



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANDRÉ LUÍS DE SOUZA MOTA**

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE RAP  
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**2021**

ANDRÉ LUÍS DE SOUZA MOTA

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE RAP  
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil do  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da  
Universidade Federal de Campina Grande, para  
encerramento do componente curricular e  
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra. Lêda Christiane de F.L. Lucena

Coorientadora: Me. Laiana Ferreira da Costa

CAMPINA GRANDE - PB

2021

ANDRÉ LUÍS DE SOUZA MOTA

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO SOBRE A INFLUÊNCIA DO TEOR DE RAP  
NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Unidade Acadêmica de Engenharia Civil do  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da  
Universidade Federal de Campina Grande, para  
encerramento do componente curricular e  
conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Aprovado em: \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena  
Orientadora

*Laiana Ferreira da Costa.*

---

Me. Laiana Ferreira da Costa  
Coorientadora

---

Profa. Dra. Ana Maria Duarte Gonçalves Mendonça  
Examinadora

---

Me. Daniel Beserra Costa  
Examinador

*A Deus e a meus pais, Martinho e Ana Lúcia,  
pela força e apoio nos momentos escuros do  
recomeço.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte da verdadeira Vida. D'Ele, por Ele e para Ele, são todas as coisas.

À Nossa Senhora, a quem devo toda a minha gratidão! “Vosso coração é minha esperança na travessia desta vida!”

Ao meu anjo da guarda e aos amigos do Céu, que um dia de cada vez, pela intercessão me ajudaram.

Aos meus pais, Martinho e Lucinha, e aos meus avós Alírio e Isaura (*in memoriam*), Francisco e Lourdes. Sei que tudo que fizeram por mim foi por amor. Meus pais, suas orações me mantiveram de pé quando o corpo perdeu forças.

A meus irmãos, Kelly, Douglas, Ana, João e Epídio e a meus sobrinhos amados Lucas, Arthur, Pedro e Lívia. Vocês são minha felicidade. Amo a cada um com todo o coração.

À minha orientadora, Professora Lêda, pelas oportunidades concedidas e paciência.

À minha coorientadora Laiana, a quem muito agradeço pela oportunidade, pelo incentivo, pela paciência e pelo tempo que dispôs comigo apesar de todas as atividades em que está encarregada.

À Layla, minha amiga e namorada, por tanto amor e incentivo.

À minha família, amigos e benfeitores, o meu coração profundamente agradecido.

Às amigadas que fiz durante o curso, irmãos que levarei para a vida, pelo apoio e incentivo.

À Letícia e Jucimara, que não mediram esforços em me ajudar.

Ao corpo docente, técnicos e funcionários do LEP e do DEC, pelo conhecimento transmitido.

Aos autores que prontamente disponibilizaram suas pesquisas, quando solicitados.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

*"Se o Senhor não edificar a casa, é em vão que trabalham os que a edificam. Se o Senhor não guardar a cidade, inutilmente vigia a sentinela."*

*(Salmos 126, 1)*

## RESUMO

Em tempos de alterações climatológicas a nível mundial, torna-se importante a reflexão e a busca de materiais e técnicas menos agressivos e, quem sabe, mais eficientes. Apesar do uso do fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP) como uma nova matéria prima ser promissor observa-se a carência de informações e dúvidas em torno do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com este material. Neste sentido, o presente trabalho reuniu, por meio de uma revisão bibliográfica, dados de resultados de ensaios laboratoriais de misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP (0% a 100%) e analisou por meio de um estudo de tendências o comportamento mecânico dessas misturas asfálticas. Os resultados mostraram que o teor total de ligante, o tipo de compactação e o teor do RAP influenciam diretamente no desempenho mecânicos das misturas asfálticas recicladas. O incremento de RAP elevou os valores de estabilidade Marshall, módulo de resiliência, vida de fadiga e resistência à tração. Observou-se que estes valores foram fortemente influenciados pela composição granulométrica da mistura reciclada e pela presença de um agente rejuvenescedor. Nesse estudo não foi possível verificar uma tendência que refletisse a forma como o RAP influencia no comportamento reológico da mistura reciclada: os valores de módulo complexo/ dinâmico, fadiga e resistência mecânica a baixa temperatura encontrados foram semelhantes aos de misturas convencionais confeccionadas sem RAP.

Palavras-chave: Misturas asfálticas recicladas; Reclaimed Asphalt Pavement; Reciclagem de pavimentos; Desempenho mecânico.

## **ABSTRACT**

In times of climate change worldwide, it is important to reflect and search for less aggressive and, who knows, more efficient materials and techniques. Despite the use of the milled (Reclaimed Asphalt Pavement - RAP) as a promising new raw material, there is a lack of information and doubts about the mechanical behavior of asphalt mixtures recycled with this material. In this sense, the present work brought together, through a literature review, data from laboratory test results of recycled asphalt mixtures with different levels of RAP (0% to 100%) and analyzed through a trend study the mechanical behavior of these asphalt mixtures. The results showed that the total binder content, the type of compaction and the RAP content directly influence the mechanical performance of the recycled asphalt mixtures. The RAP increases increased marshall stability values, resilience modulus, fatigue life and tensile strength. It was observed that these values were strongly influenced by the granulometric composition of the recycled mixture and the presence of a rejuvenating agent. In this study, it was not possible to verify a trend that reflected how RAP influences the rheological behavior of the recycled mixture: the values of complex modulus, fatigue and mechanical resistance at low temperature found were similar to those of conventional mixtures made without RAP.

**Keywords:** Recycled asphalt mixtures; Reclaimed Asphalt Pavement; Pavement recycling; Mechanical performance.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esforços em camadas do pavimento.....	15
Figura 2 - Ilustração dos três tipos de distribuição granulométrica das misturas asfálticas.....	17
Figura 3 - Amostra de resíduo fresado obtido de fresagem de trecho da BR-230. ....	22
Figura 4 - Fluxo metodológico. ....	25
Figura 5 - Estabilidade Marshall (Kgf) <i>versus</i> Teor de RAP (%). ....	44
Figura 6 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de Estabilidade Marshall....	44
Figura 7 - Dispersão e linhas de tendências para os comportamentos observados. ....	45
Figura 8 - Módulo de Resiliência (MPa) <i>versus</i> Teor de RAP (%). ....	46
Figura 9 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de MR.....	47
Figura 10 - Resistência à Tração (MPa) <i>versus</i> Teor de RAP (%). ....	48
Figura 11 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de RT.....	49
Figura 12 - Flow Number (Ciclos) <i>versus</i> Teor de RAP (%). ....	50
Figura 13 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de Flow Number. ....	51
Figura 14 - Dispersão global e tendências particulares para os valores de Flow Number. ....	51
Figura 15 - Desgaste Cântabro (%) <i>versus</i> Teor de RAP (%). ....	52
Figura 16- Gráfico de dispersão Desgaste Cântabro (%) <i>versus</i> Teor de RAP (%). ....	53
Figura 17 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de desgaste Cântabro.....	53
Figura 18 - RRT (%) <i>versus</i> Teor de RAP (%). ....	54
Figura 19 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de de RRT. ....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Categorias de ensaios de caracterização mecânica.....	18
Tabela 2 - Tabela-resumo dos estudos de abordagem quantitativa.....	28
Tabela 3 - Ensaios mecânicos e suas especificações.....	30
Tabela 4 - Compilação de resultados de estabilidade/ fluência marshall.....	65
Tabela 5 - Compilação de resultados de módulo de resiliência.....	69
Tabela 6 - Compilação de resultados de módulo complexo/ dinâmico.....	74
Tabela 7 - Compilação de resultados de resistência à tração.....	75
Tabela 8 - Compilação de resultados de vida de fadiga.....	77
Tabela 9 - Compilação de resultados de creep dinâmico.....	79
Tabela 10 - Compilação de resultados de desgaste cântabro.....	80
Tabela 11 - Compilação de resultados de suscetibilidade à umidade.....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>AASHTO</b>	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
<b>ABNT</b>	<b>Associação Brasileira de Normas Técnicas</b>
<b>AR</b>	<b>Agente rejuvenecedor</b>
<b>ARRA</b>	<i>Asphalt Reclaiming and Recycling Association</i>
<b>CAP</b>	<b>Cimento Asfáltico de Petróleo</b>
<b>CAPES</b>	<b>Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior</b>
<b>CBUQ</b>	<b>Concreto Betuminoso Usinado a Quente</b>
<b>DNER</b>	<b>Departamento Nacional de Estradas de Rodagem</b>
<b>DNIT</b>	<b>Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes</b>
<b>EAP</b>	<b>Emulsão Asfáltica de Petróleo</b>
<b>EAPA</b>	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
<b>FN</b>	<i>Flow Number</i>
<b>HWTD</b>	<i>Hamburg Wheel Tracking Devices</i>
<b>Kgf</b>	<b>Quilograma força</b>
<b>mm</b>	<b>milímetro</b>
<b>MPa</b>	<b>Mega Pascal</b>
<b>MR</b>	<b>Módulo de Resiliência</b>
<b>NBR</b>	<b>Norma Brasileira</b>
<b>RAP</b>	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
<b>RT</b>	<b>Resistência à Tração</b>
<b>SciELO</b>	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
<b>SUPERPAVE</b>	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
<b>°C</b>	<b>Graus Celsius</b>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1. OBJETIVO DO TRABALHO</b> .....	14
1.1.1. Objetivo Geral.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos .....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
<b>2.1. PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b> .....	15
<b>2.2. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....	16
2.2.1. Cimento asfáltico de petróleo .....	16
2.2.2. Agregados .....	16
<b>2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS</b> .....	17
2.3.1. Estabilidade e Fluência Marshall .....	18
2.3.2. Resistência à tração por compressão diametral (RT) .....	18
2.3.3. Módulo de Resiliência.....	19
2.3.4. Módulo Complexo/ Dinâmico .....	20
2.3.5. Vida de Fadiga .....	20
2.3.6. Desgaste Cântabro .....	20
2.3.7. Ensaio uniaxial de carga repetida ( <i>Creep</i> Dinâmico) .....	21
2.3.8. Afundamento de trilha de roda .....	21
2.3.9. Suscetibilidade à Umidade Induzida (Lottman) .....	21
<b>2.4. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS</b> .....	22
<b>2.5. MÉTODOS DE RECICLAGEM COM RAP</b> .....	23
<b>2.6. LIMITAÇÕES PARA O USO DO RAP EM NOVAS MISTURAS ASFÁLTICAS</b>	23
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	25
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	31
<b>4.1. ANÁLISE QUALITATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS</b> .....	31
4.1.1. Estabilidade e Fluência Marshall .....	31
4.1.2. Módulo de Resiliência.....	32
4.1.3. Módulo Complexo/ Dinâmico .....	34
4.1.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	35
4.1.5. Vida de Fadiga .....	36
4.1.6. Flow Number.....	37

4.1.7. Desgaste Cântabro .....	38
4.1.8. Suscetibilidade à Umidade Induzida (Lottman) .....	39
4.1.9. Desempenho à deformação permanente (Afundamento de Trilha de Roda).....	40
4.1.10. Tipo de compactação .....	41
<b>4.2. ANÁLISE QUANTITATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS .....</b>	<b>41</b>
4.2.1. Estabilidade e Fluência Marshall .....	43
4.2.2. Módulo de Resiliência.....	45
4.2.3. Resistência à Tração Estática .....	47
4.2.4. Compressão ou Tração Axial de Carga Repetida ( <i>Creep</i> Dinâmico).....	49
4.2.5. Desgaste Cântabro .....	52
4.2.6. Suscetibilidade à Umidade Induzida (Lottman) .....	54
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE A - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE ESTABILIDADE/ FLUÊNCIA MARSHALL .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE B - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE C - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE MÓDULO COMPLEXO/ DINÂMICO.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE D - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE E - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE VIDA DE FADIGA .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE F - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE CREEP DINÂMICO .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE G - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE DESGASTE CÂNTABRO ..</b>	<b>80</b>
<b>APÊNDICE H - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE SUSCETIBILIDADE À UMIDADE.....</b>	<b>81</b>

# 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a matriz de transporte de cargas e pessoas é predominantemente rodoviária. Até o mês de julho de 2021, somente a malha rodoviária federal pavimentada abrangia uma extensão total de 65.099,1 km e a não pavimentada, 9.444,0 km (DNIT, 2021). O modal rodoviário é, de longe, o mais expressivo no país, sendo responsável, até o ano de 2018, por cerca de 65% da movimentação de cargas (BRASIL, 2018) e, apesar das medidas restritivas tomadas em função da pandemia da Covid-19, movimentou um volume superior 46 milhões de passageiros no ano de 2020 (BRASIL, 2020), tudo isso devido à sua capilaridade superior em relação aos demais.

Se por um lado, no modal rodoviário, existe potencial de crescimento e perspectivas de continuidade e/ou ampliações de investimentos públicos ou privados, por outro, existe a necessidade de se executar pavimentos mais duráveis e que consigam proporcionar conforto e segurança ao usuário ao mesmo tempo em que se reduzem os danos ao meio ambiente.

É sabido que a indústria da construção civil é responsável pela geração de parte significativa dos resíduos sólidos. Dentre as atividades com alto potencial de geração de resíduos sólidos está a pavimentação nos primeiros lugares. Segundo Balbo (2007), em uma breve comparação, na pavimentação de uma via rural ou urbana, considerando um quilômetro de via e desconsiderando os acostamentos, pode-se consumir 5,1 vezes a quantidade de agregados consumida na construção de um edifício de 15 andares e dois subsolos.

Em tempos de alterações climatológicas a nível mundial e de redução da oferta de recursos naturais em face da utilização desordenada dos mesmos, torna-se importante a reflexão e a busca de materiais e técnicas menos agressivos e, quem sabe, mais eficientes. Gennesseaux (2015) destaca que o setor de infraestrutura de transportes tem incentivado o uso e desenvolvimento de novos métodos e práticas mais sustentáveis, a fim de permitir a redução de energia empregada nesses processos e a demanda exagerada por recursos naturais.

Dentro do conjunto de práticas sustentáveis no âmbito da pavimentação rodoviária, podemos citar a reciclagem de pavimentos. Surgida na década de 1930, só despertou interesse nos técnicos rodoviários internacionais e organismos de fomento a partir da crise do petróleo, em 1970, com a escassez de materiais asfálticos mais a crise econômica internacional (BONFIM, 2010).

Costa e Pinto (2011) consideram que no uso de pavimentos com revestimento asfáltico reciclado, o resíduo fresado, mais conhecido como RAP (do inglês, *Reclaimed Asphalt*

*Pavement*), anteriormente tratado como um entulho problemático, acaba por se tornar uma nova matéria prima. No entanto, observa-se que a comunidade científica e o setor da pavimentação nacional ainda apresentam dúvidas e carências de informações sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas, confeccionadas em diferentes condições.

Sendo assim, o presente trabalho objetiva reunir e analisar dados empíricos, encontrados na literatura, de estabilidade e fluência Marshall, módulo de resiliência, módulo complexo/ dinâmico, resistência à tração, vida de fadiga, *Creep* Dinâmico, afundamento de trilha de roda, desgaste Cântabro e suscetibilidade à umidade induzida, referentes a misturas asfálticas confeccionadas com diferentes taxas de reciclagem. O intuito é ajudar numa melhor compreensão do comportamento mecânico dessas misturas por meio da análise de tendências.

## 1.1. OBJETIVO DO TRABALHO

### 1.1.1. Objetivo Geral

Realizar uma revisão bibliográfica de caráter exploratório sobre a influência do teor de RAP nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Apresentar um levantamento bibliográfico de resultados de estabilidade e fluência Marshall, módulo de resiliência, módulo complexo/ dinâmico, resistência à tração, vida de fadiga, *Creep* Dinâmico, afundamento de trilha de roda, desgaste Cântabro e suscetibilidade à umidade induzida em misturas asfálticas recicladas com diferentes teores de RAP;
- Analisar os dados coletados em termos de ‘comportamento mecânico versus teor de RAP incorporado’;
- Estudar a tendência que se estabelece na relação ‘comportamento mecânico versus teor de RAP incorporado’.

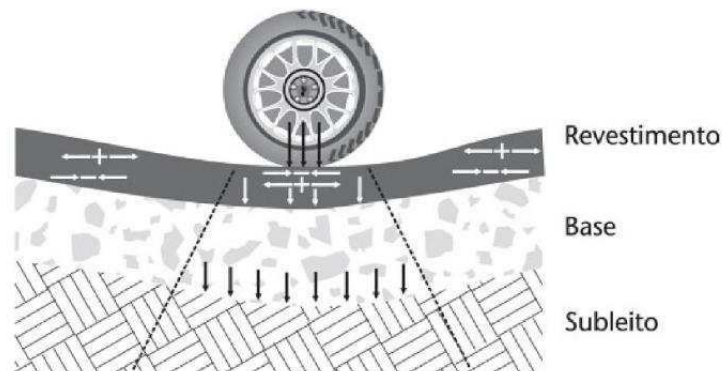
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Tomando por base as definições de pavimento de Balbo (2007) e Bernucci *et al.* (2008), podemos sintetizar pavimento como sendo uma estrutura formada por múltiplas camadas de diferentes materiais compactados sobre uma superfície de fundação, destinada a resistir ao tráfego e propiciar aos usuários do mesmo, trafegabilidade com conforto e segurança.

De modo geral, essa estrutura é concebida para, trabalhando adequadamente, transmitir os esforços da superfície para as camadas mais inferiores, de forma que impeça a ocorrência de deformações, em suas camadas ou na fundação, incompatíveis com sua utilização, sejam esses esforços causados pela movimentação de veículos ou pelo próprio ambiente. A Figura 1, a seguir, ilustra sinteticamente a atuação dos esforços solicitantes gerados por cargas externas sobre as camadas de um pavimento.

Figura 1- Esforços em camadas do pavimento.



Fonte: Adaptado de Balbo (2007).

Segundo Balbo (2007), o revestimento é a camada que deverá, entre outras funções, receber diretamente as ações do tráfego e resistir às mesmas transmitindo de forma atenuada às camadas inferiores sem sofrer grandes deformações elásticas ou plásticas, desagregação de componentes ou, ainda, perda de compactação. Para isso, necessita ser composto por materiais bem aglutinados ou dispostos de maneira a evitar sua movimentação horizontal.



## 2.2. COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A escolha dos materiais a serem empregados na camada de revestimento asfáltico de um pavimento deve ser feita de forma racional, considerando as variáveis condicionantes (tráfego, clima e estrutura do pavimento) e visando a otimização de propriedades relacionadas ao seu desempenho (CERATTI *et al.*, 2015).

Segundo a norma DNIT 031/2006 – ES, as misturas asfálticas são constituídas de agregados graúdos e miúdos, materiais de enchimento *filler* e ligante asfáltico. A composição das misturas deve satisfazer às faixas granulométricas, teor de ligante, percentual de vazios, relação de betume/vazios (RBV), vazios do agregado mineral (VAM), resistência a tração por compressão diametral e às exigências contidas nas normas de referência de misturas executadas a quente.

Ceratti *et al.* (2015) ainda salientam que em casos de recomposição da capacidade estrutural ou funcional do pavimento, além dos tipos descritos anteriormente, ainda é aceitável o uso de outros tipos de misturas, podendo ser novas relativamente fluidas (lama asfáltica e microrrevestimento) ou recicladas.

### 2.2.1. Cimento asfáltico de petróleo

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo. No Brasil utiliza-se a denominação CAP para este produto, que é um material semi-sólido, de cor marrom escura a preta, impermeável a água, viscoelástico à temperatura ambiente, pouco reativo e com propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico. Apesar da baixa reatividade química a muitos agentes, o material pode sofrer um processo de envelhecimento pelo contato com o ar e a água.

### 2.2.2. Agregados

De acordo com a ABNT NBR 9935/2011, que determina a terminologia dos agregados, o termo agregado é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassas e concreto. Segundo Bernucci *et al.* (2008), os agregados escolhidos para determinada utilização devem apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície do pavimento e também em seu interior. Deve-se garantir ainda que o material seja homogêneo e que haja intertravamento entre os grãos.

Os materiais pétreos utilizados como agregados na construção de pavimentos podem ser naturais, artificiais ou reciclados e devem ser caracterizados com relação à granulometria,

resistência à abrasão, densidade, absorção, sanidade, forma, angularidade e equivalente de areia (GENNESSEAUX, 2015).

Segundo Ceratti *et al.* (2015), existem diferentes alternativas de composição destes constituintes em misturas para revestimentos, entre as quais destacam-se:

- as misturas asfálticas de graduação densa e bem graduada, que por serem compostas por agregados de várias dimensões, os menores preenchem os vazios deixados pelos de maior dimensão, formando uma estrutura de alta resistência ao cisalhamento;
- as misturas asfálticas de graduação descontínua, que por terem uma porcentagem elevada de agregados de dimensão similar, formam um esqueleto de agregados com elevado volume de vazios entre si, onde é necessário preencher esse volume com um mástique formado por uma fração pequena de agregado miúdo, *filler* e asfalto;
- as misturas asfálticas de graduação aberta, similares às misturas asfálticas descontínuas, porém sem o preenchimento dos vazios entre os agregados.

A Figura 2 ilustra esses três tipos principais de distribuição granulométrica das misturas asfálticas.

Figura 2 - Ilustração dos três tipos de distribuição granulométrica das misturas asfálticas.



Fonte: CERATTI *et al.* (2015).

### 2.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A caracterização de materiais de pavimentação é sempre uma tarefa complexa em virtude da dependência das propriedades desses materiais a inúmeros fatores, sejam eles o meio ambiente, o estado de tensões a que estão submetidos, a magnitude, tempo de aplicação e frequência de cargas aplicadas etc. (BERNUCCI *et al.*, 2008)

Porém, para estes autores, a caracterização de misturas asfálticas recicladas é ainda mais complexa, devido ao envelhecimento oxidativo dos ligantes. Isso exige do pesquisador um balanço entre rigor e praticidade.

Atualmente, para avaliar o desempenho de misturas asfálticas, podem ser realizados ensaios mecânicos destrutivos, não destrutivos e empíricos (que correlacionam seus resultados de acordo com o desempenho em campo).

Bernucci *et al.* (2008) categoriza os ensaios em convencionais, de módulo, de ruptura, de deformação permanente e complementares. A Tabela 1 relaciona os ensaios discutidos neste trabalho de acordo com essa categorização.

Tabela 1 - Categorias de ensaios de caracterização mecânica.

<b>CONVENCIONAIS</b>	Estabilidade e Fluência Marshall
<b>DE MÓDULO</b>	Módulo de Resiliência (MR)
	Módulo Complexo (Módulo Dinâmico)
<b>DE RUPTURA</b>	Resistência à tração estática (indireta por compressão diametral) (RT)
	Vida de Fadiga (por compressão diametral ou flexão)
<b>DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE</b>	Compressão ou tração axial de carga repetida ( <i>Creep</i> Dinâmico)
	Afundamento de trilha de roda
<b>COMPLEMENTARES</b>	Desgaste Cântabro
	Suscetibilidade à umidade induzida (Lottman)

Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2008).

### 2.3.1. Estabilidade e Fluência Marshall

O ensaio de estabilidade e fluência Marshall, especificado pela norma DNER 043/1995 – ME, consiste na aplicação de uma carga de compressão sobre o corpo de prova cilíndrico regular. A temperatura de ensaio é de 60°C e a taxa de carregamento é de 5cm/minuto.

Neste ensaio, o corpo de prova recebe carga até o ponto onde ocorre a perda de estabilidade do material. A carga máxima correspondente a este ponto é denominada Estabilidade Marshall. O deslocamento vertical correspondente a este ponto é denominado Fluência Marshall.

A literatura aponta que os valores de fluência indicam a medida da flexibilidade da mistura asfáltica. Sendo assim, valores mais altos indicam uma mistura flexível, enquanto valores mais baixos indicam uma mistura seca e quebradiça.

### 2.3.2. Resistência à tração por compressão diametral (RT)

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, especificado pela norma DNIT 136/2018 – ME tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas.

O ensaio é realizado colocando-se o corpo de prova em uma prensa, de modo que ele se mantenha na posição, para então os pratos desta prensa aplicarem uma ligeira compressão ao longo do diâmetro. Segundo a norma DNIT 136/2018 – ME, aplica-se um deslocamento progressivamente a uma razão de 0,8mm por segundo, até que se dê a ruptura do corpo de prova segundo um plano diametral vertical.

No cálculo da RT, considera-se que a tensão de tração que rompe o corpo de prova é igual à tensão máxima admissível do material.

Segundo Aguilar (2016), a resistência à tração é uma característica que está diretamente atrelada à qualidade e durabilidade de pavimentos asfálticos. Ela está relacionada à capacidade do pavimento de suportar as solicitações de fadiga imposta pelas cargas aplicadas ao pavimento, as quais tendem a fissurar as superfícies das vias.

À medida que as misturas asfálticas envelhecem num pavimento, a RT aumenta, o que nem sempre representa vantagem, pois também perde sua flexibilidade, ou seja, aumenta seu módulo de resiliência (BERNUCCI *et al.*, 2008).

### 2.3.3. Módulo de Resiliência

No ensaio de Módulo de Resiliência (MR), que segue os procedimentos da norma DNIT 135/2018 – ME, uma tensão é aplicada repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico regular. Para a determinação do MR de misturas betuminosas, determina-se essa tensão de tração aplicada e a deformação específica recuperável correspondente à tensão aplicada.

Devido ao comportamento viscoelástico do ligante asfáltico, a resposta do revestimento é diferente, a depender do tipo do carregamento, sejam eles estáticos ou dinâmicos. Segundo Bernucci *et al.* (2008), mesmo quando se considera uma mesma magnitude para os dois tipos de carregamento, o material viscoelástico apresenta uma maior rigidez para carregamentos de aplicação por pulso de carga e menor rigidez para carregamentos mais longos, sendo o limite o carregamento estático.

Fatores como a frequência de aplicação e a temperatura também são de influência direta no comportamento das misturas. Ainda segundo os autores, para baixas temperaturas, a rigidez tende a aumentar, com redução da parcela viscosa. Com o aumento da temperatura, a rigidez tende a cair.

O valor de MR é definido então como a relação entre a tensão de tração e a deformação a uma dada temperatura (LIMA, 2003).

#### 2.3.4. Módulo Complexo/ Dinâmico

O ensaio de Módulo Complexo pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas do material. Este ensaio é preconizado pela norma DNIT 416/2019 - ME, e consiste na aplicação de um carregamento senoidal aplicado axialmente a um corpo de prova cilíndrico em determinadas temperaturas e frequências de carregamento. O módulo dinâmico é o valor absoluto do módulo complexo.

A tensão aplicada e a deformação axial recuperável medida são usadas para calcular o módulo dinâmico e o ângulo de fase.

#### 2.3.5. Vida de Fadiga

O ensaio de fadiga por compressão diametral (DNIT 183/2018 - ME) tem o objetivo de determinar o comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga sob um carregamento repetido, à tensão constante, usando o ensaio de compressão diametral de tração indireta.

Segundo Lima (2003), o fenômeno da fadiga foi descrito como sendo uma mudança estrutural permanente, localizada e progressiva em um material que é submetido a tensões repetidas, resultando em trincas que se desenvolvem até levar à fratura completa do material.

Bernucci *et al.* (2008) definem então que a vida de fadiga é definida em termos de vida de fratura e vida de serviço: a primeira é o número total de ciclos de aplicações de uma carga até a fratura completa da amostra; a segunda é o número total de aplicações, para essa mesma carga, que reduz a resistência inicial a um determinado nível pré-estabelecido.

Conforme a norma vigente, existem outros critérios de ruptura, mas desde a década de 1980, a prática corrente no País é realizar a ruptura completa do corpo de prova como critério de definição do número de ciclos correspondente a cada nível de carregamento aplicado.

#### 2.3.6. Desgaste Cântabro

A desagregação dos revestimentos asfálticos é um dos principais precursores das formações dos buracos e panelas pelo arrancamento progressivo dos agregados. Especificado pela norma DNER 383/1999 - ME, o ensaio é usualmente realizado para a determinação da resistência à desagregação de uma amostra.

No ensaio de Desgaste Cântabro, determinada amostra de mistura asfáltica é submetida ao aparelho de abrasão Los Angeles e em seguida é avaliada em termos de perda de massa. Segundo Bernucci *et al.* (2008), quanto menor a perda de massa, melhor será a resistência à desagregação do elemento pré-moldado.

Alguns autores apontam também que o resultado deste ensaio é um bom parâmetro para avaliar a coesão e adesividade de misturas asfálticas.

#### 2.3.7. Ensaio uniaxial de carga repetida (*Creep* Dinâmico)

O ensaio de *Creep* Dinâmico é regido pela norma DNIT 184/2018 – ME. Seu objetivo é determinar a deformação permanente de um corpo de prova cilíndrico de mistura asfáltica, resultante da aplicação de carregamento de compressão uniaxial vertical repetido.

Durante o ensaio a deformação plástica vertical uniaxial é acumulada e medida por sensores numa câmara controlada. A partir dos valores de deformação plástica vertical que o corpo de prova vai acumulando a cada ciclo de carregamento, determina-se o Flow Number.

O Flow Number é o número de ciclo correspondente ao ponto onde a taxa de deformação é mínima durante o ensaio uniaxial de carga repetida.

#### 2.3.8. Afundamento de trilha de roda

O afundamento de trilha de roda é a medida da deformação permanente no sulco formado nas trilhas de rodas de automóveis. Através de ensaios em laboratório, com equipamentos simuladores de tráfego, é possível correlacionar a deformação em trilha de roda com a deformação permanente, desde que conhecidas as condições ambientais e de tráfego. O equipamento alemão *Hamburg Wheel Tracking Devices* – HWTD e o equipamento francês *orniéreur* são os mais utilizados na determinação da deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas.

No Brasil, a norma DNIT 433/2021 – PRO estabelece os procedimentos para avaliação de defeitos naturais do pavimento através do percentual de área trincada e do afundamento de trilha de roda em campo, para trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão.

#### 2.3.9. Suscetibilidade à Umidade Induzida (Lottman)

No ensaio de suscetibilidade à umidade induzida, avalia-se o efeito da ação da água na resistência à tração indireta da mistura asfáltica. Considera-se o dano por umidade induzida a medida indireta da adesividade e coesão do par agregado-ligante asfáltico.

O ensaio é regido pela norma DNIT 180/2018 – ME, que especifica os termos da avaliação da resistência a tração gerada em um corpo de prova cilíndrico em duas condições de preparação, sendo uma antes e uma depois de um ciclo de absorção de água, congelamento e aquecimento.

O resultado do ensaio é dado em termos de resistência à tração retida (RRT) de uma mistura asfáltica. O dano é definido como a razão entre a resistência à tração por compressão diametral dos corpos de prova condicionados e não condicionados.

#### 2.4. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Souza (2009) destaca que a melhor aplicação do RAP, em termos de valor agregado, seria com sua destinação à usina, para ser misturado a outros materiais e gerar um novo pavimento. A Figura 3 ilustra uma amostra de material fresado.

Durante este processo, são reaproveitados os agregados e ligantes remanescentes do pavimento antigo, podendo ser acrescidos à nova mistura agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, CAP ou EAP (emulsão asfáltica de petróleo) novos, agregados novos e aglomerantes hidráulicos, a depender da necessidade.

Figura 3 - Amostra de resíduo fresado obtido de fresagem de trecho da BR-230.



Fonte: O autor (2021).

Gennesseaux (2015) afirma que o processo de reciclagem de materiais para pavimentação surgiu devido à necessidade ambiental no que diz respeito à economia de recursos naturais (agregados), aos espaços físicos (descargas), ao desperdício de energia e à redução da emissão de gases de efeito estufa. Isso, unido a uma necessidade cada vez maior de reabilitação de pavimentos envelhecidos e deteriorados, acabou por levar o próprio pavimento ao status de fonte alternativa de matéria prima.

Para o DNIT (2006), a reutilização dos agregados do pavimento degradado para os serviços de reciclagem propicia uma diminuição da demanda de novos materiais e das

respectivas distâncias de transporte. Segundo o órgão, isso é particularmente benéfico, devido às restrições impostas pela legislação de proteção ao meio ambiente e pela crescente valorização dos sítios de ocorrência de jazidas.

Ainda quanto à redução de demanda de matéria prima, com a reciclagem do pavimento envelhecido pode ser reduzida a quantidade de ligante novo para a restauração do pavimento. Conforme o DNIT (2006), a reciclagem dos materiais de um revestimento de CBUQ poderá necessitar de cerca de 1 a 3% de CAP adicional para fabricação da nova mistura, enquanto que numa mistura com materiais virgens é requerido cerca de 6% de CAP, o que representa uma redução significativa, e que resultará num benefício econômico apreciável.

## 2.5. MÉTODOS DE RECICLAGEM COM RAP

Ao combinar diversos fatores como a localização dos trabalhos, o ligante utilizado e a temperatura de fabrico, surge uma extensa lista de diferentes métodos passíveis de serem aplicados na reabilitação da estrada com a reciclagem do pavimento envelhecido (ESTEVES, 2014).

Os métodos podem ser caracterizados pelo local de produção da nova mistura (em usina ou “*in situ*”), pela temperatura que a mistura é produzida (a quente, a frio ou mornas), pelas propriedades do asfalto a reciclar e pelo tipo de asfalto utilizado.

ARRA (2001), define cinco categorias para descrever os métodos de reciclagem de asfalto, que são: reciclagem a quente em usina, reciclagem a quente “*in situ*”, reciclagem a frio em usina, reciclagem a frio “*in situ*” e reciclagem profunda.

Segundo o DNIT (2006), o concreto asfáltico reciclado a quente em usina é a mistura realizada em central com características específicas, em que o material outrora fresado de um revestimento asfáltico com adição de novos agregados, ligantes ou agentes rejuvenescedores, produzem uma mistura reciclada

## 2.6. LIMITAÇÕES PARA O USO DO RAP EM NOVAS MISTURAS ASFÁLTICAS

No Brasil, a grande maioria das entidades públicas e empresas ainda não fazem uso expressivo do RAP. No melhor dos casos é subutilizado na estabilização de camadas de base ou sub-base. (CANCHANYA, 2017).

Gaspar (2019), no entanto, explica que a forma de reciclagem de maior potencial ambiental e econômico se dá quando o RAP é inserido na camada de revestimento, substituindo materiais de alto valor agregado, como por exemplo o ligante asfáltico e os agregados. Para Lima (2003) a reciclagem de pavimentos asfálticos apresenta-se como uma exigência,



principalmente em termos de consciência ambiental, além de trazer repercussões econômicas e sociais.

São muitos os benefícios da reciclagem de pavimentos com RAP. No entanto, existem fatores e questões técnicas que dificultam ou reduzem o uso desse material em novas misturas recicladas. Segundo Zhao *et al.* (2012), apesar dos intensos estudos por força dos fatores econômicos e ambientais, os departamentos de transporte ainda enfrentam o desafio de como utilizar a reciclagem com RAP mantendo um pavimento de alta qualidade e com bom desempenho quanto à sua infraestrutura.

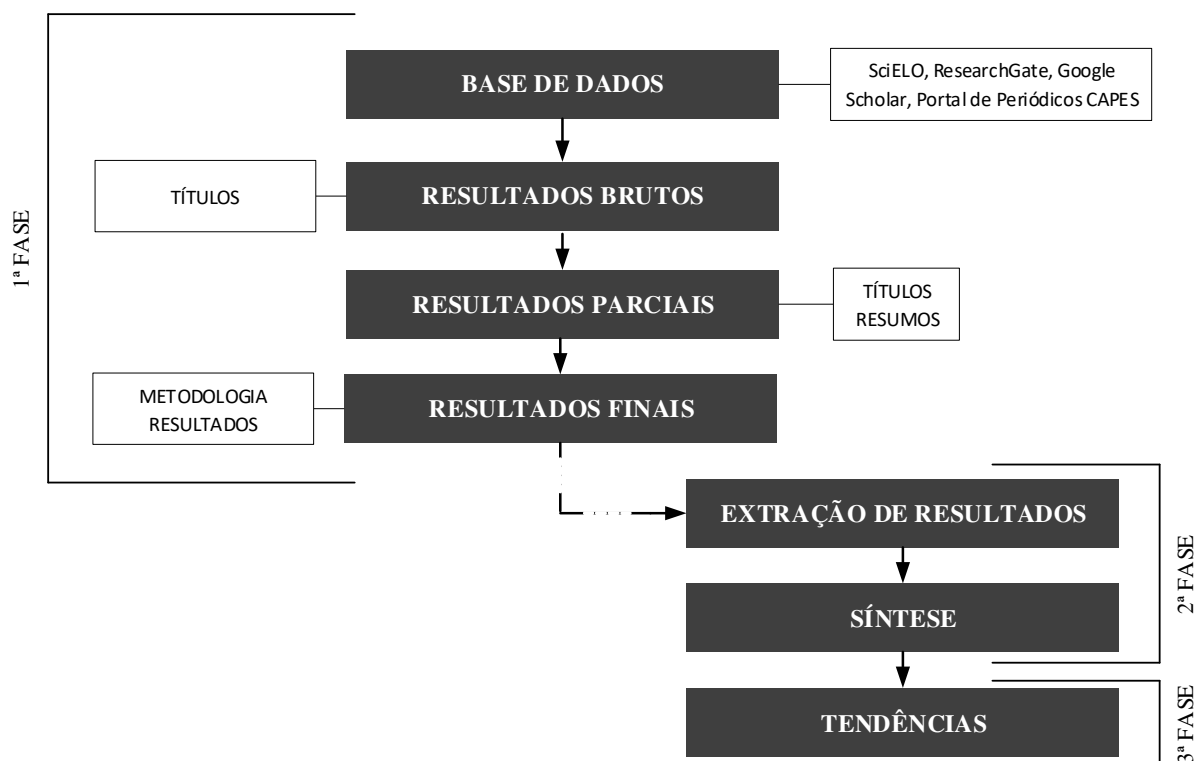
Zaumanis e Mallick (2015) apontam algumas das limitações para o uso do RAP. Entre as mais importantes, estão: as propriedades do ligante envelhecido, que podem afetar diretamente a rigidez da mistura, o que refletirá diretamente no comportamento mecânico da mistura; o grau de ativação do ligante envelhecido e a qualidade da mistura que ocorre entre os ligantes virgem e envelhecido; e as propriedades do RAP, especialmente dos seus finos. Somam-se a estes fatores a variabilidade de materiais fresados (devido a diferenças entre ligantes e origem de agregados); a desconfiança e o desconhecimento quanto ao desempenho mecânico final de misturas recicladas, principalmente as que tem altas quantidades de RAP; e a complexidade dos projetos de dosagem de misturas para a incorporação do fresado, entre outros.

### 3 METODOLOGIA

Este estudo integra uma revisão de caráter exploratório, por meio do levantamento de dados quantitativos e qualitativos sobre os efeitos da incorporação de RAP nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas, encontrados em artigos, teses e dissertações nacionais ou internacionais

As etapas metodológicas deste estudo estão mostradas no fluxograma da Figura 4.

Figura 4 - Fluxo metodológico.



Fonte: O autor (2021).

- Primeira fase: Coleta de dados

A primeira fase consistiu-se em uma busca por periódicos nacionais e internacionais que abordassem o estudo de propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas.

O levantamento das publicações seguiu o método de revisão sistemática de literatura, utilizado para avaliar e sintetizar resultados e conclusões de artigos, teses e dissertações nacionais ou internacionais.

A coleta de artigos, teses, dissertações e livros foi realizada no período de setembro a outubro de 2021, e para identificar os artigos acerca do assunto, realizou-se busca nas bases de periódicos *ResearchGate*, *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Portal de Periódicos

da CAPES e Google Scholar. As buscas foram realizadas sem limitação de idioma. Foram utilizadas palavras-chave como: ‘misturas asfálticas + RAP’, ‘misturas asfálticas recicladas + propriedades mecânicas’ e ‘comportamento mecânico + misturas recicladas’.

Após a consulta às bases de dados, procedeu-se com a seleção dos estudos que eram condizentes com a abordagem e objetivo deste trabalho, feita por meio da leitura de seus títulos e resumos. Nos casos em que a leitura do resumo não foi suficiente para estabelecer o vínculo do mesmo com esta pesquisa, este foi lido na íntegra para determinar sua elegibilidade. Para este trabalho, optou-se por dar preferência aos estudos sobre o tema publicados nos últimos vinte anos.

O trabalho de busca resultou na seleção de 110 estudos com referências à área abrangida neste trabalho. Com o refinamento da seleção, foram removidas as duplicatas e separados os estudos com abordagem quantitativa dos de abordagem qualitativa, resultando em 48 estudos com referência direta ao estudo das características mecânicas de misturas asfálticas. Dentre esses, 9 foram classificados como de ordem qualitativa e 39 como de ordem quantitativa, dos quais 37 abordavam misturas recicladas mornas e quentes e 2 abordavam misturas recicladas a frio.

Ainda nesta fase, os estudos escolhidos foram filtrados pelo tipo de abordagem realizada: se primários, realizados a partir de ensaios laboratoriais próprios, ou secundários, realizados a partir dos resultados de outros pesquisadores. Para este trabalho, optou-se por fazer a coleta de resultados somente dos estudos que abordaram a caracterização mecânica de misturas recicladas mornas e quentes.

- Segunda fase: Organização dos dados

Na segunda fase da pesquisa foi realizada a obtenção das principais informações relacionadas aos procedimentos laboratoriais dos ensaios mecânicos adotados nos estudos escolhidos na primeira fase.

Para sintetizar e obter uma melhor visualização dos estudos de abordagem quantitativa que tiveram seus resultados numéricos extraídos e avaliados, foi elaborada a Tabela 2, que contém as principais informações a respeito dos ensaios de caracterização mecânica realizados e das misturas por eles estudados: referência aos autores dos estudos escolhidos, propriedades mecânicas investigadas, teor de RAP (em massa total) empregado nas misturas asfálticas recicladas, tipo de compactação adotada, presença de aditivos ou modificadores, tipo de aditivo e tipo de mistura em relação à temperatura de usinagem e compactação.

Com base nessas informações, iniciou-se a coleta dos resultados dos ensaios mecânicos realizados em cada um dos estudos, bem como a análise das discussões de cada autor sobre o comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas avaliadas.

Para fins de comparação, foi elaborada também a Tabela 3, com as especificações técnicas, limites e alguns valores típicos encontrados na literatura estudada, a respeito dos ensaios de caracterização mecânica. As informações de limites de especificações contidas na Tabela 3 foram utilizadas no estudo de tendências para avaliar os resultados

Os valores dos ensaios mecânicos avaliados em cada estudo, após a padronização de unidades, foram organizados em tabelas em função do teor de RAP da mistura ensaiada, desconsiderando as demais variáveis. Devido à quantidade de dados encontrados, julgou-se necessária a aplicação da estatística descritiva para sintetizar os dados e facilitar as avaliações da etapa seguinte.

- Terceira fase: Estudo de tendências

De posse destes resultados, procedeu-se com a etapa final, na qual foram compilados os resultados e conclusões encontrados na literatura.

Nesta etapa foi realizado um estudo de tendências, que contou com a plotagem de todos os resultados em gráficos de dispersão, gerando, para cada propriedade investigada, uma nuvem de dados de resultados em função do teor de RAP das misturas. Também foram plotadas curvas de tendência no intuito de verificar comportamentos comuns quando essa modificação no teor de RAP acontece.

Tabela 2 - Tabela-resumo dos estudos de abordagem quantitativa. (continua na página seguinte)

REFERÊNCIA	PROPRIEDADES INVESTIGADAS								TEOR RAP (%)	COMPACTAÇÃO	ADITIVOS OU MODIFICADORES	TIPO DE ADITIVO	TIPO (MORNA OU QUENTE)
	ESTABILIDADE/ FLUÊNCIA	MÓDULO DE RESILIÊNCIA	MÓDULO COMPLEXO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	VIDA DE FADIGA	CREEP DINÂMICO	DESGASTE CÂNTABRO	DUI/ LOTTMAN					
<b>Aguilar (2016)</b>		x		x			x		100	Marshall			A quente
<b>Balbo e Bodi (2004)</b>		x		x					100	Marshall			A quente
<b>Bohn (2017)</b>		x	x	x		x	x	x	25 e 50	SUPERPAVE	x	Químico (Evotherm M1)	A quente/ Morna
<b>Bordin (2017)</b>			x			x			100	SUPERPAVE			A quente/ Morna
<b>Canchanya (2017)</b>			x		x			x	20	Marshall			A quente
<b>Centofante <i>et al.</i> (2018)</b>		x	x	x		x	x	x	0, 10, 20 e 30	SUPERPAVE			A quente
<b>Cerdeira (2018)</b>	x	x		x					100	Marshall	x	Químico (Evotherm P25/AR extrato NPA)	A quente
<b>Cunha (2014)</b>	x			x					50 e 100	Marshall			A quente
<b>Dai (2016)</b>		x	x	x	x			x	25, 50 e 75	SUPERPAVE	x	Químico (Evotherm/ Sylvaroad)	Morna
<b>Dai Lu e Saleh (2016)</b>			x		x	x		x	25, 50 e 70	SUPERPAVE	x	Químico (Evotherm)	A quente/ Morna
<b>Genesseeaux (2015)</b>			x		x			x	50	Mesa compactadora francesa	x	Químico (CECABASE RT)	A quente/ Morna
<b>González-León <i>et al.</i> (2014)</b>			x		x				30 e 50	Mesa compactadora francesa	x	Químico (CBRT1 e CBRT2 e CBRT3)	A quente/ Morna
<b>Hill (2011)</b>								x	0 e 45	SUPERPAVE	x	Orgânico/ Químico (Sasobit, Advera e Evotherm M1)	A quente/ Morna
<b>Huang <i>et al.</i> (2011)</b>		x		x	x				0, 10, 20 e 30	SUPERPAVE/ Marshall			A quente
<b>Khan <i>et al.</i> (2021)</b>	x		x		x			x	0, 30, 50, 70 e 100	Marshall	x	Químico ou Mineral (óleo queimado de automóvel)	A quente

<b>Li et al (2021)</b>		x					x	40	Marshall	x	Orgânico (extratos aromáticos)	A quente
<b>Lima (2003)</b>		x		x	x			0, 10, 30 e 50	Marshall	x	Químico (AR-75, AR-250, AR-500)	A quente
<b>Miró et al. (2011)</b>			x		x		x	0, 15, 30 e 50	?			A quente
<b>Nascimento (2011)</b>	x	x		x			x	5, 10, 15, 20, 25 e 30	SUPERPAVE/ Marshall			A quente
<b>Oliveira (2013)</b>		x		x	x	x		15, 35 e 50	SUPERPAVE/ Marshall	x	Químico (Gemul XT-14)	A quente/ Morna
<b>Oliveira et al. (2010)</b>	x							5, 10, 15 e 20	Marshall			A quente
<b>Pham et al. (2020)</b>					x			0, 30 e 50	Mesa compactadora francesa	x	Químico	A quente/ Morna
<b>Podolsky et al. (2020)</b>			x				x	30	SUPERPAVE	x	Orgânico (EMS [óleo de soja])	A quente
<b>Putman e Xiao (2012)</b>		x		x			x	0, 20, 30, 40 e 50	SUPERPAVE	x	Químico (Evotherm)	A quente/ Morna
<b>Reis (2013)</b>	x	x		x			x	100	Marshall			A quente
<b>Sánchez-Alonso et al. (2020)</b>	x							10, 20 e 30	SUPERPAVE/ Marshall	x	Míneral (Zeólita)	Morna
<b>Santana (2009)</b>	x	x		x			x	0, 10, 30, 50, 75 e 100	Marshall			A quente
<b>Segundo et al. (2016)</b>		x		x			x	75 e 100	SUPERPAVE			A quente
<b>Siqueira (2021)</b>		x		x	x		x	50	Marshall			A quente
<b>Sotoodeh-Nia et al. (2019)</b>			x					50	SUPERPAVE	x	Orgânico (BM-1/EMS)	A quente
<b>Suzuki (2019)</b>		x	x	x	x	x	x	0, 10, 20, 25, 35, 50 e 65	Marshall	x	Orgânico (Anova 1815) (óleo vegetal)	A quente
<b>Tobias (2014)</b>	x			x				25, 37 e 50	Marshall			A quente
<b>Torres (2020)</b>		x	x	x		x	x	0, 30 e 60	SUPERPAVE	x	Orgânico (óleo vegetal residual)	A quente
<b>Valdés et al. (2011)</b>	x	x		x	x			40 e 60	Marshall			A quente
<b>Vasconcelos (2003) apud Nascimento (2011)</b>		x		x				0, 10 e 50	Marshall			A quente
<b>Zhao et al. (2013)</b>		x			x	x	x	0, 15, 20, 30, 35 e 40	SUPERPAVE	x	Químico (Evotherm)	A quente/ Morna
<b>Zubaran (2014)</b>		x		x	x	x	x	0, 30 e 50	SUPERPAVE	x	Químico (AR-75)	A quente

Fonte: O autor (2021).

Tabela 3 - Ensaio mecânicos e suas especificações.

ENSAIOS	ESPECIFICAÇÕES NACIONAIS	ESPECIFICAÇÕES ESTRANGEIRAS	LIMITES MIST. CONVENCIONAIS	VALORES TÍPICOS CONVENCIONAIS
ESTABILIDADE MARSHALL	DNER 043/1995 - ME	-	Mínimo 500 kgf para camada de rolamento (DNIT 031/2006 - ES)	Cerca de 1400 Kgf (CERDEIRA, 2018)
MÓDULO DE RESILIÊNCIA	DNIT 135/2018 - ME; DNIT 133/1994 - ME	-	-	2.000 a 8.000 MPa a 25°C (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2008)
MÓDULO COMPLEXO/ DINÂMICO	DNIT 416/2019 - ME	AASHTO T342-11; AASHTO TP 79/2016; ASTM D3497-79/2003; EN 12697-26	Para o tipo de material utilizado na reciclagem 7000 MPa a 15°C, 10Hz (EN 13108-1)	-
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA)	DNIT 136/2018 - ME; DNER 138/1994 - ME	-	Mínimo de 0,65 MPa (DNIT 031/2006 - ES); Para misturas com asfalto modificado por polímero valor entre e 0,7 a 1,2 MPa (DNER 385/1999 - ES)	Entre 0,5 e 2,0 Mpa (BERNUCCI <i>et al.</i> , 2006) Por volta de 1,20 MPa (CERDEIRA, 2018)
VIDA DE FADIGA (COMPRESSÃO DIAMETRAL, FLEXÃO)	DNIT 183/2018 - ME	AASHTO T321/2017; EN 12697-24	-	-
CREEP DINÂMICO	DNIT 184/2018 - ME	-	Para tráfego médio: FN>300 ciclos; para tráfego pesado o valor mínimo exigido é de 750 ciclos (NASCIMENTO, 2008).	-
AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODA	-	EN 12697-22:2008+A1	10% para rodovias de tráfego pesado (EN 12697-22+A1)	-
DESGASTE CÂNTABRO	DNER 383/1999 - ME; ABNT NBR 15140	-	Máximo de 20% (DNIT 031/2006 ES)	Cerca de 5,91% (CERDEIRA, 2018)
SUSCETIBILIDADE À UMIDADE INDUZIDA (LOTTMAN)	ABNT NBR 15617/2015; DNIT 180/2018 - ME	AASHTO T 283; EN 12697-12	Mínimo de 80% pela metodologia SUPERPAVE; Mínimo de 70% (DNIT 031/2006 - ES)	-

Fonte: O autor (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. ANÁLISE QUALITATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

A partir da revisão bibliográfica, com base nas informações encontradas em todos os artigos analisados e em seus resultados e conclusões, procedeu-se com a descrição dos fenômenos comportamentais mecânico frente a alteração do teor de RAP incorporado nas misturas recicladas.

Na abordagem qualitativa deste trabalho, serão discutidos os resultados referentes ao desempenho mecânico de misturas recicladas com RAP, que foram compilados e agrupados conforme a característica mecânica investigada.

#### 4.1.1. Estabilidade e Fluência Marshall

Observou-se que em todos os estudos, as misturas recicladas com RAP atenderam ao mínimo preconizado na normativa DNIT 031/2006 – ES, para este parâmetro. Foi o caso das misturas de Cerdeira (2018) e Nascimento (2011). Ambos os autores observaram que os valores elevados de Estabilidade Marshall indicam que é possível a utilização de RAP em misturas asfálticas em qualquer das percentagens por eles estudadas (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 100%).

Nascimento (2011) verificou que há uma tendência de crescimento dos valores de Estabilidade Marshall até determinado ponto, e em seguida, há uma tendência de decréscimo do valor. Santana (2009) também observou esse comportamento em seus experimentos, especialmente nas misturas recicladas onde houve, além da incorporação de RAP, a adição de um *filler* de Cal Hidratada.

Este comportamento foi justificado pelo maior volume de vazios conforme há o aumento do teor de RAP. Como o fresado apresenta uma quantidade menor de finos e uma presença significativa de grumos, o aumento de suas proporções ocasiona a elevação do volume de vazios dessas misturas. Quando houve inserção do *filler*, o teor de RAP do maior valor obtido para Estabilidade Marshall, saiu de 20% de RAP incorporado, verificado por Nascimento (2011), para valores entre 50% e 75% de RAP na mistura, conforme estudos de Santana (2009), o que corroborou com a justificativa.

Cerdeira (2018), em seu estudo, verifica que a adição de um agente rejuvenescedor consegue contrabalançar o ligante endurecido do fresado, o que diminui a rigidez da mistura.



Domingues e Balbo (2006) notaram diminuição dos parâmetros mecânicos das misturas estudadas quando da adição de um AR.

Essas alterações de comportamento causadas pela adição de um AR refletem na diminuição da consistência das misturas. O mesmo comportamento foi verificado quando da adição de modificadores ou aditivos surfactantes. Os estudos de Cerdeira (2018) e Khan *et al.* (2021) apontaram a melhora da trabalhabilidade da mistura, bem como dos valores de estabilidade e fluência, após a adição de pó de borracha triturada como modificador. O estudo de Khan *et al.* (2021) também verificou melhoras na estabilidade de misturas em que foi utilizado óleo queimado de automóveis como AR.

#### 4.1.2. Módulo de Resiliência

Os ensaios de Módulo de Resiliência analisados mostraram comportamento similar ao de estabilidade em razão da elevada rigidez do ligante envelhecido do material fresado. Com o aumento gradativo do teor de RAP, em todas as temperaturas estudadas, o valor do resultado deste ensaio também apresentou tendência de crescimento, apesar dos resultados apresentarem maior variação para misturas com maior quantidade de RAP.

Centofante *et al.* (2018), Lima (2003), Reis (2013) e Santana (2009) também verificaram o aumento da rigidez ao passo em que uma quantidade maior de RAP é inserida na mistura. Os resultados obtidos por Cerdeira (2018) e Oliveira (2013), mostram que quando comparados com valores de misturas convencionais de referência sem RAP, como, por exemplo, os encontrados no estudo de Aguilar (2016), os valores de MR de misturas recicladas a quente e mornas foram sempre superiores aos valores das misturas de referência.

Bohn (2017) aponta que isso acontece de forma semelhante para ligantes convencionais e ligantes modificados por polímero, apesar de haver um aumento dos valores de MR nas misturas com CAP 60/85 em relação as com CAP 50/70, especialmente em temperaturas mais baixas. O autor argumenta que isso se deve a maior capacidade do ligante modificado em proporcionar às misturas recicladas a capacidade de se deformar e retornar as condições iniciais, apresentando maiores valores de MR em relação ao ligante convencional.

Bohn (2017) verificou, na temperatura de 25°C, comportamento semelhante, porém sem hegemonia do ligante modificado sobre o convencional. Quanto a rigidez, o mesmo resultado: quanto maior o teor de RAP, mais rígida a mistura asfáltica reciclada. Estes resultados levaram o autor a verificar que a taxa do acréscimo do MR vai decrescendo conforme a temperatura de ensaio aumenta. O autor verificou também que à medida em que se aumenta a temperatura de ensaio e reduz-se a frequência de carregamento, ocorre um acréscimo da

deformabilidade das misturas. O autor aponta que esse comportamento acontece devido às misturas asfálticas serem altamente dependentes da temperatura e da frequência de carregamento a elas aplicado.

Cerdeira (2018) apontou que em misturas asfálticas recicladas com adição de um agente rejuvenescedor, as características mecânicas também foram moderadamente afetadas, com redução de aproximadamente 20% dos valores de MR. Torres (2020) também verificou decréscimo nos valores de MR a partir do uso de óleo vegetal residual como AR. Essa redução não é de todo negativa pois espera-se que o AR, de fato, corrobore com a redução do grau de rigidez, melhorando o desempenho da mistura. O cuidado maior a ser tomado se deve para evitar a condição de redução do MR devido a formação de camada dupla, ou seja, a efetiva mistura do ligante novo e do envelhecido com o agente rejuvenescedor não ter ocorrido por problemas no controle da temperatura de produção da mistura. (ZAUMANIS e MALLICK, 2015; DOMINGUES e BALBO, 2006; GENNEESSEAU, 2015)

O comportamento enrijecido de misturas recicladas com utilização de RAP é consequência da quantidade significativa de moléculas de asfaltenos presente no ligante envelhecido. A inutilização de um agente rejuvenescedor inibe o revigoramento da fração de maltenos, as quais tendem a diminuir o módulo de resiliência do material (BARROS, 2020; SUZUKI, 2019; TORRES, 2020).

Quanto às temperaturas de mistura e compactação, Bohn (2017) verificou que com os valores obtidos na pesquisa foi possível frisar que as misturas mornas trabalham de forma semelhante às misturas quentes. Os valores obtidos pelo autor não ficam aquém dos encontrados na literatura descritos por autores que trabalharam com reciclagem a quente. Torres (2020) apontou redução das temperaturas de usinagem e compactação a partir do uso de óleo de soja residual como agente rejuvenescedor. Huang et al. (2011) apontaram também que misturas submetidas ao envelhecimento de longo prazo apresentaram valores de MR mais elevados do que as misturas envelhecidas a curto prazo.

Foi observado por Nascimento (2011) que os valores de MR variaram também com o tipo de compactação adotado, o que pode se atribuir às diferenças de estruturas do esqueleto mineral, que diferem de uma compactação para outra. Segundo a autora, para a compactação Marshall não foi possível estabelecer uma correlação entre o Módulo de Resiliência e a Resistência à Tração, provavelmente pelo mecanismo de compactação que não é uniforme, sendo muito influenciada por fatores externos.

Para Bernucci *et. al.* (2008), as misturas asfálticas que apresentam módulo de resiliência elevado, de 12.000 a 20.000 Mpa, caracterizam a estrutura do pavimento como um

pavimento semirrígido em relação a sua deformabilidade. Sabe-se que quanto mais rígido for o material maior a capacidade de reter esforços em si mesmo, portanto, o concreto asfáltico com alto módulo de resiliência indica alta rigidez, absorvendo elevadas tensões que poderão causar o trincamento prematuro da estrutura. (NASCIMENTO, 2011) Porém, segundo Bohn (2017), essas misturas com alto módulo de resiliência não precisam necessariamente ser aplicadas como revestimento asfáltico, mas também podem ser utilizadas como uma base negra, por exemplo, desde que se adeque ao projeto estrutural do pavimento.

#### 4.1.3. Módulo Complexo/ Dinâmico

Segundo revisão da literatura, geralmente a adição de fresado aumenta a rigidez de uma mistura, onde o comportamento é determinado principalmente pelo ligante asfáltico.

Bohn (2017) demonstrou a influência das características do ligante envelhecido presente no RAP no valor do Módulo Dinâmico das misturas recicladas. O autor explica que o aumento do valor pode ser explicado também pela heterogeneidade do material reciclado. Genesseeaux (2015) repete a observação.

Outros autores obtiveram resultados que apontam o contrário. Centofante et al. (2018) encontraram inversão na ordem nas misturas asfálticas recicladas, onde misturas com menos RAP apresentaram maior rigidez que as com mais RAP, o que pode ser resultado de diferentes disposições de agregados entre as amostras ensaiadas. Conclusões semelhantes às feitas por outros investigadores, atestando a dispersão de dados obtidos para misturas com RAP.

Suzuki (2009) sugere que maiores valores de rigidez podem favorecer a resistência à deformações permanentes em altas temperaturas (ou baixas taxas de carregamento); de outro modo, valores menores de rigidez poderiam favorecer a resistência à fadiga em temperaturas intermediárias e a resistência ao trincamento térmico em temperaturas baixas.

Quanto ao teor de fresado, não se pôde encontrar um comportamento que seja equivalente para todas as misturas, mas existe um visível aumento na parcela elástica quando utilizado o material reciclado em conjunto com um ligante modificado por polímero. Canchanya (2017) salienta que à medida que se aumenta a temperatura, o módulo complexo da mistura torna-se mais suscetível à variação da frequência de carregamento. Para estes casos, o autor observou que o aumento da frequência de carregamento induziu a ângulos de fase maiores. Observando-se as curvas isócronas dos ensaios avaliados, nota-se a redução do módulo complexo com o aumento da temperatura de ensaio.

Suzuki (2019) observa também que a adição de agentes rejuvenescedores reduziu a rigidez de misturas com altos teores de RAP, aproximando o comportamento das curvas mestras destas misturas com as curvas mestras de misturas convencionais sem RAP.

De maneira geral, como observado por Bohn (2017), misturas com ligante modificado exibiram uma maior elasticidade e resistência à deformação permanente. Misturas mornas e quentes comportaram-se de maneira equivalente. O autor mostra também que misturas com ligante modificado apresentaram um menor comportamento viscoso irreversível que misturas com ligante convencional, ou seja, ao se deformar retornam ao seu estado original com maior facilidade. Isso mostra que nas misturas com ligante convencional o esqueleto mineral é mais solicitado e, portanto, ocorre uma maior dissipação de energia por atrito interno, o que representa uma situação considerada de maior severidade. O autor é corroborado pelos estudos de Almeida Jr. (2016) e Bruxel (2015).

#### 4.1.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Quanto aos ensaios de Resistência à Tração, observou-se que à medida em que existe um incremento da taxa de RAP nas misturas, houve também um aumento nos valores de resistência. Tendo em vista que maiores quantidades de fresado apresentam maiores proporções de ligante envelhecido e de maior rigidez, esse seria um comportamento esperado. Essa característica favorece o aumento nos valores de RT e MR. Bohn (2017), Centofante *et al.* (2018), Huang *et al.* (2011), Lima (2003) e Suzuki (2019) pontuam as mesmas observações.

Os estudos de Aguilar (2016), Balbo *et al.* (2006) e Oliveira (2013) corroboram com essa afirmação, apontando que o aumento no teor de fresado aumenta a quantidade de ligante envelhecido em relação à quantidade de ligante virgem. Essa relação favorece a tendência relatada.

Apesar disso, Bohn (2017) alertam que em relação ao teor total de ligante da mistura (virgem + ligante RAP) não há uma regra que esclareça um aumento ou diminuição dos valores de RT de acordo com um acréscimo ou decréscimo do teor total. Os autores recomendam ainda que à medida que se aumenta o teor de fresado nas misturas, reduza-se o teor de ligante virgem adicionado.

Nascimento (2011) salienta que apesar da tendência de crescimento da resistência a tração com o incremento de RAP, semelhante ao que acontece para a estabilidade, há um teor de pico onde a resistência tende a cair. Suzuki (2009) obteve resultados similares. A autora argumenta que este fato se deve a pouca quantidade de finos do fresado e aos grumos formados

pelos agregados e ligante, então a maior proporção de RAP torna as misturas menos densas com valores de resistências à tração também menores.

Cunha et al. (2018) apontou que as misturas com maior composição de finos apresentam valores de RT significativamente superiores às com maior composição de grossos, semelhante ao verificado por Esteves (2014) e Kuchiishi *et al.* (2017). Esse comportamento pode ser esperado devido à maior superfície específica dos finos, o que pode melhorar a adesão do ligante aos agregados.

Reis (2013) atribuiu melhores valores de RT à recomposição dos finos com a adição de um *filler*. Lima (2003) obteve resultados semelhantes, porém verificou que apesar do comportamento positivo, quando utilizados materiais diferentes, algumas variações de comportamento foram observadas. Entre os materiais testados, a adição de pó calcáreo rendeu maiores resistências à tração que quando utilizados cimento Portland e pó-de-pedra.

Ainda assim, em praticamente todos os estudos que compararam os valores de RT entre misturas recicladas e misturas convencionais de referência, resguardadas as diferenças de agregados e tecnologias entre elas, os resultados de resistência das misturas recicladas foram superiores às de referência, demonstrando elevada rigidez.

Bohn (2017) observa ainda que o comportamento se estende para além das misturas confeccionadas com ligantes convencionais. Em seus estudos, misturas confeccionadas com ligante modificado por polímero, como o CAP 60/85, tiveram comportamento semelhante. Cerdeira (2018) validou também o potencial do Agente Rejuvenecedor em repor as propriedades originais do ligante envelhecido. Em seu estudo, verificou que a presença do AR diminuiu o grau de rigidez da mistura reciclada.

A mesma tendência de comportamento foi observada por Oliveira (2013) em relação a misturas convencionais recicladas a quente e mornas. Os resultados dos ensaios de RT para ambas as misturas apresentaram pequena diferença entre eles. Dessa forma, o autor comprova que apesar da diminuição da temperatura de mistura e compactação, as propriedades de resistência sofreram pouca influência.

Nascimento (2011) apontou também que os valores de RT de misturas recicladas compactadas pela metodologia SUPERPAVE foram sempre superiores às compactadas no sistema Marshall.

#### 4.1.5. Vida de Fadiga

Em Huang *et al.* (2011), os resultados dos ciclos de carregamento até a falha com base em uma recuperação de 50% redução da rigidez inicial sugeriram que a inclusão de RAP

geralmente estava aumentando a resistência à fadiga da mistura de misturas recicladas mornas, especialmente para misturas com utilização de ligante modificado. Misturas a quente apresentavam melhores resultados em relação às mornas.

Apesar disso outros estudos observam que misturas com elevada rigidez são mais propensas ao desenvolvimento de trincamento por fadiga. Foi o caso de Siqueira (2021) que apontou que o percentual incorporado de fresado estava impactando negativamente na vida de fadiga das misturas por ele avaliadas.

Canchanya (2017) afirma que em seu estudo o melhor desempenho à fadiga foi demonstrado pela mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, o que se deve à predominância da componente elástica do módulo complexo durante o ensaio de vida de fadiga e, portanto, à menor dissipação de energia por ciclo de carregamento. Para este caso, os valores mostraram-se melhores que os resultados de referência obtidos por Melo (2014).

Quanto menor for o ângulo de fase observado para um corpo de prova de concreto asfáltico, maior será a dominância da componente elástica sobre a componente viscosa, e isto aumenta a vida de fadiga. (CANCHANYA, 2017)

Genesseaux (2015) observa que misturas mornas tem sempre menor resistência à fadiga em comparação com misturas a quente, independentemente do nível de condicionamento ou do fato da mistura ser ou não reciclada. Verifica ainda que em misturas que não passaram por um condicionamento para simular um envelhecimento de curto prazo, a presença de RAP melhora a vida de fadiga.

Khan et al. (2021) verificaram que a vida de fadiga de misturas com alto teor de RAP incorporados é fortemente influenciada pela qualidade da mistura entre os ligantes virgem e envelhecidos e, portanto, é positiva a adição de um agente rejuvenescedor entre eles. Este fato foi evidenciado por Lima (2003).

#### 4.1.6. Flow Number

Quanto a influência do teor de fresado nas misturas, Bohn (2017) afirma que o incremento de RAP, além de grande economia no valor final dos pavimentos, tem proporcionado um ganho valioso de resistência à deformação permanente.

Para misturas asfálticas recicladas com ligante comum e modificado, ficou evidente o incremento do valor de FN a medida em que se aumentava a proporção de fresado, especialmente com o CAP 60/85, modificado, mostrando a sua superioridade em relação ao 50/70. Centofante *et al.* (2018) obtiveram também resultados semelhantes. Em concordância

com esses estudos, Suzuki (2009) notou nítida diferença de comportamento entre misturas com baixos e altos teores de RAP.

De outro modo, os resultados de Oliveira (2013) não demonstram a tendência observada pelos autores citados. Oliveira (2013) afirma que não obteve valores expressivos de FN, de modo que também não constatou o aumento da resistência à deformação permanente com o aumento do teor de RAP.

Bohn (2017) acredita que a comparação de misturas recicladas em relação a FN fica restringida devido à falta de maiores referências de misturas asfálticas com o uso de RAP. Ainda assim, observa que o teor total de ligante influencia diretamente nessa propriedade: quanto maior o teor total, maior a espessura do filme asfáltico em torno do agregado, o que provoca uma redução no atrito entre os grãos, especialmente em temperaturas mais elevadas, o que aumenta a mobilidade das partículas e lubrifica com maior intensidade o contato agregado-agregado.

O autor também percebeu que a quantidade de ligante envelhecido em relação à adição de ligante virgem também afeta diretamente esse parâmetro: o FN aumenta à medida em que o teor de ligante aumenta e conseqüentemente diminui com a adição de ligante novo. Fato já conhecido e esperado, devido à elevação da resistência a deformação proporcionada pela rigidez do ligante envelhecido.

Este autor indica ainda que não há grandes perdas quando as misturas são trabalhadas com temperaturas de mistura e compactação um pouco abaixo das convencionalmente utilizadas, haja vista que seus resultados mostraram um comportamento semelhante para misturas mornas e quentes.

#### 4.1.7. Desgaste Cântabro

Centofante *et al.* (2018) observaram a tendência de valores de perda de massa crescendo proporcionalmente ao incremento de fresado realizado, evidenciando que o fresado aumenta a tendência ao desgaste. Os autores notaram também que o desgaste é maior à medida em que o teor de ligante envelhecido é maior, e que o inverso ocorre para o teor de ligante virgem adicionado. Bohn (2017) obteve resultado semelhante, concluindo que a inserção do fresado influenciou na perda de coesão das misturas.

Aguilar (2016) observou que as misturas que apresentam maior teor de finos tiveram um desempenho melhor que as demais, e que a adição de ligante virgem contribuiu significativamente na redução da perda de massa. Cerdeira (2018) também observou melhora no parâmetro a partir da adição de ligante virgem. Obteve o mesmo resultado quando da

incorporação de agente rejuvenescedor na composição final. Resultado semelhante ao obtido por Bohn (2017), que verificou também melhora nos resultados de misturas com adição de ligante modificado por polímero (CAP 60/85).

Cerdeira (2018) concluiu que o acréscimo de outros materiais como ligante virgem, aditivo surfactante, modificadores e agentes rejuvenescedores em misturas asfálticas recicladas contribuem para a redução de perda de massa em relação às misturas sem incorporação de RAP. Confirmou a conclusão de Bohn (2017), de que as propriedades de adesão e coesão podem ser avaliadas pelo ensaio Cântabro.

Quanto às temperaturas de mistura e compactação, Bohn (2017) deixou claro que os resultados obtidos para misturas convencionais recicladas a quente diferem dos obtidos para misturas mornas, que, de maneira geral, perdem em desempenho frente às anteriores.

#### 4.1.8. Suscetibilidade à Umidade Induzida (Lottman)

Em geral, as misturas com RAP encontradas na literatura, tem apresentado melhores resultados de resistência ao dano por ação da água em relação a misturas totalmente virgens. Nos ensaios de avaliação do dano por umidade induzida, a literatura aponta para um aumento da Resistência à Tração Retida (RRT) de acordo com o incremento de RAP. (KHAN et al., 2021)

Dai (2016) justifica que isso pode ser explicado pelo fato de que a ligação entre ligante virgem e agregado reciclado, que é praticamente uma mistura de ligante virgem e ligante envelhecido, é mais forte que a ligação entre o ligante virgem e agregados virgens. Então, a resistência à umidade das misturas acaba sendo aprimorada com o aumento do teor de RAP na mistura.

Bohn (2017) também verificou que há um aumento da RRT na medida em que é aumentado o teor de RAP, porém não na mesma proporção que apresentada nos ensaios de RT e FN. O estudo de Centofante *et al.* (2018) apontou na direção contrária: ao passo em que se aumentava o teor de fresado, a RRT aumentava. O mesmo comportamento se deu em misturas com outros tipos de ligantes, estudados pelos autores. A diferença pode ser explicada em torno da diferente origem dos materiais fresados utilizados pelos autores, e por consequência, da diferença dos ligantes de composição antigos. Porém pode haver outros fatores de ordem mineralógica na origem dos agregados utilizados pelos dois estudos.

Canchanya (2017) atribuiu o comportamento satisfatório nos ensaios por ele realizados, às propriedades dos agregados basálticos por ele utilizados. Isso corrobora com a hipótese levantada por Bohn (2017). O primeiro, acrescenta ainda que o bom resultado é devido



à boa contribuição mecânica causada pela recomposição do *filler* das misturas ensaiadas por um incremento de Cal Hidratada. Santana (2009) e Reis (2013) também citam melhoras devido à recomposição dos finos das misturas.

Canchanya (2017) acrescenta que o comportamento foi satisfatório a partir da incorporação de 20% de RAP. Para adições menores, o autor inferiu que a adição do RAP produz pouca ou nula variação do comportamento da mistura frente ao ensaio de suscetibilidade à umidade induzida.

Santana (2009), considerando em conjunto os resultados de Estabilidade Marshall, RT e Suscetibilidade à umidade induzida, inferiu que as misturas mais adequadas para revestimentos asfálticos capa de rolamento e/ou *binder*, são as que contém até 50% de RAP.

Bohn (2017) complementa que é possível afirmar que existe grande semelhança entre os resultados obtidos para misturas recicladas a quente e mornas, todavia com uma leve superioridade para as misturas a quente. Quanto à adição de ligante virgem à mistura reciclada, o autor verificou que a medida em que se diminui o teor de ligante virgem adicionado, aumenta o valor de RRT. O que não ocorre em misturas convencionais sem fresado. Observou também a existência de uma relação entre o teor total de ligante (virgem + envelhecido) e o valor da RRT. Quanto maior o teor de ligante total, maior o valor da resistência ao desgaste por ação da água.

Quanto a adoção de AR, estudos como o de Khan et al. (2021) mostram que apesar de melhorar o desempenho algumas características mecânicas, devido a restauração das propriedades do ligante envelhecido, ele pode atuar reduzindo a resistência à umidade da mistura asfáltica. Porém o autor constatou que a adição de um modificador associado do AR pode melhorar as propriedades reológicas do ligante e ajudar a reduzir o impacto do AR. Este autor mostrou o sucesso da adição do pó de borracha triturada associada ao óleo queimado de automóveis para melhorar essa característica, demonstrando a potencial capacidade do uso sustentável desses materiais.

#### 4.1.9. Desempenho à deformação permanente (Afundamento de Trilha de Roda)

Oliveira (2013) observa que há uma tendência de elevação da resistência a deformação permanente das misturas asfálticas recicladas a quente à medida que se aumenta o percentual de RAP em suas composições. Este comportamento é condizente com o comportamento reológico da mistura.

Analisando-se os resultados obtidos pelos diversos autores na literatura, destaca-se a diferença entre os afundamentos das misturas asfálticas recicladas e as de referência, sem RAP.

Melo (2014) confeccionou misturas virgens, utilizadas por boa parte dos autores nacionais como sendo os valores de referência.

Os resultados de Canchanya (2017) mostram que mesmo com adição do RAP, as misturas recicladas demonstraram melhor desempenho à deformação permanente. No seu estudo, comparando às especificações mínimas, as misturas asfálticas atenderam ao critério estabelecido pela especificação francesa, a qual limita a deformação permanente em 10% para rodovias de tráfego pesado.

#### 4.1.10. Tipo de compactação

Nascimento (2011) demonstra, pelos resultados obtidos em seu estudo, o quanto mais eficiente é a compactação SUPERPAVE, que reduz substancialmente o volume de vazios, dando origem a misturas mais densas.

Marques (2004) também observou a redução do volume de vazios com a compactação giratória. Notou ainda que misturas compactadas pelo método Marshall tem os vazios distribuídos ao longo da altura dos corpos de prova de modo uniforme, enquanto na compactação SUPERPAVE os vazios são mais concentrados próximos às faces horizontais, indicando maior densidade na parte central. O autor afirma que isso pode influenciar na obtenção de parâmetros mecânicos.

## 4.2. ANÁLISE QUANTITATIVA DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Revisada a literatura, procedeu-se com a coleta dos resultados quantitativos dos ensaios de caracterização realizados em cada um dos estudos da Tabela 2, de modo que os dados numéricos passaram pela padronização de unidades e foram mantidos nas unidades mais comuns encontradas em estudos brasileiros, a fim de comparação.

A fim de isolar a variável ‘Teor de RAP (%)’, foram desconsideradas as demais variáveis que normalmente influenciam direta e indiretamente os resultados, como composição granulométrica, origem do RAP, origem dos agregados, métodos de ensaio *etc.*, o que se justifica para uma análise de tendências. Optou-se por manter os resultados coletados em cada estudo nas mesmas condições utilizadas por autores em seus estudos, como, por exemplo, quando um autor obteve resultados de ensaios para misturas recicladas com temperaturas de misturas diferentes *etc.*

Nos Apêndices encontram-se compilados integralmente os resultados dos ensaios realizados pelas referências consultadas, organizados em função da propriedade investigada, da

classificação das misturas pelo autor e em função do teor de RAP (%) incrementado na mistura ensaiada. Foram coletados para o estudo de tendências os resultados dos ensaios de: Estabilidade [Kgf] e Fluência [mm] Marshall; Módulo de Resiliência [MPa]; Módulo Complexo (Dinâmico); Resistência à Tração Estática [MPa]; Vida de Fadiga [ciclos até a falha]; Compressão ou Tração Axial de Carga Repetida (*Creep* Dinâmico) [*Flow Number* (ciclos)]; Desgaste Cântabro [%] e Suscetibilidade à Umidade Induzida (Lottman) [%].

Como, por vezes, um mesmo ensaio pode ser realizado em várias condições diferentes, optou-se por realizar o estudo de tendências com todos os resultados, contando com a plotagem destes resultados em gráficos de dispersão, gerando, para cada propriedade investigada, uma nuvem de dados de resultados em função do teor de RAP (%) das misturas. Caso não fosse esse o procedimento adotado, seria necessário um esforço maior de pesquisa, haja vista que ainda existem poucos estudos com essa abordagem na literatura, para realizar a extração de dados em condições de ensaio semelhantes e também em diversos teores de incorporação de RAP, para então observar o comportamento por inteiro. Os gráficos foram analisados globalmente, a fim de se investigar o comportamento geral das misturas quando o teor de RAP é modificado e analisados localmente quando verificadas tendências ou comportamentos particulares e comuns que fogem do comportamento da maioria.

Não foi viável analisar numericamente os resultados de Módulo Dinâmico e Vida de Fadiga, pois a maioria dos estudos fez uso de aplicações de cargas em diversas frequências e temperaturas, o que dificultou a padronização numérica dos resultados necessária para a comparação. Alguns resultados numéricos de módulo dinâmico e vida de fadiga estão disponibilizados nas Tabelas 6 e 8, respectivamente, encontradas nos Apêndices C e E. Além disso, as análises aconteceram a partir de curvas mestras, isotérmicas, isócronas, Planos Cole Cole e ângulos de atrito, o que dificultou a análise numérica direta.

Para os ensaios de Vida de Fadiga, alguns estudos fizeram uso de metodologias diversas das convencionais, utilizando-se de parâmetros que outros estudos não determinaram, inviabilizando mais uma vez a comparação numérica e direta. Idem para afundamento de trilha de roda. Seus resultados, portanto, foram reunidos na seção anterior.

Algumas das variações identificadas nos ensaios estudados por este trabalho foram, por vezes, evidenciadas no desvio padrão e citadas particularmente nos estudos primários. Elas podem facilmente serem atribuídas à variabilidade dos ensaios, dificuldade de controle da temperatura de ensaio e condições e incertezas quanto homogeneidade do material fresado.

Todos os gráficos plotados apresentaram algum grau de dispersão em seus valores, mas essa dispersão tornou-se bem mais evidente para maiores teores de incorporação de RAP,

conduzindo a uma grande heterogeneidade de resultados. Fez-se uso então da divisão das nuvens em setores de resultados agrupados e limitados por marcadores para analisar as densidades de pontos nos gráficos e comportamentos semelhantes.

#### 4.2.1. Estabilidade e Fluência Marshall

Na Figura 5 encontram-se os resultados do ensaio de Estabilidade Marshall plotados no gráfico de dispersão. Os valores utilizados na plotagem estão disponibilizados na Tabela 4, encontrada no Apêndice A. Preliminarmente foi possível notar que todas as misturas atenderam ao critério mínimo estabelecido pelo DNIT.

À primeira vista não foi possível verificar um comportamento geral específico, apesar do gráfico apontar para um crescimento dos valores de Estabilidade com o incremento de RAP. Foi possível observar um acúmulo maior de pontos abaixo dos 1500 Kgf, o primeiro marcador (horizontal), bem como mudanças de comportamento a partir dos 40% de RAP, o segundo marcador (vertical). A partir daí verificou-se a presença de três comportamentos diferentes.

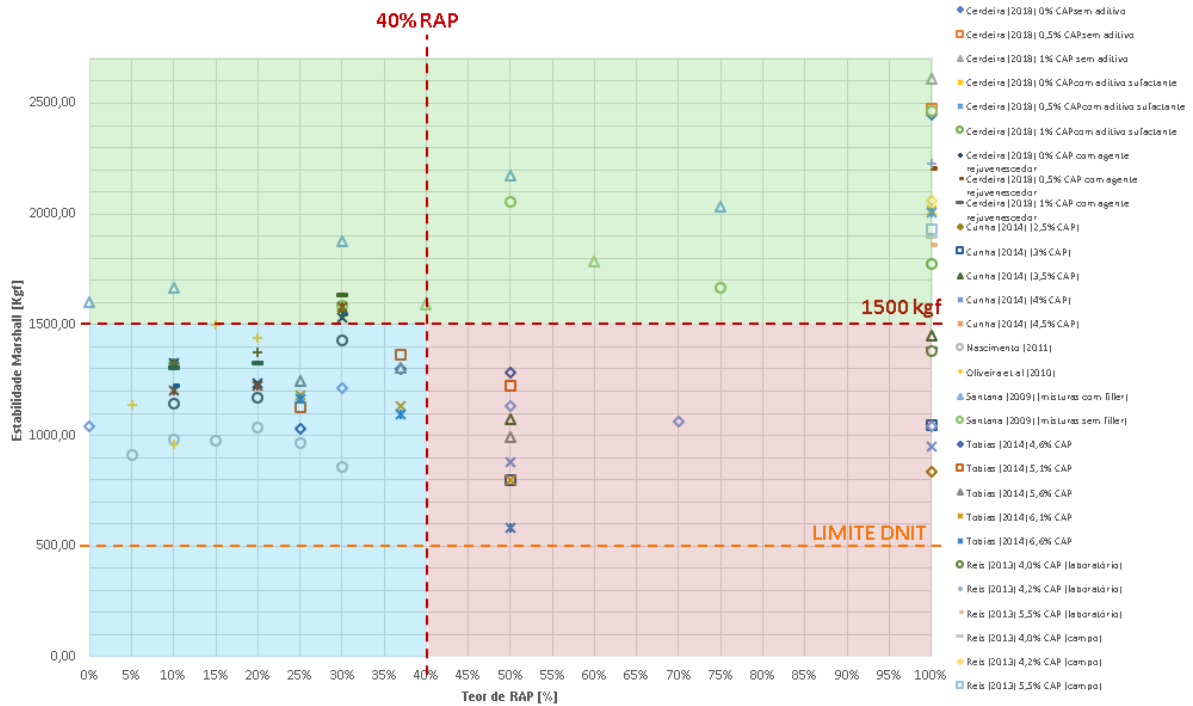
Os resultados localizados na área verde do gráfico, foram de estudos que realizaram uma recomposição granulométrica nas misturas ensaiadas. Nota-se que esses estudos apresentaram valores de Estabilidade mais altos que a média e crescentes conforme se aumentava a quantidade de fresado.

Na área azul do gráfico ficaram agrupados a maioria dos resultados. Nesta área foi notada a presença de misturas convencionais com e sem adoção de aditivos ou agentes rejuvenescedores. Verificou-se que os valores tendem a crescer conforme se incorpora o RAP, porém misturas com a adição de aditivos tenderam a obter resultados de estabilidade mais altos.

Os resultados encontrados na área vermelha estavam mais dispersos, e eram, em sua maioria, de misturas às quais foram adicionados teores de ligante virgem acima de 3,5%. Observou-se a tendência de queda dos valores de estabilidade destas misturas a partir dos 40% de RAP adicionados.

Notou-se também grandes diferenças de resultados para o teor de 100% de RAP. Supõe-se que essa dispersão está atrelada à heterogeneidade do fresado, indicando que quanto maior o teor de RAP da mistura, mais heterogênea a mistura, o que leva os resultados a variarem mais.

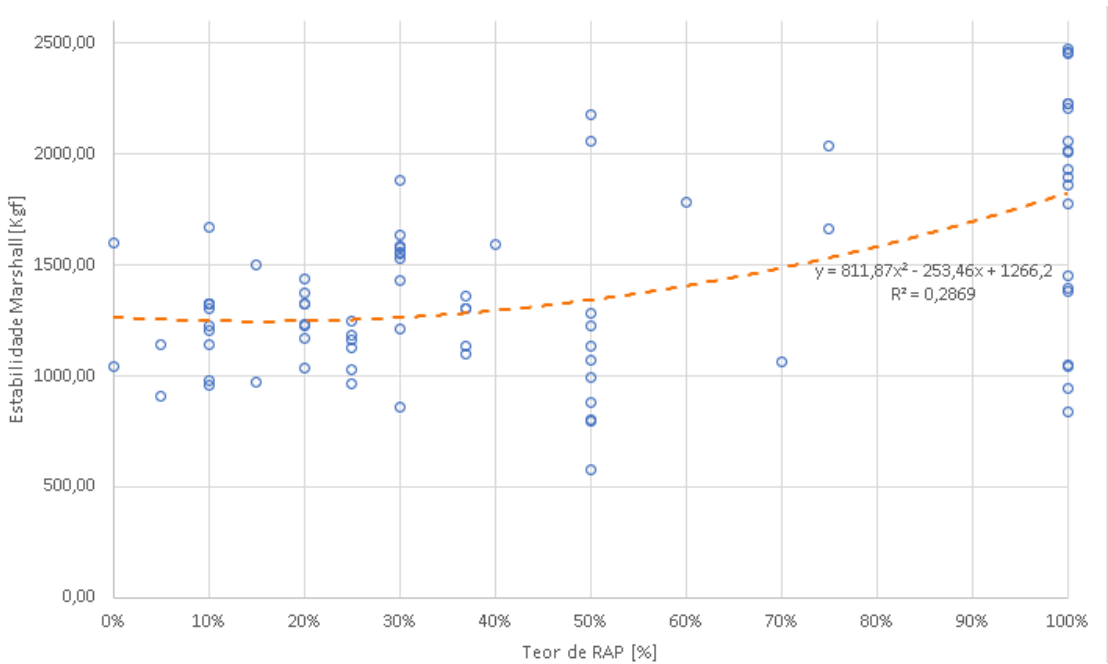
Figura 5 - Estabilidade Marshall (Kgf) versus Teor de RAP (%).



Fonte: O autor (2021).

Para esses dados, a fim de avaliação, traçou-se uma linha de tendência, conforme a Figura 6, à qual apresentou no melhor ajuste um  $R^2 = 28,69\%$ , um valor de representatividade muito baixo.

Figura 6 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de Estabilidade Marshall.

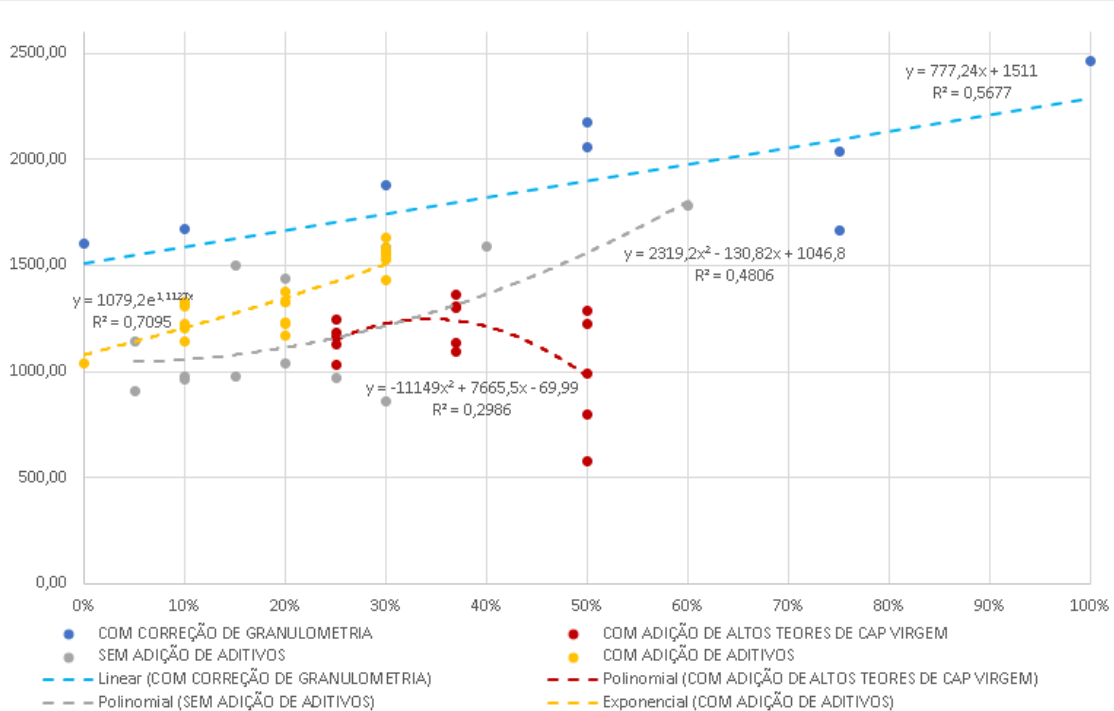


Fonte: O autor (2021).

Na tentativa de investigar mais a fundo esse comportamento, foram traçadas linhas de tendências para os três comportamentos observados. Inicialmente, não houve melhora na

representatividade das tendências, porém, ao se retirar do gráfico os valores encontrados para misturas com 100% de RAP que se apresentavam como *outliers*, houve significativa melhora de representatividade, como se observa na Figura 7.

Figura 7 - Dispersão e linhas de tendências para os comportamentos observados.



Fonte: O autor (2021).

Resultados superiores de  $R^2$  mostram que se obteve melhor correlação entre as variáveis analisadas. Ficou evidente os comportamentos extremos que o RAP pode desenvolver. Pela figura, observa-se mais claramente as quatro tendências inicialmente observadas.

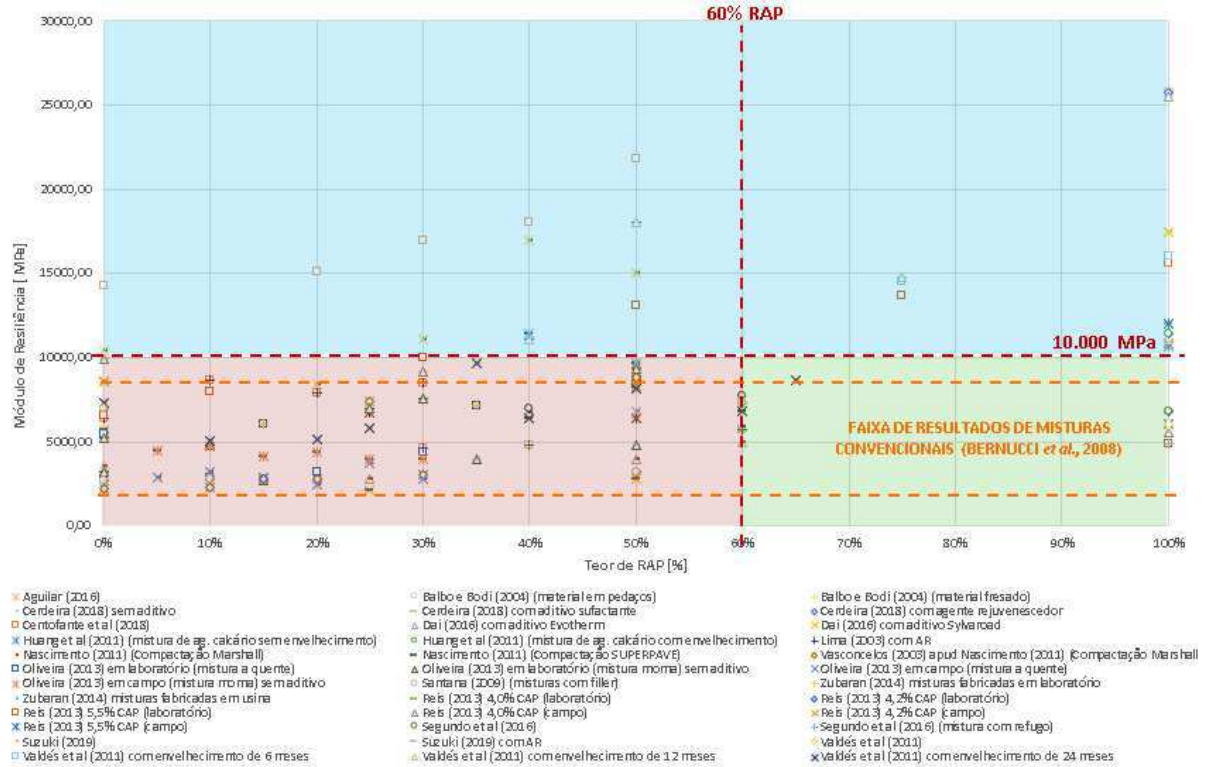
#### 4.2.2. Módulo de Resiliência

De modo análogo ao realizado para Estabilidade Marshall, foram plotados os resultados coletados do ensaio de Módulo de Resiliência. Os valores utilizados na plotagem estão disponibilizados na Tabela 5, encontrada no Apêndice B. Não foi possível verificar um comportamento geral à primeira vista, mas notou-se uma densidade maior de resultados abaixo do valor de 10.000 MPa.

Novamente o gráfico de dispersão foi dividido em três áreas de densidades de pontos diferentes e que apresentavam indícios de mudança de comportamento. Foi plotada no gráfico a faixa de resultados para misturas convencionais sem RAP, a partir de Bernucci *et al.* (2008). Como pode-se observar na Figura 8, para acréscimos de até 60% de RAP, a maioria dos

resultados, agrupados na área vermelha do gráfico, encontram-se dentro desta faixa de resultados, que varia entre 2.000 MPa e 8.000 MPa.

Figura 8 - Módulo de Resiliência (MPa) versus Teor de RAP (%).



Fonte: O autor (2021).

Observou-se também que alguns experimentos obtiveram parte considerável de seus resultados na área azul do gráfico, com valores bem mais altos que a maioria dos estudos apresentaram.

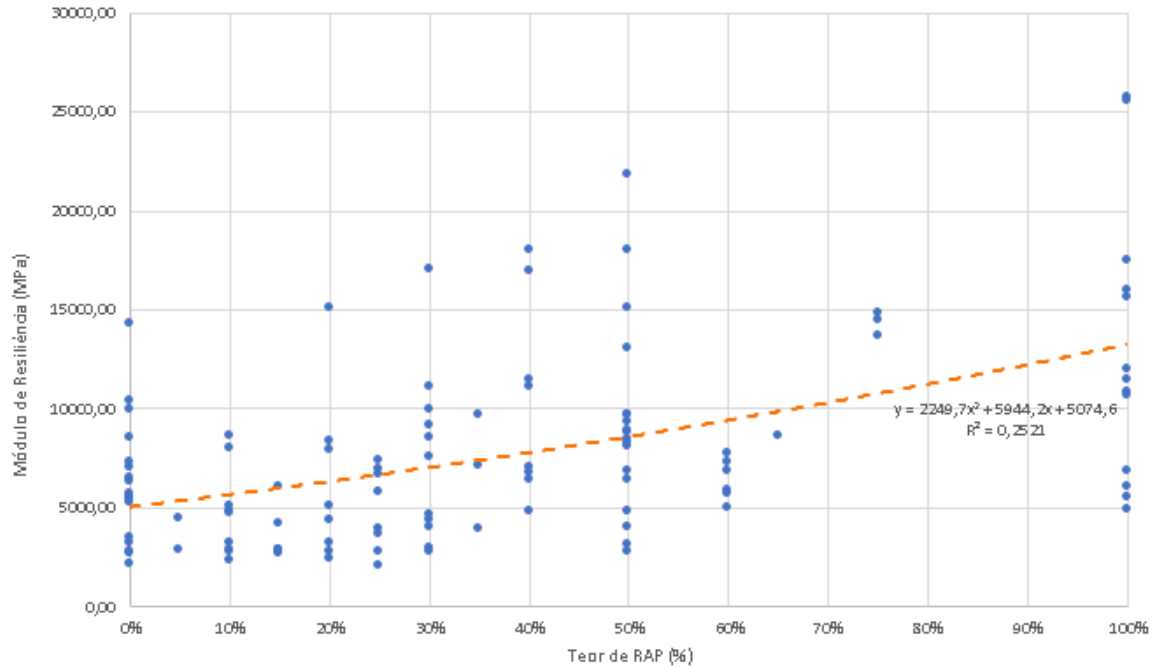
Os estudos que tiveram seus resultados na área verde do gráfico mostraram resultados dispersos, corroborando com a ideia da heterogeneidade de resultados a partir da incorporação de grandes teores de fresado.

Seguindo o mesmo raciocínio utilizado na propriedade anterior, para uma avaliação preliminar, plotou-se uma linha de tendência global a fim de verificar algum comportamento mais evidente (Figura 9). Dessa vez, observou-se uma tendência geral mais evidente de crescimento do MR conforme se adiciona RAP na mistura. Ainda assim, a linha de tendência global apresentou um resultado de  $R^2 = 25,21\%$  em seu melhor ajuste, sendo pouco representativa.

Em seguida, separou-se os estudos que apresentam comportamento diferentes dos demais e após remoção dos resultados que atuaram como *outliers*, plotou-se linhas de

tendências particulares para os comportamentos mais comuns, porém os resultados se mostraram piores.

Figura 9 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de MR.



Fonte: O autor (2021).

Sendo assim, a fim de investigar os resultados que destoaram da maioria, separou-se os estudos que tiveram maioria de resultados na área azul do gráfico. Foram os estudos de Putman e Xiao (2012), Segundo et al (2016) e Santana (2009). Notou-se que ambos fizeram alterações granulométricas ou testes com novos agregados, o que apontou grande influência da granulometria dos agregados nos valores de Módulo de Resiliência de misturas recicladas.

De outro modo, quando analisamos o comportamento dos conjuntos de dados de cada autor, com características semelhantes de ensaio e mistura, nota-se sim um aumento dos valores de MR com o incremento de RAP.

#### 4.2.3. Resistência à Tração Estática

Na Figura 10 encontram-se os resultados de Resistência à Tração extraídos dos estudos selecionados, plotados num gráfico de dispersão. Os valores utilizados na plotagem estão disponibilizados na Tabela 7, encontrada no Apêndice D.

Para facilitar a observância dos resultados e tendências, foram inseridos dois marcadores que divide a nuvem de pontos em áreas de diferentes densidades. Foi traçada também a linha que representa o limite mínimo de 0,65 MPa prescrito pelo DNIT para misturas asfálticas convencionais.

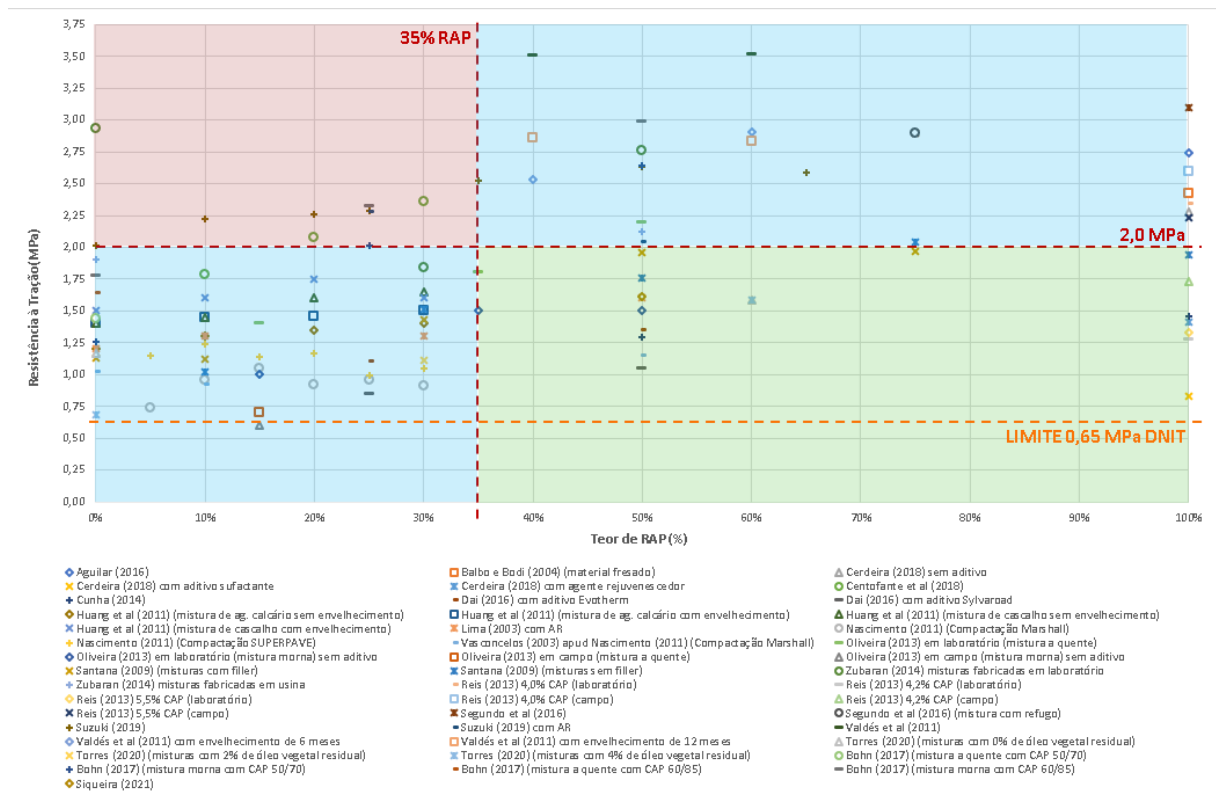


De início, podemos extrair algumas informações. Verifica-se que apenas uma mistura reciclada, entre todos os pontos, situou-se abaixo do limite estipulado pelo DNIT. As demais encontram-se dentro da faixa de resultados obtidos para misturas asfálticas convencionais, evidenciando que não existe uma diferença muito grande em questão de resistência.

Os setores em azul, no gráfico, foram os que apresentaram maior densidade de resultados em relação aos demais. Disso, podemos fazer duas observações: para até 30% de RAP incorporado nas misturas, nota-se uma quantidade maior de resultados na literatura, bem como uma menor heterogeneidade de resultados; a segunda observação é que para misturas com mais de 35% de RAP incorporado, os resultados de RT variam amplamente.

Aparentemente, na área azul inferior, os resultados tendem a crescer mais rapidamente, conforme aumenta o teor de RAP. Na área azul superior, os dados, já mais dispersos, parecem se estabilizar ou diminuir a tendência de crescimento.

Figura 10 - Resistência à Tração (MPa) versus Teor de RAP (%).

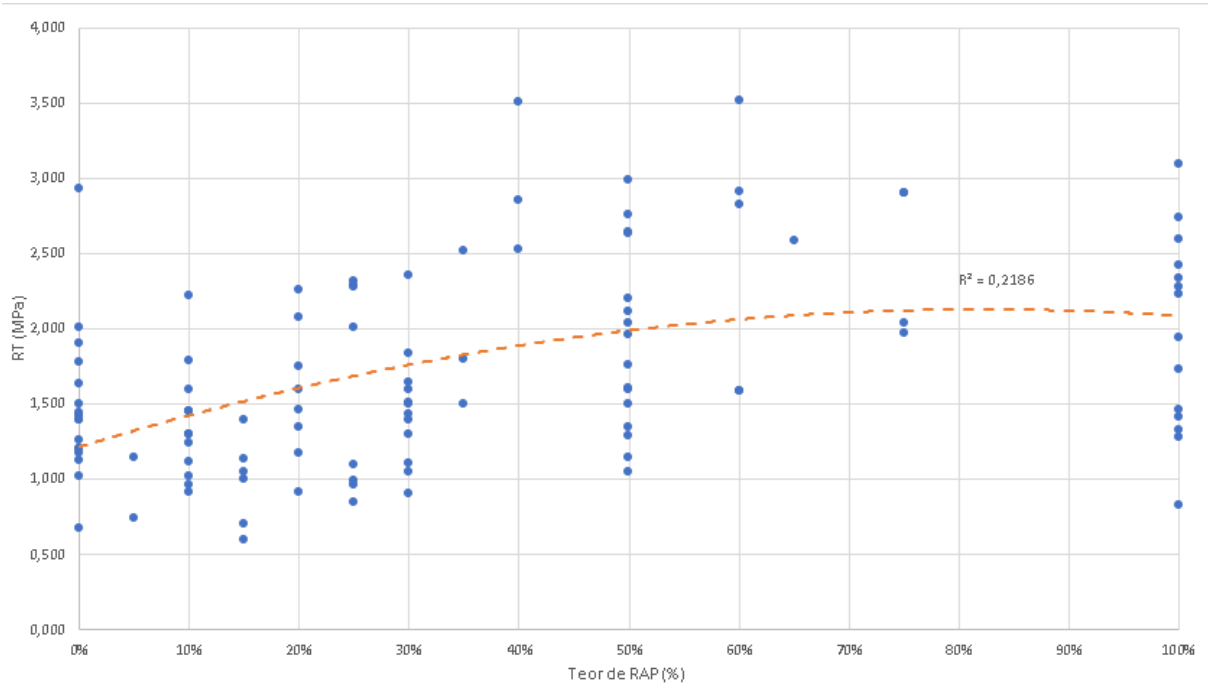


Fonte: O autor (2021).

Plotada a linha de tendência global (Figura 11), o valor de  $R^2$  do melhor ajuste foi muito baixo,  $R^2 = 21,86\%$ , desprezível em questão de representatividade. Não sendo possível afirmar que, para os resultados coletados, existe um comportamento geral de todas as misturas a partir da modificação do teor de RAP incorporado.

Provavelmente só se poderá verificar um comportamento mais abrangente em função do teor de RAP incorporado se forem realizados estudos mais completos com diversos teores de RAP adicionados e o mínimo de variáveis influenciando o comportamento.

Figura 11 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de RT.



Fonte: O autor (2021).

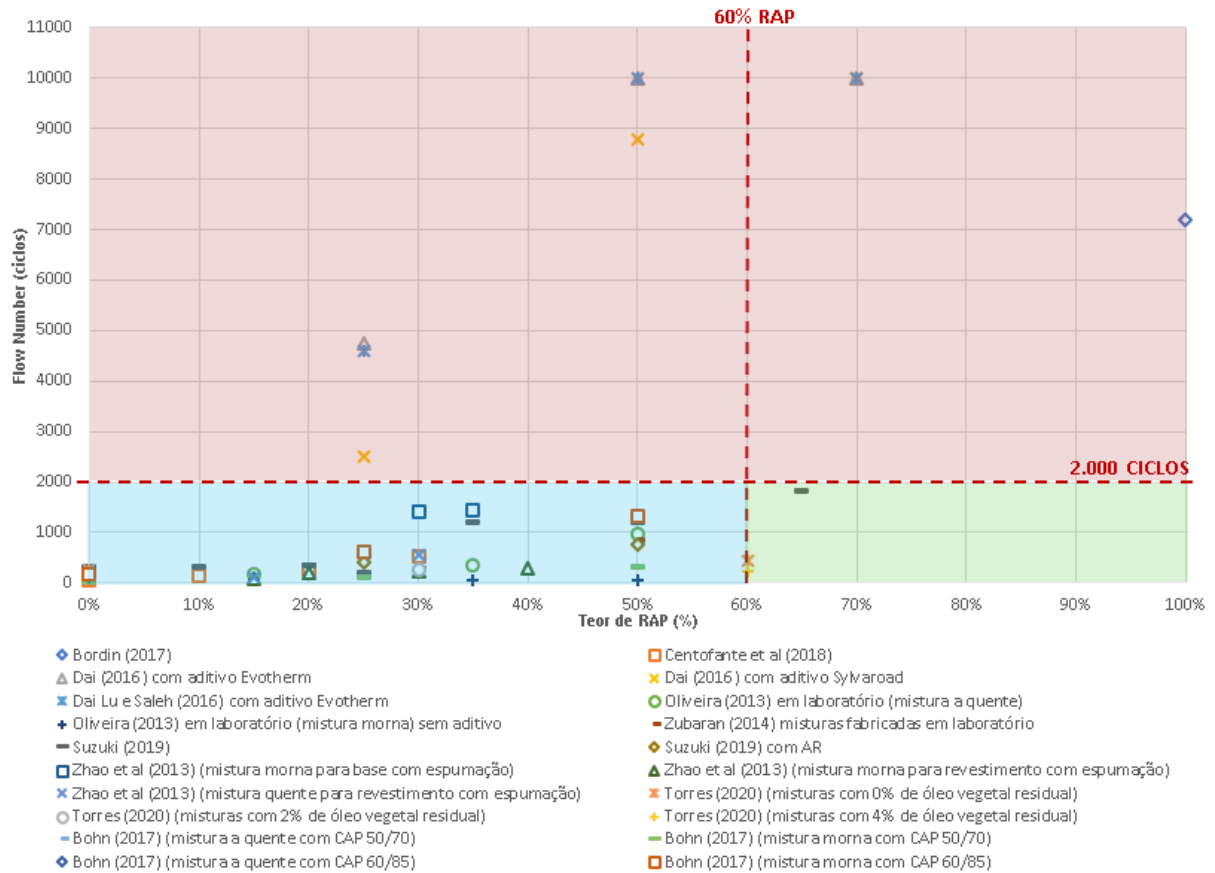
#### 4.2.4. Compressão ou Tração Axial de Carga Repetida (*Creep* Dinâmico)

Na Figura 12, encontram-se os resultados obtidos no ensaio de *Creep* Dinâmico plotados no gráfico de dispersão. Os valores utilizados na plotagem estão disponibilizados na Tabela 9, encontrada no Apêndice F.

À primeira vista verifica-se uma densidade maior de pontos entre os marcadores de  $FN = 2.000$  ciclos e teor de RAP de 60%. Isso mostra que em misturas com até 60% de RAP os valores de FN tendem a manter-se na mesma faixa de ciclos.

As áreas em vermelho e verde apresentam uma densidade de pontos muito menor em relação à azul. Ao investigar estes resultados a fim de verificar alguma discrepância, identificou-se os estudos de Dai (2016) e Dai Lu e Saleh (2016). Estes autores fizeram uso de aditivos surfactantes, o que pode ter causado essa dispersão, significando que a presença destes aditivos aumentou consideravelmente a rigidez das misturas.

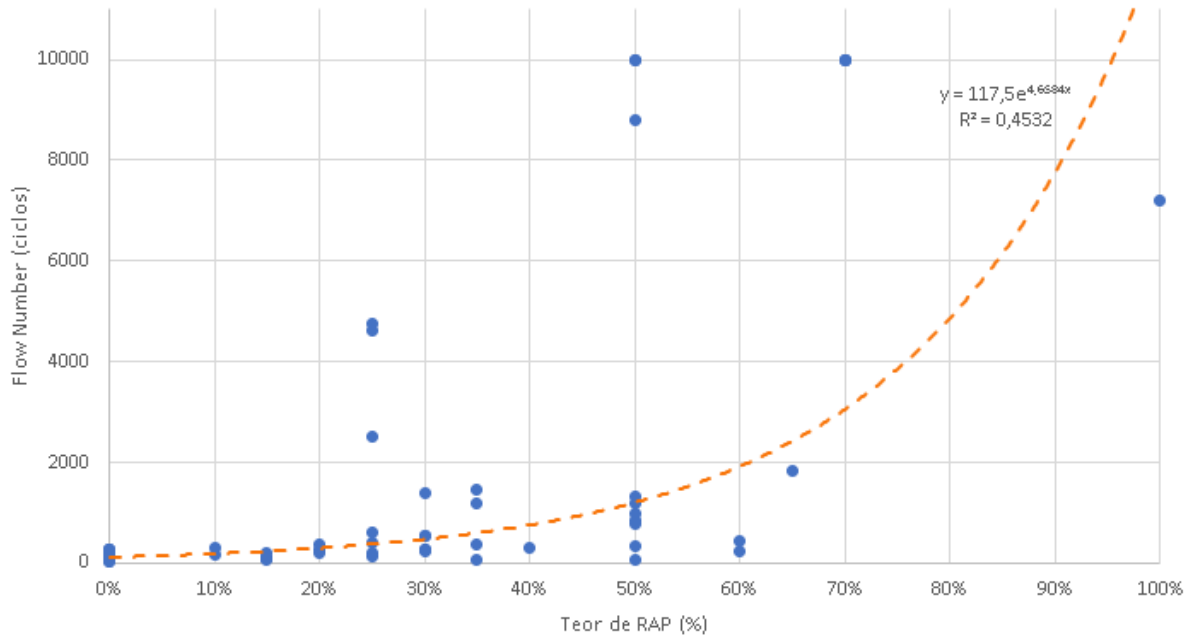
Figura 12 - Flow Number (Ciclos) versus Teor de RAP (%).



Fonte: O autor (2021).

Traçada a linha de tendência global, que pode ser vista na Figura 13, o melhor ajuste se deu com 45,32% de representatividade, mostrando uma tendência geral de crescimento exponencial do valor de Flow Number conforme se aumenta o teor de RAP incorporado na mistura.

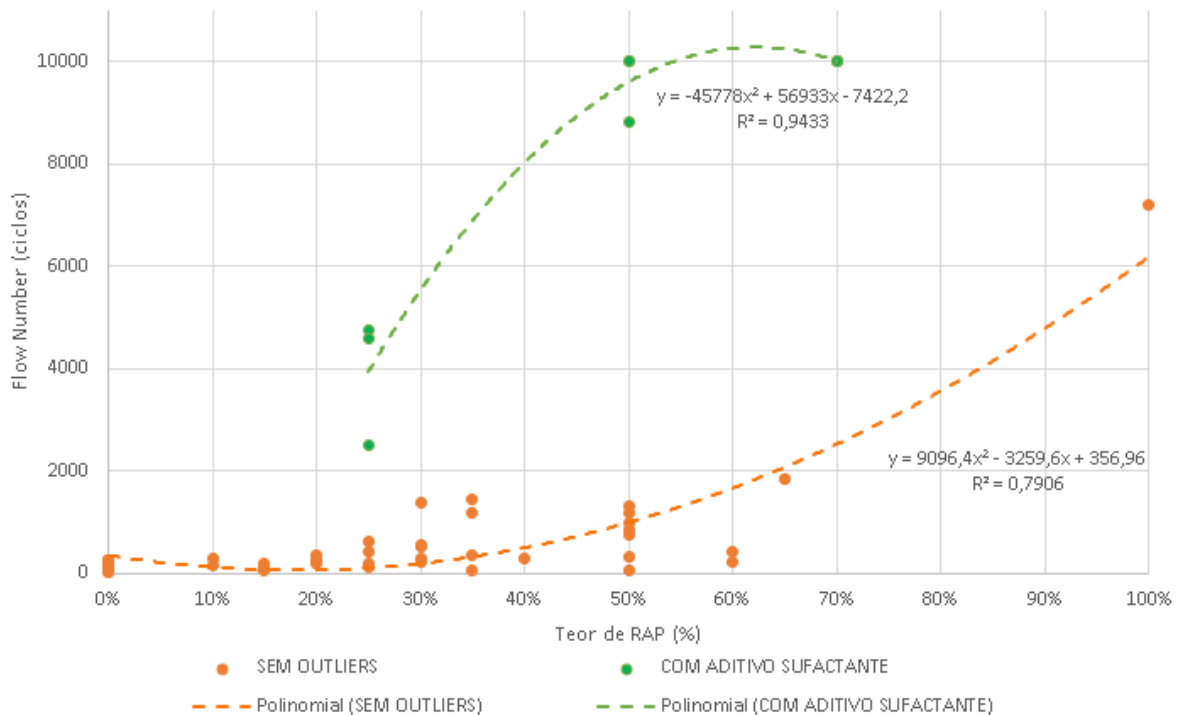
Figura 13 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de Flow Number.



Fonte: O autor (2021).

A fim de verificar se poderia melhorar a representatividade da linha de tendência, plotou-se em separado os valores que se apresentavam como outliers, exibindo as duas tendências de comportamento observadas para esta propriedade (Figura 14).

Figura 14 - Dispersão global e tendências particulares para os valores de Flow Number.



Fonte: O autor (2021).

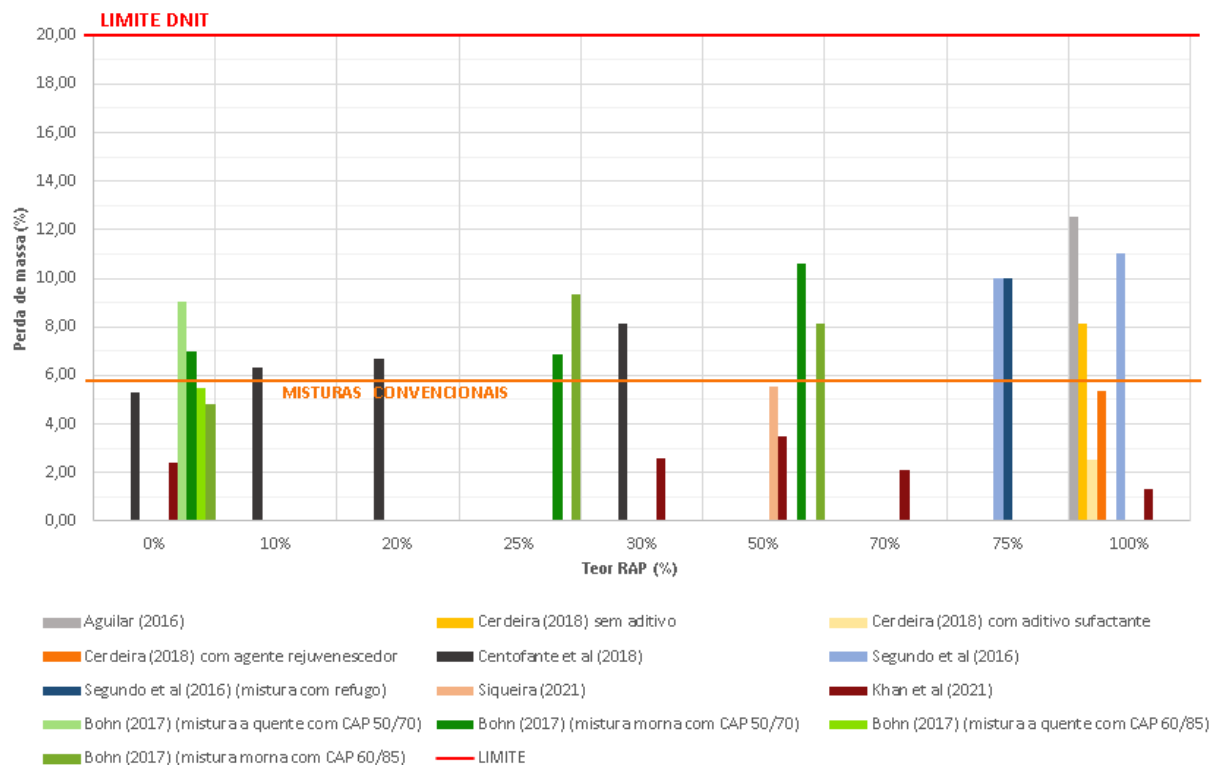
As representatividades das duas linhas de tendências subiram consideravelmente após a separação dos comportamentos, indicando a tendência de aumento do Flow Number conforme há o incremento de RAP na mistura. Quando há a adição de aditivo surfactante, o FN alcança maiores resultados de rigidez com uma menor quantidade de RAP. Por serem tendências, não podemos afirmar que é o que acontece na prática, apesar dos bons valores de  $R^2$ .

#### 4.2.5. Desgaste Cântabro

Os resultados obtidos pelos autores para o Ensaio Cântabro foram, em média, próximos dos obtidos para misturas convencionais sem adição de RAP, que fica em torno de 5,91% (CERDEIRA, 2018). Todos apresentaram valores abaixo do limite máximo determinado pelo DNIT (20% de perda de massa). Devido a menor quantidade de resultados, foi possível fazer a plotagem em um gráfico de colunas, o que facilita a visualização dos resultados (Figura 15). Os valores utilizados na plotagem estão disponibilizados na Tabela 10, encontrada no Apêndice G.

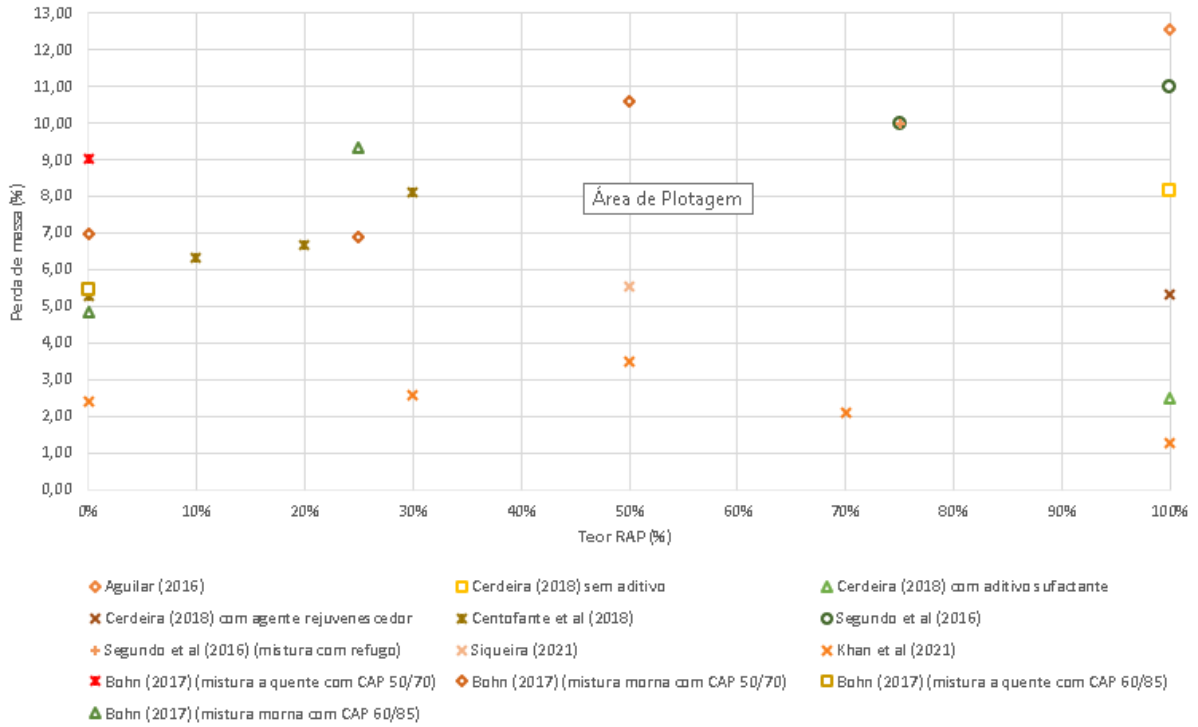
Plotados em um gráfico de dispersão, evidenciou-se a heterogeneidade dos resultados (Figura 16). Ensaios com misturas sem adição de RAP e com 100% de RAP apresentaram valores muito diferentes um dos outros.

Figura 15 - Desgaste Cântabro (%) versus Teor de RAP (%).



Fonte: O autor (2021).

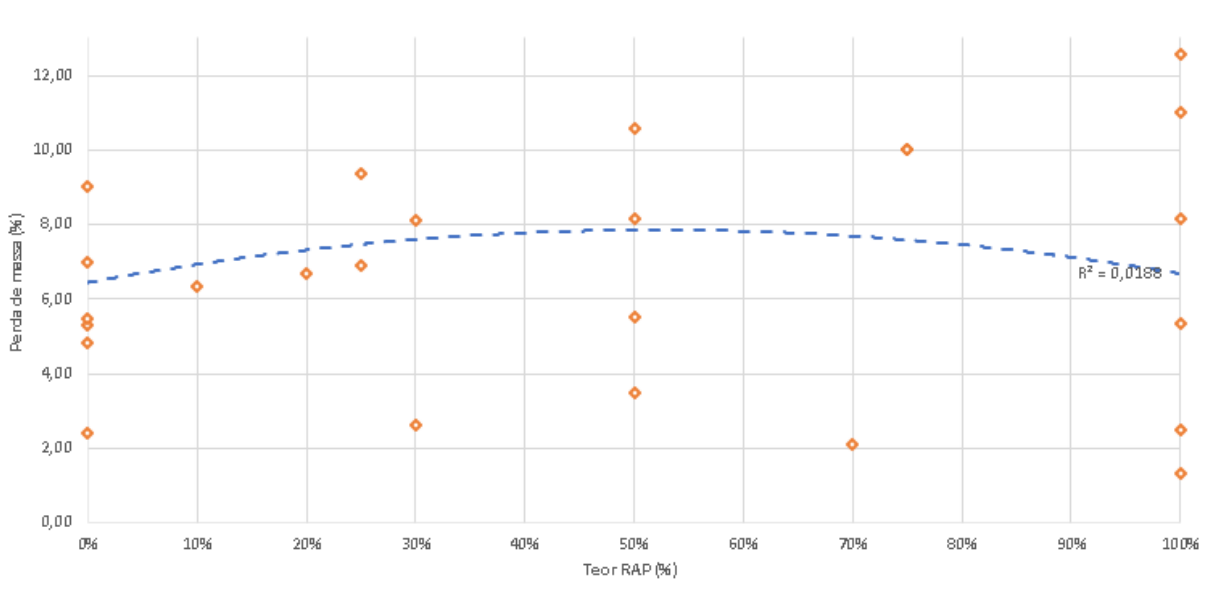
Figura 16- Gráfico de dispersão Desgaste Cântabro (%) versus Teor de RAP (%).



Fonte: O autor (2021).

Com base na nuvem global de resultados (Figura 17), não foi possível aferir uma tendência ou comportamento comum a partir da modificação dos teores de RAP incorporados.

Figura 17 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de desgaste Cântabro.



Fonte: O autor (2021).

Não se obteve um valor de  $R^2$  que representasse nenhuma tendência. No melhor ajuste, o  $R^2$  encontrado não passou de 1,88%.

#### 4.2.6. Suscetibilidade à Umidade Induzida (Lottman)

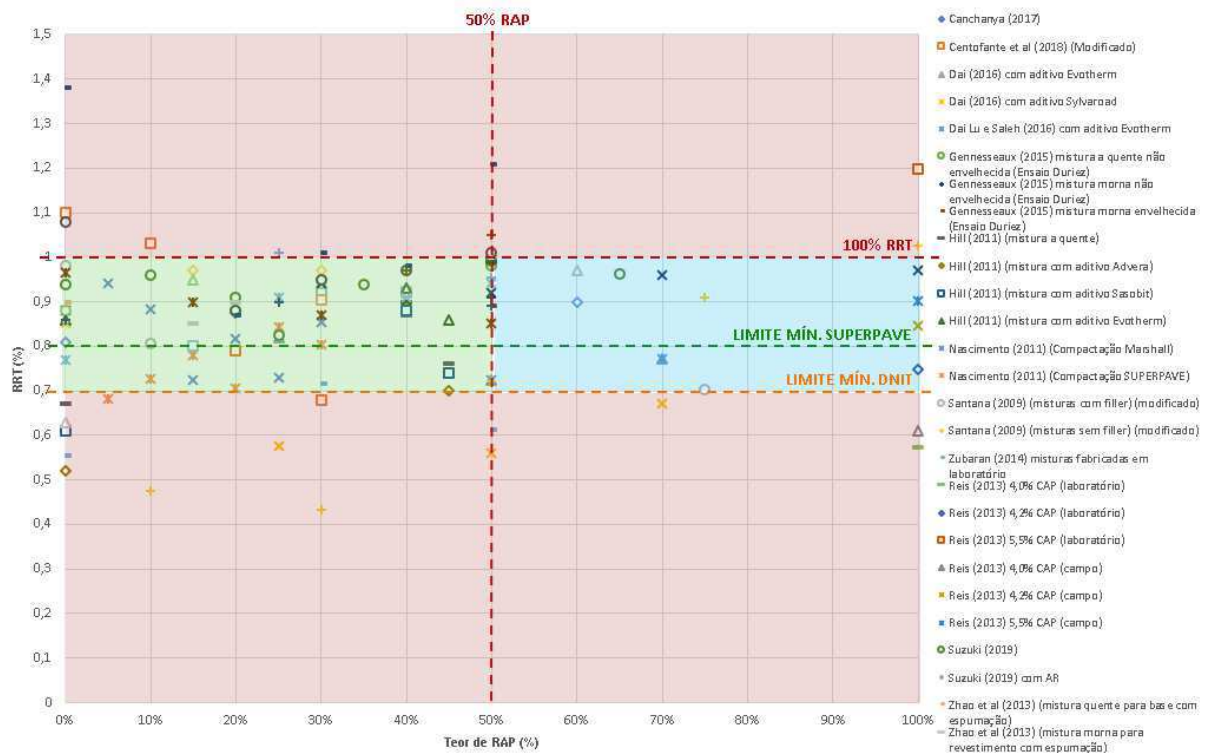
Na Figura 18 encontram-se os resultados do ensaio de Suscetibilidade à umidade induzida plotados no gráfico de dispersão. Os valores utilizados na plotagem estão disponibilizados na Tabela 11, encontrada no Apêndice H. Preliminarmente foi possível notar que a maioria das misturas ensaiadas atenderam ao critério mínimo de RRT estabelecido pelo DNIT (Tabela 3). O mesmo acontece para o critério mínimo estabelecido na dosagem SUPERPAVE, porém com menos amostras.

A área verde do gráfico, foi a que concentrou maior parte dos resultados. Delimitada pelo limite inferior do DNIT, fica claro que para misturas recicladas com até 50% de RAP apresentam valores razoáveis de RRT.

Quando partimos para a área azul, nota-se que além de poucos estudos abordarem a reciclagem com altos teores de RAP, os resultados também apresentam-se mais dispersos, evidenciando mais uma vez o comportamento variável quando se utiliza grandes teores de fresado.

As áreas em vermelho demonstram comportamentos atípicos, mas justificáveis. Algumas misturas, localizadas na área vermelha superior tiveram resultados melhores de Resistência à Tração após o condicionamento. Na área vermelha inferior, a maioria das misturas foram confeccionadas com algum aditivo, apresentando resultados inferiores ao limite.

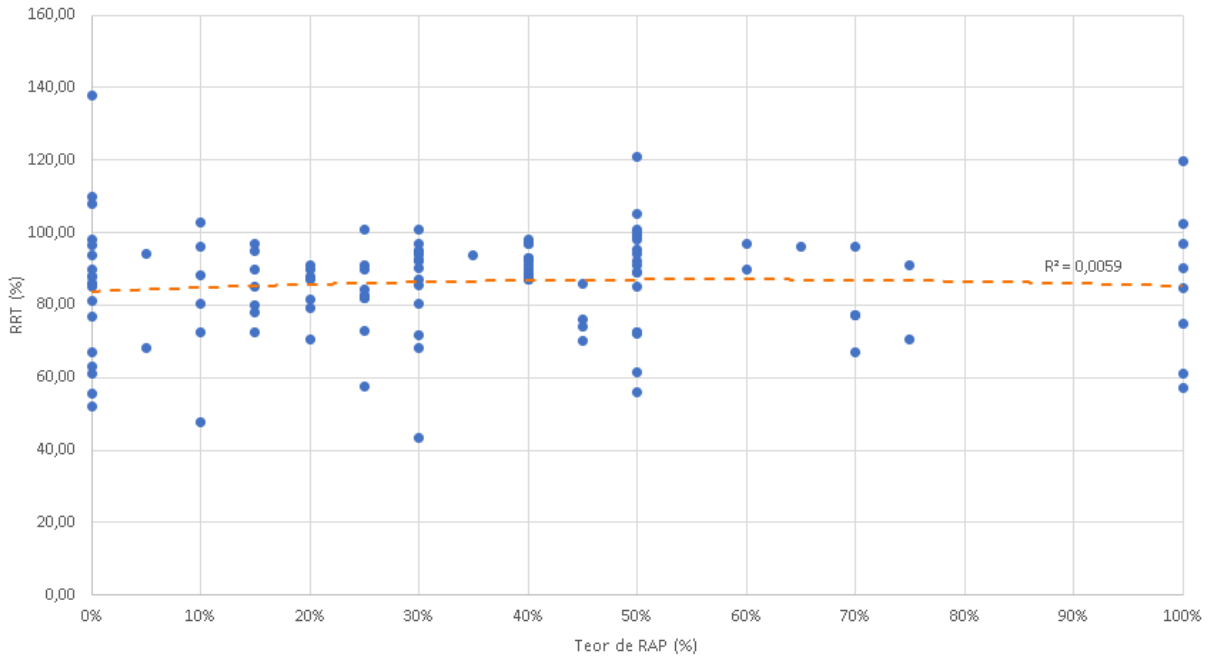
Figura 18 - RRT (%) versus Teor de RAP (%).



Fonte: O autor (2021).

Plotada a linha de tendência global, não se pôde aferir nenhum comportamento ou tendência específica a partir da modificação do teor de RAP, como verifica-se na Figura 19. O  $R^2$  do melhor ajuste obteve valor baixíssimo,  $R^2 = 0,59\%$ , desprezível em questão de representatividade.

Figura 19 - Dispersão global e linha de tendência para os valores de de RRT.



Fonte: O autor (2021).



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi avaliada a influência do teor de material asfáltico fresado nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas. Foram levantados resultados de caracterização mecânica de misturas asfálticas com RAP publicados em alguns estudos; esses resultados passaram também por um estudo de tendências a fim de investigar um comportamento comum em cada propriedade mecânica estudada.

Baseado no levantamento realizado e nos resultados obtidos nesta pesquisa, verificou-se que o comportamento mecânico das misturas recicladas foi fortemente influenciado pela composição granulométrica dessa mistura e pela presença de um agente rejuvenescedor. Os valores de MR, RT e perda de massa foram significativamente reduzidos após o uso de agentes rejuvenescedores. Estudos apontaram que a integração de óleo queimado de automóveis com pó de borracha triturada aumentou a flexibilidade das misturas recicladas se mostrando eficaz na prevenção de patologias associadas à fadiga. A utilização do segundo material sozinho não foi suficiente para devolver a flexibilidade das misturas recicladas. Óleo de cozinha virgem e residual e óleo queimado de automóveis também demonstraram grande potencial como agentes rejuvenescedores. Quando comparados com os valores de misturas convencionais confeccionadas a quente sem RAP, os resultados de módulo complexo, fadiga e resistência mecânica a baixa temperatura para misturas recicladas com fresado se mostraram muito semelhantes. Quanto ao efeito do tipo de compactação, em geral, misturas recicladas obtidas pela compactação SUPERPAVE tinham valores de RT sempre superiores aos obtidos pela compactação Marshall.

A adição de quantidades cada vez maiores de RAP numa mistura reciclada comprometia a coesão e adesividade de misturas. Em contrapartida, o incremento do material elevou os valores de estabilidade Marshall, módulo de resiliência, e resistência à tração. De modo semelhante, causou um claro aumento na capacidade das misturas recicladas de resistir às cargas que podem levar à fratura completa do material. Apesar disso, embora a literatura aponte para melhoras nos parâmetros de fadiga, o uso de misturas recicladas com fresado em camadas de rolamento devem ser melhor avaliadas, a fim de evitar a fissuração precoce. Altos teores de RAP comprometem a resistência ao trincamento das misturas em vários graus. Quanto à deformação permanente, a adição de RAP nas misturas asfálticas recicladas levou a um melhor desempenho, quando comparadas com misturas sem fresado.

O incremento de RAP tendeu a elevar a perda de massa nas amostras recicladas. A adoção de aditivos e modificadores na dosagem de misturas asfálticas recicladas conduziu a uma tendência global de redução dos valores de RT. Em termos gerais, o uso de aditivos químicos tornou possível reduções de temperaturas de mistura e compactação em até 40°C. A adição de zeólita natural, orgânica ou sintética, tornou possível a redução de temperaturas de mistura e compactação numa faixa de 6°C a 10°C. As misturas recicladas mornas preparadas com os aditivos usados pela literatura analisada tenderam a apresentar desempenho melhor do que boa parte das misturas recicladas a quente em termos de características de fadiga e de afundamento, evidenciando a potencial redução energética e de emissões de fumos com a adoção dessa tecnologia.

Em geral, espera-se que a avaliação do comportamento mecânico estudadas ao longo deste trabalho viabilize a utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas, visto ser matéria totalmente possível e viável quanto às exigências mecânicas.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 9935:2011: Agregados - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15617:2015: Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida**. Rio de Janeiro, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. Recursos para Desenvolvimento Tecnológico - RDT, Capítulo XX do Edital 03, Lote 07, item 10 do PER Rodovias BR 116/376 PR e BR 101 Trecho Curitiba – Florianópolis. p.210. 2014.
- AGUILAR, Gildeci Souza de. **Blocos intertravados em concreto asfáltico reciclado à quente: contribuição para o estudo de viabilidade técnica**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- ALMEIDA Jr., Pedro Orlando Borges de. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. 2016. 2017p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- ARRA - ASPHALT RECLAIMING AND RECYCLING ASSOCIATION. **Basic Asphalt Recycling Manual**. Annapolis, Maryland, 2001. 269p.
- BALBO, J. T.; BODI, J. **Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: alternativa para bases de elevado módulo de elasticidade**. In: XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, 2004.
- BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BARROS, Ablenya Grangeiro de. **O efeito do uso de agentes rejuvenescedores encapsulados sobre a autorregeneração de misturas asfálticas**. 2020. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Brasil, 2020.
- BERNUCCI, L. L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, 2008.
- BOHN, Kátia Aline. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 2017. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.
- BONFIM, Valmir. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3. ed. São Paulo: Exceção Editorial, 2010.
- BORDIN, Débora Tanise. **Avaliação da deformabilidade e resistência de misturas 100% RAP com ligante convencional e modificado por polímero**. 2017. TCC (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

BRASIL. **Anuário Estatístico de Transportes: 2010 – 2018**. Ministério da Infraestrutura. Secretaria de Política e Integração. Brasília. 2018.

BRASIL. **Anuário Estatístico de Transportes: 2010 – 2020**. Ministério da Infraestrutura. Secretaria de Política e Integração. Brasília. 2020.

BRUXEL, Daiana Frank. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios laboratoriais e de análise de desempenho**. 2015. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2015.

CANCHANYA, Job Pérez. **Avaliação do comportamento mecânico e reológico de mistura asfáltica com adição de 20% de material fresado – RAP**. 2017. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CENTOFANTE, R *et al.* Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas a quente com inserção de material fresado. **Revista Matéria**, v. 23, n. 03, 2018.

CERATTI, J. A. P. *et al.* **Utilização de ligantes em serviços de pavimentação**. ABEDA, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

CERDEIRA, Joselle Ferraz. **Estudo de misturas asfálticas recicladas a quente contendo 100% de material fresado para execução de tapa-buracos**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

COSTA, C.; PINTO, S. O uso de reciclagem de pavimentos como alternativa para o desenvolvimento sustentável em obras rodoviárias no Brasil. **Brasil Engenharia**, n. 602, p. 96-102, 2011.

CUNHA, Cristiane Bolina. **Avaliação do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado**. 2014. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2014.

CUNHA, C. B. *et al.* Avaliação de concreto asfáltico usinado a quente com incorporação de material fresado. **Revista Matéria**, v. 23, n. 03, 2018.

DAI, Lu Xuan. **Evaluation of warm mix asphalt performance incorporating high reclaimed asphalt pavement content**. 2016. Dissertação (Mestrado) - University of Canterbury, 2016.

DAI LU, X; Saleh, M. Evaluation of warm mix asphalt performance incorporating high RAP content. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 43, n.4, 2016)

DARTORA, Natália Catto. **Caracterização Mecânica de uma mistura asfáltica composta por material fresado e cal**. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER 043/1995 - ME:** Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall...Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER 138/1994 - ME:** Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, Brasil, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER 383/1999 - ME:** Desgaste por abrasão de mistura betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **DNER 385/1999 - ES:** Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro, Brasil. 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – DNIT. **DNIT 031/2006 – ES:** Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – DNIT. **DNIT 133/1994 – ME:** Misturas betuminosas - determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 135/2018 – ME:** Pavimentação asfáltica: misturas asfálticas: determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro: DNIT, 2010a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 136/2018 – ME.** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 180/2018 – ME:** Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 183/2018 – ME:** Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 184/2018 – ME:** Pavimentação – Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 416/2019 – ME:** Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, Brasil. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **DNIT 433/2021 – PRO:** Pavimentação – Levantamento do percentual de área trincada e de afundamento de trilha de roda de pavimento asfáltico em trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão – Procedimento. Rio de Janeiro, Brasil. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** Rio de Janeiro, RJ, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Planilhas do Sistema Nacional de Viação**, n. 202108A. Ministério dos Transportes. Brasília. 2021.

DOMINGUES, M. P.; BALBO, J. T.; **Estudos de características de misturas asfálticas recicladas a quente com o emprego de usinas transportáveis de pequeno porte.** 2006.

Disponível em:

<http://sites.poli.usp.br/ptr/lmp/download/Reciclagem%20Marcelo%20e%20Balbo%202006.pdf>. Acesso em: 05 out. 2021.

ESTEVES, Sara Ferreira. **Reciclagem de pavimentos betuminosos: influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio com emulsão.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.

GASPAR, Matheus de Souza. **Mecanismos de ativação e interação entre ligantes na reciclagem asfáltica a quente e morna.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

GENNESSEAU, Manuela de Mesquita Lopes. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GONZÁLEZ-LEÓN, J. A.; BARRETO, G. **Properties of Warm Mix Asphalts with Reclaimed Asphalt Pavement.** Proceedings of the Fifty-Ninth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA): Winnipeg, Manitoba. 2014.

HILL, Brian. **Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement.** 2011. Tese (Mestrado) - Graduate College of the University of Illinois, 2011.

HUANG, B. *et al.* Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, n. 1929, p. 37-45, 2005.

HUANG, B. *et al.* Laboratory Investigation of Cracking Resistance of Hot-Mix Asphalt Field Mixtures Containing Screened Reclaimed Asphalt Pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s.l.], vol. 23, n. 11, 2011.

KHAN, M. Z. H. *et al.* Performance of High Content Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Asphaltic Mix with Crumb Rubber Modifier and Waste Engine Oil as Rejuvenator. **Applied Sciences**, v. 11, 11. ed., n.5226, 2021.

KUCHIISHI, A. K. *et al.* **Influência da granulometria nas propriedades mecânicas de misturas recicladas a frio estabilizadas com emulsão asfáltica e cimento portland.** In: Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, 2017, Medellín. Medellín, Colômbia; 2017.

LI, M. *et al.* Influence of rejuvenator preheating temperature and recycled mixture's curing time on performance of hot recycled mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 295. 2021

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente.** Fortaleza: Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, 2003.

LO PRESTI, D. *et al.* On the Degree of Binder Activity of reclaimed asphalt and Degree of Blending with recycling agents. **Road Materials and Pavement Design**, [s. l.], v.21, n. 8, p. 2071-2090, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1607537>. Acesso em: 18 ago. 2021.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Utilização do Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica;** efeito da Compactação por Impacto e Giratória. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos.** Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2014.

MIRÓ, R. *et al.* Evaluation of high modulus mixture behavior with high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentages for sustainable road construction. **Construction and Building Materials**, v. 25, 10. Ed., p. 3854-3862, 2011.

MORILHA JUNIOR, A., **Estudo sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas suas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Carina, Florianópolis, 2004.

NASCIMENTO, Luís Alberto Herrmann do. **Nova abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente.** 2008. 204p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, 2008.

NASCIMENTO, Maria das Vitórias do. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

OLIVEIRA, A. M. *et al.* **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas contendo material fresado a partir da dosagem Marshall.** In: VII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

OLIVEIRA, Jardel Andrade de. **Avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas Mornas em laboratório e em campo.** 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, 2013.

PHAM, N. H. *et al.* Fatigue and Thermal Cracking of Hot and Warm Bituminous Mixtures with Different RAP Contents. **Sustainability** 2020, v.12. 23. ed. n. 9812, 2020.

PODOLSKY, J. H. *et al.* Rheology and mix performance of rejuvenated high RAP field produced hot mix asphalt with a soybean derived rejuvenator. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22. 8. ed. 2020.

PUTMAN, B.J.; XIAO, F. **Investigation of warm mix asphalt (wma) technologies and increased percentages of reclaimed asphalt pavement (rap) in asphalt mixtures.** 2012.

REIS, Ana Carolina da Cruz. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida.** Dissertação de mestrado. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

SANCHEZ-ALONSO, E. *et al.* Experimental Study to Design Warm Mix Asphalts and Recycled Warm Mix Asphalts Using Natural Zeolite as Additive for Sustainable Pavements. **Sustainability** 2020, v.12. 3. ed. n. 980, 2020.

SANTANA, Emerson Pereira de. **Estudos das propriedades físicas e mecânicas de misturas asfálticas recicladas com materiais fresados: estudo de caso - BR-230.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2009.

SEGUNDO, I. G. R. *et al.* Misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado. **Transportes**, v. 24, n. 4, p. 85-94, 2016.

SENGOZ, B. *et al.* Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures with Recycled Asphalt Pavement. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, v. 61, n.1, p. 117–127, 2016.

SIQUEIRA, Mateus Valdevino. **Avaliação de propriedades mecânicas de misturas asfálticas incorporadas com elevado teor de material fresado.** 2021. TCC (Curso de Engenharia Civil) - Departamento Acadêmico de Infraestrutura e Construção Civil, Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2021

SOTOODEH-NIA, Z. *et al.* Effect of two novel bio-based rejuvenators on the performance of 50% RAP mixes – a statistical study on the complex modulus of asphalt binders and asphalt mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 22, 5. ed. 2019.

SOUZA, Firmino Sávio Vasconcellos de. **Avaliação do desempenho de pavimentos restaurados por meio de técnicas de reciclagem de materiais de pavimentação.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

SUZUKI, Karina Yuriko. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado.** 2019. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade São Paulo, São Paulo, 2019.

TAO, M.; MALLICK, R. B. Effects of warm-mix asphalt additives on workability and mechanical properties of reclaimed asphalt pavement material. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, n. 2126, p.151-160, 2009.



- TOBIAS, Breno Lacerda. **Dosagem de misturas asfálticas recicladas contendo pelo menos 25% de material fresado**. 2013. Trabalho de conclusão de curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- TORRES, Paulo Roberto Barreto. **Estudo de misturas asfálticas recicladas modificadas com a adição de óleo vegetal residual**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.
- VALDÉS, G. *et al.* Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). **Construction and Building Materials**, Vol. 25, p. 1289-1297. 2011.
- ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B. Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 1, p. 39-55, 2015.
- ZHAO, S. *et al.* Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 92-100, 2013.
- ZUBARAN, Marcelo. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto**. 2014. Dissertação (Mestrado) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

## APÊNDICE A – TABELA 4 - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE ESTABILIDADE/ FLUÊNCIA MARSHALL

% RAP REFERÊNCIA	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	37%	40%	45%	50%	60%	65%	70%	75%	100%
ESTABILIDADE [Kgf]/ FLUÊNCIA [mm] MARSHALL																	
Cerdeira (2018) 0% CAPsem aditivo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2451,23/ 4,25
Cerdeira (2018) 0,5% CAPsem aditivo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2475,97/ 3,33
Cerdeira (2018) 1% CAP sem aditivo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2612,45/ 5,33
Cerdeira (2018) 0% CAPcom aditivo surfactante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2017,62/ 5,00
Cerdeira (2018) 0,5% CAPcom aditivo surfactante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2006,39/ 4,60
Cerdeira (2018) 1% CAPcom aditivo surfactante	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1774,77/ 6,00
Cerdeira (2018) 0% CAP com agente rejuvenecedor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2229,71/ 4,67
Cerdeira (2018) 0,5% CAP com agente rejuvenecedor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2207,00/ 4,67
Cerdeira (2018) 1% CAP com agente rejuvenecedor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1391,94/ 4,67
Cunha (2014) (2,5% CAP)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	536,12/ 3,49	-	-	-	-	838,20/ 3,90
Cunha (2014) (3% CAP)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	796,45/ 3,19	-	-	-	-	1046,68/ 4,25



compactador Marshall a 145°C (com aditivo)																		
Sánchez-Alonso et al (2020) compactador Marshall a 135°C (com aditivo)	-	-	1203,22	-	1223,62	-	1580,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sánchez-Alonso et al (2020) compactador Marshall a 125°C (com aditivo)	-	-	1142,04	-	1172,63	-	1427,55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sánchez-Alonso et al (2020) compactador SUPERPAVE a 145°C (com aditivo)	-	-	1325,58	-	1376,57	-	1560,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sánchez-Alonso et al (2020) compactador SUPERPAVE a 135°C (com aditivo)	-	-	1223,62	-	1325,58	-	1549,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sánchez-Alonso et al (2020) compactador SUPERPAVE a 125°C (com aditivo)	-	-	1305,20	-	1325,58	-	1631,49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Khan et al (2021)	1040,11/ 3,0	-		-		-	1213,47/ 3,1	-	-	-	-	1131,89/ 3,4	-	-	1060,51/ 3,4	-	1040,11/ 4,0	
Li et al (2021) mistura com AR pré-aquecido a 30°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1376,62	-	-	-	-	-	-	-	-
Li et al (2021) mistura com AR pré-aquecido a 70°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1427,61	-	-	-	-	-	-	-	-
Li et al (2021) mistura com AR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1325,63	-	-	-	-	-	-	-	-

pré-aquecido a 110°C																	
Li et al (2021) mistura com aditivo com 2h de cura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1427,61	-	-	-	-	-	-	-
Li et al (2021) mistura com aditivo com 3h de cura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1600,96	-	-	-	-	-	-	-
Li et al (2021) mistura com aditivo com 4h de cura	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1886,48	-	-	-	-	-	-	-



envelhecimento )																	
Lima (2003) <i>com AR</i>	3200,00	-	4776,0 0	-	-	-	7524,00	-	-	-	-	8901,00	-	-	-	-	-
Nascimento (2011) <i>(Compactação Marshall)</i>	-	2841,0 0	3206,0 0	2864,0 0	2445,00	3704,0 0	2805,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nascimento (2011) <i>(Compactação SUPERPAVE)</i>	-	4489,0 0	4743,0 0	4166,0 0	4375,00	3945,0 0	3984,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vasconcelos (2003) apud Nascimento (2011) <i>(Compactação Marshall)</i>	2680,00	-	2822,0 0		-	-	-	-	-	-	-	3163,00	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em laboratório <i>(mistura a quente)</i>	-	-	-	6056,0 0	-	-	-	7144,0 0	-	-	-	8435,00	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em laboratório <i>(mistura morna) sem aditivo</i>	-	-	-	2672,0 0	-	-	-	3921,0 0	-	-	-	4786,00	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em campo <i>(mistura a quente)</i>	-	-	-	2907,0 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em campo <i>(mistura morna) sem aditivo</i>	-	-	-	2747,0 0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Santana (2009) <i>(misturas com filler)</i>	6519,00	-	7975,0 0	-	-	-	9980,00	-	-	-	-	13072,0 0	-	-	-	13680,0 0	-
Zubaran (2014) <i>misturas fabricadas em laboratório</i>	9923,00	-	-	-	-	-	9158,00	-	-	-	-	9649,00	-	-	-	-	-

Zubaran (2014) <i>misturas fabricadas em usina</i>	8562,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8287,10	-	-	-	-	-
Reis (2013) 4,0% CAP <i>(laboratório)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12000,0 0
Reis (2013) 4,2% CAP <i>(laboratório)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6840,00
Reis (2013) 5,5% CAP <i>(laboratório)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4914,00
Reis (2013) 4,0% CAP <i>(campo)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5514,00
Reis (2013) 4,2% CAP <i>(campo)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10851,0 0
Reis (2013) 5,5% CAP <i>(campo)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6060,00
Segundo et al (2016)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14487,0 0
Segundo et al (2016) <i>(mistura com refugo)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14812,0 0
Suzuki (2019)	7316,00	-	5075,0 0	-	5098,00	5829,0 0	-	9651,0 0	-	-	-	8135,00	-	8656,0 0	-	-	-
Suzuki (2019) <i>com AR</i>	-	-	-	-	-	6692,0 0	-	-	-	-	-	6397,00	-	-	-	-	-
Valdés et al (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7014,00	-	-	7701,0 0	-	-	-	-
Valdés et al (2011) <i>com envelhecimento de 6 meses</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4837,00	-	-	5699,0 0	-	-	-	-
Valdés et al (2011) <i>com envelhecimento de 12 meses</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6730,00	-	-	5906,0 0	-	-	-	-
Valdés et al (2011) <i>com</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6390,00	-	-	6820,0 0	-	-	-	-



<i>envelhecimento de 24 meses</i>																	
Putman e Xiao (2012)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Putman e Xiao (2012) (misturas a quente) agregados "B" PG 64-22	14314,02	-	-	-	15093,15	-	16996,18	-	-	18023,53	-	21808,89	-	-	-	-	-
Putman e Xiao (2012) (misturas a quente) agregados "B" PG 58-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11080,27	-	18009,74	-	-	-	-	-
Putman e Xiao (2012) (misturas a quente) agregados "C" PG 64-22	10418,35	-	-	-	8370,53	-	11128,53	-	-	16941,20	-	15058,68	-	-	-	-	-
Putman e Xiao (2012) (misturas a quente) agregados "c" PG 58-28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11418,12	-	9701,27	-	-	-	-	-
Torres (2020) (misturas com 0% de óleo vegetal residual)	6997,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7272,00	-	-	-	-
Torres (2020) (misturas com 2% de óleo vegetal residual)	-	-	-	-	-	-	4654,67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torres (2020) (misturas com 4% de óleo vegetal residual)	3507,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4961,00	-	-	-	-

Bohn (2017) (mistura a quente com CAP 50/70)	5685,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) (mistura morna com CAP 50/70)	5515,00	-	-	-	-	7417,00	-	-	-	-	-	8800,00	-	-	-	-	-
Bohn (2017) (mistura a quente com CAP 60/85)	5433,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) (mistura morna com CAP 60/85)	5244,00	-	-	-	-	6986,00	-	-	-	-	-	9338,00	-	-	-	-	-
Siqueira (2021)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6830,00	-	-	-	-	-

## APÊNDICE C - TABELA 6 - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE MÓDULO COMPLEXO/ DINÂMICO

% RAP REFERÊNCIA	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	37%	40%	45%	50%	60%	65%	70%	75%	100%
<b>MÓDULO COMPLEXO (MÓDULO DINÂMICO) E00/E0 [MPa]</b>																	
Bordin (2017)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	40/ 35233
Centofante et al (2018)	100/ 24540	-	100/ 29700	-	100/ 27000	-	100/ 30700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Genesseaux (2015) (mistura a quente não envelhecida)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14590 Mpa	-	-	-	-	-
Genesseaux (2015) (mistura a quente envelhecida)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15847 Mpa	-	-	-	-	-
Genesseaux (2015) (mistura morna não envelhecida)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13721 Mpa	-	-	-	-	-
Genesseaux (2015) (mistura morna envelhecida)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16035 Mpa	-	-	-	-	-
González-León et al. (2014) (mistura a quente)	-	-	-	-	-	-	15000 Mpa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
González-León et al. (2014) (mistura morna com aditivo surfactante CBRT1)	-	-	-	-	-	-	12900 Mpa	-	-	-	-	14000 Mpa	-	-	-	-	-
González-León et al. (2014) (mistura morna com aditivo surfactante CBRT2)	-	-	-	-	-	-	12800 MPA	-	-	-	-	13000 Mpa	-	-	-	-	-
Khan et al (2021)	13500,00	-	-	-	-	-	13200,00	-	-	-	-	15000,00	-	-	16000,00	-	17000,00
Miró et al (2011) (4,5% CAP)	10500,00	-	-	10900,00	-	-	11500,00	-	-	-	-	11000,00	-	-	-	-	-
Miró et al (2011) (5,0% CAP)	9500,00	-	-	10300,00	-	-	10200,00	-	-	-	-	10200,00	-	-	-	-	-
Miró et al (2011) (5,5% CAP)	9600,00	-	-	9600,00	-	-	9700,00	-	-	-	-	10000,00	-	-	-	-	-

## APÊNDICE D - TABELA 7 - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

% RAP REFERÊNCIA	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	37%	40%	45%	50%	60%	65%	70%	75%	100%
<b>RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTÁTICA (INDIRETA POR COMPRESSÃO DIAMETRAL) (RT) [MPa]</b>																	
Aguilar (2016)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,740
Balbo e Bodi (2004) ( <i>material fresado</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,424
Cerdeira (2018) <i>sem aditivo</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,280
Cerdeira (2018) <i>com aditivo surfactante</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,830
Cerdeira (2018) <i>com agente rejuvenescedor</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,410
Centofante et al (2018)	1,420	-	1,790	-	2,080	-	2,360	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cunha (2014)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,290	-	-	-	-	1,460
Dai (2016) <i>com aditivo Evotherm</i>	-	-	-	-	-	1,100	-	-	-	-	-	1,350	-	-	-	-	-
Dai (2016) <i>com aditivo Sylvaroad</i>	-	-	-	-	-	0,850	-	-	-	-	-	1,050	-	-	-	-	-
Huang et al (2011) (mistura de ag. calcário sem envelhecimento)	1,20	-	1,30	-	1,35	-	1,40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Huang et al (2011) (mistura de ag. calcário com envelhecimento)	1,40	-	1,45	-	1,46	-	1,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Huang et al (2011) (mistura de cascalho sem envelhecimento)	1,40	-	1,45	-	1,60	-	1,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Huang et al (2011) (mistura de cascalho com envelhecimento)	1,50	-	1,60	-	1,75	-	1,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lima (2003) <i>com AR</i>	1,20	-	1,30	-	-	-	1,30	-	-	-	-	1,60	-	-	-	-	-
Nascimento (2011) ( <i>Compactação Marshall</i> )	-	0,74	0,96	1,05	0,92	0,96	0,91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nascimento (2011) ( <i>Compactação SUPERPAVE</i> )	-	1,15	1,24	1,14	1,17	0,99	1,05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vasconcelos (2003) apud Nascimento (2011) ( <i>Compactação Marshall</i> )	1,02	-	0,92	-	-	-	-	-	-	-	-	1,15	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em laboratório ( <i>mistura a quente</i> )	-	-	-	1,40	-	-	-	1,80	-	-	-	2,20	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em laboratório ( <i>mistura morna sem aditivo</i> )	-	-	-	1,00	-	-	-	1,50	-	-	-	1,50	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em campo ( <i>mistura a quente</i> )	-	-	-	0,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em campo ( <i>mistura morna sem aditivo</i> )	-	-	-	0,60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Santana (2009) ( <i>misturas com filler</i> )	1,13	-	1,12	-	-	-	1,43	-	-	-	-	1,96	-	-	-	1,97	-

Santana (2009) ( <i>misturas sem filler</i> )	-	-	1,02	-	-	-	1,51	-	-	-	-	1,76	-	-	-	2,04	1,940
Zubaran (2014) <i>misturas fabricadas em laboratório</i>	2,93	-	-	-	-	-	1,84	-	-	-	-	2,76	-	-	-	-	-
Zubaran (2014) <i>misturas fabricadas em usina</i>	1,90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,12	-	-	-	-	-
Reis (2013) 4,0% CAP ( <i>laboratório</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,340
Reis (2013) 4,2% CAP ( <i>laboratório</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,280
Reis (2013) 5,5% CAP ( <i>laboratório</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,330
Reis (2013) 4,0% CAP ( <i>campo</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,600
Reis (2013) 4,2% CAP ( <i>campo</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,730
Reis (2013) 5,5% CAP ( <i>campo</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,230
Segundo et al (2016)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,90	3,100
Segundo et al (2016) ( <i>mistura com refugo</i> )	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,90	-
Suzuki (2019)	2,01	-	2,22	-	2,26	2,29	-	2,52	-	-	-	2,63	-	2,59	-	-	-
Suzuki (2019) <i>com AR</i>	-	-	-	-	-	2,28	-	-	-	-	-	2,04	-	-	-	-	-
Valdés et al (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,51	-	-	3,52	-	-	-	-
Valdés et al (2011) <i>com envelhecimento de 6 meses</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,53	-	-	2,91	-	-	-	-
Valdés et al (2011) <i>com envelhecimento de 12 meses</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,86	-	-	2,83	-	-	-	-
Torres (2020) ( <i>misturas com 0% de óleo vegetal residual</i> )	1,17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,59	-	-	-	-
Torres (2020) ( <i>misturas com 2% de óleo vegetal residual</i> )	-	-	-	-	-	-	1,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torres (2020) ( <i>misturas com 4% de óleo vegetal residual</i> )	0,68	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,59	-	-	-	-
Bohn (2017) ( <i>mistura a quente com CAP 50/70</i> )	1,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) ( <i>mistura morna com CAP 50/70</i> )	1,26	-	-	-	-	2,01	-	-	-	-	-	2,64	-	-	-	-	-
Bohn (2017) ( <i>mistura a quente com CAP 60/85</i> )	1,64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) ( <i>mistura morna com CAP 60/85</i> )	1,78	-	-	-	-	2,32	-	-	-	-	-	2,99	-	-	-	-	-
Siqueira (2021)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,61	-	-	-	-	-



Zhao et al (2013) (mistura quente para revestimento com espumação)	-	-	-	360000 c	-	-	250000 c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zhao et al (2013) (mistura morna para revestimento com Evotherm)	-	-	-	210000 c	-	-	350000 c	-	-	350000 c	-	-	-	-	-	-	-
Zhao et al (2013) (mistura quente para revestimento com Evotherm)	-	-	-	125000 c	-	-	90000c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Khan et al (2021)	1340c	-	-	-	-	-	1370c	-	-	-	-	1400c	-	-	1360c	-	1270 c

## APÊNDICE F - TABELA 9 - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE CREEP DINÂMICO

% RAP REFERÊNCIA	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	37%	40%	45%	50%	60%	65%	70%	75%	100%
<b>CREEP DINÂMICO</b>																	
Bordin (2017)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7200
Centofante et al (2018)	60	-	150	-	262	-	540	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dai (2016) com aditivo Evotherm	-	-	-	-	-	4750	-	-	-	-	-	10000	-	-	10000	-	-
Dai (2016) com aditivo Sylvaroad	-	-	-	-	-	2500	-	-	-	-	-	8800	-	-	10000	-	-
Dai Lu e Saleh (2016) com aditivo Evotherm	-	-	-	-	-	4600	-	-	-	-	-	10000	-	-	10000	-	-
Oliveira (2013) em laboratório (mistura a quente)	-	-	-	186	-	-	-	352	-	-	-	983	-	-	-	-	-
Oliveira (2013) em laboratório (mistura morna) sem aditivo	-	-	-	65	-	-	-	63	-	-	-	64	-	-	-	-	-
Zubaran (2014) misturas fabricadas em laboratório	260	-	-	-	-	-	280	-	-	-	-	840	-	-	-	-	-
Suzuki (2019)	252	-	309	-	353	188	-	1198	-	-	-	1199	-	1833	-	-	-
Suzuki (2019) com AR	-	-	-	-	-	413	-	-	-	-	-	763	-	-	-	-	-
Zhao et al (2013) (mistura morna para base com espumação)	230	-	-	-	-	-	1400	1450	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zhao et al (2013) (mistura morna para revestimento com espumação)	-	-	-	95	200	-	230	-	-	300	-	-	-	-	-	-	-
Zhao et al (2013) (mistura quente para revestimento com espumação)	-	-	-	100	-	-	550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torres (2020) (misturas com 0% de óleo vegetal residual)	269	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	425	-	-	-	-
Torres (2020) (misturas com 2% de óleo vegetal residual)	-	-	-	-	-	-	253	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Torres (2020) (misturas com 4% de óleo vegetal residual)	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	222	-	-	-	-
Bohn (2017) (mistura a quente com CAP 50/70)	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) (mistura morna com CAP 50/70)	28	-	-	-	-	125	-	-	-	-	-	321	-	-	-	-	-
Bohn (2017) (mistura a quente com CAP 60/85)	142	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) (mistura morna com CAP 60/85)	178	-	-	-	-	617	-	-	-	-	-	1320	-	-	-	-	-



## APÊNDICE G - TABELA 10 - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE DESGASTE CÂNTABRO

% RAP REFERÊNCIA	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	37%	40%	45%	50%	60%	65%	70%	75%	100%
DESGASTE CÂNTABRO [%]																	
Aguilar (2016)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,55
Cerdeira (2018) <i>sem aditivo</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8,16
Cerdeira (2018) <i>com aditivo surfactante</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,50
Cerdeira (2018) <i>com agente rejuvenescedor</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,35
Centofante et al (2018)	5,29	-	6,35	-	6,68	-	8,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Segundo et al (2016)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,00	11,00
Segundo et al (2016) <i>(mistura com refugo)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,00	-
Khan et al (2021)	2,40	-	-	-	-	-	2,60	-	-	-	-	3,50	-	-	2,10	-	1,30
Bohn (2017) <i>(mistura a quente com CAP 50/70)</i>	9,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) <i>(mistura morna com CAP 50/70)</i>	6,97	-	-	-	-	6,89	-	-	-	-	-	10,58	-	-	-	-	-
Bohn (2017) <i>(mistura a quente com CAP 60/85)</i>	5,46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bohn (2017) <i>(mistura morna com CAP 60/85)</i>	4,84	-	-	-	-	9,35	-	-	-	-	-	8,16	-	-	-	-	-
Siqueira (2021)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,53	-	-	-	-	-

## APÊNDICE H - TABELA 11 - COMPILAÇÃO DE RESULTADOS DE SUSCETIBILIDADE À UMIDADE

% RAP REFERÊNCIA	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	37 %	40%	45%	50%	60%	65%	70%	75%	100%
SUSCETIBILIDADE À UMIDADE INDUZIDA (LOTTMAN) (RRT[%])																	
Canchanya (2017)	-	-	-	-	87,40 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Centofante et al (2018) <i>(Modificado)</i>	110,00 %	-	103,00 %	-	79,00 %	-	68,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dai (2016) <i>com aditivo Evotherm</i>	-	-	-	-	-	82,05%	-	-	-	-	-	72,44%	-	-	77,27 %	-	-
Dai (2016) <i>com aditivo Sylvaroad</i>	-	-	-	-	-	57,48%	-	-	-	-	-	56,06%	-	-	67,10 %	-	-
Dai Lu e Saleh (2016) <i>com aditivo Evotherm</i>	-	-	-	-	-	82,10%	-	-	-	-	-	72,40%	-	-	77,30 %	-	-
Gennesseaux (2015) <i>mistura a quente não envelhecida (Ensaio Duriez)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98,00%	-	-	-	-	-
Gennesseaux (2015) <i>mistura morna não envelhecida (Ensaio Duriez)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	91,00%	-	-	-	-	-
Gennesseaux (2015) <i>mistura morna envelhecida (Ensaio Duriez)</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	89,00%	-	-	-	-	-
Hill (2011) <i>(mistura a quente)</i>	67,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76,00 %	-	-	-	-	-	-
Hill (2011) <i>(mistura com aditivo Advera)</i>	52,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70,00 %	-	-	-	-	-	-
Hill (2011) <i>(mistura com aditivo Sasobit)</i>	61,00%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74,00 %	-	-	-	-	-	-





