

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

LARISSA GUERRA

**EFICIÊNCIA DE CAMADAS DE ABSORÇÃO DE
TENSÕES – PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO
DA CONTENÇÃO DO TRINCAMENTO ATRAVÉS DO
ENSAIO DE FLEXÃO EM AMOSTRAS
SEMICIRCULARES**

Porto Alegre
Maio de 2021

LARISSA GUERRA

**EFICIÊNCIA DE CAMADAS DE ABSORÇÃO DE
TENSÕES – PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO
DA CONTENÇÃO DO TRINCAMENTO ATRAVÉS DO
ENSAIO DE FLEXÃO EM AMOSTRAS
SEMICIRCULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Lélío Antônio Teixeira Brito

Porto Alegre
Maio 2021

LARISSA GUERRA

**EFICIÊNCIA DE CAMADAS DE ABSORÇÃO DE
TENSÕES – PROPOSTA DE MÉTODO DE AVALIAÇÃO
DA CONTENÇÃO DO TRINCAMENTO ATRAVÉS DO
ENSAIO DE FLEXÃO EM AMOSTRAS
SEMICIRCULARES**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, maio de 2021

ORIENTADOR

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito
Ph.D pela University of Nottingham

BANCA EXAMINADORA

Eng. Felipe Cipriani Luzzi
Mestre pela Universidade Federal de Santa Maria

Eng. Fernando Spinelli
Eng. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família, que sempre
me ajudou a realizar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Escrever estes agradecimentos talvez seja a parte mais complicada do trabalho de conclusão de curso, pois para fazer corretamente, devo agradecer à todos que me apoiaram, me incentivaram e de alguma forma me trouxeram até aqui. Tenho sorte de poder dizer que esta lista é imensa, pois fui muito afortunada de encontrar em minha trajetória pessoas que me ensinaram o que é amizade, trabalho em equipe e muitos outros valores que levarei para toda vida.

Começo agradecendo a meus pais Eliandra Guerra e Leandro Guerra que me ensinaram o valor do estudo e o quão longe ele pode te levar mesmo não tendo chegado a entrar em uma sala de aula universitária eles mesmos. Vocês priorizaram minha educação acima de tantos luxos e prioridades suas muito antes de eu entender o porquê. Hoje eu entendo e sou eternamente grata, não estaria vivendo este momento se não fosse vocês.

Agradeço às minhas avós, Angelina e Marlene que são minhas segundas mães e sempre tinham um ombro amigo, um conselho de sabedoria ou mesmo um lanche pra acalmar os ânimos quando nada mais resolvia. Agradeço por desenvolverem minha criatividade com jogos de cartas, palitos e quaisquer outras brincadeiras que pudéssemos inventar para passar o tempo das manhãs que compartilhamos antes de eu ir pra escola. Hoje em dia não nos vemos mais tanto, mas sou grata todos os finais de semana que passo em Caxias e posso visitá-las. Agradeço também ao meu avô Irineo que foi responsável por eu chegar à tempo no dia da matrícula no meu primeiro dia de UFRGS e nunca falhou em fornecer uma carona sempre que preciso. Sou grata também, a meu avô Arlindo que não se encontra mais conosco, mas que sempre me ensinou muito sobre tantas coisas que hoje me tornam quem sou.

Ao meu irmão, Bernardo, agradeço por me ensinar que nem todos os irmãos precisam viver brigando e, mesmo que briguem as vezes, podem se apoiar, rir, conversar e viver tranquilamente (desde que fique fora do meu quarto e não mexa nas minhas coisas só porque não moro mais em Caxias).

Meus agradecimentos também a meus amigos André, Paula, Pohren, Luciano, Júlio, Nati, Anna, Luís, Votto, Alan e Eduardo. Além de um agradecimento especial à Anna Zappe que, além de uma grande colega e um exemplo de dedicação e profissionalismo, é uma amiga que espero ter a meu lado para compartilhar todas as novas experiências que tenho pela frente.

Agradeço também ao Eng. Artur Rodrigues Mello pelo seu apoio essencial para a finalização deste projeto.

Quero agradecer ao LAPAV, minha segunda família, por me receber de braços abertos lá em 2018 quando eu ainda não tinha absoluta certeza que sou apaixonada pela área que estudo e trabalho. Não conseguirei listar todos os bolsistas, estagiários e demais colegas que já passaram por aquele portão que fica bem no fim da rua e se tornaram parte dos meus dias, mas tenham certeza que sou grata a todos por me ensinarem e sempre me apoiarem quando precisei. Todos os bolsistas, pesquisadores e colegas Ana, Everaldo, Débora, Duda, Guilherme S., Sophia, Alice, Guilherme E.

Um agradecimento especial à Livia e ao Matheus Rodrigues que foram essenciais para a realização deste trabalho, sem sua ajuda eu não teria conseguido.

Meu muito obrigada ao William, Lucas Aragão e Bruna que cada um em sua maneira foram muito importantes em minha trajetória. Agradeço também a Natália, Gracieli, Daniele e Juliana por me acalmarem nas horas de estresse e por compreenderem os momentos em que estive ausente na rotina do laboratório para realização deste trabalho.

Agradeço ao Programa PETER que foi minha porta de entrada para o mundo da pesquisa e todas as empresas que forneceram materiais para a realização deste estudo, em especial à Drenamac Geossintéticos Ltda., Greca Asfaltos e Mineração Eldorado.

Por fim, agradeço a meu orientador, Lélío, por sua paciência e confiança na minha capacidade de desenvolvimento desta pesquisa.

A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.

Albert Einstein

RESUMO

Este trabalho é um estudo sobre a possibilidade da realização do ensaio SCB (*Semi-Circular Bending Test*) em amostras com mais de uma camada de material em sua composição. Foi proposta a utilização de uma geogrelha como camada de absorção de trincas em uma das configurações e a utilização de uma camada de mistura asfáltica com ligante do tipo AB8 em outra. Para obtenção das amostras semicirculares com mais de uma camada, foram moldadas placas das quais foram extraídas as amostras usadas no ensaio. Os resultados mostram a eficiência do material geossintético se destacando quando comparado com as amostras com ligante AB8 e com a referência (mistura asfáltica com ligante 50/70).

Palavras-chave: Trincamento, pavimentos flexíveis, geogrelha, asfalto borracha, ensaio SCB

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - À esquerda, representação do corpo de prova semicircular e suas dimensões principais; à direita, esquematização da configuração de ensaio. Fonte: Godoi (2017)	14
Figura 2 - Representação do funcionamento do ensaio SCB. Fonte: Aragão (2019)...	15
Figura 3 - Aparato de acrílico para validação do ensaio SCB. Fonte: autora.....	16
Figura 4 - Composição granulométrica do agregado pétreo. Fonte: Mensch (2020)...	20
Figura 5 - Matriz experimental. Fonte: autora.....	22
Figura 6 - Esquematização do molde utilizado para moldagem das placas. Fonte: Colpo (2014).....	24
Figura 7 - Espaçador usado na compactação. Fonte: autora.....	25
Figura 8 – Placa dentro do molde com os 4com inferiores moldados. Fonte: autora. .	25
Figura 9 - Placa dentro do molde com os 4com inferiores moldados. Fonte: autora. .	26
Figura 10 - Suporte utilizado para posicionar as placas no momento da extração com serra copo. Fonte: autora.	26
Figura 11 - a) superior à esquerda: cilindro partido ao meio extraído da placa com mistura AB8; b)superior à direita: cilindro partido ao meio extraído da placa com Geogrelha; c) inferior à esquerda: cilindro partido ao meio extraído da placa de referência d) inferior à direita: corpos de prova serrados a partir dos cilindros partidos ao meio. Fonte: autora.	27
Figura 12 - Representação do processo de obtenção dos corpos de prova. Fonte: autora.	27
Figura 13 - Corpos de prova pintados com tinta spray. Fonte: autora.....	28
Figura 14 - Posicionamento da amostra para realização do ensaio. Fonte: autora.	29
Figura 15 - Exemplo de amostra com faces não paralelas. Fonte: autora.	30
Figura 16 - Representação de pontos de interesse na curva força versus deslocamento. Fonte: Godoi (2017).	32
Figura 17 - Gráfico força versus deslocamento para amostras do tipo “R”. Fonte: autora.	33
Figura 18 - Gráfico força versus deslocamento para amostras do tipo “B”. Fonte: autora.	33
Figura 19 - Gráfico força versus deslocamento para amostras do tipo “G”. Fonte: autora.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do ligante 50/70. Fonte: autora.	19
Tabela 2 - Resultados de ensaios para ligante AB8. Fonte: Mensch (2020).	19
Tabela 3 – Análise granulométrica do agregado pétreo. Fonte: Mensch(2020).	20
Tabela 4 - Resultados de ensaios de caracterização do agregado. Fonte: Dapper(2020).	21
Tabela 5 - Especificação da Geogrelha Hatelit XP 50. Fonte: Drenamac Geossintéticos Ltda.	21
Tabela 6 - Caracterização da emulsão RR2C. Fonte: Greca asfaltos.	22
Tabela 7 - Caracterização da mistura asfáltica com o ligante 50/70. Fonte: adaptado de Mensch(2020).	23
Tabela 8 - Caracterização da mistura asfáltica com ligante AB8. Fonte: Mensch(2020).	23
Tabela 9 - Dimensões especificadas pela norma EM 14697-44. Fonte: autora.	30
Tabela 10 - Volumes de vazios obtidos. Fonte: autora.	31
Tabela 11 - Parâmetros para amostras do tipo “R”. Fonte: autora.	35
Tabela 12 - Parâmetros para amostras do tipo “B”. Fonte: autora.	35
Tabela 13 -- Parâmetros para amostras do tipo “G”. Fonte: autora.	35
Tabela 14 - Trabalho de ligação, energia de fratura e Índice de Flexibilidade das amostras “R” . Fonte: autora.	36
Tabela 15 - Trabalho de ligação, energia de fratura e Índice de Flexibilidade das amostras “B”. Fonte: autora.	36
Tabela 16 - Trabalho de ligação, energia de fratura e Índice de Flexibilidade das amostras “G”. Fonte: autora.	36

LISTA DE SIGLAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ANP – Agência Nacional do Petróleo

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

MTS - *Material Test System*

SAMI - *Stress-absorbing membrane interlayer*

SCB - *Semi-circular Bending Test*

PEAD - Polietileno de alta densidade

PET - Poliéster

PP - Polipropileno

PVA - Polialcol Vinílico

PVC - Cloreto de Povilina

SUMÁRIO

Introdução.....	12
1. Revisão Bibliográfica.....	12
1.1 Trincamento	12
1.2 Utilização de Geossintéticos para camadas de absorção de tensões.....	13
1.3 Utilização de asfalto borracha em camadas asfálticas para contenção do trincamento por reflexão.....	14
1.4 Ensaio SCB estático.....	14
2. Objetivos.....	18
3. Materiais.....	18
3.1 Ligantes asfálticos	18
3.2 Agregado mineral.....	20
3.3 Geogrelha.....	21
3.4 Emulsão.....	21
4. Metodologia.....	22
4.1 Matriz Experimental.....	22
4.2 Misturas asfálticas utilizadas.....	23
4.3 Produção dos corpos de prova.....	23
4.4 Ensaio SCB	28
5. Resultados.....	29
5.1 Geometria das amostras	29
5.2 Resultados do ensaio SCB	31
6. Considerações finais.....	37
7. Sugestões para trabalhos futuros.....	38
Referências Bibliográficas.....	39
ANEXO A.....	42

Introdução

Estudos utilizando o ensaio SCB para caracterização do comportamento de misturas asfálticas quanto ao trincamento se tornam cada vez mais comuns devido a facilidade de obtenção de amostras e representatividade do ensaio. No entanto, os corpos de prova são produzidos apenas com um tipo de mistura asfáltica e não se encontram na literatura estudos que adotem este ensaio para corpos de prova com mais de uma camada, limitando a análise ao comportamento daquele material somente, sem avaliar suas interações com o restante do pavimento em que se encontra. Em seu estudo, Idris *et al.* (2020) destaca que não há conhecimento de nenhum estudo que avalie a resistência de camadas asfálticas construídas sobre uma camada com superfície previamente trincada.

Contudo, levando em conta cenários em que se pretende reabilitar camadas asfálticas que já atingiram um alto nível de degradação, é importante saber se a solução adotada para recuperação do revestimento será compatível com o pavimento preexistente e não sofrerá com patologias como a reflexão de trincas. Elseifi (2005) identifica que a contenção de trincas de reflexão apresenta um grande desafio para a reabilitação de pavimentos com revestimentos asfálticos. Neste sentido, este estudo aborda esta questão propondo um método para avaliar se é adequado utilizar este ensaio na caracterização de estruturas multicamadas que simulam o que será aplicado em campo da forma mais verossímil possível. Esta proposta permite que seja testada a interação entre os diferentes materiais e seu comportamento em conjunto nos revestimentos flexíveis.

1. Revisão Bibliográfica

Nesta seção, serão abordados os conceitos relevantes para a compreensão do tema estudado e apresentado um breve histórico do que já se sabe sobre os materiais e sobre o ensaio realizado.

1.1 Trincamento

Pavimentos flexíveis compõem a imensa maioria dos revestimentos de estradas e rodovias pavimentadas do país. Com o tráfego e a passagem do tempo, estes pavimentos começam a apresentar defeitos diversos. Um destes defeitos é o trincamento apontado por Soares *et al.* (2002) como o principal defeito das estradas brasileiras e, apesar de não comprometer a qualidade de trafegabilidade para o usuário tanto quanto outras patologias, se não corrigido, pode evoluir e gerar danos graves à estrutura do pavimento segundo Elseifi *et al.* (2012). A abertura destas trincas pode também ser indicativa de falhas estruturais que já estão ocorrendo nas camadas inferiores do pavimento, assinalando a necessidade de investigações mais detalhadas.

As trincas são denominadas a partir de suas características de tamanho, forma, profundidade e presença de outras trincas ao seu redor. O DNIT-TER 005 classifica de forma geral todas as discontinuidades no pavimento como fendas e, a partir daí, consideram-se suas demais propriedades como sentido em relação ao tráfego, tamanho, se a trinca é isolada ou não.

O trincamento ocorre nos pavimentos flexíveis principalmente por dois motivos: carregamento do tráfego e pelas variações de temperatura que o pavimento sofre. Torna-se complexo simular este defeito justamente pelo fato de ser essencial tratar ambas as causas do surgimento de trincas ao mesmo tempo segundo Idris *et al.* (2020).

O carregamento que os pavimento sofre em decorrência do tráfego é cíclico e de magnitude muito variável sendo, por vezes, superior ao que a camada asfáltica consegue dissipar para o restante do pavimento causando a ruptura da camada de rolamento. Depois de fissurada, a tendência é que a camada asfáltica fique cada vez mais fragilizada facilitando que as trincas existentes aumentem e que outras se abram devido à movimentação vertical entre as faces da trinca.

O ensaio realizado neste estudo é utilizado para a simular o trincamento causado pela ação do tráfego apenas, pois é realizado através da aplicação de um carregamento vertical sobre o corpo de prova induzindo tração nas suas fibras inferiores.

1.2 Utilização de Geossintéticos para camadas de absorção de tensões

Geossintéticos são produtos industrializados poliméricos sintéticos ou naturais, utilizados para melhorar as propriedades de materiais geotécnicos quando utilizados em funções de reforço, filtração e drenagem além de auxiliarem na proteção e separação de camadas (Vidal, 2002).

Em obras viárias, geossintéticos são utilizadas na forma de geogrelhas em forma de grades trançadas compostas de materiais como polietileno de alta densidade (PEAD), poliéster (PET), polipropileno (PP) ou, como foi usado neste estudo, poliálcol Vinílico (PVA).

Estes materiais são aplicados com o objetivo de retardar o trincamento de camadas asfálticas na América Latina desde a década de 70 e se desenvolveram muito até a década de 90 em questão de avanços tecnológicos e proposição de novos materiais (Wickert, 2002). Seu uso é comum em pistas de decolagem aeroportuárias como no Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro, em 1993 e foi utilizada uma solução com geogrelha na obra de ampliação e restauração da pista do aeroporto Salgado Filho, em Porto Alegre.

Um estudo realizado por Elseifi *et al.* (2005) avaliou o potencial do uso de uma membrana geossintética cuja matéria prima principal é PVC para retardar o trincamento por reflexão em um sistema de pavimento flexível de forma teórica e em campo. Concluiu-se que o material escolhido não foi adequado para o propósito aplicado, no entanto, esta descoberta não inibe a utilização deste tipo de material. Neste mesmo estudo são levantadas as características importantes para a utilização de outros materiais como, por exemplo, a relevância de utilizar um material que não

apresente um módulo muito baixo e garantir a perfeita aderência entre o material e as camadas que o circundam evitando, desta forma, que ocorra qualquer movimentação que gere o rompimento do geossintético depois de aplicado.

1.3 Utilização de asfalto borracha em camadas asfálticas para contenção do trincamento por reflexão

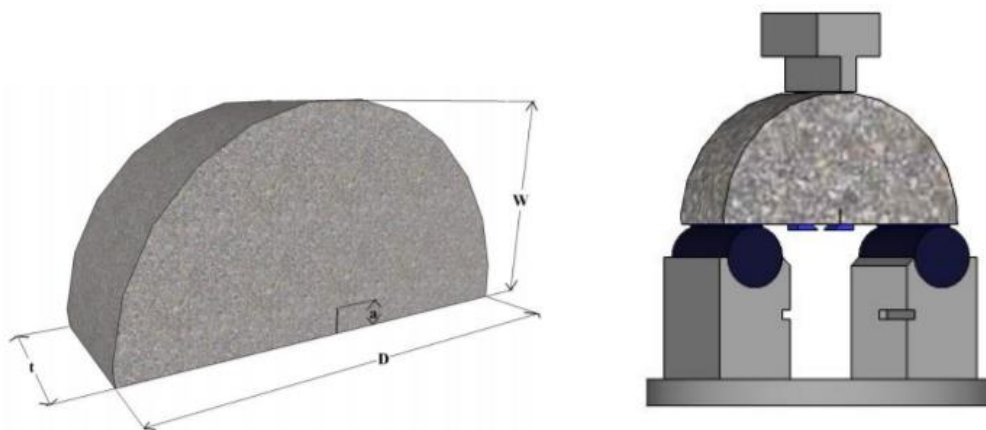
Foi proposta a utilização de uma mistura com asfalto borracha como solução para redução do trincamento por reflexão, pois estudos como Chen *et al.* (2013), Cao (2008), Geng *et al.* (2014) mostram resultados favoráveis como um material que reduz a propagação do trincamento originado na parte inferior do pavimento para cima. Segundo Fontes *et al.* (2009), misturas asfálticas com asfalto-borracha têm sido empregadas em diversos países devido a sua capacidade de inibição de propagação de trincas. No entanto, os estudos citados não apresentam nenhum padrão de aplicação ou avaliação quanto ao tipo de ensaio, especificação do ligante e demais condições de ensaio. Neste sentido, este estudo tem a intenção de colaborar com a ampliação deste conhecimento.

1.4 Ensaio SCB estático

Este ensaio, também conhecido como ensaio de fratura em amostra semicircular com fenda, foi originalmente desenvolvido para avaliar a resistência à fratura de materiais rochosos (Molenaar *et al.*, 2002) sendo adaptado para misturas asfálticas alguns anos depois. No entanto, vem ganhando visibilidade e gerando interesse de pesquisadores na busca pela compreensão das características de fratura destes materiais (Saha e Biligiri, 2016).

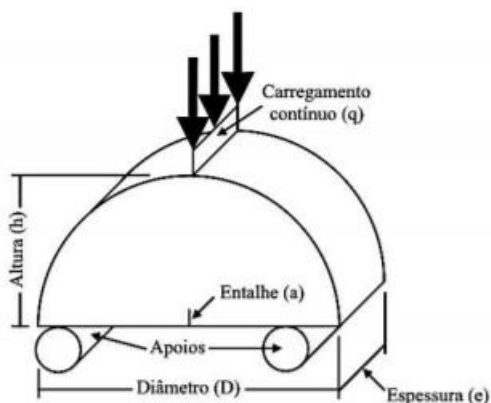
Para a realização deste ensaio, são utilizadas amostras em formato semicircular com uma fenda na face inferior que será responsável por induzir o trincamento neste ponto. O corpo de prova é caracterizado por suas dimensões como ilustrado na Figura 1 apresentando diâmetro D , espessura t e altura W . A fenda tem altura a e deve ser posicionada no centro da base da amostra.

Figura 1 - À esquerda, representação do corpo de prova semicircular e suas dimensões principais; à direita, esquematização da configuração de ensaio. Fonte: Godoi (2017)



O funcionamento do ensaio se dá pela aplicação de um carregamento vertical na parte superior do corpo de prova que gera esforço de tração na face inferior induzindo a propagação da trinca a partir do entalhe. A Figura 2 ilustra o esquema básico de funcionamento.

Figura 2 - Representação do funcionamento do ensaio SCB. Fonte: Aragão (2019)



No Brasil, não há normatização para o ensaio de fratura em amostra semicircular, são conhecidas apenas uma normativa europeia, a EN 12697-44 (2010) e uma americana, a AASTO TP105 (2013). Neste estudo optou-se por seguir as diretrizes da norma europeia por ser o procedimento utilizado em estudos anteriores no LAPAV como Godoi (2017) e Aragão (2019).

1.4.1 Norma Europeia EN 12697-44

Esta norma especifica que as amostras devem ser ensaiadas em uma temperatura de $\Theta^{\circ}\text{C}$ após serem condicionadas a $(\Theta \pm 1)^{\circ}\text{C}$ por, no mínimo, 4h, contudo, ela não aponta qual temperatura deve ser escolhida, apenas indica que, na maioria dos casos, o ensaio é feito na temperatura de 0°C .

Com os corpos de prova condicionados, deve-se posicioná-los no aparato de ensaio rapidamente centralizando-os sobre os roletes. Em seguida, deve ser aplicada uma carga de contato com o atuador do equipamento que fará o carregamento.

Após o correto posicionamento da amostra, o ensaio é iniciado. Ele deve ocorrer com deslocamento controlado a uma taxa de $5 \pm 0,2 \text{ mm/min}$ e deve ser registrada a força aplicada a cada incremento de deslocamento.

O resultado da fissuração deve ser validado verificando se o a zona de trincamento termina em uma zona de $\pm 15 \text{ mm}$ a partir do centro do aplicador de carga na parte superior do corpo de prova. Pode ser utilizado um instrumento como o da Figura 3 para visualização.

Figura 3 - Aparato de acrílico para validação do ensaio SCB. Fonte: autora.



Para cada corpo de prova, são determinados os parâmetros de força máxima ($F_{máx,i}$) e a deformação no momento da aplicação da força máxima (ΔW_i). Com estes valores, calcula-se a deformação máxima do corpo de prova a partir da Equação 1.

$$\varepsilon_{máx,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} * 100 \quad (1)$$

Em que:

$\varepsilon_{máx, i}$: deformação correspondente à carga máxima aplicada na amostra “i”, expresso na forma de percentual;

W_i : altura da amostra “i” (mm).

Deve ser calculada também a máxima tensão suportada ($\sigma_{máx}$) de acordo com a Equação 2.

$$\sigma_{máx} = \frac{4,263 * F_{máx,i}}{D_i * t_i} \quad (2)$$

Em que:

$\sigma_{máx}$: tensão máxima suportada (N/mm²);

D_i : diâmetro (mm);

t_i : espessura do corpo de prova (mm).

1.4.2 Norma americana AASHTO TP105 (2013)

Apesar da escolha da utilização da norma europeia para a execução deste estudo, serão avaliados alguns parâmetros especificados pela AASHTO TP 105 na caracterização das amostras ensaiadas.

Esta norma estabelece parâmetros diferentes da europeia para a confecção de amostras, protocolo de ensaio, quantidade de amostras ensaiadas e temperatura de ensaio que não serão discutidas neste estudo, no entanto, são calculados parâmetros interessantes para a caracterização da mistura asfáltica analisada. Estes cálculos estão descritos a seguir.

A partir da curva de força vs. deslocamento obtida como resposta do ensaio, deve ser obtida a área sob o gráfico que é designada como Trabalho de Fratura (W_f). Calcula-se a Área de ligamento no centro da amostra conforme a Equação 3.

$$A_{lig} = e * (h - a) \quad (3)$$

Em que:

A_{lig} : Área de ligamento (mm^2);

e : espessura da amostra (mm);

h : altura (mm);

a : altura do entalhe (mm).

Esta informação é utilizada para o cálculo da Energia de Fratura (G_f) que representa a porção do trabalho de fratura por unidade da área de ligação através da Equação 4.

$$G_f = \frac{W_f}{A_{lig}} * 10^6 \quad (4)$$

Em que:

G_f : energia de fratura da amostra (J/m^2);

W_f : trabalho de fratura (J).

Como este parâmetro está diretamente ligado com a dimensão do corpo de prova, ele é relevante para a comparação entre amostras com a mesma configuração.

Do gráfico de força *versus* deslocamento gerado pela ruptura do corpo de prova, ainda é possível extrair o coeficiente de inclinação ($|m|$) da reta que tangencia a curva no ponto de inflexão que ocorre após o pico de carregamento. Esta inclinação é um indicador do quão dúctil ou frágil é o comportamento do material devido ao carregamento a que ele foi submetido. Com esta reta, é possível determinar o deslocamento crítico da amostra (D_c) expresso pelo ponto de interseção da reta com o eixo x.

Segundo Aragão (2014), todavia, o parâmetro D_c não representa de forma satisfatória as características de misturas asfálticas com comportamento mais frágil, pois parte desta energia dissipada provém das deformações viscoelásticas do material. Neste sentido, foi proposto o cálculo do Índice de Flexibilidade (FI) calculado utilizando os valores de inclinação da reta tangente e a energia de fratura para caracterizar a ductilidade do material estudado. Este parâmetro é calculado a partir da Equação 5.

$$FI = \frac{G_f}{|m|} * 0,01 \quad (5)$$

Em que:

G_f : energia de fratura (J/m²);

$|m|$ é o valor absoluto da inclinação da curva pós-pico m (kN/mm);

O fator 0,01 é usado para conversão das unidades.

2. Objetivos

- Desenvolver uma geometria de ensaio que permita verificar a eficácia do uso de camadas para absorção de tensões no controle da propagação de trincas;
- Verificar se os materiais escolhidos para reduzir a propagação de trincas são adequados para aplicação em misturas asfálticas;
- Avaliar o procedimento proposto para obtenção de amostras semicirculares quanto a sua aplicabilidade e conformidade com as exigências da norma adotada.

3. Materiais

Neste estudo, foram utilizados materiais que estão presentes tanto na construção de um novo pavimento quanto em um processo de reabilitação. Dentre eles duas misturas asfálticas compostas por ligante asfáltico e agregado pétreo, uma geogrelha e emulsão utilizada para pintura de ligação. Nesta seção, serão descritas suas características e aplicação.

3.1 Ligantes asfálticos

Nesta pesquisa, foram utilizados dois tipos de ligante asfáltico: CAP 50/70 e AB8. Ambos caracterizados de acordo com as especificações da Agência Nacional do

Petróleo (ANP) em seus Regulamentos Técnicos nº03/2005 e nº05/2008, respectivamente.

3.1.1 CAP 50/70

O CAP 50/70 foi escolhido para a mistura de referência e para a mistura utilizada com o SAMI geossintético. Optou-se pela sua utilização, pois é um ligante bastante comum na região, aumentando sua representatividade no cenário atual. Ademais, não contém nenhum modificador, diminuindo assim sua influência na retenção do trincamento e evidenciando a alteração de desempenho obtida a partir dos demais materiais propostos nesse estudo.

Para este ligante, a ANP especifica parâmetros de desempenho para os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade, ductilidade, entre outros. Foram realizados ensaios de caracterização no LAPAV e os resultados dos ensaios deste ligante se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização do ligante 50/70. Fonte: autora.

Propriedade	Método	Unid.	Limites ANP nº03/2005	Resultado
Massa específica	NBR 6296	g/cm ³	-	1,002
Penetração (100g, 5s, 25°C)	NBR 6576	g/cm ³	50 - 70	56
Ponto de amolecimento	NBR 6560	°C	mín. 46	48,25
Ductilidade à 25°C	NBR 6293	cm	mín. 50	100
Viscosidade Brookfield (a 135°C)			Mín. 274	322,5
Viscosidade Brookfield (a 150°C)	NBR 15184	cP	Mín. 97	162,3
Viscosidade Brookfield (a 177°C)			57-285	62,5

3.1.2 AB8

O ligante AB8 foi escolhido por ser uma solução amplamente aplicada como camada de absorção de tensões. Sua utilização no Brasil é crescente e, por isso, também se torna importante estudar seu comportamento. Para este material, foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade Brookfield e recuperação elástica. Os resultados resumidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados de ensaios para ligante AB8. Fonte: Mensch (2020).

Propriedade	Método	Unid.	Limites DNIT 111/2009	Resultado
Massa específica	NBR 6296	g/cm ³	-	1,05
Penetração (100g, 25°C)	NBR 6576	g/cm ³	30 – 70	55
Ponto de amolecimento	NBR 6560	°C	mín. 55	56,5
Recuperação elástica à 25°C	NBR 15086	%	mín. 50	78
Viscosidade Brookfield (a 177°C)	NBR 15184	cP	8000 a 2000	1352

3.2 Agregado mineral

Foi utilizado apenas um tipo de agregado mineral neste estudo. O agregado é de origem granítica e é extraído e britado pela Empresa de Mineração Eldorado, situada em Eldorado do Sul na região metropolitana de Porto Alegre. A composição granulométrica do material pétreo é apresentada na Figura 4 e Tabela 3 Os resultados dos demais ensaios de caracterização estão resumidos na Tabela 4

Figura 4 - Composição granulométrica do agregado pétreo. Fonte: Mensch (2020).

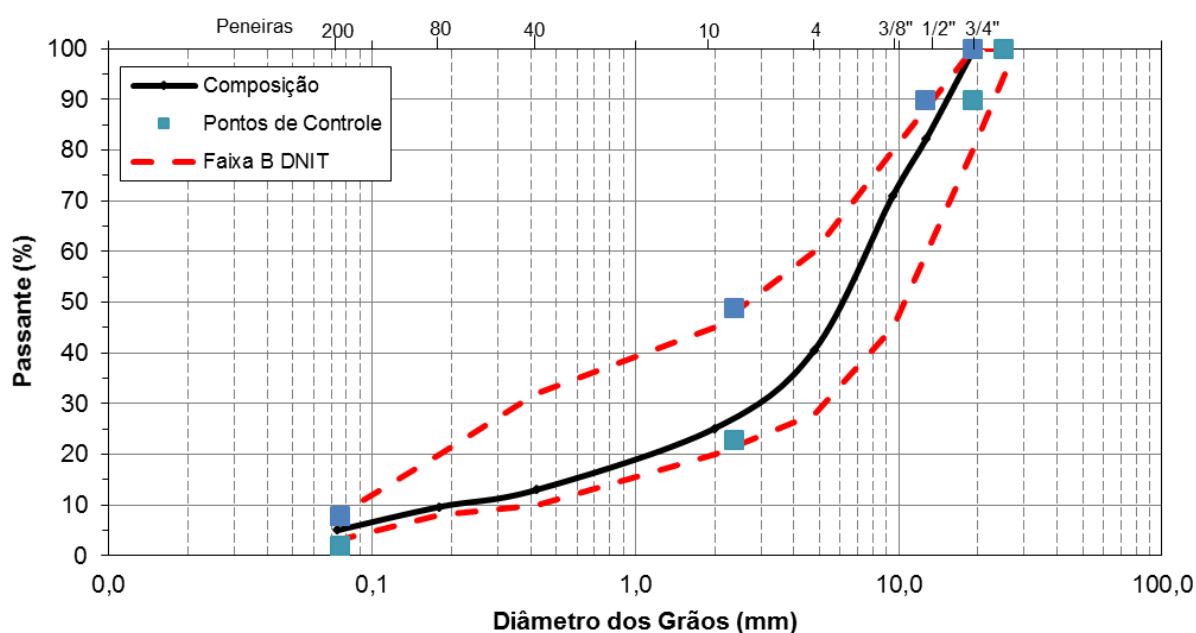


Tabela 3 – Análise granulométrica do agregado pétreo. Fonte: Mensch(2020).

PENEIRA	Abertura (mm)	Porcentagem passante		
		BRITA 3/4	BRITA 3/8	PÓ
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	46,83	100,00	100,00
3/8"	9,5	15,55	97,08	100,00
4	4,76	0,98	4,79	88,93
10	2	0,70	1,35	51,22
40	0,42	0,52	0,95	19,84
80	0,18	0,44	0,82	11,20
200	0,074	0,35	0,67	5,57

Tabela 4 - Resultados de ensaios de caracterização do agregado. Fonte: Dapper(2020).

Propriedade	¾"	3/8"	Pó de pedra
Abrasão "Los Angeles" (%)	19,53	25,65	-
Equivalente de areia (%)	-	-	93,37
Índice de forma		0,71	
Durabilidade (perda de massa em %)	0,43	0,55	1,72
Absorção (%)	0,72	1,17	0,79
Massa específica real (g/cm ³)	2,590	2,625	2,63
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,543	2,547	-
Massa específica aparente solta (g/cm ³)	1,353	1,366	1,579
Massa específica aparente compacta (g/cm ³)	1,474	1,474	1,708

3.3 Geogrelha

Em uma das configurações propostas, foi utilizada a Geogrelha Hatelit XP 50 fabricada pela empresa Huesker como camada de absorção de tensões. Este material foi escolhido por ser uma solução desenvolvida para reforço de concreto asfáltico. Sua matéria prima principal é Poliálcool vinílico (PVA) com revestimento betuminoso sobre um tecido não tecido. Suas especificações estão descritas na Tabela 5. É importante ressaltar que a escolha da matéria prima para a geogrelha utilizada deve ser feita levando em consideração todas as características de deformação e resistência adequadas, pois o comportamento dos materiais geossintéticos varia conforme a temperatura e às condições de adesividade com as camadas adjacentes.

Tabela 5 - Especificação da Geogrelha Hatelit XP 50. Fonte: Drenamac Geossintéticos Ltda.

Propriedade	Método	Especificação
Abertura nominal da malha, mm	NA	40 mm
Resistência à tração nominal	NBR/ISO 10319	50 kN/m
Deformação na resistência nominal	NBR/ISO 10319	≤ 6%
Resistência à tração - a 3% de deformação	NBR/ISO 10319	≥ 22 kN/m
Eficiência à temperatura - Ponto de fusão	-	250°C
Eficiência à temperatura - Resistência térmica	-	190°C
Teor de betume de revestimento	-	>60%
Apresentação e dimensões das bobinas (LxC)	-	(5x150) m

3.4 Emulsão

Para unir as camadas de diferentes materiais, foi utilizada emulsão do tipo RR2C fornecida pela empresa Greca. Este material foi selecionado por apresentar baixo tempo de ruptura que é interessante para evitar exposição prolongada a possíveis contaminações da superfície da placa moldada antes que seja compactada a camada

superior. Os resultados de ensaios de caracterização deste material estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Caracterização da emulsão RR2C. Fonte: Greca asfaltos.

Propriedade	Método	Especificação	Resultado
Sedimentação, % peso	NBR-6570	Máximo 5,0%	0,09
Peneiração 0,84mm, % peso	NBR-14393	Máximo 0,10%	0,02
Carga de Partícula	NBR-6567	Positiva	Positiva
Resíduo asfáltico, % peso	NBR-14376	Mínimo 67%	67,4
Viscosidade Saybolt-Furol a 50°C, S	NBR-14491	100 a 400 SSF	250
Desemulsibilidade, % peso	NBR-6569	Mínimo 50%	66,8

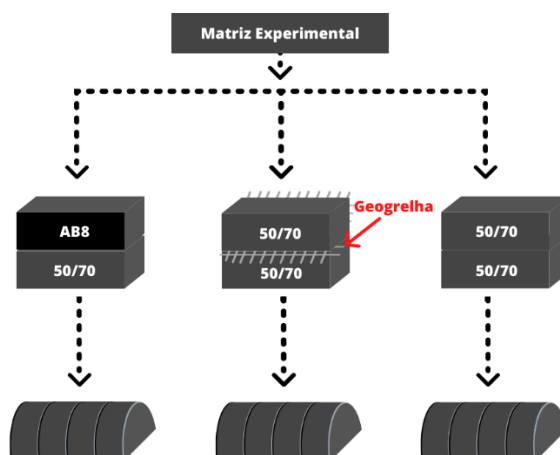
4. Metodologia

4.1 Matriz Experimental

Neste estudo, foram propostas duas disposições de materiais com dois tipos de camada de absorção: uma mistura asfáltica com ligante modificado pela adição de borracha cujos corpos de prova foram denominados como letra “B” e outra configuração com a utilização de geogrelha designada com a letra “G”.

Para cada composição destas, foi moldada uma placa e extraídos corpos de prova. Destes, no mínimo, 4 foram ensaiados de acordo o indicado em norma. Para que fosse possível comparar os resultados do SAMI, foi moldada também uma placa de referência cujos corpos de prova são identificados pela letra “R” apenas com mistura asfáltica com ligante 50/70 em duas camadas unidas por uma película de pintura de ligação. A matriz experimental é, portanto, como demonstrado na Figura 5

Figura 5 - Matriz experimental. Fonte: autora.



4.2 Misturas asfálticas utilizadas

As misturas asfálticas utilizadas foram dosadas pela metodologia Superpave, nomenclatura abreviada para *SUPERior PERforming asphalt PAVEMENTS*, e com a composição granulométrica determinada pela metodologia Bailey com Tamanho Máximo Nominal (TMN) 19mm.

A mistura com ligante 50/70 apresenta as características da Tabela 7, já a mistura com ligante AB8 tem as características resumidas na Tabela 8

Tabela 7 - Caracterização da mistura asfáltica com o ligante 50/70. Fonte: adaptado de Mensch(2020).

Propriedades	Especificações		Resultados
	Superpave	DNIT 031/2006 Capa	Mistura 50/70
Teor de Projeto (%)	-	-	4,70
Volume de Vazios (%)	4	3 a 5	5,20
Relação Betume Vazios (%)	65 - 75	65 - 78	67,40
Vazios do Agregado Mineral (%)	mínimo 13	mínimo 15	15,94
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m ³)	-	-	2,425
Massa Esp. Aparente (kN/m ³)	-	-	2,299
Relação Filler/Betume (%)	0,6 - 1,2	-	1,02

Tabela 8 - Caracterização da mistura asfáltica com ligante AB8. Fonte: Mensch(2020).

Propriedades	Especificações		Resultados
	Superpave	DNIT 112/09-ES	Mistura AB8
Teor de Projeto (%)	-	-	4,9
Volume de Vazios (%)	4	4 a 6	4,2
Relação Betume Vazios (%)	65 - 75	65 - 78	72,3
Vazios do Agregado Mineral (%)	mínimo 13	mínimo 15	15
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m ³)	-	-	2,419
Massa Esp. Aparente (kN/m ³)	-	-	2,318
Relação Filler/Betume (%)	0,6 - 1,2	-	1,02

4.3 Produção dos corpos de prova

O ensaio SCB geralmente é conduzido a partir de corpos de prova retirados de amostras cilíndricas com 15cm de diâmetro moldadas em compactador giratório. Esta configuração é relativamente simples e exige apenas cortes retilíneos para obtenção de corpos de prova, no entanto, neste processo de fabricação a compactação é feita em sentido perpendicular ao sentido de ensaio da amostra, portanto, se estes corpos de

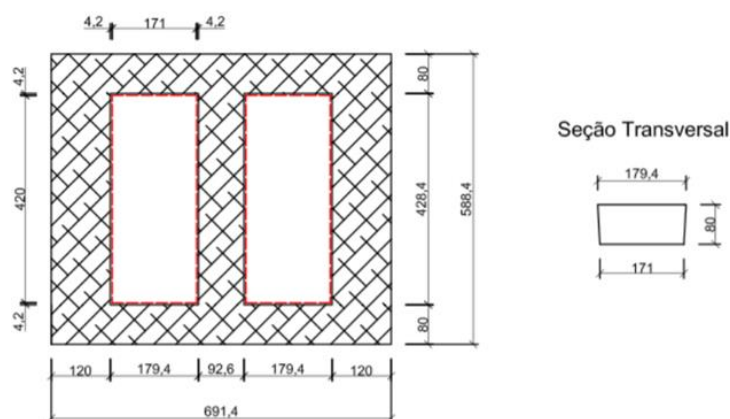
prova fossem moldados com mais de uma camada, elas ficariam verticais no momento do ensaio.

Deste modo, para obter camadas horizontais representativas no corpo de prova final, foi definido um processo através da moldagem de placas prismáticas moldadas com as camadas que se deseja estudar das quais serão extraídos corpos de prova semicirculares para realização do ensaio SCB.

A primeira etapa na produção dos corpos de prova que serão ensaiados é a produção das placas prismáticas. No LAPAV, é possível produzir placas de aproximadamente 17cm de largura por 42cm de comprimento e 8cm de altura, dimensões adequadas para a posterior extração de CPs semicirculares.

As placas são moldadas utilizando um molde metálico conforme a representação da Figura 6 e compactadas com um rolo compactador liso de pequeno porte. Durante a moldagem, não foi feito o controle de temperatura do material, no entanto, o molde foi aquecido na estufa (apenas para a moldagem da parte inferior). Para que fosse possível moldar a estrutura em duas camadas de 4cm de altura, foi produzido um espaçador responsável por transmitir a pressão do rolo compactador para a mistura no fundo do molde. O espaçador também foi aquecido em estufa previamente para auxiliar na preservação da temperatura da mistura.

Figura 6 - Esquemática do molde utilizado para moldagem das placas. Fonte: Colpo (2014).



Cada placa moldada teve uma configuração diferente, no entanto, o processo de moldagem é similar. Inicialmente, foi moldada a camada inferior da placa. Para esta etapa, calculou-se o volume do molde considerando apenas os 4cm inferiores da sua altura, com este volume, foi obtida a massa de mistura asfáltica necessária para obtenção de uma camada com 4% de volume de vazios e, com o auxílio do espaçador representado na Figura 7, foram compactados os 4cm inferiores da placa obtendo um resultado como mostrado na Figura 8.

Figura 7 - Espaçador usado na compactação. Fonte: autora.



Após o completo resfriamento desta mistura, foi feita a pintura de ligação e, na configuração com geogrelha, ela foi aplicada conforme a Figura 9. O volume de emulsão asfáltica utilizada foi calculado a partir das especificações fornecidas pelo fabricante com relação ao teor residual de asfalto contido na mesma e as indicações da norma DNIT 145/2012-ES.

Figura 8 – Placa dentro do molde com os 4cm inferiores moldados. Fonte: autora.



Após a ruptura da emulsão utilizada na pintura, calculou-se o volume restante no molde e, com este valor, a massa de mistura asfáltica necessária para a moldagem dos 4cm superiores da placa finalizando assim, sua produção. Dado tempo suficiente para o total resfriamento da camada superior, retira-se a placa do molde metálico e ela está pronta para a próxima etapa do processo que é a extração dos corpos de prova.

Figura 9 - Placa dentro do molde com os 4 com inferiores moldados. Fonte: autora.



Para a extração, foi utilizada uma serra copo com 15cm de diâmetro interno. Para minimizar quebras nas pontas do corpo de prova, as placas foram serradas ao meio e fixadas conforme a Figura 10 em um suporte que garantiu a estabilidade da placa no momento do corte. Esta etapa é a mais sensível e o corte deve ser feito de forma lenta e cuidadosa evitando o deslocamento da lâmina em qualquer direção que não seja o eixo da extração. Ao fim desta etapa, são retirados cilindros partidos ao meio que serão serrados com 5cm de largura para obtenção das amostras semicirculares como mostra a Figura 11 a, b, c e d.

Figura 10 - Suporte utilizado para posicionar as placas no momento da extração com serra copo. Fonte: autora.

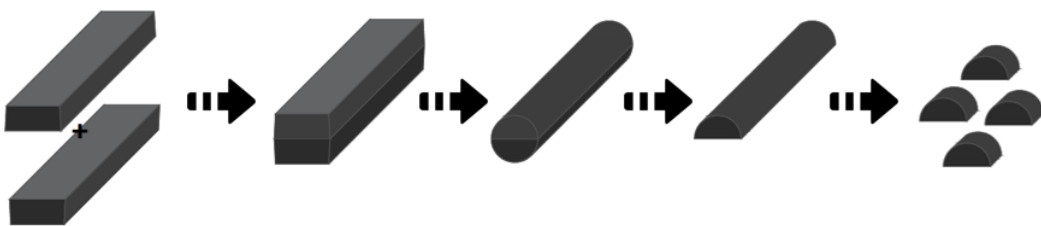


Figura 11 - a) superior à esquerda: cilindro partido ao meio extraído da placa com mistura AB8; b) superior à direita: cilindro partido ao meio extraído da placa com Geogrelha; c) inferior à esquerda: cilindro partido ao meio extraído da placa de referência d) inferior à direita: corpos de prova serrados a partir dos cilindros partidos ao meio. Fonte: autora.



Por fim, foi feita a fenda que irá induzir o início do trincamento nestes corpos de prova com o auxílio de uma serra de disco a seco e as amostras atingem sua configuração final. Para facilitar a visualização, o processo de obtenção dos corpos de prova foi esquematizado na Figura 12.

Figura 12 - Representação do processo de obtenção dos corpos de prova. Fonte: autora.



A fim de facilitar a visualização da fissura no corpo de prova eles foram pintados com tinta *spray* branca em uma de suas faces como pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Corpos de prova pintados com tinta spray. Fonte: autora.

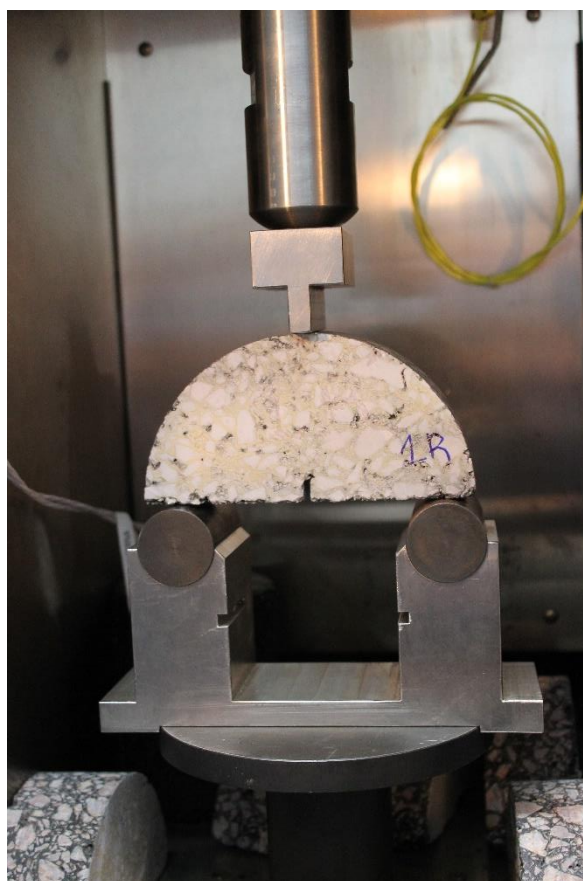


4.4 Ensaio SCB

Para realização deste ensaio, foram adotados os procedimentos conforme a Norma Europeia EN 12697-44 (2010). Esta norma não especifica uma temperatura de ensaio, foi adotada a temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ já praticada em estudos como Aragão (2019) e Godoi (2016). Os corpos de prova foram condicionados a esta temperatura, no mínimo, 4h imediatamente antes de serem ensaiados.

O equipamento utilizado para fazer o ensaio foi um *Material Test System* (MTS) que foi adaptado com peças específicas para que a aplicação do carregamento seja de acordo com o que a norma solicita. Foram utilizados um suporte com roletes para apoiar o corpo de prova e um cabeçote na parte superior que será responsável pela aplicação da carga. Com auxílio de um gabarito, o corpo de prova é posicionado de forma centralizada e é aplicada uma carga chamada “de contato” de 0,1kN para garantir que o atuador está encostando na amostra, o posicionamento final da amostra antes do ensaio é como mostrado na Figura 14. Os instrumentos são zerados para que a aquisição de dados inicie apenas quando o ensaio for iniciado.

Figura 14 - Posicionamento da amostra para realização do ensaio. Fonte: autora.



Em seguida, o equipamento inicia o ensaio aplicando o carregamento com deslocamento controlado em uma taxa de $5 \pm 0,2$ mm/min e é apresentado o gráfico da obtenção de dados onde são informados o deslocamento do atuador e a força, em N, que está sendo aplicada no corpo de prova.

O critério de parada sugerido pela norma é que o ensaio seja paralisado quando a leitura da força aplicada na amostra decair para 100kN, no entanto, em algumas amostras como as com membrana Geotêxtil, o corpo de prova se deformava demasiadamente sem que a força aplicada diminuísse e, então, o ensaio foi encerrado quando notava-se a desagregação dos agregados na face superior do corpo de prova, demonstrando que ele não resistia mais ao carregamento.

5. Resultados

5.1 Geometria das amostras

A obtenção de corpos de prova de geometria adequada para a realização do ensaio SCB é um dos objetivos deste estudo devido à proposição de um método alternativo ao convencional para a obtenção destas amostras. Durante toda a elaboração do procedimento de confecção das amostras semicirculares visou-se atender às dimensões especificadas por norma. Neste estudo, a configuração utilizada será a da norma europeia EN 12697-44 (2010) que estabelece as dimensões conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Dimensões especificadas pela norma EM 14697-44. Fonte: autora.

Altura (h) [mm]	Diâmetro (D) [mm]	Espessura (e) [mm]	Altura do entalhe (a) [mm]	Espessura do entalhe [mm]
75 ± 2	150 ± 1	50 ± 3	10 ± 1	$0,35 \pm 0,1$

Das placas moldadas, foram extraídos 8 corpos de prova semicirculares da mistura de referência, 6 da placa com mistura asfáltica com AB8 e mais 6 da placa com geogrelha.

Devido ao processo de obtenção dos corpos de prova ser uma proposição, foi difícil obter as dimensões exatas solicitadas pela norma. O percentual de acerto foi de 25% para a altura o que se deve à dificuldade de posicionar a serra copo de forma que ela retire corpos de prova de forma centralizada na divisória entre as placas. Esta medida foi também a que apresentou o maior desvio com amostras por vezes muito altas (em média 78,12mm) ou muito baixas (média 71,3mm) explicitando novamente que houve um deslocamento da serra no momento do corte. Com relação às demais medidas, em torno de 60% das amostras ficaram dentro das especificações tanto para o diâmetro quanto para a espessura demonstrando um maior controle destas medidas. Seu desvio também ficou muito mais próximo do que era esperado sendo menor do que 1mm para o diâmetro e próximo de 2mm para a espessura.

Com relação ao aspecto geral, notou-se que algumas amostras como da Figura 15 apresentaram pequenos desvios com relação às faces laterais dos corpos de prova. Em alguns casos, as faces laterais não formavam planos paralelos entre si. Este fato se deve a um problema identificado na serra utilizada para fazer a separação dos corpos de prova a partir do meio cilindro extraído. O suporte utilizado para apoiar o corpo de prova na serra não estava fixado de forma perpendicular ao disco de corte causando estas inclinações. Todavia, optou-se por não descartar estes corpos de prova considerando que um dos intuitos do estudo foi identificar possíveis dificuldades no processo de fabricação.

Figura 15 - Exemplo de amostra com faces não paralelas. Fonte: autora.



Obtidas as medidas dos corpos de prova, procedeu-se para a verificação do volume de vazios das amostras. Buscou-se, produzir amostras que atendessem à especificação do DNIT 031/2006 que exige 3 a 5% de Vv para misturas usadas na camada de rolamento. Foi possível atender a estes limites apenas nas amostras com mistura AB8 que apresentaram Vv em torno de 5%. Contudo, as amostras com Geogrelha apresentaram, em média, 7,68% de Vv enquanto a mistura de referência apresentou média de 7,6%. Levando em conta que a norma de ensaio não apresenta nenhuma indicação para o volume de vazios (Vv) ideal de cada amostra, os corpos de prova foram ensaiados da mesma maneira e esta diferença foi levada em conta na análise final dos resultados de ensaio. Os volumes de vazios para cada corpo de prova estão apresentados na Tabela 10

Tabela 10 - Volumes de vazios obtidos. Fonte: autora.

Identificação da mistura	n° CP	Volume de Vazios (Vv)
Mistura de Referência	1R	8,02%
	2R	7,61%
	3R	7,91%
	4R	7,14%
	5R	7,26%
	6R	7,13%
	7R	7,40%
	8R	8,24%
AB8	1B	5,52%
	2B	4,98%
	3B	4,68%
	4B	5,01%
	5B	5,43%
	6B	5,00%
Geogrelha	1G	7,79%
	2G	7,17%
	3G	7,40%
	4G	7,07%
	5G	7,99%
	6G	8,65%

5.2 Resultados do ensaio SCB

Apesar de todas as ressalvas em relação à geometria dos corpos de prova moldados, foram ensaiados todos para que fosse possível comparar seu desempenho entre si e identificar quais dimensões foram mais significativas e tiveram influência nos resultados do ensaio. Ao fim do ensaio, foram selecionados os corpos de prova com

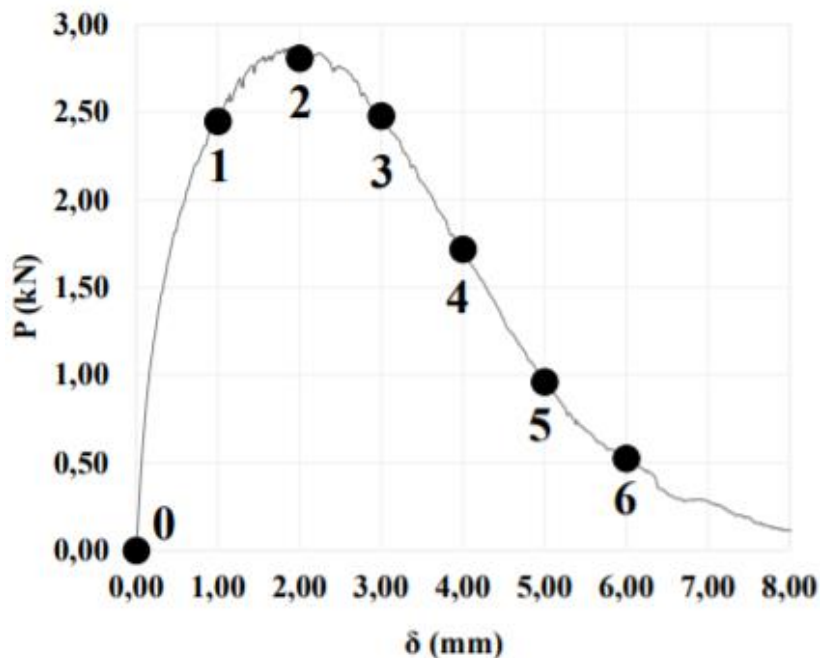
desempenho mais similar entre si para que fosse feita a comparação entre as diferentes configurações analisadas.

5.2.1 Análise dos Gráficos

Pode-se resumir o resultado esperado do ensaio SCB estático observando a Figura 16 onde estão representados os pontos de interesse na análise da fratura. Na fase de carregamento do ponto 0 ao 1, a amostra suporta um aumento de carga rápido sem que se rompa. Quando chega ao ponto 2, o material não consegue mais resistir ao esforço que está sendo aplicado sobre ele e se rompe dando início ao processo de trincamento a partir do entalhe preexistente na face inferior da amostra. Estas trincas começam pequenas e vão se abrindo e se interligando à medida que o deslocamento do atuador segue pressionando o corpo de prova passando pelos pontos 3 e 4 a partir de onde se formam macrotrincas até que ocorra a ruptura total da amostra quando o gráfico atinge os pontos 5 e 6. É possível comparar o estado inicial e final dos corpos de prova nas figuras do ANEXO A.

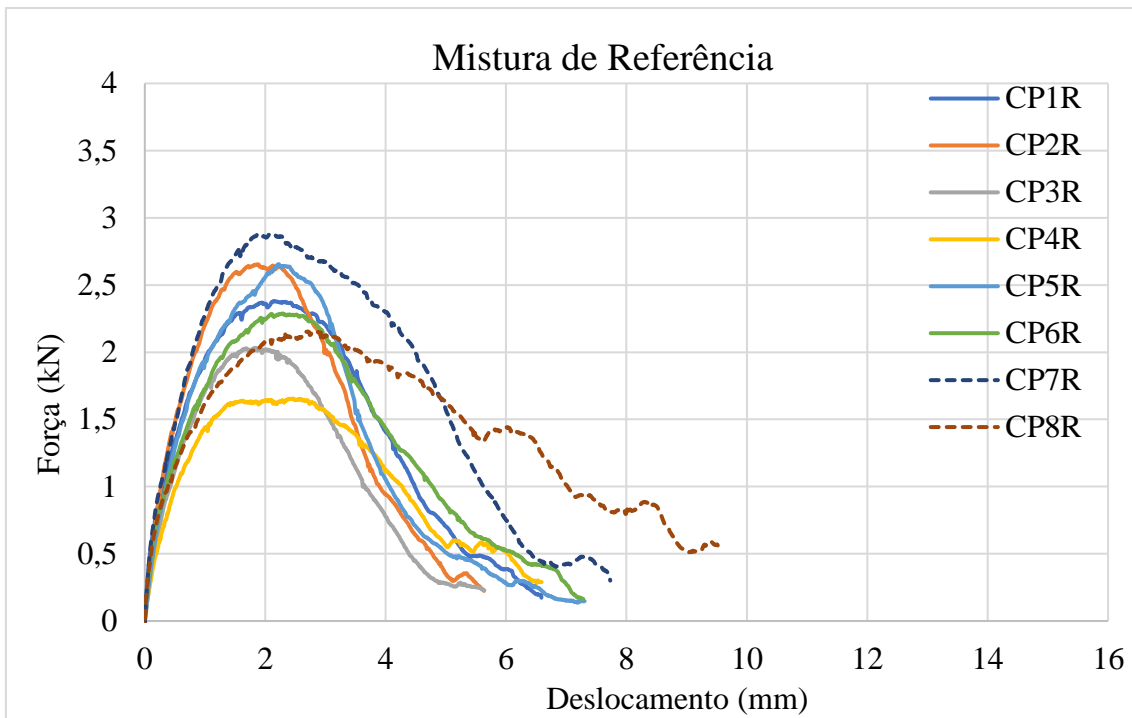
O critério de parada para a finalização do ensaio indicado é quando o carregamento reduzisse de valor para em torno de 0,1kN, no entanto, devido às configurações propostas neste estudo, este critério não pode ser atingido em todos os casos. Optou-se então, por finalizar o ensaio quando o gráfico atingisse um patamar de estabilização após a ruptura do corpo de prova.

Figura 16 - Representação de pontos de interesse na curva força versus deslocamento. Fonte: Godoi (2017).



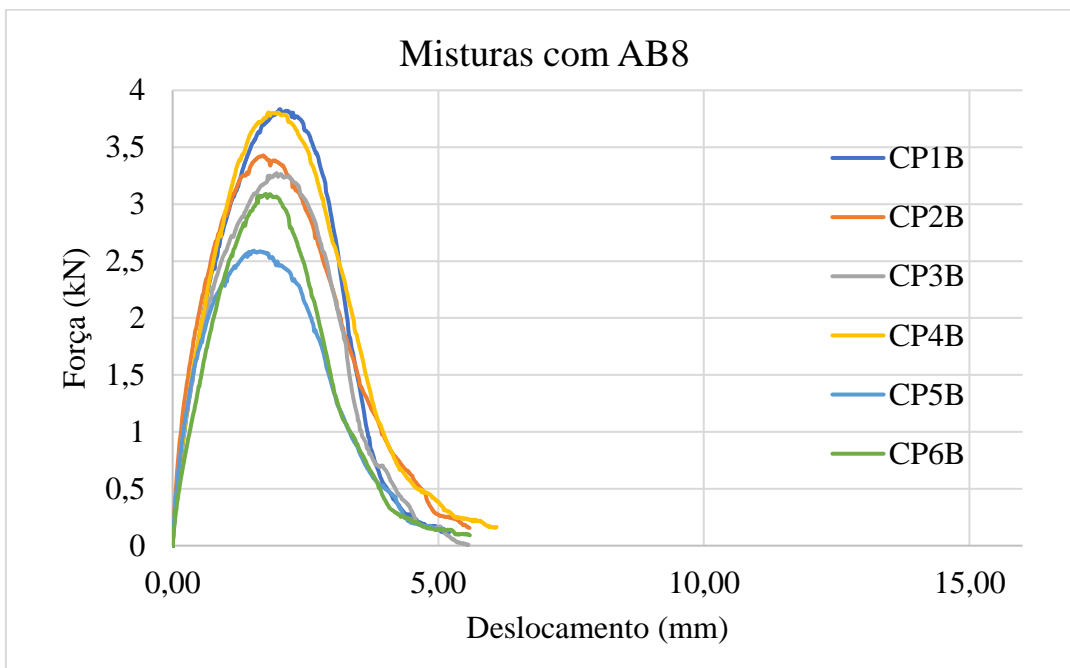
Nas Figuras 17, 18 e 19, são apresentados os gráficos de desempenho dos corpos de prova das misturas de referência, com asfalto borracha e com geogrelha, respectivamente.

Figura 17 - Gráfico força versus deslocamento para amostras do tipo "R". Fonte: autora.



Para esta configuração, pode-se observar que, apesar de uma amplitude de quase 1kN entre as cargas de pico dos corpos de prova 1R até 6R, estes apresentam um comportamento de descarregamento com declividade muito parecida, por este motivo, optou-se por descartar as amostras 7R e 8R do restante da análise.

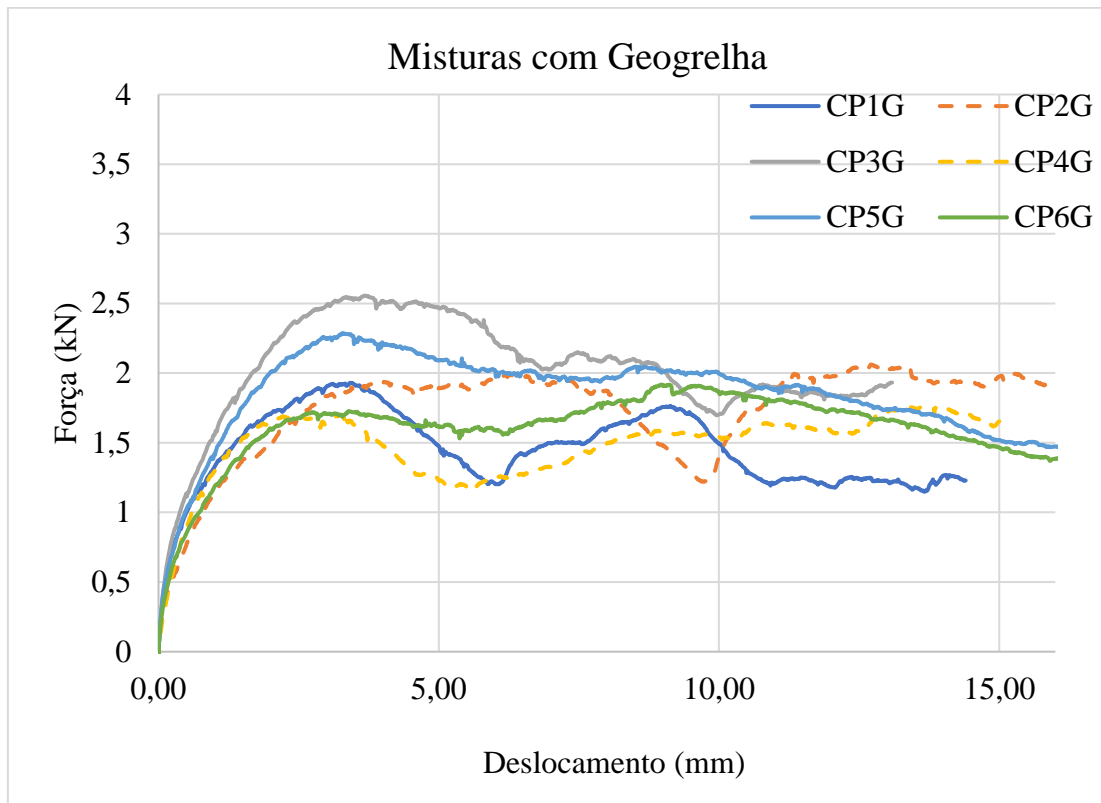
Figura 18 - Gráfico força versus deslocamento para amostras do tipo "B". Fonte: autora.



As amostras com esta configuração de ensaio composta por 4cm de mistura asfáltica com ligante 50/70 na parte inferior (representando o pavimento trincado) e 3,5cm de mistura asfáltica com ligante AB8 na parte superior (como camada de absorção de

tensões) tiveram um comportamento bastante padronizado, por isso, optou-se por seguir com a avaliação dos 6 corpos de prova ensaiados.

Figura 19 - Gráfico força versus deslocamento para amostras do tipo "G". Fonte: autora.



Estes corpos de prova apresentaram um comportamento completamente diferente das demais misturas estudadas, pode-se perceber que a fase de carregamento é bastante similar às demais misturas, no entanto, após o pico de carregamento, é possível perceber que o comportamento não segue sempre o mesmo padrão, por vezes, como é o caso do CP5G, ocorre uma estabilização no descarregamento ou uma leve elevação da carga e, a seguir, forma-se uma rampa descendente com inclinação negativa e baixa declividade, indicando alta ductibilidade do material e, em outras, como é o caso do CP2G ocorre um descarregamento rápido, seguido de um novo aumento força aplicada que se estabiliza em um patamar. Optou-se por não seguir com a análise dos corpos de prova CP2G e CP4G devido à ausência de um comportamento que possa ser interpretado pelos parâmetros estudados.

5.2.2 Cálculo dos parâmetros de caracterização

Como visto anteriormente, os resultados buscados para a caracterização dos materiais ensaiados provêm do tratamento dos dados obtidos do gráfico força *versus* deslocamento de onde são extraídas as informações de carregamento máximo ($F_{m\acute{a}x}$) e deslocamento no ponto de $F_{m\acute{a}x}$. Com estes dados, foram calculados a deformação máxima e a tensão máxima que o material pode suportar. Estes resultados estão descritos nas Tabelas 11, 12 e 13 são representativos das configurações de referência, AB8 e com Geogrelha, respectivamente.

Tabela 11 - Parâmetros para amostras do tipo "R". Fonte: autora.

Amostra	F _{max} (kN)	Deslocamento em F _{máx} (mm)	ε _{max}	σ _{máx} (N/mm ²) [Mpa]
1R	2,38	2,15	2,80%	1,527
2R	2,65	1,88	2,40%	1,726
3R	2,03	1,84	2,60%	1,281
4R	1,65	2,47	3,50%	1,001
5R	2,66	2,22	3,20%	1,603
6R	2,29	2,3	3,30%	1,374
Média	2,28	2,14	2,97%	1,42
Desvio Padrão	0,39	0,24	0,43%	0,26

Tabela 12 - Parâmetros para amostras do tipo "B". Fonte: autora.

Amostra	F _{max} (kN)	Deslocamento em F _{máx} (mm)	ε _{max}	σ _{máx} (N/mm ²) [Mpa]
1B	3,83	2,02	2,70%	2,172
2B	3,43	1,72	2,40%	1,981
3B	3,27	1,95	2,60%	2,062
4B	3,81	1,8	2,40%	2,139
5B	2,59	1,53	2,10%	1,468
6B	3,09	1,76	2,40%	1,821
Média	3,3367	1,7967	0,0243	1,9405
Desvio Padrão	0,4688	0,1742	0,0021	0,2634

Tabela 13 -- Parâmetros para amostras do tipo "G". Fonte: autora.

Amostra	F _{max} (kN)	Deslocamento em F _{máx} (mm)	ε _{max}	σ _{máx} (N/mm ²) [Mpa]
1G	1,93	3,42	4,70%	1,203
3G	2,56	3,69	4,70%	1,443
5G	2,29	3,29	4,20%	1,432
6G*	1,73	3,39	4,30%	1,136
Média	2,03	3,89	5,22%	1,243
Desvio Padrão	0,33	1,19	1,77%	0,16

* após o primeiro pico, houve um carregamento superior de 1,92kN, no entanto, este não se deve à resistência ao trincamento da mistura asfáltica, pois esta já se encontrava completamente trincada.

A partir dos dados do gráfico, também foram calculadas a área de ligação (Alig), o Trabalho de Fratura (Wf) que representa a área sobre o gráfico de força *versus* deslocamento, a Energia de Fratura (Gf) e com auxílio do coeficiente de inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão ($|m|$), foi determinado o deslocamento crítico (Dc) e o Índice de Flexibilidade (IF). As Tabelas 14,15 e 16 apresentam os resultados obtidos para cada configuração de ensaio.

Tabela 14 - Trabalho de ligação, energia de fratura e Índice de Flexibilidade das amostras "R". Fonte: autora.

Amostra	Alig (mm ²)	Wf (J)	Gf (J/m ²)	$ m $	Dc	FI
1R	2939,14	9,30	3165,41	1,23	5,00	25,78
2R	2971,60	8,63	2905,34	1,23	4,66	23,68
3R	2742,16	6,63	2417,64	0,87	4,81	27,68
4R*	2870,28	7,02	2447,12	-	-	-
5R	2867,70	8,64	3013,18	0,94	5,32	32,17
6R	2881,80	8,78	3047,76	0,81	5,78	37,59
Média	2866,71	8,17	2832,74	1,0151	5,11	29,38
Desvio Padrão	81,79	1,08	321,17	0,1989	0,45	5,56

* Não foi possível determinar o ponto de inflexão a partir da equação representativa do gráfico.

Tabela 15 - Trabalho de ligação, energia de fratura e Índice de Flexibilidade das amostras "B". Fonte: autora.

Amostra	Alig (mm ²)	Wf (J)	Gf (J/m ²)	$ m $	Dc	FI
1B	3333,00	10,67	3201,19	2,47	4,13	12,96
2B	3103,65	10,34	3332,53	1,33	4,69	25,02
3B	2951,00	9,23	3127,53	1,85	4,23	16,92
4B	3364,49	11,36	3377,05	1,80	4,51	18,81
5B	3131,00	7,31	2333,18	1,25	4,21	18,68
6B	3070,34	7,78	2535,47	1,56	4,04	16,29
Média	3158,91	9,45	2984,49	1,7086	4,30	18,11
Desvio Padrão	159,67	1,63	440,11	0,4435	0,25	3,99

Tabela 16 - Trabalho de ligação, energia de fratura e Índice de Flexibilidade das amostras "G". Fonte: autora.

Amostra	Alig (mm ²)	Wf (J)	Gf (J/m ²)	$ m $	Dc	FI
1G	2887,11	8,66	2999,27	0,1362	16,3	220,21
3G	3483,09	11,72	3363,43	0,1504	21,7	223,63
5G	3148,73	10,23	3249,05	0,049	49,0	663,07
6G	2958	8,27	2795,13	0,0548	34,2	510,06
Média	3158,91	9,72	3101,72	0,10	30,31	404,24
Desvio Padrão	159,67	1,58	254,75	0,05	14,55	219,60

6. Considerações finais

Neste tópico será feita a análise crítica dos resultados encontrados. Será feita a comparação entre as configurações testadas para determinar qual apresentou o melhor desempenho.

Considerando todos os dados obtidos neste estudo, é possível concluir que:

- Apesar das ressalvas quanto às dimensões finais dos corpos de prova, conclui-se que o método proposto para a obtenção destas amostras se provou adequado e, com pequenos ajustes que auxiliem na centralização da serra no momento da extração, pode ser aplicado para o objetivo proposto neste estudo;
- Observando os gráficos e parâmetros obtidos para os corpos de prova analisados, é possível concluir que os resultados se mostraram bastante coerentes para cada conjunto de amostras. Especialmente quanto ao carregamento máximo ($F_{m\acute{a}x}$), tensão máxima suportada ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e à deformação no carregamento máximo ($\epsilon_{m\acute{a}x}$) que apresentaram, para todas as configurações, desvios padrão satisfatórios;
- Avaliando os gráficos obtidos no ensaio, percebe-se que os corpos de prova com mistura de asfalto borracha tiveram um desempenho bastante similar aos corpos de prova de referência. Se comparadas as declividades das retas tangentes ao ponto de inflexão no carregamento ($|m|$) percebe-se que as amostras com AB8 apresentaram um comportamento mais frágil, com $|m|$ superior à referência. Houve diferença também no carregamento de pico médio entre as estruturas. As amostras do tipo “B” suportaram, em média, um carregamento superior à referência em mais de 1kN. Apesar de este fato poder ser relacionado com o volume de vazios das amostras “B” ser mais baixo do que a mistura de referência, este ganho indica maior resistência ao trincamento. Um ponto negativo observado nestes corpos de prova é que não ocorre a deflexão da trinca quando atingida a camada com ligante asfáltico AB8 indicando que a retenção da trinca se dá apenas pela resistência do material
- A configuração com Geogrelha (amostras designadas com “G”) suportou uma carga de pico bastante similar às amostras de referência, no entanto, o comportamento destes corpos de prova foi muito superior quanto à ductilidade tanto em relação às amostras “B” quanto às “R”. Isto pode ser comprovado avaliando a declividade $|m|$ média das amostras com geogrelha que foi reduzida à um décimo quando comparada com as referências. Este comportamento é bastante desejável, pois significa que a membrana foi capaz de dissipar completamente a tensão gerada nela pela fissuração na parte inferior. Nos corpos de prova, foi possível perceber que as amostras se deformaram muito após a trinca atingir a altura da geogrelha e, ainda assim, não houve a propagação da mesma trinca para a parte superior do corpo de prova;
- Avalia-se que a estrutura proposta, com 4cm de mistura asfáltica na parte inferior representando a mistura asfáltica trincada, pintura de ligação e solução

para redução do trincamento foi adequada para a avaliação do trincamento das amostras. Embora a trinca induzida precisasse passar por um trecho da camada inferior para que fosse avaliada a eficácia do material na parte superior, entende-se que isto não configurou um impedimento para a compreensão de como ocorreu a fratura da amostra;

- Por fim, avaliando o panorama geral dos resultados obtidos e as limitações deste estudo, considera-se que, entre as configurações propostas, com os materiais utilizados, as amostras com Geogrelha representam a melhor solução para a retenção do trincamento por reflexão.

7. Sugestões para trabalhos futuros

- Comparação com corpos de prova moldados da forma tradicional (*Superpave*);
- Avaliação quantitativa da influência de variações geométricas da amostra no resultado do ensaio;
- Realizar o ensaio SCB dinâmico para compreender o comportamento dos materiais testados com relação à fadiga;
- Utilização de algum software de *Digital image analysis* (DIC) para medição da trinca e avaliação do padrão de propagação;
- Comparação com outros materiais geossintéticos e ligantes.

Referências Bibliográficas

AASHTO TP 105: **Standard Method of Test for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend Geometry (SCB)**, Washington, DC, 2013.

ARAGÃO, F.T.S., HARTMANN, D.A., KIM, Y.R., MOTTA, L.M.G., AFTJAVAHERIAN, M. **A numerical-experimental approach to characterize fracture properties of asphalt mixtures at low in-service temperatures**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2447, Washington, D.C. pp. 42-50, 2014.

ARAGÃO, Lucas Cenci. **Avaliação de *induction healing* através de aquecimento em misturas asfálticas com adição de fibras metálicas**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2019.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de Alguns Modificadores de Ligante na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CAO, Rongji, BAI, Qifeng. **Laboratory Evaluation of Performances of Asphalt Rubber and GAP Graded Mixtures**. Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructures in China Congress. Nanjing, 2007

CHEN, Yu; LOPP, George; ROQUE, Reynaldo. **Effects of an Asphalt Rubber Membrane Interlayer on Pavement Reflective Cracking Performance**. JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING. Dezembro, 2013.

COLPO, G.B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

DNER-ME 35: **Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 81: **Agregados – Determinação da Absorção e da Densidade de Agregado Graúdo**. Rio de Janeiro, 1998.

DNER-ME 86: **Agregados – Determinação do Índice de Forma**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 78: **Agregado Graúdo – Adesividade a ligante betuminoso**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER-ME 84: **Agregados Miúdo – Determinação da Densidade Real**. Rio de Janeiro, 1995.

DNER-ME 54: **Equivalente de Areia**. Rio de Janeiro, 1997.

DNIT 031: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Levantamento visual contínuo para avaliação da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Procedimento. NORMA DNIT 008 / 2003. Rio de Janeiro, RJ: DNIT. 2003

DNIT. Pavimentação asfáltica – Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall- Procedimento. NORMA DNIT 178 / 2018. Rio de Janeiro, RJ: DNIT. 2018

DNIT. Pavimentação asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação de densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados- Método de Ensaio. NORMA DNIT XXX/ 2020. Rio de Janeiro, RJ: DNIT. 2020

ELSEIFI, M. A.; MOHAMMAD, L.; COOPER, S. **Modeling and evaluation of the cracking resistance of asphalt mixtures using semi-circular bending test at intermediate temperatures.** *Road and materials and pavement design*, 10.1080/14680629.2012.657035, p. 124-139, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12697-44: Bituminous Mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt Part 44: Crack Propagation by Semi-Circular Bending Test**, Brussels, Belgium, 2010.

FONTES, L.; TRICHÊS, G.; PEREIRA, P.; PAIS, J.; **Consideração da propagação de trincas em camadas de reforço com misturas com asfalto-borracha.** IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Fortaleza/CE, 2009.

GODOI, L. C. **Aplicação do Ensaio de Flexão em Amostra Semicircular para Avaliação do Trincamento de Misturas Asfálticas.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

IPSHIT IBNE IDRIGS, S.M. ASCE; HUSAM SADEK, A.M. ASCE; and MARWA HASSAN, F.ASCE. **State-of-the-art Review of the Evaluation of Asphalt Mixtures' Resistance to reflective Cracking in Laboratory.** *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2020

GENG, L.; WANG, X; REN, R, *et al.* **Research and Development of Stabilized Rubber Modified Asphalt (SRMA) for Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI) Binder of Asphalt Pavement in Xinjiang Uygur Autonomous Region.** CICTP 2014: Safe, Smart, and Sustainable Multimodal Transportation Systems. 2014.

MENSCH, N. G. **Contribuições à modelagem da deformação permanente de misturas asfálticas.** 2020. Tese (Qualificação de doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

MOSTAFA, A. Elsenfi; AL-QADI, F. Asce. **Modeling of Strain Energy Absorbers for Rehabilitated Cracked Flexible Pavements**. Setembro de 2005. *Journal of Transportation Engineering*. 2005. 653-661.

NBR 6560: **Materiais Betuminosos - Determinação do Ponto de Amolecimento - Método do Anel e Bola**. Rio de Janeiro, 2008.

NBR 6576: **Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração**. Rio de Janeiro, 2007.

NBR 15184: **Materiais Betuminosos - Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional**. Rio de Janeiro, 2004.

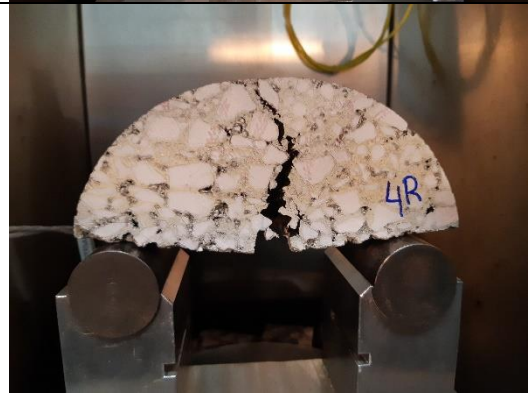
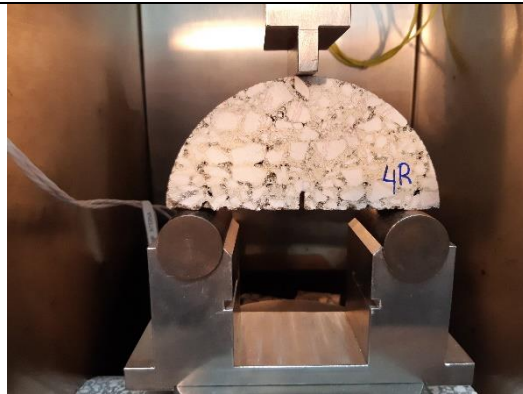
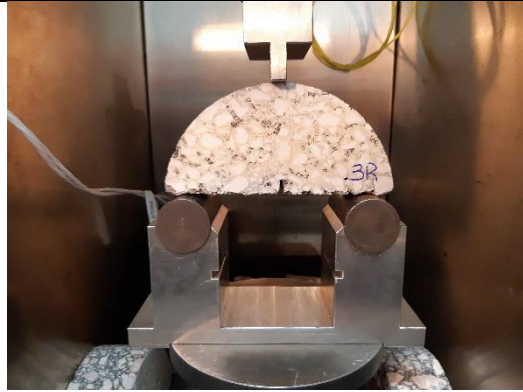
NBR 6296: **Produtos betuminosos semi-sólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa**. Rio de Janeiro, 2012.

SOARES, Jorge Barbosa; FREITAS, Felipe Araújo Colares. **Modelagem da Formação e Propagação de Trincas em Misturas Asfálticas**. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal do Ceará, Ceará. 2002.

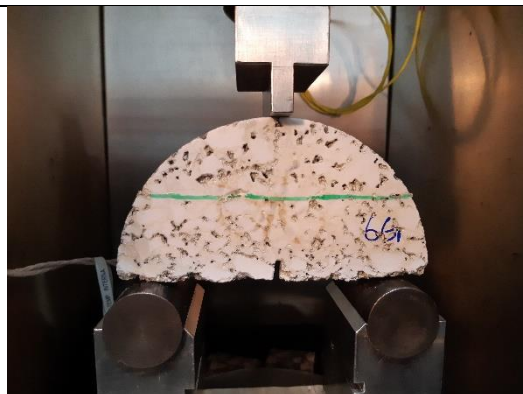
VIDAL, D. M., *Aplicação em Pavimentos*, Apostila do Curso de Aplicação de Geossintéticos à Obras Cívicas, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2001.

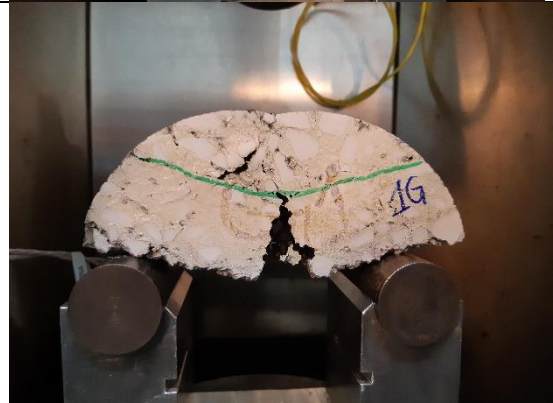
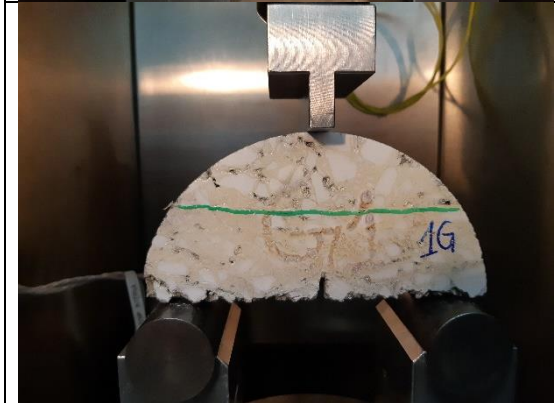
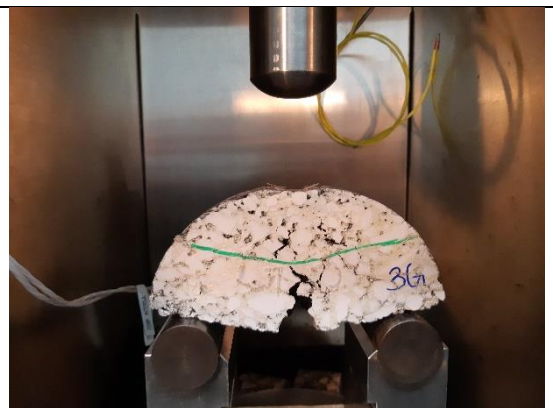
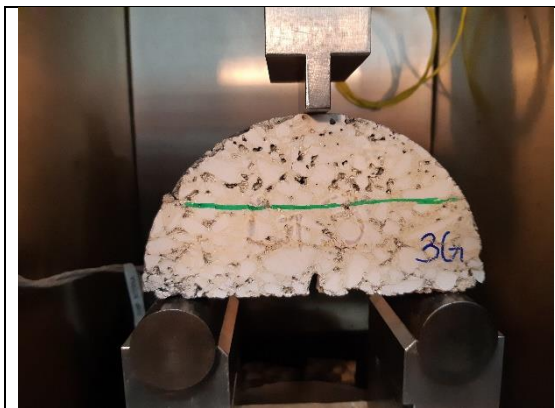
ANEXO A

CPs Referência



CPs com Geogrelha





CPs com Mistura AB8

