



2026

Análise comparativa de mistura asfáltica convencional e mistura asfalto-borracha

Paulo Henrique Barbosa Silva ^a; Daniel Anijar de Matos ^b

^a Aluno de Graduação em Engenharia Civil, paulo_henrique@ufms.br

^b Professor Orientador, Doutor em Engenharia de Transportes, daniel.matos@ufms.br

Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Av. Costa e Silva, s/nº | Bairro Universitário | 79070-900 | Campo Grande, MS, Brasil.

RESUMO

O presente trabalho aborda a degradação acelerada da malha rodoviária brasileira frente ao aumento do tráfego de carga e intempéries, propondo o uso de asfaltos modificados como alternativa para ampliar a durabilidade dos pavimentos. O objetivo central é realizar uma análise comparativa entre uma mistura asfáltica convencional e uma mistura modificada com borracha de pneu (processo via úmida, tipo *terminal blending*), avaliando o comportamento volumétrico e mecânico por meio de ensaios laboratoriais. A metodologia empregou a dosagem Marshall para determinar o teor ótimo de projeto de ambas as misturas, utilizando agregados de origem basáltica e ligante modificado do tipo AB-8. Foram realizados ensaios de caracterização de agregados, granulometria (Faixa C do DNIT), estabilidade, fluência e resistência à tração. Os resultados demonstraram que a mistura asfalto-borracha apresentou um teor “ótimo” superior ao da mistura convencional. Esse incremento é justificado pela maior viscosidade do ligante e pela necessidade de um filme mais espesso para revestir os agregados. Notadamente, a mistura modificada obteve uma resistência à tração superior e maior capacidade de deformação elástica (fluência) sem perda de coesão interna. Conclui-se que o uso do ligante asfalto-borracha é tecnicamente viável e vantajoso, pois proporciona ganho de desempenho mecânico e sustentabilidade ambiental através da destinação final de pneus inservíveis.

Palavras-chave: Pavimento flexível; CAP modificado; Asfalto-borracha; Mistura densa; Dosagem Marshall.

ABSTRACT

This study addresses the accelerated degradation of the Brazilian road network due to increased cargo traffic and severe weather conditions, proposing the use of modified asphalts as an alternative to extend pavement durability. The primary objective is to conduct a comparative analysis between a conventional asphalt mixture and a tire-rubber modified mixture (wet process, terminal blending type), evaluating their volumetric and mechanical behavior through laboratory tests. The methodology employed Marshall dosage to determine the optimal design binder content for both mixtures, using basaltic aggregates and AB-8 modified binder. Tests included aggregate characterization, particle size analysis (DNIT Range C), stability, flow, and tensile strength. The results demonstrated that the asphalt-rubber mixture presented an "optimal" binder content superior to that of the conventional mixture. This increase is justified by the higher viscosity of the modified binder and the need for a thicker film to coat the aggregates. Notably, the modified mixture achieved superior tensile strength and a higher capacity for elastic deformation (flow) without loss of internal cohesion. It is concluded that the use of asphalt-rubber binder is technically viable and advantageous, providing gains in mechanical performance and environmental sustainability through the final disposal of waste tires.

Keywords: Flexible pavement; Modified binder; Asphalt-rubber; Dense mixture; Marshall dosage.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade da infraestrutura rodoviária brasileira está vastamente vinculada ao desempenho de suas atividades econômicas e sociais. Segundo a Pesquisa CNT de Rodovias (2024), a malha rodoviária tem cerca de 1,5 milhão de quilômetros. Porém, somente 12,4% é pavimentada, o que corresponde a 213,5 mil quilômetros, em sua grande maioria feita de pavimento asfáltico flexível, e quanto a condição das vias observadas, 67% foi classificada como regular, ruim ou péssimo.

Neste cenário, o revestimento asfáltico é a solução adotada em cerca de 95% das estradas pavimentadas do Brasil. Essa preferência se reflete não apenas nas rodovias, mas também no arruamento urbano (BERNUCCI *et al.*, 2022).

Todavia, a cada ano, o país bate recordes na produção agrícola, conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2025; 2026), sendo que milhões de toneladas de grãos são escoadas principalmente pelo modal rodoviário, conforme o Anuário Agrologístico da CONAB (2025). Com isso, há significativo, e constante, crescimento da frota de veículos de carga. Por consequência, o aumento das solicitações de tráfego, aliado às intempéries mais severas, têm acelerado os processos de degradação dos pavimentos convencionais, resultando na incidência de variadas patologias, ou defeitos, nas rodovias nacionais.

Não obstante, para reduzir a necessidade de manutenção constante, aumentar a vida útil e possibilitar melhorias nas propriedades do pavimento, uma alternativa viável que vem sendo tomada é o uso de asfaltos modificados.

Segundo Oliveira *et al.* (2019), a modificação do ligante com borracha de pneu é uma alternativa viável tanto para a recuperação de vias quanto para a extensão de sua durabilidade. Além de contribuir para a redução de resíduos no meio ambiente, essa técnica resulta no incremento da consistência e das propriedades elásticas do ligante, o que melhora a resistência do pavimento a defeitos como trincas por fadiga e deformações permanentes.

Considerando o potencial dessa tecnologia, o presente trabalho propõe uma análise comparativa entre uma mistura asfáltica convencional e uma mistura modificada com borracha de pneu, visando avaliar, por meio de ensaios laboratoriais, os parâmetros volumétricos e mecânicos dos teores de projeto das misturas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

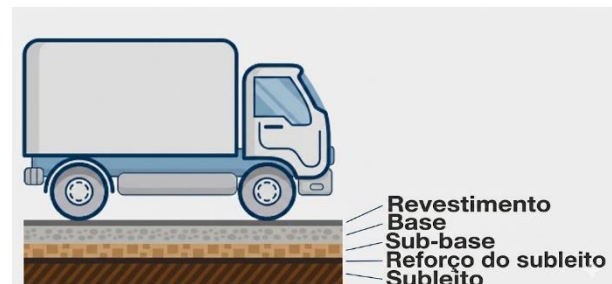
2.1. Pavimentos

Os pavimentos consistem de um sistema multicamadas construído sobre um subleito terrapleno. Essa estrutura tem o papel fundamental de distribuir os esforços mecânicos provenientes dos veículos e resistir à ação do clima, assegurando a trafegabilidade com adequada segurança e comodidade. Em função da rigidez do conjunto, são classificados em: rígido; semirrígido e flexível (ODA, 2017).

2.1.1. Pavimentos asfálticos ou flexíveis

Conforme Bernucci *et al.* (2022), a designação de um pavimento como asfáltico vincula-se à composição do revestimento, obrigatoriamente formada por agregados, filer e ligantes betuminosos. Do ponto de vista estrutural, acima do subleito, o sistema organiza-se em quatro camadas fundamentais: o revestimento asfáltico, a base, a sub-base e o reforço do subleito (figura 1). Podendo esta estrutura diferir conforme os resultados do dimensionamento do pavimento.

Figura 1 – Camadas de um pavimento asfáltico. Fonte: Pesquisa CNT de rodovias (2024), adaptado



2.1.2. Revestimento

Como camada superior do sistema de um pavimento flexível, o revestimento recebe diretamente as cargas dos veículos e a ação climática. Desempenha papel crucial ao resistir aos esforços do tráfego, dissipando as tensões para as camadas subjacentes, além de atuar na impermeabilização da estrutura. Pode ser executada em uma ou mais camadas conforme a necessidade técnica (CNT, 2017).

2.2. Asfalto

O asfalto é definido como um material aglutinante, derivado do petróleo (por destilação ou processos naturais), cujo principal constituinte é o betume. Conforme explica Negrão (2006), trata-se de uma substância de cor pardo-escuro a negra, composta por hidrocarbonetos, que apresenta consistência variável e versatilidade de aplicação.

2.2.1. Ligante asfáltico ou cimento asfáltico de petróleo – CAP

O CAP, que é produto da destilação do petróleo, é obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos flexíveis.

Utilizado como ligante dos agregados minerais na produção de misturas asfálticas, é um material semissólido à temperatura ambiente, com propriedades adesivas, termoplástico, impermeável à água, viscoelástico e resistente à ação da maioria dos produtos inorgânicos e duráveis. Possui a temperatura associada a todas as suas propriedades físicas. Por isso é necessário que seja aquecido para que tenha a consistência adequada ao uso como revestimento asfáltico (ABEDA, 2010; MADUREIRA, 2023).

Para Bernucci *et al.* (2022), a característica de termoviscoelasticidade do ligante asfáltico manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento e à temperatura de serviço.

No Brasil, a classificação desses ligantes segue o critério de penetração, regulamentado pela Resolução ANP nº 897/2022. Os tipos especificados são: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200.

2.2.2. Ligante asfáltico modificado por polímero ou asfalto modificado por polímero – AMP

Os Asfaltos Modificados com Polímeros (AMP) são ligantes asfálticos que recebem a adição de agentes poliméricos previamente à sua incorporação na mistura asfáltica. Essa modificação tem como objetivo principal alterar o comportamento reológico do material, conferindo-lhe maior elasticidade e aprimorando suas propriedades mecânicas e de resistência (MANOEL, 2015; MATOS 2017).

2.2.2.1. Ligante asfáltico modificado por borracha via úmida (*wet process*)

As características adquiridas pelo CAP modificado com borracha dependem do tipo de borracha usada, da proporção da mesma adicionada ao CAP, do tamanho das partículas de borracha adicionadas, do tempo de mistura, da composição do CAP e da temperatura da mistura reacional (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

No processo de reaproveitamento pela via úmida, partículas finas de borracha de pneumáticos inservíveis são misturadas ao ligante asfáltico aquecido (KLINSKY; FARIA, 2017), e conforme a norma DNIT 111/2009 – EM, resulta em uma

composição na qual a borracha moída representa geralmente de 15 a 20% da massa do ligante.

2.2.2.2. Processo via úmida, do tipo “*Terminal Blending*” (estocável)

Nesse processo a borracha moída é misturada com o CAP em um terminal especial, resultando em um ligante estável, consistente (figura 2), relativamente homogêneo e que pode ser estocado para uso posterior. Para assegurar a qualidade desse ligante modificado, o processo exige atenção especial às temperaturas de mistura e à proporção correta de borracha, visando uma reação química homogênea (HEITZMAN, 1991 *apud* CAMARGO, 2016).

Figura 2 – Exemplo de maior consistência do asfalto-borracha no momento da usinagem:
(a) Asfalto convencional; (b) Asfalto-borracha.

Fonte: Bernucci *et al* (2022)



Como descrito por Maia (2023), o processo de produção do asfalto-borracha estocável exige altas temperaturas e agitação de alto cisalhamento. Essas condições promovem a desvulcanização e despolimerização da borracha, facilitando sua reação química com o CAP e resultando em um produto final de menor viscosidade.

Os cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha são classificados, segundo sua viscosidade, em AB8 e AB22, tanto pela Resolução ANP nº 897/2022, como pela norma DNIT 111/2009 – EM.

2.3. Agregado

Agregado é um termo genérico para os materiais inertes e granulares como as areias, os pedregulhos e as rochas minerais britadas, com dimensões e propriedades adequadas para produção de misturas asfálticas (LEITE *et al.*, 2021), e compõem o maior volume de uma mistura.

Na pavimentação podem ser classificados ou agrupados segundo suas propriedades, duas das mais importantes são: origem e tamanho.

2.3.1. Quanto à origem

Quanto à origem, os agregados são classificados em: artificial, natural e reciclado (BARBOSA, 2017; LEITE *et al.*, 2021).

Agregados artificiais: englobam materiais como escórias de alto-forno e aciaria, argilas calcinadas ou expandidas, e ainda os resíduos de construção e demolição (RCD). O uso desses materiais exige precauções técnicas: as escórias demandam processamento adequado, enquanto os RCDs requerem seleção criteriosa para assegurar propriedades compatíveis com a pavimentação.

Agregados naturais: constituídos por areias, seixos e britas. Podem precisar de processamento ou ser utilizados logo após sua obtenção em jazidas.

Agregados reciclados: referem-se ao material obtido pela fresagem de revestimentos asfálticos deteriorados, sendo geralmente reincorporados na produção de novas camadas de pavimentos.

2.3.2. Quanto ao tamanho

Em relação ao tamanho dos grãos, a norma DNIT 412/2025 – ME estabelece as seguintes definições para a análise granulométrica por peneiramento:

agregado graúdo: todas as partículas minerais passantes na peneira de 3” (75 mm) e retidas na peneira nº 4 (4,8 mm);

agregado miúdo: todas as partículas minerais passantes na peneira nº 4 (4,8 mm) e retidas na peneira nº 200 (0,075 mm);

filer: todas as partículas minerais passantes na peneira nº 200 (0,075 mm), incluindo os materiais solúveis em água.

2.4. Mistura Asfáltica Usinada

As misturas são compostas por partes de agregados minerais e ligantes asfálticos com graduações e características próprias que, de forma adequadamente dosada e processada, garantam ao revestimento os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

A classificação das misturas usinadas baseia-se na distribuição dos grãos, podendo ser densas, abertas ou descontínuas. Além destas, há os tratamentos superficiais, que diferem pelo processo executivo, sendo preparados diretamente na pista e podendo ser aplicados a quente ou a frio (BERNUCCI *et al.*, 2022).

2.4.1. Concreto asfáltico denso – CA

O CAUQ – concreto asfáltico usinado a quente ou ainda CBUQ – concreto betuminoso usinado a quente é uma mistura densa executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (filer), se necessário, e CAP, espalhada e compactada a quente (MADUREIRA, 2022).

O desempenho mecânico das misturas densas deve-se ao seu empacotamento eficiente. A presença de agregados de diferentes dimensões permite que os menores preencham os interstícios dos maiores, reduzindo o volume de ar disponível. Como consequência, cria-se uma estrutura de grande atrito interno e empacotamento, fundamental para garantir a resistência ao cisalhamento do revestimento.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado neste estudo consiste em um cimento asfáltico de petróleo modificado por pó de borracha de pneus inservíveis, do tipo AB-8.

3.1.1. Caracterização

Visto que o foco deste trabalho compreende a avaliação da mistura asfáltica, não foram realizados ensaios de caracterização do ligante em laboratório próprio. As propriedades físicas e reológicas foram adotadas conforme certificado de análise disponibilizado pelo fornecedor.

Os resultados dos ensaios de caracterização, realizados segundo as normas da ABNT, constam no Anexo A.

3.2. Agregado

O agregado selecionado foi cedido por pedreira, próxima ao município de Campo Grande – MS, já separado nas frações de 3/4”, 5/8”, 3/8” e pó de pedra.

3.2.1. Caracterização

3.2.1.1. Amostragem e preparação

A amostragem dos agregados foi executada em conformidade com as diretrizes da norma DNIT 461/2025 – PRO. A amostra final foi constituída pela reunião e homogeneização de diversas amostras parciais, coletadas em pontos distintos da pilha de estocagem na pedreira (figura 3), visando assegurar a representatividade das características físicas do material.

Figura 3 – Pilhas de estocagem, na pedreira. Fonte: Autor



Na etapa de preparação, procedeu-se à redução da amostra de campo por meio do método de quarteamento, seguindo os procedimentos da norma DNER-PRO 199/96, obtendo-se assim as quantidades adequadas para a realização dos ensaios de caracterização.

3.2.1.2. Granulometria

A análise granulométrica foi realizada por meio de peneiramento mecânico, conforme os procedimentos da norma DNIT 412/2025 – ME, com o objetivo de determinar a distribuição percentual dos grãos em função de seus diâmetros. O sequenciamento de peneiras e os limites da granulometria, à composição do concreto asfáltico, seguiu a faixa C especificada pela norma DNIT 031/2006 – ES para composição da curva granulométrica.

Ressalta-se que a escolha do uso desta norma, em detrimento da versão vigente, DNIT 031/2024 – ES, deu-se para garantir a estrita comparabilidade com a mistura convencional de referência.

Após o peneiramento, os materiais foram classificados nas frações: agregado graúdo, agregado miúdo. Para o agregado graúdo utilizado (brita 3/4”), determinou-se o Tamanho Máximo Nominal (TMN) de 19,1 mm. Sendo que o TMN é definido como a abertura da peneira imediatamente superior àquela que retém, acumuladamente, mais de 10% do material.

3.2.1.3. Massa específica, densidade relativa e absorção

Para a determinação da massa específica, densidade relativa e absorção, as amostras de agregados foram previamente imersas em água por um período de 24 horas, visando o preenchimento de água dos poros permeáveis, como na (figura 4).

Os ensaios foram conduzidos seguindo as diretrizes da norma DNIT 413/2021 – ME para os agregados graúdos e da norma DNIT 411/2021 – ME para os agregados miúdos.

Figura 4 – Preparação do ensaio para massa específica e densidade relativa, agregado graúdo e miúdo. Fonte: Autor



3.2.1.4. Equivalente de areia

A avaliação da limpeza do agregado miúdo e a detecção de materiais finos nocivos ou argilosos foram realizadas por meio do ensaio de equivalente de areia, conforme preconiza a norma DNIT 450/2024 – ME.

O procedimento consiste em ensaiar a fração da amostra que passa na peneira de 4,8 mm (nº 4). O material é introduzido em uma proveta graduada contendo uma solução floculante à base de cloreto de cálcio e submetido a um processo padronizado de agitação e repouso (figura 5). A solução atua separando as partículas finas (argila e pó) dos grãos maiores.

Figura 5 – Equivalente de areia: solução em repouso. Fonte: Autor



Ao final do período de repouso, realizam-se as leituras das alturas das colunas sedimentadas.

3.3. Mistura Asfalto-borracha

3.3.1. Dosagem Marshall

Para a dosagem, seguiu-se a sistematização exposta por Bernucci *et al.* (2022). A faixa granulométrica selecionada, de acordo com a mistura asfáltica pretendida, foi a Faixa C da norma DNIT 031/2006 – ES, e o uso desta norma deu-se para garantir a estrita comparabilidade com a mistura convencional de referência. Definiu-se, pelo método das tentativas, o percentual em massa de cada agregado para compor a

mistura, observando-se que a porcentagem-alvo enquadrou-se nos limites da referida norma.

As temperaturas de mistura e compactação foram estabelecidas com base na curva viscosidade-temperatura do ligante apresentadas pelo fabricante. Sendo que a temperatura de mistura pretendida para o agregado foi sempre a mesma do ligante.

A definição dos teores de CAP modificado a serem usados seguiu o exposto na norma DNIT 447/2024-ME. A partir de um teor inicial sugerido de 6,5%, foram adotados acréscimos e decréscimos de 0,5% e 1,0%. Logo, os demais teores para avaliação foram: 5,5%, 6,0%, 7,0% e 7,5%. Para cada um desses teores, foram moldados grupos com, pelo menos, três corpos de prova, buscando garantir a representatividade estatística necessária para a construção das curvas de estabilidade, fluência e parâmetros volumétricos.

Após a compactação (procedimento detalhado no item 3.3.3.), as amostras foram submetidas a ensaios para a determinação dos parâmetros volumétricos e mecânicos, limitados conforme as Tabelas 1 e 2, a fim de garantir que a mistura atenda aos requisitos de resistência e durabilidade necessários para o pavimento.

Tabela 1 – Requisitos para projeto de concreto asfáltico
Fonte: DNIT 031/2006 – ES, adaptado

PARÂMETROS	NORMA	VALOR
Volume de vazios (%)	DNIT 449 – PRO	3 a 5
Relação betume vazios (%)	DNIT 449 – PRO	75 a 82
Estabilidade Marshall (kgf) (75 golpes)	DNIT 447 – ME	≥ 500
Resistência à tração (MPa)	DNIT 136 – ME	≥ 0,65

Tabela 2 – Requisitos para vazios do agregado mineral – VAM. Fonte: DNIT 031/2006 – ES

VAM – Vazios do Agregado Mineral		
Tamanho Nominal Máximo do agregado		VAM Mínimo %
#	m m	
1½"	38,1	13
1"	25,4	14
¾"	19,1	15
½"	12,7	16
3/8"	9,5	18

As definições dos parâmetros estão apresentadas no item 3.5..

3.3.2. Preparação da mistura

Os procedimentos de preparação da mistura modificada seguiram as diretrizes da norma DNIT 178/2018 – PRO.

Inicialmente, os agregados foram secos em estufa até atingirem constância de massa. Visando garantir confiabilidade nos resultados, os agregados secos foram separados por meio de peneiramento. Em seguida, foram pesadas em recipientes individuais as quantidades de cada tipo de agregado para compor as misturas de agregados. Essas misturas de agregados foram reservadas, (figura 6) para posteriormente serem combinadas com o ligante e compor a mistura asfáltica.

Figura 6 – Mistura de agregados virgens. Fonte: Autor



O ligante asfáltico modificado, AB-8, e a mistura de agregados foram aquecidos separadamente às temperaturas de mistura preestabelecidas pela curva de viscosidade. A homogeneização manual da mistura asfáltica ocorreu, de forma cautelosa, a fim de evitar perdas de material, e observando a temperatura de mistura, até que houve a cobertura completa do agregado pelo ligante (figura 7).

Figura 7 – Mistura asfáltica. Fonte: Autor



A mistura asfáltica foi quarteada e separada em recipientes metálicos com quantidade de massa apropriada (pouco mais de 1200 g) para a confecção de cada corpo de prova conforme o tamanho limite expresso pelas normas DNIT 136/2018 – ME e DNIT 447/2024 – ME.

Após, os recipientes com a mistura, e os moldes, foram colocados em estufa à temperatura de compactação, por um período de 2 horas, denominado

período de condicionamento de curto prazo, para simular condições de envelhecimento como em campo.

3.3.3. Compactação

A compactação dos corpos de prova foi executada seguindo os procedimentos descritos, ainda, pela norma DNIT 178/2018 – PRO.

Imediatamente após o término do período de condicionamento, procedeu-se à retirada dos recipientes, contendo as parcelas da mistura, e dos moldes de compactação da estufa. Visando evitar a aderência do material à base metálica, um disco de papel foi colocado no fundo do molde.

Figura 8 – Mistura asfáltica recém transferida aos moldes.
Fonte: Autor



Antes do início da compactação mecânica, a mistura foi acomodada manualmente, com uma espátula, realizando cerca de 15 movimentos de espatulação ao redor do perímetro e no centro da amostra, garantindo a pré-acomodação dos agregados. Finalizou-se esta etapa preparatória com a colocação de um segundo disco de papel sobre a superfície da mistura, evitando o contato direto e a aderência do soquete de compactação ao material asfáltico.

O número de golpes do soquete foi adotado em função do tipo de mistura asfáltica e do tráfego (faixa C), sendo de 75 impactos por face.

Antes de retirar os moldes, o conjunto foi pousado sobre uma superfície plana, para resfriamento. A extração dos corpos de prova (CPs) só ocorreu depois de pelo menos 12 horas (figura 9), conforme pede a norma DNIT 447/2024 – ME.

Figura 9 – CPs extraídos dos moldes. Fonte: Autor



3.3.4. Pós-compactação

Após a compactação e extração do molde, com o corpo de prova à temperatura ambiente, foi registrada a altura e o diâmetro do corpo de prova, com precisão de 0,1 mm.

Os ensaios aos quais os corpos de prova foram submetidos tiveram suas realizações durante as 24 h após a compactação, conforme a norma DNIT 447/2024 – ME.

3.4. Densidades e Massas Específicas

A determinação das densidades e massas específicas é a etapa preliminar indispensável para o cálculo das relações volumétricas da mistura asfáltica.

3.4.1. Densidade relativa aparente e massa específica aparente

A densidade relativa aparente é a razão entre a massa de um corpo de prova e a massa de igual volume de água por ele ocupado, ambas à temperatura de ensaio (adimensional), como designa a norma DNIT 428/2022 – ME. Já a massa específica aparente é razão entre a massa de um corpo de prova e seu volume, expressa em gramas por centímetro cúbico, à temperatura de ensaio.

A execução do ensaio seguiu todos os procedimentos para: misturas asfálticas com volume de vazios < 10 % e absorção de água pelo corpo de prova ≤ 2 % por volume; e corpos de prova preparados em laboratório secos e livres de solventes. Ambos descritos na referida norma.

3.4.2. Densidade relativa máxima medida e massa específica máxima medida

A densidade relativa máxima medida é a razão entre a massa da mistura asfáltica não compactada (solta) e a massa da água ocupando o mesmo volume, ambas à temperatura padronizada do ensaio, como designa a

norma DNIT 427/2020 – ME. Já a massa específica máxima medida é a razão entre a massa da mistura asfáltica não compactada (solta) e seu volume, à temperatura do ensaio, medidos em laboratório. Conforme consta na norma supracitada, foi realizada a formação da amostra e execução do ensaio.

3.5. Parâmetros Volumétricos e Mecânicos da Mistura Asfáltica Modificada

Os CPs compactados foram analisados para a determinação das propriedades que regem o comportamento da mistura asfáltica. A análise volumétrica fundamentou-se nas relações entre as massas específicas dos componentes e da mistura compactada, enquanto a análise mecânica avaliou a resistência e a deformabilidade do material. As normas pelas quais são definidos estão na Tabela 1.

3.5.1. Volume de vazios

É o volume total de espaços não preenchidos entre as partículas de agregado recobertas com ligante asfáltico em uma mistura asfáltica compactada (volume de ar).

3.5.2. Vazios do agregado mineral

Espaços vazios entre as partículas de agregado da mistura compactada, incluindo o volume de vazios com ar e o volume de ligante asfáltico efetivo.

3.5.3. Relação betume vazios

Razão entre o volume de ligante asfáltico efetivo e os vazios no agregado mineral.

3.5.4. Estabilidade e fluência Marshall

A estabilidade é a resistência à compressão radial máxima apresentada pelo corpo de prova ensaiado de acordo com o processo estabelecido neste documento, expressa em kgf. E a fluência é a deformação total apresentada pelo corpo de prova, desde a aplicação da carga inicial nula até a aplicação da carga máxima, expressa em milímetros. Ambos são parâmetros mecânicos.

O valor máximo de carga lido, indicando o rompimento do corpo de prova, corresponde à estabilidade Marshall (E), que deve ser posteriormente corrigida segundo a espessura do corpo de prova (E').

A fluência é relativa à leitura na qual se verifica o início do decréscimo dos valores de carga (pico de estabilidade).

3.5.5. Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio foi realizado apenas para o teor “ótimo” da mistura modificada.

Com auxílio de computador ou sistema de aquisição de dados, os deslocamentos verticais e a carga de ruptura são obtidos quando aplica-se uma carga vertical de compressão, progressivamente, até que se dê a ruptura completa, por separação das duas partes do corpo de prova.

A resistência à tração por compressão diametral é a média aritmética dos valores obtidos de três corpos de prova, desde que a variação entre os valores individuais e a média esteja em um intervalo de $\pm 10\%$.

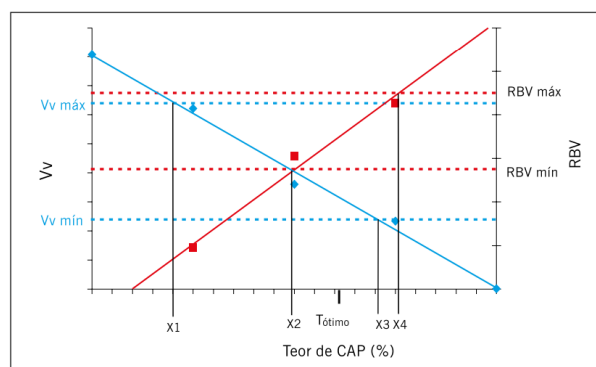
3.6. Teor “Ótimo” da Mistura Asfáltica

A definição do teor de projeto ou teor “ótimo”, para a mistura asfáltica modificada foi realizada mediante a análise conjunta de dois parâmetros volumétricos, volume de vazios (V_v) e a relação betume vazios (RBV) conforme a metodologia proposta por Bernucci et al. (2022).

Com os cinco valores médios de V_v e RBV obtidos nos grupos de corpos de prova (visto em 3.3.1.) é possível traçar um gráfico (figura 10) do teor de asfalto versus V_v e RBV. E são traçadas linhas de tendência para os valores encontrados dos dois parâmetros.

Os limites específicos das duas variáveis (Gráfico 1), são indicados pelas linhas tracejadas. A partir da interseção das linhas de tendência do V_v e do RBV com os limites respectivos de cada um desses parâmetros são determinados quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4). O valor final fica estabelecido pela média aritmética dos dois teores centrais (X2 e X3).

Gráfico 1 – Teor de asfalto versus V_v e RBV. Fonte: Bernucci et al. (2022)



3.7. Comparação das Misturas Asfálticas

O objetivo central foi avaliar o impacto da incorporação do CAP borracha no desempenho da mistura. Para viabilizar o estudo, os dados referentes à mistura convencional foram obtidos a partir de um trabalho precedente realizado no Laboratório de

Transportes da UFMS (LATRAN), os quais se encontram detalhados no Anexo B.

Considerando que os ligantes utilizados nas misturas possuem propriedades reológicas distintas, buscou-se garantir similaridade quanto aos outros aspectos da mistura, para restringir, ao máximo, variações indesejadas. Para tanto, mantiveram-se constantes a origem dos agregados minerais, a composição granulométrica (Faixa C), o diâmetro dos moldes, a energia de compactação e os mesmos equipamentos. Dessa forma, as variações observadas nos resultados podem ser atribuídas, primordialmente, à modificação do ligante.

Para a análise comparativa, as características a serem comparadas entre as misturas asfálticas são os parâmetros volumétricos e mecânicos dos teores “ótimos”. Essa análise permite verificar as diferenças da mistura modificada frente à convencional.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização dos Materiais

4.1.1. Ligante asfáltico modificado – AB-8

As propriedades físicas e reológicas do CAP borracha utilizado neste estudo foram adotadas conforme o certificado de análise disponibilizado pelo fornecedor (disponível na íntegra no Anexo A). As temperaturas de mistura e compactação estão sintetizadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperaturas determinadas. Fonte: Fornecedor

TEMPERATURA			
Compactação	150 °C	-	155 °C
Mistura	170 °C	-	175 °C
Agregado	170 °C	-	175 °C

A norma DNIT 112/2009 – ES, define que os agregados devem ser aquecidos a temperaturas entre 10 e 15 °C acima da temperatura do ligante asfáltico, sem ultrapassar 180 °C. No entanto, a temperatura ideal do ligante para a mistura foi fixada em 175 °C, correspondente a uma viscosidade média de 1652,45 cP, então a temperatura do agregado acompanhou a de mistura.

4.1.2. Ligante asfáltico convencional – 50/70

Tabela 3 – Temperaturas determinadas. Fonte: Fornecedor

TEMPERATURA			
Compactação	131 °C	-	142 °C
Mistura	152 °C	-	159 °C
Agregado	162 °C	-	169 °C

4.1.2. Agregado

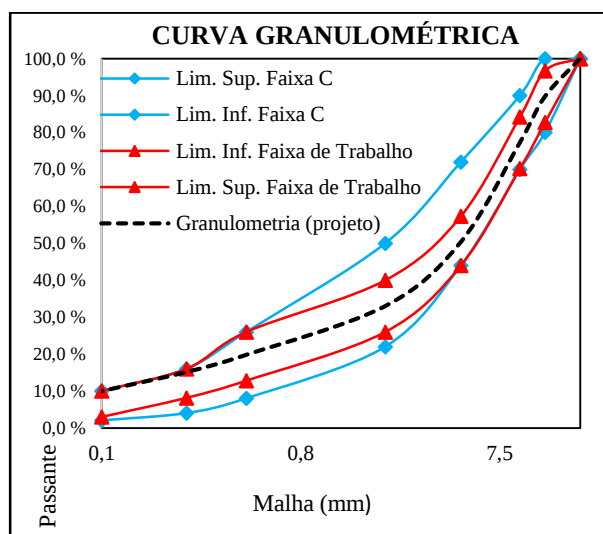
4.1.2.1. Granulometria

O Gráfico 2, logo abaixo, mostra a curva granulométrica usada para a mistura asfáltica, relacionando a porcentagem de material retido em cada peneira enquanto a Tabela 4 mostra a composição de material respeitando a faixa C apresentadas na norma 031/2006 – ES.

Tabela 4 – Composição dos agregados por percentual passante. Fonte: Autor

PENEIRAS	PROJETO		
	Granulometria	Faixa de trabalho	
Diâmetro		Limite inferior	Limite superior
19,1 mm	100,0 %	100,0 %	100,0 %
12,7 mm	89,7 %	82,7 %	96,7 %
9,5 mm	77,2 %	70,2 %	84,2 %
4,8 mm	50,3 %	44,0 %	57,3 %
2,0 mm	33,0 %	26,0 %	40,0 %
0,42 mm	19,8 %	12,8 %	26,0 %
0,18 mm	15,1 %	8,1 %	16,0 %
0,075 mm	10,0 %	3,0 %	10,0 %

Gráfico 2 – Curva granulométrica. Fonte: Autor



Essa proximidade com o limite superior para os menores diâmetros de peneiras implica em um maior consumo de CAP para a mistura. Isso ocorre principalmente devido a maior área superficial total desses materiais.

4.1.2.2. Massa específica, densidade relativa e absorção

Os resultados das massas específicas, densidades e absorção para as frações graúda e miúda estão sintetizados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado graúdo: brita 5/8". Fonte: Autor

PARÂMETROS ANALISADOS	Resultado
G_{sa}	3,033
G_{sb}	2,873
ME_{sa}	3,284 g/cm ³
ME_{sb}	3,088 g/cm ³
Absorção	1,8 %

Tabela 6 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado graúdo: pedrisco. Fonte: Autor

PARÂMETROS ANALISADOS	Resultado
G_{sa}	3,012
G_{sb}	2,869
ME_{sa}	3,206 g/cm ³
ME_{sb}	3,041 g/cm ³
Absorção	1,6 %

Tabela 7 – Resultado dos ensaios de caracterização do agregado miúdo. Fonte: Autor

PARÂMETROS ANALISADOS	Resultado
G_{sa}	2,989
G_{sb}	2,761
ME_{sa}	2,980 g/cm ³
ME_{sb}	2,752 g/cm ³
Absorção	2,8 %

Os valores de massa específica obtidos são elevados, o que é característico de agregados de origem basáltica ou similar. Tal elevação é frequentemente associada à presença de ferro em sua composição mineralógica, resultando em valores que comumente superam a média de 2,60 a 2,70 g/cm³ observada em outras rochas para construção civil (FARIAS; PALMEIRA, 2017; YILMAZ, 2022)."

4.1.2.3. Equivalente de areia

Tabela 8 – Equivalente de areia. Fonte: Autor

EQUIVLENTE DE AREIA	Resultado
EA	62 %

Portanto atende a condição especificada pela norma DNIT 031/2006 – ES.

4.2. Dosagem e Parâmetros das Misturas Asfalto-borracha

A dosagem das misturas com diferentes teores de CAP borracha (Apêndice A), Tabela 9, permitiu observar a evolução dos parâmetros volumétricos e mecânicos em função do incremento do teor de ligante, servindo de base para a verificação do atendimento aos limites normativos estabelecidos pelas Tabelas 1 e 2.

Tabela 9 – Dosagem Marshall. Fonte: Autor

Material	5,5 %	6,0 %	6,5 %	7,0 %	7,5 %
CAP AB-8	275,0 g	300,0 g	325,0 g	350,0 g	375,0 g
Brita 5/8"	614,3 g	611,0 g	607,8 g	604,5 g	601,3 g
Pedrisco	1890,0 g	1880,0 g	1870,0 g	1860,0 g	1850,0 g
Pó de pedra	2220,8 g	2209,0 g	2197,3 g	2185,5 g	2173,8 g
Massa (total)	5000,0 g	5000,0 g	5000,0 g	5000,0 g	5000,0 g

Os valores médios obtidos para cada grupo de três corpos de prova, referentes aos cinco teores ensaiados, estão consolidados na Tabela 8.

Tabela 10 – Resumo dos parâmetros da dosagem Marshall. Fonte: Autor

% CAP borracha	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
Absorção (%)	1,2	1,2	0,7	0,9	0,5
G_{mb}	2,449	2,472	2,469	2,482	2,487
G_{mm}	2,664	2,628	2,614	2,576	2,558
V_v (%)	8,10	5,90	5,60	3,70	2,80
V.A.M. (%)	17,80	17,50	18,10	18,10	18,40
R.B.V.	54,90	66,20	69,30	79,80	84,80
Estabilidade (kgf)	887,40	954,40	796,00	865,20	883,30
Fluência (mm)	6,99	8,75	9,80	9,94	9,14

Vale destacar a relação entre os teores de ligante e o comportamento das densidades. Observa-se que o aumento do teor de ligante asfáltico resultou no acréscimo progressivo da densidade relativa aparente

(G_{mb}) em contrapartida à redução da densidade relativa máxima medida (G_{mm}).

O incremento do G_{mb} se dá pela redução do volume de vazios de ar, uma vez que o ligante preenche os espaços intergranulares e atua como adesivo, favorecendo a compactação e o rearranjo dos agregados. Simultaneamente, a redução do G_{mm} acontece, pois o ligante começa substituir os agregados, que tem densidade maior que a do ligante.

Ao analisar os resultados mecânicos, observa-se que a estabilidade máxima foi alcançada no teor de 6,0%, apresentando uma oscilação subsequente no teor de 6,5%. Tal comportamento pode ser atribuído à alta viscosidade do ligante asfalto-borracha, que exige rigoroso controle térmico para garantir o intertravamento mineral.

Por outro lado, o V_v e RBV seguiram as tendências volumétricas descritas por Bernucci et al. (2022). O volume de vazios decresceu de conforme o incremento do ligante, enquanto a relação betume vazios aumentou, demonstrando o preenchimento progressivo dos vazios intergranulares pelo asfalto-borracha.

Embora os valores de fluência observados excedam os limites típicos das misturas convencionais, tal comportamento é condizente com a reologia do ligante asfalto-borracha utilizado. Conforme aponta Bernucci et al. (2022), a presença de polímeros no ligante modifica as respostas da mistura asfáltica.

No caso desta mistura modificada, a recuperação elástica conferida pela borracha permite que o material suporte deformações superiores às de uma mistura convencional sem perda imediata de integridade, o que justifica o comportamento observado nos ensaios Marshall.

4.2.1. Dosagem e parâmetros das misturas convencionais

Tabela 11 – Dosagem Marshall. Fonte: Autor

Material	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %
CAP 50/70	180,00 g	202,50 g	225,00 g	247,50 g	270,00 g
Brita 5/8"	864,00 g	859,50 g	855,00 g	850,50 g	846,00 g
Pedrisco	1512,00 g	1504,13 g	1496,25 g	1488,38 g	1480,50 g
Pó de Pedra	1944,00 g	1933,88 g	1923,75 g	1913,63 g	1903,50 g
Massa (total)	4500,0 g	4500,0 g	4500,0 g	4500,0 g	4500,0 g

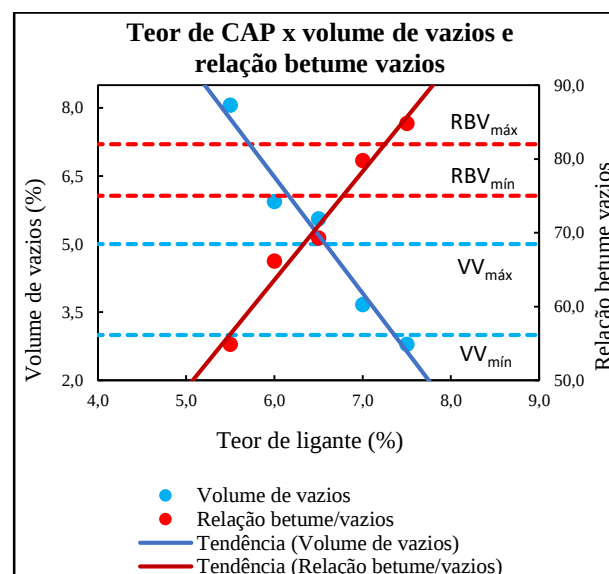
Tabela 12 – Resumo dos parâmetros da dosagem Marshall. Fonte: Autor

% CAP borracha	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
Absorção (%)	2,8	2,0	1,1	0,7	0,3
G_{mb}	2,461	2,463	2,491	2,506	2,534
G_{mm}	2,720	2,700	2,672	2,654	2,628
V_v (%)	9,50	8,80	6,80	5,60	3,60
V.A.M. (%)	16,20	16,60	16,10	16,00	15,50
R.B.V.	41,40	47,20	57,90	65,20	77,00
Estabilidade (kgf)	537,20	592,70	793,50	760,80	837,90
Fluência (mm)	2,73	3,02	2,67	2,99	4,34

4.3. Definição do Teor “Ótimo”

A definição do teor de projeto para a mistura asfalto-borracha foi realizada através do cruzamento gráfico dos parâmetros volumétricos de volume de vazios e relação betume vazios, conforme ilustrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Tendências para o teor “ótimo”. Fonte: Autor



A Tabela 9 mostra o valor do teor ótimo.

Tabela 13 – Teor ótimo da mistura. Fonte: Autor

X1	X2	X3	X4	Resultado
5,86 %	6,57%	7,25%	7,38%	6,9%

O teor de projeto calculado matematicamente pela média das interseções resultou em 6,91%. Contudo, para fins de diretriz de projeto adotou-se o teor de 6,9%.

O teor de projeto obtido está completamente dentro do esperado, tanto pelas normas DNIT 031/2006 – ES e

norma DNIT 112/2009 – ES, quanto pela natureza do ligante, que é um ligante modificado.

4.4. Análise Comparativa

Para a comparação, os dados referentes aos parâmetros volumétricos e mecânicos dos teores de projeto de ambas as misturas seguiu o padrão anterior, sendo que os valores médios foram obtidos a partir de um grupo de três corpos de prova, vide a Tabela 10.

Tabela 14 – Resumo dos parâmetros da dosagem Marshall, para os teores “ótimos”. Fonte: Autor

	Mistura convencional	Mistura asfalto-borracha
% teor ótimo	6,1	6,9
Absorção de água (%)	0,4	0,8
G_{mb}	2,527	2,483
ME_a	2,519	2,475
G_{mm}	2,606	2,591
ME_{mm}	2,597	2,582
V_v (%)	3,0	4,2
V.A.M. (%)	15,9	18,0
R.B.V.	81,2	76,8
Estabilidade (kgf)	889,8	902,4
Fluência (mm)	3,94	6,56
Resistência a Tração (MPa)	0,78	1,16

Comparando as misturas, o teor de ligante da mistura modificada foi maior que da mistura convencional, como esperado, visto que é necessário um filme mais espesso para revestir os agregados pois a borracha também absorve parte do ligante. No entanto a diferença de valores não foi tão expressiva, visto que a diferença de massas foi de apenas 70,50 g.

As densidades não apresentaram grandes divergências em seus valores. A pouca diferença é mais em relação aos teores e tipos de ligantes, já que os agregados minerais são os mesmos.

É relevante notar que o atendimento aos altos valores limites de RBV perante a norma DNIT 031/2006 pode induzir a teores de projeto bem elevados ou acima do

que seria necessário, o que requer atenção quanto à possibilidade de exsudação em climas quentes. A norma atual já traz valores limites mais baixos para esse parâmetro.

Embora a mistura asfalto-borracha utilize um teor de ligante maior, sua relação betume vazios foi inferior ao da convencional devido a diferença dos vazios do agregado mineral. Isso demonstra que a mistura modificada possui um esqueleto mineral menos travado, por consequência de uma granulometria menos centralizada aos limites, permitindo a acomodação do filme de ligante mais espesso sem saturar os vazios da mistura, o que corrobora a deformação superior observada nos ensaios de fluência.

Essa maior capacidade de deformação não implicou em perda de coesão interna, visto que o resultado da RT para mistura asfalto-borracha alcançou um valor satisfatório, e aproximadamente 33% maior que o valor da mistura convencional.

Conforme a norma DNIT 031/2006 – ES, ambas as misturas atenderam as especificações quanto a esses parâmetros e aos demais.

4. CONCLUSÃO

O uso de misturas asfálticas com ligantes modificados por borracha de pneus inservíveis vem sendo bastante discutido em trabalhos publicados, os quais apresentam resultados interessantes e satisfatórios em diversos aspectos, tanto para o aumento de desempenho dos pavimentos, quanto para a destinação final de resíduos.

O presente estudo permitiu avaliar e comparar, as propriedades de uma mistura asfáltica convencional frente a uma mistura asfalto-borracha. Assim este artigo traz as seguintes conclusões referentes a análise comparativa:

- O teor de projeto mais alto na mistura modificada foi devido a natureza e maior viscosidade do ligante modificado por borracha;
- A mistura modificada é mais resistente, tendo maior suporte mecânico;
- A maior flexibilidade da mistura modificada sugere uma capacidade de deformação elástica antes da ruptura, superior;
- O aumento não significativo do teor de projeto, torna a mistura modificada muito viável, em relação a convencional, visto os ganhos apresentados.

Para estudos futuros:

- Analisar financeiramente o impacto do uso de CAP convencional em relação ao uso de CAP borracha;
- Realizar a análise comparativa com outros polímeros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Resolução ANP nº 897, de 18 de novembro de 2022**. Altera a Resolução ANP nº 46, de 1º de novembro de 2016. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ed. 221, p. 88, 24 nov. 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-897-2022>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DISTRIBUIDORAS DE ASFALTO. **Manual básico de emulsões asfálticas**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.
- BARBOSA, Vitor Hugo Rodrigues. **Estudo de solos do Acre para a produção de agregados calcinados e misturas para bases em pavimentação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Defesa) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://bdex.eb.mil.br/jspui/handle/123456789/9094>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: ABEDA, 2022.
- CAMARGO, Felipe Filizzola. **Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2016.tde-01072016-111905>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- CERATTI, Jorge Augusto Pereira; BERNUCCI, Liedi Bariani; SOARES, Jorge Barbosa. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Anuário agrologístico**. v. 2. Brasília: Conab, 2025. 52 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2025/26: 5º levantamento**. Brasília: Conab, v. 13, n. 5, fev. 2026. 111 p. ISSN 2318-6852.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: safra 2024/25: 12º levantamento**. Brasília: Conab, v. 12, n. 12, set. 2025. 132 p. ISSN 2318-6852.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de rodovias 2024**. Brasília: CNT: SEST SENAT: ITL, 2024.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias do Brasil não duram?** Brasília: CNT, 2017.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual básico de estradas e rodovias vicinais: volume I: planejamento, projeto, construção e operação**. São Paulo: DER/SP, 2012. Disponível em: https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivo_s/manuais/Manual_Basico_de_Estradas_e_Rodovias_Vicinais-Volume_I.pdf. Acesso em: 20 dez. 2025.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 204/95: cimentos asfálticos de petróleo: especificação de material**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 111/2009 – EM: pavimentação flexível: cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo "terminal blending": especificação de material**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 112/2009 – ES: pavimentos flexíveis: concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo "terminal blending": especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 136/2018 – ME: pavimentação asfáltica: misturas asfálticas: determinação da resistência à tração por compressão diametral: método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2018.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 178/2018 – PRO:** pavimentação asfáltica: preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall: procedimento. Rio de Janeiro: IPR, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 412/2025 – ME:** agregados: análise granulométrica de agregados graúdos e miúdos por peneiramento: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2025.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 427/2020 – ME:** pavimentação: misturas asfálticas: determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 428/2022 – ME:** pavimentação: misturas asfálticas: determinação da densidade relativa aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2022.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 447/2024 – ME:** misturas asfálticas: ensaio de estabilidade e fluência Marshall: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 449/2024 – PRO:** pavimentação asfáltica: misturas asfálticas: parâmetros volumétricos para dosagem de misturas asfálticas: procedimento. Brasília: DNIT, 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 450/2024 – ME:** equivalente de areia: método de ensaio. Brasília: DNIT, 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **NORMA DNIT 461/2025 – PRO:** agregados: coleta de amostras de agregados: procedimento. Brasília: DNIT, 2025.
- FARIAS, Márcio Muniz de; PALMEIRA, Ennio Marques. Agregados para a construção civil. In: ISAIÁ, Geraldo Cechella (ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1, cap. 16, p. 481-523.
- KLINSKY, Luis Miguel Gutiérrez; FARIA, Valéria C. de. **Asfalto borracha:** revisão bibliográfica, avaliação reológica do ligante asfáltico e determinação dos parâmetros mecânicos das misturas asfálticas. [S. l.]: Concessionária NovaDutra: Centro de Pesquisas Rodoviárias, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/anttp/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes/nova-dutra/relatorios/relatorios-de-pesquisa-rdt-1/asfalto-borracha-revisao-bibliografica-a-valiacao-reologica-do-ligante-asfaltico-e-determinacao-dos-parametros-mecanicos-das-misturas-asfalticas-1.pdf/view>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- LEITE, L. M. F. *et al.* **A importância das características dos agregados no desempenho das misturas asfálticas**. Rio de Janeiro: IBP, 2021. *E-book*. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/hub-de-conhecimento/publicacoes/?page=6>. Acesso em: 22 dez. 2025.
- LOPES, Letícia Nunes; FARIAS, Márcio Muniz de; MELLO, Luiz Guilherme Rodrigues de. Influência da espessura do filme de ligante na dosagem de misturas asfálticas com borracha do tipo RAR. **Revista ENINFRA**, Brasília, v. 2, n. 2, p. 6-24, set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.70859/2764-9539.v2.n2.65>.
- MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. **Misturas asfálticas:** conceituação, materiais e dosagem: módulo 1: conceitos gerais. Brasília: DNIT: IPR, 2023. Disponível em: <http://repositorio.enap.gov.br/handle/1/7689>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. **Misturas asfálticas:** conceituação, materiais e dosagem: módulo 2: tipos de ligantes asfálticos. Brasília: DNIT: IPR, 2023. Disponível em: <http://repositorio.enap.gov.br/handle/1/7689>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. **Misturas asfálticas:** conceituação, materiais e dosagem: módulo 3: tipos de revestimentos asfálticos. Brasília: DNIT: IPR, 2022. Disponível em: <http://repositorio.enap.gov.br/handle/1/7689>. Acesso em: 15 dez. 2025.

- MADUREIRA, Letícia Alberto Borges. **Misturas asfálticas: conceituação, materiais e dosagem: módulo 4: dosagem de misturas asfálticas.** Brasília: DNIT: IPR, 2022. Disponível em: <http://repositorio.enap.gov.br/handle/1/7689>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- MAIA, Ivana Gomes. **Avaliação de ligantes e misturas asfálticas preparadas com péletes de asfalto-borracha.** 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/55278>. Acesso em: 9 dez. 2025.
- MANOEL, Getúlio Francisco. **Caracterização físico-química e estudo reológico de asfaltos modificados pelos polímeros PEAD, PEBD e PELBD e contribuição ao estudo do envelhecimento do cimento asfáltico de petróleo.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade de Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1843/BUBD-A3ZG8A>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- MATOS, Tiago Scheffer de. **Investigação das propriedades dinâmico-mecânicas de ligantes asfálticos brasileiros como indicadores de seus desempenhos operacionais em campo.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/46967>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- NEGRÃO, Douglas Polcaro. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2006.tde-09032007-170249>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- ODA, Sandra. **Treinamento e capacitação técnica em pavimentação: módulo I: materiais para pavimentação.** Brasília: ANTT: CCR NovaDutra: UFRJ, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/rodovias/concessionarias/lista-de-concessoes/nova-dutra/relatorios/relatorios-d-e-pesquisa-rdt-1/anexo-modulo-i.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- OLIVEIRA, Nayla Kelly Antunes de *et al.* Análise do ligante asfáltico modificado com borracha de pneu. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUSTENTABILIDADE, 2., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: IBEAS, 2019. p. 1-6. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/conreso1/conresol2019/I-070.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2025.
- YILMAZ, Altan. Engineering properties of basalt aggregates in terms of use in granular layers of flexible pavements. **Case Studies in Construction Materials**, [S. l.], v. 17, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01182>.

Apêndice A – Dosagem: Composição das Misturas

COMPOSIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA						
Material	5,5 %	6,0 %	6,5 %	6,9 %	7,0 %	7,5 %
CAP AB-8	275,0 g	300,0 g	325,0 g	345,0 g	350,0 g	375,0 g
Brita 5/8"	614,3 g	611,0 g	607,8 g	605,2 g	604,5 g	601,3 g
Pedrisco	1890,0 g	1880,0 g	1870,0 g	1862,0 g	1860,0 g	1850,0 g
Pó de pedra	2220,8 g	2209,0 g	2197,3 g	2187,9 g	2185,5 g	2173,8 g
Massa (total)	5000,0 g	5000,0 g	5000,0 g	5000,0 g	5000,0 g	5000,0 g

Anexo A - Caracterização do Ligante Asfáltico Modificado

Figura A.1. – Temperaturas de mistura. Fonte: Fornecedor

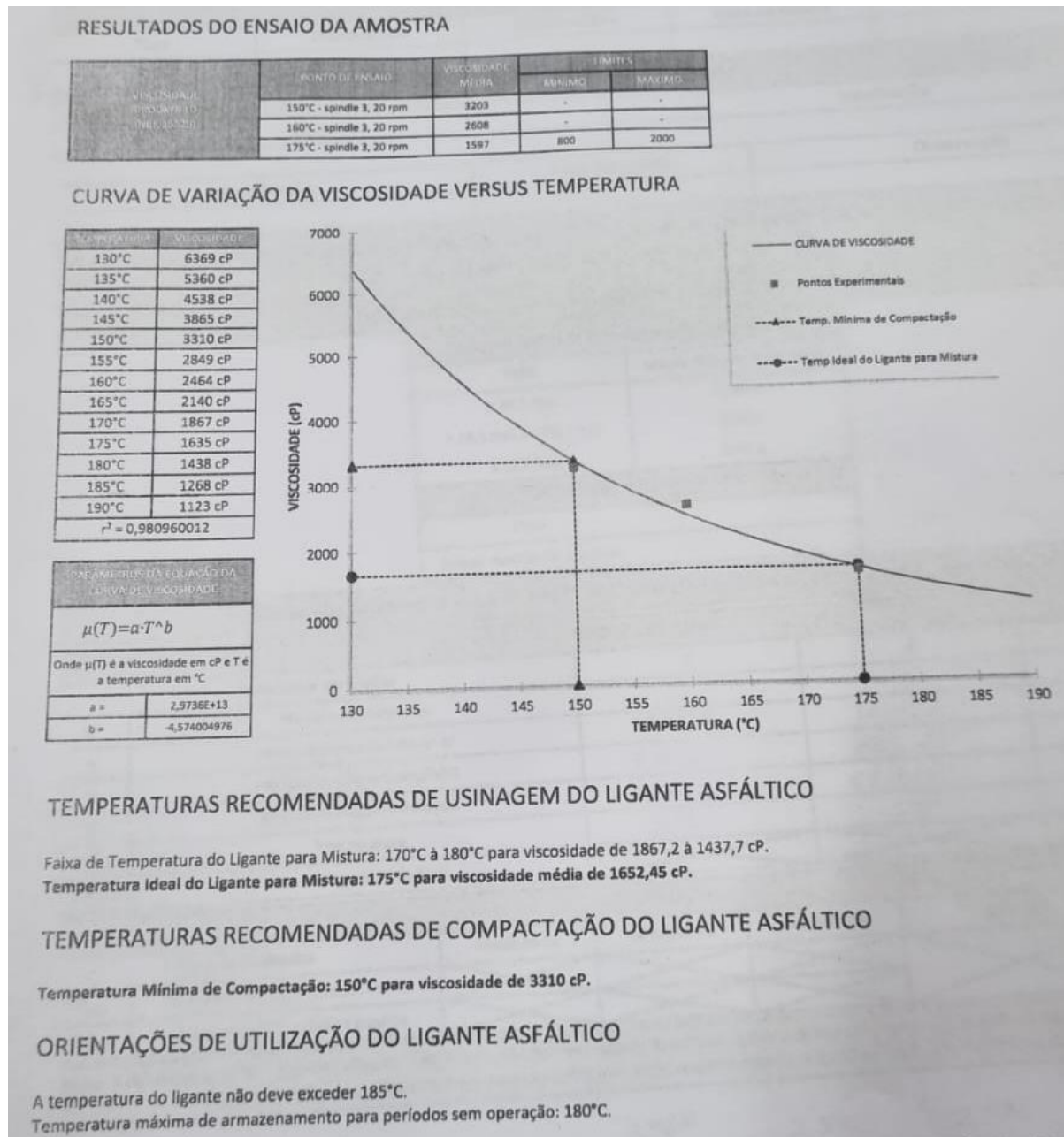


Figura A.2. – Caracterização do ligante. Fonte: Fornecedor

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE

	CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
					MÍNIMO	MÁXIMO
1	Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	55,1	50	-
2	Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm	0,1 mm	NBR 6576	42	30	70
3	Recuperação Elástica, 10cm, 25°C	%	NBR 15086	70	50	-
4	Viscosidade Brookfield 175°C – spindle 3, 20 rpm	cP	NBR 15529	1597	800	2000
5	Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	279	235	-
6	Ensaio de Separação de Fase	Δ P.A. (°C)	NBR 15166	6,9	-	9
7	Massa específica a 25°C	kg/m³	NBR 6296	1,030	-	-

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT

	CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	QUALIDADE	LIMITES	
					MÍNIMO	MÁXIMO
8	Variação de massa	%	NBR 15235	0,19	-1,0	1,0
9	Variação do Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	6,7	-	+10
10	Porcentagem de Recuperação Elástica Original, 10cm, 25°C	%	NBR 15086	126	100	-
11	Porcentagem de Penetração Original, 25°C	%	NBR 6576	62	55	-

NEGRO DE FUMO (CARBON BLACK)

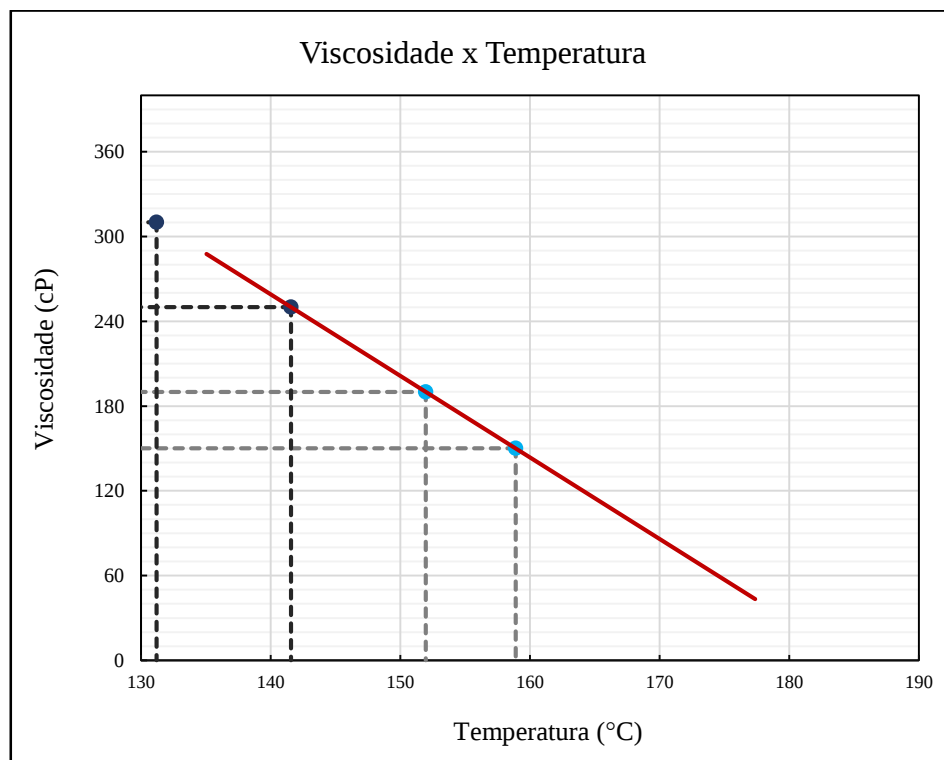
	CARACTERÍSTICAS	UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
					MÍNIMO	MÁXIMO
12	Teor de Negro de Fumo no Pó de Pneu (Puro)	%	ASTM D5805	23,35%	-	-
13	Teor de Negro de Fumo no Ligante	%	NA	3,46%	-	-
14	Fator de Correção da Extração	-	NA	1,03580	-	-

DESEMPENHO DO LIGANTE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DO PAVIMENTO

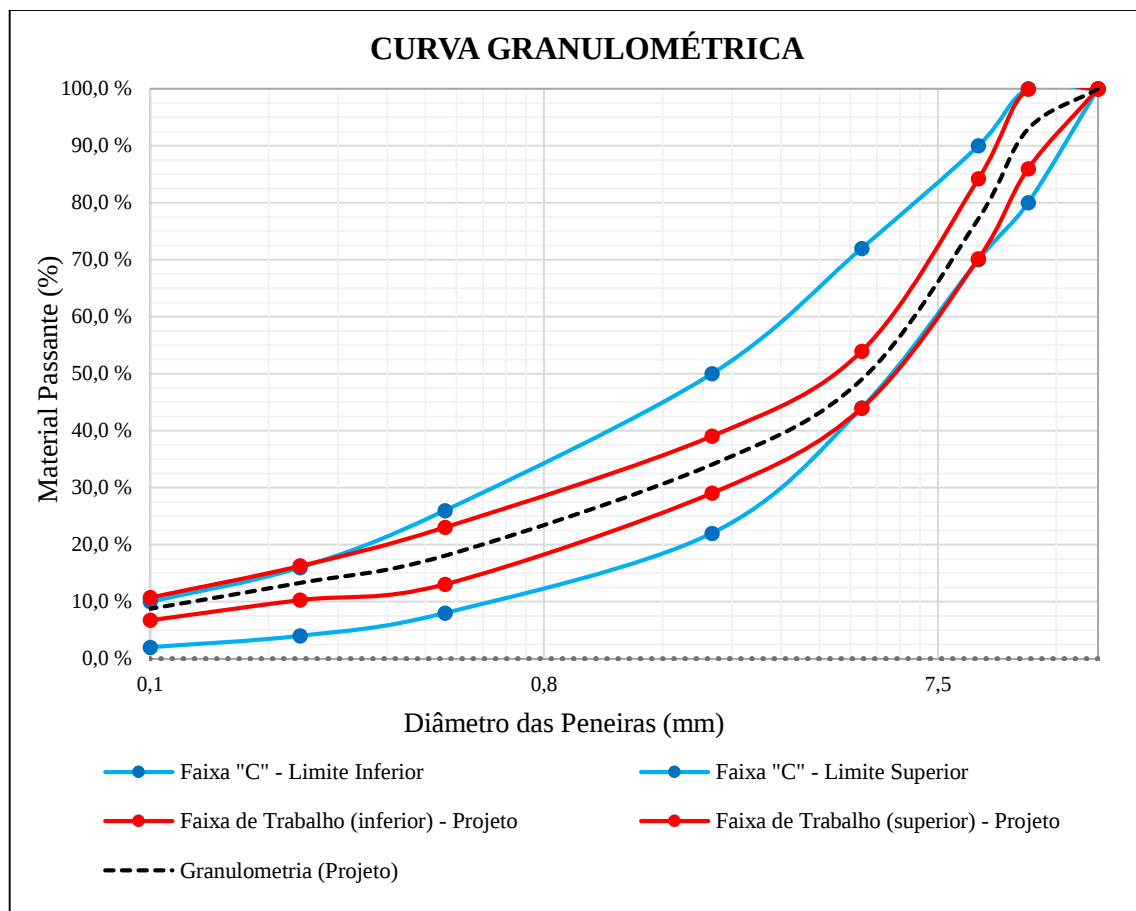
	TEMPERATURA DO PAVIMENTO	ESPECIFICAÇÃO	Jnr à 3,2kPa	NÍVEL DE TRAFEGO
				ACEITO
15	58°C	AASHTO M332	0,2703	Extremamente Pesado (E)
16	64°C		0,7636	Muito Pesado (V)
17	70°C		1,1888	Pesado (H)
18	76°C		3,7027	Padrão (S)

Anexo B – Resultados da Mistura Convencional de Referência

TEMPERATURAS DO LIGANTE ASFÁLTICO: CAP 50/70	
Compactação	131 °C - 142 °C
Mistura	152 °C - 159 °C
Agregado	162 °C - 169 °C
INFORMAÇÕES ADICIONAIS	
Eq. da linha de tendência	$-5,774x + 1067,335$
Viscosid. (compactação)	280 ± 30 cP
Viscosid. (misturas)	170 ± 20 cP



DETERMINAÇÃO DA CURVA GRANULOMÉTRICA DA MISTURA ASFÁLTICA			
Peneiras	Projeto		
	Granulometria	Faixa de trabalho	
Diâmetro		Limite inferior	Limite superior
19,1 mm	100,0 %	100,0 %	100,0 %
12,7 mm	93,0 %	86,0 %	100,0 %
9,5 mm	77,2 %	70,2 %	84,2 %
4,8 mm	49,0 %	44,0 %	54,0 %
2,0 mm	34,1 %	29,1 %	39,1 %
0,42 mm	18,1 %	13,1 %	23,1 %
0,18 mm	13,3 %	10,3 %	16,3 %
0,075 mm	8,8 %	6,8 %	10,8 %

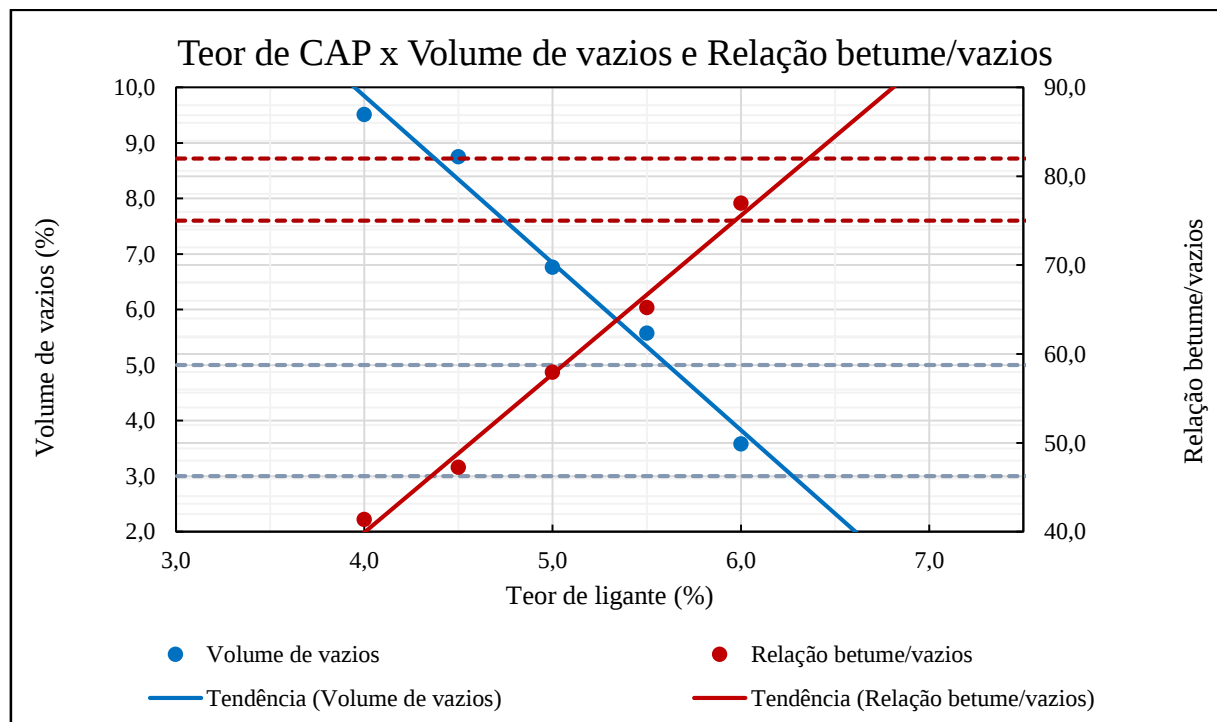


DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA, DENSIDADE RELATIVA E ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO: Brita 5/8"		
Parâmetros analisados		Resultado
G _{sa}	Densidade relativa real do agregado	3,030
G _{sb}	Densidade relativa aparente do agregado	2,867
ME _{sa}	Massa específica real do agregado	3,283 g/cm ³
ME _{sb}	Massa específica aparente do agregado	3,088 g/cm ³
A _a	Porcentagem de absorção	1,8 %
DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA, DENSIDADE RELATIVA E ABSORÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO: Pedrisco		
Parâmetros analisados		Resultado
G _{sa}	Densidade relativa real do agregado	3,021
G _{sb}	Densidade relativa aparente do agregado	2,866
ME _{sa}	Massa específica real do agregado	3,212 g/cm ³
ME _{sb}	Massa específica aparente do agregado	3,040 g/cm ³
A _a	Porcentagem de absorção	1,6 %
DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA, DENSIDADE RELATIVA E ABSORÇÃO DO AGREGADO MIÚDO: Pó de Pedra		
Parâmetros analisados		Resultado
G _{sa}	Densidade relativa real do agregado	2,989
G _{sb}	Densidade relativa aparente do agregado	2,761
ME _{sa}	Massa específica real do agregado	2,980 g/cm ³
ME _{sb}	Massa específica aparente do agregado	2,752 g/cm ³
A _a	Porcentagem de absorção	2,8 %

DETERMINAÇÃO DO EQUIVALENTE DE AREIA		
Fator analisado		Resultado
EA	Equivalente de areia	64 %

COMPOSIÇÃO DA MISTURA ASFÁLTICA						
Material	4,0 %	4,5 %	5,0 %	5,5 %	6,0 %	6,1 %
CAP 50/70	180,00 g	202,50 g	225,00 g	247,50 g	270,00 g	274,50 g
Brita 5/8"	864,00 g	859,50 g	855,00 g	850,50 g	846,00 g	845,10 g
Pedrisco	1512,00 g	1504,13 g	1496,25 g	1488,38 g	1480,50 g	1478,93 g
Pó de Pedra	1944,00 g	1933,88 g	1923,75 g	1913,63 g	1903,50 g	1901,48 g
Massa (total)	4500,0 g	4500,0 g	4500,0 g	4500,0 g	4500,0 g	4500,0 g

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS VOLUMÉTRICOS DOS TEORES DE LIGANTE - ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL								
% CAP	ABS. DE ÁGUA	DENSIDADE RELATIVA		V.V.	V.A.M.	R.B.V.	ESTABILIDADE	FLUÊNCIA
		Aparente (G _{mb})	Máxima (G _{mm})					
4,0 %	2,8 %	2,461	2,720	9,5 %	16,2 %	41,40	537,20 kgf	2,73 mm
4,5 %	2,0 %	2,463	2,700	8,8 %	16,6 %	47,20	592,70 kgf	3,02 mm
5,0 %	1,1 %	2,491	2,672	6,8 %	16,1 %	57,90	793,50 kgf	2,67 mm
5,5 %	0,7 %	2,506	2,654	5,6 %	16,0 %	65,20	760,80 kgf	2,99 mm
6,0 %	0,3 %	2,534	2,628	3,6 %	15,5 %	77,00	837,90 kgf	4,34 mm



RESULTADOS		
X ₂	X ₃	Resultado
6,0 %	6,3 %	6,1 %