

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

FELIPE GUSTAVO DAGA

VINICIUS HENRIQUE DAMKE

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO VIDRO RECICLADO NA COMPOSIÇÃO
GRANULOMÉTRICA DO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE
(CBUQ)**

**CASCADEL - PR
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ

FELIPE GUSTAVO DAGA

VINICIUS HENRIQUE DAMKE

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO VIDRO RECICLADO NA COMPOSIÇÃO
GRANULOMÉTRICA DO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE
(CBUQ)**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

**Professor Orientador: Especialista, Engenheiro Civil
Lincoln Salgado.**

**CASCADEL - PR
2018**

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAG

VINICIUS HENRIQUE DAMKE E FELIPE GUSTAVO DAGA

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO VIDRO RECICLADO NA COMPOSIÇÃO
GRANULOMÉTRICA DO CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE
(CBUQ)

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Civil, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, sob orientação do Professor **Especialista, Eng. Civil LINCOLN SALGADO**.

BANCA EXAMINADORA


Orientador Prof. **Especialista, LINCOLN SALGADO**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil


Professora **Mestre MARIA VANIA NOGUEIRA DO NASCIMENTO PERES**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheira Civil


Professor **Especialista MARCIO EVANDRO GUIMARÃES**
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Civil

Cascavel, 01 de Dezembro de 2018.

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho aos nossos familiares, pelo apoio nos momentos difíceis e confiança na hora de enfrentar todos os desafios.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus, por ser nossa base e o principal pilar em nossa caminhada.

As nossas famílias, que sempre estiveram ao nosso lado.

Ao nosso professor orientador Lincoln Salgado, pelo papel de extrema importância exercido ao guiar-nos neste trabalho.

Agradecemos também a empresa Terraplenagem SR e ao Centro Universitário Assis Gurgacz, por cederem seu espaço para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O conceito de sustentabilidade busca minimizar os efeitos negativos atendendo as necessidades das gerações atuais sem comprometer as gerações futuras. O presente trabalho busca discorrer sobre a possibilidade da utilização do vidro reciclado na composição granulométrica do concreto betuminoso usinado a quente. O problema originário da pesquisa é de como a utilização do vidro reciclado na composição do CBUQ pode aumentar eficientemente a sustentabilidade na pavimentação. O objetivo geral da pesquisa trata-se de avaliar a utilização do vidro reciclado na composição do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), em substituição da areia. A metodologia utilizada no decorrente trabalho acadêmico trata-se de uma pesquisa experimental com caráter exploratório, consumada através do método de ensaio Marshall. A pesquisa laboratorial decorreu-se em laboratórios instrumentados para a área de pavimentação, no Centro Universitário Assis Gurgacz e na empresa Terraplenagem SR. Após verificar a compatibilidade granulométrica das amostras com diferentes porcentagens de vidro, selecionou-se a amostra que melhor se enquadrava na faixa F de granulometria para o prosseguimento dos ensaios. O tratamento dos dados deu-se através de gráficos e equações. Os resultados obtidos na pesquisa com o vidro reciclado caracterizaram-se satisfatórios no parâmetro mecânico de estabilidade e insatisfatórios no parâmetro de fluência. Tornou-se possível avaliar a utilização de vidro reciclado na composição de CBUQ, mesmo por esta substituição ter-se efetivado de forma simplificada, haja vista que a pesquisa é prerrogativa inicial para que estudos mais aprofundados sejam elaborados a partir dos resultados obtidos.

Palavras-chave: Pavimentação; Flexível; Sustentabilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rodovia União Indústria.....	15
Figura 2 – Camadas constituintes de um pavimento.....	17
Figura 3 – Execução de mistura asfáltica a quente.....	18
Figura 4 – Requisitos para mistura granulométrica.....	22
Figura 5 – Peneiramento Mecânico dos agregados.....	23
Figura 6 – Distribuição granulométrica.....	23
Figura 7 – Curva granulométrica de faixa F.....	24
Figura 8 – Homogeneização da mistura.....	26
Figura 9 – Soquete elétrico Marshall.....	27
Figura 10 – Amostras contidas nos cilindros.....	27
Figura 11 – Rompimento dos corpos de prova.....	28
Figura 12 – Características Marshall.....	29
Figura 13 – Granulometria de pedrisco e granilha.....	30
Figura 14 – Granulometria de areia e pó de vidro.....	30
Figura 15 – Curvas das misturas.....	31
Figura 16 – Granulometria mistura com 5% de pó de vidro.....	32
Figura 17 – Granulometria mistura com 10% de pó de vidro.....	33
Figura 18 – Pesos de cada material para devidas misturas.....	33
Figura 19 – Resultado da aparência dos corpos de prova.....	34
Figura 20 – Características dos corpos de prova.....	34
Figura 21 – Valores de estabilidade.....	35
Figura 22 – Valores de fluência.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente

CNT – Confederação Nacional do Transporte

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

ES – Especificação de serviço

FEM – Fórum Econômico Mundial

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias

SNV – Sistema Nacional de Viação

CP – Corpo de prova

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	11
1.1 INTRODUÇÃO.....	11
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
1.3 JUSTIFICATIVA.....	12
1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	13
1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE.....	13
1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	13
CAPÍTULO 2.....	14
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1.1 Contexto histórico.....	14
2.1.2 Estrutura dos pavimentos.....	15
2.1.2.1 Camadas constituintes.....	16
2.1.3 Principais tipos de revestimentos flexíveis betuminosos.....	17
2.1.3.1 Concreto betuminoso usinado a quente.....	17
2.1.3.2 Pré-misturado a quente.....	18
2.1.3.3 Pré-misturado a frio.....	18
2.1.3.4 Tratamentos superficiais e macadames betuminosos.....	19
2.1.4 Utilização de agregados reciclados na pavimentação.....	19
CAPÍTULO 3.....	21
3.1 METODOLOGIA.....	21
3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa.....	21
3.1.2 Caracterização da amostra.....	21
3.1.3 Instrumentos e procedimentos para coleta de dados.....	22
3.1.3.1 Granulometria.....	22
3.1.3.2 Mistura.....	23
3.1.3.3 Teor provável.....	24
3.1.3.4 Ensaio Marshall.....	25
3.1.4 Análise dos dados.....	29
CAPÍTULO 4.....	30
4.1 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29

4.1.1	Granulometria.....	30
4.1.2	Resultados com 5% de vidro.....	32
4.1.3	Resultados com 10% de vidro.....	33
4.1.4	Dosagem.....	33
4.1.5	Medidas.....	34
4.1.6	Estabilidade e Fluência.....	35
CAPÍTULO 5.....		36
5.1	CRONOGRAMA DA PESQUISA.....	36
CAPÍTULO 6.....		37
6.1	SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	37
REFERÊNCIAS.....		38

CAPÍTULO 1

1.1 INTRODUÇÃO

Uma alternativa que vem se fazendo cada vez mais presente na construção civil é o uso de agregados reciclados em substituição aos agregados convencionais. Com a política de sustentabilidade introduzida no século XXI, tem se aumentado a busca pela reutilização de matérias primas recicladas (PINI, 2011).

De acordo com estudo do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2017) são geradas em torno de 160 mil toneladas diárias de resíduos sólidos urbanos no Brasil, sendo passíveis de reciclagem de 30 a 40% desse total, entretanto, são encaminhados para reciclagem somente uma parcela de 16%, sendo que o vidro representa 2,34% desse percentual apenas, com crescente índice de reciclagem atingindo quase 50% do montante coletado.

Com o objetivo de evitar criação ou expansão de aterros sanitários e lixões, consequentemente a contaminação dos recursos naturais, os órgãos ambientais trabalham no desenvolvimento dos programas de destinação e reutilização de resíduos. Neste cenário o vidro tem se mostrado um material com uma grande gama de utilização, sendo incorporado também na construção civil, inclusive na área de pavimentação (AECWEB, 2018).

O vidro de uma maneira geral tem características mecânicas de alta resistência à compressão, resistência elevada à abrasão, sendo um material perfeitamente elástico e que suporta altas temperaturas sem alterar sua estrutura molecular (BARROS, 2010).

Segundo Bernucci *et al.* (2006), pavimentos flexíveis normalmente recebem a atuação de esforços de compressão e tração devidos à flexão. Os revestimentos requerem um bom desempenho essencialmente nos quesitos de durabilidade, flexibilidade, estabilidade, impermeabilidade.

O desempenho satisfatório nos parâmetros de resistência se deve à composição de uma dosagem adequada de agregados e cimento asfáltico, além da elaboração de um projeto estrutural de pavimentos adequado. Deste modo nesse estudo pretende-se avaliar a utilização do vidro reciclado na composição do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), introduzindo o material e suas características em substituição aos agregados convencionais, sendo eles areia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a utilização do vidro reciclado na composição do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), em substituição da areia.

1.2.2 Objetivos específicos

- Obter uma mistura com granulometria que atenda os padrões normatizados pela DER/PR ES-P 21/17;
- Elaborar amostras homogêneas que simulem a condição de campo;
- Verificar os parâmetros de resistência através de ensaios laboratoriais.

1.3 JUSTIFICATIVA

A malha rodoviária tem uma longa extensão por todo o país e é o modal mais utilizado para o transporte, deve propiciar um tráfego confortável e seguro para seus usuários, contudo, a infraestrutura rodoviária ainda é subdesenvolvida e demonstra insuficiência tecnológica nos serviços. Devido a isso as vias sofrem um processo de degradação acelerado ao longo dos anos e devem estar sempre passando por processos de melhorias na superfície de rolagem.

A intenção deste trabalho acadêmico é encontrar melhorias sustentáveis e viáveis utilizando o vidro nas misturas asfálticas, principalmente quanto a sua durabilidade, qualidade e custo.

Com a alta demanda de resíduos gerados por processos industriais, cresce a preocupação com o meio ambiente. O vidro é um material que demora anos para se decompor na natureza e está com um crescente índice de reciclagem, assim, será utilizado o pó de vidro em substituição da areia na composição granulométrica da massa asfáltica.

Este estudo tem o objetivo de contribuir com instituições e empresas da área de pavimentação que buscam de alguma forma inovar seu modo de produzir asfalto, podendo ser uma solução exequível e sustentável de aplicação nos pavimentos pelo país.

1.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Como a avaliação da utilização do vidro reciclado na composição granulométrica do concreto betuminoso usinado a quente pode ampliar a sustentabilidade na pavimentação?

1.5 FORMULAÇÃO DA HIPÓTESE

Pode-se dizer que a dosagem de uma mistura asfáltica constitui um processo de formulação na qual se busca uma composição granulométrica de agregados com naturezas específicas e de uma adição do cimento asfáltico de petróleo (CAP). O concreto betuminoso usinado a quente tem sido o tipo de pavimento mais utilizado em nosso país. Diante deste cenário podemos afirmar que a utilização do vidro reciclado no pavimento flexível seria uma forma eficiente de ampliar a sustentabilidade na pavimentação.

1.6 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa será restrita ao âmbito laboratorial, tendo em vista a análise da adição do pó de vidro oriundo da cidade de Toledo – PR, em substituição à areia na composição de misturas granulares asfálticas em corpos de prova moldados em laboratório.

A avaliação da adição do vidro na composição de misturas granulares betuminosas será realizada através de ensaios laboratoriais e verificada através de tabelas e gráficos. Delimita-se a pesquisa à obtenção de uma mistura que atenda aos parâmetros normativos de granulometria, verificação dos critérios de resistência e análise de viabilidade econômica das misturas que melhor atenderem os requisitos normatizados.

CAPÍTULO 2

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica aborda os tópicos fundamentais relacionados ao estudo de pavimentos oriundos de misturas asfálticas. São explanados assuntos como contexto histórico, estrutura dos pavimentos, tipos de pavimentos flexíveis betuminosos e utilização de agregados reciclados na pavimentação.

2.1.1 Contexto histórico

As primeiras estradas, que foram implantadas na China, foram a partir da necessidade de melhorar o acesso às áreas cultiváveis e às fontes de madeira, rochas, minerais e água. Balbo (2007), afirma que o aperfeiçoamento das mesmas se deu com os romanos durante a fase áurea de Roma (30 a. C. a 14 d. C.), que com a intenção de tornar seu processo de degradação mais lento instalaram pavimentos e drenagem. Foram os romanos também quem planejaram rotas mais racionais para chegar aos portos do Mediterrâneo. Após a decadência do Império Romano a interligação terrestre acabou perdendo força e só foi retomada com grande impacto pelo governo francês durante o século XVIII, o qual determinou a construção de seis mil léguas de estradas.

Constata-se que em 1560, no governo de Mem de Sá, surge uma das primeiras estradas brasileiras, ligando São Vicente ao Planalto Piratininga. Mais tarde esse caminho aberto viria a se tornar a Estrada do Mar, permitindo a passagem e tráfego de veículos. Em 1789, no trecho da serra, a pavimentação foi feita com lajes de granito, denominada Calçada de Lorena, preservada em partes até hoje (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Cruzando cursos d'água e as escarpas graníticas da serra do Taquaril, foi inaugurada em 23 de julho de 1861, após aproximadamente 5 anos de construção, a primeira estrada de rodagem do Brasil e maior obra de engenharia da América Latina em seu tempo, a rodovia União e Indústria. Realizada pela parceria de engenheiros brasileiros e alemães, a estrada representada na Figura 1, contava com 144 km de extensão, passando pelo Rio de Janeiro e Minas Gerais e proporcionou o desenvolvimento da região através do escoamento de produtos e mercadorias (DNIT, 2003).

Figura 1: Rodovia União e Indústria.



Fonte: UFJF (2014).

Atualmente o Brasil conta com uma malha viária de 213.458,3 km pavimentados e 1.507.248,1 km não pavimentados (SNV, 2015). Mesmo apresentando um crescimento significativo nos últimos anos, a consistência da malha rodoviária pavimentada ainda é insuficiente, sendo ela de 24,8 km para cada 1000 km², ficando atrás de países como Colômbia, Argentina, Uruguai e México. Sem conseguir conciliar o crescimento da frota de veículos com a pavimentação rodoviária, o Brasil ficou com nota 3,1 de 7 pontos no ranking de competitividade global do Fórum Econômico Mundial (FEM), em que o país se encontra na 103ª posição entre os 137 países avaliados (CNT, 2017).

2.1.2 Estrutura dos Pavimentos

Formado por uma única ou várias camadas, o pavimento tem função estrutural de receber esforços empregados em sua superfície e dividi-los ao longo de sua extensão para que as tensões aplicadas não ultrapassem as tensões admissíveis características dos materiais constituintes. Podemos classificar os pavimentos como rígido, semirrígido e flexível. O pavimento rígido se caracteriza pela rigidez elevada em comparação às camadas inferiores, absorvendo a maioria das tensões recebidas. O flexível se qualifica pela deformação elástica e distribuição das cargas igualmente ao longo de todos os substratos. Por último e não menos

importante, temos o pavimento semirrígido composto por uma base cimentada quimicamente (PINTO e PREUSSLER, 2010).

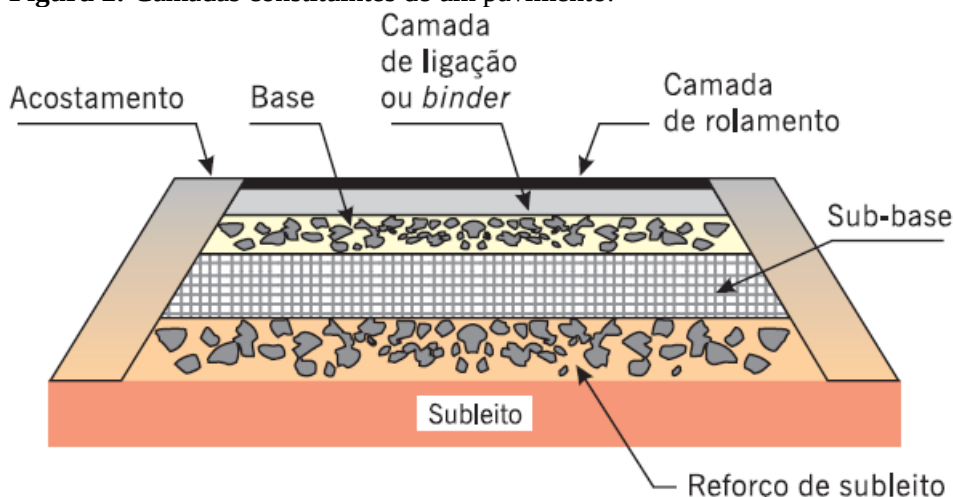
2.1.2.1 Camadas Constituintes

Em uma ordem descendente de posicionamento estrutural, apresentada na Figura 2, podemos classificar o pavimento da seguinte maneira: revestimento, base, sub-base, reforço de subleito e subleito. De acordo com Balbo (2007), para que atenda a sua função estrutural, o revestimento deverá ser uma mistura de materiais bem aglutinados, para que não haja deslocamento horizontal. Os revestimentos asfálticos em vezes são compostos por duas ou mais camadas por razões econômicas ou executivas.

O autor descreve bases e sub-bases como camadas responsáveis pela recepção dos esforços verticais do revestimento e distribuição para a parte do subleito. Ambas também podem ter um papel importante na drenagem do pavimento, pois geralmente são formadas pela mistura de solos e agregados estabilizados granulometricamente e algumas vezes quimicamente. As duas camadas se diferem pela composição granulométrica e método construtivo, onde a base por demandar uma espessura maior de execução, acaba se dividindo e dando lugar a sub-base. No entanto a sub-base pode ser realizada demandando um menor custo e rigor granulométrico de materiais.

Concluindo a descrição estrutura do pavimento, o subleito é retratado como uma camada de solo natural compactada e consolidada capaz de aliviar os esforços restantes em profundidade. Como segurança, acima do subleito geralmente é executado o reforço de subleito, uma camada de solo de melhor qualidade que tem a função de diminuir a magnitude das cargas que chegam a fundação subjacente (BALBO, 2007).

Figura 2: Camadas constituintes de um pavimento.



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2006).

2.1.3 Principais tipos de revestimentos flexíveis betuminosos

Pavimentos flexíveis são aqueles que as deformações podem ir até certo limite que não ocorre rompimento, são dimensionados a compressão e a tração na flexão (SENÇO, 1997). Serão abordados nesta seção os principais tipos de revestimentos asfálticos utilizados na pavimentação rodoviária.

2.1.3.1 Concreto betuminoso usinado a quente

O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é o mais nobre revestimento flexível, é um produto utilizado na construção de revestimentos de pavimentos, incluindo capas de rolamento e camadas de ligação imediatamente subjacentes aos revestimentos. É a mistura asfáltica a quente mais utilizada no país, principalmente pelos materiais empregados em sua composição e por ter um alto processo de controle tecnológico tanto na usinagem como em sua aplicação. A massa asfáltica é obtida através de uma mistura feita em usina, entre o cimento asfáltico de petróleo devidamente dosado, material de enchimento (*filler*) e agregados minerais, estes agregados podem ser naturais ou artificiais contanto que tenham um rigoroso controle de granulometria. Após a obtenção desta combinação, a mistura é espalhada e compactada a quente (BALBO, 2007).

Para usinagem deve-se garantir que os agregados estejam perfeitamente secos, isto é assegurado pelo tambor de aquecimento na produção. Além da secagem completa, a temperatura é elevada a cerca de 175° C na usina, que é a temperatura compatível com a de

usinagem do cimento asfáltico de petróleo (CAP), assim não ocasionando queda de temperatura na mistura final, esta mistura deverá chegar no seu local de aplicação, exemplificado na Figura 3, com uma temperatura próxima a 145° C (BALBO, 2007).

Bernucci *et al.* (2006) afirmam ainda que esta temperatura de aplicação em pista deve ser respeitada para que a mistura obedeça às características do ligante homogeneamente distribuído e de massa específica mínima após compactação, para tanto deve-se levar em conta vários fatores, entre eles a distância entre a usina e o local de aplicação, condições meteorológicas, proteção do material na caçamba do caminhão, etc.

Figura 3: Execução de mistura asfáltica a quente.



Fonte: ABEDA (2013).

2.1.3.2 Pré-misturado a quente

Trata-se de um revestimento betuminoso, onde o agregado é envolvido e combinado com o ligante asfáltico previamente à compressão. Em sua execução é espalhado na pista ainda quente, logo após é feita a compactação. Quando ocorre a mistura na pista, são conhecidos popularmente como “*Road Mixes*” (IPR, 2006).

2.1.3.3 Pré-misturado a frio

Os revestimentos pré-misturados a frio são constituídos de misturas de emulsão ou de outras reduções asfálticas com uma faixa de agregados, porém, usinados a temperaturas

inferiores que o CBUQ e aplicados a temperatura ambiente. Este tipo de mistura demanda menos energia, um menor custo de implantação e proporciona maior mobilidade, entretanto, deve ser considerado um tratamento mais simples, com menos rigor técnico e eficiência para alto carregamento aplicado (ASPHALT INSTITUTE, 2014).

2.1.3.4 Tratamentos superficiais e macadame betuminoso

Pinto e Preussler (2010), constataram que o tratamento superficial consiste na aplicação de uma ou mais camadas de agregados ligadas por pinturas betuminosas, que é executado através do espalhamento e compactação de camadas de agregados com granulometria apropriada, sendo cada camada, após compressão, submetida a uma aplicação de material betuminoso. Os tratamentos superficiais podem ser simples, quando há uma camada de agregado e uma pintura de betume, duplo, quando são duas camadas de agregado e duas pinturas de betume e assim sucessivamente.

O macadame betuminoso tem processo construtivo similar ao do tratamento superficial, porém diferencia-se devido à espessura e granulometria. O emprego deste tipo de serviço pode se dar como base ou revestimento, sendo que se usado como revestimento, muitas vezes é necessário o emprego de uma capa selante com agregados miúdos (IPR, 2006).

2.1.4 Utilização de agregados reciclados na pavimentação

Devido a limitação de recursos naturais disponíveis, há uma crescente linha de pesquisa sobre a utilização de agregados reciclados em revestimentos pavimentados. A finalidade dos estudos é de desenvolver misturas que garantam um melhor desempenho nas estradas atendendo à destinação sustentável dos resíduos gerados pela sociedade (SANGIORGI *et al.*, 2017).

O vidro tem características particulares que dificultam sua eliminação, ele não enferruja, não queima e não se decompõe facilmente. Malisch, Day e Wixson (1970) afirmam que mesmo após incineração, remanescem quantidades significativas de vidro a ser eliminado. Dito isto, é reforçada a ideia de utilização do vidro em forma de partículas finas na pavimentação asfáltica.

Utilizando a areia de fundição de ferro em substituição aos agregados finos na composição da massa asfáltica foi possível alcançar viabilidade técnica e resistências

mecânicas equivalentes em comparação a misturas de agregados minerais (STEFENON, 2003).

CAPÍTULO 3

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Tipo de estudo e local da pesquisa

Foi uma pesquisa experimental com avaliação da utilização de vidro reciclado na produção do concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), em substituição da areia. Realizou-se a pesquisa no laboratório do Centro Universitário Assis Gurgacz.

A consumação do estudo deu-se através da metodologia exploratória, na qual utilizou-se o método de ensaio Marshall, em uma mistura asfáltica modificada estruturalmente pela adição de pó de vidro em sua composição granulométrica. As amostras teriam de atender as normas e especificações. Após a coleta de dados em laboratório, analisou-se os resultados de resistência mecânica dos corpos de prova.

3.1.2 Caracterização da amostra

Realizou-se a pesquisa em laboratórios equipados para área de pavimentação no Centro Universitário Assis Gurgacz, na cidade de Cascavel-PR e na empresa Terraplenagem SR, localizada em Itaipulândia-PR, na qual foi realizada a coleta dos agregados graúdos (Pedra $\frac{3}{4}$ " e pedrisco) e miúdos (Granilha, pó de pedra, areia média). Coletou-se o pó de vidro reciclado na empresa Nanoglass, localizada na cidade de Toledo-PR.

Após verificar a compatibilidade granulométrica das amostras com diferentes porcentagens do pó de vidro, selecionou-se a amostra que melhor se enquadrava na faixa F de granulometria, dando prosseguimento ao ensaio Marshall.

Figura 4: Requisitos para mistura granulométrica.

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando, em peso					
ABNT	Abertura, mm	Faixa A	Faixa B	Faixa C	Faixa D	Faixa E	Faixa F
1 ½"	38,10	100	100	-	-	-	-
1"	24,40	95-100	90-100	100	-	-	-
¾"	19,10	80-100	-	90-100	100	100	-
½"	12,70	-	56-80	-	80-100	90-100	-
? "	9,50	45-80	-	56-80	70-90	75-90	100
n.º 4	4,80	28-60	29-59	35-65	50-70	45-65	75-100
n.º 10	2,00	20-45	18-42	22-46	33-48	25-35	50-90
n.º 40	0,42	10-32	8-22	8-24	15-25	8-17	20-50
n.º 80	0,18	8-20	-	-	8-17	5-13	7-28
n.º 200	0,074	3-8	1-7	2-8	4-10	2-10	3-10
Utilização como		Ligação		Rolamento			Reperfilagem

Fonte: DER/PR (2005).

3.1.3 Instrumentos e procedimentos para coleta de dados

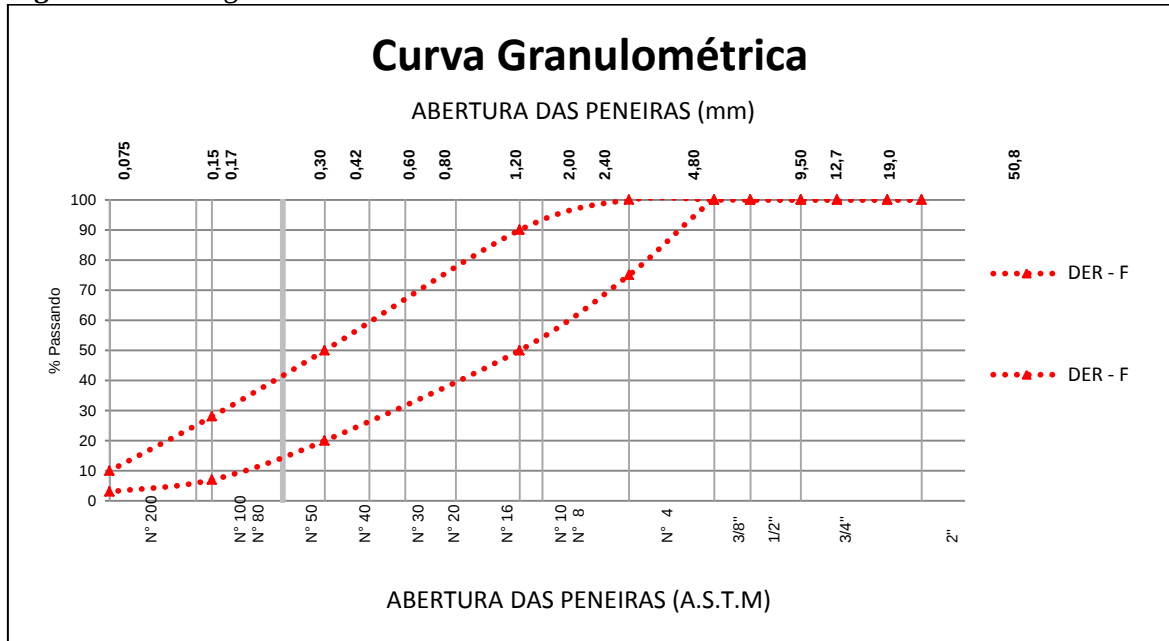
Na pesquisa experimental, a coleta de dados deu-se através de testes laboratoriais, realizados em ambiente adequado a verificações de parâmetros e moldagem de corpos de prova para pavimentação. Realizaram-se os testes entre os meses de julho e setembro de 2018. Decorreram-se os procedimentos em período integral, de acordo com a disponibilidade de utilização dos laboratórios previamente requisitados.

3.1.3.1 Granulometria

Segundo a NBR 7217, a análise granulométrica consiste no peneiramento dos agregados, por meio de peneiras metálicas com malha filtrante. Inicialmente colocaram-se as amostras em recipientes metálicos para secagem dos agregados em estufa, a qual permaneceu com temperatura de aproximadamente 110 C°. Realizada a secagem por completo, levaram-se as amostras à balança de precisão para a determinação de sua massa total. Encaminhou-se o conjunto de peneiras a um agitador eletromagnético, retratado na Figura 5, para um peneiramento inicial, sendo finalizado o peneiramento de forma manual, até que 1% ou menos de material passasse por alguma das peneiras. Por fim pesou-se o material retido em cada peneira, obtendo-se os dados.

Fonte: Autores (2018).

Figura 7 – Curva granulométrica de faixa F.



Fonte: Autores (2018).

Verificando a compatibilidade granulométrica positiva, em base da composição de materiais escolhida, realizou-se os cálculos de superfície específica e dosagem do cimento asfáltico de petróleo (CAP), assim encontrando o teor provável de CAP da mistura.

3.1.3.3 Teor Provável

Para obtenção do teor provável da mistura, primeiramente efetuou-se o cálculo de superfície específica, através da equação 1:

(1)

$$S = \frac{0,17 * G + 0,33 * g + 2,3 * A + 12 * a + 135 * f}{100}$$

Onde:

S: superfície específica do agregado, em m²/Kg;

G: % retida na peneira de 9,52 mm;

g: % passada na peneira de 9,52 mm e retida na peneira de 4,76 mm;

A: % passada na peneira de 4,76 mm e retida na peneira de 0,297 mm;

a: % passada na peneira de 0,297 mm e retida na peneira de 0,074 mm;

f: % passada na peneira de 0,074 mm.

Após o cálculo de superfície específica, aplicou-se a equação 2 para encontrar o teor provável, com o módulo de riqueza (m) variando entre 3,75 e 4,00. Adotou-se o valor de 3,75 para efeitos de cálculo.

(2)

$$Ta = m * \sqrt[5]{S}$$

Onde:

Ta: teor provável (%);

m: modelo de riqueza;

S: Superfície específica.

3.1.3.4 Ensaio Marshall

Conforme DNER-ME 043/95, o ensaio Marshall pode ser explanado brevemente pelos processos de secagem dos agregados em estufa, mistura com o CAP aquecido, moldagem e compactação, imersão em banho maria, desmoldagem e rompimento na prensa.

Com os agregados aquecidos e totalmente secos, foram pesadas amostras para moldagem dos corpos de prova, nas proporções que se enquadraram na faixa especificada, com peso de aproximadamente 1200 g por amostra, nas porcentagens pré-definidas. Os agregados foram pesados com balança de precisão.

Para o método Marshall, prepararam-se 3 corpos de prova para cada dosagem de pó de vidro, totalizando 6 amostras. Inicialmente aqueceu-se os agregados em estufa na temperatura próxima a 110 C° e controlou-se a temperatura do ligante com o auxílio do termômetro digital do forno Mufla, onde o CAP foi aquecido, respeitando a temperatura de no máximo 177 C°.

Posteriormente deu-se início ao processo de moldagem dos corpos de prova, transferindo-se a mistura dos agregados a um recipiente metálico sob aquecimento de fogo. Estando a amostra em temperatura por volta de 160°C, fora adicionado o CAP, prosseguindo com a homogeneização da mistura, demonstrada na Figura 8.

Figura 8: Homogeneização da mistura.



Fonte: Autores (2018).

Em conferência com a DNER-ME 043/95, após as misturas serem homogeneizadas por um período de 2 a 3 minutos, foram pesadas e transferidas aos cilindros de aço, que encontravam-se aquecidos de 90 a 150 C° para compactação. Realizou-se a compactação através de um soquete Marshall elétrico, ilustrado na Figura 9, com peso em torno de 4.5 kg e altura livre de queda de 45,72 cm. Efetuaram-se 75 golpes em cada face do corpo de prova.

Figura 9: Soquete elétrico Marshall.



Fonte: Autores (2018).

Finalizados os procedimentos de compactação, reservaram-se as amostras contidas nos cilindros metálicos, aguardando a solidificação e diminuição de temperatura. Foram deixadas em repouso na temperatura ambiente por 10 dias conforme Figura 10. Mesmo que a DNER-ME 043/95 estipule 24 horas para o rompimento dos CP's, a disponibilidade do laboratório não permitiu que este tempo fosse respeitado, podendo ser um fator determinante nos resultados.

Figura 10 – Amostras contidas nos cilindros.



Fonte: Autores (2018).

Separaram-se os corpos de prova dos cilindros metálicos através de um extrator de amostras.

O processo de rompimento iniciou-se com a pesagem dos corpos de prova secos e imersos, foram também tomadas às medidas das amostras. Posteriormente levou-se os CP's ao banho maria, com temperatura de 60 C° por um período de 30 a 40 minutos. Em seguida colocaram-se as amostras individualmente no molde de compressão radial, pré-aquecido em estufa na temperatura de 40°C, posicionando o mesmo na prensa ilustrada na Figura 11, a qual aplicou carga no corpo de prova até o seu rompimento, coletando as características de estabilidade (Kgf) através de um anel dinamométrico e de fluência (Milímetros) através de um medidor de fluência.

Figura 11 – Rompimento dos corpos de prova.



Fonte: Autores (2018).

Para comparação dos dados coletados em relação às características especificadas na coluna da camada de rolamento da Figura 12, selecionou-se a média dos dados de ensaio de 3 corpos de prova calculados, para cada teor de dosagem, assim apresentando resultado satisfatório ou não.

Caso um ou mais resultados apresentarem-se satisfatórios, seria selecionado o que se mostrasse mais fiel à média dos valores contidos em intervalos e mais próximo aos valores absolutos. Se não fossem encontrados resultados satisfatórios delimitaria-se o fim da pesquisa.

Figura 12 – Características Marshall.

Ensaio	Característica	Camada de rolamento	Camada de ligação
DNER-ME 043/95	Percentagem de vazios	3 a 5	4 a 6
DNER-ME 043/95	Relação betume/vazios	70 - 82	65 - 75
DNER-ME 043/95	Estabilidade, mínima	850 kgf	700 kgf
DNER-ME 043/95	Fluência, mm	2,0 – 4,0	2,5 – 3,5
DNER-ME 138/94	Resistência à tração por compressão diametral estática a 25°C, MPa	0,65 (mínima)	0,65 (mínima)
-	Relação finos/betume	0,8 – 1,2	0,6 – 1,2

Fonte: DER/PR (2005).

3.1.4 Análise dos dados

Após a coleta de dados, avaliou-se os mesmos por meio de critérios exigidos nas normas e bibliografias. A norma principal utilizada na avaliação foi a ES-P 21/17 DER/PR.

Analisaram-se as informações coletadas através dos testes em comparação aos parâmetros normativos, que por sua vez, se atendidos ou não, suceder-se-ia o fim da pesquisa.

CAPÍTULO 4

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação da metodologia nos ensaios com os corpos de prova asfálticos teve resultados expressivos e deu origem a algumas discussões.

Devido ao tamanho excessivo da pedra $\frac{3}{4}$ " na composição granulométrica de faixa F, a mesma foi inutilizada. As peneiras utilizadas foram $\frac{3}{8}$ ", 4, 10, 80 e 200, conforme especificado pela norma DER/PR ES-P 21/17. Através do peneiramento, foi quantificada em gramas, a massa retida em cada peneira, sendo possível obter a média das porcentagens passantes e retidas de cada material nos três ensaios. Os resultados alcançados estão apresentados nas Figuras 13 e 14.

4.1.1 Granulometria

Figura 13: Granulometria de Pedrisco e Granilha.

Peneiras		Pedrisco			Granilha		
ASTM	mm	Massa total (g)	2500,00		Massa total	1000,00	
		Massa Ret.	% Ret.	% Pass.	Massa Ret.	% Ret.	% Pass.
$\frac{3}{8}$ "	9,500	18,78	0,75	99,2	0,00	0,00	100,0
4	4,800	2332,51	93,30	5,9	35,51	3,55	96,4
10	2,000	145,03	5,80	0,1	504,79	50,48	46,0
40	0,420	0,18	0,01	0,1	274,48	27,45	18,5
80	0,177	0,00	0,00	0,1	34,41	3,44	15,1
200	0,074	0,84	0,03	0,1	18,05	1,81	13,3

Fonte: Autores (2018).

Figura 14: Granulometria de Areia e Pó de Vidro.

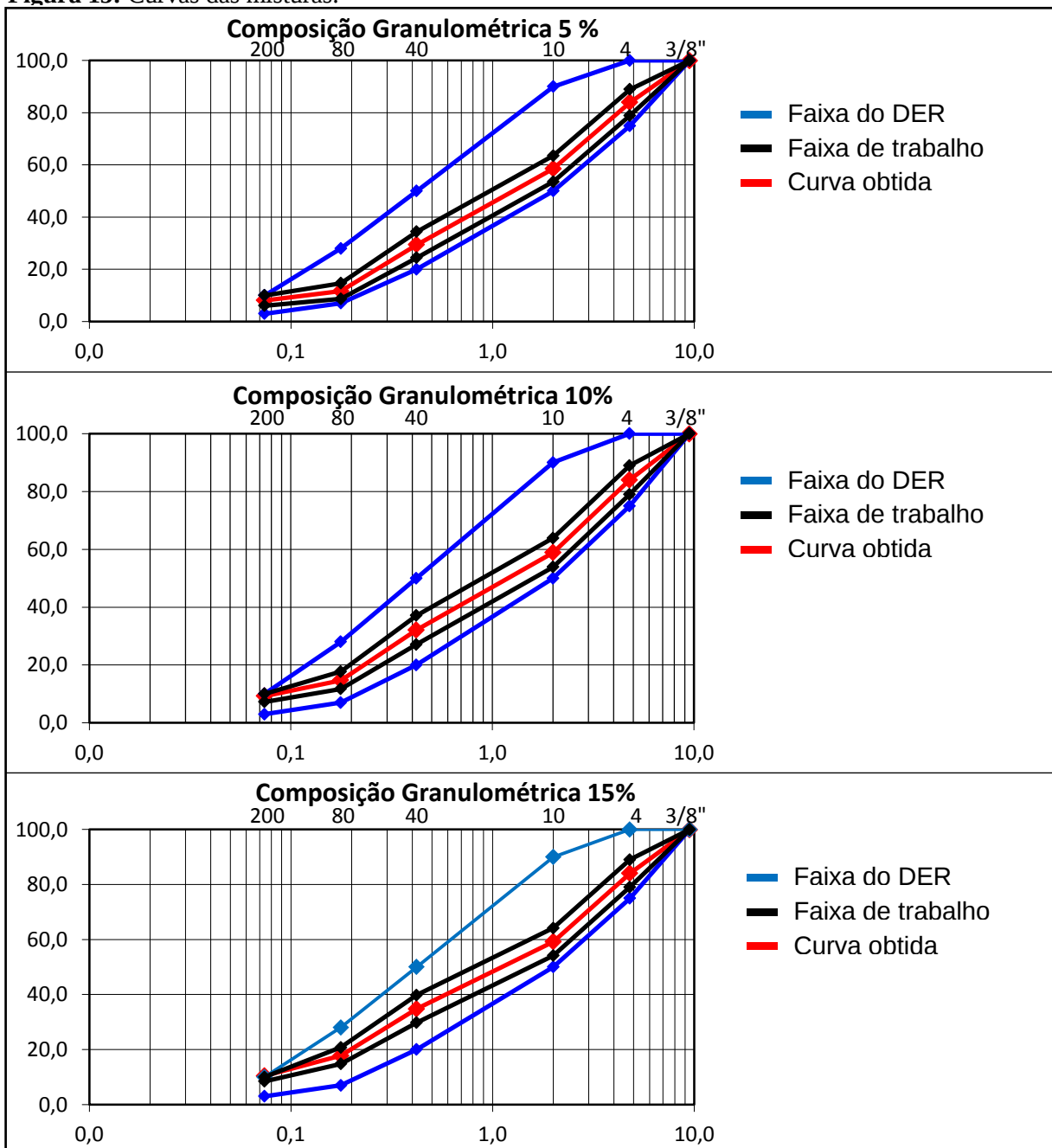
Peneiras		Areia			Pó de Vidro		
ASTM	mm	Massa total (g)	1000,00		Massa total	1000,00	
		Massa Ret.	% Ret.	% Pass.	Massa Ret.	% Ret.	% Pass.
$\frac{3}{8}$ "	9,500	0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0
4	4,800	10,47	1,05	99,0	0,00	0,00	100,0
10	2,000	51,45	5,15	93,8	0,00	0,00	100,0
40	0,420	479,09	47,91	45,9	2,66	0,27	99,7
80	0,177	414,13	41,41	4,5	341,00	34,10	65,6
200	0,074	22,34	2,23	2,3	398,40	39,84	25,8

Fonte: Autores (2018).

Os resultados das curvas compostas pela granulometria dos materiais com o objetivo de enquadrar a mistura na Faixa F da DER/PR ES-P 21/17 estão apresentados na Figura 15.

Os intervalos em azul são os solicitados em norma, em preto está à faixa de trabalho e em vermelho a curva obtida. Esta curva necessariamente precisa estar dentro dos intervalos da norma, propiciando o enquadramento dentro dos intervalos de trabalho, uma maior qualidade na mistura.

Figura 15: Curvas das misturas.



Fonte: Autores (2018).

Com base nos resultados alcançados, observou-se que utilizando o pó de vidro com 15%, a curva excede os limites normatizados na peneira 200, portanto descartou-se esta mistura por não se enquadrar na norma.

Pelo fato de a mistura ter excedido os parâmetros na peneira 200 com 15% de pó de vidro, pode-se dizer que a mistura começa a se tornar fina demais com o aumento da porcentagem de pó de vidro, pois é um material muito denso, assim ultrapassando os valores normatizados.

Os demais resultados, com 5% e 10% de pó de vidro atenderam os requisitos solicitados, portanto deu-se prosseguimento a pesquisa com as duas misturas, seguindo o que foi antecipadamente explanado na metodologia aplicada ao trabalho.

4.1.2 Resultados com 5% de vidro

Os resultados obtidos para a mistura com 5% de pó de vidro podem ser observados na Figura 16.

Figura 16: Granulometria mistura com 5% de pó de vidro.

Peneiras		Mistura (5% pó de vidro)		
ASTM	mm	Massa total (g)	1000,0	
		Massa Ret.	% Ret.	% Pass.
3/8"	9,500	0,00	0,00	100,0
4	4,800	153,14	15,30	84,70
10	2,000	239,52	23,93	60,77
40	0,420	283,46	28,32	32,45
50	0,297	68,99	6,89	25,56
80	0,177	124,14	12,4	13,16
200	0,074	55,59	5,56	7,6

Fonte: Autores (2018).

Com os resultados da granulometria, utilizamos a equação 1 para o cálculo da superfície específica, posteriormente, lançamos os dados obtidos com a superfície específica na equação 2, a qual refere-se ao teor provável da mistura, os resultados estão apresentados abaixo.

- Superfície específica = 13,82 m²/Kg

- Teor provável: 6,34%

4.1.3 Resultados com 10% de vidro.

Os resultados obtidos para a mistura com 10% de pó de vidro podem ser observados na Figura 17.

Figura 17: Granulometria mistura com 10% de pó de vidro.

Peneiras		Mistura (10% pó de vidro)		
ASTM	mm	Massa total (g)	1000,00	
		Massa Ret.	% Ret.	% Pass.
3/8"	9,500	2,42	0,242	99,76
4	4,800	162,31	16,23	83,53
10	2,000	234,52	23,45	60,08
40	0,420	263,44	26,34	33,74
50	0,297	59,78	5,78	27,96
80	0,177	123,69	12,40	15,56
200	0,074	76,49	7,65	7,90

Fonte: Autores (2018).

Assim como para a granulometria com 5% de pó de vidro, foram aplicadas as equações 1 e 2, e calculados os valores de superfície específica e teor provável, obtendo os resultados abaixo:

- Superfície específica: 14,40 m²/Kg
- Teor provável: 6,39%

4.1.4 Dosagem

A Figura 18 apresenta os pesos para dosagem de uma amostra.

Figura 18 – Pesos de cada material para devidas misturas.

Material	Peso (5% pó de vidro) em gramas	Peso (10% pó de vidro) em gramas
CAP	76,08	76,68
Pedrisco	168,59	168,50
Granilha	505,76	505,50
Areia	393,37	337,00
Pó de Vidro	56,20	112,30

Fonte: Autores (2018).

O resultado aparente foi a obtenção de corpos de prova homogêneos, bem compactados (fechados) e brilhosos conforme a Figura 19, tanto para as misturas com 5% quanto para 10% de pó de vidro.

Figura 19: Resultado da aparência dos corpos de prova.



Fonte: Autores (2018).

4.1.5 Medidas

A Figura 20 apresenta o resultado da coleta de medidas dos CP's, não apresentando discrepâncias anormais entre as amostras.

Figura 20: Características dos corpos de prova.

Corpo de prova	Espessura (cm)	Largura (cm)	Peso Seco (g)	Peso Imerso (g)
CP – 1 (5%)	6,12	10,05	1181,70	678,90
CP – 2 (5%)	6,19	10,08	1190,50	653,50
CP – 3 (5%)	6,12	10,05	1180,50	638,50
CP – 1 (10%)	6,12	10,05	1187,10	667,20
CP – 2 (10%)	6,12	10,05	1174,60	666,10
CP – 3 (10%)	6,12	10,05	1182,80	650,00

Fonte: Autores (2018).

4.1.6 Estabilidade e Fluência

É possível observar na Figura 21 que os valores de estabilidade atenderam o requisito mínimo de 500 Kgf e superaram o valor usual segundo DNER-ME 043/95 que circunda os 1200 Kgf. Já a fluência apresentada na Figura 22 não se enquadrou nos intervalos solicitados pela DER/PR ES-P 21/17, a qual requer valores entre 2 e 4 mm.

Figura 21: Valores de estabilidade.

Corpo de prova	Leitura (mm)	Const. do Anel	Encontrada	Fator de Correção	Corrigida	Média (Kgf)
CP – 1 (5%)	920	1,265	1164	1,06	1234	1309,6
CP – 2 (5%)	1000	1,265	1265	1,06	1341	
CP – 3 (5%)	1010	1,265	1278	1,06	1354	
CP – 1 (10%)	960	1,265	1214	1,06	1287	1466,1
CP – 2 (10%)	1130	1,265	1429	1,06	1515	
CP – 3 (10%)	1190	1,265	1505	1,06	1596	

Fonte: Autores (2018).

Figura 22: Valores de fluência.

Corpo de prova	Leitura (mm)	Fluência 1/100	Média (mm)
CP – 1 (5%)	440	4,40	4,60
CP – 2 (5%)	470	4,70	
CP – 3 (5%)	470	4,70	
CP – 1 (10%)	490	4,90	4,90
CP – 2 (10%)	475	4,75	
CP – 3 (10%)	490	4,90	

Fonte: Autores (2018).

Deve-se considerar que a fluência pode ter seu resultado desfavorável pelo fato do teor de CAP utilizado ser o teor provável deste insumo, e não o teor ótimo, assim, aumentando a superfície específica da mistura e majorando excessivamente a quantidade de ligante, mas ainda ficando dentro dos parâmetros normatizados.

CAPÍTULO 5

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível avaliar a utilização de vidro reciclado na composição de CBUQ, mesmo por esta substituição ter-se efetivado de forma simplificada, subtraindo percentuais de areia e substituindo por vidro, o que de forma nenhuma desabona esta abordagem, haja vista que esta é prerrogativa inicial para que estudos mais aprofundados sejam elaborados a partir dos resultados obtidos.

A utilização do pó de vidro se mostrou possível considerando que a estabilidade encontrada atende aos requisitos mesmo que a fluência não tenha apresentado resultado satisfatório.

Uma abordagem secundária deve ser feita a partir dos resultados obtidos, verificando o teor ótimo de CAP a partir da metodologia Marshall. Estes resultados irão identificar e retratar os possíveis desabonos da utilização do vidro.

Portanto, como sugestão de novas abordagens, pode-se estudar um percentual específico de substituição, em razão da utilização do teor ótimo de CAP, a fim de validar as prerrogativas de estabilidade e fluência.

As amostras homogêneas permitiram realizar com êxito os ensaios necessários para obtenção dos dados de resistência, onde os resultados foram satisfatórios para estabilidade e insatisfatórios para fluência. Assim podemos concluir que a utilização do teor ótimo pode alterar o excesso de fluência, que aparentemente está mais relacionado com o aumento do teor de CAP do que com a utilização do pó de vidro.

Por fim, podemos destacar o conceito sustentável abrangido neste trabalho, contido na incorporação do pó de vidro reciclado na composição do concreto betuminoso usinado a quente, ressaltando a importância das ações da sociedade em relação à natureza.

CAPÍTULO 6

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros podemos indicar os seguintes estudos:

- Estudo visando encontrar um percentual específico de substituição do pó de vidro no CBUQ, em razão da utilização do teor ótimo de CAP;
- Estudo visando encontrar um percentual específico de substituição do pó de vidro no CBUQ, em razão da utilização do teor ótimo, porém, com outros ligantes asfálticos;
- Estudo visando incorporar na substituição de agregados do CBUQ materiais semelhantes ao pó de vidro, em razão da utilização do teor ótimo de CAP.

REFERÊNCIAS

AECWEB. **Vidro pode ser reciclado infinitamente**: 100% natural, ele mantém suas propriedades físicas e químicas independente do processamento. Disponível em: <https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/vidro-pode-ser-reciclado-infinitamente_9457_0_1>. Acesso em: 09 dez. 2018.

ASPHALT INSTITUTE (Estados Unidos). **MS-2 Asphalt Mix Design Methods**. 7. ed. [S.l.]: Asphalt Institute, 2014. 188 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: Abnt, 1987. 3 p.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica**: materiais, projeto e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 558 p.

BARROS, Carolina. **Apostila de Vidros**: Materiais de Construção Edificações. Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2010. 19 p.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação Asfáltica**: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobras, 2006. 500 p.

CNT. **Pesquisa CNT de rodovias 2017**: Relatório gerencial. 21. ed. Brasília: Confederação Nacional do Transporte, 2017. 403 p.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DO PARANÁ. **ES-P 21/17**: Pavimentação: Concreto Asfáltico Usinado à Quente. 1 ed. Curitiba: Der/pr (dt/cpd), 2017. 23 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 043/95**: Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. 1 ed. Rio de Janeiro: Dner, 1995. 11 p.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Breve Histórico do Rodoviarismo Federal no Brasil**. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/historico/>>. Acesso em: 10 maio 2018.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **IPR 719**: Manual de Pavimentação. 3 ed. Rio de Janeiro: Ipr, 2006. 274 p.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Sistema Nacional de Viação**. 2015. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>>. Acesso em: 10 maio 2018.

MALISCH, Ward R.; DAY, Delbert E.; WIXSON, Bobby G. **Use of Domestic Waste Glass as Aggregate in Bituminous Concrete**. Rolla: University Of Missouri, 1970. 10 p.

PINTO, Salomão; PREUSSLER, Ernesto. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2010. 220 p.

RODNEI CORSINI. Pini. **Agregados reciclados**: Com elevação de custos dos materiais, agregados reaproveitados ganham força. Confira os principais cuidados de aquisição e uso. 2011. Disponível em: <<http://construcaomercado17.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/123/agregados-reciclados-299541-1.aspx>>. Acesso em: 09 dez. 2018.

SANGIORGI, Cesare et al. Alternative Fillers for the Production of Bituminous Mixtures: A Screening Investigation on Waste Powders. **Coatings: Open Access Journal**. Bolonha, p. 1-13. 3 jun. 2017. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2079-6412/7/6/76>>. Acesso em: 10 maio 2018.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação Volume 2**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2001. 671 p.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: Pini, 1997. 761 p.

SILVA, Sandro Pereira da. **A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilemas e potencialidades sob a ótica da economia solidária**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2017. 48 p.

STEFENON, Fernando. **Incorporação de Resíduos Industriais em Concreto Betuminoso Usinado à Quente**. 2003. 145 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Cap. 8.