



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
ENGENHARIA CIVIL

**COMPORTAMENTO MECÂNICO PRELIMINAR DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO CONTENDO 100% DE RAP E
DIFERENTES TEORES DE CIMENTO PORTLAND**

PAULO RICARDO LEMOS DE SANTANA

CRUZ DAS ALMAS - BA

Dezembro de 2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
ENGENHARIA CIVIL

**COMPORTAMENTO MECÂNICO PRELIMINAR DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO CONTENDO 100% DE RAP E
DIFERENTES TEORES DE CIMENTO PORTLAND**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia como
parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Dr. Mario Sergio de Souza
Almeida

PAULO RICARDO LEMOS DE SANTANA

CRUZ DAS ALMAS - BA

Dezembro de 2023

PAULO RICARDO LEMOS DE SANTANA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO PRELIMINAR DE
MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO CONTENDO
100% DE RAP E DIFERENTES TEORES DE CIMENTO
PORTLAND**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Cruz das Almas/BA, 21 de dezembro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **MARIO SERGIO DE SOUZA ALMEIDA**
Data: 21/12/2023 16:31:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Mario Sergio de Souza Almeida, DSc. (Orientador)
DNIT/UFRB

Documento assinado digitalmente
 **BEATRIZ CHAGAS SILVA GOUVEIA**
Data: 21/12/2023 16:17:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng^a. Beatriz Chagas Silva Gouveia, DSc.
DNIT

Documento assinado digitalmente
 **GISANDRA FARIA DE PAULA**
Data: 21/12/2023 16:06:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng^a. Gisandra Faria de Paula, MSc.
DER-DF/UnB

COMPORTAMENTO MECÂNICO PRELIMINAR DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A FRIO CONTENDO 100% DE RAP E DIFERENTES TEORES DE CIMENTO PORTLAND

PRELIMINARY MECHANICAL BEHAVIOR OF COLD RECYCLED ASPHALT
MIXTURES CONTAINING 100% RAP AND DIFFERENT CONTENTS OF PORTLAND
CEMENT

Paulo Ricardo Lemos de Santana¹

Mario Sergio de Souza Almeida²

RESUMO: A fresagem de pavimentos asfálticos desempenha um papel fundamental na manutenção e reabilitação de estradas e rodovias. Este processo envolve a remoção da camada superficial desgastada de asfalto, proporcionando benefícios significativos, como a restauração da textura da superfície, correção de imperfeições no pavimento e a possibilidade de reciclagem do asfalto fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement*). Este material tem ganhado espaço na construção civil como opção auspiciosa na execução de obras viárias econômicas e sustentáveis, entretanto, nota-se uma carência de referências e dados relacionados ao desempenho mecânico das misturas recicladas a frio. Neste sentido, este estudo propõe-se produzir diferentes misturas asfálticas a frio recicladas, utilizando 100% de material fresado ou RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) e diferentes teores de cimento buscando avaliar a influência do aglomerante na mistura. A abordagem envolve a elaboração de misturas asfálticas usando a dosagem Marshall, com uma energia de compactação de 50 golpes em cada face do corpo de prova, seguida pela realização de testes mecânicos para avaliar o desempenho. Esses testes abrangem aspectos como estabilidade, fluência, resistência à tração por compressão diametral e a análise volumétrica. Os resultados indicaram que a adição de cimento proporcionou melhorias nas características mecânicas e volumétricas da mistura, além disso, a utilização de RAP demonstrou ser uma alternativa viável para reduzir o teor de asfalto nas misturas de pavimentação.

PALAVRAS-CHAVE: RAP. Fresagem. PMF reciclado. Resistência a tração. Dosagem Marshall

ABSTRACT: Milling of asphalt pavements plays a fundamental role in the maintenance and rehabilitation of roads and highways. This process involves removing the worn-out surface layer of asphalt, providing significant benefits such as restoring surface texture, correcting pavement imperfections, and the potential for recycling the milled asphalt (*Reclaimed Asphalt Pavement - RAP*). This material has gained prominence in the construction industry as a promising option for the implementation of economical and sustainable roadworks. However, there is a lack of references and data related to the mechanical performance of cold recycled mixtures. In this regard, this study aims to produce different cold recycled asphalt mixtures, using 100% milled material or RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) and varying amounts of cement, in order to assess the influence of the binder in the mixture.

¹ Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Av. Rui Barbosa, 710, 44380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, lemosp.eng@gmail.com

² Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Av. Rui Barbosa, 710, 44380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil, mario.almeida@ufrb.edu.br

The approach involves the preparation of asphalt mixtures using Marshall mix design, with a compaction energy of 50 blows on each face of the specimen, followed by conducting mechanical tests to evaluate performance. These tests encompass aspects such as stability, flow, tensile strength by diametral compression, and volumetric analysis. The results indicated that the addition of cement provided improvements in the mechanical and volumetric characteristics of the mixture. Additionally, the use of RAP proved to be a viable alternative for reducing the asphalt content in pavement mixtures.

KEY WORDS: RAP. Milling. Recycled Cold Mix Asphalt. Tensile Strength. Marshall Mix Design.

1. INTRODUÇÃO

O setor de transportes desempenha um papel de importância e impacto altamente significativos na sociedade. Visto que se trata de atividades responsáveis pelo deslocamento de pessoas e movimentação de mercadorias entre locais de produção e consumo, a racionalização destas tem influência direta na eficiência da economia de um país. Segundo dados recentes da Pesquisa da Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2023), a rede rodoviária brasileira é formada por 78,5% de rodovias não pavimentadas e 12,4% de rodovias pavimentadas, sendo estas responsáveis por movimentar aproximadamente 65% da carga e 95% do total de passageiros transportados no país. Essas vias pavimentadas, como a BR-116 (Rodovia Presidente Dutra) e a BR-101, desempenham um papel crucial na movimentação de cargas e passageiros, conectando grandes centros urbanos. Por outro lado, as rodovias não pavimentadas, como a Transamazônica (BR-230), assumem um papel estratégico em regiões menos desenvolvidas, contribuindo para o acesso a áreas remotas. Entretanto, devido aos investimentos em infraestrutura rodoviária serem aquém das necessidades, os custos com logística e transporte podem ter um acréscimo de até 91,5%, o que resulta na desaceleração do crescimento econômico nacional e prejudica a competitividade do país.

Parte significativa dos recursos federais do setor de infraestrutura são empregados em obras de manutenção e restauração das vias pavimentadas, cuja operação de fresagem do revestimento envelhecido acaba gerando resíduos de misturas asfálticas conhecido como RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) e de acordo com Bruno *et. al* (2022) o emprego desse material representa uma solução amplamente difundida na pavimentação, oferecendo vantagens tanto econômicas quanto ambientais. Além de reduzir o consumo de ligantes nas misturas asfálticas, essa abordagem contribui para a diminuição dos custos das obras no setor e minimiza a necessidade de extração e tratamento de novos agregados.

Nos dias hodiernos, observa-se crescentemente a ascensão do emprego de RAP em empreendimentos de infraestrutura viária pelo mundo afora. Segundo os registros da *European Asphalt Pavement Association* (2021), nos Estados Unidos, do volume de 91 milhões de toneladas de RAP gerados anualmente, praticamente a totalidade, 99%, é submetida à reciclagem, reintegrando-se em misturas asfálticas. Na Europa, por sua vez, emerge um volume global estimado de aproximadamente 56 milhões de toneladas de RAP produzidas a cada ano, destacando-se a Alemanha que se sobressai nesse panorama ao conferir uma segunda vida a 83% das 14 milhões de toneladas de material coletado.

Segundo Castro Neto (2000), no território nacional, uma das experiências pioneiras com o uso de material fresado ocorreu em 1986 quando foi aplicada uma mistura contendo 50% de RAP no revestimento da camada de rolamento da rodovia Anhanguera que, mesmo depois de 14 anos de uso, apresentava excelentes condições. Desde então, são escassos os registros documentados na literatura acerca da incorporação do RAP em misturas asfálticas no Brasil. Conforme mencionado por Suzuki (2019), a falta de regulamentações rigorosas para o uso de materiais reciclados, bem como a ausência de diretrizes técnicas apropriadas para a execução eficaz e o controle tecnológico de projetos que envolvam asfalto reciclado (RAP), são fatores cruciais que desestimulam a aplicação do material em obras rodoviárias.

De acordo com Fonseca (2014) a reciclagem de material asfáltico traz consigo uma série de vantagens, tais como a redução substancial do consumo de energia, a diminuição da demanda por novos agregados e uma notável diminuição no período necessário para a conclusão e reabilitação das estradas, resultando em uma significativa economia de custos. Adicionalmente, o reuso do RAP desempenha um papel crucial na preservação do meio ambiente ao reduzir a exploração de recursos não renováveis ao mesmo tempo em que oferece uma solução eficaz para o dilema da disposição inadequada desses materiais. Neste contexto, estudos que investiguem e viabilizem o uso do RAP em obras de infraestruturas viárias são precursores para a ampliação e disseminação da utilização desse material.

Ragab e El-Naga (2021) examinaram o desempenho de misturas de asfalto a frio que continham RAP. No estudo realizado, diferentes quantidades de material reciclado foram testadas na mistura, incluindo 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Para avaliar o desempenho dessas misturas, foram utilizados os seguintes testes: teste Marshall padrão, teste de perda de estabilidade, teste de rastreamento de rodas e teste de cisalhamento triaxial. Com o aumento da adição de RAP, houve uma redução na quantidade residual de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) necessário na mistura. Nas misturas com 0% de RAP, o teor residual de CAP foi de 5,6%, enquanto nas misturas com 100% de RAP, esse teor caiu para 4,2%. Além disso, foi

observado um aumento na estabilidade das misturas que continham 100% de RAP, atingindo um valor de 714,82 kgf, sendo este resultado o que mais se aproximou do valor da estabilidade da mistura de referência do estudo, que foi de 1070,70 kgf. Com base nos dados levantados, os autores concluíram que ao aumentar as adições de RAP nas misturas, conferiu-se as mesmas um aumento na estabilidade e resistência ao cisalhamento e diminuição no teor de CAP.

Conforme levantamentos realizados por Xiao *et al.* (2023) sobre as aplicações e desenvolvimentos de pavimento de asfalto reciclado a frio na China entre 2010 e 2021, é apontado que o RAP é utilizado em camadas de bases e superfícies de rodovias com baixo e médio volume de tráfego, sendo o método de CIR *in situ* (Reciclagem de Asfalto Fresado a Frio no Local) o mais aplicado na pavimentação dessas vias. Para conferir melhor resistência e durabilidade ao material fresado, é comumente utilizado agentes de estabilização betuminosos ou aditivos outros, como fibras ou aglomerantes (cimento), que implicam em uma otimização do uso do material e aumento da vida útil dos trechos requalificados.

Zhu *et al.* (2020) avaliaram o desempenho de misturas asfálticas contendo alta porcentagem de RAP com a adição de fibras. O propósito da pesquisa foi a implementação e avaliação de fibra de lignina, poliéster e basalto, para determinar seu potencial como aditivos em ligantes e misturas asfálticas que contenham materiais de asfalto recuperado (RAP). Os resultados apontaram que, para misturas em baixas temperaturas, a adição de LF (fibra de lignina) indicou o maior aprimoramento, das misturas testadas, aumentando a resistência estrutural, devido a maior aderência entre o ligante e o RAP, e melhorando assim suas propriedades mecânicas. As inferências deste estudo apontam que a conjunção de diversos aditivos pode proporcionar um aumento na resistência das misturas de RAP. Isso possui importância prática considerável na utilização do RAP em empreendimentos de engenharia rodoviária.

No estudo desenvolvido por Flores *et al.* (2020) foi analisada a influência do teor de emulsão e cimento em misturas de asfalto a frio usando 100% de material asfáltico reciclado. Com a utilização de um RAP com densidade de 2,44 g/cm³ e teor de betume de 4,89%, previamente, os autores avaliaram o comportamento da densidade da mistura com teores de emulsão de 1%, 2%, 3% e 4% e adição de 2% e 3% de água. Com a adição de 3% de água, a densidade da mistura aumentou de 1,96 g/cm³ para 2,04 g/cm³ com o teor de 3,0% de emulsão e de 2,00 g/cm³ para 2,08 g/cm³ para o teor de 4,0%, sendo assim, os estudos foram conduzidos com os teores de 3,0% e 4,0% de emulsão para uma adição de 3,0% de água. Os autores avaliaram os resultados dos ensaios de resistência à tração indireta, deformações plásticas, módulo de rigidez à tração indireta e fadiga à tração indireta, para misturas com quatro tipos de

emulsão e percentuais de adição de 1,5% e 2,0% de cimento. Foi observado, entre os testes feitos, que a adição do cimento nas misturas chegou a reduzir o volume de vazios em 30% e conferiu um significativo melhoramento nas propriedades mecânicas, atribuindo eficácia no controle à deformação permanente medido pelo teste de resistência ao desgaste por tráfego (WTS) e aumentando o módulo de rigidez, promovendo um aumento na vida útil à fadiga das misturas recicladas.

Em Jiangxi, na China, Lin *et al.* (2018) estudaram a resistência em estágios iniciais de pavimentos asfálticos a frio (PMF) com uso exclusivo de RAP tratado com emulsão e cimento. A mistura foi projetada pelo método Marshall modificado na qual se utilizou 3,8% de emulsão (2,4% de CAP) com adição de 0%, 1%, 2% e 3% de cimento Portland. Foi observado que, sem o uso do cimento, após 24 h de cura a 20°C, a resistência da mistura ficou abaixo de 1,02 kgf/cm². Contudo, ao se adicionar o aglomerante a resistência aumentou rapidamente chegando para 2,04 kgf/cm² para o mesmo período. Esse aumento apresentou uma tendência contínua nos 6 dias seguintes o que permitiu aos autores indicarem que a adição do cimento condiciona a mistura asfáltica a manter sua integridade estrutural e propriedades desejadas ao longo do tempo.

Lin *et al.* (2019) investigaram os efeitos da adição de cimento nas propriedades das misturas asfálticas a frio com 100% de RAP e emulsão. Dentre outras características, os autores avaliaram os efeitos da adição do aglomerante na razão de vazios e resistência à tração indireta, de uma mistura com teor de 2,5% de CAP. Observou-se que ao se adicionar 4% de cimento na mistura a razão de vazios cai de 8,4%, em misturas sem cimento, para 7,4% à medida que a resistência à tração indireta aumenta de 3,06 kgf/cm² para 6,63 kgf/cm², demonstrando um melhoramento nas características mecânicas da mistura.

Nas misturas recicladas a frio é crucial considerar a influência do tempo de armazenamento nas suas características mecânicas. Pedreira *et al.* (2021) avaliaram os parâmetros obtidos dos ensaios de estabilidade, fluência, resistência a tração por compressão diametral e volumetria em 1, 7, 15, 30 e 60 dias após a fabricação de mistura asfáltica a frio dosada por meio do método Marshall. Foi avaliado que os resultados dos ensaios realizados apontam para uma correlação entre a perda de umidade durante o período de armazenamento da mistura e a crescente dificuldade no processo de compactação do material. Essa complexidade foi demonstrada pela diminuição gradual da densidade aparente média (Dap) ao longo do tempo que, para compactações com 50 golpes, foi medida em 2,26 g/cm³ com um dia de estocagem e decresceu para 2,09 g/cm³ com sessenta dias. O autor inferiu que, com base nos requisitos de estabilidade e fluidez, é estimado que o produto PMFr demonstrou capacidade de

armazenamento por até 15 dias com uma energia de compactação de 50 golpes, e por 5 dias com uma energia de compactação de 75 golpes.

Assim, o propósito deste estudo é elaborar uma mistura asfáltica a frio reciclada, com a utilização de 100% de material fresado, contendo adições de 0%, 1%, 2%, 3% e 4% de cimento Portland. Com os resultados obtidos espera-se possibilitar uma análise preliminar acerca do comportamento mecânico e volumétrico dessas diferentes composições, visando avaliar a influência do cimento nas propriedades da mistura reciclada a frio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

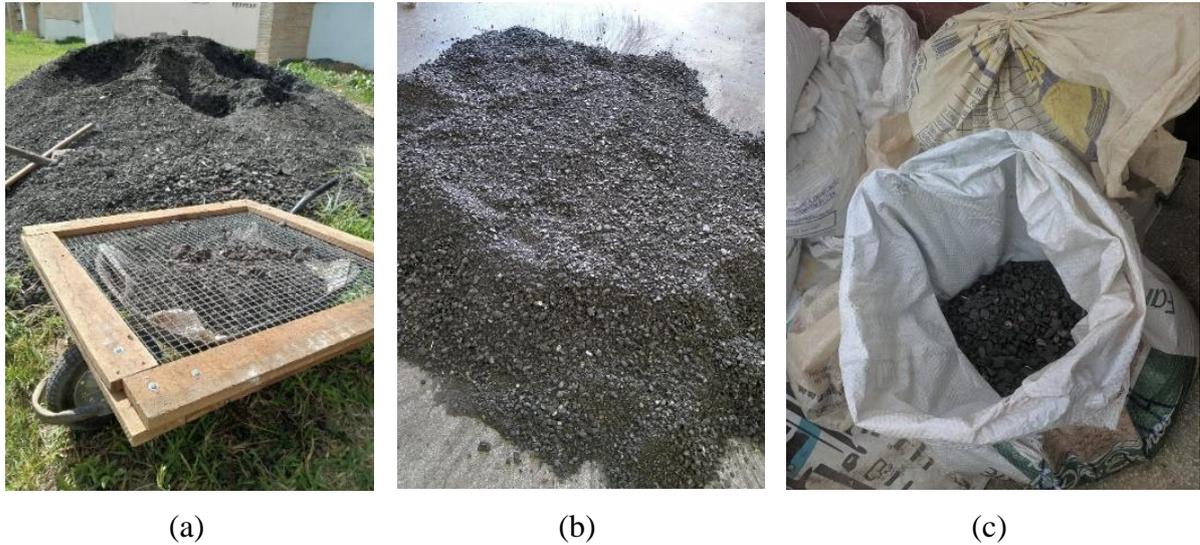
A campanha experimental foi iniciada com a caracterização do RAP e da Emulsão Asfáltica, seguida pela determinação do projeto da mistura reciclada sem adição de cimento, considerada como mistura controle no presente estudo. Após, foi realizada a preparação das misturas com a adição de diferentes teores de cimento Portland, no teor de CAP de projeto anteriormente definido (controle) com a realização, por fim, dos ensaios mecânicos das misturas com adições de cimento.

2.1. Caracterização do RAP

Para o presente estudo foram coletadas amostras de um depósito de RAP no laboratório de pavimentação da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Este material foi originado de serviços de recuperação da camada de revestimento da rodovia BR 101/BA.

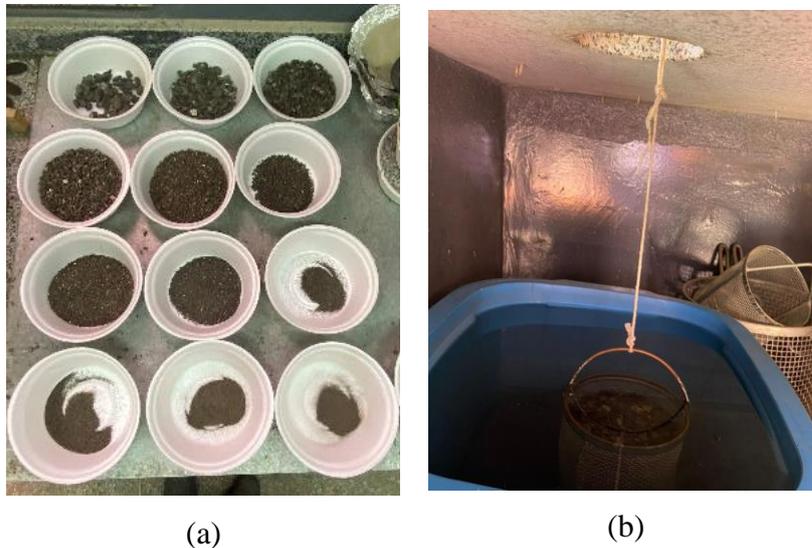
A amostragem do material foi coletada em distintos pontos do depósito onde se realizou o peneiramento de cada coleta utilizando a peneira de $\frac{3}{4}$ " (19,05 mm) descartando as frações que ficaram retidas na mesma. O material passante na peneira foi reduzido seguindo as recomendações da norma de redução de amostras DNER – PRO 199 (DNER, 1996) e armazenado em sacos de lona com 50 kg cada, a fim de se obter uma quantidade satisfatória para realização dos ensaios, conforme a Figura 1.

Figura 1 - (a) Coleta e peneiramento do RAP; (b) homogeneização e quarteamento;
(c) armazenamento em sacos de 50 kg.



A caracterização do RAP iniciou-se com a realização dos ensaios de análise granulométrica de agregados por peneiramento ME DNIT 412 (DNIT, 2019) e densidade real do agregado ME DNIT 413 (DNIT, 2021), como apresentados na Figura 2.

Figura 2 - (a) Frações do RAP por diâmetro; (b) Pesagem do RAP submerso (DNIT 413/2021)



Para determinar a quantidade de ligante asfáltico residual no RAP, foram realizados os procedimentos de extração de betume via extrator Soxhlet ME DNIT 158 (DNIT, 2011) e Rotarex ME DNER 053 (DNER, 1994), conforme Figura 3, sendo utilizado o tricloroetileno como solvente para realização dos ensaios. As extrações, em cada metodologia, foram realizadas em triplicata para que se obtivesse uma precisão mais apurada nos resultados obtidos.

Figura 03 - (a) Extrator Soxhlet; (b) Extrator Rotarex

(a)

(b)

Na Tabela 1 são apresentadas as características granulométricas do material fresado e na Tabela 2 apresentam-se os resultados de densidade, massa específica e absorção do material pelo método preconizado na norma ME DNIT 413. O teor de ligante residual presente no RAP é apresentado na Tabela 3 pelas metodologias do Soxhlet e do Rotarex, junto com a granulometria média do RAP antes e após a extração do ligante, apresentadas na Figura 4.

Tabela 1 - Granulometria do RAP

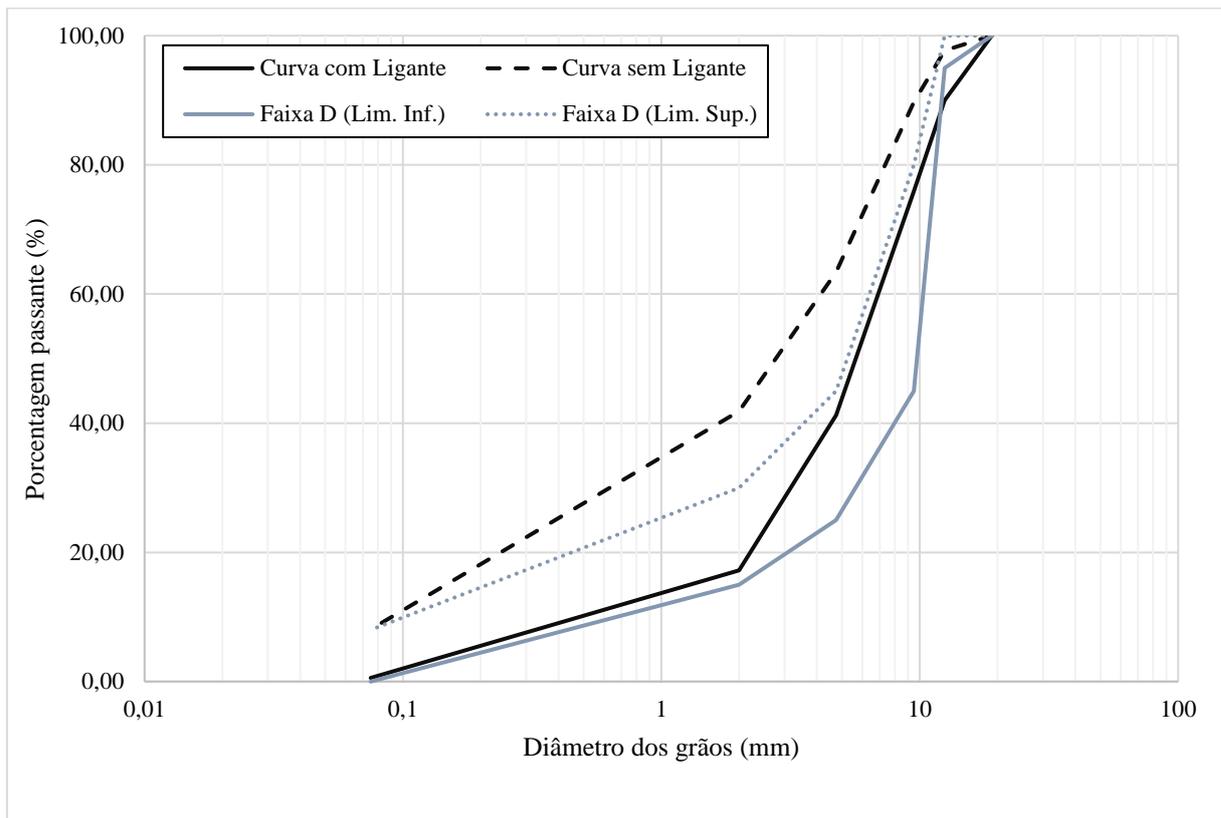
Peneiras		RAP
Nomenclatura	Abertura (mm)	Percentual passante (%)
3/4"	19,1	100,00
1/2"	12,7	89,58
3/8"	9,5	76,21
n° 04	4,8	39,23
n°10	2,0	16,27
n° 200	0,1	0,60

Tabela 2 - Densidade e Absorção do RAP (DNIT 413/2021)

Ensaio	RAP
Densidade Real	2,520
Densidade Aparente	2,513
Massa Esp. Real (g/cm ³)	2,445
Massa Esp. Aparente (g/cm ³)	2,445
Absorção (%)	1,011

Tabela 3 - Teor de Betume

Ensaio	Teor de CAP (%)
Soxhlet (DNIT 158/2021)	5,22
Rotarex (DNER 053/94)	5,04

Figura 4 - Composição granulométrica média antes e após a extração do ligante.

2.2. Caracterização da Emulsão Asfáltica

Para preparação da mistura asfáltica reciclada utilizou-se uma emulsão asfáltica catiônica, de ruptura controlada, modificada com polímeros (RC1C-E) fornecida pela empresa Brasquímica- Produtos Asfálticos LTDA que, em acordo com a norma EM DNIT 165 (DNIT, 2013), forneceu a caracterização do material, apresentada Tabela 4.

Dos ensaios de caracterização fornecidos pela empresa foram repetidos na presente pesquisa alguns deles, com o objetivo de avaliar a variação destes resultados entre a produção e seu uso, cujos equipamentos utilizados estão destacados na Figura 5. Os ensaios foram conduzidos seguindo os mesmos normativos utilizados na caracterização original.

Figura 5 - (a) Ensaio de Viscosidade Saybolt Furol; (b) Ensaio de Penetração; (c) Ensaio de Ponto de Amolecimento; (d) Ensaio de Retorno Elástico

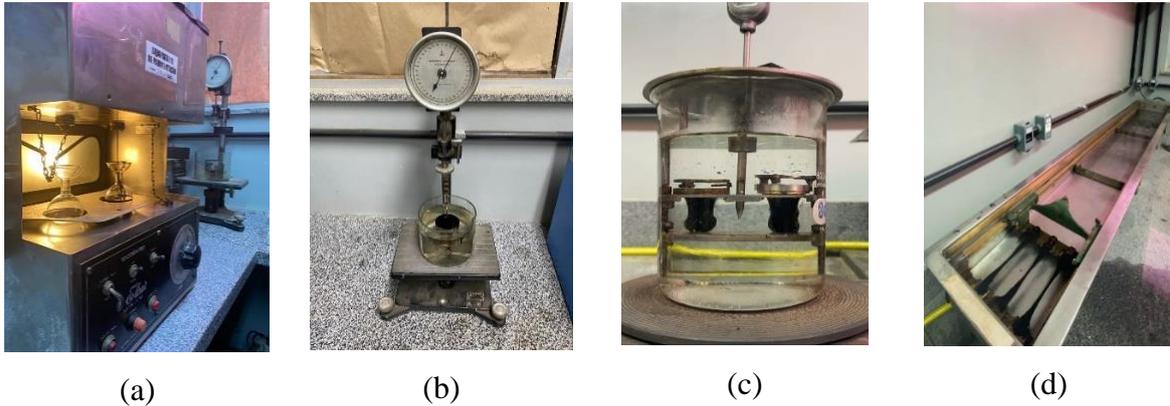


Tabela 4 - Caracterização da emulsão asfáltica RC1C-E pela empresa Brasquímica em setembro de 2023

Características	Limites e Exigências	Resultados	Métodos de Ensaio
Viscosidade Saybolt Furol, s, 50°C	Máx. 70	28,6	NBR-14491
Sedimentação após 5 dias, % massa	Máx. 5,0	2,0	NBR-6570
Peneiração 0,84 mm, % massa	Máx. 0,1	0,01	NBR-14393
Resistência à água, % seco	Mín. 80	97	NBR-6300
Resistência à água, % úmida	Mín. 60	95	NBR-6567
Carga de partícula	Positiva	Positiva	NBR-6567
PH	Máx. 6,5	3,3	NBR-6299
Resíduo Asfáltico, % massa	Mín. 62,0	62,5	NBR-14376
Penetração a 25°C	45 - 150	63,3	NBR-6576
Ponto de Amolecimento	Mín. 55	56,0	NBR-6560
Viscosidade Brookfield, 135°C	Mín. 600 CP	894,5	NBR-15184
Recuperação elástica a 25°C	Mín. 70	72,0	NBR-15086

Fonte: Adaptado da Brasquímica (2023)

2.3. Projeto da mistura controle

De posse da granulometria do RAP, foi realizada uma análise tentado enquadrar a composição granulométrica do material em uma das faixas de projeto expressas na Especificação de Serviço ES DNIT 153 (DNIT, 2010), a qual estabelece limites e tolerâncias para a granulometria dos materiais que se utiliza em misturas asfálticas a frio.

Uma vez que a granulometria do RAP permaneceu inalterada, não havendo a adição de qualquer tipo de agregado suplementar, não foi possível alcançar a conformidade da granulometria com as faixas estipuladas pela norma, como indicado na Tabela 5. Portanto, o estudo prosseguiu com a composição granulométrica original do material.

Tabela 5 - Granulometria do RAP e faixas granulométricas da Especificação de serviço

Nomenclatura	Peneiras		RAP		Faixas Granulométricas do PMF (DNIT 153/2010)				Tolerância (%)
	Abertura (mm)	Passante (%) RAP com ligante	Passante (%) RAP sem ligante	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)		
1"	25,4	100,00	100,00	100	-	100	-	±7	
3/4"	19,1	100,00	100,00	75-100	100	95-100	100	±7	
1/2"	12,7	90,02	97,72	-	75-100	-	95-100	±7	
3/8"	9,5	75,91	89,73	30-60	35-70	40-70	45-80	±7	
n° 04	4,8	41,25	63,39	10-35	15-40	20-40	25-45	±5	
n°10	2	17,24	41,85	5-20	10-25	10-25	15-30	±7	
n° 200	0,1	0,57	8,09	0-5	0-5	0-8	0-8	±2	

Fonte: Adaptado do DNIT (2010)

Em virtude da premissa estabelecida no presente estudo, de dosar uma mistura contendo 100% de RAP, o método da superfície específica proposto por Duriez e comumente aplicado para estimar o teor provável de ligante asfáltico (SANTANA, 1993) não foi utilizado, uma vez que o material fresado contém ligante asfáltico envelhecido impregnado na superfície dos grãos (CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo). Assim, a dosagem foi conduzida considerando como ponto de partida os mesmos teores de emulsão asfáltica RL-1C utilizados por Santos et al. (2023) para dosagem de PMF reciclado (PMFr) contendo 60% de RAP. Dessa forma, foram testados no presente estudo cinco teores de emulsão asfáltica (RC1C-E), sendo estes de 3,2%, 4,0%, 4,8%, 5,6% e 6,4%, correspondendo a 2,0%, 2,5%, 3,0%, 3,5% e 4,0% de CAP residual, respectivamente.

As misturas testadas, foram submetidas aos ensaios de determinação da densidade relativa máxima medida pelo método Rice ME DNIT 427 (DNIT, 2020), ensaio Marshall para misturas betuminosas a frio DNER 107 (DNER, 1994) e determinação da densidade relativa aparente de corpos de prova compactados ME DNIT 428 (DNIT, 2022), afim de se avaliar os parâmetros obtidos e definir o teor de CAP residual de projeto utilizado na mistura reciclada a frio.

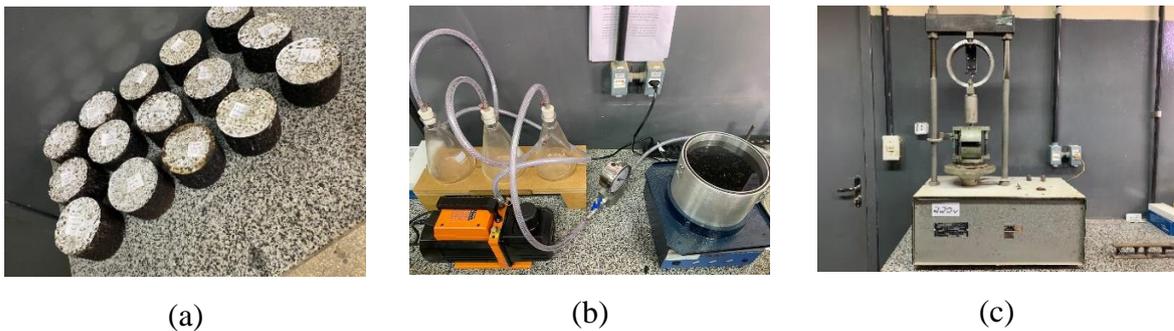
De acordo com a metodologia de dosagem Marshall, definida pela norma ME DNER 107 (DNER, 1994), foram produzidas três misturas asfálticas recicladas, pesando 2500 g cada, para cada teor de adição de CAP residual, totalizando 15 amostras, com o objetivo de determinar a densidade relativa máxima medida (G_{mm}), usando o método Rice (DNIT 427/2020), conforme apresentado na Figura 6. A densidade para cada teor, foi definida como a média das três amostras.

Adicionalmente, foram confeccionados outros 15 corpos de prova (CP), sendo três para cada teor de CAP residual, com 1200 g cada. Esses foram compactados com 50 golpes em cada face e posteriormente submetidos a um período de 24 horas a 60 °C em estufa, conforme prescrito em norma. Após esse período, permaneceram em temperatura ambiente (25°C) por 2

horas antes da extração dos moldes. Em seguida, foram efetuadas medidas de altura e diâmetro dos CP em quatro posições diametralmente opostas. A determinação da densidade aparente dos corpos de prova produzidos no laboratório seguiu o padrão da norma ME DNIT 428 (DNIT, 2022), permitindo o cálculo da densidade aparente com base na razão entre massa ao ar e volume de cada corpo de prova. Esse procedimento, combinado com a G_{mm} , possibilitou a avaliação do volume de vazios (V_v) de cada amostra.

Posteriormente, os CP foram submetidos aos ensaios de determinação da estabilidade e fluência de acordo com a metodologia Marshall (DNER, 1994), onde se utilizou uma prensa automática, da marca HELVAN, de capacidade 4.000 kg, operada com velocidade de ensaio de 50 mm/min, conforme prescrito na referida norma, como mostra a Figura 6.

Figura 6 - (a) Corpos de prova compactados - Metodologia Marshall (DNER 107/94); (b) Ensaio da densidade medida - Metodo Rice (DNIT 427/2020); (c) Prensa automática - Ensaio de Estabilidade



2.4. Dosagens e compactações das misturas com adição de cimento

Após a análise e definição do teor de CAP residual de projeto, procedeu-se ao desenvolvimento de misturas recicladas a frio, com e sem a adição de água, incorporando 0,0% (Controle), 1,0%, 2,0%, 3,0% e 4,0% de cimento Portland. As dosagens e compactações seguiram a metodologia Marshall (DNER, 1994), com amostras de 1200 g de massa e energia de compactação de 50 golpes em cada face do corpo de prova.

Ao total, foram produzidos 60 CP, sendo 12 para cada teor de cimento, com 0,0% e 2,5% de adição de água. Esse teor de umedecimento foi escolhido com base na Especificação técnica do Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER-SP, 2006). As etapas do processo foram organizadas de acordo com o fluxograma ilustrado na Figura 7. Além das misturas dosadas para compactação, foram preparadas 30 outras misturas para definição da densidade relativa máxima medida, conforme método Rice (DNIT 427/2020), buscando-se obter parâmetros volumétricos e de densidade de cada CP, conforme norma DNIT 428 (DNIT, 2022), indicado na Figura 8.

Figura 7 - Fluxograma- Preparação das misturas asfálticas por teor de adição de cimento para ensaios mecânicos.

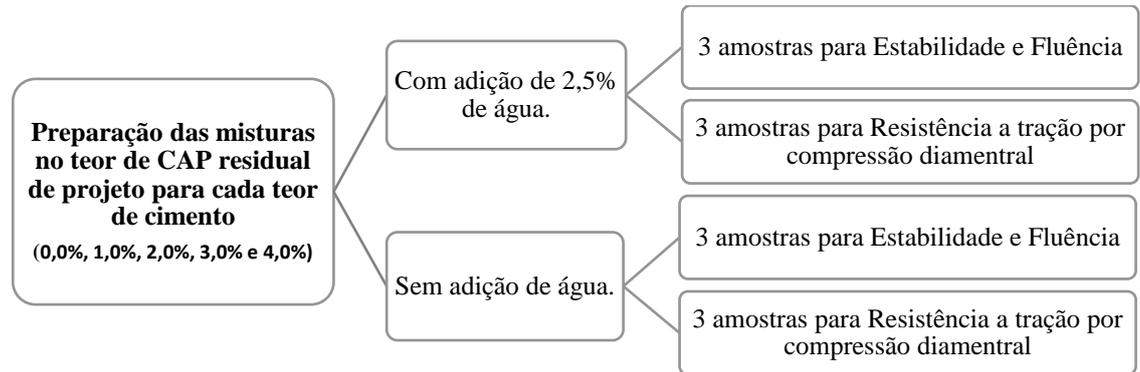
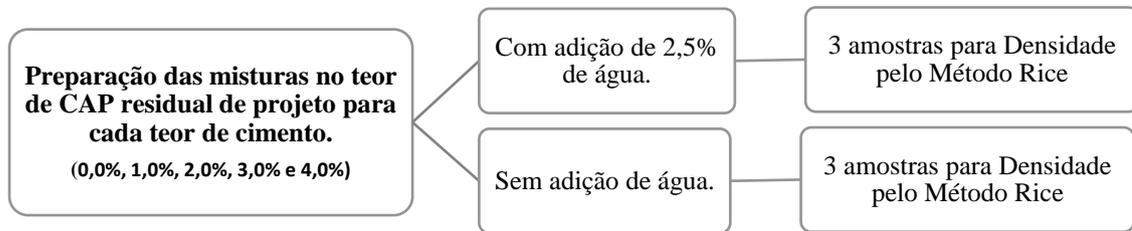


Figura 8 - Fluxograma- Preparação de misturas asfálticas por teor de adição de cimento para metodologia Rice.



2.5. Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos utilizados na caracterização das misturas com as adições de cimento foram os descritos nas normas ME DNIT 107 (DNER, 1994), para definição da Estabilidade e Fluência, e ME DNIT 136 (DNIT, 2018), medindo a resistência à tração por compressão diametral (RT). Nestes ensaios, as amostras destinadas à avaliação de estabilidade, fluência e RT foram testadas individualmente em uma prensa automática HELVAN com capacidade de 4.000 kg, conforme Figura 9. Os testes foram conduzidos a uma velocidade de ensaio de 50 mm/min, conforme prescrito pelas normas indicadas.

Para os ensaios de estabilidade e fluência, os corpos de prova foram pré-condicionados em uma estufa a 40°C por 2 horas, conforme prescrito em norma, antes da realização dos testes. Já nos ensaios de RT, as amostras foram mantidas em uma sala climatizada a 25°C por 4 horas antes do início do ensaio. A prensa faz uma leitura contínua da força aplicada, em quilograma-força (kgf), por deformação, em milímetros (mm), fornecendo um relatório no qual consta uma curva que caracteriza os ensaios. Para definição da estabilidade e fluência partiu-se do método descrito por Abedali *et al.* (2014) o qual define os parâmetros e correções de acordo com o ponto máximo da curva Marshall, como expresso na Figura 10, porém, devido

ao fato de as curvas geradas em laboratório não apresentarem este comportamento bem definido, foi realizada uma adaptação desta metodologia no qual foram inseridas duas retas que simulam as inclinações da curva, como mostra a Figura 11, buscando encontrar-se o valor onde a ruptura ocorre, definindo assim a estabilidade e corrigindo a fluência da amostra, subtraindo a deformação encontrada na ruptura pela deformação encontrada na intersecção da primeira reta traçada com o eixo x. Na determinação da resistência a tração é fornecido, diretamente no relatório, a carga no momento da ruptura e a RT da amostra ensaiada.

Figura 9 - Ensaio mecânicos: (a) Ensaio de Estabilidade e fluência e (b) Ensaio de RT

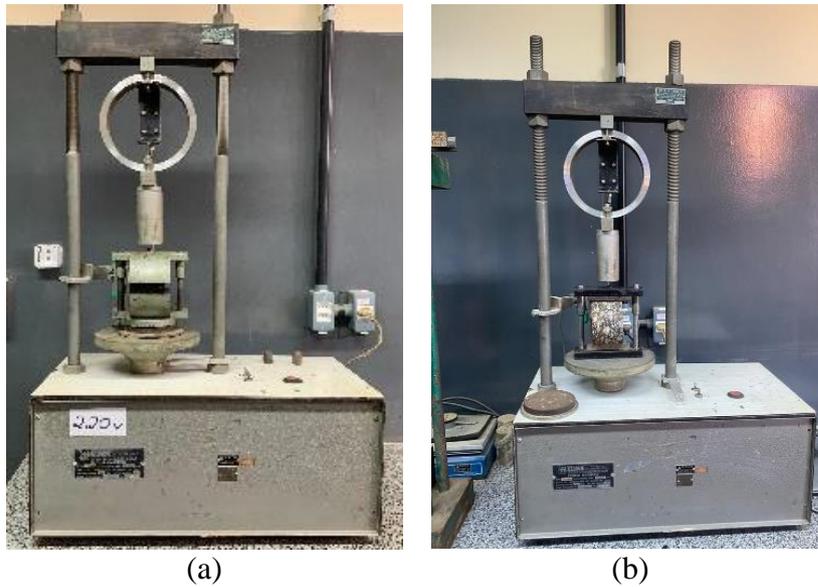
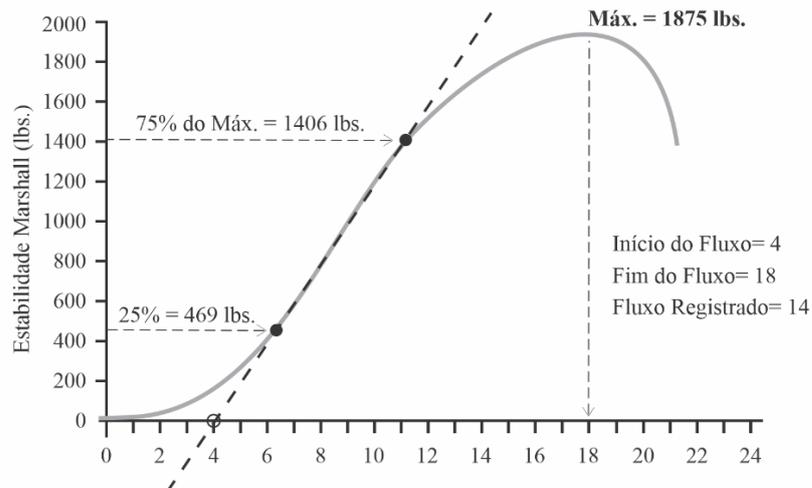
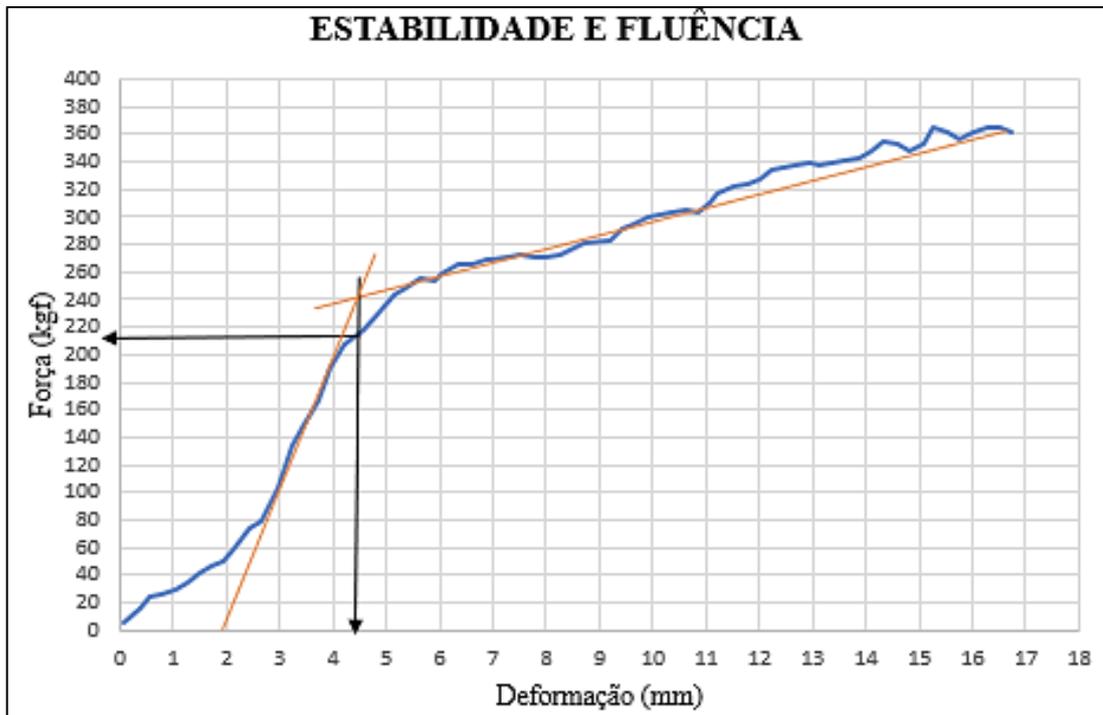


Figura 10 – Curva de Estabilidade Marshall



Fonte: Adaptado de Abedali *et. al* (2014)

Figura 11 - Metodo de determinação dos resultados na curva gerada pela prensa (Exemplo)



Fonte: Abedali *et. al* adaptado por Santos *et al.* (2023)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são abordadas e realizadas as devidas análises dos resultados provenientes dos ensaios laboratoriais do RAP e das misturas asfálticas (PMF) produzidas.

3.1. Projeto da mistura reciclada (Controle)

As misturas dosadas inicialmente com 100% de RAP sem adição de cimento foram analisadas com o intuito de se obter o teor de CAP residual de projeto. Para isso, foram analisados parâmetros de volumetria, densidade, estabilidade e fluência das misturas com seus respectivos teores de CAP residual. Na Tabela 6, são evidenciados os resultados, dos teores testes para os ensaios de: Densidade Aparente (G_{mb}), Densidade Máxima Medida (G_{mm}), Volume de Vazios (V_v), Relação Betume Vazios (RBV), Estabilidade (Est.) e Fluência (F).

Tabela 6 - Parâmetros com resultados médios dos teores testes.

Teor de CAP residual (%)	G_{mb} (g/cm^3)	G_{mm} (g/cm^3)	V_v (%)	RBV (%)	Est. (kgf)	F (mm)
2,0	1,810	2,456	26,32	12,09	439,52	2,40
2,5	1,826	2,439	25,15	15,37	467,31	3,30
3,0	1,852	2,361	21,54	20,52	444,40	2,06
3,5	1,839	2,381	22,76	22,05	502,96	3,97
4,0	1,864	2,391	22,03	25,76	303,01	2,74

Como mencionado por Flores *et al.* (2020) as misturas recicladas a frio apresentam uma tendência a ter maior resistência à compactação sendo a densidade e o volume de vazios parâmetros importantes na avaliação desse tipo de mistura. Desse modo, para definição do teor de CAP residual de projeto foram avaliados, inicialmente, os valores obtidos para os parâmetros supracitados. Notou-se que os teores de 3,0%, 3,5% e 4,0% foram os que apresentaram as maiores densidades, sendo o teor de 3,0% o que apresentou menor volume de vazios. Por sua vez, os parâmetros de resistência e deformabilidade foram avaliados para este teor e observou-se que ambos estão em conformidade com as condições exigidas na Especificação de Serviço DNIT 153 (DNIT, 2010), com estabilidade acima do mínimo exigido na norma e fluência dentro do intervalo definido, como apresentado na Tabela 7.

Além disso, dos três teores destacados, o percentual de 3,0% é o que promove menor consumo de emulsão para a mistura avaliada, conferindo redução nos custos e potencializando a proposta sustentável do uso de misturas recicladas. Sendo assim, este foi o teor de projeto definido para as dosagens com adição de cimento.

Tabela 7 - Comparação dos parâmetros obtidos com as limitações da norma para 3% de CAP residual.

	Resultados	Condições exigidas – ES DNIT 153/2010
Estabilidade (kgf)	444,40	Mín. 150 kgf (50 golpes)
Fluência (mm)	2,06	2,0 – 4,5
Volume de vazios (%)	21,54	5 – 30

3.2. Caracterização Marshall das misturas com adição de cimento

Após a preparação e compactação dos corpos de prova com adições de cimento, foram realizados os ensaios para determinar as características de volumetria e densidade e os parâmetros mecânicos de estabilidade, fluência e resistência à tração sintetizados na Tabela 8, Tabela 9, Figura 11 e Figura 12.

Tabela 8 – Parâmetros com resultados dos traços com adições de cimentos sem água.

ORDEM	TEOR DE CAP RESIDUAL (%)	TEOR DE CIMENTO (%)	G _{mb} (g/cm ³)	G _{mm} (g/cm ³)	V _v (%)	R.B.V	Est. (kgf)	F (mm)	RT (MPa)
1	3,0	0%	1,833	2,361	22,36	19,74	463,69	2,07	0,115
2	3,0	0%	1,867	2,361	20,92	21,12	430,30	2,00	0,108
3	3,0	0%	1,858	2,361	21,30	20,74	439,19	2,10	0,110
Média			1,853	2,361	21,53	20,53	444,40	2,06	0,111
DP			0,018	0,000	0,746	0,713	17,293	0,051	0,004
4	3,0	1,0%	1,850	2,409	23,20	19,30	367,98	1,83	0,132
5	3,0	1,0%	1,858	2,409	22,87	19,59	332,21	2,22	0,129
6	3,0	1,0%	1,817	2,409	24,57	18,15	357,39	2,04	0,143
Média			1,842	2,409	23,55	19,02	352,53	2,03	0,138
DP			0,022	0,000	0,902	0,761	18,373	0,197	0,007
7	3,0	2,0%	1,861	2,399	22,43	19,93	384,82	2,14	0,142
8	3,0	2,0%	1,850	2,399	22,88	19,52	432,34	2,37	0,148
9	3,0	2,0%	1,868	2,399	22,13	20,20	465,12	1,99	0,143
Média			1,860	2,399	22,48	19,88	427,43	2,17	0,144
DP			0,009	0,000	0,378	0,345	40,371	0,193	0,003
10	3,0	3,0%	1,874	2,393	21,69	20,59	552,61	4,00	0,108
11	3,0	3,0%	1,909	2,393	20,23	22,07	647,33	4,00	0,161
13	3,0	3,0%	1,877	2,393	21,56	20,71	624,29	3,50	0,189
Média			1,887	2,393	21,16	21,12	608,08	3,83	0,175
DP			0,019	0,000	0,811	0,823	49,397	0,289	0,041
13	3,0	4,0%	1,869	2,394	21,93	20,36	382,04	4,00	0,123
14	3,0	4,0%	1,837	2,394	23,27	19,15	424,56	3,50	0,203
15	3,0	4,0%	1,883	2,394	21,35	20,93	419,30	3,50	0,221
Média			1,863	2,394	22,18	20,15	408,63	3,67	0,212
DP			0,024	0,000	0,985	0,908	23,182	0,289	0,052

Tabela 9 – Parâmetros com resultados dos traços com adições de cimentos com água.

ORDEM	TEOR DE CAP RESIDUAL (%)	TEOR DE CIMENTO (%)	G _{mb} (g/cm ³)	G _{mm} (g/cm ³)	V _v (%)	R.B.V	Est. (kgf)	F (mm)	RT (MPa)
1	3,0	0%	1,845	2,381	22,51	19,74	472,82	2,22	0,191
2	3,0	0%	1,819	2,381	23,60	18,78	428,49	2,15	0,172
3	3,0	0%	1,838	2,381	22,81	19,47	458,36	2,18	0,185
Média			1,834	2,381	22,97	19,33	453,22	2,18	0,183
DP			0,013	0,000	0,564	0,493	22,607	0,035	0,010
4	3,0	1,0%	1,887	2,420	22,02	20,45	302,72	2,68	0,197
5	3,0	1,0%	1,885	2,420	22,11	20,37	351,52	2,87	0,185
6	3,0	1,0%	1,866	2,420	22,89	19,65	339,79	2,25	0,192
Média			1,879	2,420	22,34	20,16	331,34	2,60	0,191
DP			0,012	0,000	0,479	0,440	25,471	0,317	0,006
7	3,0	2,0%	1,889	2,422	22,01	20,48	515,99	2,14	0,199
8	3,0	2,0%	1,896	2,422	21,72	20,75	475,70	2,37	0,199
9	3,0	2,0%	1,894	2,422	21,80	20,68	398,54	1,99	0,209
Média			1,893	2,422	21,84	20,64	463,41	2,17	0,202
DP			0,004	0,000	0,149	0,143	59,683	0,193	0,006

Continua na próxima página.

ORDEM	TEOR DE CAP RESIDUAL (%)	TEOR DE CIMENTO (%)	G _{mb} (g/cm ³)	G _{mm} (g/cm ³)	V _v (%)	R.B.V	Est. (kgf)	F (mm)	RT (MPa)
10	3,0	3,0%	1,895	2,402	21,11	21,22	557,65	3,31	0,202
11	3,0	3,0%	1,875	2,402	21,94	20,41	587,77	2,80	0,206
13	3,0	3,0%	1,893	2,402	21,19	21,14	627,28	3,55	0,199
Média			1,888	2,402	21,41	20,92	590,90	3,22	0,202
DP			0,011	0,000	0,459	0,447	34,921	0,383	0,004
13	3,0	4,0%	1,910	2,374	19,55	22,67	534,04	3,00	0,129
14	3,0	4,0%	1,957	2,374	17,57	25,05	602,28	4,50	0,226
15	3,0	4,0%	1,915	2,374	19,33	22,91	409,51	5,00	0,214
Média			1,927	2,374	18,81	23,54	515,28	4,17	0,190
DP			0,026	0,000	1,087	1,311	97,744	1,041	0,053

Figura 11 – Propriedades volumétricas das misturas recicladas a frio com adições de cimento

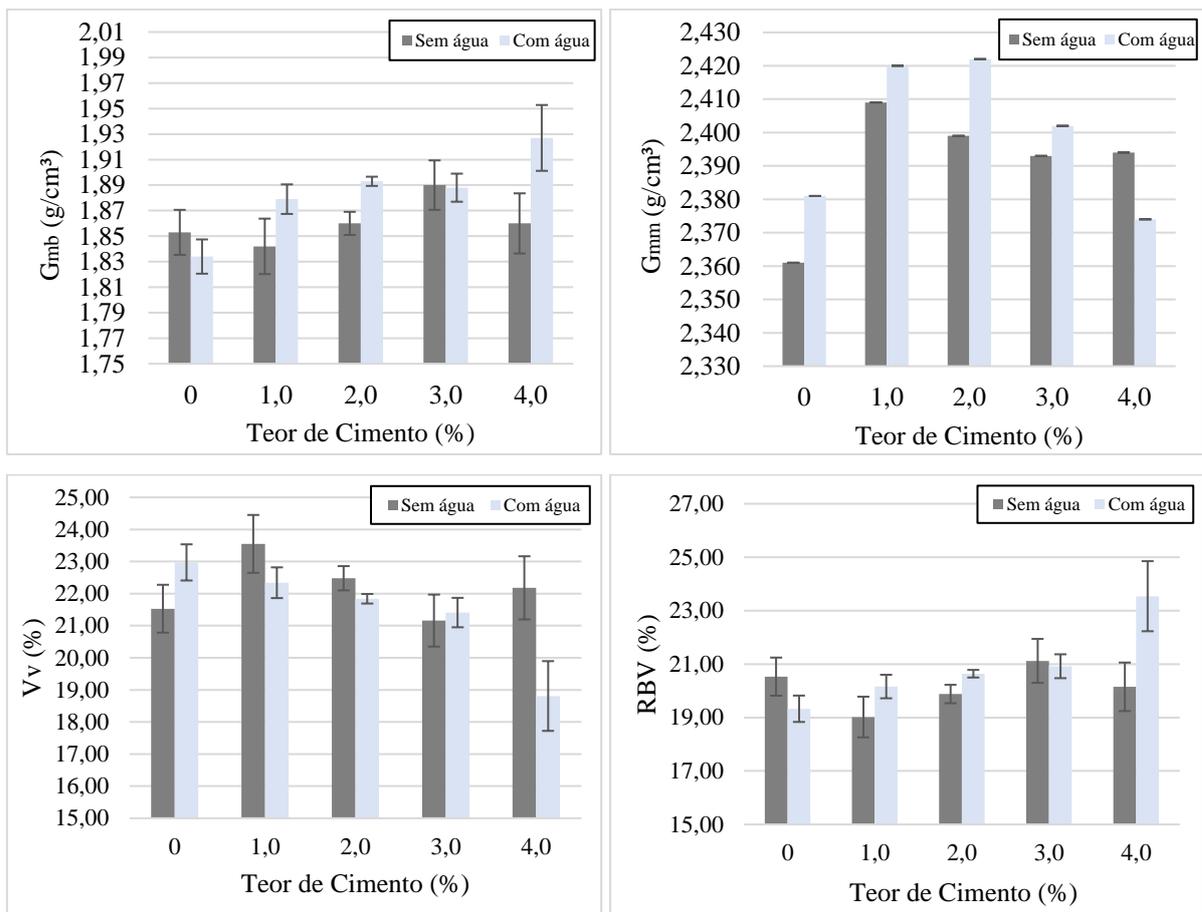
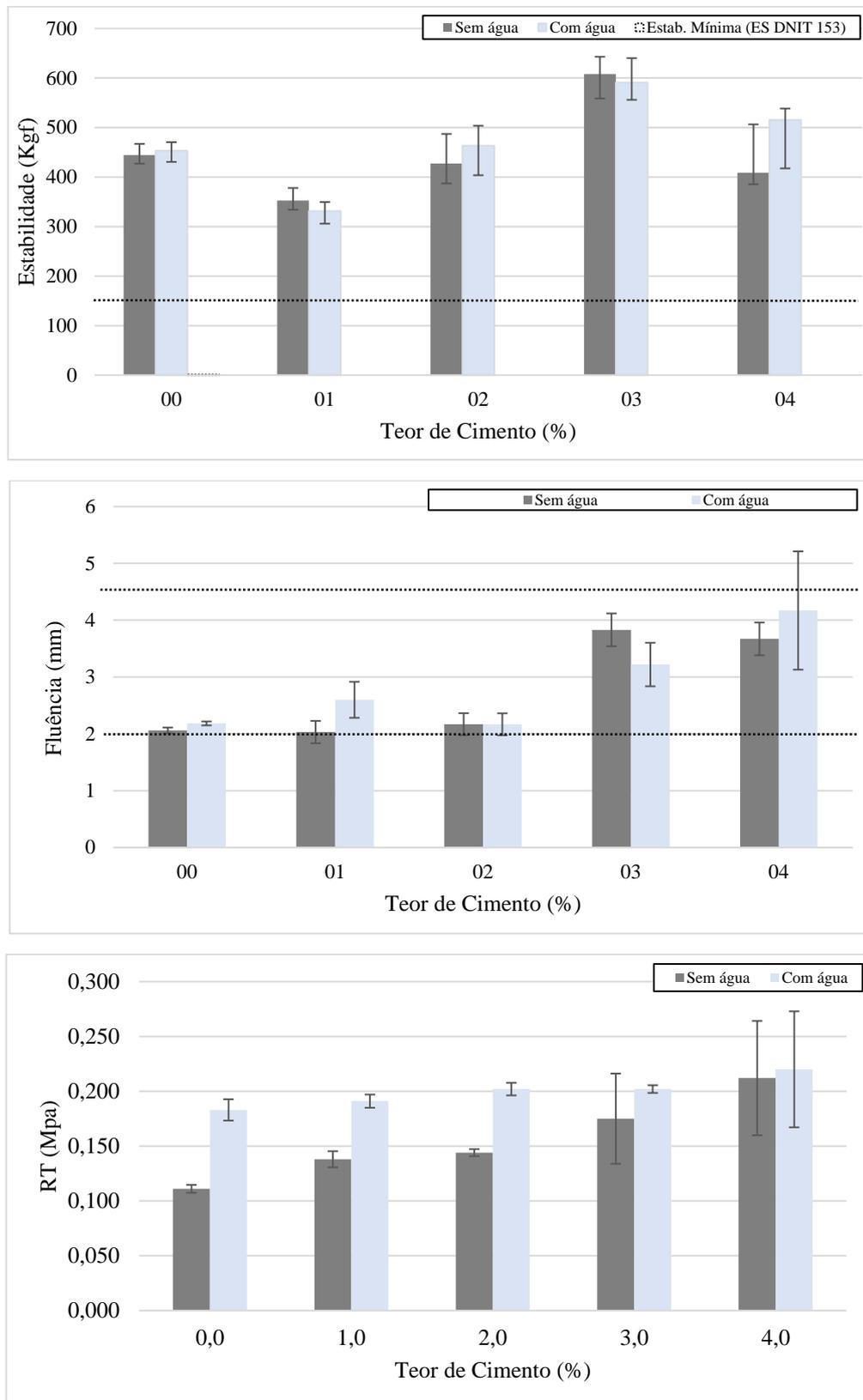


Figura 12 - Propriedades mecânicas das misturas recicladas a frio com adições de cimento



A adição de água na mistura conferiu uma melhor trabalhabilidade ao material onde foi

possível observar que houve uma melhoria no envolvimento do RAP com o ligante, como indicado na Figura 12, com consequente aprimoramento das propriedades volumétricas das mesmas. Notou-se, ainda, que as densidades aparentes e medidas aumentaram com adição de água, o que aponta para uma maior densificação dos corpos de prova (CP) culminando na diminuição do volume de vazios em comparação com a mistura controle.

Figura 12 - (a) Misturas no teor de 4% de cimento com e sem água; (b) Corpos de provas compactados com e sem adição de água.



Observou-se uma tendência de redução no volume de vazios das amostras, como consequência das adições de cimento, indicado na Figura 11. Para os CP nos quais não foi adicionada água, essa tendência foi irregular, onde apenas o teor de 3% de cimento apresentou volume de vazios inferior ao da mistura controle. Nas misturas com adição de água, a tendência de queda foi contínua, chegando a uma redução de 18% no volume de vazios, indicando que pode ter ocorrido uma hidratação mais eficiente do aglomerante, o que levou à formação de gel de cimento para preenchimento dos vazios, melhorando a coesão e reduzindo o V_v das amostras.

As densidades aparentes dos CP aumentaram à medida que os teores de cimento foram adicionados, com exceção do CP com 4% de cimento e sem água, conforme ilustrado na Figura 11. A análise dos resultados da relação betume/vazios (RBV) nas misturas indicou variação baixa nas amostras sem água. Porém, nos CP com água foi evidenciada uma maior variabilidade, destacando-se o último ensaio com a adição de 4% de cimento Portland, indicando que com a adição do aglomerante, houve um melhor preenchimento dos vazios com betume o que confere melhores características volumétricas a mistura.

Os parâmetros de resistência das misturas também foram alterados com a adição de cimento. A resistência a tração por compressão diametral apresentou resultados promissores, indicando um ganho de resistência da mistura a medida em que se adicionou cimento Portland. Esse aumento foi contínuo e conferiu, principalmente para a mistura sem água, um ganho considerável de resistência, aumentando em 90% este parâmetro. Notou-se que a estabilidade

apresentou uma queda na adição de 1%, porém com 2% e 3% este parâmetro aumentou, ao se adicionar 4% de cimento, a estabilidade voltou a cair, chegando a ser inferior à medida na mistura controle sem adição de água. Estes resultados indicam que 1% de adição pode ter sido insuficiente para melhorar a estabilidade da mistura e 4% de adição pode ter sido superior ao teor necessário para formação de uma matriz rígida e equilibrada. Os resultados da fluência das misturas com adição de cimento Portland, apresentaram um comportamento não linear. Observou-se uma variação nos resultados conforme o teor de cimento aumentava, indicando sua influência no aumento da deformação da mistura.

A dispersão evidenciada nos ensaios retratados na Figura 11 destaca-se especialmente nos parâmetros de resistência e deformabilidade. Essa alteração é atribuída à técnica adotada na análise dos resultados desses ensaios, que, embora profícua, pode, eventualmente, resultar em valores menos representativos. Considerar ajustes na metodologia analítica pode ser pertinente para assegurar uma representação mais precisa e consistente dos dados.

4. CONCLUSÃO

A condução do estudo laboratorial das misturas asfálticas recicladas a frio contendo 100% de RAP e diferentes teores de cimento portland, utilizando a emulsão asfáltica de ruptura controlado RC-1C-E, permitiu a obtenção de resultados significativos em termos de dosagem Marshall, abrangendo volumetria, estabilidade, fluência e resistência à tração.

A inclusão de cimento Portland na mistura revelou melhorias, resultando em uma maior densificação dos corpos de prova e aumento das densidades aparentes. Os efeitos sobre os parâmetros de resistência foram promissores, com variações positivas na estabilidade e ganhos notáveis na resistência à tração por compressão diametral, especialmente na mistura sem água. Para realização de pesquisas futuras é indicado avaliar o tempo de cura dessas misturas, uma vez que com a adição do filler os parâmetros mecânicos podem apresentar ganhos de resistência consideráveis.

Em síntese, a adição controlada de cimento desempenhou um papel de otimização das propriedades da mistura, evidenciando a importância da formulação cuidadosa para atender aos requisitos específicos de desempenho em pavimentação.

Esta pesquisa proporcionou dados auspiciosos sobre o comportamento de misturas recicladas a frio com adição de cimento Portland, contribuindo para o avanço do conhecimento na área da reciclagem de pavimentos e seu desempenho mecânico quando da adição de um *filler* ativo como o cimento. No entanto, para alcançar estruturas asfálticas mais resilientes e sustentáveis, é crucial conduzir estudos adicionais e aprofundar a compreensão

do comportamento mecânico de misturas recicladas com 100% de RAP e o efeito da adição de cimento Portland nestas misturas, bem como a realização de ensaios dinâmicos de caracterização mecânica (módulo de resiliência).

5. REFERÊNCIAS

ABEDALI, A. H.; Asphalt Mix-Design Methods. 7ª edição. Asphalt Institute, 2014

BRASQUIMICA LTDA. Especificação Técnica- Emulsão RC1C-E. Bahia, 2023.

BRUNO, M.; TATARANNI, P.; SANGIORGI, C. Experimental application of fully recycled asphalt concretes produced with chemical additives for patch pavement rehabilitation. *Construction and Building Materials*, v. 363, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129807>. Acesso: 13 set. 2023.

CASTRO NETO, A.M. Proposta de projeto de dosagem de concreto betuminoso reciclado a quente. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica / USP – Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo – SP, 2000.

CNT - Confederação Nacional do Transporte. Pesquisa CNT de Rodovias 2023: Relatório Gerencial. Brasília: CNT: SEST: SENAT. 2023.

Departamento de Estradas de Rodagem. ET-DE-P00/025. Pré- Misturado a Frio. São Paulo, 2006

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 053. Misturas Betuminosas- Percentagem de Betume, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 107. Mistura betuminosa a frio, com emulsão asfáltica- Ensaio Marshall, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER 199. Redução de amostra de campo de agregados para ensaio de laboratório, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1996.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 136. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2018.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 153. Pavimentação asfáltica – Pré misturado a frio com emulsão catiônica convencional – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2010.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 158. Mistura asfáltica – Determinação da porcentagem de betume em mistura asfáltica utilizando o extrator Soxhlet – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2011.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 165. Emulsões asfálticas para pavimentação – Especificação de material, Brasília, DF, Brasil. 2013.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 412. Pavimentação - Misturas asfálticas – Análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos e misturas de agregados por peneiramento – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2019.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 413. Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2021.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 427. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2020.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 428. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados – Método de ensaio, Brasília, DF, Brasil. 2022.

EAPA. Asphalt in figures 2021. [S.l.]. Disponível em: <https://eapa.org/asphalt-in-figures/>. Acesso em: 12 de setembro de 2023.

FLORES, G.; GALLEGU, J.; MIRANDA, L.; MARCOBAL, J. R. Cold asphalt mix with emulsion and 100% rap: Compaction energy and influence of emulsion and cement content. *Construction and Building Materials*, v. 250, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118804>. Acesso: 16 set. 2023.

FONSECA, J. F.; GÓIS, T., S.; DOMINICINI, W. K.; TEIXEIRA, J. E. S. L. O estado da arte sobre uso de reciclado de pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, Vitória, 2014.

LIN, J.; HUO, L.; XU, F.; HONG, J. Development of microstructure and early-stage strength for 100% cold recycled asphalt mixture treated with emulsion and cement. *Construction and Building Materials*, v. 189, p. 924 – 933, nov. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.064>. Acesso: 15 set. 2023.

LIN, Y.; LYV, Y.; FAN, L.; ZHANG, Y. Effects of Cement and Emulsified Asphalt on Properties of Mastics and 100% Cold Recycled Asphalt Mixtures. *Materials*, v. 12, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma12050754>. Acesso: 17 set. 2023.

PEDREIRA, W. J. P.; ALMEIDA, M. S. S., CARVALHO, A. I. S.; SILVA, F. G. S. Efeito do tempo de estocagem no comportamento mecânico de mistura asfáltica a frio produzida em usina de pequeno porte. *Revista Matéria*, v. 26, nº 4. Rio de Janeiro, 2021.

RAGAB, M.; EL-NAGA, I. A. Performance Assessment of Cold Asphalt Concrete Mixtures Containing Recycled Paving Materials. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2021.

SANTANA, H. Manual de pré-misturados a frio. Rio de Janeiro: IBP, 1993.

SANTOS, E. D.; ALMEIDA, M. S. S. ; MARQUES, R. V. L. ; ALMEIDA, P. R. X. ; SANTANA, P. R. L. ; ACHY, A. R. A. ; COSTA, W. G. S. ; LIMA, C. D. A. Comportamento mecânico preliminar de pmf reciclado com elevados teores de rap. In: 37º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2023, Santos/SP. 37º ANPET, 2023.

SUZUKI, K. Y. Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

XIAO, F.; XU, L.; ZHAO, Z.; HOU, X.; Recent applications and developments of reclaimed asphalt pavement in China, 2010–2021. *Sustainable Materials and Technologies*, v. 37, set. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00697>. Acesso: 13 set. 2023.

ZHU, Y.; LI, Y.; SI, C.; QIAO, Y.; LI, H. Laboratory Evaluation on Performance of Fiber-Modified Asphalt Mixtures Containing High Percentage of RAP. *Advances in Civil Engineering: Hindawi*, v. 2020, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/5713869>. Acesso: 15 set. 2023.