES		VALORES PASSANTES	
Em polegadas	Em milímetros	Massa (g)	PERCENTUAL	Massa (g)	PERCENTUAL	Massa (g)	PERCENTUAL	Massa (g)	PERCENTUAL
2"	50,8	401,07	100,00%	4035,1	100,00%	5525,75	100,00%	26,82	100,00%
1 1/2"	38,1	401,07	100,00%	4035,1	100,00%	5525,75	100,00%	26,82	100,00%
1"	25,4	401,07	100,00%	4035,1	100,00%	5525,75	100,00%	26,82	100,00%
3/4"	19,1	401,07	100,00%	4035,1	100,00%	5096,2	92,23%	26,82	100,00%
1/2"	12,7	401,07	100,00%	4035,1	100,00%	1011,75	18,31%	26,82	100,00%
3/8"	9,5	401,07	100,00%	3989,1	98,86%	145,35	2,63%	26,82	100,00%
Nº4	4,8	400,28	99,80%	1266,2	31,38%	0	0,00%	26,82	100,00%
Nº10	2	313,86	78,26%	173,15	4,29%			26,82	100,00%
Nº40	0,42	142,05	35,42%	50,4	1,25%			26,82	100,00%
Nº80	0,18	102,66	25,60%	40,45	1,00%			26,82	100,00%
Nº200	0,075	63,81	15,91%	33,5	0,83%			25,8	96,20%
FUNDO		28,95	7,22%	0,85	0,02%			-0,01	-0,04%

Fonte: Elaborado pelo autor

Após determinar os percentuais passantes em cada peneira para cada um dos agregados, passou-se a formular o traço de modo a obedecer aos intervalos da tabela 4, em específico na faixa B da norma DNIT 031/2006, como pode ser visto na Tabela 6.

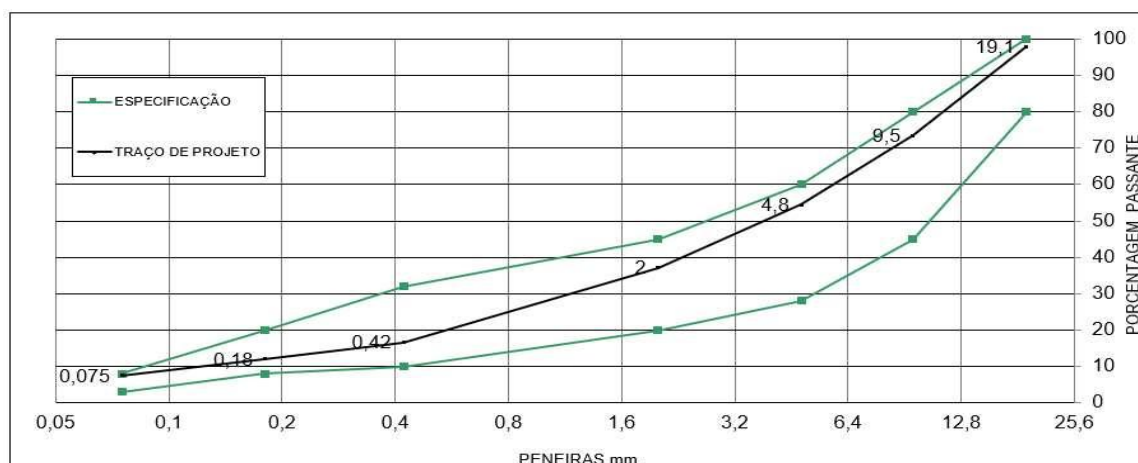
Tabela 5 - Dosagem para o traço da mistura sem lama de carbonato de cálcio

100												
PENEIRAS		BRITA 3/4"		BRITA 3/8"		PÓ		DADOS DE PROJETO				
n°	mm	% que passa	%	% que passa	%	% que passa	%	TRAÇO DE PROJETO	FAIXA DE ESPECIFICAÇÃO		TOLERANCIA	
									B - DNIT 031/2006		MÍNIMA	MAXIMA
2"	50,8	100,00	27,00	100	27,00	100	46,00	100,00	100	100	7	7
1 1/2"	38,1	100,00	27,00	100	27,00	100	46,00	100,00	100	100	7	7
1"	25,4	100,00	27,00	100	27,00	100	46,00	100,00	95	100	7	8
3/4"	19,1	92,23	24,90	100,00	27,00	100,00	46,00	97,90	80	100	7	7
3/8"	9,5	2,63	0,71	98,86	26,69	100,00	46,00	73,40	45	80	7	7
4	4,8	0,00	0,00	31,38	8,47	99,80	45,91	54,38	28	60	5	5
10	2,00	0,00	0,00	4,29	1,16	78,26	36,00	37,16	20	45	5	5
40	0,42	0,00	0,00	1,25	0,34	35,42	16,29	16,63	10	32	5	5
80	0,18	0,00	0,00	1,00	0,27	25,60	11,78	12,05	8	20	3	3
200	0,075	0,00	0,00	0,83	0,22	15,91	7,32	7,54	3	8	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, para 1000 gramas de agregados que irão compor o traço da massa asfáltica, a formulação que melhor se mostrou adequada aos intervalos pretendidos foi: 270 gramas de Brita 3/4", 270 gramas de brita 3/8" e 460 gramas de pó de pedra. A curva granulométrica para essas proporções pode ser vista na figura 12.

Figura 12 - Curva granulométrica da mistura sem lama de carbonato de cálcio



Fonte: Elaborado pelo autor

Desta forma, como ponto de partida foi utilizado o traço padrão conforme descrito anteriormente.

Após determinado o traço de referência, passou-se agora a procurar o percentual de resíduo (lama de carbonato de cálcio) que melhor se ajustaria ao traço. Após várias tentativas, verificou-se que, para os agregados e Lama de carbonato de cálcio utilizados, o percentual de 2% se mostrou mais adequado como parâmetro para substituir os finos da mistura pelo resíduo. Ou seja, de toda mistura, 2% será composta de resíduos (Lama de carbonato de cálcio).

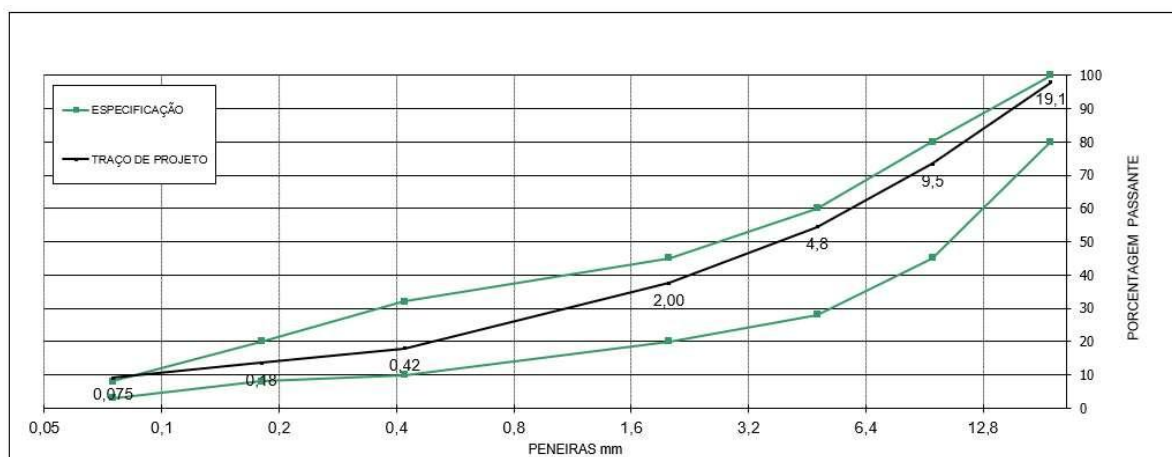
Tabela 6 - Dosagem para traço com 2% de lama de carbonato de cálcio

PENEIRAS		BRITA 3/4"		BRITA 3/8"		PÓ		LAMA DE CAL		DADOS DE PROJETO				
n°	mm	% que passa	% 27	% que passa	% 27	% que passa	% 44	% que passa	% 2	TRAÇO DE PROJETO	FAIXA DE ESPECIFICAÇÃO B - DNIT 031/2006		TOLERANCIA	
											MÍNIMA	MAXIMA		
2"	50,8	100,00	27,00	100	27,00	100	44,00	100	2,00	100,00	100	100	7	7
1 1/2"	38,1	100,00	27,00	100	27,00	100	44,00	100	2,00	100,00	100	100	7	7
1"	25,4	100,00	27,00	100	27,00	100	44,00	100	2,00	100,00	95	100	7	8
3/4"	19,1	92,23	24,90	100,00	27,00	100,00	44,00	100	2,00	97,90	80	100	7	7
3/8"	9,5	2,63	0,71	98,86	26,69	100,00	44,00	100	2,00	73,40	45	80	7	7
4	4,8	0,00	0,00	31,38	8,47	99,80	43,91	100	2,00	54,38	28	60	5	5
10	2,00	0,00	0,00	4,29	1,16	78,26	34,43	100	2,00	37,59	20	45	5	5
40	0,42	0,00	0,00	1,25	0,34	35,42	15,58	100	2,00	17,92	10	32	5	5
80	0,18	0,00	0,00	1,00	0,27	25,60	11,26	100	2,00	13,53	8	20	3	3
200	0,075	0,00	0,00	0,83	0,22	15,91	7,00	96,20	1,92	9,15	3	8	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Para esta mistura, a curva granulométrica pode ser vista na figura 13.

Figura 13 - Curva granulométrica para traço com 2% de lama de carbonato de cálcio



Fonte: Elaborado pelo autor

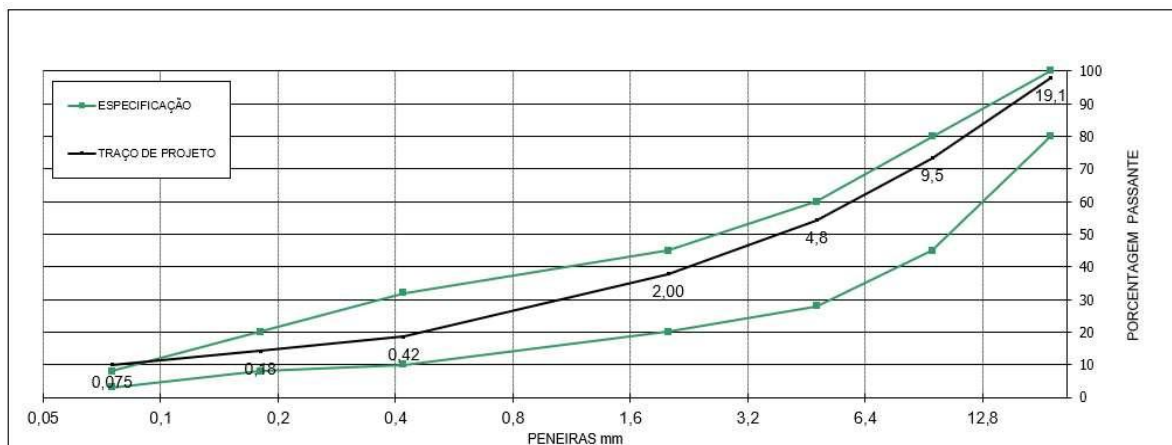
As tabelas 8 e 9 trazem os traços quando utilizado 3% e 4%, respectivamente. Em todos os casos as curvas se mostram adequadas aos limites estabelecidos pela norma, como pode ser visto nas figuras 14 e 15.

Tabela 7 - Dosagem para traço com 3% de lama de carbonato de cálcio

PENEIRAS		BRITA 3/4"		BRITA 3/8"		PÓ		LAMA DE CAL		DADOS DE PROJETO				
n°	mm	% que passa	% 27	% que passa	% 27	% que passa	% 43	% que passa	% 3	TRAÇO DE PROJETO	FAIXA DE ESPECIFICAÇÃO		TOLERANCIA	
											B - DNIT 031/2006	MÍNIMA	MAXIMA	
2"	50,8	100,00	27,00	100	27,00	100	43,00	100	3,00	100,00	100	100	7	7
1 1/2"	38,1	100,00	27,00	100	27,00	100	43,00	100	3,00	100,00	100	100	7	7
1"	25,4	100,00	27,00	100	27,00	100	43,00	100	3,00	100,00	95	100	7	8
3/4"	19,1	92,23	24,90	100,00	27,00	100,00	43,00	100	3,00	97,90	80	100	7	7
3/8"	9,5	2,63	0,71	98,86	26,69	100,00	43,00	100	3,00	73,40	45	80	7	7
4	4,8	0,00	0,00	31,38	8,47	99,80	42,91	100	3,00	54,39	28	60	5	5
10	2,00	0,00	0,00	4,29	1,16	78,26	33,65	100	3,00	37,81	20	45	5	5
40	0,42	0,00	0,00	1,25	0,34	35,42	15,23	100	3,00	18,57	10	32	5	5
80	0,18	0,00	0,00	1,00	0,27	25,60	11,01	100	3,00	14,28	8	20	3	3
200	0,075	0,00	0,00	0,83	0,22	15,91	6,84	96,20	2,89	9,95	3	8	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 - Curva granulométrica para traço com 3% de lama de carbonato de cálcio



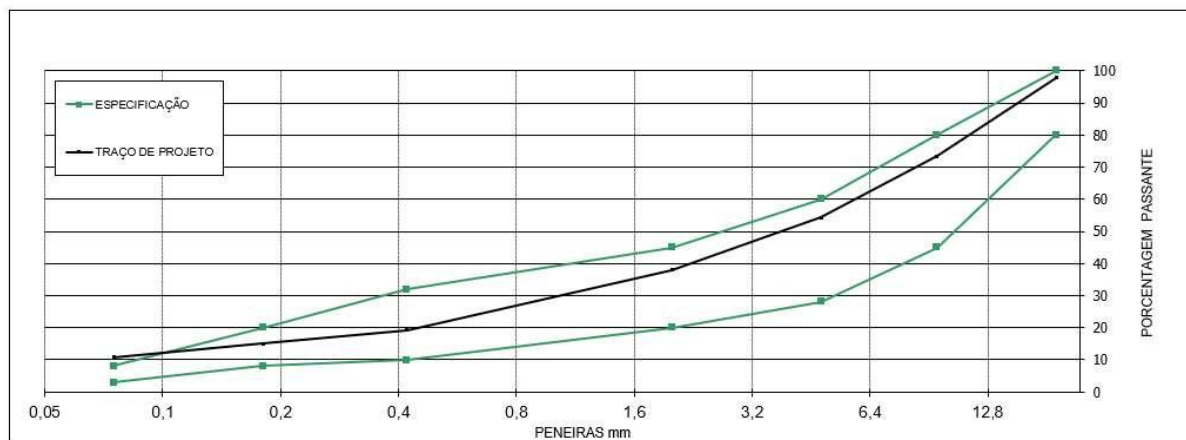
Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 8 - Dosagem para traço com 4% de lama de carbonato de cálcio

PENEIRAS		BRITA 3/4"		BRITA 3/8"		PÓ		LAMA DE CAL		DADOS DE PROJETO				
nº	mm	% que passa		% que passa		% que passa		% que passa		TRAÇO DE PROJETO	FAIXA DE ESPECIFICAÇÃO		TOLERANCIA	
		27	27	27	27	42	42	4	4		B - DNIT 031/2006		MÍNIMA	MAXIMA
2"	50,8	100,00	27,00	100	27,00	100	42,00	100	4,00	100,00	100	100	7	7
1 1/2"	38,1	100,00	27,00	100	27,00	100	42,00	100	4,00	100,00	100	100	7	7
1"	25,4	100,00	27,00	100	27,00	100	42,00	100	4,00	100,00	95	100	7	8
3/4"	19,1	92,23	24,90	100,00	27,00	100,00	42,00	100	4,00	97,90	80	100	7	7
3/8"	9,5	2,63	0,71	98,86	26,69	100,00	42,00	100	4,00	73,40	45	80	7	7
4	4,8	0,00	0,00	31,38	8,47	99,80	41,92	100	4,00	54,39	28	60	5	5
10	2,00	0,00	0,00	4,29	1,16	78,26	32,87	100	4,00	38,03	20	45	5	5
40	0,42	0,00	0,00	1,25	0,34	35,42	14,88	100	4,00	19,21	10	32	5	5
80	0,18	0,00	0,00	1,00	0,27	25,60	10,75	100	4,00	15,02	8	20	3	3
200	0,075	0,00	0,00	0,83	0,22	15,91	6,68	96,20	3,85	10,75	3	8	2	2

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 - Curva granulométrica para traço com 4% de lama de carbonato de cálcio



Fonte: Elaborado pelo autor

Vale salientar que, apesar da acurva de projeto aparecer fora da faixa de especificação para a peneira n°200, ainda está dentro do intervalo de tolerância de +/-2%, sendo possível utilizar o referido traço.

Em síntese, os traços utilizados foram:

Quadro 2 - Resumo dos traços de agregados do CBUQ

Brita ¾”(brita 01)	Brita 3/8” (brita zero)	Pó de pedra
27%	27%	46%

Traço com 2% de LCC

Brita ¾”(brita 01)	Brita 3/8” (brita zero)	Pó de pedra	LCC
27%	27%	44%	2%

Traço com 3% de LCC

Brita ¾”(brita 01)	Brita 3/8” (brita zero)	Pó de pedra	LCC
27%	27%	43%	3%

Traço com 4% de LCC

Brita ¾”(brita 01)	Brita 3/8” (brita zero)	Pó de pedra	LCC
27%	27%	42%	4%

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1.2 Cálculo do teor de CAP

A determinação do teor de asfalto, segundo Napa (1982) foi baseada somente no volume de vazios (vv) de 5%. Porém, o método Marshall pode apresentar diversas alternativas para a escolha do teor de projeto de ligante asfáltico, obtido através da análise de alguns parâmetros dos concretos asfálticos como: fluência; relação betume/vazios (RBV); percentagem de vazios (vv); vazios do agregado mineral (VAM) e massa específica aparente dos corpos de prova moldados.

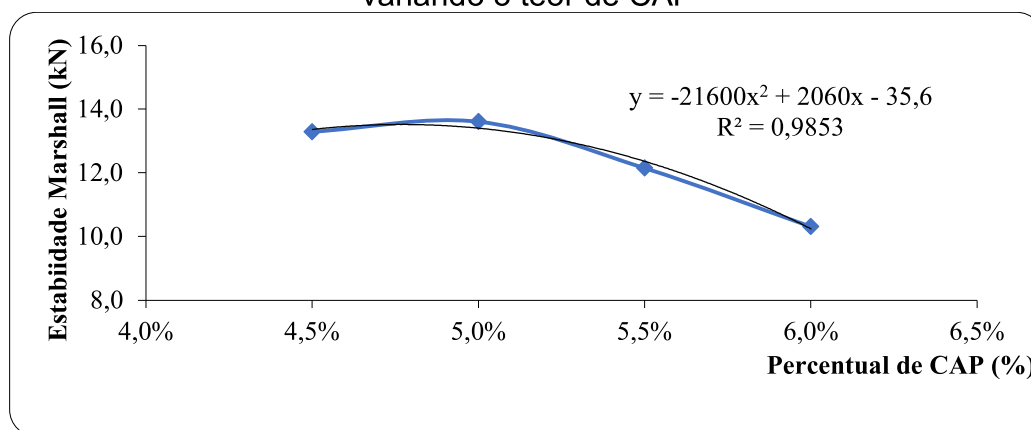
Para determinar o percentual do CAP, utilizou-se o traço padrão referência apresentado no quadro 2, sem adição de resíduo, inserindo 4 variações do percentual de CAP, 4,5%; 5,0%; 5,5%; e 6,0% da massa da mistura. Para cada variação foram confeccionados 4 corpos de provas, obtendo os resultados abaixo para os parâmetros estabilidade e Fluência:

Tabela 9 - Resultados do ensaio Marshall utilizados para determinação do teor de CAP

	% DE CAP	ESTABILIDADE	FLUÊNCIA
	%	kN	mm
CP 4,5	4,5%	13,290	4,420
CP 5,0	5,0%	13,610	4,830
CP 5,5	5,5%	12,150	5,170
CP 6,0	6,0%	10,310	5,000

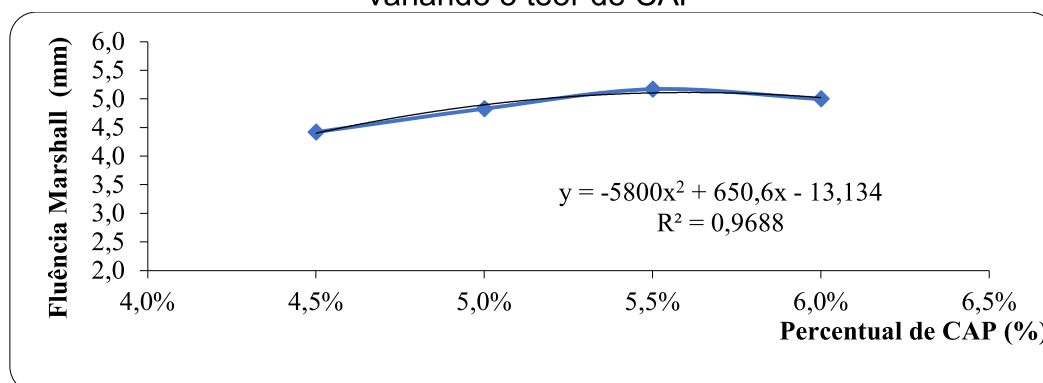
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16 - Curva de regressão para Estabilidade do CBUQ sem utilizar o resíduo e variando o teor de CAP



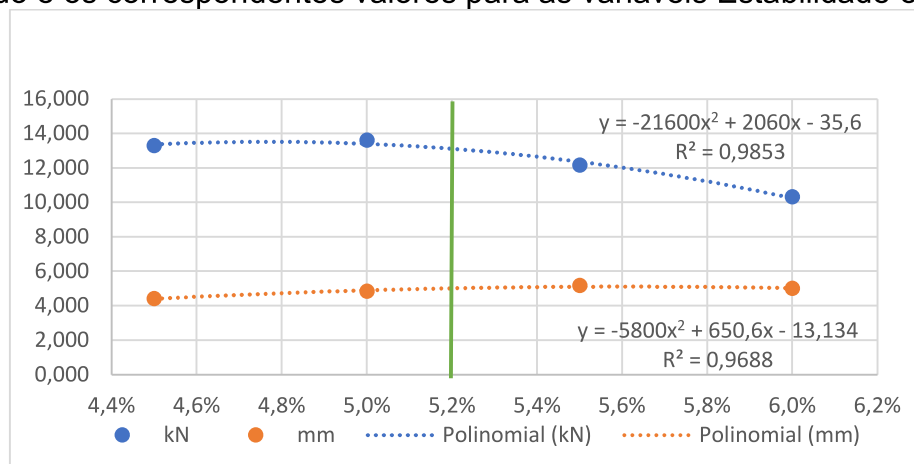
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17 - Curva de regressão para Fluência CBUQ sem utilizar o resíduo e variando o teor de CAP



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 - Indicação Visual do ponto de intersecção entre percentual de CAP escolhido e os correspondentes valores para as variáveis Estabilidade e Fluência



Fonte: Elaborado pelo autor

Feita uma análise visual da figura, foi estabelecido o percentual de 5,2% para o teor de CAP, por ser este um valor mediano dos percentuais de CAP adotados inicialmente, e que apresentou resultado próximo do máximo para estabilidade e diferente do máximo para fluência.

3.2.1.3 Confecção dos corpos de prova

Utilizando o percentual de 5,2% de CAP (fixo para todos os traços do teste) foi feita a determinação das massas para cada material nos correspondentes corpos de prova do experimento.

Assim ficando:

Tabela 10 - Massa dos materiais componentes de cada traço de CBUQ utilizado nos ensaios

Percentual de LCC	Massa brita 0 (g)	Massa brita 1 (g)	Massa pó de pedra (g)	Massa LCC (g)	Massa CAP (g)	SOMA (g)
Referência	307,15	307,15	523,30	0,00	62,40	1200,00
2%	307,15	307,15	512,83	10,47	62,40	1200,00
3%	307,15	307,15	507,60	15,70	62,40	1200,00
4%	307,15	307,15	502,36	20,94	62,40	1200,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Para cada percentual de LCC (REFERÊNCIA; 2%; 3% e 4%) foi mantida a mesma massa de CAP (62,4g), e feito 4 corpos de provas para cada variação, cada um com 1200 gramas de materiais, conforme norma DNER-ME 43/95.

A preparação dos corpos de prova de mistura asfáltica para a caracterização mecânica obedeceu ao estabelecido na norma DNER-ME 43/95, que consiste basicamente em:

a) Secagem, análise granulométrica e composição da mistura para os agregados;

b) Estimativa da porcentagem ótima do ligante para o agregado a ser utilizado;

c) Pré-aquecimento dos agregados e ligantes em estufa a 150°C durante 24 horas;

d) Aquecimento dos agregados a 175°C (10°C a 15°C acima da temperatura do cimento asfáltico e inferior a 177°C);

e) Aquecimento do ligante a 165°C;

f) Mistura dos agregados com o ligante numa panela aquecida a 150°C. A mistura deve chegar a aproximadamente 150°C;

g) Acondicionamento da mistura nos moldes metálicos previamente aquecidos a 150°C;

h) Moldagem dos corpos de prova por impacto de um soquete padronizado, com 4540g de massa e 45,72 cm de altura de queda livre, com 75 golpes de cada lado, para no mínimo três corpos-de-prova para cada teor de ligante;

i) Desmoldagem dos corpos-de-prova, mantendo-os em repouso sobre superfície lisa e plana, por no mínimo 12 horas, à temperatura ambiente;

j) Obtenção das dimensões (diâmetro e altura) e determinação de suas massas secas e submersa;

k) Imersão dos corpos-de-prova em banho-maria por um período de 30 a 40 minutos a (60 ± 1) °C. Como alternativa, podem ser colocados em estufa nas mesmas temperaturas por um período de 2 (duas) horas. Após esse tempo, os corpos-de-prova foram colocados no molde de compressão, centrando-os no prato da prensa Marshall e submetidos ao ensaio de ruptura, Marshall, para determinação dos parâmetros mecânicos de estabilidade e fluência, resultante da curva obtida;

Os valores limites de referência para os parâmetros de estabilidade, fluência, o percentual de vazios e a relação betume vazios estão informados na Tabela 12, que consta na norma DNIT ES 031/2006.

Tabela 11 – Ensaio Marshall – Valores limites

Características	Norma de referência	Camada de Rolamento	Camada de ligação (BINDER)
Porcentagem de Vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação Betume/vazios	DNER-ME 043	75 – 82	65 – 72
Estabilidade mínima, (Kgf), (75 golpes)	DNER-ME 043	500	500
Resistência à tração por Compressão diametral estática a 25°C, mínima, MPa	DNER-ME 043	0,65	0,65

Fonte: DNIT – ES 031/2006

3.2.3 Caracterização das misturas

3.2.3.1 Densidade teórica

Para calcular alguns parâmetros como percentual de vazios e relação betume vazio, faz-se necessário analisar alguns índices físicos dos agregados e do ligante, como a massa específica. Esse parâmetro foi determinado através do método que proporcionou o cálculo da densidade teórica da mistura, usada para calcular o percentual de vazios nos corpos de prova.

De posse de todas as massas específicas (Tabela 3), calculou-se as densidades teóricas das misturas para cada traço (referência; 2% de LCC; 3% de LCC e 4% de LCC). O procedimento é descrito pela Norma DNIT 428/2020, necessitando para tal de conhecer o percentual de cada material no traço e a massa específica de cada material. Nas tabelas 13 a 16 estão apresentados os valores obtidos para a densidade teórica em cada caso, utilizando a Equação 5, abaixo:

Equação 5 – Cálculo da densidade teórica em concreto asfáltico

$$Dt = \frac{100}{\frac{X}{Mag} + \frac{Y}{Mam} + \frac{Z}{Mfl} + \frac{L}{Mcap}}$$

Fonte: PINTO, 2015.

Onde:

Dt é a densidade teórica da mistura;

X é o percentual de agregado graúdo na mistura;

Y é o percentual de agregado miúdo na mistura;

Z é o percentual de filer na mistura;

L é o percentual de CAP na mistura;

Mag é a massa específica do agregado graúdo;

Mam é a massa específica do agregado miúdo;

Mfl é a massa específica do filer;

Mcap é a massa específica do CAP.

Tabela 12 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço referência

QUANTIDADE	MATERIAL	AGREGADO			LIGANTE	FILLER
		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	CAP 50/70	LCC
Traço inicial		27,0	27,0	46,0	5,2	0,0
%	100,00	25,596	25,596	43,608	5,200	0,000
massa específica (g/cm³)	38,42	2,856	2,880	2,796	1,045	2,609
		8,962	8,888	15,597	4,976	0,000
VALOR CALCULADO PARA A DENSIDADE TEÓRICA				2,6027		

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço com 2% de LCC

QUANTIDADE	MATERIAL	AGREGADO			LIGANTE	FILLER
		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	CAP 50/70	LCC
Traço inicial		27,0	27,0	44,0	5,2	2,0
%	100,00	25,596	25,596	41,712	5,200	1,896
massa específica (g/cm³)	38,47	2,856	2,880	2,796	1,045	2,609
		8,962	8,888	14,918	4,976	0,727
VALOR CALCULADO PARA A DENSIDADE TEÓRICA				2,5994		

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 14 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço com 3% de LCC

QUANTIDADE	MATERIAL	AGREGADO			LIGANTE	FILLER
		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	CAP 50/70	LCC
Traço inicial		27,0	27,0	43,0	5,2	3,0
%	100,00	25,596	25,596	40,764	5,200	2,844
massa específica (g/cm ³)	38,50	2,856	2,880	2,796	1,045	2,609
		8,962	8,888	14,579	4,976	1,090
VALOR CALCULADO PARA A DENSIDADE TEÓRICA				2,5977		

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 – Valor da densidade teórica e as respectivas informações utilizadas para o seu cálculo no traço com 4% de LCC

QUANTIDADE	MATERIAL	AGREGADO			LIGANTE	FILLER
		BRITA 1	BRITA 0	PÓ DE PEDRA	CAP 50/70	LCC
Traço inicial		27,0	27,0	42,0	5,2	4,0
%	100,00	25,596	25,596	39,816	5,200	3,792
massa específica (g/cm ³)	38,52	2,856	2,880	2,796	1,045	2,609
		8,962	8,888	14,240	4,976	1,453
VALOR CALCULADO PARA A DENSIDADE TEÓRICA				2,5961		

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3.2 Resistência Mecânica – Ensaio Marshall

Após determinados os traços para cada repetição, foram confeccionados quatro corpos de prova para cada percentual de LCC. Desta forma foram confeccionados e rompidos 16 corpos de prova na prensa MARSHALL.

Figura 19 – Corpos de prova confeccionado com e sem LCC utilizados no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Antes de romper os corpos de prova, foi feita a caracterização física deles com a aferição de diâmetro, altura, pesos. Os resultados estão abaixo descritos:

Tabela 16 – Diâmetros e alturas dos corpos de provas de CBUQ

Traço adotado	Identificação do corpo de prova	Diâmetro 01 (em milímetros)	Diâmetro 02 (em milímetros)	Diâmetro médio (a ser considerado)	Altura 01 (em milímetros)	Altura 02 (em milímetros)	Altura 03 (em milímetros)	Altura 04 (em milímetros)	Altura média (a ser considerada)
REFERÊNCIA	R - 01	101,95	101,55	101,75	61,69	61,38	62,07	60,61	61,44
	R - 02	103,29	101,50	102,40	61,54	60,86	65,17	59,88	61,86
	R - 03	103,14	102,93	103,04	59,83	60,34	62,16	59,15	60,37
	R - 04	101,47	102,88	102,18	60,34	60,38	59,46	62,41	60,65
2% DE LCC	2% - 01	101,99	103,83	102,91	62,44	61,03	61,90	60,20	61,39
	2% - 02	102,19	101,57	101,88	63,97	60,25	60,87	61,14	61,56
	2% - 03	101,69	101,75	101,72	60,80	59,68	59,20	60,89	60,14
	2% - 04	102,16	102,10	102,13	59,90	61,17	60,29	60,42	60,45
3% DE LCC	3% - 01	101,45	102,28	101,87	61,21	60,36	61,82	60,26	60,91
	3% - 02	101,69	101,57	101,63	59,79	60,83	61,13	59,84	60,40
	3% - 03	102,00	101,82	101,91	62,86	60,31	62,00	61,77	61,74
	3% - 04	102,72	101,89	102,31	61,55	60,26	60,41	60,56	60,70
4% DE LCC	4% - 01	101,50	101,69	101,60	59,83	59,01	60,59	58,16	59,40
	4% - 02	101,60	102,32	101,96	60,06	62,07	60,49	61,13	60,94
	4% - 03	101,73	101,34	101,54	59,62	61,20	59,80	60,86	60,37
	4% - 04	102,10	102,06	102,08	60,98	60,58	60,86	60,17	60,65

Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 17 – Volume e massa dos corpos de provas de CBUQ

Traço adotado	Identificação do corpo de prova	Volume (cm ³)	Pesagem a seco (em gramas)	Pesagem hidrostática (em gramas)
REFERÊNCIA	R - 01	499,31	1183,10	698,70
	R - 02	509,16	1183,20	699,80
	R - 03	503,11	1180,70	702,00
	R - 04	497,02	1182,10	702,70
2% DE LCC	2% - 01	510,39	1169,30	693,20
	2% - 02	501,57	1175,20	698,40
	2% - 03	488,50	1181,80	702,80
	2% - 04	494,92	1172,40	697,40
3% DE LCC	3% - 01	496,16	1177,50	701,20
	3% - 02	489,70	1180,00	701,10
	3% - 03	503,31	1175,10	696,30
	3% - 04	498,67	1172,40	694,10
4% DE LCC	4% - 01	481,26	1178,60	705,10
	4% - 02	497,29	1177,50	701,10
	4% - 03	488,57	1179,20	701,90
	4% - 04	496,09	1172,90	695,80

Fonte: Elaborada pelo autor

Medidas as características físicas dos corpos de provas, passou-se para o rompimento destes na prensa MARSHALL.

Figura 20- Corpo de prova inserido em anel para rompimento Marshall



Fonte: Elaborado pelo autor

Com isto, obteve-se informações para o cálculo de dois parâmetros pertencentes ao objetivo de estudo desta pesquisa: a estabilidade e a fluência. Para tal foi utilizado o procedimento descrito na Norma DNER – ME 043/95.

Equação 6 – Calibração de prensa Marshall

$$F = A \cdot X^3 + B \cdot X^2 + C \cdot X + D$$

Onde:

A =	-9,88E+00
B =	8,25E+00
C =	2,00E+03
D =	1,72E+01

Fonte: SENAI, 2019

Após romper cada corpo de prova, os resultados das leituras foram inseridos na equação 6, determinando assim os resultados para estabilidade. Para a fluência foi observado o número de voltas dadas pelo relógio da prensa Marshall até que o corpo de prova se rompesse. Os resultados para a Estabilidade e a Fluência para cada corpo de prova e, por fim, as médias destes parâmetros, para cada traço estudado, foram calculados utilizando os valores obtidos pela Equação 6. (Apêndice A).

3.2.3.3 Percentual de vazios na mistura

Para o cálculo do percentual de vazios, é necessário a utilização das densidades aparentes e teóricas, conforme DNER – ME 043/95. Assim, utilizando os valores das densidades teóricas combinadas com as informações das massas obtidas por pesagem hidrostática, foram calculadas ainda as densidades aparentes, e por fim os percentuais de vazios para cada corpo de prova, conforme apêndice B.

3.2.3.4 Relação betume vazios

Para realizar o cálculo da relação Betume vazios, foi utilizado o percentual de vazios ocupado pelo ligante CAP e o percentual de vazios do agregado mineral. O método para realização desse cálculo é descrito pela Norma DNER – ME 043/95. (Apêndice C).

3.2.3.5 Análise estatística dos dados

Para realizar as análises estatísticas dos dados, foi utilizado o software SISVAR. Foram feitas as estatísticas descritivas para organizar os resultados. Depois, foi feita uma análise de variância para determinar se as médias dos resultados de todos os parâmetros medidos, apresentavam diferença estatística significativa, à medida que variou o percentual de LCC.

Por fim, foi feita uma regressão para determinar o modelo que melhor representa os resultados obtidos em cada parâmetro.

A seguir é exposto com detalhe cada procedimento.

a. Estatística descritiva dos dados

Foram calculados os valores da média aritmética, variância, desvio-padrão e coeficiente de variação para cada parâmetro medido nos corpos de prova. Estes são suficientes para representar bem e de forma resumida todos os resultados obtidos os ensaios.

b. Análise de Variância (ANAVA)

De posse dos dados tabulados, foi feito o teste de ANAVA Tukey, para verificar a existência de diferença significativa entre os resultados das médias para cada teste. O nível de significância adotado para o teste foi de 5% (“p-valor igual a 0,05”).

c. Análise de Regressão

Após verificar a estatística descritiva dos dados, e identificar onde existem diferenças estatísticas significativas, foi feita uma análise de regressão, para determinar o modelo matemático que melhor ajusta a cada caso.

Tendo determinada a equação de regressão para cada variável, foram calculados os pontos críticos (máximo ou mínimo) para cada uma delas. Assim:

- a) Estabilidade: como a concavidade é voltada para baixo, existe um ponto de máximo e um ponto máximo, que são:

Tabela 18 – Cálculo do ponto de máximo e do ponto máximo para a variável Estabilidade

$y = -21x^2 + 49,621x + 1379,9$	
$y' = -42x + 49,621$	
para $y' = 0$, então	
$x = -49,621 / -42$	
Ponto de máximo (x)	1,18
Ponto máximo (y)	1409,21

Fonte: Elaborado pelo autor

Ponto de máximo: $x = 1,18 \%$;

Ponto máximo: $y = 1.409,21 \text{kgf}$.

- b) Fluência: a concavidade é voltada para acima, demonstrando a existência de um ponto de mínimo e um ponto mínimo que são, respectivamente, $x = 2,62\%$ e $y = 3,48 \text{mm}$.

Tabela 19 – Cálculo do ponto de mínimo e do ponto mínimo para a variável Fluência

$y = 0,173x^2 - 0,9077x + 4,6734$	
$y' = 0,346x - 0,9077$	
para $y' = 0$, então	
$x = 0,9077 / 0,346$	
ponto de mínimo (x)	2,62
ponto mínimo	3,48

Fonte: Elaborado pelo autor

- c) Percentual de vazios: aqui o gráfico possui concavidade voltada para baixo, indicando a existência de um ponto máximo com o seu correspondente ponto de máximo, que tiveram valores iguais a: $y = 5,63\%$ e $x = 0\%$.

Tabela 20– Cálculo do ponto de máximo e do ponto máximo para a variável Percentual de vazios

$y = -0,028x^2 - 0,0893x + 5,6286$	
$y' = -0,056x - 0,0893$	
para $y' = 0$, então	
$x = 0,0893 / (-0,056)$	
Ponto de máximo (x)	-1,59
Ponto máximo (y)	5,70
Porém, x deve ser maior ou igual a zero, assim:	
Ponto de máximo considerado (x)	0
Ponto máximo considerado (y)	5,63

Fonte: Elaborado pelo autor

- d) Relação betume-vazios: por fim, para esta variável a curva quadrática apresentou concavidade voltada para cima, apresentando assim ponto de mínimo e ponto mínimo, com valores iguais a: $x = 0\%$ e $y = 68,50\%$.

Tabela 21 – Cálculo do ponto de mínimo e do ponto mínimo para a variável Relação Betume-vazios

$y = 0,1345x^2 + 0,2982x + 68,504$	
$y' = 0,269x + 0,2982$	
para $y' = 0$, então	
$x = -0,2982 / 0,269$	
Ponto de mínimo (x)	-1,11
Ponto mínimo (y)	68,02
Porém, x deve ser maior ou igual a zero, assim:	
Ponto de mínimo considerado (x)	0
Ponto mínimo considerado (y)	68,50

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.3.6 Avaliação visual de absorção de CAP pelo método da lupa

Após romper todos os corpos de prova, foram feitas imagens da mistura utilizando uma lupa, buscando identificar, visualmente, diferença entre os traços com percentuais de LCC diferentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

4.1 ESTABILIDADE MARSHALL

A Estabilidade Marshall é o valor da carga expressa em *kgf* que produz a ruptura diametral de um corpo de prova de mistura betuminosa em condições padronizadas de ensaio (PINTO,2015).

A norma DNIT ES 031/2006 estabelece um valor mínimo para a estabilidade que é de 500 *kgf*. Para a norma qualquer valor acima é considerado adequado.

Tabela 22 – Valores das estatísticas descritivas para variável Estabilidade (em *Kgf*) obtidos no teste MARSHALL

	MÉDIA	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
REFERÊNCIA	1387,38	3572,81	59,77	4,38%
2%	1347,48	107129,34	327,31	24,29%
3%	1394,41	7197,67	84,83	6,08%
4%	1209,94	23349,08	152,8	12,62%

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos no teste MARSHALL para estabilidade nos corpos de prova da massa asfáltica estudada.

Tabela 23 – Valores médios para variável Estabilidade

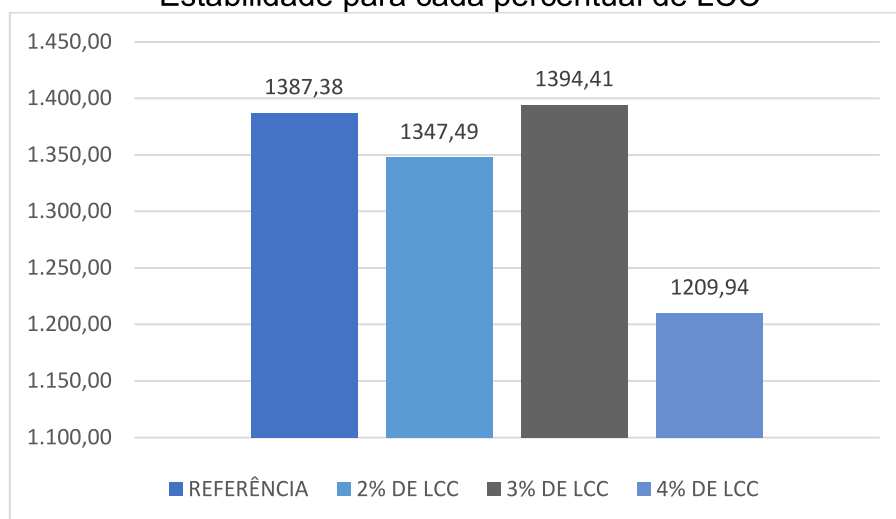
Traço adotado	Estabilidade Média (Kgf)	Parâmetro da Norma DNIT – ES 031/2006
REFERÊNCIA	1387,38	> 500 Kgf
2% DE LCC	1347,49	
3% DE LCC	1394,41	
4% DE LCC	1209,94	

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores para este parâmetro foram adequados a norma em todas as variações, desde a referência até a que conteve 4% de LCC (Tabela 24). Porém é possível observar que com 4% o valor da estabilidade demonstrou tendência de queda. Este fato também foi observado por Bardini (2009), que percebeu que, quando a porcentagem de material passante na peneira 200 aumenta, reduzem-se os vazios do esqueleto mineral, melhora-se a graduação e a trabalhabilidade da mistura asfáltica, que aumenta até certo ponto. Acima de um dado nível, quanto maior a porcentagem passante na peneira no 200, os finos começam a prejudicar a estabilidade do esqueleto mineral, diminuindo os contatos entre as partículas grossas e alterando a capacidade de compactação.

No gráfico de barras da Figura 21 é possível ver que, apesar de todas as variações apresentarem valores satisfatório, o traço que conteve 4% de resíduo apresentou estabilidade menor que os demais.

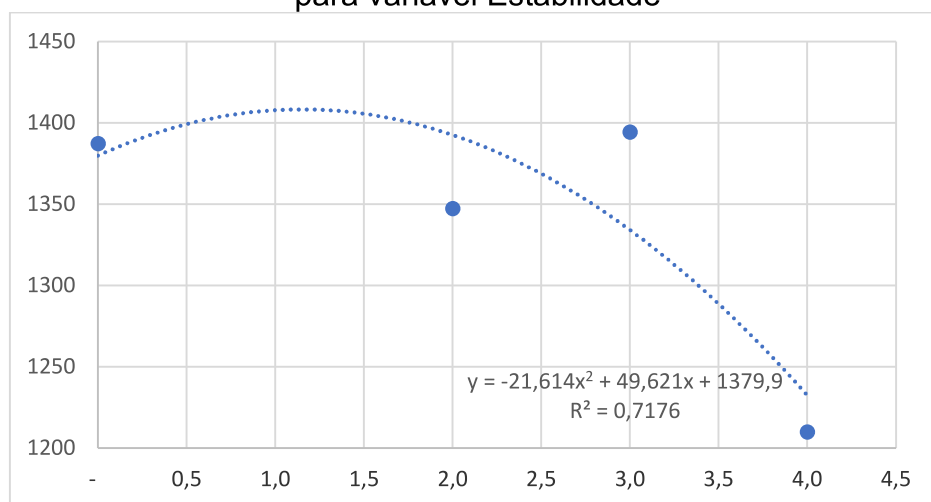
Figura 21 – Gráfico de barras para valores médios e desvio-padrão da variável Estabilidade para cada percentual de LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

Observando os resultados de dispersão (Figura 22), também é possível visualizar que, com o acréscimo de LCC a estabilidade aumentou, porém, a partir de um determinado valor este parâmetro passou a decair.

Figura 22 – Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável Estabilidade



Fonte: Elaborado pelo autor

A pesquisa de Lins (2019) resultou na produção de um concreto asfáltico com ligante asfáltico modificado com 1%, 4% e 6% de lignina originária da indústria de papel e celulose. No ligante asfáltico com 4% de lignina constatou-se maior estabilidade Marshall, o que indicou maior resistência à trilha de roda.

Em sua pesquisa sobre uso de LCC nas camadas de estrutura dos pavimentos, Zhou (1999) constatou que os teores de resíduos nas misturas eram de 10% e que as resistências mecânicas das misturas variam conforme a qualidade do solo. Nessa análise o esperado era que a lama de carbonato de cálcio exibisse um comportamento semelhante ao da cal hidráulica quando utilizada na estabilização de solo com grandes quantidades de teores de argila pelo fato de este resíduo ter elevado teor de cálcio.

Talvez o comportamento no caso da massa asfáltica também seja afetado pela falta de materiais argilosos na mistura, além da diminuição de vazios, fazendo com que o ligante em excesso dificulte a aderência entre agregados, limitando a quantidade de LCC a um percentual bem menor que 10% quando o parâmetro adotado para referência é a estabilidade da mistura.

O gráfico da figura 22 apresenta um comportamento que melhor se adequa a uma equação polinomial de grau 2, com equação de regressão apresentando valor negativo para o coeficiente da variável x^2 , informando assim uma parábola com a concavidade voltada para baixo, indicando, ainda a existência de um ponto de máximo para o valor da variável Estabilidade.

O ponto de máximo e o ponto máximo são, respectivamente, **$x = 1,18 \% \text{ de LCC}$, e $y = 1.409,21\text{kgf}$ (Tabela 19).**

Na análise de Variância (Figura 23), o “p-valor” foi de 0,5010, que é maior que 0,05 (nível de significância), demonstrando que, ao nível de significância de 5%, não existe indícios suficientes para afirmar que existem diferença significativa entre as médias obtidas em cada percentual de LCC utilizado.

Mesmo sem demonstrar essa diferença, o teste demonstra ainda que o experimento apresentou variabilidade aceitável, uma vez que esta foi de $CV = 14,08\% < 20\%$.

Todas as médias foram agrupadas em um mesmo grupo “a1”, confirmando que os experimentos apresentaram médias estatisticamente iguais.

Figura 23 – Resultado do Software SISVAR para o teste de ANAVA na variável Estabilidade

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)			
TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA			
FV	GL	SQ	Fc Pr>Fc
TRATAMENTO	3	88275.608525	0.833 0.5010
erro	12	423746.768050	35312.230671
Total corrigido	15	512022.376575	
CV (%) = 14.08			
Média geral: 1334.8037500 Número de observações: 16			
Teste Tukey para a FV TRATAMENTO			
DMS: 394,637980144355 NMS: 0,05			
Média harmonica do número de repetições (r): 4			
Erro padrão: 93,957744053954			
Tratamentos	Médias	Resultados do teste	
4% de LCC	1209.940000	a1	
2% de LCC	1347.485000	a1	
REFERÊNCIA	1387.382500	a1	
3% de LCC	1394.407500	a1	

Fonte: Elaborado pelo autor

O valor a partir do qual a estabilidade diminui é o ponto de máximo $x = 1,18\%$ de LCC acrescentado. A partir desta quantidade de LCC o teste indica que a massa asfáltica perde estabilidade. Porém esta perda não se mostrou estatisticamente relevante, uma vez que o teste de ANAVA não identificou diferença significativa entre as médias para as variações de LCC.

Desta forma é possível inferir que o resíduo pode ser utilizado como material de enchimento quando o parâmetro utilizado para verificação é a Estabilidade.

Ainda segundo Pinto (2015), a estabilidade diminui à medida que a quantidade de material de enchimento aumenta na mistura. Isto possibilita diminuir a quantidade de Ligante Asfáltico (CAP), tornando assim a mistura mais econômica financeiramente, uma vez que o ligante é o material de maior valor financeiro presente na mistura.

4.2 FLUÊNCIA

A fluência é definida por Pinto (2015), como sendo a deformação diametral de um corpo de prova, expressa em milímetros, medida no momento da ruptura na prensa Marshall. Simulando desta forma o quanto a massa asfáltica deforma antes de romper. Assim valores elevados de fluência indicam alta deformabilidade da massa asfáltica.

A Tabela 24 traz os resultados obtidos no teste de rompimento MARSHALL para este parâmetro.

Tabela 24 – Valores das estatísticas descritivas para variável Fluência (em mm) obtidos no teste MARSHALL

	MÉDIA	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
REFERÊNCIA	4,67	1,46	1,21	25,83%
2%	3,57	0,17	0,41	11,68%
3%	3,48	0,49	0,7	20,15%
4%	3,83	0,05	0,22	5,80%

Fonte: Elaborado pelo autor

A norma DNIT 31/2006 traz o intervalo aceitável para este parâmetro, de acordo com cada faixa na camada de pavimento. Assim, para a faixa B que está sendo adotada, o intervalo para fluência é entre *2mm e 4,6mm*.

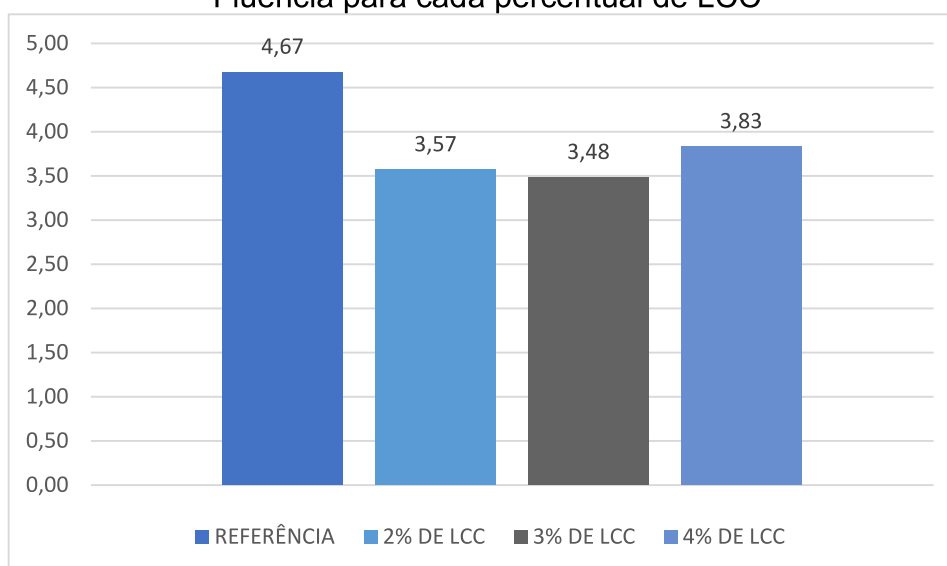
A Tabela 25 mostra que as variações estão dentro do intervalo normatizado.

Tabela 25 – Valores médios para variável Fluência

Traço adotado	Fluência Média (mm)	Parâmetro da Norma DNIT – ES 031/2006 2 mm a 4,6 mm
REFERÊNCIA	4,67	
2% DE LCC	3,57	
3% DE LCC	3,48	
4% DE LCC	3,83	

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Gráfico de barras para valores médios e desvio-padrão da variável Fluência para cada percentual de LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

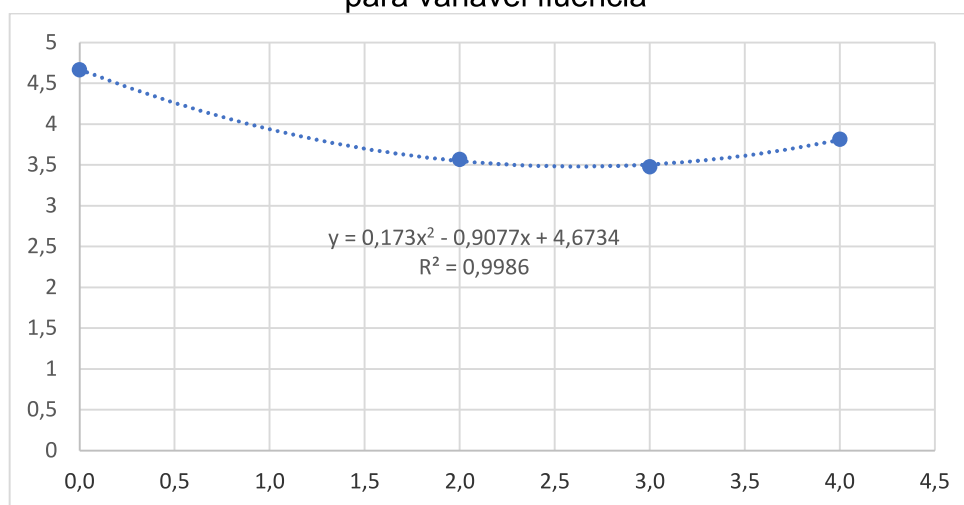
O gráfico apresentado na Figura 24 indica que a fluência diminui com o acréscimo do teor de resíduo. Porém, com 4% de LCC, o valor da Fluência volta a crescer.

Molina (2004) desenvolveu um estudo no qual usou um resíduo da indústria de papel constituído por lama de cal e *dregs* na proporção de 10:1, respectivamente, e obteve como resultado que a adição do resíduo não melhora as propriedades mecânicas das misturas compactadas.

Neste experimento foi observado o mesmo fenômeno, conforme verificado na ANAVA a seguir (Figura 26), onde o teste estatístico não identificou indícios suficientes para indicar variação nos resultados ao serem acrescentados resíduos na mistura.

Este comportamento para a Fluência também é visto no gráfico de dispersão apresentado na Figura 25. A curva se comporta como uma parábola de concavidade voltada para cima, indicando assim um ponto de mínimo e um respectivo ponto mínimo. **Esses valores são $x = 2,62\%$ de LCC e $y = 3,48\text{mm}$ (tabela 20).**

Figura 25 – Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável fluência



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados da ANAVA para a Fluência (Figura 26), indicam um “p-valor” de 0,1437 que é maior que 0,05 (nível de significância), indicando que, ao nível de significância de 5%, não existe indícios suficientes para afirmar diferença estatística significativa entre as médias da Estabilidade obtidas em cada percentual de LCC utilizado. Aqui acontece o mesmo fenômeno observado por Molina (2004) em sua pesquisa, o qual seja, a adição do resíduo não modifica as propriedades da mistura.

Mesmo sem demonstrar essa diferença estatística, o teste demonstra ainda que o experimento apresentou variabilidade aceitável, uma vez que esta foi de $CV = 18,96\% < 20\%$.

Todas as médias foram agrupadas em um mesmo grupo a1, confirmando que os experimentos apresentaram médias estatisticamente iguais.

Com base nas médias obtidas, o valor de LCC que apresenta menor Fluência é o de 2,62% (Tabela 20). Para este valor de resíduo acrescentado, a Fluência é de 3,48mm, que por sua vez está dentro do intervalo determinado pela Norma DNIT 031/2006. Ao adotar este percentual de LCC, é obtido um valor para Estabilidade igual a 1.365,75kgf. Valor este que é bem acima do mínimo estabelecido por norma.

Figura 26 – Resultado teste ANAVA para variável Fluência

 Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

 TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	3	3.546750	1.182250	2.177	0.1437
erro	12	6.515950	0.542996		
Total corrigido	15	10.062700			

CV (%) = 18.96
 Média geral: 3.8875000 Número de observações: 16

Teste Tukey para a FV TRATAMENTO

 DMS: 1,54751387563504 NMS: 0,05

 Média harmonica do número de repetições (r): 4
 Erro padrão: 0,368441254928562

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
3% de LCC	3.480000	a1
2% de LCC	3.570000	a1
4% de LCC	3.827500	a1
REFERÊNCIA	4.672500	a1

Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, com base em parâmetros de Estabilidade e Fluência, a utilização do Resíduo como material de enchimento em CBUQ tem viabilidade técnica adequada. **E ainda, o percentual de substituição que apresenta melhor resultado para o caso específico, está no intervalo entre 1,18% e 2,62%.**

Até aqui os dados demonstram ainda a possibilidade de diminuir a quantidade de CAP, uma vez que este interfere tanto na Estabilidade quanto na Fluência. Como a utilização de LCC está aumentando a estabilidade e diminuindo a Fluência, indica

que, mesmo se diminuir o percentual de CAP na mistura ainda é possível ter valores aceitáveis (nos termos da Norma DNIT 031-2006), para estes dois parâmetros.

Mais uma vez é verificado que o uso de LCC como material de enchimento é viável tecnicamente.

4.3 PERCENTUAL DE VAZIOS NA MISTURA

É, por definição, o volume de vazios existente na mistura, expresso como a porcentagem do volume total da mistura (PINTO, 2015). Esse valor é dado pela diferença relativa entre a sua massa específica máxima e sua massa específica real (BALBO, 2007).

A Tabela 27 apresenta os resultados obtidos no ensaio Marshall para o parâmetro percentual de vazios na mistura.

Tabela 26 – Valores das estatísticas descritivas para variável Percentual de vazios (%) obtidos no teste MARSHALL

	MÉDIA	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
REFERÊNCIA	5,65	0,22	0,47	8,41%
2%	5,21	0,05	0,21	4,11%
3%	5,28	0,13	0,37	6,96%
4%	4,76	0,24	0,49	10,33%

Fonte: Elaborado pelo autor

A norma DNIT ES 031/2006, estabelece como intervalo aceitável para a camada de ligação, faixa B, o percentual entre 4% e 6%. Para os traços analisados, todas as variações apresentaram parâmetros dentro desse intervalo (Tabela 27).

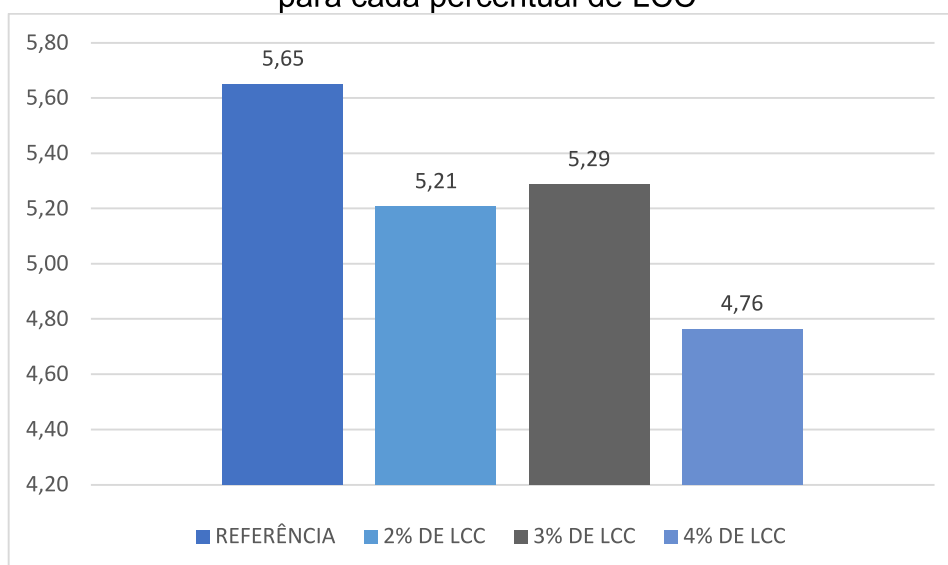
Tabela 27 – Valores médios para variável Percentual de vazios

Traço adotado	Percentual de vazios da mistura médio (%)	Parâmetro da Norma DNIT – ES 031/2006
REFERÊNCIA	5,65	4% a 6%
2% DE LCC	5,21	
3% DE LCC	5,29	
4% DE LCC	4,76	

Fonte: Elaborado pelo autor

O resíduo LCC acrescentado na massa asfáltica possui característica de material de enchimento, assim, a consequência deste acréscimo é um preenchimento dos vazios na mistura, diminuindo a quantidade do percentual de vazios, fenômeno este observado de maneira mais clara na figura 27.

Figura 27 – Gráfico de barras para valores médios da variável Percentual de vazios para cada percentual de LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

A curva de tendência no gráfico de dispersão (Figura 28) está decrescendo em todo o intervalo de variação do percentual de LCC acrescido, reforçando a ideia de que, à medida que é aumentado o percentual de LCC na mistura, o percentual de vazios vai diminuindo.

O índice de vazios de Rigden, modificado por Anderson, é um método para analisar o efeito do fíler na mistura asfáltica. É determinado sob condições padronizadas, em que os vazios da mistura fíler-ligante asfáltico resultam em uma máxima densificação do fíler. Com isso é possível avaliar o teor de ligante asfáltico que preencherá os vazios e ainda avaliar o volume de ligante em relação ao teor determinado para a mistura (BARDINI *et al.*, 2009).

Bardini *et al.* (2009), comentam que, teoricamente, quando a quantidade de ligante aumenta além do índice de vazios Rigden, as partículas perdem o contato entre elas e a quantidade adicional de ligante promove lubrificação entre as partículas. Quando a quantidade livre de ligante asfáltico diminui, a rigidez da mistura aumenta. Quanto mais fino for o fíler, menor deve ser a relação fíler-ligante, pois o volume livre de ligante é que aumenta a espessura de recobrimento das partículas dos agregados. Em outras palavras, a razão do volume de ligante livre pelo volume total de ligante tem efeito significativo na rigidez do mástico.

Pinilla (1965) propôs uma técnica de determinação da concentração crítica de fíler – denominada de C_s – a partir da qual o sistema fíler-ligante asfáltico deixa de ser viscoso, transformando seu escoamento em não newtoniano ou plástico. Para dosar misturas asfálticas que se deformam sem ruptura, ou seja, sem comprometer a vida de fadiga, a concentração em volume de fíler deve ser igual ou menor que C_s .

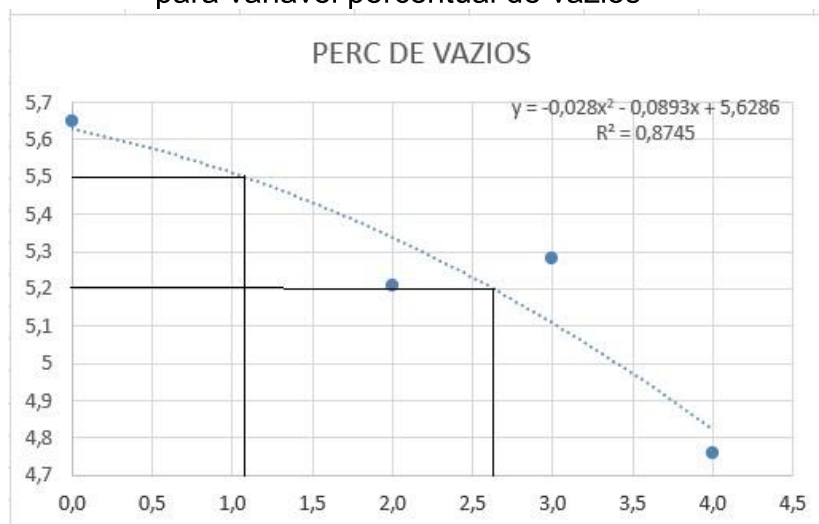
Quanto maior a concentração volumétrica do sistema fíler-ligante – C –, mais próxima estarão as partículas dos agregados na mistura e menor será o volume de poros e, conseqüentemente, mais rígida ficará a mistura.

Assim ao acrescentar materiais muito finos, a tendência é que a mistura apresente volumes de poros cada vez menores, fato este verificado nesta pesquisa. Para Bardini *et al.* (2009), o fíler, além de preencher os vazios, aumenta a viscosidade – diminuindo a penetração – do ligante asfáltico. O fíler ativa o asfalto, espessando-o e encorpendo-o, fazendo com que o mástico tenha maior viscosidade que o ligante asfáltico correspondente. Simultaneamente, têm-se aumento do ponto de amolecimento, diminuição da suscetibilidade térmica, aumento da resistência aos

esforços de cisalhamento (estabilidade), do módulo de rigidez e da resistência à tração na flexão.

Segundo Motta e Leite (2000), quanto menor o tamanho da partícula de fíler, maior a incorporação do mineral no ligante, aumentando a rigidez da mistura.

Figura 28 - Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável percentual de vazios



Fonte: Elaborado pelo autor

A equação de regressão que se ajustou possui tendência polinomial de grau 2, com curva parabólica de concavidade voltada para abaixo, indicando assim a existência de um valor máximo. **Para esse caso o ponto máximo e o ponto de máximo são, respectivamente, $y = 5,63\%$ e $x = 0\%$ de LCC (Tabela 21)**, uma vez que o valor da abscissa não pode ser negativo, por se tratar da quantidade de LCC crescido na mistura.

Assim, o máximo valor do percentual de vazios se apresenta quando não há presença do resíduo e, à medida que aumenta a quantidade de resíduos na amostra, este parâmetro diminui.

No teste de ANAVA (Figura 29), a variável PERCENTUAL DE VAZIOS apresentou um “p-valor” de 0,0576 que, apesar de ser maior que 0,05 é quase igual, deixando a entender que pode haver alguma diferença estatística significativa entre as médias para os diferentes percentuais de LCC.

Figura 29 – Resultado teste ANAVA para variável Percentual de vazios

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)

TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TRATAMENTO	3	1.595937	0.531979	3.302	0.0576
erro	12	1.933533	0.161128		
Total corrigido	15	3.529470			

CV (%) = 7.68
Média geral: 5.2264375 Número de observações: 16

Teste Tukey para a FV TRATAMENTO

DMS: 0,84298809723039 NMS: 0,05

Média harmonica do número de repetições (r): 4
Erro padrão: 0,200703591304441

Tratamentos	Médias	Resultados do teste
4% de LCC	4.762900	a1
2% de LCC	5.205725	a1 a2
3% de LCC	5.286300	a1 a2
REFERÊNCIA	5.650825	a2

Fonte: Elaborado pelo autor

Esta diferença entre grupos é observada no fato de que o teste separou os resultados em dois grupos, “a1” e “a2”. Os resultados obtidos no traço REFERÊNCIA diferiu significativamente dos obtidos quando adicionado 4% de LCC.

No caso de 2% e 3% o teste apresentou um conflito, tornando assim incerta a afirmação de que estes diferem dos demais, podendo ser estatisticamente iguais ao REFERÊNCIA e diferir do traço com 4% de LCC, ou serem iguais a este e diferir do REFERÊNCIA.

Em resumo, para o teste de ANAVA, o valor do percentual de vazios na mistura apresentou diferença estatística significativa entre a amostra Referência (sem adição de LCC) e a amostra com 4% de LCC, apesar de as demais variações (2% e 3% de LCC) apresentarem médias maiores que a referência.

O teste demonstra ainda que o experimento apresentou variabilidade aceitável, uma vez que esta foi de $CV = 7,68\% < 20\%$.

Com relação a análise dos valores máximos ou mínimos para percentual de acréscimo de LCC, pode-se manter o intervalo adotado para os parâmetros de Estabilidade e Fluência, **entre 1,18% e 2,62%**, uma vez que a variável Percentual de vazios não apresenta informações para inferir valores diferentes.

Aqui basta perceber que, para estes valores de LCC o percentual de vazios ainda se encaixa dentro dos parâmetros da norma. Para 1,18% de LCC tem-se 5,48% de vazios e, para 2,62% de LCC, tem-se 5,20% de vazios na mistura.

Assim, assim como verificado para as variáveis Estabilidade e Fluência, também com base no percentual de vazios, é possível afirmar a existência de viabilidade técnica do uso de LCC como material de enchimento em CBUQ.

4.4 RELAÇÃO BETUME VAZIOS

A relação betume-vazios (RBV) indica qual porcentagem de vazios do agregado é preenchida pelo ligante (CAP) (PINTO,2015). Assim, para RBV = 0% tem-se uma mistura sem asfalto. Para RBV = 100%, indica que todos os vazios estão preenchidos com asfalto.

A tabela 29 expõe os valores das estatísticas descritivas da variável Relação Betume vazios, obtidos no ensaio Marshall.

Tabela 28 – Valores descritivos para variável Relação Betume-vazios (%)

	MÉDIA	VARIÂNCIA	DESVIO PADRÃO	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO
REFERÊNCIA	68,41	3,71	1,93	2,81%
2%	70,2	0,81	0,9	1,28%
3%	69,86	2,42	1,56	2,23%
4%	72,13	4,75	2,18	3,02%

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a relação betume-vazios, a norma DNIT 031/2006 também traz um intervalo aceitável entre 65% e 72% para a camada de ligação, faixa B. Todos os percentuais de LCC, os resultados da relação betume-vazio se enquadram no intervalo normativo, mesmo tendo o valor para 4% de LCC ficando no limite superior, como pode ser visto na tabela abaixo.

Tabela 29 – Valores médios para variável Relação betume-vazios

Traço adotado	Relação Betume Vazio Média (%)	Parâmetro da Norma DNIT – ES 031/2006
REFERÊNCIA	68,41	65% a 72%
2% DE LCC	70,20	
3% DE LCC	69,86	
4% DE LCC	72,13	

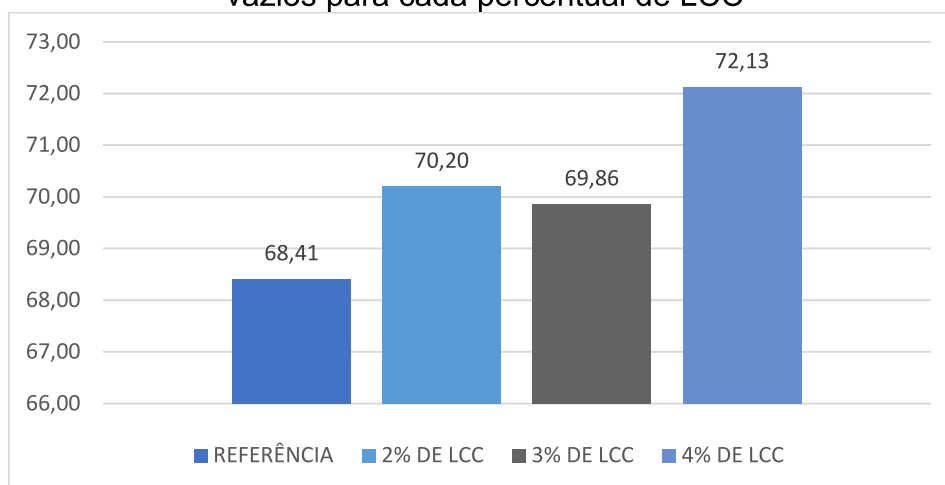
Fonte: Elaborado pelo autor

O gráfico de barras (Figura 30) apresenta visualmente esta variação. À medida que aumenta o percentual de LCC, aumenta também a relação betume vazios.

De modo a evitar os danos causados pelo excesso ou pela ausência de fíler, McGennis *et al.* (1994) estabeleceram, como parte das especificações Superpave de dosagem de misturas asfálticas, a razão, em peso, entre o fíler mineral e o ligante asfáltico, denominada de *dust proportion*, recomendando valores de 0,6 a 1,8 para todo tipo de mistura. Estabeleceram, também, valores de relação betume-vazios (RBV) em função do volume de tráfego, sendo tais valores relativamente mais baixos do que os adotados no Brasil.

Desta forma, ao notar um acréscimo na relação Betume vazios à medida em que é aumentado o percentual de LCC na mistura, é preciso tomar cuidado em não exceder o limite da norma, conforme dito acima, pois este excesso pode causar trincamento, e diminuir o tempo de uso da mistura.

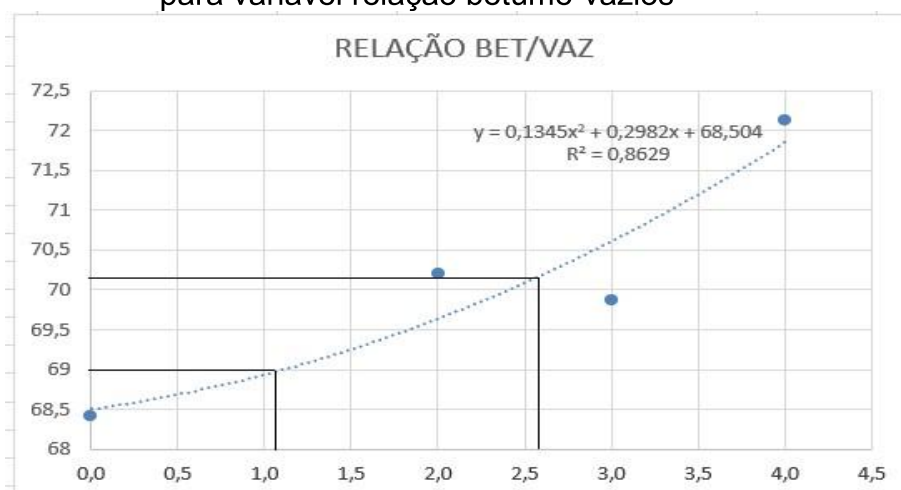
Figura 30 – Gráfico de barras para valores médios da variável Relação Betume-vazios para cada percentual de LCC



Fonte: Elaborado pelo autor

A equação de regressão para esta variável foi uma quadrática, que apresentou gráfico parabólico com a concavidade voltada para cima, mostrando assim existência de um valor mínimo e um ponto de mínimo para este parâmetro. **Estes valores são, respectivamente, $y = 68,50$ e $x = 0\%$ de LCC (Tabela 22)** (uma vez que os valores para abscissa devem ser não negativos).

Figura 31 – Gráfico de dispersão, com curva de tendência e equação de regressão para variável relação betume-vazios



Fonte: Elaborado pelo autor

Na análise de variância (Figura 32), o “p-valor” foi de 0,0618 que, apesar de ser maior que 0,05 foi considerado igual, deixando a entender que pode haver alguma diferença estatística significativa entre as médias para os diferentes percentuais de LCC.

Esta diferença entre grupos é observada no fato de que o teste separou os resultados em dois, “a1” e “a2”. Os resultados obtidos no traço REFERÊNCIA diferiu estatisticamente dos obtidos quando adicionado 4% de LCC. Isto indica ainda que há diferença técnica quando da utilização de LCC na mistura, uma vez que a relação betume vazios é um parâmetro que melhor indica o consumo de CAP na mistura asfáltica (PINTO, 2015). Assim, se aumenta a relação betume-vazios, quer dizer que houve diminuição do consumo de CAP na mistura, visto que este passou a preencher vazios que não deveriam ser preenchidos, por serem suportáveis e necessários para a mistura.

No caso de 2% e 3% o teste apresentou um conflito, tornando assim incerta a afirmação de que estes diferem dos demais, podendo ser estatisticamente iguais ao REFERÊNCIA e diferir do traço com 4% de LCC, ou serem iguais a este e diferir do REFERÊNCIA. Isso *significa que o acréscimo de LCC melhora a relação betume-vazios, melhorando assim a absorção de CAP pela mistura, e como consequência possibilitando diminuir esta quantidade de CAP, à medida que é acrescido o resíduo.*

O teste demonstra ainda que o experimento apresentou variabilidade aceitável, uma vez que esta foi de $CV = 2,44\% < 20\%$.

Figura 32 – Resultado teste ANAVA para variável Relação Betume-vazios

Opção de transformação: Variável sem transformação (Y)				
TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA				
FV	GL	SQ	QM	Fc Pr>Fc
TRATAMENTO	3	28.135365	9.378455	3.209 0.0618
erro	12	35.065978	2.922165	
Total corrigido	15	63.201343		
CV (%) =		2.44		
Média geral: 70.1529750		Número de observações:		16
Teste Tukey para a FV TRATAMENTO				
DMS: 3,58995211818113 NMS: 0,05				
Média harmonica do número de repetições (r): 4				
Erro padrão: 0,854717029928618				
Tratamentos	Médias	Resultados do teste		
REFERÊNCIA	68.411550	a1		
3% de LCC	69.864650	a1 a2		
2% de LCC	70.203950	a1 a2		
4% de LCC	72.131750	a2		

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, é possível considerar como intervalo adequado para esta variável aquele que apresentou melhores resultados para estabilidade e fluência, qual seja, entre 1,18% e 2,62% de LCC acrescido na mistura. Para o limite inferior tem-se uma relação betume vazio de 69,04% e, para o percentual de 2,62% de LCC, tem-se 70,21% dos vazios dos agregados preenchidos pelo CAP.

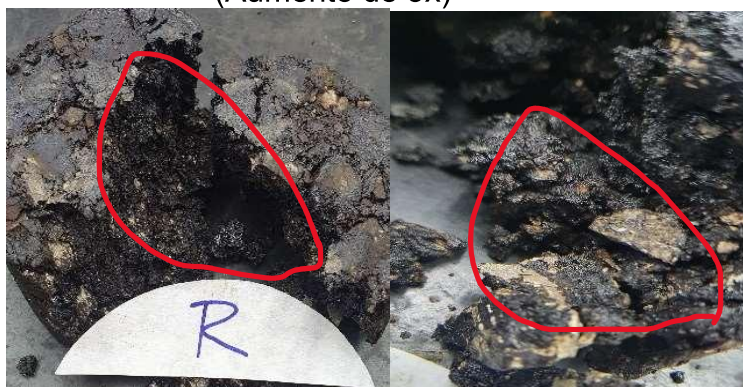
A análise com base na relação betume-vazios também permite afirmar que é viável tecnicamente a utilização do resíduo LCC como material de enchimento em Concreto asfáltico usinado a quente em uma quantidade variando entre 1,18% e 2,62% da massa total da mistura.

4.5 ANÁLISE DAS IMAGENS POR LUPA

Nas imagens por lupa foi possível identificar algumas diferenças físicas com relação ao teor de CAP, corroborando os resultados numéricos. Abaixo são apresentadas duas imagens para cada percentual, desde o Referência, até o que foi inserido 4% de LCC.

a. REFERÊNCIA

Figura 33 – Imagem por lupa da massa asfáltica Referência, sem adição de resíduo (Aumento de 3x)



Fonte: Elaborado pelo autor

b. 2% de LCC

Figura 34 – Imagem por lupa da massa asfáltica com 2% de resíduo (Aumento de 3x)



Fonte: Elaborado pelo autor

c. 3% de LCC

d.

Figura 35 – Imagem por lupa da massa asfáltica com 3% de resíduo (Aumento de 3x)



Fonte: Elaborado pelo autor

e. 4% de LCC

Figura 36 – Imagem por lupa da massa asfáltica com 4% de resíduo (Aumento de 3x)



Fonte: Elaborado pelo autor

A seguir é apresentada uma sequência de imagens ladeadas, para cada percentual de lama de carbonato de cálcio.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nas fotos do corpo de prova com o traço referência (Figura 37.a) tem-se um aspecto limpo, sem apresentar aspecto de excesso de ligante. Isto demonstra que o traço foi adequado, e condiz com os números apresentados nos parâmetros de percentual de vazio e relação betume vazio.

Aqui, com o traço adicionado de 2% de LCC, já é perceptível um excesso de CAP, onde na imagem o aspecto da mistura aparece mais “pastoso”. Indicando assim que o CAP adicionado foi em excesso, mesmo tendo mantido a mesma quantidade do traço referência.

É possível observar que a mistura começa apresentar sinais de encharcamento a medida que aumenta o percentual de LCC adicionado.

Por fim, quando é visualizado o corpo de prova com 4% de LCC, a imagem trás o ligante “minando”, exsudando do material, indicando que há excesso de CAP. Tal imagem condiz com a análise numérica efetuada acima, em que, a medida que aumenta o percentual de LCC nas misturas, é observada variação nos parâmetros sempre na direção indicativa do excesso de CAP.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado o concreto asfáltico usinado a quente (CBUQ), em específico a utilização de Lama de carbonato de cálcio como material de enchimento na massa asfáltica. Foram caracterizados os materiais que compõem do CBUQ, e definidos traços iniciais com variações de ligante asfáltico (CAP) com a finalidade de determinar o percentual de CAP nas misturas de teste. Este percentual foi definido em 5,2%, com base em parâmetros de estabilidade e fluência.

Utilizando este percentual, foram feitos testes com traços de CBUQ formados com acréscimos de porções variadas do resíduo lama de cal. Observou-se que este material se adequou bem ao traço, uma vez que as misturas testadas mostraram parâmetros de estabilidade, fluência, percentual de vazios e relação betume-vazios todas dentro das faixas normativas do DNIT.

Os percentuais de lama de carbonato de cálcio usados em substituição do agregado mineral apresentaram bons resultados, onde, no caso específico da pesquisa, com uma análise dos dados obtidos nos ensaios, verificou-se que os percentuais *entre 1,18% e 2,62% de LCC proporcionaram resultados melhores para estabilidade e fluência, apesar de os testes indicarem que essa diferença não tem significância estatística*, o que impede de fazer uma generalização para os valores.

Foi verificado ainda que a medida que se insere LCC na mistura, há sobra de ligante, indicando a possibilidade de ajuste do traço para um valor menor de CAP e, por conseguinte, diminuir o custo de fabricação da mistura. Informação esta que pôde ser confirmada com a análise das fotos das misturas onde, a amostra com 4% de LCC apresentou exsudação do ligante, indicando excesso deste.

Diante de todas as análises, conclui-se pela viabilidade técnica da utilização de LCC como material de enchimento em misturas asfálticas a quente, e que essa utilização não acarreta resultados com diferença estatística comprovada para os parâmetros de estabilidade e fluência, apesar de ter no caso particular valores aumentando até valores próximos de 3% e LCC. Já para os parâmetros de percentual de vazios e relação betume-vazios, os valores com as massas contendo resíduos são estatisticamente diferentes daqueles obtidos com massas sem resíduos, e inclusive, melhores, sendo comprovado pelo aparecimento de exsudação do ligante na mistura com 4% de LCC, permitindo assim inferir que o LCC melhora o consumo de CAP e possibilita fabricação de uma massa asfáltica mais barata.

REFERÊNCIAS

ANITELLI, A. **Estudo do dano por umidade de misturas densas com ligantes asfálticos convencional e modificado com polímero SBS**. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

Agencia Goiana de Transportes e Obras - **AGETOP – PAV 13/18**. Pavimentacao – Especificacao de Servico – Camadas de Misturas Asfalticas Usinadas a Quente, 2018.

ARAMBULA, E. M. **Influence of fundamental material properties and air voids structure on moisture damage of asphalt mixes**. 204 f. Thesis of doctorate. Texas A e M University, College Station, Texas, 2007.

ARAÚJO, M. A. *et al.* Análise Comparativa de Métodos de Pavimentação – Pavimento Rígido (concreto) x Flexível (asfalto). **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 10, p. 187-196, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL - BRACELPA. **Relatório Estatístico 2010/201**, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL – ABRELPE. **Florestas plantadas**: oportunidades e desafios da indústria brasileira de celulose e papel no caminho da sustentabilidade. Brasília: 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro: 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP. **Gás natural veicular**: Mercado em expansão, 2005.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP. **Glossário**, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico da ABRAF 2013** - Ano base 2012, 2012.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARDINI, V. S. S. *et al.* A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. **Rev Pesquisa e Tecnologia Minerva**. v. 7, n. 1, p. 71-78, 2009.

BARRETO, S. S. Estudo e Abordagem da Origem e Desenvolvimento das Patologias em Pavimento. **Revista Saber Acadêmico**, Presidente Prudente, n. 21 / ISSN 1980-5950, p. 1-9, fev. 2016.

BATISTA, K.B. *et al.* High-temperature, low-temperature and weathering aging performance of lignin modified asphalt binders, **Industrial Crops and Products**, v. 111, p. 107-116, 2018.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Gráfica Imprinta, 2008.

BRAJPAI, P. **Biotechnology for Pulp and Paper Processing**. [S.l.]: [s.n.], 2012.

BRANCO, Fernando *et al.* **Pavimentos Rodoviários**. Coimbra: Edições Almedina S.a., 2016.

BRASIL. Secretaria de Governo da Presidência da República. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**: ODS 12 – Consumo e Produção Responsável, 2019.

BRASIL. **Decreto 10.240 de 12 de fevereiro de 2020**. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, 2020.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná - DER/PR. **DER/PR ES-P 21/05: Pavimentação**: concreto asfáltico usinado a quente. Curitiba, p. 22. 2005.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestruturas e Transportes - DNIT. **Cimentos asfálticos de petróleo** - Especificação de matéria, 2006.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestruturas e Transportes - DNIT 428/2020 – **Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2020.

CASTRO, H. F. D. **Papel e Celulose**. Universidade de São Paulo. Lorena. 2009.

CELULOSE ONLINE. **Introdução ao Processo de Obtenção da Celulose**. [S.l.]. 2016.

CENTRO DE TECNOLOGIA DE CELULOSE E PAPEL. **Módulos de Fabricação de Matéria Prima**. Telêmaco Borba: SENAI-CETCEP, PR. CD-ROM, 2015.

CLASSIFICAÇÕES do CBUQ. *In*: VILABETUME. Cariacica, ES 21 de jan. de 2021. Disponível em: <https://vilabetume.com.br/classificacoes-do-cbuq-entenda-a-diferenca-entre-elas>. Acesso em: 21 jun. 2021.

CONCEPA-LAPAV. **RELATÓRIO DE PROJETO DE PESQUISA**: Análise de Estrutura de Pavimento da Rodovia BR-290/RS Através de Ensaios Acelerados. Relatório Final. Laboratório de Pavimentação. Escola de Engenharia, UFRGS, 2007.

FERNANDES, W. A. **O Movimento da Qualidade no Brasil**. INMETRO. ed. São Paulo: Essential Idea Publishing, 2011.

FIGLIARESE, M. A. Z. **Proposta de um modelo teórico de manutenção em obras com base no comportamento do concreto armado em ambientes de produção de celulose**: estudo de caso. Espírito Santo: 2009.

FOELKEL, C. Aspectos Práticos e Conceituais sobre a Fabricação de Celulose de Mercado do Tipo *Kraft* Branqueada a Partir de Madeira de Eucalipto. Capítulo 31: **O Processo Kraft de Fabricação de Celulose**. Eucalyptus Online Book, São Paulo: ABTPC, 2013.

FOELKEL, C. Resíduos sólidos industriais do processo de fabricação de celulose *KRAFT* de eucalipto. Parte 05: **Resíduos Minerais**. Eucalyptus Online Book, São Paulo: ABTCP, 2011.

FOELKEL, C. Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto. Parte 2: **Fatores de sucesso para seu gerenciamento**. Eucalyptus Online Book. São Paulo: ABTCP, 2009.

GASTHAUER, E. *et al.* Characterization of asphalt fume composition by GC/MS and effect of temperature. **Fuel**, v. 87, p. 1428-1434, 2008.

GOMES, Fernanda Alves Verzeloni; SILVA, Joelma Veríssimo. **Terraplenagem e a Aplicação do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) em Vias Urbanas No Condomínio Meridian**. 98p. (Bacharel, Engenharia Civil, 2017). TCC – FACEG – FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA. Curso de Engenharia Civil. 2017.

GRANDE, W. R. **Efeitos da cal hidratada e do ácido polifosfórico na suscetibilidade térmica de misturas asfálticas densas**. 2011. 149 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2017**. São Paulo: IBÁ, 77 p., 2017.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBÁ 2019**. São Paulo, IBÁ, 2019.

KLEIN, G. C. *et al.* Use of saturates/aromatics/resins/asphaltenes (SARA) fractionation to determine matrix effects in crude oil analysis by electrospray ionization fourrier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry. **Energy e fuels**, v. 20, p. 668-672, 2006.

LAHTINEN M., The conversion from cellulose I to cellulose II in Na OH mercerization performed in alcoholwater systems: An X-ray powder diffraction study. **Carbohydrate Polymers**, v, 68, p. 35-43, 2000.

LINS, V. F. C. Reciclagem e a Engenharia de Superfícies. **Revista Matéria**, v. 24, n. 4, 2019.

LIXING, M.; HUANG, J.; LI, Z. The effect of short-term aging on rheological properties of asphalts. **Advanced materials research**, v. 25, n. 26, p.3321-3325, 2011.

MACHADO, C. C. *et al.* Influência do tratamento térmico do resíduo sólido industrial (grits) na resistência mecânica de um latossolo para pavimento de estradas florestais. Viçosa: **Revista Árvore**, v. 27, n° 4, p. 543-550, 2004.

MARTINS, F. M. **Caracterização química e mineralógica de resíduos sólidos industriais minerais do Estado do Paraná**. Curitiba, PR: UFPR, 2006, 154p. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal do Paraná, 2006.

MCGENNIS, R.B. *et al.* Issues pertaining to use of Superpave gyratory compactor. Transportation, Washington, **Research Record**, n. 1543, p. 117-25, 1994.

MEHRARA, A.; KHODAI, A. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete. **Construction and Materials**, v. 38, p. 423-442, 2013.

MODOLO, R. *et al.* Pulp and paper plant wastes valorisation in bituminous mixes. **Waste Management**, v. 30, n. 4, p. 685-696, 2010.

MOLINA, Mônica Castagna (Org.). **Por uma Educação do Campo**: contribuições para a construção de um projeto de Educação do Campo. Caderno 5. Brasília, 2004.

MOREIRA, H. **Análise Crítica da Gestão de Resíduos de Construção Civil**: Estudo de caso do município do Rio de Janeiro. 129 p. Monografia UFRJ. Escola Politécnica, Curso de Engenharia Ambiental, Oreira. – Rio de Janeiro: 2013.

MOTTA, L. M. G., LEITE, L. F. M. Efeito do fíler nas características mecânicas das misturas asfálticas. In: CONGRESSO PANAMERICANO DE ENGENHARIA DE TRÂNSITO E TRANSPORTE, Anais. (...) p. 1007 – 1017, Gramado, 2000.

NAPA – NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **NAPA TAS-14**: mix design techniques: part I: Instructors Manual, 1982.

NOLASCO, A.M. *et al.* Uso de resíduos urbanos e industriais como fonte de nutrientes e condicionadores de solos florestais. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Org.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, p. 385 – 414, 2000.

OJALA, J. *et al.* A Evolução da Indústria de Papel Global. **O Papel**, v. 74, n. 9, 2013.

OSORIO, E. G. **Indústria de papel e celulose: estudo de caso da implantação da vcp florestal no extremo sul do rio grande do sul**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. [S.l.]. 2007.

PFEIFFER, J. P.; SAAL, R. N. J. Asphaltic bitumen as colloid system. Presented at the Sixteenth Colloid Symposium, held at Stanford University, **Chem**, California, July 6-8, 1940.

PINTO, S; PINTO, I. E. **Pavimentação asfática: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

PINILLA, A. **O sistema fíler-betume, algumas considerações sobre sua importância nas misturas densas**. Conselho Nacional de Pesquisa: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1965.

PIZZORNO, B. S. **Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico do petróleo**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Fevereiro de 2010.

PREGO, A.S. S. **A memória da pavimentação no Brasil**. Rio de Janeiro: ABPv, 1999.

PRIETO, Valter; **“Notas de aula – superestrutura rodoviária”**. Centro Universitário da FEI. São Bernardo do Campo, 2016.

ROBERTS, F. L. *et al.* History of hot mix mixture design in the United States. **Amer. Soc. Eng. Civ.**,v.14, p.279-293, 2002.

SANTANA, H. **Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de filer em misturas asfálticas**. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.

SANTOS, R.E., SANTOS, I.F.S., BARROS, R.M., *et al.*, “Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis”, **Journal of Environmental Management**, v. 231, n. 1, p. 198-206, 2019.

SILVA, A.; JERÔNIMO, C. E. Estudo de alternativas para o aproveitamento de resíduos sólidos da industrialização do coco. **Monografias Ambientais**, Natal, v. 10, p. 2193 – 2208, Out. – Dez. 2012.

WENZL, H. **The Chemical Technology of Wood**. Elsevier: Academic Press, p. 270, 2012.

Zhou, M. *et al.* Critical Specimen Sizes for Tensile -Shear Testing of Steel Sheets, **Welding Research Supplement**, p. 305-13, 1999.

APÊNDICES

**APÊNDICE A – Resultado do ensaio Marshall para cada corpo de prova
(Estabilidade e Fluência)**

	Nº CP	Deformação do Anel (mm)	Estabilidade (kgf)	Estabilidade Corrigida (kgf)	Fluência (mm)	Altura média (mm)
REFERÊNCIA						
REFERÊNCIA	CP 1	0,610	1238,55	1300,47	5,26	61,44
	CP 2	0,681	1380,48	1435,70	6,08	61,86
	CP 3	0,633	1284,54	1400,15	3,84	60,37
	CP 4	0,645	1308,53	1413,21	3,51	60,65
			Estabilidade Média (kgf) =	1387,38		
			Fluência Média (mm) =	4,67		
2% DE LCC						
2% DE LCC	CP 1	0,429	876,31	920,12	4,12	61,39
	CP 2	0,605	1228,55	1277,69	3,17	61,56
	CP 3	0,690	1398,47	1524,33	3,34	60,14
	CP 4	0,763	1544,26	1667,80	3,65	60,45
			Estabilidade Média (kgf) =	1347,49		
			Fluência Média (mm) =	3,57		
3% DE LCC						
3% DE LCC	CP 1	0,610	1238,55	1325,24	2,80	60,91
	CP 2	0,620	1258,54	1359,23	3,04	60,40
	CP 3	0,652	1322,52	1375,42	3,73	61,74
	CP 4	0,700	1418,45	1517,74	4,35	60,70
			Estabilidade Média (kgf) =	1394,41		
			Fluência Média (mm) =	3,48		
4% DE LCC						
4% DE LCC	CP 1	0,545	1108,52	1230,45	3,90	59,40
	CP 2	0,485	988,43	1057,62	4,11	60,94
	CP 3	0,513	1044,48	1138,48	3,65	60,37
	CP 4	0,645	1308,53	1413,21	3,65	60,65
			Estabilidade Média (kgf) =	1209,94		
			Fluência Média (mm) =	3,83		

Fonte: Elaborada pelo autor

APÊNDICE B – Percentual de vazios para os corpos de prova de CBUQ

Traço adotado	Identificação do corpo de prova	Pesagem a seco (em gramas)	Pesagem hidrostática (em gramas)	Densidade aparente	Densidade teórica	Percentual de vazios da mistura (V%)	Percentual de vazios da mistura médio (%)	Parâmetro da Norma
REFERÊNCIA	R - 01	1183,10	698,70	2,442	2,6027	6,1572	5,65	4% a 6%
	R - 02	1183,20	699,80	2,448	2,6027	5,9551		
	R - 03	1180,70	702,00	2,466	2,6027	5,2324		
	R - 04	1182,10	702,70	2,466	2,6027	5,2586		
2% DE LCC	2% - 01	1169,30	693,20	2,456	2,5994	5,5155	5,21	
	2% - 02	1175,20	698,40	2,465	2,5994	5,1782		
	2% - 03	1181,80	702,80	2,467	2,5994	5,0836		
	2% - 04	1172,40	697,40	2,468	2,5994	5,0456		
3% DE LCC	3% - 01	1177,50	701,20	2,472	2,5977	4,8328	5,29	
	3% - 02	1180,00	701,10	2,464	2,5977	5,1485		
	3% - 03	1175,10	696,30	2,454	2,5977	5,5227		
	3% - 04	1172,40	694,10	2,451	2,5977	5,6412		
4% DE LCC	4% - 01	1178,60	705,10	2,489	2,5961	4,1201	4,76	
	4% - 02	1177,50	701,10	2,472	2,5961	4,7927		
	4% - 03	1179,20	701,90	2,471	2,5961	4,8350		
	4% - 04	1172,90	695,80	2,458	2,5961	5,3038		

Fonte: Elaborada pelo autor

APÊNDICE C – Relação Betume-Vazios para os corpos de prova de CBUQ

Traço adotado	Identificação do corpo de prova	Densidade aparente	Percentual de vazios da mistura (V%)	Vazios ocupado pelo CAP (VCB%)	Percentual de vazios do agregado mineral (VAM%)	Relação betume Vazios (RBV%)	Relação Betume Vazio Média (%)	Parâmetro da Norma
REFERÊNCIA	R - 01	2,442	6,1572	12,1536	18,3108	66,3739	68,41	65% a 72%
	R - 02	2,448	5,9551	12,1798	18,1349	67,1621		
	R - 03	2,466	5,2324	12,2734	17,5058	70,1103		
	R - 04	2,466	5,2586	12,2700	17,5285	69,9999		
2% DE LCC	2% - 01	2,456	5,5155	12,2212	17,7367	68,9034	70,20	
	2% - 02	2,465	5,1782	12,2649	17,4431	70,3137		
	2% - 03	2,467	5,0836	12,2771	17,3607	70,7177		
	2% - 04	2,468	5,0456	12,2820	17,3276	70,8810		
3% DE LCC	3% - 01	2,472	4,8328	12,3018	17,1346	71,7950	69,86	
	3% - 02	2,464	5,1485	12,2610	17,4095	70,4269		
	3% - 03	2,454	5,5227	12,2126	17,7353	68,8605		
	3% - 04	2,451	5,6412	12,1973	17,8385	68,3762		
4% DE LCC	4% - 01	2,489	4,1201	12,3861	16,5062	75,0389	72,13	
	4% - 02	2,472	4,7927	12,2992	17,0919	71,9592		
	4% - 03	2,471	4,8350	12,2937	17,1288	71,7724		
	4% - 04	2,458	5,3038	12,2332	17,5369	69,7565		

Fonte: Elaborada pelo autor