

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL LUÍS SIMÕES

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
GRANULOMETRIA DETERMINADA PELA FAIXA DE AGREGADOS
DOMINANTES**

CAMPO MOURÃO

2022

GABRIEL LUÍS SIMÕES

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
GRANULOMETRIA DETERMINADA PELA FAIXA DE AGREGADOS
DOMINANTES**

**Analys of the Permanent Deformation of Asphalt Mixtures with Granulometry
Determined by the Dominant Aggregate Range**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
bacharel em engenharia civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientadora: Prof. Dra. Eliana Fernandes dos Santos

CAMPO MOURÃO

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL LUÍS SIMÕES

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM
GRANULOMETRIA DETERMINADA PELA FAIXA DE AGREGADOS
DOMINANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
bacharel em engenharia civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

Orientadora: Prof. Dra. Eliana Fernandes dos Santos

Data de aprovação: 22 /11/ 2022

Eliana Fernandes dos Santos
Doutorado em Infraestrutura de Transportes
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adalberto Luiz Rodrigues de Oliveira
Doutor em Ciências da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paula Cristina de Souza
Doutora em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2022

Dedico este trabalho à toda minha família, sobretudo a minha mãe e meu pai que tanto admiro e que nunca mediram esforços para me educar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, pelo suporte incondicional em todos anos de faculdade.

Gostaria de agradecer minha mãe Luzia Aparecida Alamino Simões e meu pai Marcos Antonio Simões, as razões da minha vida, por buscarem sempre o melhor pra mim e por entenderem o que esses anos longe de casa significam.

Aos meus colegas, gostaria de agradecer pela amizade e por todo apoio nesses anos de faculdade onde pude conhecer pessoas que se tornaram muito importantes.

Aos meus amigos, Barbara dos Santos Lima e José Roberto Alves, agradeço a todos os momentos em que me ajudaram, em todos os dias que nos apoiamos para enfrentarmos juntos os obstáculos da graduação.

Agradeço a minha orientadora Prof. Dr. Eliana Fernandes dos Santos, por me ajudar nesse momento do curso tão importante, com muita sabedoria, me ensinando um pouco de seu vasto conhecimento.

A coordenação do curso de engenharia civil, por ser muito solícita em vários momentos que precisei durante toda minha graduação.

Agradeço a instituição de ensino, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por me permitir fazer parte dessa grandiosa universidade, que me proporcionou um crescimento pessoal e profissional, além de momentos inimagináveis.

Agradeço a empresa E-VIAS TECNOLOGIA EM INFRAESTRUTURA VIARIA LTDA, que sempre procurou atender minhas solicitações com o máximo de empenho, que sem ela não seria possível concluir esse estudo.

RESUMO

A deformação permanente em trilha de roda da camada de revestimento é um dos principais defeitos dos pavimentos flexíveis pois além de causar uma deterioração acelerada da estrutura, reduz a segurança do usuário. A granulometria da mistura asfáltica está entre os principais agentes causadores deste defeito, uma vez que os agregados minerais constituem aproximadamente 95% de sua composição. Assim, com o objetivo de promover uma maior resistência às deformações plásticas no revestimento, além das propriedades do ligante asfáltico, é necessário conhecer as características dos agregados e elaborar composições granulométricas que apresentem um bom intertravamento de partículas proporcionando misturas mais resistentes. O método da Faixa de Agregados Dominantes (FAD), permite, a partir dos parâmetros Porosidade FAD e Fator de Ruptura (FR), avaliar as granulometrias de modo que se confirme uma interação entre os agregados, resultando em uma melhor resposta da mistura asfáltica frente à deformação permanente. Nesse trabalho, considerando o Método da Faixa de Agregados Dominantes, foram elaboradas diferentes faixas granulométricas e confeccionadas misturas asfálticas que foram submetidas a ensaios de deformação permanente por equipamento simulador de tráfego. Os resultados obtidos revelaram que a Faixa de Agregados Dominantes (FAD) é uma importante ferramenta para avaliar e selecionar granulometrias de misturas asfálticas, permitindo analisar o intertravamento de partículas e relacionando-o com a resistência à deformação permanente.

Palavras-chave: faixa de agregados dominantes (FAD); pavimento; deformação permanente; fator de ruptura; granulometria.

ABSTRACT

The permanent deformation of the coating layer in wheel tracks is one of the main defects of flexible pavements because, in addition to causing an accelerated deterioration of the structure, it reduces the user's safety. The asphalt mixture granulometry is among the main agents causing this defect, since the mineral aggregates constitute approximately 95% of its composition. Thus, in order to promote greater resistance to plastic deformations in the coating, in addition to the properties of the asphalt binder, it is necessary to know the characteristics of the aggregates and develop granulometric compositions that present a good interlocking of particles, providing more resistant mixtures. The method of The Dominant Aggregates Size Range (DASR) allows, from the parameters Porosity DASR and Disruption Factor (DF), to evaluate the granulometries in order to confirm an interaction between the aggregates, resulting in a better response of the asphalt mixture against to permanent deformation. In this work, considering the Dominant Aggregates Band Method, different granulometric bands were elaborated and asphalt mixtures were prepared, which were submitted to permanent deformation tests by a traffic simulator equipment. The results obtained revealed that The Dominant Aggregates Size Range (DASR) is an important tool to evaluate and select the granulometries of asphalt mixtures, allowing the analysis of the interlocking of particles and relating it to the resistance to permanent deformation.

Keywords: dominant aggregates size range (DASR); pavements, permanent deformation; disruptor factor; granulometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mistura asfáltica no método FAD.....	19
Figura 2. Diferença de Espaçamento.....	20
Figura 3. Exemplo de diagrama de interação	21
Figura 4. Representação de valores de FR	23
Figura 5. Deformação Permanente no pavimento	25
Figura 6. Hamburg Wheel Tracking Device.....	26
Figura 7. Corpos de Prova em HWTD.....	27
Figura 8. Curva deformação permanente <i>versus</i> número de ciclos.....	28
Figura 9. Ensaio deformação permanente em HWTD	33
Figura 10. Curvas granulométricas com pontos de controle TMN 19 Superpave	36
Figura 11. Diagrama de interações	38
Figura 12. Teor de ligante das misturas	39
Figura 13. Porcentagem de agregados da FAD	41
Figura 14. Porcentagem de agregados intersticiais.....	41
Figura 15. Aspecto visual lateral antes do ensaio - Mistura 01	43
Figura 16. Aspecto visual lateral antes do ensaio - Mistura 02.....	43
Figura 17. Aspecto visual lateral antes do ensaio - Mistura 03.....	44
Figura 18. Aspecto visual lateral após o ensaio - Mistura 01	45
Figura 19. Aspecto visual lateral após o ensaio - Mistura 02.....	46
Figura 20. Aspecto visual lateral após o ensaio - Mistura 03.....	47
Figura 21. Resultados obtidos nos ensaios de deformação com Simulador Hamburgo	48
Figura 22. Resultados obtidos nos ensaios de deformação com Simulador Hamburgo a partir dos 5000 ciclos.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição da mistura asfáltica	17
Tabela 2. Pontos de controle de acordo com TMN - Superpave	17
Tabela 3. Valores mínimos de VAM	18
Tabela 4. Resultado da caracterização do ligante asfáltico	30
Tabela 5. Resultado das características dos agregados	30
Tabela 6. Granulometria – Mistura 01	34
Tabela 7. Granulometria – Mistura 02	35
Tabela 8. Granulometria – Mistura 03	35
Tabela 9. Comparação das granulometrias das misturas	36
Tabela 10. Interação entre os agregados FAD – Mistura 01	37
Tabela 11. Interação entre os agregados FAD - Mistura 02	37
Tabela 12. Interação entre os agregados FAD - Mistura 03	37
Tabela 13. Dosagens das misturas	39
Tabela 14. Granulometria da FAD	40
Tabela 15. Elementos da <i>nFAD</i>	42
Tabela 16. Parâmetros <i>nFAD</i>	42
Tabela 17. Análise pontual de deformação - Mistura 01	44
Tabela 18. Análise pontual de deformação - Mistura 02	45
Tabela 19. Análise pontual de deformação - Mistura 03	46
Tabela 20. Média das deformações	47
Tabela 21. Resumo dos Resultados	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CI	Componentes Intersticiais
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CGS	Compactador Giratório Superpave
DASR	<i>Dominant Aggregate Size Range</i>
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DMN	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Infra Estrutura de Transporte
DNIT	Diâmetro Máximo Nominal
FAD	Faixa de Agregados Dominantes
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
FR	Fator de Ruptura
HWTD	<i>Hamburg Wheel Tracking Device</i>
NBR	Norma Brasileira
RBV	Relação Betume Vazios
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SMA	<i>Stone Matrix Asphalt</i>
TMN	Tamanho Máximo Nominal
VAM	Volume de Vazios no Agregado Mineral
VI	Volume Intersticial
VTM	Volume Total da Mistura
VV	Volume de Vazios

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo Geral	12
2.2	Objetivos Específicos	12
3	JUSTIFICATIVA	13
4	REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1	Granulometria dos Agregados da Mistura Asfáltica	15
4.2	Seleção Granulométrica dos Agregados	15
4.3	Granulometria de Misturas Asfálticas	16
4.4	Faixa de Agregados Dominantes (FAD)	18
4.4.1	Relação Porosidade FAD	19
4.4.2	Proporção Relativa dos Agregados	20
4.4.3	Identificação da Faixa de Agregados Dominantes (FAD).....	21
4.4.4	Fator de Ruptura (FR)	22
4.5	Dosagem de Misturas Asfálticas	24
4.6	Deformação Permanente	24
4.7	Ensaio com Simulador de Tráfego	25
4.8	Deformação Permanente Acumulada e Flow Number (FN)	27
5	MATERIAIS E MÉTODOS	29
5.1	Considerações Iniciais	29
5.2	Materiais	29
5.2.1.	Caracterização do ligante asfáltico	29
5.2.2.	Caracterização dos agregados.....	30
5.3	Métodos	31
5.3.1	Composição granulométrica das misturas asfálticas.....	31
5.3.2	Dosagem das Misturas Asfálticas.....	31
5.3.3	Ensaio de Simulador de Tráfego Hamburgo	32
6.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	34
6.1	Granulometria das Misturas	34
6.2	Dosagem das Misturas	38
6.3	Elementos e Cálculos da FAD	40
6.4	Ensaio no Simulador de Tráfego	43
7.	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A deformação permanente é considerada irrecuperável pois tem sua formação proveniente de acúmulos de deformações plásticas causadas pelas cargas oriundas do tráfego, podendo ocorrer tanto no subleito, nas camadas granulares ou no revestimento asfáltico (NETO, 2018).

Comumente conhecido como Afundamento de Trilha de Roda (ATR), a deformação permanente sendo um problema detectado na maioria dos pavimentos, se caracteriza por abaixamentos longitudinais no caminho comum das rodas dos veículos (BASTOS, 2017).

No que se refere às misturas asfálticas, os agregados minerais sendo responsáveis por cerca de 95% de sua composição, diversos estudos como Kim (2006), Ferreira (2017), Portela (2018), Santos (2021), comprovaram que há uma relação intrínseca entre a granulometria dos agregados e a resistência da mistura à deformação permanente.

Para minimizar o problema da deformação permanente, Kim (2006) propôs a metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD) ou *Dominant Aggregate Size Range* (DASR). Esse método permite avaliar uma estrutura granulométrica a partir do intertravamento de partículas que criam um esqueleto pétreo estável dentro da mistura.

Em sua proposta Kim (2006), parte da premissa que deve haver interação entre as partículas de agregados para formação de uma estrutura FAD que mitigue a deformação permanente. Segundo o pesquisador, os agregados inferiores a FAD são os Componentes Intersticiais (CI), que podem afetar o comportamento da mistura asfáltica, pois dependendo de sua quantidade, podem causar uma ruptura da estrutura FAD. Os agregados pertencentes a FAD e os Componentes Intersticiais, quando em equilíbrio, permitem um intertravamento das partículas da mistura asfáltica, transmitindo esforços entre a estrutura FAD, propiciando um melhor resultado contra a deformação permanente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar o comportamento quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com granulometria elaborada pela Faixa de Agregados Dominantes.

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar granulometrias de misturas asfálticas aplicando o conceito da Faixa de Agregados Dominantes;
- Realizar a dosagem das misturas asfálticas para determinação dos parâmetros volumétricos das misturas e cálculo da porosidade FAD;
- Executar ensaios de deformação permanente nas misturas asfálticas utilizando um equipamento simulador de tráfego;
- Analisar a relação entre os resultados dos ensaios de deformação permanente e a porosidade FAD das misturas estudadas.

3 JUSTIFICATIVA

Segundo a Confederação Nacional dos Transportes, CNT (2017), o modo de transporte mais utilizado no Brasil é o rodoviário, sendo que 99% da malha viária pavimentada é constituída por pavimentos flexíveis. A qualidade dos pavimentos das rodovias tem impacto no desempenho do transporte rodoviário e na economia do país, pois uma rodovia em más condições de uso, além de comprometer a segurança e o conforto dos usuários, aumenta o custo operacional do transporte.

Os defeitos nos pavimentos flexíveis manifestam-se principalmente em danos na superfície de rolamento e podem ser resultado de imperfeições durante o processo construtivo, falhas no projeto estrutural, ações do meio ambiente e pelas solicitações resultantes do tráfego. De acordo com BERNUCCI, et al., 2010, os principais defeitos detectados são a deformação permanente e as trincas por fadiga.

A deformação permanente é um defeito estrutural que pode apresentar-se tanto no revestimento quanto nas demais camadas da estrutura, sendo definida como o acúmulo de pequenas quantidades de tensões irrecuperáveis resultantes de cargas aplicadas pelas rodas dos veículos no pavimento. (COOLEY, et. al. 2000). Quando presente no revestimento asfáltico, esse defeito pode ser resultado de má dosagem da mistura asfáltica.

As misturas asfálticas são uma combinação de agregados e ligante asfáltico que devem ser convenientemente dosados. Contudo, a maior parte da composição das misturas, em torno de 95%, é constituída por agregados, sendo indispensável o estudo não somente das características destes materiais como também do tamanho e da combinação de suas partículas que são representadas por uma curva granulométrica.

Normalmente a definição da granulometria das misturas é realizada por métodos de tentativa e erro, porém Kim (2006) investigando o intertravamento e a interação entre agregados com diâmetro superior a 1,18mm e sua relação com a deformação permanente, idealizou um método de seleção granulométrica denominado *Dominant Aggregate Size Range* (DASR) ou Faixa de Agregados Dominantes (FAD).

O referido método, baseado em conceitos da mecânica dos solos, utiliza a porosidade entre os grãos (porosidade FAD) como apoio para avaliação do comportamento das misturas com relação à deformação permanente. Segundo Kim

(2006), há uma gama interativa de tamanhos de partículas que contribui para promover o intertravamento em misturas asfálticas, interagindo um com o outro e formando uma estrutura primária responsável por resistir à deformação.

A Faixa de Agregados Dominantes foi estudada inicialmente no Brasil por Ferreira (2017) em sua dissertação de mestrado e recentemente por Santos (2021) em sua tese de doutorado, onde os autores verificaram uma forte relação entre a porosidade FAD e o comportamento das misturas asfálticas com relação a deformação permanente. Contudo, ainda há poucos estudos sobre o emprego do método no país, fato que justifica a elaboração deste trabalho.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Granulometria dos Agregados da Mistura Asfáltica

Agregado é um termo genérico para se referir a areias, pedregulhos e rochas minerais seja elas em seu estado natural ou como britadas em seu estado processado. (BERNUCCI, 2010).

A granulometria dos agregados é a distribuição de diferentes tamanhos de partículas constituindo aproximadamente 95% das misturas asfálticas, sendo responsáveis em grande parte por seu comportamento mecânico (KIM, 2006; FERREIRA 2018; SANTOS, 2020).

De acordo com Federal Highway Administration (FHWA) a importância de estudar as propriedades dos agregados é imprescindível pois eles são responsáveis por 80% da prevenção a deformação permanente, sendo assim, necessário ter um esqueleto pétreo bem dimensionado.

Uma mistura asfáltica ideal apresenta resistência à deformação, ao trincamento e boa trabalhabilidade e durabilidade. Essas características são atingidas quando há uma proporção entre ligantes asfálticos, agregados e os vazios de ar. (FERREIRA, 2017).

Desse modo, a composição granulométrica e suas especificações devem ser o pressuposto para a criação de uma mistura asfáltica que venha a atender aos requisitos para o qual foi projetada. (SANTOS, 2021).

4.2 Seleção Granulométrica dos Agregados

A escolha apropriada dos agregados sobrevém de suas especificações e da causa de sua utilização, por isso deve-se conhecer e selecionar as propriedades que os agregados devem possuir.

São de relevância, sua graduação, sua tendência à degradação, abrasão ou fratura, principalmente quando submetido ao tráfego. É importante ter conhecimento de que os agregados precisam ter uma boa adesão ao ligante asfáltico, além de ser necessário informações sobre o tipo de rocha, composição mineralógica, e sua composição química. (BERNUCCI, 2010).

Com relação a granulometria apesar de existirem diversos métodos de obtenção de distribuição granulométrica, a determinação de valores exatos e de possível reprodução são difíceis (SANTANA, 2017), por exemplo, o método Bailey, ainda que seja um dos métodos mais pesquisados, pois apresenta uma percepção da relação entre a graduação e os vazios do agregado mineral possibilitando uma análise da estrutura, ele não assegura que as partículas graúdas participem dessa rede estrutural, isto é, os agregados graúdos podem estar flutuando em uma estrutura de agregados finos (SANTOS, 2021).

Segundo Kim (2006), a determinação de diferentes granulometrias de agregados para o uso na mistura asfáltica deve ser proporcionada de forma adequada, para que todas as partículas entrem em contato mútuo criando uma estrutura resistente.

4.3 Granulometria de Misturas Asfálticas

A seleção da graduação para mistura asfáltica normalmente está dentro das normas do DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes que é um órgão federal, gestor e executor de infraestrutura de transportes contribuindo para desenvolvimento sustentável, e do DER – Departamento de Estradas e Rodagem que atua do mesmo modo, porém em escala estadual, os órgãos tem especificações de acordo com o método do projeto das misturas asfálticas, sendo a norma DNIT 031/2006 bem usual que trata das especificações de serviços de pavimento flexíveis.

Já dentre as especificações do DER, a norma DER-PR-ES-P 15/17 define o mínimo e o máximo de % passante para algumas peneiras, conforme Tabela 1.

Além disso, existem algumas misturas especiais, como faixas alemãs que são usuais no Brasil, ou grandes concessionárias que seguem suas próprias normas técnicas consistindo em faixas granulométricas diversas.

Tabela 1. Composição da mistura asfáltica

Peneira de malha quadrada		Porcentagem passando em peso					
Número	Abertura (mm)	Faixa A	Faixa B	Faixa C	Faixa D	Faixa E	Faixa F
1 1/2"	38,10	100	100	-	-	-	-
1"	25,40	95 - 100	90 - 100	100	-	-	-
3/4"	19,10	80 - 100	-	90 - 100	100	100	-
1/2"	12,70	-	56 - 80	-	80 - 100	90 - 100	-
3/8"	9,50	45 - 80	-	56 - 80	70 - 90	75 - 90	100
#4	4,75	28 - 60	29 - 59	35 - 65	50 - 70	45 - 65	75 - 100
#10	2,00	20 - 45	18 - 42	22 - 46	33 - 48	25 - 35	50 - 90
#40	0,42	10 - 32	8 - 22	8 - 24	15 - 25	8 - 17	20 - 50
#80	0,18	8 - 20	-	-	8 - 17	5 - 13	7 - 28
#200	0,08	3 - 8	1 - 7	2 - 8	4 - 10	2 - 10	3 - 10
Utilização como		Ligação		Rolamento			Reperfilagem
Variação do Teor de Projeto		4,0 - 5,5		4,5 - 6,0			5,00 - 6,50
Espessura máx., cm		6,0		5,0			3,00

Fonte: DER/PR-ES-P 15/17 (2017, p. 6)

Na metodologia SHRP-Superpave o Diâmetro máximo nominal (DMN) ou Tamanho máximo nominal (TMN) corresponde a peneira de abertura imediatamente maior do que a primeira peneira que reter mais de 10% do material (BERNUCCI, 2010). Para que a graduação em estudo atenda aos critérios SHRP-Superpave, a curva granulométrica deve passar entre os pontos de controle definidos pela Tabela 2, de acordo com TMN (Superpave).

Tabela 2. Pontos de controle de acordo com TMN - Superpave

Abertura (mm)	Pontos de controle									
	Porcentagem em massa, passando									
	37,5 mm		25 mm		19,00 mm		12,5 mm		9,5 mm	
	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
50	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37,5	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-
25	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-
19	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-
12,5	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-
9,5	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100
4,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90
2,36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67
0,075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10

Fonte: Adaptado AASHTO M 323-13 (2017, p. 5)

Os Vazios do Agregado Mineral (VAM), é um parâmetro volumétrico proveniente da escolha da curva granulométrica, podendo ser obtido pelo método de dosagem. O VAM deve ser definidos de acordo com o TMN seguindo os valores mínimos exigidos pela DER-PR-ES-P 15/17 na Tabela 3.

Tabela 3. Valores mínimos de VAM

Tamanho Máximo Nominal		% VAM, mínimo	
ABNT	mm	Vazios 4%	Vazios 5%
1 1/2"	38,10	11	12
1"	25,40	12	13
3/4"	19,10	13	14
1/2"	12,70	14	15
3/8"	9,50	15	16

Fonte: DER-PR-ES-P 15/17 (2017, p. 7)

4.4 Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

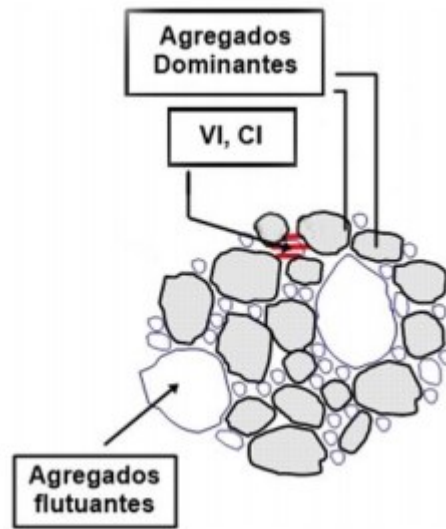
Determinado pela teoria do empacotamento, o método FAD apresenta entre suas vantagens de utilização, a avaliação das misturas asfálticas com foco em um esqueleto pétreo que compreenda estabilidade e resistência a deformação permanente (FERREIRA, 2017).

Utilizando a porosidade como um critério para garantir o contato mútuo entre as partículas, Kim (2006), concluiu que a porosidade do conjunto de partículas não deve ser maior que 50%; empregando-a assim como um critério para obtenção da resistência à deformação.

A hipótese de Kim (2006), considera que partículas com o tamanho menor que a FAD, desempenham a ação de preencher o espaço vazio entre a FAD chamado de Volume intersticial (VI). O VI, segundo o referido autor, é composto pelos agregados inferiores a FAD, o ligante asfáltico e os vazios da mistura asfáltica, onde todos são chamados de Componentes intersticiais (CI).

Partículas com dimensões excedentes a FAD, acabam não tendo contribuição para a resistência à deformação permanente pois acabam flutuando na mistura sem estabelecer contato entre elas (KIM, 2006). Na Figura 1 são ilustrados os conceitos do método FAD.

Figura 1. Mistura asfáltica no método FAD



Fonte: Ferreira (2017, p. 13)

4.4.1 Relação Porosidade FAD

O potencial de resistência à deformação de uma mistura pode ser considerado a partir da determinação de sua porosidade (BASTOS, 2017).

Em sua pesquisa, Kim (2006), concluiu que a Faixa de Agregados Dominantes (FAD) de uma mistura asfáltica deve ser consideravelmente grosseira e sua porosidade não deve ser superior a 50% para que ocorra o intertravamento entre as partículas melhorando o comportamento da mistura com relação à deformação permanente.

O estudo de Ferreira (2017), relata que uma porosidade inferior a 48% indica grande potencial de resistência a deformação permanente, em paralelo, porosidades FAD entre 48% e 52% são conhecidas como porosidades marginais, que são consideradas questionáveis, pois não é possível ter a certeza de seu comportamento frente a deformação permanente.

Dentre os demais parâmetros analisados em sua pesquisa, Santos (2021), concluiu que a porosidade FAD sobressaiu-se indicando misturas que apresentam melhor comportamento frente à deformação permanente quando a porosidade se situa dentro do intervalo de 38 a 48%.

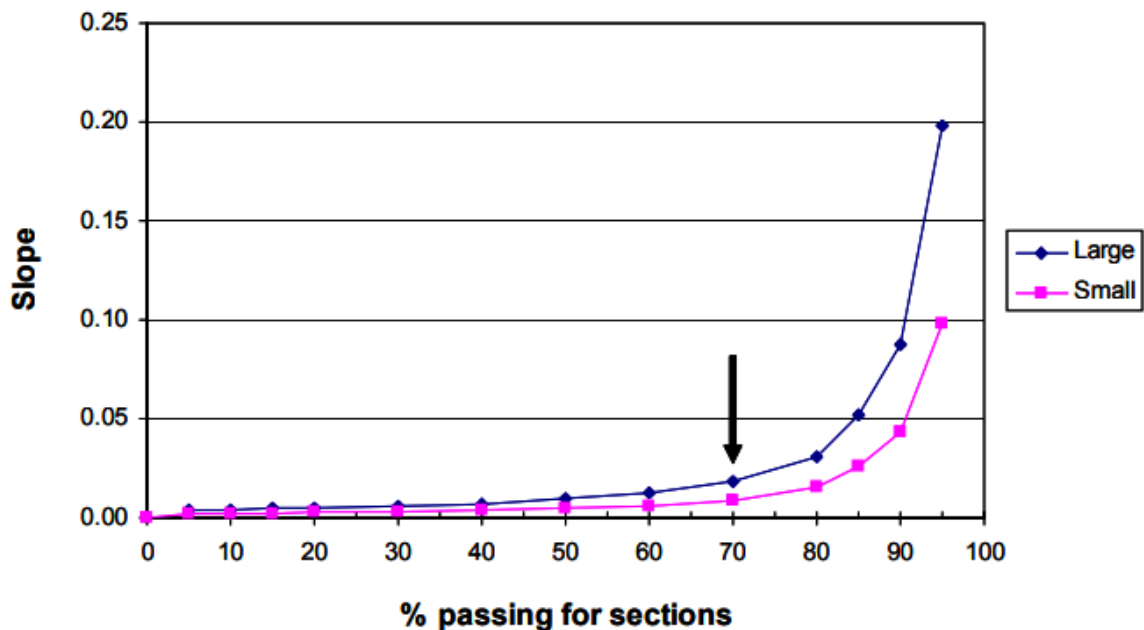
4.4.2 Proporção Relativa dos Agregados

Partindo do pressuposto que uma mistura asfáltica possui uma quantidade eficiente de ligante e vazios, é possível encontrar a porosidade de uma peneira, ou de peneiras consecutivas, desde que elas interajam.

Executado por meio de um diagrama entre as partículas, apontado por Kim (2006), essa interação de peneiras é encontrada de acordo com a relação entre a diminuição da proporção entre partículas maiores e menores em duas peneiras contíguas, e aumento do espaçamento entre as partículas maiores (FERREIRA, et. al. 2015).

A medida em que a proporção relativa entre dois tamanhos de agregados em peneiras seguidas se aproximar de 70/30, o espaçamento entre elas aumenta aceleradamente (KIM, et. al. 2009), de acordo com a Figura 2 a seguir.

Figura 2. Diferença de Espaçamento



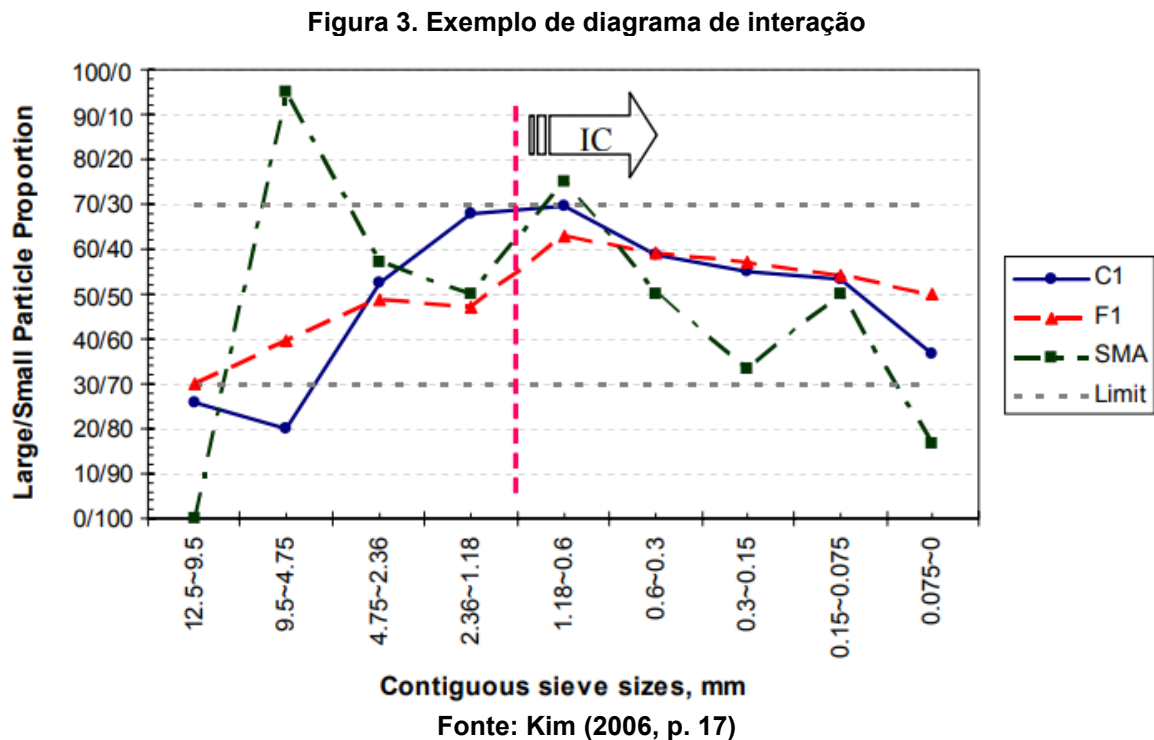
Fonte: Kim (2006, p. 30)

Segundo Kim, et. al. (2019), para resultar numa interação de partículas significativa, a relação de proporção dos agregados entre duas peneiras consecutivas deve estar em 70/30.

4.4.3 Identificação da Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

De acordo com Kim (2006), encontrar quais peneiras estão interagindo, e traçar o diagrama de interação entre elas é o pontapé inicial da aplicação da metodologia FAD.

Na Figura 3 temos uma representação gráfica de um diagrama de interação de peneiras, exemplificando a interação de peneiras para as quais apresentam uma relação de proporção de agregados consecutiva entre 30/70 e 70/30.



Uma vez identificada as peneiras interativas, são apontados os agregados da FAD, e sucessivamente é calculada a porosidade desses agregados por meio da Equação 1 (FERREIRA, 2015).

$$\eta_{FAD} = \frac{V_v(FAD)}{V_t(FAD)} = \frac{V_{ic,ag} + V_{AM}}{V_{tm} - V_{ag > FAD}} \quad (1)$$

Onde:

η_{FAD} : Porosidade da FAD (%);

$V_v(FAD)$: volume de vazios dentro da FAD (%);

$V_t(FAD)$: Volume total de agregado disponível para a FAD;

$V_{ic,ag}$: Volume de agregados intersticiais menores que a FAD;

VAM: Volume de vazios no agregado mineral;

V_{tm}: Volume total da mistura;

V_{ag > FAD}: volume de agregados maiores que a FAD (flutuantes).

A determinação do volume de agregados intersticiais menores que a FAD (Vic, ag) segue na Equação 2, assim como a Equação 3 nos traz o volume de agregados maiores que a FAD (V_{ag > FAD}), e a Equação 4 nos mostram o V_{tm}.

$$Vic, ag = \frac{\sum \%ret.<FAD}{Gsb} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$\sum \%ret.< FAD$: soma dos percentuais retidos nas peneiras menores que a FAD;

G_{sb}: massa específica aparentes dos agregados.

$$V_{ag > FAD} = \frac{\sum \%ret.>FAD}{Gsb} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

$\sum \%ret.> FAD$: soma dos percentuais retidos nas peneiras maiores que a FAD;

G_{sb}: massa específica aparentes dos agregados.

$$V_{tm} = \frac{100}{Gmb} \quad (4)$$

Onde:

G_{mb}: Densidade aparente da mistura;

Constante 100 representa a porcentagem total de uma mistura.

4.4.4 Fator de Ruptura (FR)

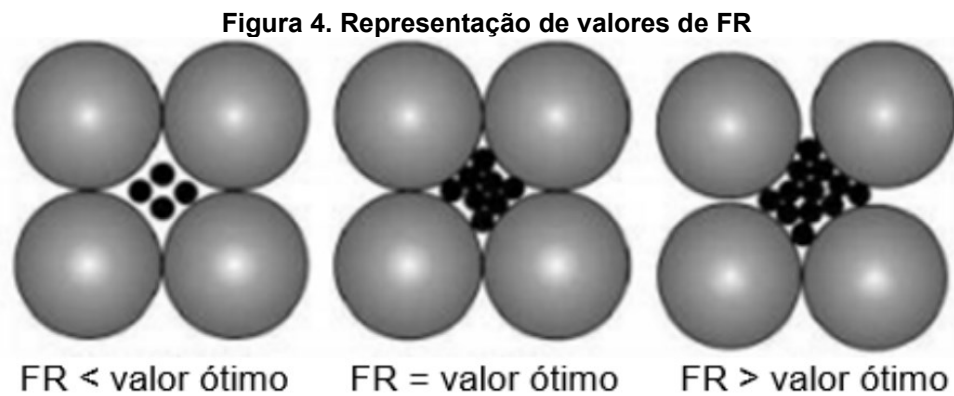
A metodologia Faixa de Agregados Dominantes se mostrou muito eficaz como uma ferramenta para compreender o comportamento de uma mistura frente a deformação permanente; contudo Kim (2006) destacou que além da FAD, os componentes intersticiais também podem ser relevantes para o comportamento da mistura.

GUARIN (2009), destaca que os componentes intersticiais tem a característica de preencher os espaços entre os agregados maiores, sem causar o rompimento da estrutura da FAD; além disso os CI têm influência no comportamento da mistura em

relação a deformação permanente e as trincas, agregados menores a 1,18mm podem ajudar no desempenho a deformação.

Com isso, o FR analisa a porção fina de agregados e seu potencial de danificar a estrutura da FAD, se o FR for baixo acaba não transmitindo esforços entre os agregados FAD, se for muito alto acaba danificando a FAD, no entanto, em equilíbrio, os CI estariam envolvidos com a FAD, e contribuiriam para a resistência. (SANTOS, et. al. 2020).

A Figura 4 representa os diferentes valores de FR e o comportamento dos agregados presentes na mistura.



Fonte: Portela, et. al. (2018, p. 1682)

CHUN (2012) recomenda que intervalos de 0,60 até 0,90 podem contribuir para bom comportamento da mistura, PORTELA (2018) aponta que valores inferiores a 0,60 podem indicar misturas graúdas, onde os CI não são capazes de transmitir os esforços da estrutura FAD, e valores de FR maiores que 0,90 apontam uma granulometria dispersa, onde os CI podem danificar a estrutura FAD.

Para melhor estudo da mistura, FERREIRA (2015) no diz que o Fator de Ruptura pode ser calculado pela Equação (4) a seguir.

$$FR = \frac{\text{Volume de Partículas CI potencialmente rompedoras}}{\text{Volume de Vazios da FAD}} \quad (5)$$

4.5 Dosagem de Misturas Asfálticas

Na determinação de misturas asfálticas, é necessário montar uma mistura que seja estável, tanto na sua trabalhabilidade, como em seu comportamento mecânico, por isso, é imprescindível determinar o teor ótimo de ligante responsável pelo equilíbrio das propriedades da mistura.

Para a dosagem de uma mistura é essencial estabelecer proporções de agregados, ligante e volume de vazios, para isso, são utilizadas algumas metodologias destacando-se o método Marshall e Superpave.

A maior diferença entre o método Marshall e o Superpave é a forma de compactação. Na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto, enquanto na dosagem Superpave a compactação é realizada por amassamento (BERNUCCI, 2010).

Um fator muito importante para definir as proporções de dosagem é o Volume de Vazios (VV), ele auxilia a encontrar o teor de ligante asfáltico a ser empregado na mistura, geralmente determinado entre 3 e 5%. O VAM são os Vazios do Agregado Mineral que expressam o espaço que é ocupado pelo ligante e pelo ar dentro de uma mistura já compactada, esse parâmetro deve seguir as normas DNIT (Tabela 3) com ele é possível estabelecer o RBV - Relação Betume Vazios, que se trata do VAM sem a soma dos volumes de ar.

4.6 Deformação Permanente

Considerada como uma das principais falhas da mistura asfáltica, a deformação permanente pode ocorrer em todas as camadas do pavimento, tem sua causa originada da carga do tráfego (BARROS, 2017).

No pavimento, a deformação permanente pode ser caracterizada de dois tipos, sendo a estrutural e a não estrutural. A deformação estrutural envolve todas as camadas do pavimento, já a deformação permanente não estrutural é definida pelo solevamento lateral do material, ocorrendo apenas na mistura asfáltica (PARTL et al., 2013). Sendo a deformação permanente não estrutural o foco desse estudo.

Minimamente causada por um só veículo, a deformação permanente pode ter sua causa de passagem repetitivas de veículos. (PARTL et. al. 2013).

Definida pelo rebaixamento no trilho de roda dos pavimentos, deformação do material asfáltico e pelo acúmulo de parcelas incorrigíveis causados pelas cargas repetitivas, a deformação permanente vai se juntando ao longo da vida do pavimento (BROWN, et. al. 2001, PARTL et. al. 2013)

Segundo Sohm (2011) o efeito do tráfego aumenta os problemas da deformação permanente, principalmente em estradas onde o tráfego é lento e canalizado como paradas de ônibus, estradas com encostas íngremes; também é observado esse fenômeno em estradas que são utilizadas para cargas pesadas; conforme exemplificado na Figura 5.

A norma DNER – PRO 164/94 define a deformação como um desvio da superfície da rodovia, fazendo com que a qualidade do rolamento, e a dinâmica dos veículos seja afetada.

Figura 5. Deformação Permanente no pavimento



Fonte: Bernucci (2010, p. 316)

O Afundamento do Trilho de Roda (ATR), é um dos principais defeitos do pavimento, além de degradar aceleradamente, ela gera desconforto e insegurança ao usuário, se tornando também uma das causas do aumento do custo operacional (MOURA, 2010).

4.7 Ensaio com Simulador de Tráfego

Mesmo com a falta de evolução de métodos laboratoriais para previsão de deformação permanente no Brasil a crescente demanda de entendimento das patologias da vida útil do pavimento, juntamente com a busca por padronização de ensaios, faz com que utilização de simuladores de tráfego em laboratório venha aumentando (BARROS, 2017).

Comumente adquiridos por laboratórios para fins de pesquisa, no Brasil há também simuladores de tráfego em laboratórios de empresas privadas ligadas a concessionárias (BORGES, 2014).

Dentre os simuladores de laboratório, temos o Hamburg Wheel Tracking Device (Figura 6), sendo ele capaz de medir o afundamento do trilho de roda em um corpo de prova, esse equipamento foi desenvolvido na Alemanha, e é utilizado como requisito para as rodovias mais movimentadas no País (COOLEY, 2000).

Figura 6. Hamburg Wheel Tracking Device



Fonte: Autoria Própria (2022)

A confecção dos corpos-de-prova seguem as especificações do equipamento que será utilizado no ensaio, no HWT os corpos-de-prova devem ser compactados por amassamento de acordo com a norma American Society for Testing and Materials (ASTM D7369-09) com 7% +/- 1% de volume de vazios; no ensaios eles devem ser imersos em água quente e submetidos à simulação de tráfego realizada pela aplicação de uma força de 705 N com uma roda metálica de largura 47 mm, o resultado é medido pelo relógio comparador, que faz uma relação do cor-de-prova antes do ensaio e após o ensaio, para mostrar o quanto a mistura asfálticas teve de afundamento; o ensaio se encerra quando atinge 20.000 ciclos ou quando a deformação for de 20 mm. (COOLEY, et. al. 2000).

A Figura 7 ilustra corpos-de-prova no equipamento Hamburg Wheel Tracking Device antes do início do ensaio.

Figura 7. Corpos de Prova em HWT



Fonte: Autoria Própria (2022)

4.8 Deformação Permanente Acumulada e Flow Number (FN)

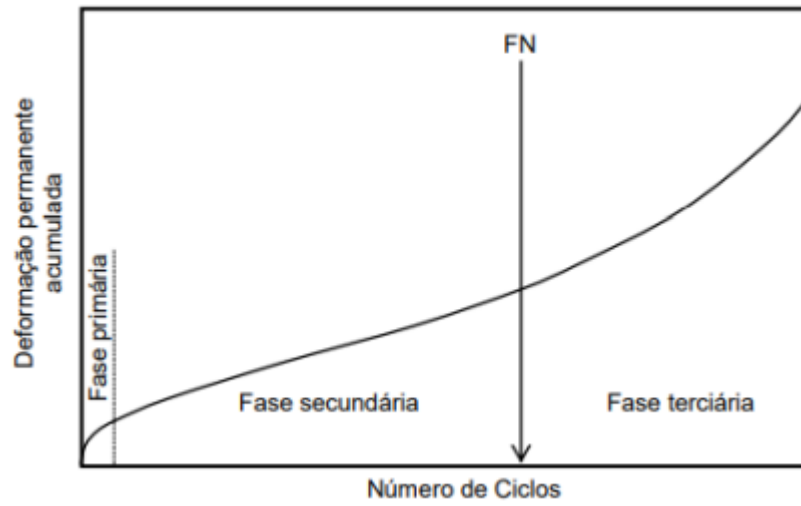
Os ensaios de deformação permanente têm seus resultados frequentemente apresentados por curvas de deformações plásticas em função do número de ciclos em que o corpo-de-prova é submetido durante o ensaio. O resultado de um ensaio pode ser dividido em três fases:

- Fase Primária: Associada a mudança volumétrica, as deformações são crescentes identificando uma densificação do material sendo responsável por um nível elevado de deformação, compatíveis com os primeiros anos de utilização do pavimento. (BARROS, 2017).
- Fase Secundária: Nessa fase as deformações ainda são crescentes, porém a uma taxa menor e constante, diferente da fase primária. (NETO, 2018).
- Fase Terciária: Na última fase, há pouca variação volumétrica, contudo, ocorrendo uma rápida deformação axial devido ao cisalhamento. (SANTOS, 2021).

O Flow Number (FN) corresponde ao número de ciclos em que é identificado o início da fase terciária, quando o corpo-de-prova entra em fase de cisalhamento

constante e é observado uma taxa de deformação mínima (BARROS, 2017), conforme observado na Figura 8.

Figura 8. Curva deformação permanente versus número de ciclos



Fonte: Leandro (2016, p. 122)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Considerações Iniciais

Para a realização da pesquisa foram determinadas três composições granulométricas de misturas asfálticas conforme as diretrizes estabelecidas pelo método da Faixa de Agregados Dominantes e realizadas as dosagens de acordo com a metodologia Superpave.

Foram moldados corpos-de-prova submetendo-os ao ensaio de laboratório em equipamento simulador de tráfego para a avaliação do comportamento das misturas em relação à deformação permanente.

5.2 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram disponibilizados pela empresa E-VIAS TECNOLOGIA EM INFRAESTRUTURA VIARIA LTDA, local onde foram realizados todos os ensaios.

Considerando apenas as mudanças na graduação dos agregados, que foi foco do estudo, os agregados utilizados foram de origem basáltica enquanto o ligante foi o Asfalto Modificado por Polímero (AMP) 55/75.

5.2.1. Caracterização do ligante asfáltico

Foi realizada a caracterização do cimento asfáltico, todos os parâmetros estão dentro dos limites definidos pelas normas correspondentes, os resultados e as respectivas normas técnicas utilizadas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Resultado da caracterização do ligante asfáltico

Método	Ensaio	Resultado	Limites
NBR 6576/07	Penetração 25°, 5s, 100, dm	48,0	45 - 70
NBR 6560/16	Ponto de amolecimento mín, C°	76,0	Mín. 55°C
NBR 15184/04	Viscosidade de Brookfield 135°, SPINDLE 21, 20 RPM	1005,0	Máx. 3000
NBR 15184/04	Viscosidade de Brookfield 150°, SPINDLE 21, 20 RPM	485,0	Máx. 2000
NBR 15184/04	Viscosidade de Brookfield 170°, SPINDLE 21, 20 RPM	237,0	Máx. 1000
NBR 15086/06	Recuperação elástica à 25°C, 20 cm, MÍN %	85,0	Mín. 75%
NBR 6560/16	Variação do PA, °C, MÁX	6,0	(-5 a 7°C)
NBR 6576/07	Porcentagem de penetração original, MÍN	64,6	Mín. 60%
NBR 15086/06	% de recuperação elástica original à 25°C, MÍN	88,8	Mín. 80%
ASTM D70	Densidade Relativa	1,0	-
ASTMD 2872	Variação de massa	-0,01	Máx. 1%

Fonte: Adaptado E-VIAS TECNOLOGIA EM INFRAESTRUTURA VIARIA LTDA (2022)

5.2.2. Caracterização dos agregados

A caracterização dos agregados foi realizada no laboratório da E-VIAS TECNOLOGIA EM INFRAESTRUTURA VIARIA LTDA., em Curitiba. Os resultados mostram que os agregados atendem aos requisitos estabelecidos por norma.

As características dos agregados e suas respectivas normas técnicas utilizadas são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Resultado das características dos agregados

Método	Ensaio	Resultado	Limites
DNER-ME 035/98	Abrasão Los Angeles	11,10%	Max. 50%
DNER-ME 089/94	Durabilidade do agregado graúdo	0,50%	Máx 12%
DNER-ME 089/94	Durabilidade do agregado miúdo	3,80%	Máx. 15%
DNER-ME 054/97	Equivalente de areia	73,30%	Mín. 55%
MANUAL DER/PR	Índice de lamelaridade	12,50%	Máx. 25%
NBR 14329/99	Adesividade do agregado graúdo	100,00%	-

Fonte: Adaptado E-VIAS TECNOLOGIA EM INFRAESTRUTURA VIARIA LTDA (2022)

Após a caracterização, os agregados foram secos em estufa e fracionados nas peneiras 50,80; 38,10; 25,40; 19,10; 12,70; 9,50; 6,30; 4,75; 2,36; 2,00; 1,18; 0,60; 0,42; 0,33; 0,18; 0,15; 0,075 mm e fundo.

Os fracionamentos dos materiais foram efetuados conforme o método de ensaio DNIT (DER – ME 083/98 – Agregados – análise granulométrica). A seleção das peneiras foi definida em função da série usual empregada para ensaios de deformação permanente.

5.3 Métodos

5.3.1 Composição granulométrica das misturas asfálticas

O método proposto por Kim (2006) orienta que a porosidade FAD é um parâmetro que pode indicar o comportamento da mistura asfáltica com relação à deformação permanente. Para a utilização da metodologia é necessário dosar a mistura asfáltica para a determinação do seu VAM (Vazios do Agregado Mineral) pois este é um parâmetro utilizado para o cálculo da porosidade. De acordo com as normas utilizadas para dosagem de misturas asfálticas, foram elaboradas composições granulométricas com DMN de 19,0 mm.

As composições granulométricas das misturas apresentar-se dentro dos pontos de controle Superpave para 19,0 mm (Tabela 2) definidos pela norma American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO M 323, 2017).

A elaboração das curvas granulométricas foi realizada de forma que as mesmas permanecessem dentro da Faixa C e dos padrões TMN 19 Superpave. Assim, foram geradas graduações próximas ao centro, ao limite superior e ao limite inferior da faixa.

Após a definição da composição granulométrica, é necessário verificar a interação entre peneiras consecutivas para cada uma das três misturas, conforme estabelece a metodologia FAD.

A determinação da proporção de cada mistura é feita de acordo com o quociente entre a porcentagem de agregados que são retidos na peneira maior, pela porcentagem de agregados retidos na peneira consecutiva menor.

Além de estarem entre as peneiras de 25,00 até 1,18 mm, para pertencerem a FAD, a proporção deve estar dentro do intervalo de 0,43 (30/70) a 2,33 (70/30).

5.3.2 Dosagem das Misturas Asfálticas

As dosagens das misturas asfálticas foram realizadas no laboratório da E-VIAS TECNOLOGIA EM INFRAESTRUTURA VIARIA LTDA, em Curitiba. Todos os procedimentos de dosagem seguiram a metodologia *Superpave*, em específico a norma AASHTO M323-13 (2013). As misturas foram compactadas considerando um volume de tráfego de médio a alto, que corresponde a 100 giros no Compactador Giratório *Superpave* (CGS).

Para a moldagem dos corpos-de-prova, o ligante AMP 55/75 foi aquecido a 160°C e os agregados a 170°C, temperaturas estabelecidas pelo fabricante do ligante asfáltico. As amostras foram colocadas em estufa a 150°C para envelhecimento à curto prazo.

Foram moldados 12 corpos-de-prova, sendo 3 CP's para cada teor que variou de 0,5 % no intervalo de 4,5 a 5,5 %. Seguindo os procedimentos da AASHTO T166 (2005), foram determinados os parâmetros volumétricos das misturas. Por pesagem foram obtidas as massas seca, imersa e saturada com superfície seca de cada CP sendo possível calcular suas densidades aparentes (Gmb).

Utilizando o método *Rice* descrito na ABNT NBR 15619/2012 e na ASTM D2041/2011, foi possível determinar a densidade máxima medida (Gmm) das misturas asfálticas. Esse método consiste em preparar a mistura asfáltica solta, ou seja, sem compactação com as mesmas proporções dos corpos-de-prova, seja em ligante, agregado e massa.

Posteriormente, para as três misturas, foi determinado o teor ótimo de ligante para o volume de vazios (VV) igual a 3,8%. O Volume do agregado mineral (VAM) e a Relação Betume Vazios (RBV) foram obtidos em concordância a norma DNIT 031/2006-ES e os métodos de ensaios descritos na DNER-ME 043/95.

5.3.3 Ensaio de Simulador de Tráfego Hamburgo

Para cada mistura foram moldados dois corpos-de-prova com dimensões de 150mm de diâmetro por 62mm de altura, conforme recomendado pelas especificações do equipamento. Os CP's foram preparados no teor ótimo, definido para cada uma das misturas, sendo compactados por amassamento com 7%, +/- 1% de volume de vazios.

Durante os ensaios de Simulador de Tráfego, os corpos-de-prova devem permanecer imersos em água quente com temperatura média de 50°C, +/- 1°C, conforme mostra a Figura 9.

As solicitações são impostas aos CP's por uma roda metálica de largura 47 mm. O ensaio tem a duração de 20.000 ciclos ou até o corpo-de-prova atingir uma deformação maior que 20mm.

Figura 9. Ensaio deformação permanente em HWT



Fonte: Autoria Própria (2022)

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Granulometria das Misturas

As Tabelas 6, 7, e 8 mostram as granulometrias formuladas para as misturas estudadas. A Tabela 9 apresenta as três granulometrias obtidas na elaboração das misturas.

Tabela 6. Granulometria – Mistura 01

MISTURA 01 – DMN 19		PROPORÇÃO DA MISTURA			MISTURA
PENEIRA		0,35	0,25	0,40	Passante
Número	Abertura (mm)	Brita 3/4	Pedrisco 3/8	Pó de pedra	(%)
2"	50,80	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	38,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	51,05	100,00	100,00	82,87
3/8"	9,50	19,85	99,65	100,00	71,86
5/16"	6,30	1,55	93,20	100,00	63,84
#4	4,75	0,60	37,10	99,90	49,45
#8	2,36	0,60	4,10	81,35	33,78
#10	2,00	0,45	3,15	74,40	30,71
#16	1,18	0,45	4,20	54,30	22,93
#30	0,60	0,45	1,85	36,05	15,04
#40	0,42	0,30	1,80	30,30	12,68
#50	0,33	0,30	1,95	25,45	10,77
#80	0,18	0,30	1,60	19,85	8,45
#100	0,15	0,30	1,55	18,75	7,99
#200	0,08	0,30	1,35	12,35	5,38

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 7. Granulometria – Mistura 02

MISTURA 01 – DMN 19		PROPORÇÃO DA MISTURA			MISTURA
PENEIRA		0,25	0,20	0,55	Passante
Número	Abertura (mm)	Brita 3/4	Pedrisco 3/8	Pó de pedra	(%)
2"	50,80	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	38,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	51,05	100,00	100,00	87,76
3/8"	9,50	19,85	99,65	100,00	79,89
5/16"	6,30	1,55	93,20	100,00	74,03
#4	4,75	0,60	37,10	99,90	62,52
#8	2,36	0,60	4,10	81,35	45,71
#10	2,00	0,45	3,15	74,40	41,66
#16	1,18	0,45	4,20	54,30	30,82
#30	0,60	0,45	1,85	36,05	20,31
#40	0,42	0,30	1,80	30,30	17,10
#50	0,33	0,30	1,95	25,45	14,46
#80	0,18	0,30	1,60	19,85	11,31
#100	0,15	0,30	1,55	18,75	10,70
#200	0,08	0,30	1,35	12,35	7,14

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 8. Granulometria – Mistura 03

MISTURA 01 – DMN 19		PROPORÇÃO DA MISTURA			MISTURA
PENEIRA		0,45	0,30	0,25	Passante
Número	Abertura (mm)	Brita 3/4	Pedrisco 3/8	Pó de pedra	(%)
2"	50,80	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	38,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,40	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	51,05	100,00	100,00	77,79
3/8"	9,50	19,85	99,65	100,00	63,83
5/16"	6,30	1,55	93,20	100,00	53,66
#4	4,75	0,60	37,10	99,90	36,38
#8	2,36	0,60	4,10	90,00	24,00
#10	2,00	0,45	3,15	85,00	22,40
#16	1,18	0,45	4,20	54,30	15,04
#30	0,60	0,45	1,85	36,05	9,77
#40	0,42	0,30	1,80	30,30	8,25
#50	0,33	0,30	1,95	25,45	7,08
#80	0,18	0,30	1,60	19,85	5,58
#100	0,15	0,30	1,55	18,75	5,29
#200	0,08	0,30	1,35	12,35	3,63

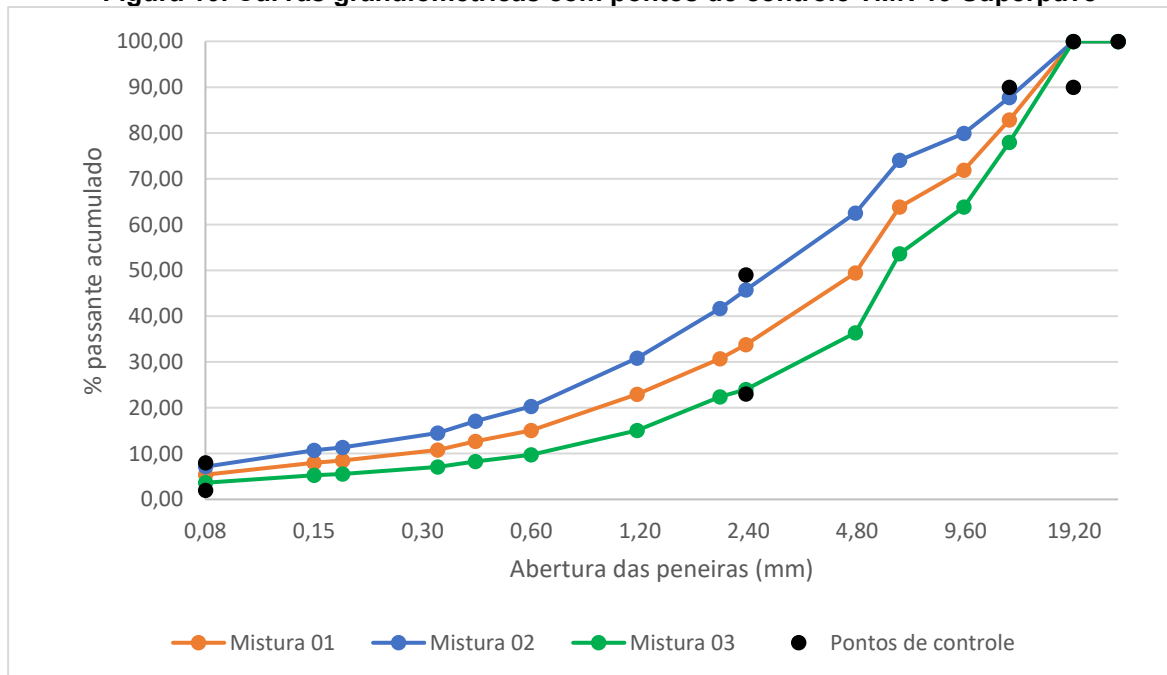
Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 9. Comparação das granulometrias das misturas

Peneira		Passante %		
Número	Abertura (mm)	Mistura 01	Mistura 02	Mistura 03
2"	50,80	100,00	100,00	100,00
1 ½"	38,10	100,00	100,00	100,00
1"	25,40	100,00	100,00	100,00
¾"	19,10	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	82,87	87,76	77,97
3/8"	9,50	71,86	79,89	63,83
5/16"	6,30	63,84	74,03	53,66
#4	4,75	49,45	62,52	36,38
#8	2,36	33,78	45,71	24,00
#10	2,00	30,71	41,66	22,40
#16	1,18	22,93	30,82	15,04
#30	0,60	15,04	20,31	9,77
#40	0,42	12,68	17,10	8,25
#50	0,33	10,77	14,46	7,08
#80	0,18	8,45	11,31	5,58
#100	0,15	7,99	10,70	5,29
#200	0,08	5,38	7,14	3,63
Fundo		0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria Própria (2022)

A Figura 10 ilustra as graduações próxima ao centro, ao limite superior e ao limite inferior da faixa, juntamente com os pontos de controle TMN.

Figura 10. Curvas granulométricas com pontos de controle TMN 19 Superpave

Fonte: Autoria Própria (2022)

As Tabelas 10, 11 e 12 mostram a interatividade entre os agregados das misturas estudadas.

Tabela 10. Interação entre os agregados FAD – Mistura 01
TMN - 19

Interação	Proporção	Interatividade
25,4 - 19,10	0,00	Não
19,10 - 12,70	0,00	Não
12,70 - 9,50	1,56	12,70 - 9,50
9,50 - 6,30	1,37	9,50 - 6,30
6,30 - 4,75	0,56	6,30 - 4,75
4,75 - 2,36	0,92	4,75 - 2,36
2,36 - 2,00	5,10	Não
2,00 - 1,18	0,39	Não

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 11. Interação entre os agregados FAD - Mistura 02
TMN - 19

Interação	Proporção	Interatividade
25,4 - 19,10	0,00	Não
19,10 - 12,70	0,00	Não
12,70 - 9,50	1,55	12,70 - 9,50
9,50 - 6,30	1,34	9,50 - 6,30
6,30 - 4,75	0,51	6,30 - 4,75
4,75 - 2,36	0,69	4,75 - 2,36
2,36 - 2,00	4,15	Não
2,00 - 1,18	0,37	Não

Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 12. Interação entre os agregados FAD - Mistura 03
TMN - 19

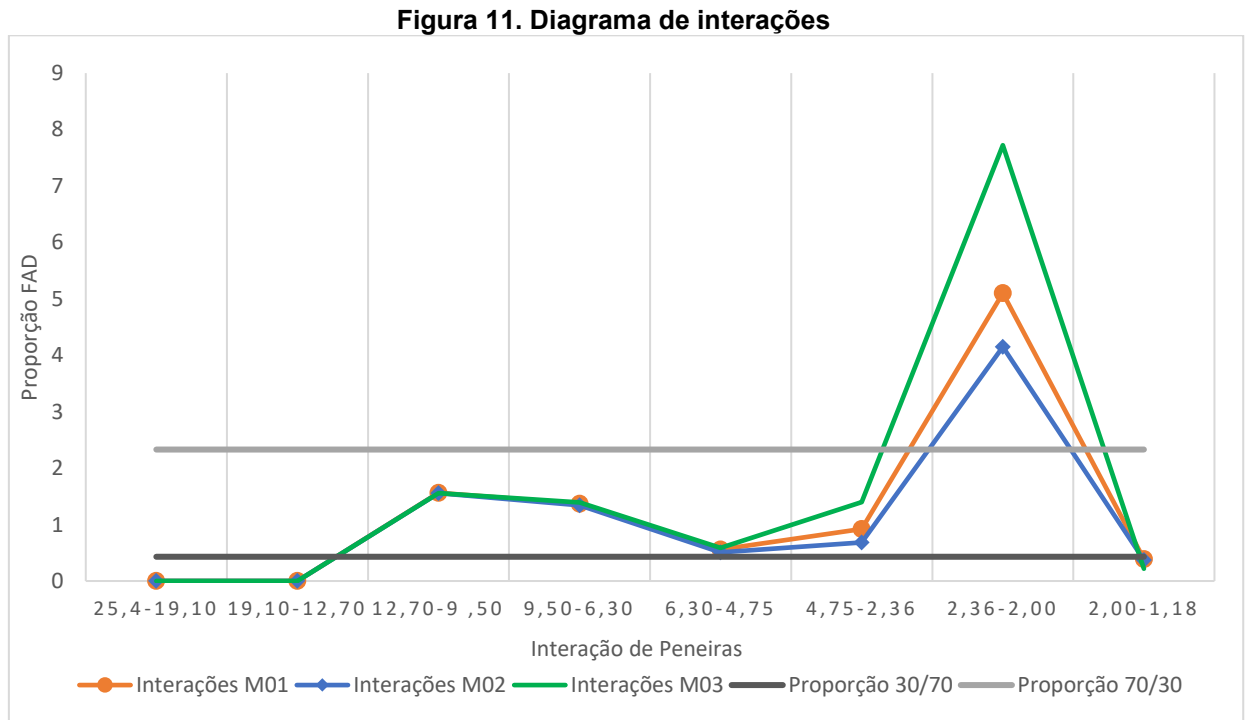
Interação	Proporção	Interatividade
25,4 - 19,10	0,00	Não
19,10 - 12,70	0,00	Não
12,70 - 9,50	1,56	12,70 - 9,50
9,50 - 6,30	1,39	9,50 - 6,30
6,30 - 4,75	0,59	6,30 - 4,75
4,75 - 2,36	1,40	4,75 - 2,36
2,36 - 2,00	7,72	Não
2,00 - 1,18	0,22	Não

Fonte: Autoria Própria (2022)

As Tabelas 10, 11 e 12 mostram que todas as misturas apresentaram interação para o mesmo intervalo de peneiras, ou seja, desde a peneira com abertura

12,7 mm até a peneira com 2,36 mm. Com isso, verifica-se que pela metodologia FAD todas as graduações formuladas possuem uma faixa de agregados dominantes dentro do referido intervalo.

A Figura 11 ilustra as peneiras que interagem juntamente com a proporção definida pela metodologia FAD.



6.2 Dosagem das Misturas

Neste trabalho, o VV (volume de vazios) foi fixado em 3,8% para todas as misturas. A partir do VV determinou-se o teor ótimo de ligante das misturas e os demais parâmetros volumétricos. Conforme explicado no item 5.3 Métodos, as graduações foram determinadas dentro da Faixa C do DNIT (Tabela 1) e do TMN 19mm – Superpave (Tabela 2) de modo que todas possuíssem uma Faixa de Agregados Dominantes (Figura 11).

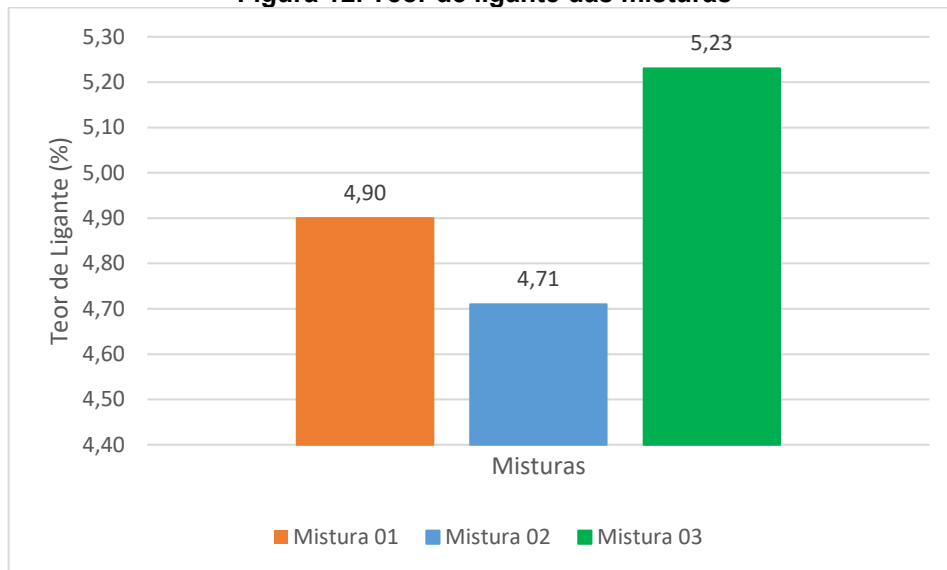
A Tabela 13 apresenta os resultados das dosagens das misturas.

Tabela 13. Dosagens das misturas

Método	Características	Mistura 01	Mistura 02	Mistura 03	Limites
DNER-ME 043/95	Teor adotado (%)	4,90	4,71	5,23	-
DNER-ME 043/95	Volume de vazios (%)	3,80	3,80	3,80	3 - 5%
DNER-ME 043/95	Relação betume vazios (%)	76,40	73,20	78,00	70 - 82%
DNER-ME 043/95	Vazios do agregado mineral (%) (VAM)	16,10	14,20	17,30	Mín 13%
NBR 15619/16	M. específica dos agregados (g/cm ³) (Gsb)	2,874	2,823	2,917	-
DNIT 431/2020	D. da mistura compactada (g/cm ³) (Gmb)	2,536	2,543	2,546	-
DNIT 428/2020 ME	Densidade aparente (g/cm ³) (Gmm)	2,636	2,643	2,647	-
DER/PR ES P 15/17	Relação Filler betume	1,10	1,45	0,74	0,8 - 1,6%

Fonte: Autoria Própria (2022)

A Figura 12 representa a porcentagem do teor de ligante obtida para cada mistura.

Figura 12. Teor de ligante das misturas

Fonte: Autoria Própria (2022)

Com relação às dosagens das misturas asfálticas estudadas, é possível observar na Tabela 13 que a Mistura 02, que se encontra próxima dos pontos de controle máximos do TMN 19, apresentou o menor teor de ligante para o VV igual a 3,8%, pois possui o menor VAM. Isso significa que a Mistura 02 apresenta menores vazios entre os agregados, quando comparada às Misturas 01 e 03, e desta forma, necessita de menor quantidade de ligante para preencher esses vazios.

A Mistura 03, que se encontra próxima dos pontos de controle mínimo do TMN 19, foi a mistura que apresentou um maior VAM, ou seja, maiores vazios entre os agregados, e conseqüentemente necessitou de uma porcentagem maior de ligante para preencher os vazios.

A Mistura 01, que se encontra próxima da média dos pontos de controle da TMN 19, demonstrou VAM intermediário entre a Mistura 02 e 03, apresentando teor de ligante intermediário para o VV considerado.

6.3 Elementos e Cálculos da FAD

Utilizando o método da Faixa de Agregados Dominantes (FAD), dispendo-se das curvas granulométricas (Tabela 9) que foram analisadas no intuito de verificar a interação de peneiras (

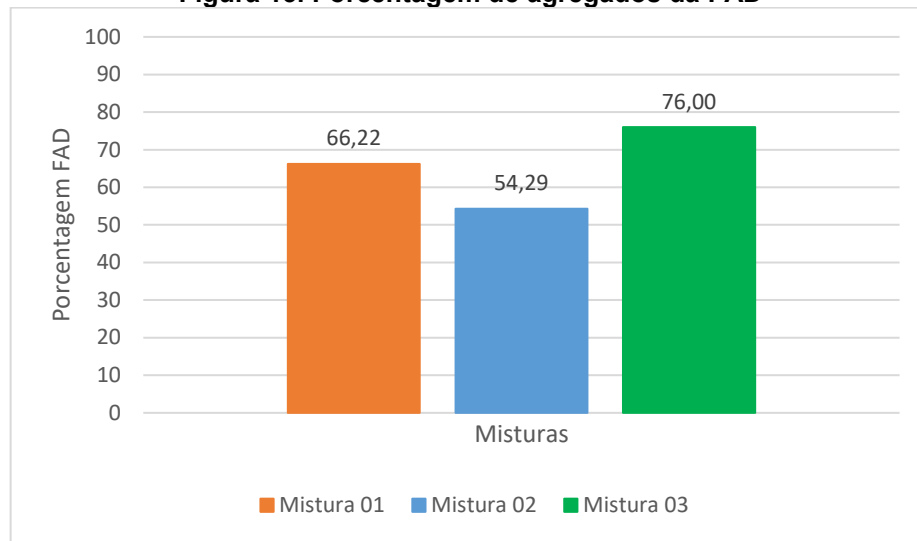
Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12), separou-se a graduação em proporções, conforme estabelecido pelo referido método.

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos para agregados flutuantes, pertencentes à FAD e agregados intersticiais. As Figuras 13 e 14 ilustram respectivamente a porcentagem de agregados pertencentes à FAD e agregados intersticiais. Não foram detectados agregados flutuantes nas granulometrias das misturas estudadas.

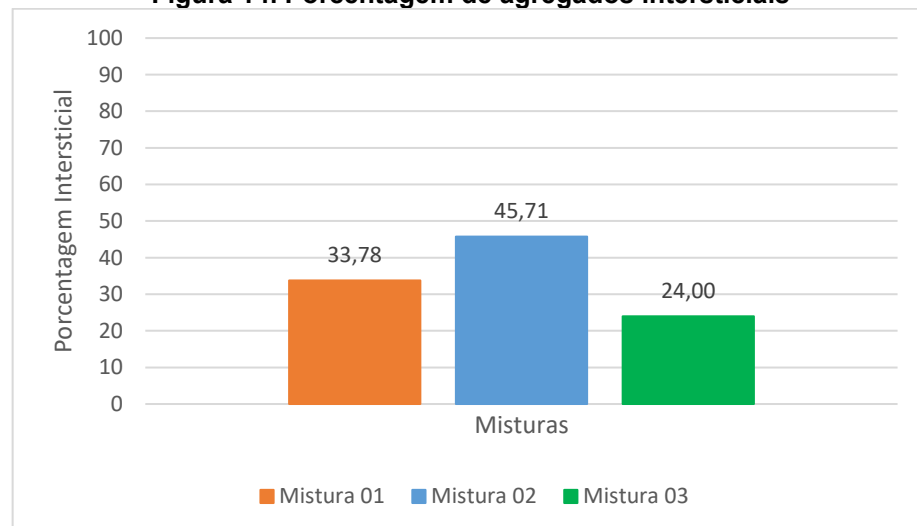
Tabela 14. Granulometria da FAD

TMN (mm)	Mistura	Agregados (%)		
		Flutuante	FAD	Intersticial
19	Mistura 01	0,00	66,22	33,78
19	Mistura 02	0,00	54,29	45,71
19	Mistura 03	0,00	76,00	24,00

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 13. Porcentagem de agregados da FAD

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 14. Porcentagem de agregados intersticiais

Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a determinação do parâmetro porosidade FAD (n_{FAD}), é necessário calcular o volume de agregados flutuantes ($V_{ag>FAD}$), que são os agregados maiores que a FAD, o volume de agregados intersticiais ($V_{ic,ag}$), que são os agregados menores que a FAD, o Volume Total da Mistura (V_{tm}), e o Volume de Vazios do Agregado Mineral (VAM). Para isso, utilizou-se respectivamente as equações (2), (3), e (4) conforme exibido no item 4.4.3 Identificação da Faixa de Agregados Dominantes (FAD). A Tabela 15 mostra os resultados dos cálculos dos elementos.

Tabela 15. Elementos da $nFAD$

Elementos	Mistura 01	Mistura 02	Mistura 03
Vag>FAD	0,00	0,00	0,00
Vci,ag	11,80	16,20	8,20
Vtm	39,40	39,30	39,30
VAM	16,10	14,20	17,30

Fonte: Autoria Própria (2022)

Com os resultados da Tabela 15, foi possível calcular a porosidade $nFAD$, de acordo com a Equação (1). Para o cálculo do Fator de Ruptura (FR) foi utilizada a equação (5). Os resultados de $nFAD$ e FR encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16. Parâmetros $nFAD$

Parâmetros	Intervalo recomendado	Mistura 01	Mistura 02	Mistura 03
$nFAD$	38 - 48%	46%	55%	38%
FR	0,50 – 0,95	0,59	0,87	0,36

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quanto aos elementos pertencentes à FAD, a Mistura 01, encontra-se dentro dos intervalos propostos pelo método tanto para $nFAD$ quanto para o Fator de Ruptura. Já a Mistura 02, demonstrou $nFAD$ acima do recomendado pela metodologia FAD e FR elevado, porém dentro do intervalo estabelecido. A Mistura 03 apresentou o parâmetro $nFAD$ no limite mínimo sugerido, entretanto o Fator de Ruptura mostrou-se abaixo do proposto.

Analisando-se a Tabela 14 e a Figura 14, verifica-se que a mistura com graduação mais grossa (Mistura 03) apresentou uma maior quantidade de agregados pertencentes à FAD. Por outro lado, a graduação com predominância de finos (Mistura 02), expressou uma menor quantidade de agregados pertencentes à FAD. Também é possível verificar a grandeza inversa quando se considera a porcentagem de agregados intersticiais.

A Tabela 13 evidencia a relação entre os Vazios do Agregado Mineral e o teor ótimo de ligante, pois para um mesmo VV, quanto maior o VAM maior o teor de ligante a ser consumido.

Dentro do mesmo TMN é possível relacionar o valor do VAM com a graduação da mistura, sendo que quanto mais fina a mistura, menor o VAM, e com o aumento do tamanho das partículas o valor de VAM tende a aumentar.

6.4 Ensaio no Simulador de Tráfego

As Figuras 15, 16 e 17 mostram os corpos-de-prova das Misturas 01, 02, e 03 respectivamente, antes da execução do ensaio

Figura 15. Aspecto visual lateral antes do ensaio - Mistura 01



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 16. Aspecto visual lateral antes do ensaio - Mistura 02



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 17. Aspecto visual lateral antes do ensaio - Mistura 03



Fonte: Autoria Própria (2022)

Com relação ao ensaio de deformação permanente executado no simulador de tráfego de Hamburgo, os resultados foram medidos por um relógio comparador posicionado em 11 pontos dos corpos-de-prova a cada 5.000 ciclos. Como nenhum corpo-de-prova atingiu mais de 20mm de deformação, os ensaios foram encerrados quando atingidos 20.000 ciclos.

As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os resultados pontuais das deformações nos corpos-de-prova das Misturas 01, 02 e 03, respectivamente.

As Figuras 18, 19 e 20 mostram os corpos-de-prova das Mistura 01, 02 e 03 após a execução do ensaio.

Tabela 17. Análise pontual de deformação - Mistura 01

Ciclos	Deformação por ponto (mm)										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
5.000	-2,1	-2,2	-2,1	-2,1	-2,1	-2,0	-1,9	-1,8	-1,7	-2,0	-2,0
10.000	-2,4	-2,7	-2,5	-2,4	-2,4	-2,3	-2,2	-2,0	-2,0	-2,2	-2,3
15.000	-2,7	-2,8	-2,8	-2,7	-2,6	-2,4	-2,3	-2,1	-2,1	-2,4	-2,6
20.000	-2,8	-3,1	-2,9	-2,8	-2,7	-2,6	-2,5	-2,2	-2,2	-2,5	-2,7

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 18. Aspecto visual lateral após o ensaio - Mistura 01



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 18. Análise pontual de deformação - Mistura 02

Ciclos	Deformação por ponto (mm)										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
5.000	-1,8	-1,8	-2,0	-1,9	-1,8	-1,8	-1,7	-1,6	-1,6	-1,8	-2,0
10.000	-2,3	-2,2	-2,4	-2,4	-2,2	-2,2	-2,1	-1,8	-1,9	-2,1	-2,4
15.000	-2,6	-2,5	-2,6	-2,6	-2,5	-2,5	-2,3	-2,0	-2,1	-2,4	-2,8
20.000	-2,8	-2,8	-2,9	-2,9	-2,7	-2,6	-2,4	-2,2	-2,3	-2,4	-3,0

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 19. Aspecto visual lateral após o ensaio - Mistura 02



Fonte: Autoria Própria (2022)

Tabela 19. Análise pontual de deformação - Mistura 03

Ciclos	Deformação por ponto (mm)										
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
5.000	-2,4	-2,7	-2,8	-1,9	-1,7	-1,7	-1,7	-1,5	-1,6	-1,8	-1,8
10.000	-2,8	-3,2	-2,8	-2,3	-2,1	-2,0	-1,8	-1,7	-1,7	-1,9	-2,3
15.000	-3,1	-3,5	-3,1	-2,6	-2,4	-2,3	-1,9	-1,8	-1,8	-2,1	-2,6
20.000	-3,2	-3,7	-3,2	-2,7	-2,5	-2,4	-2,2	-1,9	-1,9	-2,2	-2,7

Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 20. Aspecto visual lateral após o ensaio - Mistura 03



Fonte: Autoria Própria (2022)

A partir dos resultados de deformação permanente de cada mistura, foi possível realizar a média da deformação em milímetros a cada 5.000 ciclos conforme apresentado na Tabela 20.

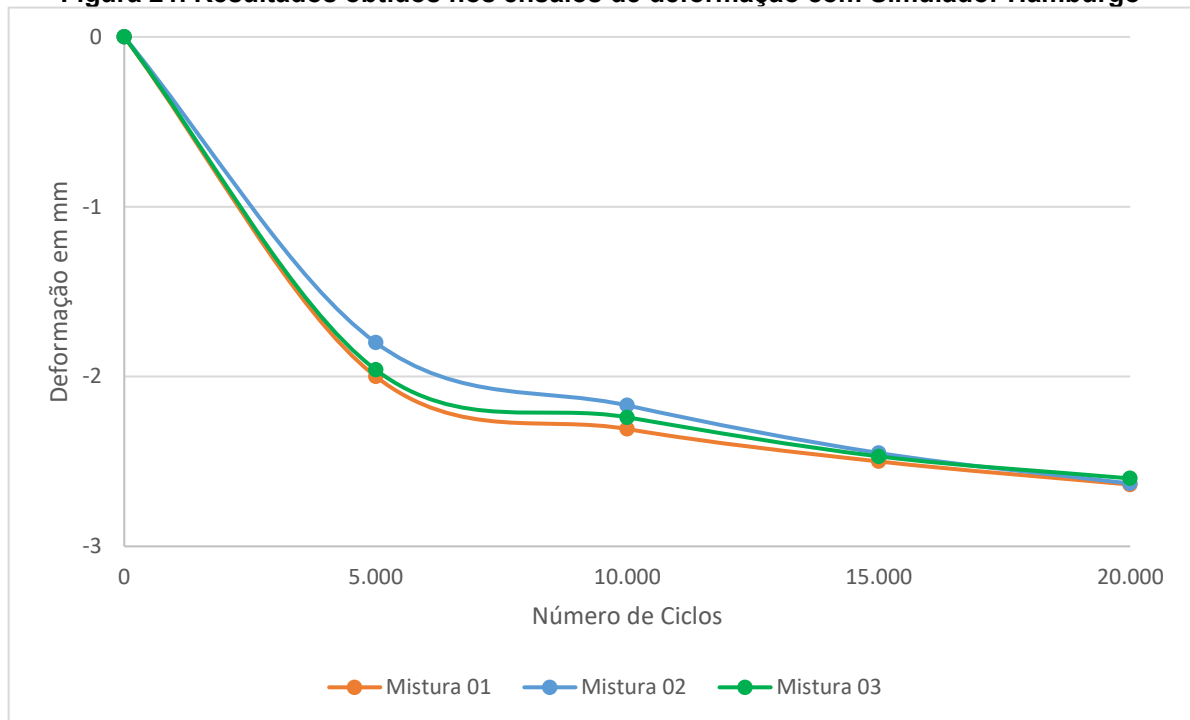
Tabela 20. Média das deformações

Ciclos	Média em (mm)		
	Mistura 01	Mistura 02	Mistura 03
5.000	-2,00	-1,80	-1,96
10.000	-2,31	-2,17	-2,24
15.000	-2,50	-2,45	-2,47
20.000	-2,64	-2,63	-2,60

Fonte: Autoria Própria (2022)

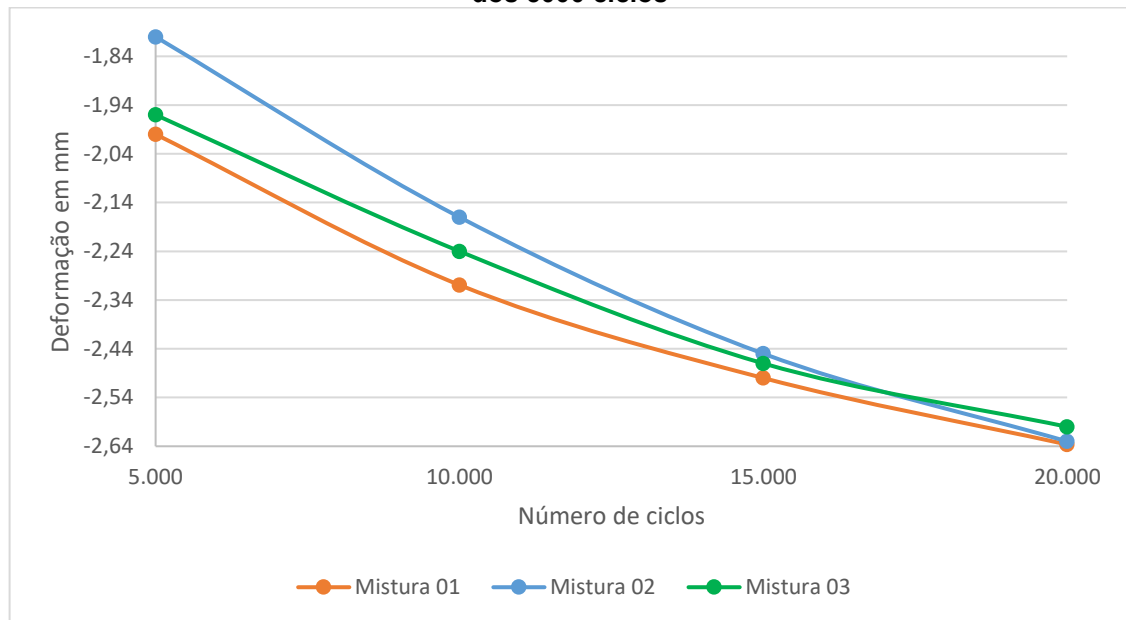
Com os valores da Tabela 20, elaborou-se o gráfico ilustrado pela Figura 21. Como os resultados de deformação foram muito próximos no início dos ensaios, formulou-se um gráfico detalhado ressaltando as deformações sofridas a partir da primeira leitura do relógio comparador em 5.000 ciclos, representado na Figura 22.

Figura 21. Resultados obtidos nos ensaios de deformação com Simulador Hamburgo



Fonte: Autoria Própria (2022)

Figura 22. Resultados obtidos nos ensaios de deformação com Simulador Hamburgo a partir dos 5000 ciclos



Fonte: Autoria Própria (2022)

Analisando-se o gráfico ilustrado pela Figura 22 em conjunto com a Tabela 20, verifica-se que a Mistura 02 revelou menores valores de deformação na fase primária, seguidas das Misturas 03 e 01. Ao final dos 20.000 ciclos a Mistura 03 apresentou o

menor valor de deformação (2,60) seguida das Misturas 01 e 02 que apresentaram valores praticamente iguais (2,64 e 2,63).

A Tabela 21 mostra o resumo dos resultados obtidos para os parâmetros FAD e deformação permanente.

Tabela 21. Resumo dos Resultados

Misturas	Agregados FAD (%)	Agregados Intersticiais (%)	Porosidade FAD (%)	Fator de Ruptura	Deformação (mm)
Mistura 01	66,22	33,78	46	0,59	2,64
Mistura 02	54,29	45,71	55	0,87	2,63
Mistura 03	76,00	24,00	38	0,36	2,60

Fonte: Autoria Própria

Avaliando-se a Tabela 21 nota-se que no caso da Mistura 01, o valor de porosidade FAD, embora tenha se apresentado dentro do intervalo recomendado pelo método (38 a 48%), está próximo ao limite máximo estabelecido, tendendo à porosidade marginal entre 48 a 52%, onde, segundo Kim (2006), não é possível prever o comportamento das misturas asfálticas. O valor do FR, por sua vez, está dentro intervalo estabelecido (0,50 a 0,95), porém o resultado encontrado pode sugerir que a presença de agregados intersticiais seja insuficiente para contribuir de forma mais efetiva na resistência à deformação.

A Mistura 02 revelou porosidade FAD acima do limite estabelecido sugerindo que não houve travamento necessário da parte graúda da mistura para potencializar sua resistência à deformação, embora a quantidade de agregados intersticiais demonstre ser suficiente para auxiliar neste aspecto, visto que FR apresentou-se dentro do intervalo recomendado.

A Mistura 03, que demonstrou menor valor de deformação permanente, exibiu porosidade FAD dentro do intervalo de valores recomendado por Kim (2006). Por outro lado, o FR desta mistura está fora do intervalo orientado pelo método, indicando que há baixa quantidade de agregados intersticiais que poderiam contribuir para a resistência da mistura à deformação permanente.

Ao analisar-se a composição granulométrica das misturas asfálticas sob o aspecto das proporções de agregados pertencentes à FAD e intersticiais e sua relação com os resultados dos ensaios de deformação verificou-se que maiores valores de deformação permanente ocorreram nas misturas com maiores quantidades de agregados intersticiais corroborando os resultados dos estudos de Santos (2021). Assim, o aumento da quantidade de agregados mais finos dentro da mistura tende a

desestabilizar o esqueleto pétreo formado pela interação entre os agregados que compõem a FAD, fato comprovado pelos estudos de Kim (2006), Chun et al. (2012) e Santos (2021). No caso da quantidade dos agregados pertencentes à FAD, este estudo demonstrou que a quantidade dos mesmos não necessariamente evidencia um bom comportamento da mistura quanto a deformação permanente, sendo importante a interação entre eles indicada pela porosidade FAD.

Com as curvas resultantes da deformação permanente acumulada proveniente dos ensaios, é plausível relacioná-las com o estudo do Flow Number (FN). Entretanto, neste estudo, não foi possível determiná-lo, uma vez que os ensaios foram encerrados em 20.000 ciclos devido às limitações de tempo e do equipamento. Assim, não houve a estabilização do volume dos corpos-de-prova indicando que não ocorreu a mudança da fase secundária para terciária.

7. CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho “Análise da deformação permanente de misturas asfálticas com granulometria determinada pela faixa de agregados dominantes”, foi alcançado.

O projeto de dosagem foi elaborado de maneira que as granulometrias das três misturas estudadas apresentassem interação entre os agregados estabelecendo uma faixa de agregados dominantes e assim fossem realizados os ensaios de deformação permanente.

Na Mistura 01, os parâmetros $nFAD$ e FR indicaram um esqueleto pétreo estável, uma vez que se apresentaram dentro dos limites recomendados pelo método. No entanto, esta mistura apresentou o maior valor de deformação dentre os estudados. Nesta situação, nota-se que apesar de dentro do intervalo, o valor da porosidade FAD está muito próximo ao limite máximo estabelecido tendendo a porosidade marginal onde não é possível prever seu comportamento.

Com relação à Mistura 02, que apresentou valor de deformação semelhante a Mistura 01, a porosidade FAD está acima do limite superior sugerido, revelando que não houve travamento necessário entre os agregados para auxiliar na resistência à deformação permanente. Apesar do FR demonstrar quantidade satisfatória de agregados intersticiais para contribuir no comportamento da mistura frente à deformação, os mesmos não foram determinantes.

No caso da Mistura 03, o resultado da porosidade FAD, próximo ao limite mínimo indicou bom intertravamento dos agregados visto que a mistura apresentou o menor valor de deformação mesmo com valor de FR abaixo do recomendado. Nesta situação, os agregados intersticiais são insuficientes para potencializar a resistência à deformação permanente.

Ao avaliar os resultados dos ensaios de deformação das três misturas e a $nFAD$ conjuntamente com o FR, é possível concluir que o parâmetro $nFAD$ se sobressai sobre FR, podendo indicar misturas que apresentarão melhor comportamento com relação à deformação permanente. Porém, quando o valor de $nFAD$ aproxima-se da porosidade marginal (48%) este parâmetro associa-se à um comportamento duvidoso da mistura.

O parâmetro FR, apesar de estar dentro do intervalo sugerido pelo método nas misturas 01 e 02, não foi determinante para proporcionar um melhor comportamento quanto à deformação permanente destas misturas, visto que a mistura 03, que apresentou FR fora do intervalo, revelou um melhor resultado. Este fato explica-se devido a FR estar diretamente ligado à parte mais fina dos agregados que compõem a mistura, ou seja, agregados com diâmetro inferior a 1,18 mm. Assim FR está relacionado ao comportamento das misturas asfálticas quanto às trincas por fadiga conforme constatado por pesquisadores como Guarin (2009) e Chun et al (2012).

Assim, a partir dos resultados obtidos, concluiu-se que o parâmetro que se destacou para avaliar o comportamento da mistura quanto à deformação permanente é a porosidade FAD corroborando com os estudos de Kim (2006), Chun et al. (2012) e Santos (2021).

A Faixa de Agregados Dominantes (FAD) é uma importante ferramenta para previsão do comportamento de misturas asfálticas quanto à deformação permanente podendo ser utilizada para seleção de suas composições granulométricas.

REFERÊNCIAS

AASHTO M323 (2017). **Standard Specification for Superpave Volumetric Mix Design. 2017.** American Association of State Highway and Transportation Officials.

AASHTO T 166-16 (2020). **Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens.** American Association of State Highway and Transportation Officials.

ABNT NBR 15619/2016. **Misturas Asfálticas - Determinação da Densidade Máxima Teórica e da Massa Específica Máxima Teórica em Amostras não Compactadas,** Rio de Janeiro, 2016.

ALRICH, R. C. 1196. **Influence Of Aggregate Properties on Performance of Heavy-Duty Hot-Mix Asphalt Pavements.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1547.

ANDRADE, Viviane D. 2018. **Influência da Formulação de Esqueletos Minerais na Deformação Permanente de Misturas de Concreto Asfáltico Densas,** Tese de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, UFSC.

ARTERIS, **Determinação da Quantidade de Ligante Asfáltico em Misturas Asfálticas a Quente (Maq) pelo Método da Combustão,** Acessado em: ME-Determinação-da-quantidade-de-ligante-asfáltico-em-misturas-asfálticas-à-quente-pelo-método-da-combustão.pdf, 20/03/2022.

ARTERIS, **Projeto de Misturas Asfálticas a Quente,** 2017. Acessado em: <https://www.arteris.com.br/wp-content/uploads/2018/07/ARTERIS-ET-001.-Projeto-de-Misturas-Asf%C3%A1lticas-REV.2.pdf>, 20/03/2022.

AsphaltInstitute, **Hamburg Wheel Tracking (HWT)Test,** 2018. Acessado em: <https://www.ltrc.lsu.edu/asphalt/pdf/Hamburg%20Wheel%20Tracking%20Test.pdf>, 05/02/2022.

ASTM D7369-09 (2009). **Determining the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension Test.** American Society for Testing and Materials.

ASTM D2041-11 (2011). **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.** American Society for Testing and Materials.

BASTOS, et. al. **Avaliação da Faixa de Agregados Dominantes (FAD) com Foco na Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas - Campo e Laboratório,** XIXº Congresso Ibero-Latinoamericano del asfalto, Medellín, 2017, p. 11.

BASTOS, Juceline B. 2016. **Considerações Sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-empírico,** Tese de doutorado, programa de pós graduação em engenharia de transportes, UFC.

BARROS, Larissa M. **Deformação Permanente de Misturas Asfálticas: Avaliação do Desempenho Conforme Critério de Flow Number de Misturas Quentes e Mornas**, Porto Alegre, 2017, p. 175.

BARROS, et al. 2019. **Aspectos dos Ensaio de Deformação Permanente e a Perspectiva Brasileira para Utilização no Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**, 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú, 2019, p. 01-12.

BERNUCCI, et. al. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, Associação brasileira das empresas distribuidoras de asfaltos, Petrobras asfaltos, 3º Reimpressão, Rio de Janeiro, 2008 p. 509.

BROWN, et. Al. 2001, **Literature Review: Verification of Gyration Levels in the Superpave Ndesign Table**. In: **National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board - TRB**. National Research Council. Auburn University, Alabama, EUA.

CNT, **Brasil tem método antigo para dimensionar o pavimento - Estudo da CNT identifica as principais causas do desgaste precoce do asfalto brasileiro**, 2017. Acessado em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-tem-metodo-antigo-para-dimensionar-o-pavimento>, 15/08/2021.

COOLEY, et. al. 2000. **Loaded wheel testers in the united states: state of the practice**, National Center for Asphalt Technology, NCAT – Auburn University, Auburn, p. 18.

DER/PR, **Pavimentação: Concreto asfáltico usinado à quente com asfalto polímero**, 2017. Acessado em: https://www.der.pr.gov.br/sites/der/arquivos_restritos/files/documento/2019-10/es-p15-17cauqpolimero3.pdf, 05/02/2022.

DNER, **Agregados – Análise granulométrica DNER-ME 083/98**, 1998. Acessado em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me083-98.pdf>, 05/02/2022.

DNER, **Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall DNER-ME 043/95**, 1995. Acessado em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner-me043-95.pdf>, 05/02/2022.

DNIT, **Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio, NORMA DNIT 428/2020-ME** 2020. Acessado em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_428_2020_me.pdf

DNIT, **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço NORMA DNIT-031/2006-ES**, 2006. Acessado em: <https://www.gov.br/dnit/pt->

br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit031_2006_es.pdf, 05/02/2022.

FERREIRA, et. al. **Métodos de Seleção Granulométrica com Foco na Resistência à Deformação Permanente**, TRANSPORTES v. 24, n. 2 (2016), p. 46-52.

FERREIRA, et. al. **Validação da Metodologia de Faixa de Agregados Dominantes para Avaliação e Especificação Granulométrica de Misturas Asfálticas Densas**, XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, 2015, p. 85-96.

FERREIRA, J. L. S. **Novas Diretrizes para Seleção Granulométrica de Misturas Asfálticas Densas com Foco na Deformação Permanente**, Fortaleza, 2017, p. 72.

GADLER, et. al. 2018. **Efeito do Tipo de Compactação, por impacto ou por amassamento, no teor de ligante e comportamento mecânico de misturas asfálticas**, 1º Simpósio de Transportes do Paraná. 2º Seminários em Aeroportos e Transporte Aéreo. 2º Urbanidade, Curitiba, p. 01-10.

GUARIN, A. 2009. **Interstitial Component characterization to evaluate asphalt mixture performance**. PhD dissertation. University of Florida, Gainesville.

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range of asphalt mixture**, University of Florida, 2006, p. 142.

Leandro, R.P. 2016. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Corpos de Prova de Misturas Asfálticas a Quente Resultantes de Diferentes Métodos de Compactação**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo 2016.

MOURA, Edson. **Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório**, Tese de doutorado, São Paulo, 2010 p. 299.

NETO, et. al. **Avaliação da Porosidade Marginal da Faixa de Agregados Dominantes em Misturas Asfálticas**, 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, 2018, p. 1679-1690.

NETO, Manoel G. P. **Avaliação da Faixa de Agregados Dominantes e Componentes Intersticiais em Mistura Asfáltica**, Fortaleza, 2018, p. 115.

PAN, T; Tutumluer, E.; Carpenter, S. H. (2006). **Effect of Coarse Aggregate Morphology on Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt**. Journal of Transportation Engineering, 132, n. 7, 2006.

PARTL, M. N. 2013. **Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials**. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB.

PORTELA, et. al. 2018. **Avaliação da Porosidade Marginal da Faixa de Agregados Dominantes em Misturas Asfálticas**. Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Gramado, p. 1679–1690.

SANTANA, Geovana L. **Estudo Comparativo Através da Análise de Variância para Determinação da Distribuição Granulométrica pelas Técnicas de Sedimentação e Difração à Laser**, João Pessoa, 2017, p. 84.

SANTOS, Eliana F. 2021. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Granulometria Definida pela Faixa de Agregados Dominantes**, Tese de doutorado, programa de pós graduação em engenharia de transportes, EESC-USP.

SANTOS, Eliana F. 2020. **Avaliação do Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas com Granulometria Definida pela Faixa de Agregados Dominantes**, 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2020, p. 1334-1345.

SILVA, et. al. **O Efeito da Seleção Granulométrica na Resistência à Deformação Permanentes de Misturas Asfálticas**, XXIXº Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, 2015, p. 73-84.

WESSELING, Diego H. 2002. **Avaliação Laboratorial Do Comportamento De Misturas Em Concreto Asfáltico**. UNIJUÍ – Universidade regional do noroeste do estado do rio grande do sul.