



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



LAURA CAIXETA CARVALHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS ASFÁLTICAS POR
MEIO DE ENSAIO DE ARRANCAMENTO EM CAMPO**

UBERLÂNDIA
2026

LAURA CAIXETA CARVALHO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DA ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS ASFÁLTICAS POR
MEIO DE ENSAIO DE ARRANCAMENTO EM CAMPO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Civil da Universidade
Federal de Uberlândia, como parte das
exigências para a obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Rodrigo Pires Leandro

BANCA EXAMINADORA

Prof. Rodrigo Pires Leandro
UFU

Prof. Michael Andrade Maedo
UFU

Prof^a. Raquel Naiara Fernandes Silva
UFU

RESUMO

A aderência entre camadas asfálticas é um requisito fundamental para que o revestimento trabalhe de forma monolítica, reduzindo a ocorrência de defeitos prematuros associados ao descolamento interfacial, escorregamento e degradação acelerada por alteração do comportamento estrutural previsto. Dessa forma, a pintura de ligação (*tack coat*), usualmente executada com emulsão asfáltica, é o principal mecanismo de união entre camadas, porém sua qualidade, taxa de aplicação e efetividade em campo podem ser afetadas por variáveis de execução e de ambiente, como macrotextura da superfície, temperatura e presença de finos. Nesse contexto, ensaios *in situ* capazes de quantificar a aderência têm sido estudados como alternativa de controle tecnológico, com destaque para métodos em tração direta do tipo *pull-off*. Este trabalho avaliou experimentalmente a aderência entre camadas asfálticas em dois trechos experimentais executados em campo, com aplicação de emulsão RR-1C em taxas distintas, e medição da resistência por ensaio de arrancamento com placas metálicas coladas por adesivo epóxi. Foram realizados 60 ensaios, distribuídos em faixas por trecho experimental, permitindo análise comparativa e discussão em função das condições reais de pista. Os resultados indicaram ausência de tendência proporcional direta entre a taxa de emulsão e a resistência obtida, sugerindo que a aderência depende de variáveis externas. Conclui-se que o *pull-off* em campo é promissor como ferramenta de diagnóstico e controle de aderência, mas requer interpretação conjunta do valor de resistência e do modo de ruptura, bem como atenção ao controle de fatores ambientais e de execução.

Palavras-chave: Aderência interfacial; Pintura de ligação; Emulsão RR-1C; *Pull-off*; Ensaio de arrancamento.

ABSTRACT

Interlayer adhesion in asphalt pavements is a fundamental requirement for the overlay to perform monolithically, reducing the occurrence of premature distresses associated with interfacial debonding, such as slippage and accelerated degradation. Tack coat, usually performed with asphalt emulsion, is the primary bonding mechanism between layers; however, its quality and effectiveness in the field can be affected by construction and environmental variables, such as surface macrotexture, temperature, and the presence of fines. In this context, in situ tests capable of quantifying adhesion have been studied as an alternative for technological control, with emphasis on direct tension methods such as the pull-off test. This study experimentally evaluated the adhesion between asphalt layers in two field experimental sections, using different RR-1C emulsion application rates, and measuring strength through pull-off tests with metal plates bonded by epoxy adhesive (Sikadur). Sixty tests were conducted, distributed across strips per experimental section, allowing for a comparative analysis and discussion of how results vary due to real-world conditions. The results indicated an absence of a direct proportional trend between the emulsion rate and the obtained strength, suggesting that adhesion depends on external variables, especially ambient and pavement temperatures, as well as surface conditions. It is concluded that field pull-off testing is a promising tool for adhesion diagnosis and control, but it requires a joint interpretation of the strength value and the failure mode, as well as attention to the control of environmental and construction factors.

Keywords: Interlayer adhesion; Tack coat; RR-1C emulsion; Pull-off; Pull-off test.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura do pavimento	11
Figura 2. Dispositivo UPOD (Patente Pendente)	18
Figura 3. Localização dos trechos experimentais	20
Figura 4. Configuração das faixas longitudinais do Trecho 1	20
Figura 5. Configuração das faixas longitudinais do Trecho 2	21
Figura 6. Ensaio da mancha de areia	22
Figura 7. Limpeza da superfície das faixas	23
Figura 8. Aplicação da emulsão asfáltica	24
Figura 9. Determinação da quantidade de emulsão por faixa.....	25
Figura 10. Cura da emulsão.....	25
Figura 11. Aplicação do revestimento asfáltico	26
Figura 12. Compactação da nova camada asfáltica	27
Figura 13. Dispositivo para os ensaios de arrancamento	28
Figura 14. Adesivos testados.....	29
Figura 15. Preparação da massa plástica	29
Figura 16. Placas metálicas coladas com massa plástica.....	29
Figura 17. Preparação do adesivo epóxi.....	30
Figura 18. Placas metálicas coladas com adesivo epóxi	30
Figura 19. Resultados do arrancamento dos adesivos	31
Figura 20. Amostragem Trecho 1	31
Figura 21. Amostragem Trecho 2.....	32
Figura 22. Procedimento do ensaio de arrancamento.....	33
Figura 23. Procedimento do ensaio HT-IDT	34
Figura 24. Gráfico Carga x Deslocamento – HT-IDT.....	35
Figura 25. Procedimento do ensaio Ideal-CT	36
Figura 26. Gráfico Carga x Deslocamento – Ideal-CT.....	37

Figura 27. Modos de ruptura observados	38
Figura 28. Distribuição quanto ao modo de falha	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classe de macrotextura	23
Tabela 2. Taxas de aplicação de emulsão asfáltica	24
Tabela 3. Classificação superficial dos trechos experimentais.....	37
Tabela 4. Modos de falha no Trecho 1	40
Tabela 5. Modos de falha no Trecho 2	42
Tabela 6. Média dos resultados do ensaio de arrancamento.....	47
Tabela 7. Análise de significância ANOVA	49
Tabela 8. Análise de outliers pelo teste de <i>Grubbs</i>	49
Tabela 9. Análise de outliers no <i>Python</i> – Trecho 1.....	50
Tabela 10. Análise de outliers no <i>Python</i> – Trecho 2.....	51
Tabela 11. Resultados do ensaio HT-IDT	53
Tabela 12. Resultados do ensaio Ideal-CT	53

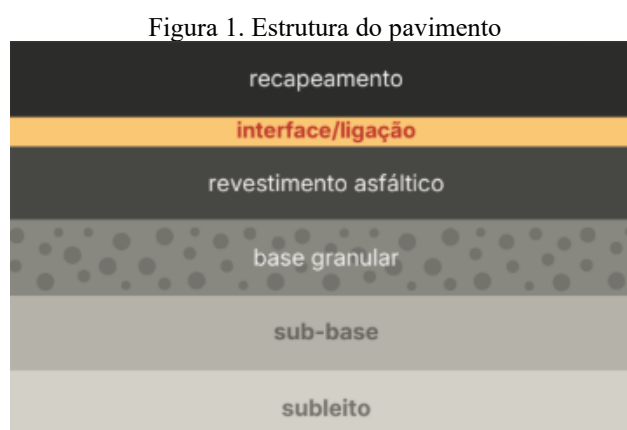
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Camada de ligação (<i>tack coat</i>)	13
2.1.1 Textura e condição da superfície	13
2.1.2 Taxa de aplicação	14
2.1.3 Emulsão asfáltica	15
2.1.4 Temperatura e viscosidade	16
2.2 Projeto de pavimentos	16
2.3 Métodos de caracterização da ligação	17
2.4 Teste de arrancamento <i>pull-off</i>	18
3 MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Configuração experimental	19
3.1.1 Local de estudo	19
3.1.2 Divisão de faixas	19
3.1.3 Caracterização superficial: macrotextura (mancha de areia)	21
3.1.4 Taxas de emulsão	23
3.1.5 Execução do recapeamento	26
3.2 Teste de arrancamento (<i>pull-off</i>)	27
3.2.1 Dispositivo utilizado	27
3.2.2 Definição do adesivo	28
3.2.3 Ensaio pull-off	31
3.3 Análise complementar	33
3.3.1 Ensaio HT-IDT	34
3.3.2 Ensaio Ideal-CT	36
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	37
4.1 Macrotextura	37

4.2 Ensaios de arrancamento.....	38
4.2.1 Tipos de falha	38
4.2.2 Valores numéricos	47
4.2.3 Análise estatística	48
4.3 Propriedades do agregado e da mistura	52
4.4 Análise complementar	53
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICE A – Resultados dos ensaios HT-IDT	58
APÊNDICE B – Resultados dos ensaios Ideal-CT	67
APÊNDICE C – Script em Python para geração dos <i>boxplots</i>.....	76
ANEXO A – Certificado da emulsão asfáltica	77
ANEXO B – Curva granulométrica da mistura do Trecho 1.....	78
ANEXO C – Curva granulométrica da mistura do Trecho 2	79

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos asfálticos são estruturas constituídas por múltiplas camadas sobrepostas que devem atuar de forma integrada para suportar as solicitações de tráfego e as ações ambientais. Nesse viés, a deterioração dos pavimentos ao longo do tempo, torna necessárias intervenções de reabilitação, frequentemente executadas por meio de recapeamento asfáltico. Nessa técnica, uma nova camada de revestimento é aplicada sobre a superfície existente, sendo indispensável a aplicação prévia de pintura de ligação para promover aderência entre as camadas e garantir o funcionamento conjunto da estrutura, como indica a Figura 1.



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Nesse sentido, a integridade da interface entre camadas asfálticas é determinante para o desempenho estrutural e funcional do pavimento, pois o descolamento interfacial pode reduzir a capacidade de distribuição de tensões e acelerar mecanismos de dano, elevando custos de manutenção e diminuindo a vida útil do pavimento. Em obras de recapeamento, a aderência depende, em grande parte, da pintura de ligação, cuja função é promover união efetiva entre a camada existente e a nova camada aplicada, evitando escorregamento e delaminação.

A pintura de ligação, geralmente realizada com emulsão asfáltica, tem a função de estabelecer a ligação adesiva e mecânica na interface, permitindo que o pavimento recapeado mantenha o comportamento estrutural previsto em projeto.

Diversos estudos, como Ahn (2014), Akraym *et al.* (2023), Komaragiri *et al.* (2024), Musselman *et al.* (2020), Guimarães (2013), Scherer (2018), Omar *et al.* (2020), Tandon e Puentes (2006) e Xiao *et al.* (2016), indicam que a aderência entre camadas é influenciada por fatores como taxa de aplicação da emulsão, textura e condição superficial, temperatura, compactação e presença de contaminantes na interface. Com isso, determinar as taxas ótimas

de aplicação e avaliar experimentalmente a ligação na interface são fundamentais para o desempenho de pavimentos multicamadas.

Apesar da relevância do tema, a avaliação da qualidade da pintura de ligação em campo ainda enfrenta desafios práticos, já que procedimentos empíricos e inspeções visuais podem não representar o comportamento mecânico real da interface. Por isso, a literatura tem discutido métodos de ensaio para caracterização entre as camadas, principalmente em ambiente controlado de laboratório, incluindo abordagens em cisalhamento e em tração, cada qual com limitações e sensibilidades distintas.

Entre os métodos *in situ*, o ensaio de arrancamento (*pull-off*) tem sido explorado como alternativa para quantificar resistência de aderência, sobretudo por sua praticidade de aplicação em campo e potencial de aplicação em controle tecnológico de obra. Contudo, os resultados podem apresentar dispersão devido à heterogeneidade do concreto asfáltico e às condições ambientais, e isso reforça e exige a necessidade de estruturação amostrais adequadas e análise cuidadosa do modo de ruptura. No contexto brasileiro, o controle tecnológico da camada de ligação ainda é considerado uma limitação, devido à ausência de normas nacionais específicas.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar experimentalmente a aderência entre as camadas asfálticas em segmentos de recapeamento executados em campo, sob diferentes taxas de aplicação de emulsão asfáltica, por meio de ensaio *pull-off*, discutindo também a influência de condições superficiais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta revisão visa mostrar que a adesão entre as camadas desempenha um papel fundamental em pavimentos asfálticos. Além disso, as características da ligação na interface entre as camadas são propensas a serem influenciadas por vários fatores, sendo eles, o tipo de camada de ligação, aplicação, características e textura da superfície, temperatura, entre outros.

O projeto adequado de pavimentos é essencial para uma estrutura de pavimento bem-sucedida e duradoura, representado pela total aderência na interface das camadas, porém, é algo que nem sempre ocorre em campo. Os projetos de pavimentos, sejam de seções novas ou de recapeamentos, não levam em conta a possibilidade de falha na aderência entre camadas e a maioria dos softwares de dimensionamento estrutural de pavimentos não contempla esse aspecto (Ahn, 2014).

Com isso, as condições de construção também influenciam no desempenho do pavimento, pois a temperatura de mistura, a compactação, a espessura da camada e as mudanças nas condições ambientais podem afetar a qualidade da adesão da mistura (Akraym *et al.*, 2023).

2.1 Camada de ligação (*tack coat*)

A camada de ligação é imprescindível para possibilitar a aderência entre duas camadas asfálticas e aumentar a durabilidade do revestimento. Segundo Omar *et al.* (2020), a avaliação da força de ligação começou antes de 1932, por Nicholson. Desde então, numerosas investigações focadas na falha de má ligação entre as camadas do pavimento identificaram diferentes influências que afetam essa aderência, como o tipo de asfalto na camada de desgaste, o tipo de material da camada de ligação, a baixa compactação da camada de base, da sub-base ou do subleito, a segregação da camada de base e a aplicação insuficiente ou excessiva da camada de ligação (*tack coat*) devido à carga veicular.

Além disso, a literatura aponta que fatores como a presença de umidade, a limpeza e a preparação da superfície do pavimento também influenciam diretamente nesse processo. Por isso, muitos testes e aparelhos de desempenho foram desenvolvidos em estudos para avaliar a eficiência da ligação entre as camadas.

2.1.1 Textura e condição da superfície

A textura do pavimento refere-se às irregularidades da superfície e pode ser categorizada em microtextura, macrotextura ou rugosidade. Cada uma dessas categorias desempenha um papel específico nas interações pneu-pavimento, porém a medição da macrotextura é a técnica mais comumente utilizada para determinar a textura do pavimento.

Dessa forma, a macrotextura é influenciada por vários fatores, incluindo o tamanho do agregado (fino ou grosso), vazios de ar e teor de ligante. Geralmente, a macrotextura depende da proporção e das características dos agregados graúdos utilizados, portanto, é esperado pelo projetista da mistura que considere esses critérios ao selecionar os graus de agregado apropriados para fins de projeto (Akraym *et al.*, 2023).

Nesse sentido, Scherer (2018) concluiu em seu trabalho que a resistência da ligação é significativamente afetada pelas texturas das camadas e que quanto maior o valor obtido no ensaio de macrotextura, maior será o intertravamento das camadas.

A resistência de ligação na interface é afetada pelas condições da superfície do pavimento, como textura, limpeza e umidade. Dessa maneira, diretrizes recomendam a

aplicação do *tack coat* apenas em superfícies limpas e secas, considerado uma preparação adequada da superfície para receber a pintura de ligação (Akraym *et al.*, 2023).

2.1.2 Taxa de aplicação

Para construir um pavimento asfáltico durável e de longa duração, é fundamental aplicar o tipo e a taxa de pintura de ligação adequados entre as camadas asfálticas do pavimento. Diversos estudos demonstraram os efeitos da taxa de aplicação e as melhorias nos resultados de resistência.

De modo geral, o aumento da taxa de aplicação amplia a área de contato e a resistência ao cisalhamento. Entretanto, quando aplicada em excesso, a camada adesiva pode provocar deslizamento na interface e reduzir a aderência entre as camadas. Assim, a definição de uma taxa adequada de aplicação é essencial para garantir uma ligação eficiente no pavimento. Contudo, não há consenso sobre a taxa ideal de aplicação do *tack coat*, pois ela varia conforme o tipo de material empregado e as condições físicas da superfície (Ahn, 2014).

As características da superfície do pavimento influenciam diretamente nessa taxa de aplicação, em que superfícies novas, antigas ou fresadas exigem diferentes quantidades de pintura de ligação para alcançar aderência adequada na interface. Pavimentos envelhecidos e oxidados, por exemplo, tendem a absorver maior quantidade da emulsão aplicada, tornando necessária uma taxa residual mais elevada para assegurar a ligação entre a camada existente e o novo revestimento. Em contrapartida, superfícies novas apresentam menor absorção, exigindo redução da taxa aplicada. Além da idade e do estado de conservação, a textura superficial também exerce influência significativa, na qual superfícies mais lisas demandam menor quantidade de pintura de ligação devido à menor área exposta, enquanto superfícies desagregadas requerem maior aplicação residual para compensar a textura mais áspera (Musselman *et al.*, 2020).

Essa variação nas condições do pavimento também se reflete nas normas e especificações técnicas brasileiras, que apresentam diferentes intervalos para a taxa de aplicação da pintura de ligação. O estudo de Scherer (2018) destaca que, segundo o DNIT, as emulsões asfálticas devem ser aplicadas em taxas de 0,3 a 0,4 L/m² de ligante residual. Já a especificação do DER-SP recomenda taxas entre 0,3 e 0,5 L/m² de resíduo asfáltico e no caso do DER-PR, a taxa de aplicação em campo varia de 0,5 a 0,8 L/m². Além disso, Lavin (2003) *apud* Scherer (2018) recomenda taxas de 0,2 a 1,0 L/m² de emulsão, com os maiores valores destinados a superfícies fresadas ou misturas de graduação aberta.

2.1.3 Emulsão asfáltica

Uma das chaves para garantir que a pintura de ligação forneça aderência satisfatória entre as camadas do pavimento asfáltico é a utilização adequada dos materiais. De acordo com Musselman *et al.*, 2020, três grandes classificações de materiais betuminosos têm sido empregadas como pintura de ligação: ligantes asfálticos (*straight run*) ou modificados com polímeros/aditivos, frequentemente denominados “pintura de ligação a quente”, asfaltos diluídos (*cutback*) e asfaltos emulsionados. Dentre esses materiais, destaca-se a utilização do asfalto emulsionado, conhecido como emulsão asfáltica, amplamente empregado como pintura de ligação entre camadas do pavimento.

A emulsão asfáltica consiste em um ligante asfáltico líquido emulsificado em água, sendo formada basicamente por asfalto, água e um agente emulsificante. Esse emulsificante atua como agente tensoativo (surfactante), mantendo as gotículas de asfalto em suspensão estável. As emulsões asfálticas são identificadas por letras e números relacionados à carga das partículas, taxa de pega, viscosidade da emulsão, dureza do ligante asfáltico base e presença de modificação por polímero.

A primeira classificação refere-se à carga elétrica das partículas do ligante asfáltico, responsável por manter as partículas em suspensão e evitar sua coalescência. As emulsões catiônicas, de carga positiva, são identificadas pela letra “C”; quando essa designação não aparece, a emulsão geralmente é aniônica, de carga negativa. Também existem emulsões não iônicas, que ganharam importância comercial nos últimos anos, embora a maioria das emulsões utilizadas ainda seja aniônica ou catiônica. Após a classificação quanto à carga, as emulsões também são diferenciadas pela rapidez com que as gotículas de asfalto coalescem, processo relacionado à velocidade de ruptura da emulsão, ou seja, ao tempo necessário para que ela retorne a uma fase asfáltica contínua. As categorias incluem ruptura rápida (RR), ruptura média (RM) e ruptura lenta (RL). Os números que acompanham essas classificações indicam a viscosidade relativa da emulsão, assim, uma emulsão RR-2C apresenta maior viscosidade que uma RR-1C (Musselman *et al.*, 2020).

Durante o armazenamento, a emulsão asfáltica apresenta coloração marrom e após sua aplicação na superfície do pavimento, inicia-se o processo de ruptura, caracterizado pela mudança de cor para preto, indicando a separação entre as partículas de asfalto e a água. Quando toda a água evapora, ocorre a “cura” da emulsão, restando apenas o ligante asfáltico na superfície do pavimento. Em relação aos tempos de ruptura e cura, eles podem ser influenciados por diversos fatores, como temperatura do ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do

vento, temperatura da superfície do pavimento, taxa de aplicação da emulsão, taxa de diluição e tipo de agente emulsificante utilizado (Deysarkar; Tandon, 2004).

2.1.4 Temperatura e viscosidade

A temperatura é um fator essencial no comportamento do asfalto, pois variações térmicas influenciam diretamente as propriedades do ligante asfáltico e da pintura de ligação. De modo geral, observa-se uma relação entre temperatura e resistência, em que o aumento da temperatura tende a reduzir esse parâmetro. Segundo Akraym *et al.* (2023), a resistência na interface aumenta com o aumento da taxa de aplicação, porém diminui com o aumento da temperatura. De forma semelhante, a resistência de ligação da emulsão é ligeiramente melhor em viscosidades mais baixas quando comparadas às mais altas.

De maneira geral, a literatura indica que o aumento da temperatura reduz a aderência entre camadas asfálticas. No estudo de Guimarães (2013), os ensaios realizados em temperaturas mais elevadas, apresentou menor aderência em comparação a condições mais baixas, devido à redução da viscosidade da pintura de ligação, o que diminuiu o efeito adesivo e fez com que a textura superficial passasse a ter maior influência na ligação.

2.2 Projeto de pavimentos

Os projetos de pavimentos são essenciais para a obtenção de uma estrutura durável, porém, em geral, não é considerado explicitamente a possibilidade de falhas na aderência entre camadas, e a maioria dos softwares de dimensionamento estrutural de pavimentos não contempla adequadamente esse aspecto.

Nesse contexto, segundo Ahn (2014), no novo Guia de Projeto da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), é possível definir a condição da interface entre camadas, variando de 0 (deslizamento total ou ausência de ligação) a 1 (ligação total ou atrito completo), sendo que essa condição pode gerar diferenças significativas no desempenho estrutural do pavimento. Em muitos casos, o pavimento é projetado assumindo ligação total entre as camadas asfálticas, uma vez que as interfaces ainda não estão fisicamente definidas no momento do dimensionamento.

Nesse viés, Guimarães (2013) destaca que a aderência entre camadas pode ser representada como plena ou nula, sendo incorporada em softwares por meio de um fator de aderência. Esse fator pode ser fixo, definido pelo desenvolvedor ou ajustável pelo usuário, dependendo do programa utilizado. No *AEMC* o valor “0” indica aderência plena e “1” ausência

total de aderência. Já no *WESLEA* e no *KENLAYER*, “0” corresponde à escorregamento e “1” à aderência. Diante disso, a avaliação da aderência entre camadas de pavimentos ainda é um campo em desenvolvimento.

2.3 Métodos de caracterização da ligação

Diversos métodos têm sido propostos para avaliar a aderência entre camadas asfálticas, porém ainda não existe consenso sobre o procedimento mais adequado. De forma geral, essas abordagens se baseiam em diferentes princípios mecânicos, como resistência à tração, cisalhamento direto ou torque aplicado na interface. Dessa forma, os ensaios podem ser classificados em testes de cisalhamento, arrancamento (*pull-off*) e torção, aplicáveis tanto em laboratório quanto em campo, utilizando corpos de prova moldados ou extraídos.

Dentro desses métodos, o ensaio de cisalhamento direto é um dos mais difundidos, por apresentar simplicidade e boa correlação com o comportamento da interface. Já os testes de torção surgiram como alternativa para avaliar a resistência ao escorregamento interfacial sob ação rotacional, sendo utilizados em equipamentos de campo como o *Oregon Torque Tester* e outros sistemas desenvolvidos para aplicação *in situ* (Komaragiri *et al.*, 2024).

Os ensaios de arrancamento foram desenvolvidos com o objetivo de medir diretamente a resistência à tração na interface entre camadas. Um dos exemplos mais conhecidos é o teste desenvolvido pela Universidade do Texas em El Paso (UTEP), amplamente utilizado para avaliar a aderência da pintura de ligação. Esse tipo de ensaio permite estimar a resistência coesiva da interface de forma mais direta em comparação aos métodos baseados em cisalhamento (Xiao *et al.*, 2016).

Apesar disso, muitos desses métodos apresentam limitações. Ensaio de torção e arrancamento podem sofrer com baixa repetibilidade devido à dificuldade de controle da taxa de carregamento e à influência da aplicação manual, o que gera variabilidade nos resultados. Além disso, alguns equipamentos não permitem controle rigoroso de temperatura e condições ambientais, o que afeta a consistência dos ensaios.

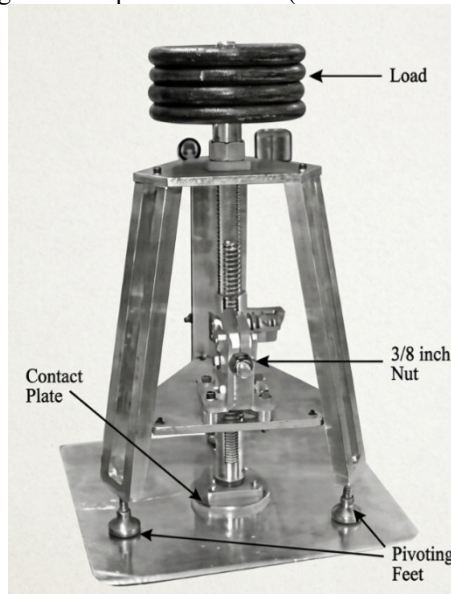
Diante dessas limitações, foram propostos métodos alternativos mais recentes, como o *Louisiana Tack Coat Quality Tester* (LTCQT), o *Compression Pull-Off Test* (CPOT) e o *Interface Bond Test* (IBT), que buscam melhorar a quantificação da aderência entre camadas e reduzir problemas dos métodos tradicionais. Esses ensaios também permitem maior aproximação entre resultados laboratoriais e o desempenho em campo (Akaym *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços, ainda há carência de métodos de campo amplamente padronizados e confiáveis para a avaliação da pintura de ligação, o que mantém o uso de procedimentos complementares e, em alguns casos, subjetivos (Tandon; Puentes, 2006). Nesse contexto, os ensaios de arrancamento se destacam como alternativa promissora por avaliarem diretamente a resistência de tração da interface, reduzindo a influência do atrito e representando de forma mais fiel o comportamento da ligação entre camadas.

2.4 Teste de arrancamento *pull-off*

O dispositivo UPOD (Patente Pendente), representado pela Figura 2, desenvolvido na Universidade do Texas em El Paso (UTEP), foi criado com base no mecanismo de arrancamento e pode ser utilizado para determinar as propriedades adesivas da pintura de ligação. O equipamento pode ser facilmente nivelado por meio de pés giratórios, e a aplicação da carga é realizada com o auxílio de uma chave de torque, responsável por promover o arrancamento da placa de contato da superfície tratada com pintura de ligação (Tandon; Puentes, 2006).

Figura 2. Dispositivo UPOD (Patente Pendente)



Fonte: (Tandon; Puentes, 2006).

Com base nesse princípio, o dispositivo de arrancamento da UTEP foi desenvolvido para avaliar a qualidade da camada de adesão em modo de tração. Além disso, esse equipamento permite identificar a qualidade da ligação interfacial por meio da medição da resistência de aderência sob diferentes condições de ensaio.

A principal vantagem dos ensaios de arrancamento é que eles eliminam a influência do componente de atrito, permitindo que a resistência medida esteja mais associada à resistência coesiva da interface. Assim, assume-se que a resistência à tração obtida nesses ensaios se aproxima da resistência coesiva esperada da camada de ligação.

De maneira geral, os ensaios de arrancamento podem apresentar diferentes modos de falha, independentemente do equipamento utilizado. Os principais são a falha adesiva, caracterizada pela separação entre o ligante asfáltico e a superfície do agregado, e a falha coesiva, que ocorre no interior do próprio ligante asfáltico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Configuração experimental

O estudo foi realizado dentro do Campus da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por meio de dois trechos experimentais de recapeamento, sendo que o Trecho 1 apresenta revestimento existente do tipo Concreto Asfáltico (CA), enquanto o Trecho 2 é caracterizado por revestimento do tipo Tratamento Superficial Duplo (TSD). Cada trecho foi dividido em quatro faixas longitudinais, de modo a permitir comparação entre as diferentes taxas de aplicação da emulsão asfáltica e as variáveis de execução encontradas nos locais.

3.1.1 Local de estudo

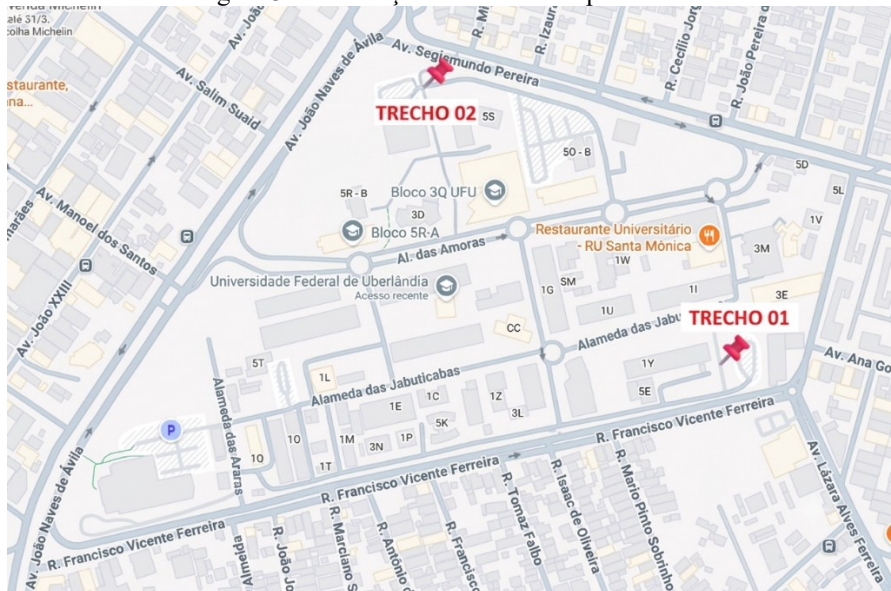
A preparação para os ensaios teve início com a definição criteriosa dos locais onde seria realizado os experimentos e os ensaios. Após avaliação das áreas disponíveis, para o Trecho 1, optou-se por utilizar duas vagas de estacionamento situadas próximas do Bloco 1Y, essa escolha se deu por critérios de praticidade e de acessibilidade para a execução dos procedimentos previstos. Por outro lado, a seleção do Trecho 2 foi definida com o objetivo de avaliar o comportamento do pavimento em situação real de tráfego, com isso a área escolhida foi uma via de acesso ao estacionamento da biblioteca da UFU, caracterizada por fluxo e passagem de veículos. Dessa forma, a localização dos trechos experimentais está apresentada na Figura 3.

3.1.2 Divisão de faixas

As duas vagas selecionadas para o Trecho 1 correspondem a uma área total de 4,60m de largura por 4,25m de comprimento. Com isso, essa área foi previamente delimitada, de modo a garantir organização e padronização durante os ensaios. A partir dessa delimitação, o espaço

foi subdividido em quatro faixas longitudinais, cada uma medindo 4,25m de comprimento por 1,00m de largura, como é apresentado na Figura 4.

Figura 3. Localização dos trechos experimentais



Fonte: (Autoria própria, 2026).

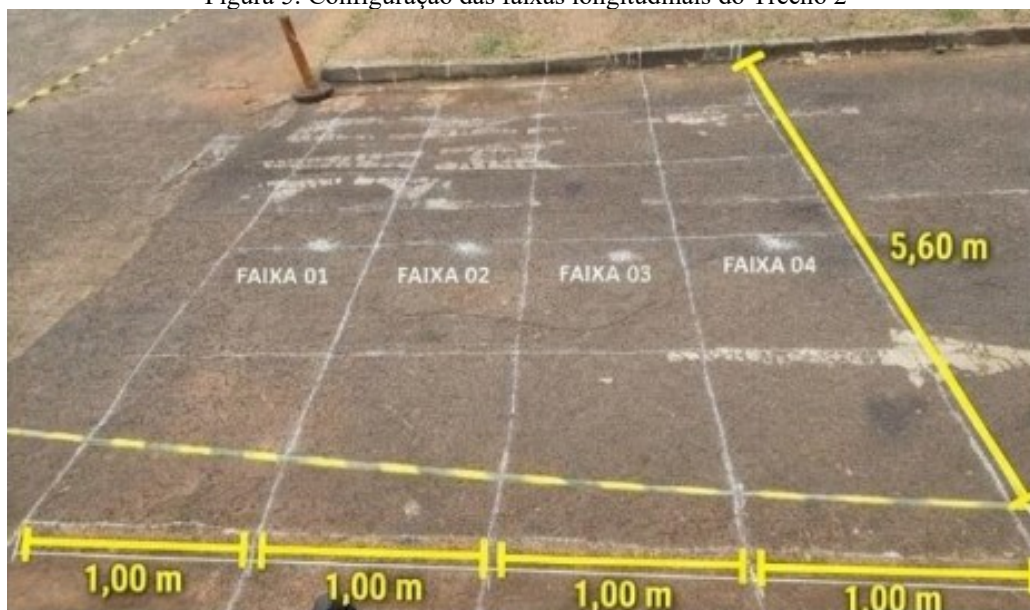
Figura 4. Configuração das faixas longitudinais do Trecho 1



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Nesse sentido, o Trecho 2 corresponde a uma área total de 4,00m de largura por 5,60m de comprimento, com área subdividida em quatro faixas longitudinais, cada uma medindo 5,60m de comprimento por 1,00m de largura, conforme Figura 5. Essa subdivisão permitiu uma melhor organização da aplicação dos materiais, facilitando tanto o controle das variáveis quanto a repetição dos procedimentos.

Figura 5. Configuração das faixas longitudinais do Trecho 2



Fonte: (Autoria própria, 2026).

A definição precisa da área foi essencial para o planejamento do volume de insumos a serem utilizados, como a emulsão e a nova camada de revestimento asfáltico a ser aplicada. Portanto, essa etapa de preparação e divisão das faixas foi realizada com atenção, assegurando que os ensaios fossem realizados de maneira eficiente.

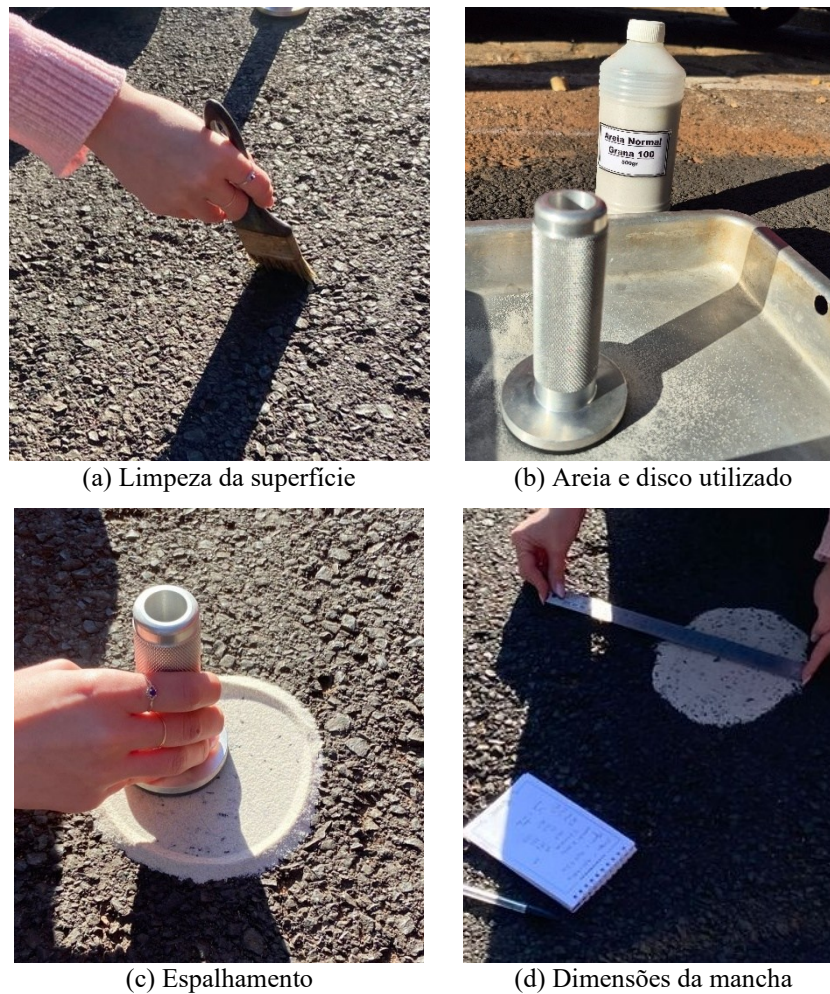
3.1.3 Caracterização superficial: macrotextura (mancha de areia)

A realização do ensaio de mancha de areia consiste em determinar a macrotextura superficial do pavimento existente em cada uma das faixas delimitadas. A macrotextura do pavimento foi caracterizada e mensurada segundo a norma ABNT NBR 16504 (2016), buscando qualificar a condição superficial e apoiar a interpretação dos resultados de aderência, uma vez que a textura pode alterar a área efetiva de contato e o intertravamento mecânico das camadas.

O ensaio foi realizado individualmente em cada faixa, de maneira padronizada, utilizando os utensílios disponíveis no Laboratório de Pavimentação (LabPAV) da UFU. O procedimento, representado pela Figura 6, consiste basicamente na aplicação de um volume constante de areia padronizada ($V = 25000 \text{ mm}^3$), conforme estabelecido em norma técnica. Essa areia, seca e com granulometria uniforme, é cuidadosamente depositada sobre o pavimento e espalhada com o auxílio de um disco de borracha, em movimentos circulares, até preencher completamente os vazios da superfície, formando um círculo regular.

Ao final do espalhamento, é medido 4 valores de diâmetro da mancha formada pela areia para a determinação de uma média (D), considerando que a mancha não é um círculo perfeito. Com base nessa média e no volume previamente conhecido de material utilizado, calcula-se a altura média da mancha de areia (HS), por meio de uma equação estabelecida na norma (Equação 1). Por fim, esse valor é então comparado a uma tabela de referência (Tabela 1), que permite classificar o tipo de macrotextura presente na superfície do pavimento.

Figura 6. Ensaio da mancha de areia



Fonte: (Autoria própria, 2026).

$$HS = \frac{4V}{D^2\Pi} \quad (1)$$

em que HS é a altura média da mancha de areia em mm, V é o volume constante de areia de 25000 mm^3 e D é o diâmetro médio do círculo de areia em mm.

Tabela 1. Classe de macrotextura

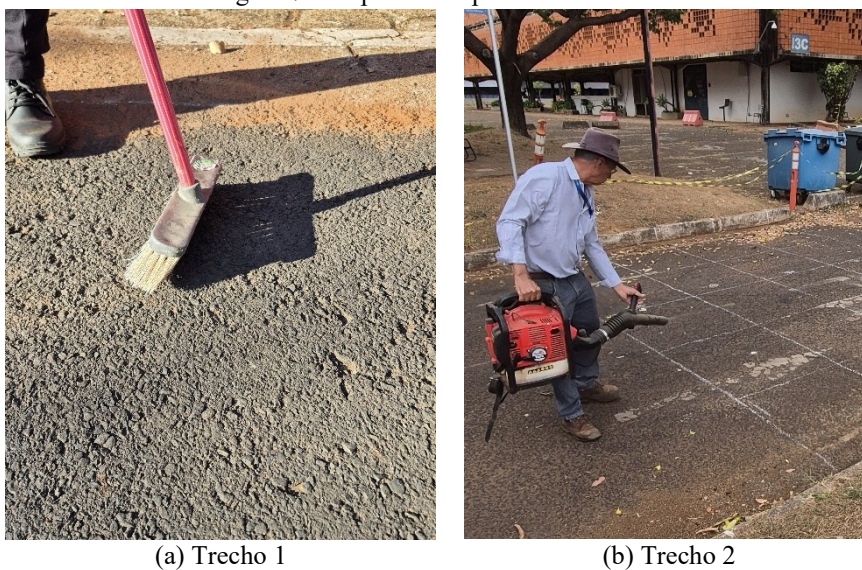
AVALIAÇÃO DA MACROTEXTURA / MÉTODO DA ALTURA DE AREIA	
PROFUNDIDADE MÉDIA EM (mm)	TEXTURA SUPERFICIAL
HS < 0,20 mm	MUITO FINA OU MUITO FECHADA
0,20 mm < HS < 0,40 mm	FINA OU FECHADA
0,40 mm < HS < 0,80 mm	MÉDIA
0,80 mm < HS < 1,20 mm	GROSSEIRA OU ABERTA
HS > 1,20 mm	MUITO GROSSEIRA OU ABERTA

Fonte: (Adaptado DNIT, 2006).

3.1.4 Taxas de emulsão

Para avaliar o impacto da taxa de aplicação na qualidade da ligação, quatro taxas de aplicação diferentes para cada trecho foram avaliadas. Essa intervenção foi realizada com o apoio da Prefeitura de Uberlândia e a terceirização dos serviços por meio de um laboratório especializado, responsável pelo fornecimento e aplicação da emulsão asfáltica. Esse processo consistiu inicialmente na limpeza da superfície das faixas, de modo a garantir condições adequadas para a aderência dos materiais a serem aplicados (Figura 7).

Figura 7. Limpeza da superfície das faixas



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Em seguida, ocorreu a aplicação da pintura de ligação sobre a superfície do revestimento existente com o auxílio de um regador (Figura 8), com o objetivo de garantir condições adequadas de aderência entre a camada antiga e a nova camada a ser executada. Para isso, utilizou-se emulsão asfáltica RR-1C, com densidade de $0,985 \text{ g/cm}^3$ e teor de resíduo asfáltico de 65,1% (Anexo A), atendendo às especificações normativas (mínimo de 62%), aplicada em diferentes taxas nas faixas experimentais, conforme indicado na Tabela 2.

Figura 8. Aplicação da emulsão asfáltica



(a) Trecho 1 – durante a aplicação



(b) Trecho 2 – durante a aplicação



(c) Trecho 1 – após a aplicação



(d) Trecho 2 – após a aplicação

Fonte: (Autoria própria, 2026).

Tabela 2. Taxas de aplicação de emulsão asfáltica

Faixas	Taxa de aplicação (L/m ²)	
	Trecho 1	Trecho 2
01	0,7	1,0
02	1,0	0,7
03	1,2	0,3
04	0,3	0,0

Fonte: (Autoria própria, 2026)

Saber a densidade da emulsão é uma etapa essencial, pois é com essa informação que será definida a quantidade em massa da camada de ligação. Dessa maneira, com o auxílio de uma balança, foi possível descobrir quanto de emulsão era preciso para cada faixa, respeitando a área de cada faixa e as taxas de aplicação já especificadas. Esse processo é ilustrado pela Figura 9, em que mostra como foi realizado a transferência da emulsão e sua pesagem.

Figura 9. Determinação da quantidade de emulsão por faixa



Fonte: (Autoria própria, 2026).

As taxas foram escolhidas de modo a permitir uma avaliação da aderência para condição com nível baixo de emulsão e níveis normalmente utilizados em obras rodoviárias (DNIT, 2012). Após a aplicação da pintura de ligação, foi observado o processo de cura da emulsão, entendido como a etapa em que ocorre sua ruptura e a perda da água presente na composição, permitindo a formação da película ligante responsável pela ligação entre as camadas. Essa cura é caracterizada visualmente pela mudança de coloração da emulsão de um tom marrom para um preto, como é indicado pela Figura 10.

Figura 10. Cura da emulsão



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Destaca-se que a aplicação ocorreu em períodos climáticos distintos, o Trecho 1 em condição mais fria, com uma máxima de 25°C e mínima de 13°C, e o Trecho 2 em mais quente,

com uma máxima de 37°C e mínima de 26°C. Além disso, o tempo de ruptura da emulsão também variou conforme as condições de contorno, especialmente clima e tipo de superfície. Essas observações foram importantes para identificar o comportamento do material em campo e possíveis diferenças associadas às taxas empregadas. Concluído o tempo de cura, procedeu-se com a aplicação da nova camada de asfalto em cada uma das faixas.

3.1.5 Execução do recapeamento

Com a cura da emulsão, o revestimento foi aplicado em ambos os trechos e, em seguida, compactado com o auxílio da placa vibratória. As Figuras 11 e 12 ilustram a execução e compactação da nova camada asfáltica, respectivamente.

Figura 11. Aplicação do revestimento asfáltico



(a) Trecho 1 – durante a aplicação



(b) Trecho 2 – durante a aplicação



(c) Trecho 1 – após a aplicação e compactação



(d) Trecho 2 – após a aplicação e compactação

Fonte: (Autoria própria, 2026).

Figura 12. Compactação da nova camada asfáltica



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Após a finalização do recapeamento, a área foi liberada para o tráfego, permitindo que o pavimento fosse submetido às solicitações reais de carga e circulação. Essa etapa foi fundamental para o trabalho, pois com ela foi possível realizar os ensaios voltados à análise do comportamento das diferentes taxas de aplicação da emulsão, no qual o objetivo é avaliar qual dessas condições proporciona a melhor aderência entre a camada antiga e a nova camada de revestimento, contribuindo assim para a eficiência e a durabilidade do recapeamento asfáltico.

3.2 Teste de arrancamento (*pull-off*)

O ensaio de arrancamento foi realizado a partir da adaptação do método de tração direta com placas metálicas coladas ao revestimento, procedimento amplamente relacionado a dispositivos e abordagens de campo para avaliar qualidade de *tack coat* e aderência (Tandon e Puentes, 2006).

3.2.1 Dispositivo utilizado

A resistência ao arrancamento de uma camada de ligação é medida usando um dispositivo comercialmente disponível de teste de arrancamento direto motorizado portátil, conhecido por Dispositivo de Descolamento UTEP (UPOD) desenvolvido na Universidade do Texas de El Paso (UTEP).

No entanto, ressalta-se que o dispositivo específico para a realização do ensaio não se encontra disponível na UFU, assim como também não foi identificado no Laboratório de Pavimentação. Dessa forma, em função dessa limitação, optou-se pela utilização de um

equipamento alternativo com princípio de funcionamento semelhante, sendo empregado o dispositivo de arrancamento de placas cerâmicas (Figura 13), disponibilizado pelo Laboratório de Construção Civil da UFU.

Figura 13. Dispositivo para os ensaios de arrancamento



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Tal adaptação foi considerada adequada para os fins deste estudo, uma vez que o equipamento utilizado permite a aplicação de esforços de tração comparáveis aos requeridos no ensaio originalmente proposto.

3.2.2 Definição do adesivo

Definir qual o tipo de adesivo é mais adequado para a colagem das placas metálicas a serem utilizadas no ensaio de arrancamento, é uma etapa importante, pois ela representa o procedimento principal para avaliação da aderência entre as camadas do recapeamento. Com isso, foram testados dois tipos de adesivos amplamente utilizados em ensaios de arrancamento: a massa plástica e o adesivo epóxi, ilustrados pela Figura 14.

A preparação da massa plástica consistiu na mistura da base com um componente líquido catalisador, que funciona como agente de cura (Figura 15). Essa mistura foi aplicada em três placas metálicas, em quantidade suficiente para promover a adesão à superfície do pavimento (Figura 16).

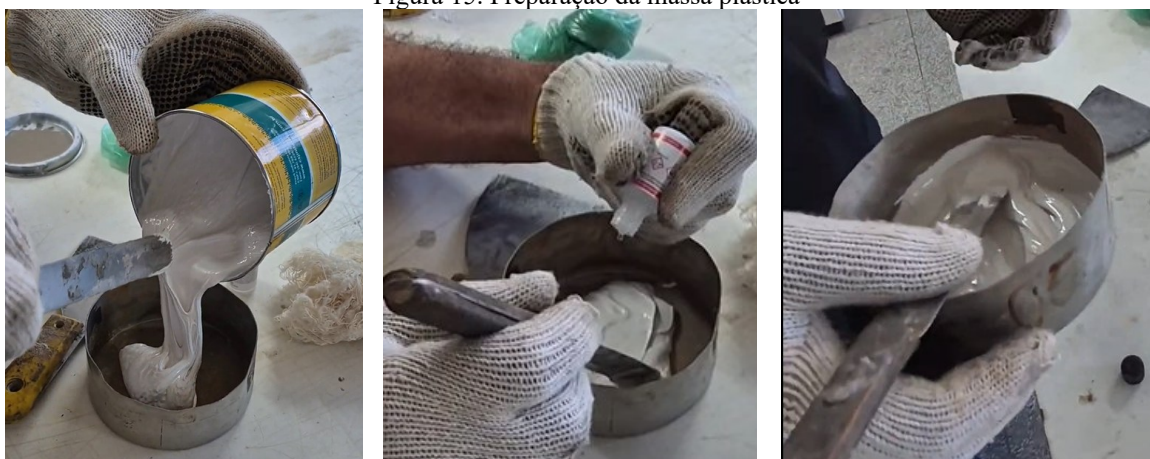
Desse mesmo modo o adesivo epóxi foi preparado de acordo com as instruções do fabricante, a partir da mistura de dois componentes: uma base de consistência pastosa (geralmente cinza-claro) e um agente endurecedor (cinza-escuro) (Figura 17). Esse material também foi aplicado em outras três placas, que foram coladas no revestimento asfáltico antigo (Figura 18).

Figura 14. Adesivos testados



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Figura 15. Preparação da massa plástica



Fonte: (Autoria própria, 2026).

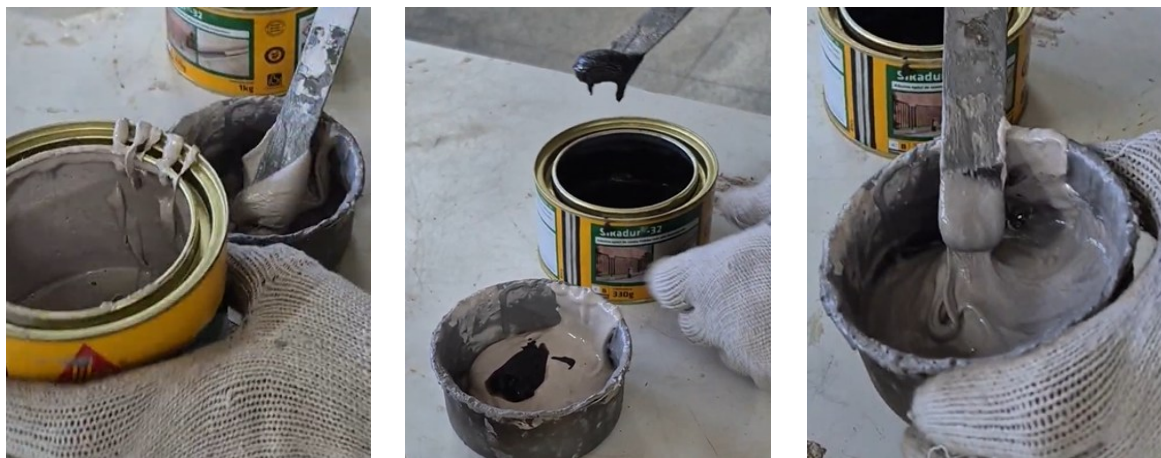
Figura 16. Placas metálicas coladas com massa plástica



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Após a aplicação, todas as placas permaneceram em repouso pelo tempo necessário para a cura total dos adesivos, assegurando a aderência à superfície. Na sequência, o ensaio foi realizado utilizando o equipamento utilizado para os ensaios de arrancamento (Figura 13).

Figura 17. Preparação do adesivo epóxi



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Figura 18. Placas metálicas coladas com adesivo epóxi



Fonte: (Autoria própria, 2026).

Após o ensaio, observou-se que as placas coladas com massa plástica foram removidas com relativa facilidade, enquanto aquelas coladas com epóxi apresentaram resistência significativamente maior, sugerindo melhor desempenho. Isso se deu pela observação visual, em que apenas uma das placas fixadas com massa plástica rompeu no revestimento asfáltico, as outras duas, a falha aconteceu dentro do próprio adesivo, que permaneceu colado à superfície, indicando menor resistência da cola. Por outro lado, as três placas coladas com epóxi ao serem arrancadas, romperam no revestimento, o que demonstra uma aderência significativamente superior à massa plástica. A Figura 19 faz uma comparação quanto aos modos de falha dos adesivos submetidos ao ensaio de arrancamento. Com base nesses resultados, definiu-se que o adesivo epóxi seria adotado como padrão para os ensaios de arrancamento a serem realizados nas faixas recapeadas.

Figura 19. Resultados do arrancamento dos adesivos



(a) Massa plástica



(b) Epóxi

Fonte: (Autoria própria, 2026).

3.2.3 Ensaio pull-off

Um teste de arrancamento foi desenvolvido e utilizado para avaliar a qualidade *in-situ* da camada de ligação. Um dos objetivos desta tarefa foi avaliar a precisão deste método como um ensaio de campo.

O ensaio foi realizado nas oito faixas previamente definidas em cada trecho. No primeiro trecho, foram conduzidos 24 ensaios, distribuídos em 6 pontos por faixa (Figura 20).

Figura 20. Amostragem Trecho 1



(a) Faixa 1



(b) Faixa 2



(c) Faixa 3

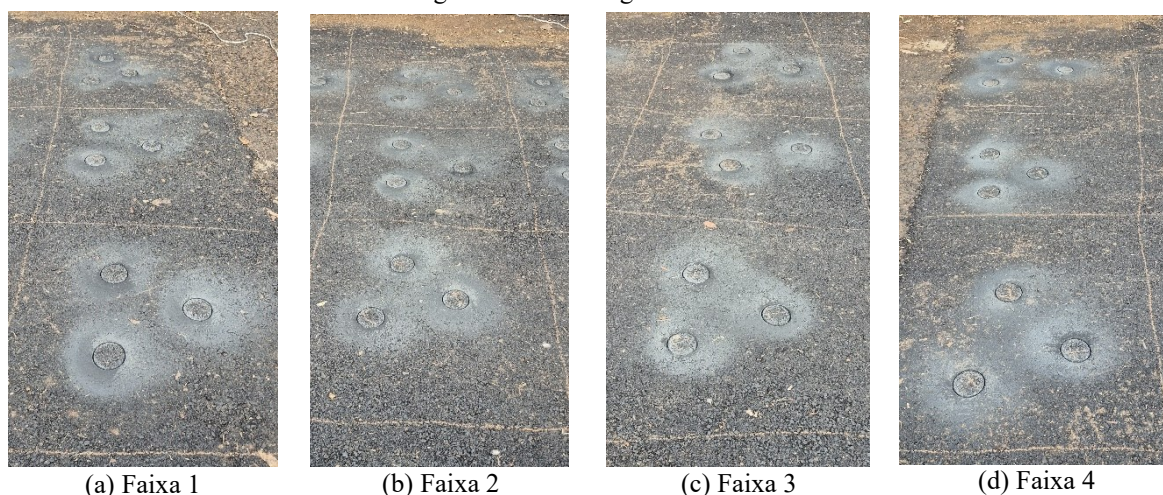


(d) Faixa 4

Fonte: (Autoria própria, 2026).

Já no segundo trecho, a malha de ensaios foi de 36 pontos, com 9 testes por faixa (Figura 21), visando aumentar a confiabilidade dos dados frente às variações encontradas em campo. Portanto, a amostragem totalizou 60 ensaios de arrancamento.

Figura 21. Amostragem Trecho 2



Fonte: (Autoria própria, 2026).

O processo foi iniciado com o corte da superfície do pavimento, com o uso de uma serra-copo, formando os corpos de prova circulares em campo (Figura 22-a). Após o corte, foi realizada a limpeza da área, uma etapa essencial para a remoção do pó e de resíduos gerados, que podem comprometer a aderência da cola ao pavimento.

Para evitar que o adesivo escorresse para dentro dos cortes durante o processo de colagem, foram inseridas folhas de papel nos furos, assegurando que a força de tração atuasse corretamente no plano desejado (Figura 22-b).

A seguir, foram realizadas as colagens das placas metálicas de 100 mm de diâmetro sobre os corpos de prova, utilizando o adesivo epóxi, previamente definido como o mais adequado (Figura 22-c e 22-d). As placas permaneceram em repouso pelo tempo mínimo de 24 horas para garantir a cura completa da cola.

Finalizado o período de cura, procedeu-se com o ensaio de arrancamento. A força foi aplicada de forma perpendicular à superfície, até o momento da ruptura (Figura 22-e). Após cada ensaio, foi feita a observação visual da região rompida, a fim de identificar o tipo de falha (se na cola, na interface ou no próprio revestimento), e também foram coletados os dados de força de arrancamento (Figura 22-f), necessários para o cálculo da tensão de adesão em cada caso (Equação 2).

Esses valores serão posteriormente utilizados para comparação entre as faixas e os trechos, possibilitando a identificação da taxa de aplicação de emulsão que resultou na melhor aderência entre a camada antiga e a nova camada de recapeamento.

Figura 22. Procedimento do ensaio de arrancamento



Fonte: (Autoria própria, 2026)

$$P = \frac{F}{A} \times n \quad (2)$$

em que P é a resistência adesiva à tração em kPa, F é a força de tração na falha ou de arrancamento em kgf, A é a área da superfície de falha ou da placa metálica em mm² e n é o fator de conversão igual a 9806,65.

3.3 Análise complementar

Foram realizados os ensaios HT-IDT e Ideal-CT como forma de complementar e investigar possíveis diferenças na qualidade e comportamento da mistura asfáltica utilizada no Trecho 2. Esses ensaios avaliaram de forma prática e eficiente as propriedades críticas das misturas, especialmente a resistência à deformação permanente e ao trincamento por fadiga.

3.3.1 Ensaio HT-IDT

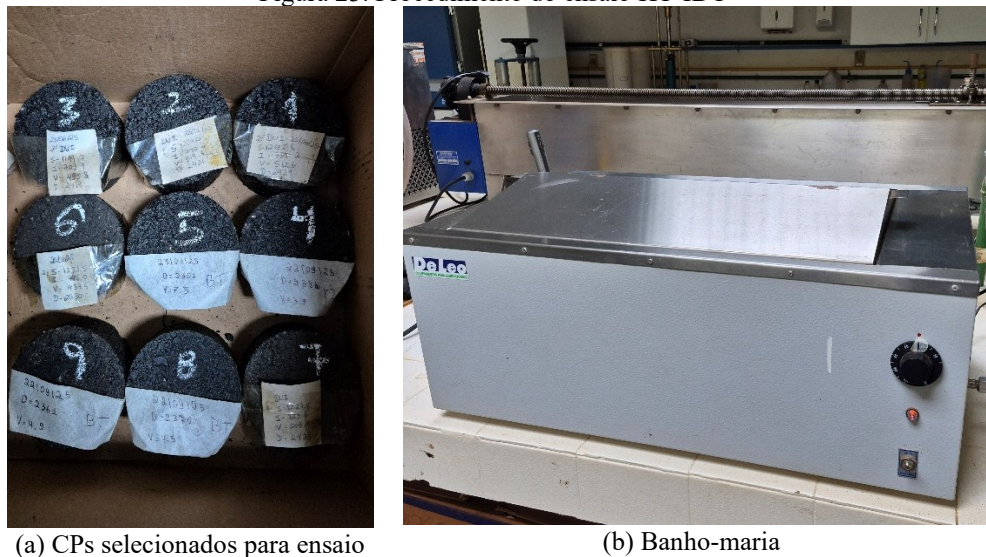
O ensaio HT-IDT foi utilizado para avaliar a propensão à deformação permanente das misturas asfálticas. O teste consistiu na aplicação de uma taxa de carregamento de 50 mm/min em deslocamento axial aplicado no plano diametral de nove corpos de prova (CPs) cilíndricos com uso da prensa Marshall. Antes da realização dos ensaios, os CPs foram condicionados em banho-maria a uma temperatura de 50°C por 2h. Dessa forma, a Figura 23 apresenta o esquema utilizado para execução do ensaio HT-IDT.

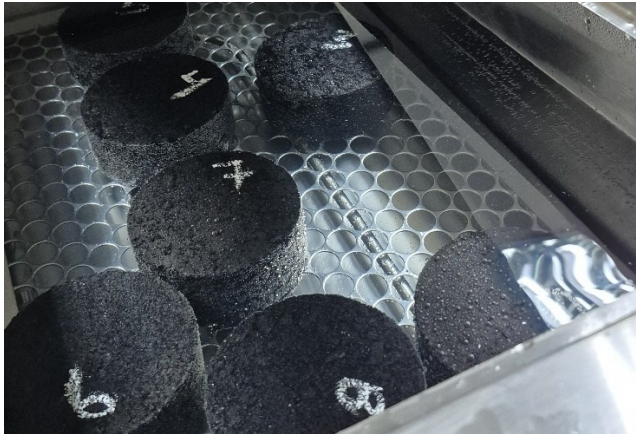
Com os nove CPs selecionados, o ensaio foi realizado e a partir dos resultados obtidos (Apêndice A), foram elaborados gráficos de deslocamento por carga a partir do ajuste das curvas resultantes, tendo em vista que a resistência à deformação permanente (HT-IDT) é calculada (Equação 3) em função da carga máxima de ruptura, que é representada pelo ponto de falha da amostra durante a aplicação da carga, além das dimensões do CP, que são medidas diretamente nas amostras antes da realização do ensaio. A Figura 24 representa um exemplo do gráfico ajustado.

$$HT - IDT = \frac{2 \times P_{m\acute{a}x}}{\pi \times t \times D} \times 10^6 \quad (3)$$

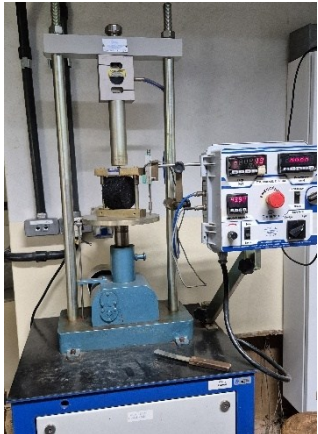
em que HT-IDT é a resistência à tração indireta em kPa, $P_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima em kN, t é a espessura do corpo de prova em mm e D é o diâmetro do corpo de prova em mm.

Figura 23. Procedimento do ensaio HT-IDT





(c) CPs condicionados



(d) Prensa Marshall

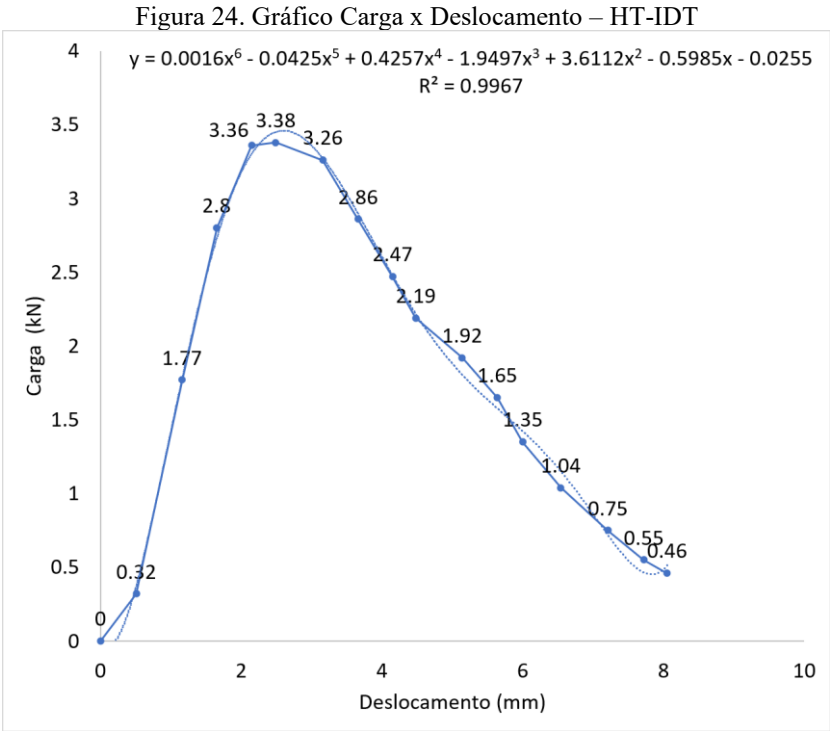


(e) Rompimento de CPs



(f) CPs após ensaio

Fonte: (Autoria própria, 2026)

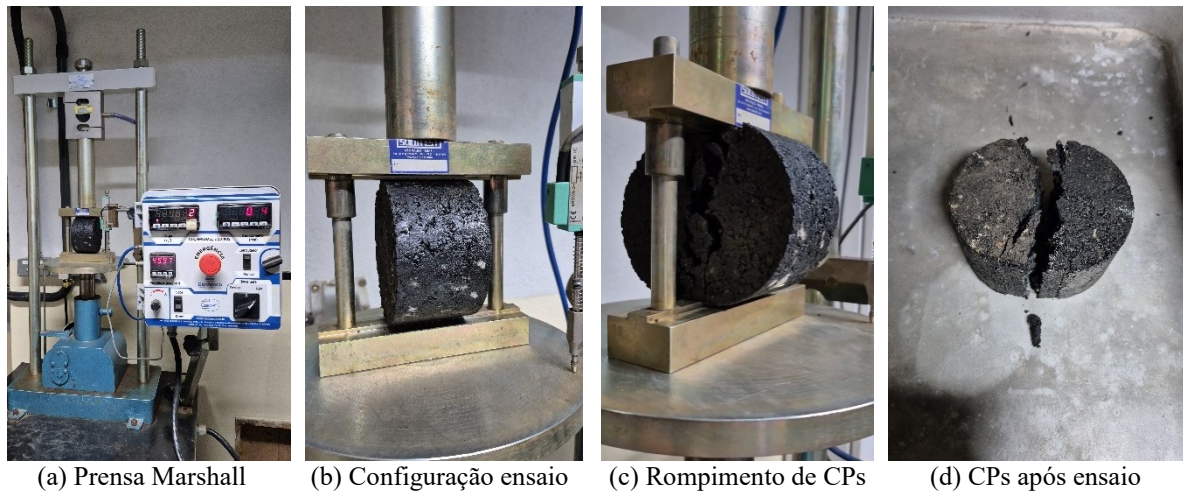


Fonte: (Autoria própria, 2026)

3.3.2 Ensaio Ideal-CT

O ensaio Ideal-CT foi utilizado para avaliar a suscetibilidade das misturas asfálticas ao trincamento. O teste foi realizado em oito corpos de prova (CPs) cilíndricos à temperatura de 25°C e taxa de carregamento de 50 mm/min em tração indireta com o uso da prensa Marshall. Antes da realização dos ensaios, os CPs foram condicionados por 2h em uma sala com monitoramento de temperatura. Dessa maneira, a Figura 25 apresenta o esquema do teste Ideal-CT.

Figura 25. Procedimento do ensaio Ideal-CT

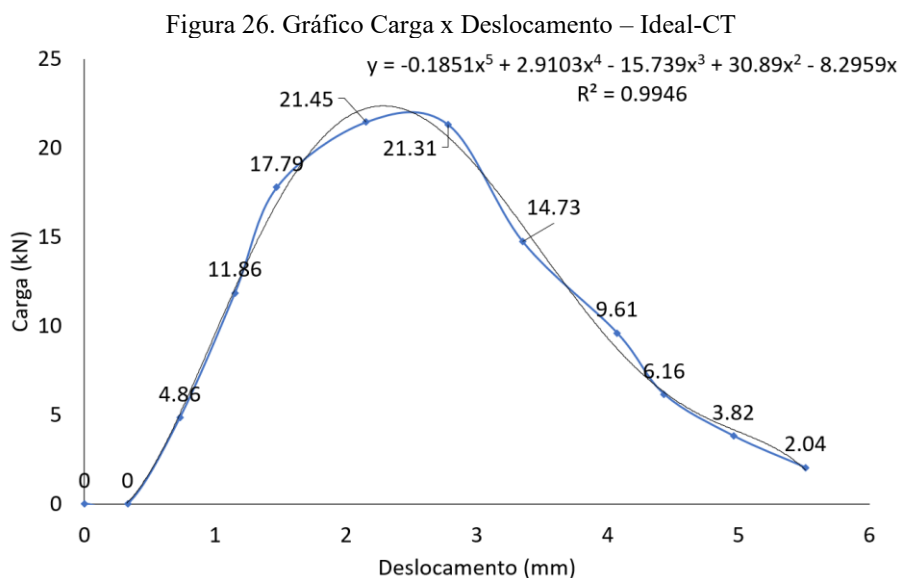


Fonte: (Autoria própria, 2026).

Com os oito CPs selecionados, o ensaio foi realizado e a partir dos resultados obtidos (Apêndice B), foram elaborados gráficos de deslocamento por carga a partir do ajuste das curvas resultantes, tendo em vista que o parâmetro utilizado para avaliar a resistência à fissuração das misturas asfálticas, denominado de CTIndex (Cracking Tolerance Index), é calculado pela Equação 4 com base em três componentes principais: a energia de fratura (G_f), a inclinação pós-pico (m_{75}) e a tolerância à deformação (l_{75}). A energia de fratura é obtida a partir da área sob a curva carga-deslocamento, que representa a energia necessária para propagar uma fissura; a inclinação pós-pico é determinada no ponto correspondente a 75% da carga máxima após o pico, enquanto a tolerância à deformação é o deslocamento nesse mesmo ponto. A Figura 26 representa um exemplo do gráfico ajustado.

$$CTIndex = \frac{t}{62} \times \frac{G_f}{|m_{75}|} \times \frac{l_{75}}{D} \times 10^6 \quad (4)$$

em que CTIndex é o índice de tolerância à fissuração, t é a espessura do corpo de prova em mm, G_f é a energia de falha em J/m², $|m_{75}|$ é o valor absoluto da inclinação pós – pico em N/m, l_{75} é o deslocamento a 75% da carga pico em mm e D é o diâmetro do corpo de prova em mm.



4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios foram utilizados para analisar a influência da taxa de aplicação da pintura de ligação, além da textura superficial e de fatores externos, na aderência entre camadas asfálticas.

4.1 Macrotextura

A partir dos resultados obtidos, foi elaborada a Tabela 3 reunindo os valores obtidos no ensaio de mancha de areia por faixa em cada trecho, sendo possível classificar a superfície quanto a classe de macrotextura, através da Equação 1 e da Figura 6.

Tabela 3. Classificação superficial dos trechos experimentais

Faixas	Altura mancha de areia (mm)	
	Trecho 1 – CA	Trecho 2 – TSD
01	0,89	2,54
02	0,86	2,46
03	0,68	2,64
04	0,56	2,46
Média	0,75	2,52
Classe	Média à aberta	Muito aberta

Fonte: (Autoria própria, 2026)

Segundo Scherer (2018), recomenda-se que a altura média de mancha de areia esteja entre 0,60 mm e 1,20 mm, em que abaixo de 0,6 mm, a macrotextura apresenta uma tendência a ser fina e aumenta o risco de hidroplanagem; e acima de 1,2 mm, a macrotextura apresenta uma característica grosseira promovendo um desgaste excessivo de pneus.

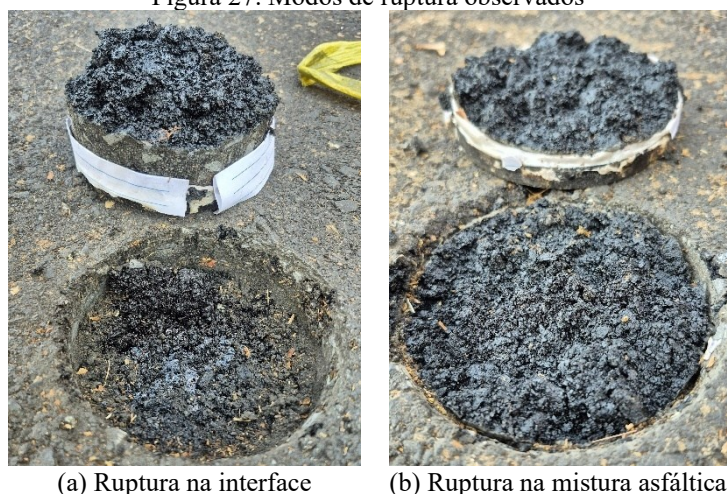
Porém, vale ressaltar que os resultados e a variabilidade entre os valores obtidos pela mancha de areia são intrínsecos ao processo de ensaio, tendo em vista a pequena área de amostragem e condições de superfície dos revestimentos asfálticos.

4.2 Ensaios de arrancamento

4.2.1 Tipos de falha

A interpretação do ensaio *pull-off* depende da identificação do local da falha, que pode ocorrer na interface, na mistura asfáltica ou no adesivo. Mais do que o valor numérico de resistência, o modo de ruptura revela a qualidade real da união: falhas na interface indicam que a pintura de ligação não foi eficiente, enquanto rupturas na mistura ou no adesivo sinalizam que a aderência entre as camadas superou a resistência dos materiais. Para ilustrar essas ocorrências, na Figura 27 são apresentados exemplos de rupturas na interface e na mistura que ocorreram nesse estudo.

Figura 27. Modos de ruptura observados



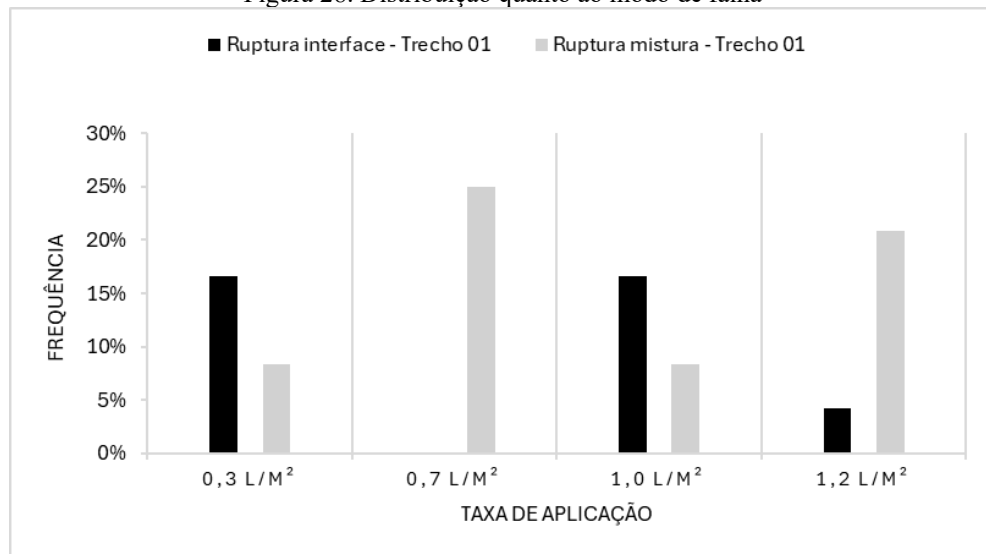
(a) Ruptura na interface

(b) Ruptura na mistura asfáltica

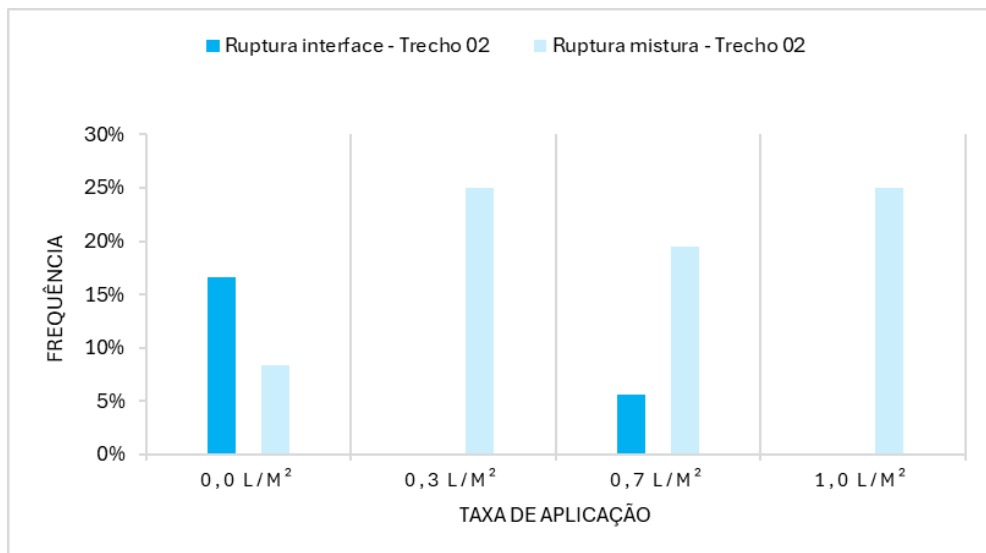
Fonte: (Autoria própria, 2026)

Após a realização dos ensaios, percebeu-se que algumas amostras romperam na mistura e outras no plano de interface entre camadas, representando uma falha adesiva. A Figura 28 e as Tabelas 4 e 5 ilustram a frequência e os modos de falha resultados pelo teste de arrancamento nos trechos experimentais.

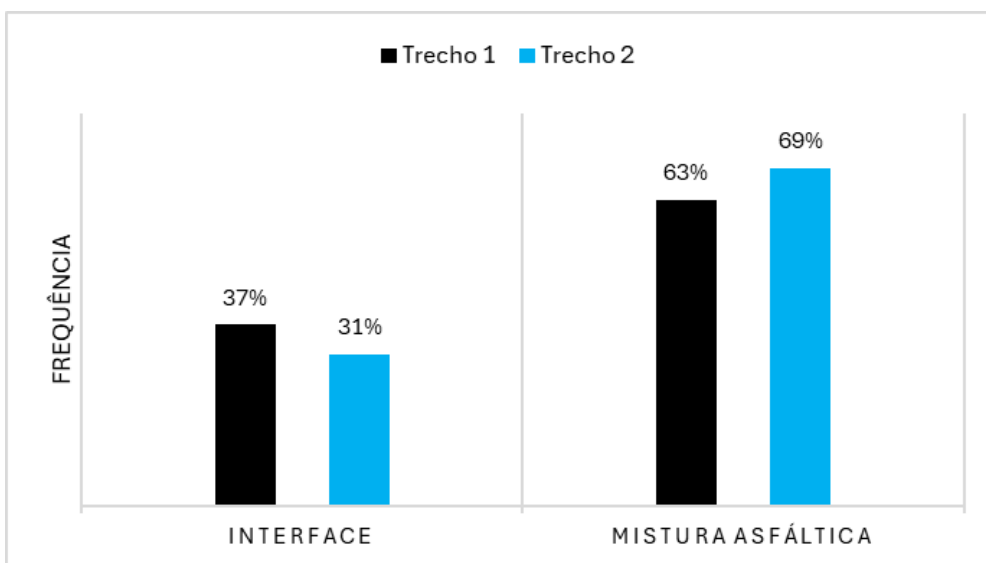
Figura 28. Distribuição quanto ao modo de falha



(a) Trecho 1



(b) Trecho 2



(c) Frequência de ruptura

Fonte: (Autoria própria, 2026)

Tabela 4. Modos de falha no Trecho 1

Faixa 1 – 0,7 L/m²		
		
Na mistura asfáltica nova	Na mistura asfáltica nova	Na mistura asfáltica nova
		
Na mistura asfáltica nova	Na mistura asfáltica nova	Na mistura asfáltica nova
Faixa 2 – 1,0 L/m²		
		
Na mistura asfáltica nova	Na mistura asfáltica nova	Na ligação entre as camadas
		
Na ligação entre as camadas	Na ligação entre as camadas	Na ligação entre as camadas

Faixa 3 – 1,2 L/m²



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na ligação entre as camadas



Na mistura asfáltica nova

Faixa 4 – 0,3 L/m²



Na mistura asfáltica nova



Na ligação entre as camadas



Na ligação entre as camadas



Na ligação entre as camadas



Na ligação entre as camadas



Na mistura asfáltica nova

Fonte: (Autoria própria, 2026)

Tabela 5. Modos de falha no Trecho 2

Faixa 1 – 1,0 L/m²



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova

Faixa 2 – 0,7 L/m²



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na ligação entre as camadas



Na ligação entre as camadas



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova

Faixa 3 – 0,3 L/m²



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova



Na mistura asfáltica nova

Faixa 4 – 0,0 L/m²

Na ligação entre as camadas



Na mistura asfáltica nova



Na ligação entre as camadas



Na ligação entre as camadas



Na ligação entre as camadas



Na mistura asfáltica nova



Na ligação entre as camadas



Na ligação entre as camadas



Na mistura asfáltica nova

Fonte: (Autoria própria, 2026)

Ao analisar as taxas de aplicação com o tipo de falha é perceptível que não houve uma tendência, ou seja, não foi possível relacionar que quanto maior essa taxa será, mais adesão as camadas terão. Por outro lado, a ausência da camada de ligação resulta na falta de aderência, o que é observado na Tabela 5, em que na faixa onde não foi utilizado a emulsão, a falha decorrente ao arrancamento aconteceu justamente na interface, comprovando a eficiência da camada de ligação.

Além disso, outro ponto observado foi quanto ao tempo de cura da emulsão asfáltica para o Trecho 1. Na faixa com taxa de aplicação de $0,70 \text{ L/m}^2$, a emulsão teve seu rompimento total dentro do tempo esperado, o que resultou na aderência entre as camadas. Já na faixa com taxa de $1,00 \text{ L/m}^2$, notou-se que o rompimento da emulsão não ocorreu de forma completa no mesmo intervalo de tempo, onde havia regiões com presença visível de emulsão não completamente rompida, e isso explica a maioria dos testes rompidos na interface.

Por fim, a faixa que recebeu a menor taxa de aplicação ($0,30 \text{ L/m}^2$), observou-se um rompimento extremamente rápido. A emulsão secou em tempo reduzido, o que pode ter favorecido a aderência inicial da camada asfáltica, mas também levantou questionamentos quanto à suficiência da quantidade de ligante para garantir uma boa união entre as camadas ao longo do tempo. Isso foi comprovado com os resultados, em que a maioria dos ensaios rompeu na ligação.

Para completar, constatou-se que a temperatura é um fator que pode influenciar quanto ao modo de falha. Essa interpretação foi consequência dos resultados dos ensaios do Trecho 2, os quais não foi possível notar a tendência das falhas decorrente a quantidade de emulsão e o tempo de cura. Um ponto importante a considerar é que os testes realizados nesse trecho ocorreram em condição mais quente, com temperatura média de 32°C , quando comparada ao Trecho 1, com temperatura média de 19°C . Portanto a alta temperatura influenciou no arrancamento, em que a maioria dos rompimentos foram na nova mistura asfáltica.

Ainda pela análise da Figura 28, verifica-se que a maioria dos casos de ruptura na mistura asfáltica aconteceram para as situações com aplicação de pintura de ligação. No Trecho 1, a maior frequência de ruptura no concreto asfáltico foi para a taxa de $0,7 \text{ L/m}^2$ e a maior frequência de ruptura na interface aconteceu para as taxas de $0,3$ e 1 L/m^2 . Para o Trecho 2, as frequências de ruptura na mistura foram relativamente semelhantes para as taxas de $0,3$ a $1,0 \text{ L/m}^2$. Porém, evidencia-se que o cenário sem aplicação de pintura de ligação apresentou o pior comportamento, mostrando a maior frequência de ruptura na interface em relação aos demais cenários.

4.2.2 Valores numéricos

Os resultados obtidos no *pull-off* foram organizados por trecho e faixa, na tentativa de avaliar a presença de tendência entre a taxa aplicada e a resistência medida. Na Tabela 6 é apresentada uma síntese dos resultados, com os valores médios de força e da tensão de arrancamento, calculada a partir da Equação 2.

Tabela 6. Média dos resultados do ensaio de arrancamento

Taxa de aplicação (L/m ²)	Força de arrancamento (kgf)		Resistência (kPa)	
	Trecho 1	Trecho 2	Trecho 1	Trecho 2
0,0	--	24,97	--	7,79
0,3	63,86	22,67	19,93	7,08
0,7	120,58	6,18	37,64	1,93
1,0	70,88	5,62	22,13	1,76
1,2	102,6	--	32,03	--
Altura média de Mancha de Areia	0,75	2,52	0,75	2,52

Fonte: (Autoria própria, 2026).

Observa-se pela Tabela 6, que não houve proporcionalidade entre o aumento da taxa de emulsão e a resistência de aderência, indicando que a taxa, isoladamente, pode não explicar o comportamento interfacial em campo. Além disso, nota-se que não houve tendência bem definida dos resultados podendo ser explicada pela pequena área de contato (placas de 100 mm), pela distribuição interna de vazios e agregados não uniformes no interior do concreto asfáltico e pela variabilidade da textura superficial na região de contato.

Analisando-se os resultados de resistência ao arrancamento mostrados na Tabela 6 associados aos resultados de macrotextura (Tabela 3), nota-se uma tendência de valores consideravelmente menores para a situação de superfície existente com maior altura de macha de areia. Além disso, 17% das amostras romperam na interface do cenário sem aplicação de pintura de ligação do Trecho 2 de macrotextura mais aberta.

Esse comportamento pode ser creditado a menor disponibilidade de asfalto efetivo no contato da superfície existente com o novo concreto asfáltico em função da maior rugosidade superficial (maior superfície específica). Nesse caso, a taxa de emulsão poderia ser ajustada em função do resultado da macrotextura do revestimento existente.

Outro fator contribuinte para redução das resistências ao arrancamento no Trecho 2 é que texturas mais abertas podem reduzir o contato efetivo entre as superfícies na interface. Adicionalmente, o ligante concentra-se no fundo dos vales, existindo menos disponibilidade nos picos da superfície.

De modo geral, pela Figura 28, para os dois trechos analisados, a frequência de ruptura na mistura foi de 63% para o Trecho 1 e de 69% para o Trecho 2, indicando a eficiência da aplicação da pintura de ligação independente da sua taxa.

Destaca-se que a pequena dimensão da placa (100 mm de diâmetro) associada às variáveis não controladas do clima e de solicitação, além da distribuição dos constituintes do concreto asfáltico podem explicar a dispersão elevada dos resultados. Nesse sentido, as características das misturas asfálticas de cada trecho, como o nível de compactação, a composição das misturas e particularidades da execução, podem influenciar os valores de resistência obtidos nos ensaios de arrancamento.

Logo, não se pode estabelecer um critério de aceitação por análise de resistência, mas vislumbra-se a possibilidade de utilização dos ensaios para verificação das condições da eficiência de ligação entre as camadas de concreto asfáltico.

4.2.3 Análise estatística

Com base nos valores numéricos de arrancamento, provenientes do ensaio *pull-off*, foram realizadas duas análises principais: uma análise de significância e uma análise de outliers.

A análise de significância teve como objetivo verificar se existiu alguma diferença estatística entre os cenários de arrancamento. Além disso, também foi feita a análise de outliers, que buscou identificar valores que estavam muito fora do padrão dentro desses cenários. Nesse sentido, procurou-se avaliar se, estatisticamente, os resultados obtidos no ensaio de arrancamento fizeram sentido do ponto de vista analítico, bem como identificar possíveis valores discrepantes que influenciou a interpretação dos dados.

Na análise de significância, foi utilizado uma ferramenta do *software Excel* denominada Análise de Variância (ANOVA), que é um método estatístico utilizado para verificar se existem diferenças significativas entre médias de dois ou mais grupos. Assim, essa análise foi aplicada relacionando os valores da resistência de arrancamento por faixa, em ambos os trechos.

De uma forma resumida, a ferramenta ANOVA analisa os valores numéricos e avalia se há diferença significativa entre eles. Essa verificação é feita por meio do valor-P, que é comparado com um coeficiente de 0,05. Dessa forma, se o valor-P for menor que 0,05, considera-se que há diferença significativa; por outro lado, se for maior que 0,05, entende-se que não há diferença significativa. Por fim, apresenta-se na Tabela 7 um resumo dos trechos analisados quanto à existência ou não de diferenças significativas.

Tabela 7. Análise de significância ANOVA

Trecho	Valor comparativo	Valor-P	Há diferença significativa?
1	0,05	0,1261	Não
2	0,05	0,0096	Sim

Fonte: (Autoria própria, 2026).

Conforme Tabela 7, confirmou-se que houve uma diferença significativa na resistência de arrancamento no Trecho 2 e não houve no Trecho 1.

Em relação à análise de outliers, foi utilizado o teste de *Grubbs*, um método estatístico aplicado que verificou se os valores obtidos fizeram sentido dentro do conjunto analisado ou se houve algum resultado muito discrepante em relação aos demais. Nesse caso, a análise foi realizada de forma manual, utilizando a equação do próprio teste, e com o auxílio do *Python*. Assim, os dados foram inseridos na ferramenta para possibilitar uma visualização mais clara e facilitar a interpretação dos valores numéricos.

O teste de *Grubbs* é dado pela Equação 5 e calculado a partir de dois parâmetros importantes. O primeiro parâmetro é o número de observações (n), que é a quantidade de ensaios realizados por faixa. Já o segundo parâmetro é o valor da distribuição *t-Student*, que se relaciona com os graus de liberdade e com o nível de significância adotado. Dessa forma, a Equação 5 foi utilizada para verificar a existência ou não de outliers no conjunto de dados.

$$G_{crit} = \frac{(n-1)}{\sqrt{n}} \times \sqrt{\frac{t^2}{n-2+t^2}} \quad (5)$$

em que G_{crit} é o valor crítico de *Grubbs*, n é o número de ensaios por faixa e t é o valor da distribuição *t* (*t-Student*).

A partir disso, um resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Análise de outliers pelo teste de *Grubbs*

Taxa de aplicação (L/m ²)	Trecho 1			Trecho 2		
	$G_{máx}$	G_{crit}	Há outlier?	$G_{máx}$	G_{crit}	Há outlier?
0,0	--	--	--	2,14	1,89	Sim
0,3	1,48	1,89	Não	1,66	1,89	Não
0,7	1,59	1,89	Não	1,97	1,89	Sim
1,0	1,73	1,89	Não	2,02	1,89	Sim
1,2	1,70	1,89	Não	--	--	--

Fonte: (Autoria própria, 2026).

Pela Tabela 8 foi possível identificar que o Trecho 1 não apresentou outliers, enquanto o Trecho 2 apresentou 3 faixas com outliers.

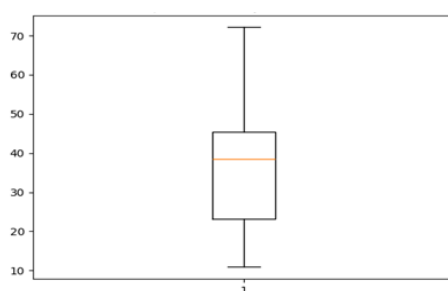
Na sequência, no *Python* foi realizada essa mesma interpretação, porém por meio de linguagem de programação (Apêndice C). Nesse caso, foi implementada a Equação 5 no código, de modo a reproduzir computacionalmente o procedimento adotado. Essa abordagem, por sua vez, é mais avançada, pois permite a detecção de múltiplos outliers de forma mais robusta. Assim, o uso do código se mostrou importante para complementar a análise, proporcionando uma verificação mais consistente dos dados.

A partir do código desenvolvido, foram geradas imagens que representaram essa análise de outliers por meio de uma visualização gráfica, as quais são apresentadas e discutidas na Tabela 9 e a Tabela 10. Em relação às imagens, elas correspondem a gráficos do tipo *boxplot*, representado por uma caixa, que indica a região central dos dados, ou seja, onde se concentra a maior parte dos valores. Além disso, a caixa apresenta limites que correspondem ao início e ao fim dessa distribuição central e uma linha no seu interior indicando a mediana.

A partir dessa caixa, estendem-se linhas, conhecidas como “bigodes”, tanto para cima quanto para baixo, que representam até onde os dados são considerados dentro de um comportamento esperado, ou seja, sem serem classificados como discrepantes. Dessa forma, valores que aparecem fora desses limites, isto é, fora dos bigodes e da caixa, são identificados como outliers. Portanto, por meio desse tipo de gráfico, é possível visualizar de maneira clara a dispersão dos dados e identificar possíveis valores discrepantes.

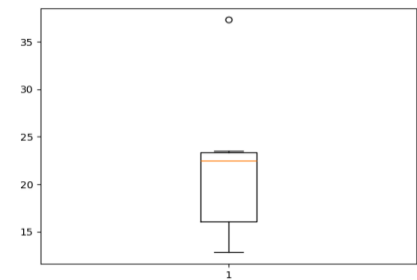
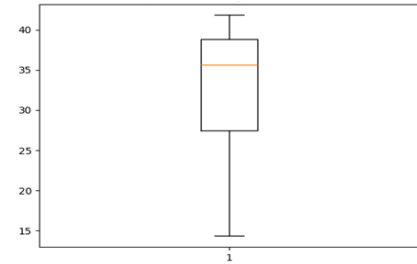
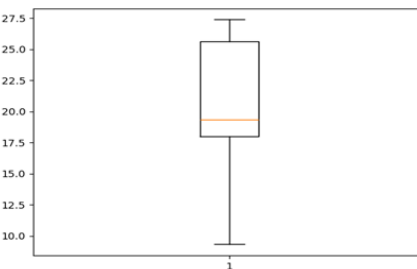
Pela Tabela 9 e 10 foi possível identificar que tanto no Trecho 1 quanto no Trecho 2 apresentou-se outliers em uma das faixas. Além disso, também foi indicado quais os valores considerados discrepantes, ou seja, o resultado de resistência que foi identificado como outlier.

Tabela 9. Análise de outliers no *Python* – Trecho 1



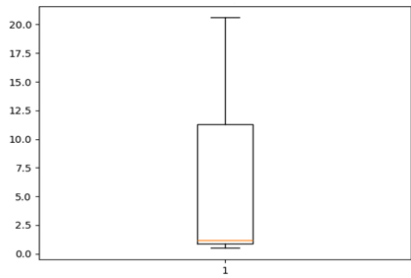
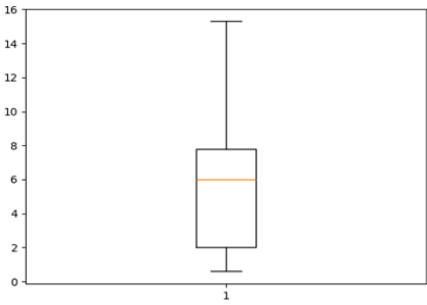
Faixa 1 – 0,7 L/m²

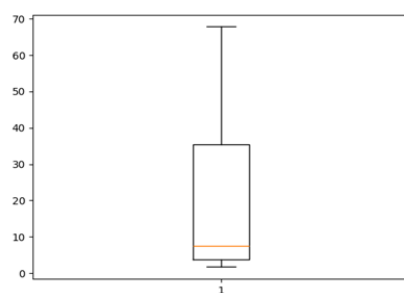
A caixa está entre aproximadamente 25 e 45, com mediana próxima de 38. Os bigodes se estendem de 10 até 70. Não há outliers, porém observa-se alta dispersão dos dados.

	Faixa 2 – 1,0 L/m² A caixa varia entre aproximadamente 16 e 23, com mediana em torno de 22. Há um ponto isolado acima de 35, caracterizando um outlier.
	Faixa 3 – 1,2 L/m² A caixa varia entre aproximadamente 30 e 38, com mediana em torno de 35. Os bigodes vão de 15 até 42, sem presença de outliers.
	Faixa 4 – 0,3 L/m² A caixa varia aproximadamente entre 18 e 25, com mediana em torno de 19. Os bigodes vão de 10 até 27,5, e não há pontos fora desses limites, indicando ausência de outliers.

Fonte: (Autoria própria, 2026).

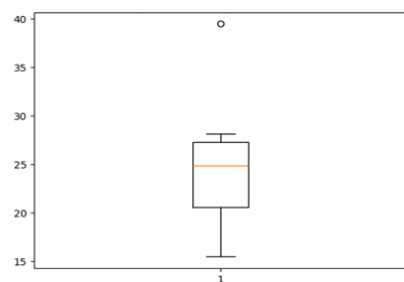
Tabela 10. Análise de outliers no *Python* – Trecho 2

	Faixa 1 – 1,0 L/m² Os dados da caixa se concentram aproximadamente entre 1 e 10, com mediana em torno de 2. Os bigodes variam de 0,5 até 20, sem presença de outliers.
	Faixa 2 – 0,7 L/m² Os dados da caixa se concentram aproximadamente entre 2 e 8, com mediana em torno de 6. Os bigodes variam de 1 até 15, sem presença de outliers.



Faixa 3 – 0,3 L/m²

Os dados da caixa se concentram aproximadamente entre 3 e 35, com mediana em torno de 7. Os bigodes variam de 2 até 68. Não há outliers detectados.



Faixa 4 – 0,0 L/m²

A caixa varia entre aproximadamente 21 e 28, com mediana em torno de 25. Há um ponto isolado próximo de 40, caracterizando um outlier.

Fonte: (Autoria própria, 2026).

4.3 Propriedades do agregado e da mistura

As propriedades do agregado e da mistura também foram vistas como importantes. O tamanho e a forma do agregado, a área superficial, a quantidade de ligante, entre outros, são algumas das características que influenciam a resistência.

A influência da textura superficial e da não uniformidade dos agregados foi avaliada no Trecho 1, onde a distribuição granulométrica da mistura (Anexo B) evidenciou predominância de agregados de maiores dimensões, muitos deles soltos, o que contribuiu para a variabilidade da mistura e influenciou os resultados de aderência. Em contrapartida, o Trecho 2 apresentou faixa granulométrica mais fechada (Anexo C), isto é, presença de agregados com dimensões menores, assim, a textura superficial não foi um fator de grande importância.

Embora muitos pesquisadores tenham postulado que a textura superficial é o principal fator que afeta a adesão, a viscosidade e a quantidade de betume foi considerada um impacto nesse estudo, pois quando a temperatura ambiente é mais alta, o ligante que une os agregados se torna mais macio e resulta em menor resistência da mistura asfáltica.

Como os testes foram realizados em campo, uma temperatura constante não pôde ser mantida ao longo de todo o ensaio, portanto, o Trecho 2 foi influenciado pela temperatura mais alta. Ademais, foi possível observar que o recapeamento desse trecho apresentou um visual mais brilhoso, o que possivelmente estava relacionado com um excesso de ligante na mistura. Assim, essa variável somada com a alta temperatura contribui nos resultados.

4.4 Análise complementar

Diante dos resultados do ensaio de HT-IDT, tem-se que quanto maior o valor calculado para HT-IDT, maior será a resistência da mistura à deformação permanente. Com isso, as resistências calculadas a partir da Equação 3 são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados do ensaio HT-IDT		
CP	HT-IDT (kPa)	HT-IDT médio (kPa)
1	318,94	354,16
2	333,89	
3	276,19	
4	595,09	
5	94,51	
6	513,27	
7	360,22	
8	366,04	
9	329,27	

Fonte: (Autoria própria, 2026)

Nesse sentido, segundo Christensen e Bonaquist (2007) *apud* Barbosa Júnior (2025), a mistura asfáltica testada atenderia ao critério utilizado para tráfego pesado, em que HT-IDT em uma faixa 270 a 430 kPa é classificada como “Boa” quanto a resistência à deformação permanente. Portanto, a mistura pode ser tecnicamente viável na aplicação de situações de tráfego pesado.

Para o ensaio Ideal-CT, quanto maior o valor do CTIndex, maior a resistência à fissuração da mistura asfáltica. Assim, na Tabela 12 são apresentados os resultados do ensaio calculados pela Equação 4.

Tabela 12. Resultados do ensaio Ideal-CT					
CP	G _f (J/m ²)	m ₇₅ (N/m)	l ₇₅ (mm)	CTIndex	CTIndex médio
1	10024,15	9,69E+06	3,24	32,43	91,65
2	8813,99	5,40E+06	3,63	59,91	
3	4488,90	4,45E+06	3,52	37,86	
4	5981,46	3,57E+06	3,94	65,97	
5	3972,12	1,35E+06	5,02	161,59	
6	3548,78	1,02E+06	4,88	180,99	
7	3192,81	2,36E+06	3,62	51,17	
8	3525,72	1,26E+06	4,74	143,24	

Fonte: (Autoria própria, 2026)

Com isso, segundo *National Asphalt Pavement Association* (2021) *apud* Barbosa Júnior (2025), o valor mínimo de CTIndex é de 100, utilizado pelo *Texas Department of Transportation* (TDOT), para caracterizar a viabilidade de utilização de uma mistura asfáltica

em situações de tráfego pesado, portanto, a mistura não é tecnicamente viável na aplicação de situações de tráfego médio a pesado, o que é coerente com os baixos valores de resistência ao arrancamento obtidos no Trecho 2, validando os resultados encontrados no ensaio *pull-off*.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo, o método de *pull-off* foi realizado com a adaptação do dispositivo de arrancamento, que foi eficaz para testar a ligação interfacial.

A principal contribuição foi mostrar que a interpretação dos resultados dos ensaios de *pull-off* aplicados para a avaliação de aderência entre camadas asfálticas não deve ser baseada exclusivamente nos valores de resistência. Essa avaliação só faz sentido quando considerado o modo de ruptura e as limitações frente as variáveis externas e não controláveis, como a temperatura do ambiente, visto que os testes foram realizados em campo. Essa visão integrada fortalece o ensaio como uma ferramenta de controle tecnológico e qualidade em obras de pavimentação no que tange à verificação da existência de ligação entre camadas asfálticas.

A principal conclusão é que não existe uma relação direta e proporcional entre o aumento da taxa de emulsão asfáltica e o ganho de resistência de aderência que possa ser avaliada pelos ensaios de arrancamento realizados. Ademais, ficou evidente que os fatores externos exercem uma influência superior à taxa de emulsão isolada, dado que a temperatura alta no Trecho 2 influenciou nos resultados de resistência.

Outra contribuição evidenciada é que a pintura de ligação é um serviço essencial para garantir aderência entre camadas, representado pelos resultados das taxas de 0,0 L/m² e 0,3 L/m², onde o tipo de falha aconteceu justamente na interface.

Por fim, o trabalho reforça que a interpretação da aderência deve ser sempre conjunta, em que a análise do modo e da posição de ruptura é crítica. Assim, identificar se a falha ocorreu na interface ou na mistura é o que permite validar a qualidade da execução e entender se a pintura de ligação cumpriu seu papel estrutural.

Como limitações do estudo, destacam-se a pequena dimensão das placas metálicas (100 mm de diâmetro), a impossibilidade de controle de temperatura durante os ensaios em campo, a ausência do dispositivo UPOD original e o número reduzido de trechos experimentais. Esses fatores podem ter contribuído para a dispersão dos resultados e devem ser considerados na interpretação das conclusões.

Portanto, recomenda-se seguir boas práticas construtivas para obter uma boa ligação entre as camadas. Para trabalhos futuros, sugere-se a replicação desta pesquisa em um maior

número de trechos experimentais, abrangendo diferentes condições climáticas e faixas de temperatura, a utilização do dispositivo UPOD original para comparação dos resultados, a avaliação de diferentes dimensões de placas metálicas e metodologias de arrancamento, bem como a investigação da influência de outras variáveis, como o tipo e a condição da superfície da mistura asfáltica, o tempo de cura da pintura de ligação, o tipo de emulsão e o tráfego, visando ampliar a confiabilidade e a aplicabilidade dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, H. J. Evaluation of Asphalt Pavement Interfac. Open Access Theses. 469. 2014. https://docs.lib.purdue.edu/open_access_theses/469.

AKRAYM, H. M.; MUNIANDY, R.; JAKARNI, F. M.; HASSIM, S. Review: Shear Properties and Various Mechanical Tests in the Interface Zone of Asphalt Layers. Infrastructures, 8(3), 48. 2023. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8030048>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16504:2016 – Misturas asfálticas — Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria — Método da mancha de areia. Rio de Janeiro, 2016.

BARBOSA JÚNIOR, Elias João. Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com substituição parcial por RAP. 2025. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). IPR 720: Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos. 2ª ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). NORMA DNIT 145/2012-ES: Pavimentação – Pintura de ligação com ligante asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2012.

DEYSARKAR, I; TANDON, V. Development of an objective field test to determine tack coat adequacy. El Paso: Center for Transportation Infrastructure Systems, The University of Texas at El Paso; Texas Department of Transportation, 2004. Research Report TX-0-4129-1.

GUIMARÃES, P. A. Estudo da aderência entre camadas asfálticas de pavimentos. 189. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

KOMARAGIRI, S.; DRIMALAS, T.; HAZLETT, D.; FOLLIARD, K.; BHASIN, A. An in-situ method to evaluate the interlayer bond between hot-mix asphalt and portland cement concrete surface. Construction and Building Materials, 411. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134648>.

MUSSELMAN, J.; MORAES, R.; WALBECK, T.; WEST, R. C. Methods for addressing tack tracking. Literature Review. National Center for Asphalt Technology, Auburn, 2020.

OMAR, H. A.; YUSOFF, N. I. M.; MUBARAKI, M.; CEYLAN, H. Effects of moisture damage on asphalt mixtures. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7(5), 2020. p. 600-628. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.07.001>.

SCHERER, R. G. Estudo da influência da condição de aderência entre camadas de pavimentos em seu comportamento mecânico. 170. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

TANDON, V.; PUENTES, I. Development of a Portable Device to Measure Tack Coat Quality in the Field. The University of Texas at El Paso, El Paso, 2006.

XIAO, Y.; VAN DE VEN, M. F. C.; WU, S. P.; WOLDEKIDAN, M. F. Advanced pull test to determine adhesion properties of thin surfaces for pavement. Delft University of Technology. 2016.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios HT-IDT



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

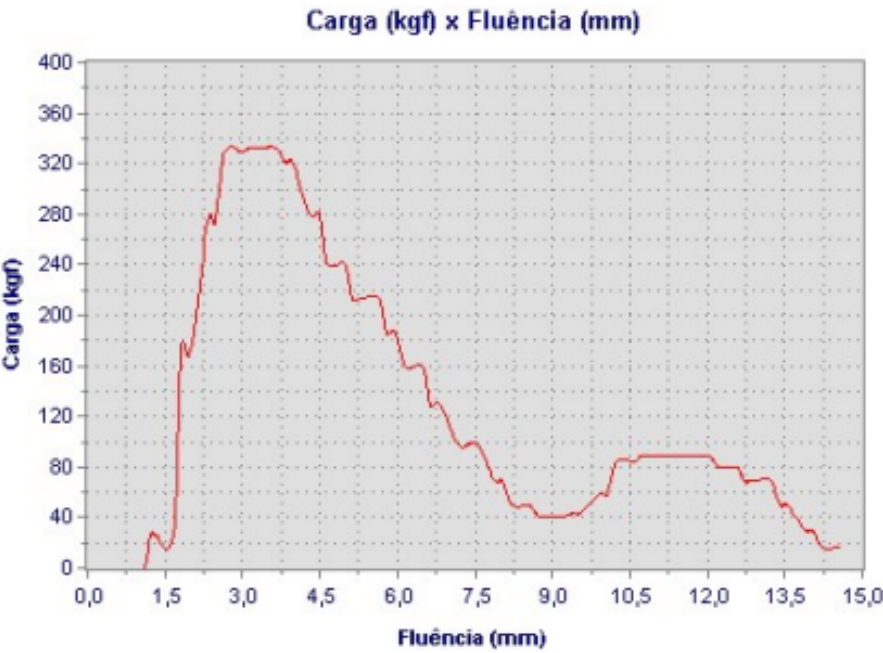
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 1 - HT IDT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	332,0
Estabilidade (kgf):	345,3
Fluência (mm):	14,550

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

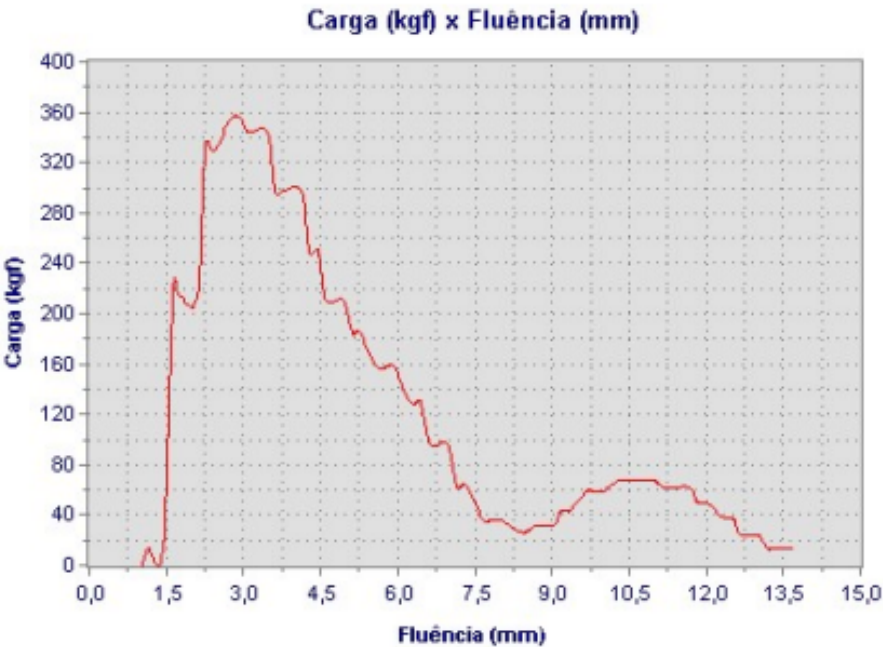
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 2 - HT IDT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	355,0
Estabilidade (kgf):	369,2
Fluência (mm):	13,670

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

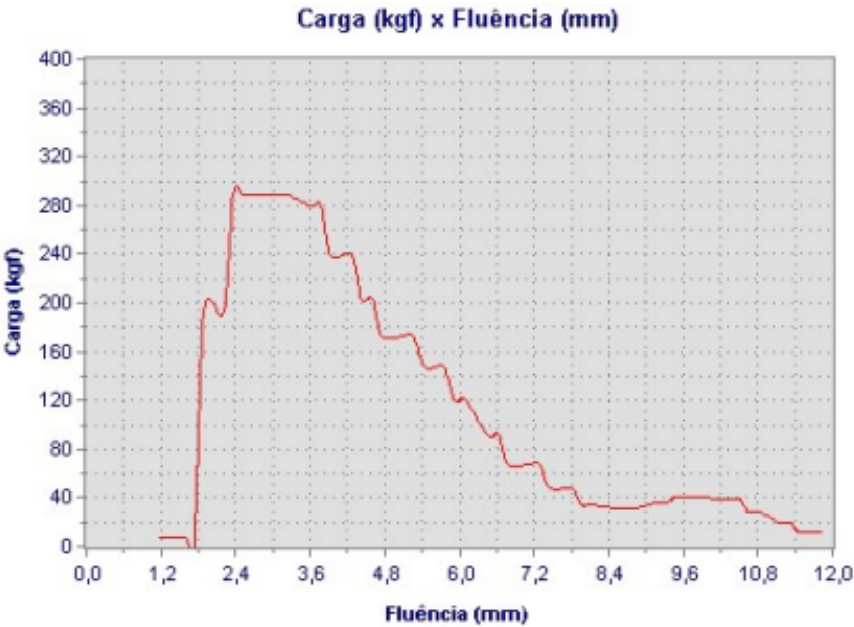
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 3 - HT IDT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	289,0
Estabilidade (kgf):	300,6
Fluência (mm):	11,810

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra: Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
 Tipo de amostra: Amostra de laboratório
 Mistura: Cimento Asfáltico
 Data do ensaio: 14/05/2024

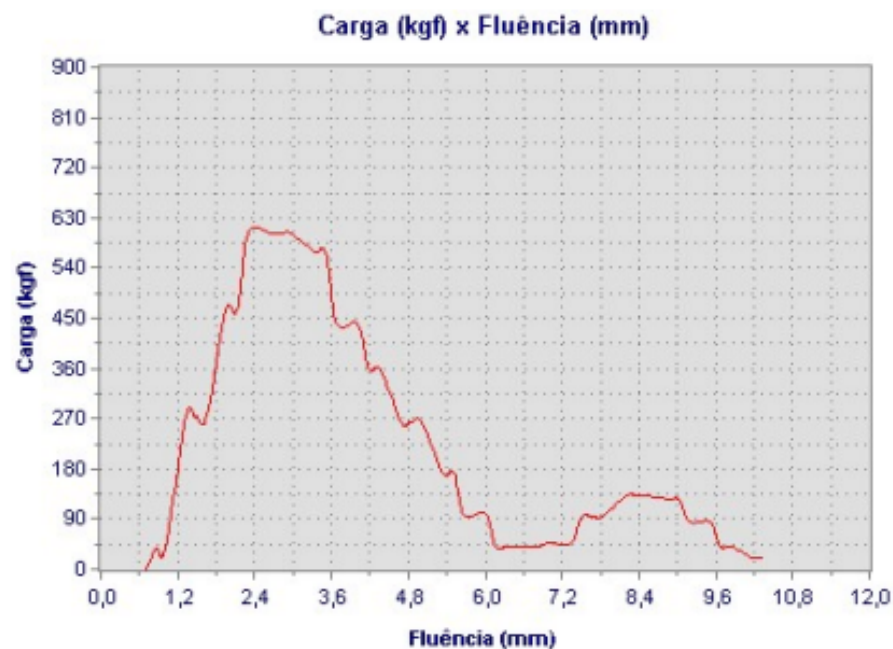
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP: CP 4 - HT IDT
 Volume (cm³): 500,00
 Massa Esp. Ap. (g/cm³): 2,40
 Correção: 1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf): 602,0
 Estabilidade (kgf): 626,1
 Fluência (mm): 10,330

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

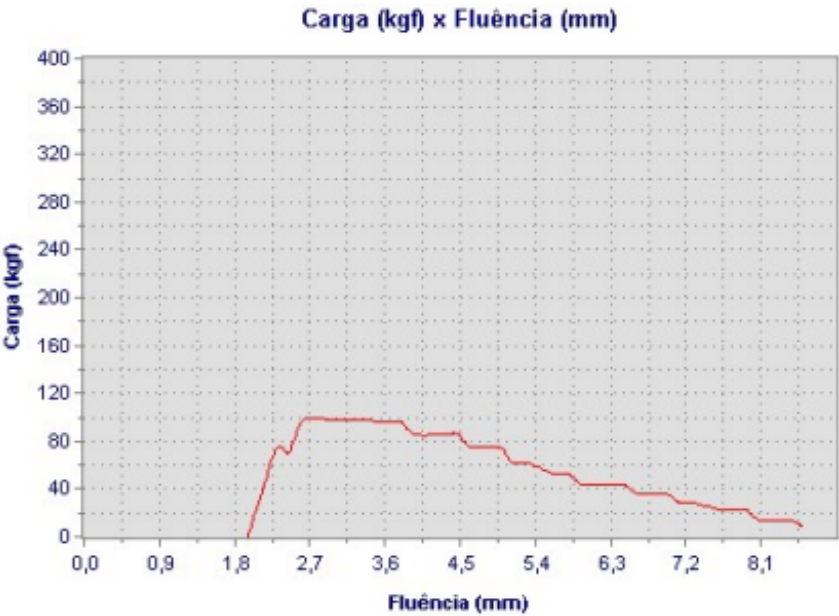
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 5 - HT IDT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	98,0
Estabilidade (kgf):	101,9
Fluência (mm):	8,600

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

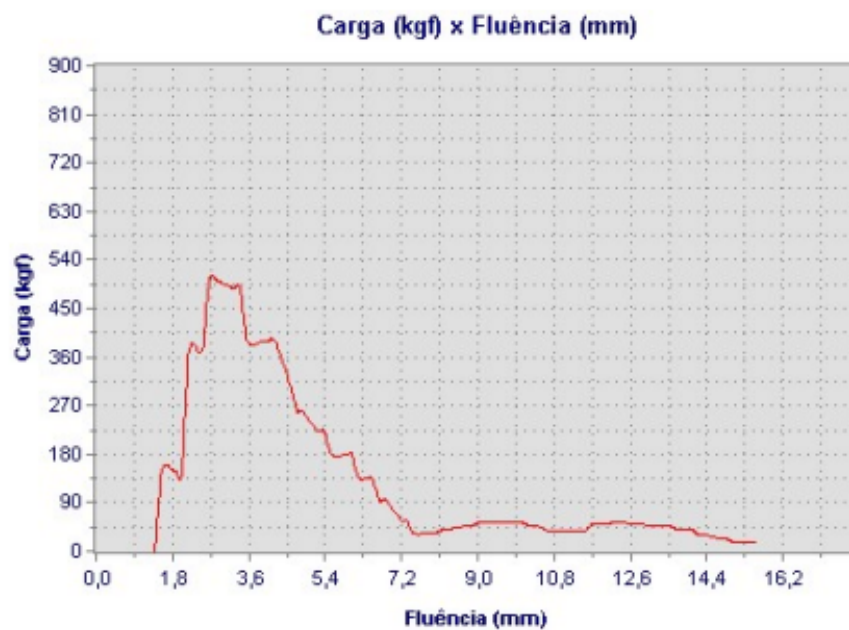
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 6 - HT IDT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	502,0
Estabilidade (kgf):	522,1
Fluência (mm):	15,530

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

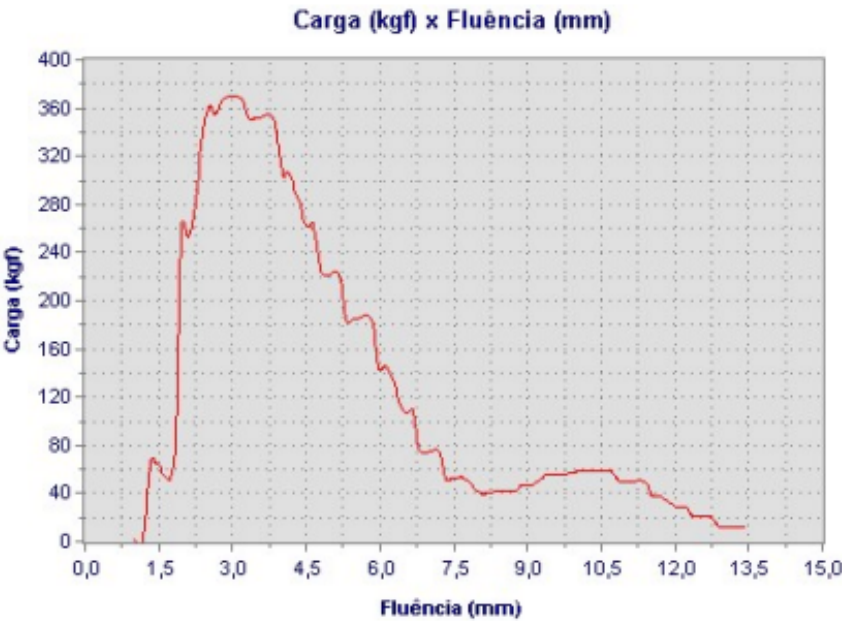
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 7 - HT IDT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	368,0
Estabilidade (kgf):	382,7
Fluência (mm):	13,410

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

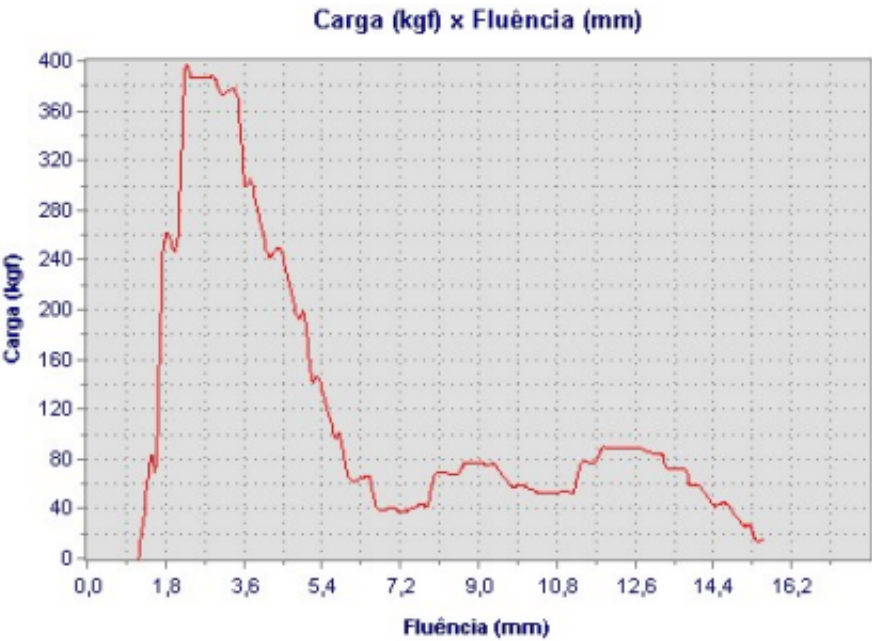
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 8 - HT IDT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	386,0
Estabilidade (kgf):	401,4
Fluência (mm):	15,560

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra: Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
 Tipo de amostra: Amostra de laboratório
 Mistura: Cimento Asfáltico
 Data do ensaio: 14/05/2024

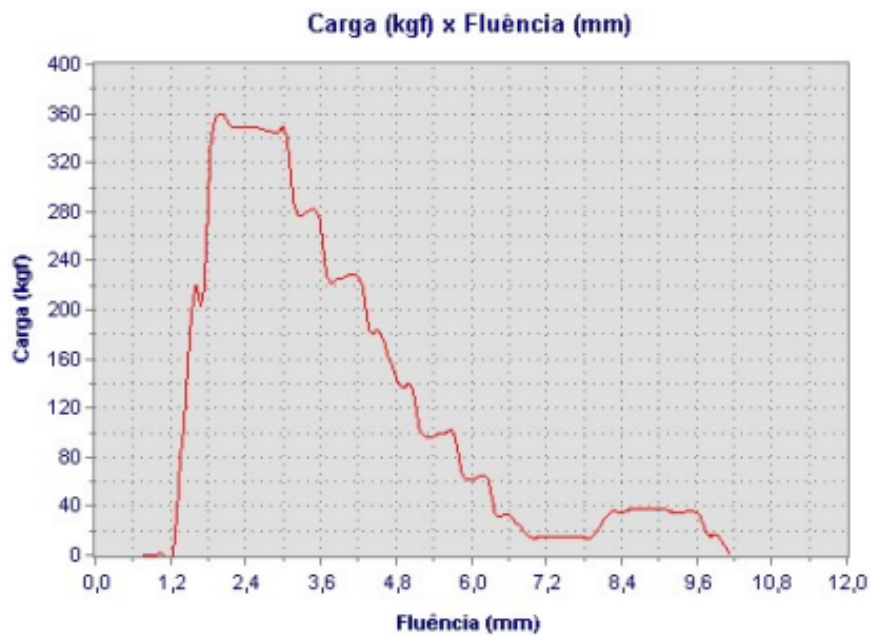
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP: CP 9 - HT IDT
 Volume (cm³): 500,00
 Massa Esp. Ap. (g/cm³): 2,40
 Correção: 1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf): 349,0
 Estabilidade (kgf): 363,0
 Fluência (mm): 10,120

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios Ideal-CT



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

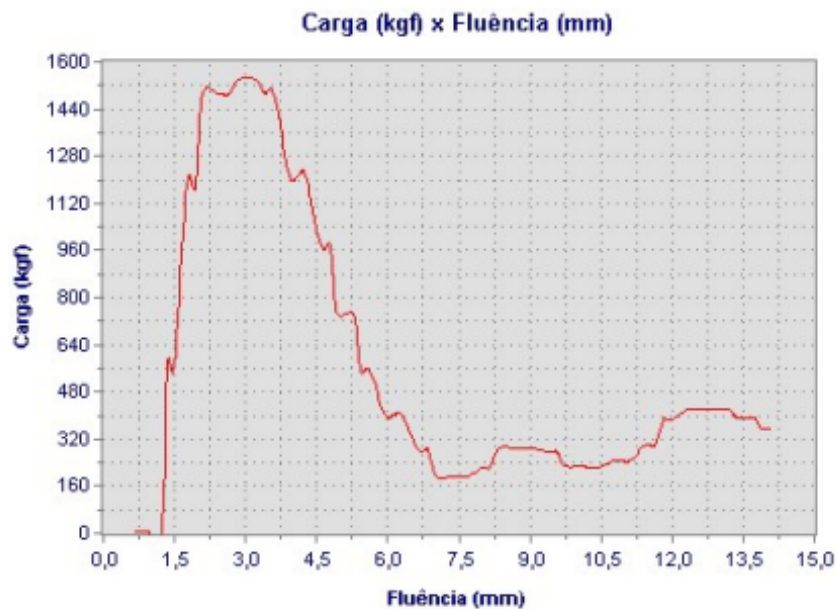
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 2 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	1.541,0
Estabilidade (kgf):	1.602,6
Fluência (mm):	14,060

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

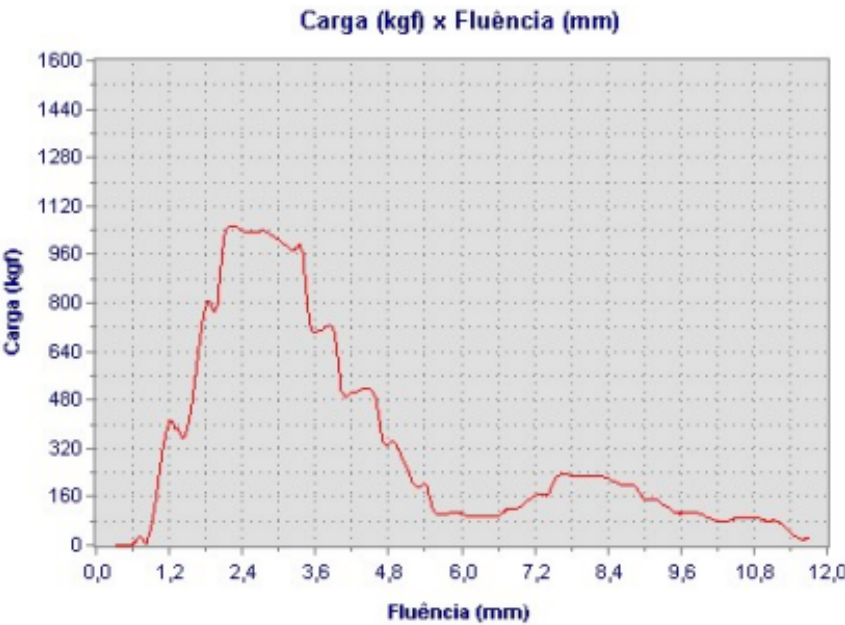
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 3 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	1.033,0
Estabilidade (kgf):	1.074,3
Fluência (mm):	11,690

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

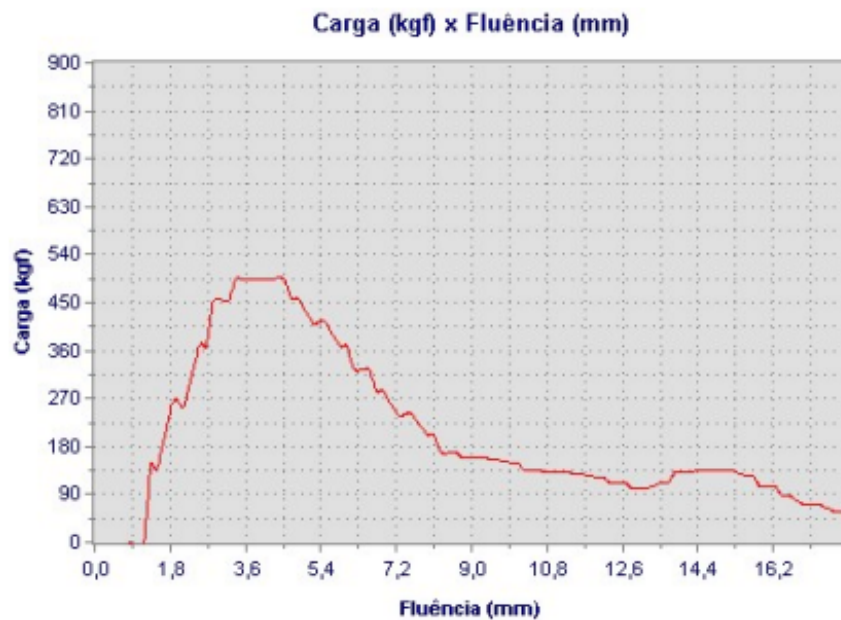
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 4 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	495,0
Estabilidade (kgf):	514,8
Fluência (mm):	19,720

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

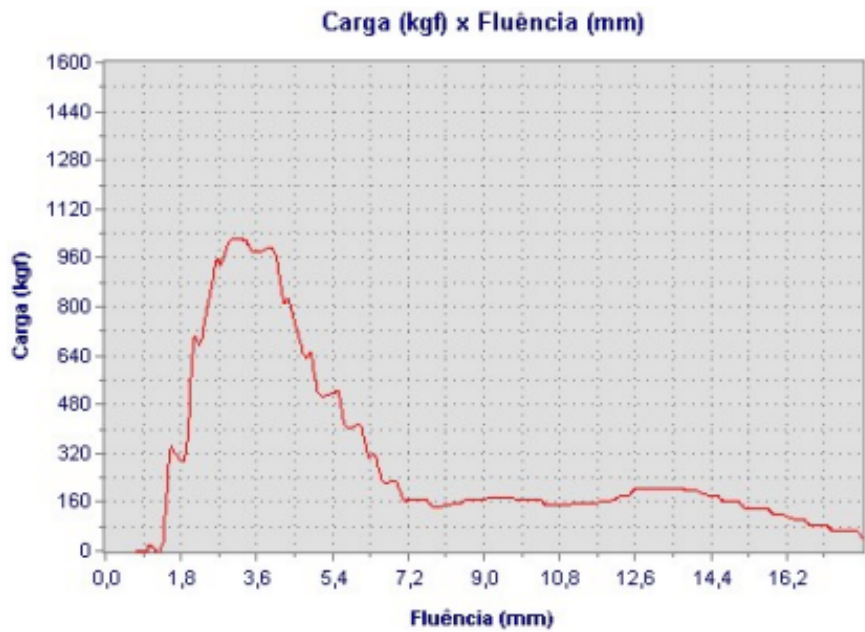
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 5 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	1.018,0
Estabilidade (kgf):	1.058,7
Fluência (mm):	18,520

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

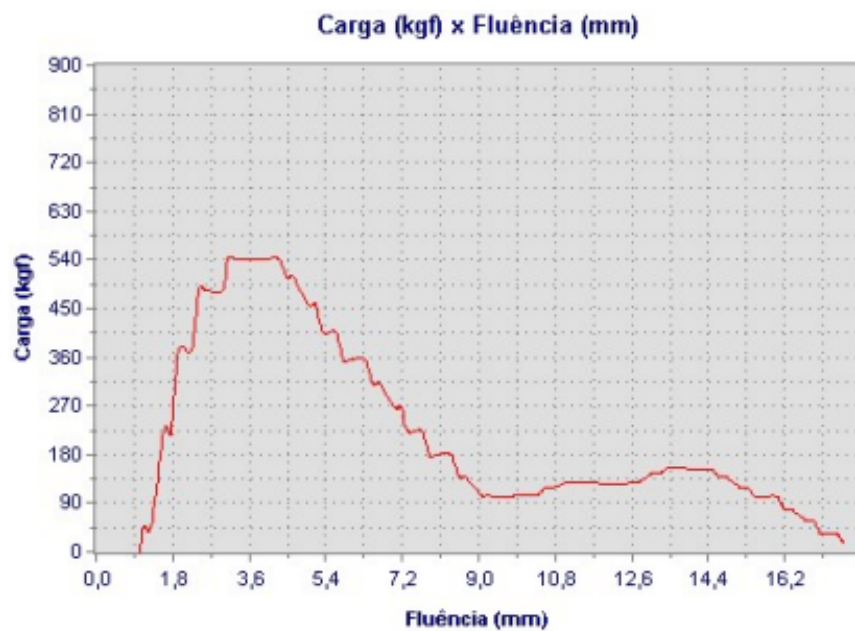
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 6 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	543,0
Estabilidade (kgf):	564,7
Fluência (mm):	17,550

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

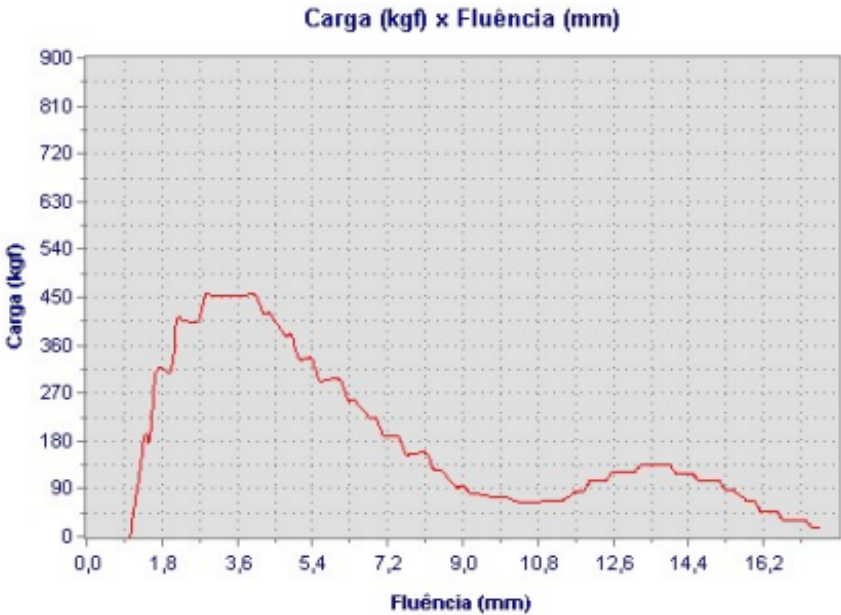
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 7 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	455,0
Estabilidade (kgf):	473,2
Fluência (mm):	17,530

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra: Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
 Tipo de amostra: Amostra de laboratório
 Mistura: Cimento Asfáltico
 Data do ensaio: 14/05/2024

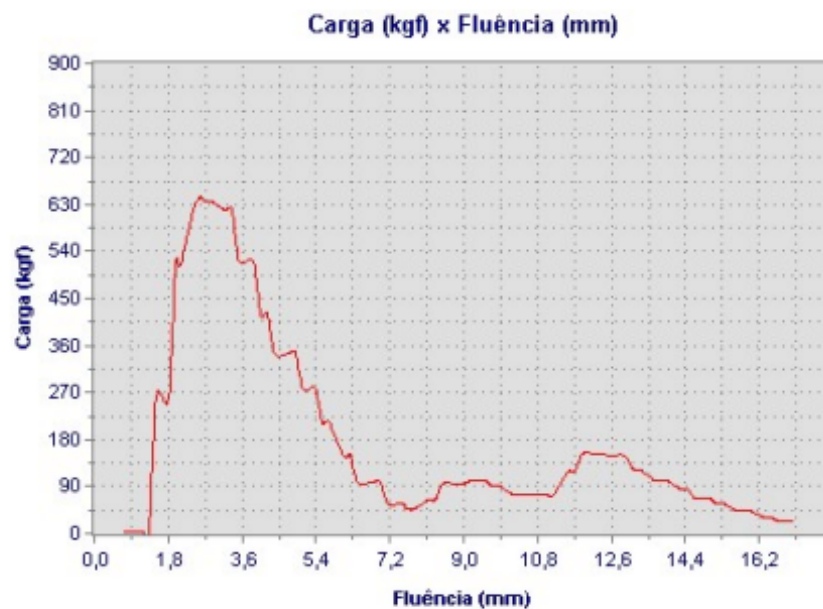
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP: CP 8 - Ideal CT
 Volume (cm³): 500,00
 Massa Esp. Ap. (g/cm³): 2,40
 Correção: 1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf): 637,0
 Estabilidade (kgf): 662,5
 Fluência (mm): 17,000

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

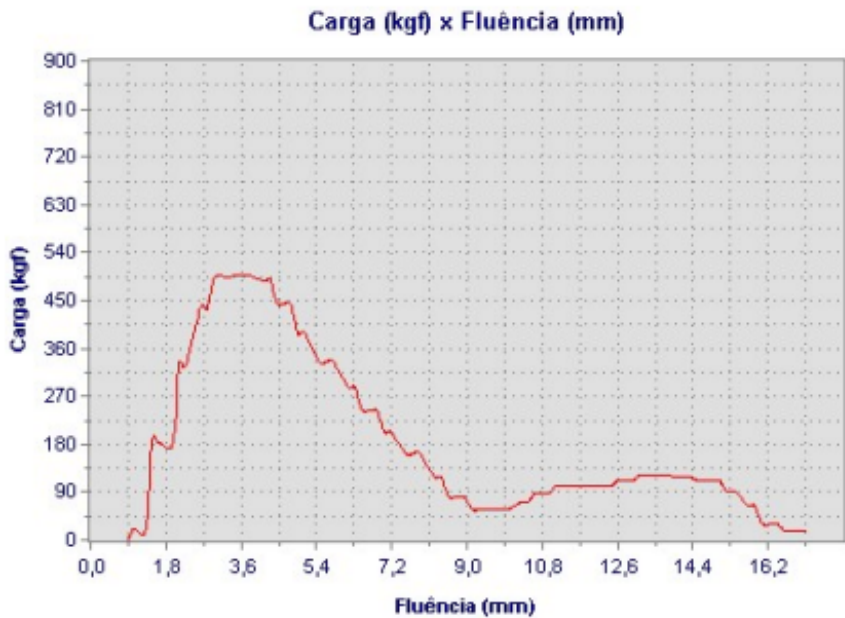
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 9 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	498,0
Estabilidade (kgf):	517,9
Fluência (mm):	17,100

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.



Amostra de laboratório

Dados Cadastrais da Amostra

Ident. da amostra:	Mistura asfáltica área de teste Laura (biblioteca)
Tipo de amostra:	Amostra de laboratório
Mistura:	Cimento Asfáltico
Data do ensaio:	14/05/2024

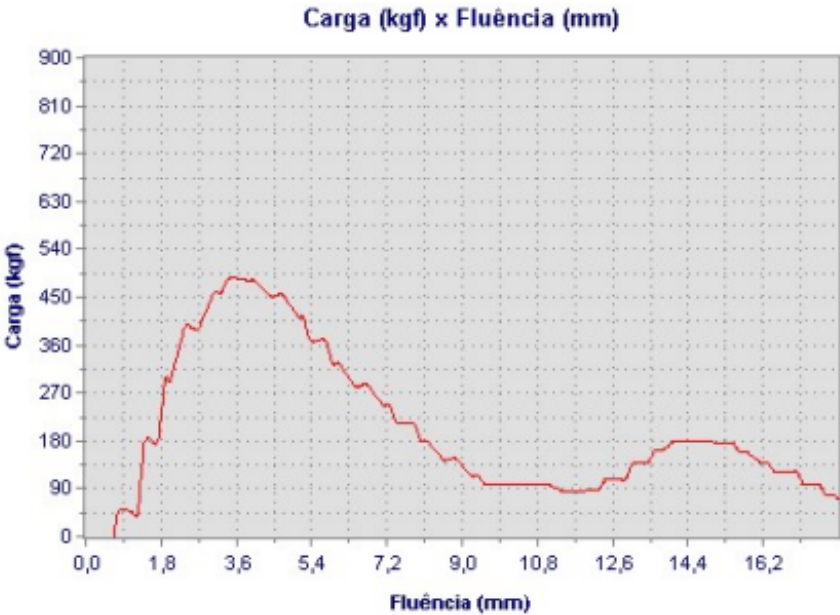
Dados Cadastrais do Corpo de Prova

Ident. do CP:	CP 10 - Ideal CT
Volume (cm³):	500,00
Massa Esp. Ap. (g/cm³):	2,40
Correção:	1,04

Dados Cadastrais da Amostra

Carga Máxima (kgf):	483,0
Estabilidade (kgf):	502,3
Fluência (mm):	20,310

Gráfico do Ensaio Realizado



Fonte: Autoria própria, 2026.

APÊNDICE C – Script em Python para geração dos *boxplots*

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from math import sqrt
from scipy.stats import t

# --- Funções do Grubbs ---
def grubbs_critical(n, alpha):
    if n < 3:
        return np.nan
    tcrit = t.ppf(1 - alpha / (2 * n), df=n - 2)
    return ((n - 1) / sqrt(n)) * sqrt((tcrit**2) / (n - 2 + tcrit**2))

def grubbs_test(data, alpha=0.05):
    data = np.array(data, dtype=float)
    n = len(data)
    mean = np.mean(data)
    std = np.std(data, ddof=1)
    diffs = abs(data - mean)
    i_max = np.argmax(diffs)
    G = diffs[i_max] / std
    Gcrit = grubbs_critical(n, alpha)
    return i_max, data[i_max], G, Gcrit, G > Gcrit

# --- SEUS DADOS (mude aqui) ---
dados = [1, 2, 3, 4, 5, 20]

# --- Rodar até não encontrar mais outliers ---
restantes = dados.copy()
outliers = []
while True:
    if len(restantes) < 3:
        break
    idx, val, G, Gcrit, is_outlier = grubbs_test(restantes)
    if is_outlier:
        outliers.append(val)
        restantes.pop(idx)
    else:
        break

print("📊 Dados originais:", dados)
print("🚨 Outliers encontrados:", outliers)
print("✅ Dados sem outliers:", restantes)

# --- Gráfico ---
plt.boxplot(dados)
plt.title("Boxplot (visualização de outliers)")
plt.show()

```

Fonte: Autoria própria, 2026.

ANEXO A – Certificado da emulsão asfáltica

 CERTIFICADO DE ENSAIO			
Produto:	EMULSÃO ASFÁLTICA CATIONICA TIPO RR-1C		
Local Coleta:	TANQUE CARRETA		
Data / Hora Amostragem	14/05/2025		
Data / Hora Recebimento	12/06/2025		
Nota Fiscal:	Nº 0026366		
Quantidade:	14,970		
Frota / Placa	NWE 2686		
Característica	NORMA	Especificação	Resultado
RESÍDUO ASFÁTICO, % PESO	NBR- 14376	Mínimo 62,0	65,1%
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 50 GC	NBR- 14991	20-90	30,4%
SEDIMENTAÇÃO, % EM PESO	NBR- 6570	MÁXIMO 5,0	-
PENEIRAÇÃO 0,84 mm, % EM PESO	NBR- 14393	MÁXIMO 0,1	0,03%
DESEMULSIBILIDADE, % EM PESO	NBR- 6569	MÍNIMO 50,0	-
CARGA DE PARTÍCULA	NBR- 6567	POSITIVA	-

OBS:	COLETA FEITA NO TANQUE DA CARRETA
	PRODUTO APTO PARA USO.

Fonte: BT Construções, 2025.

ANEXO B – Curva granulométrica da mistura do Trecho 1

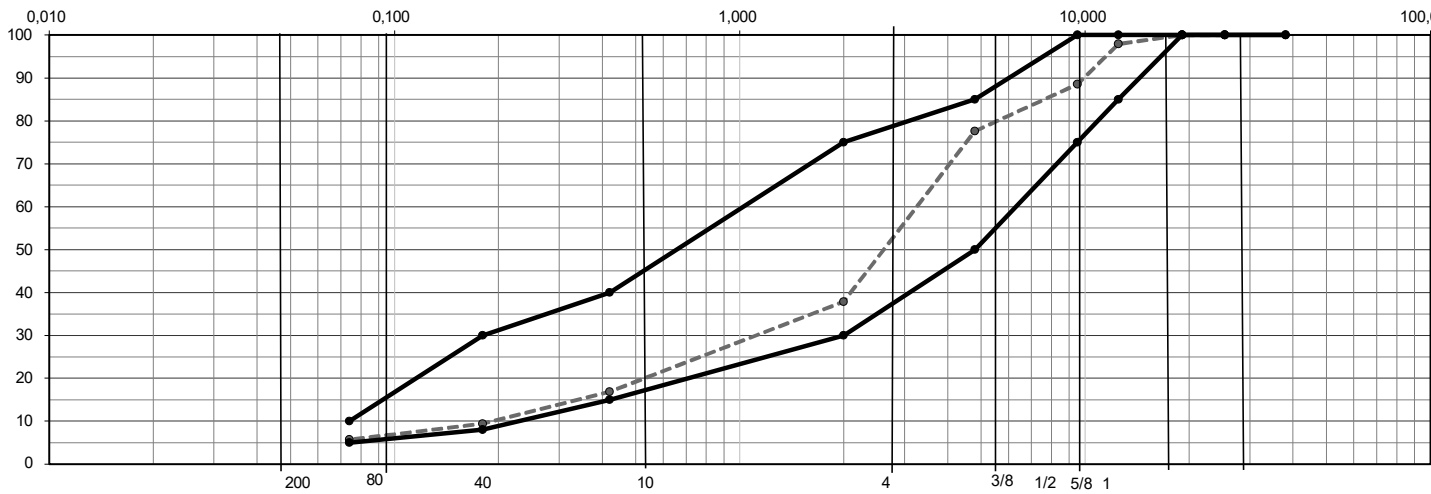


ENSAIO MARSHALL

REG.

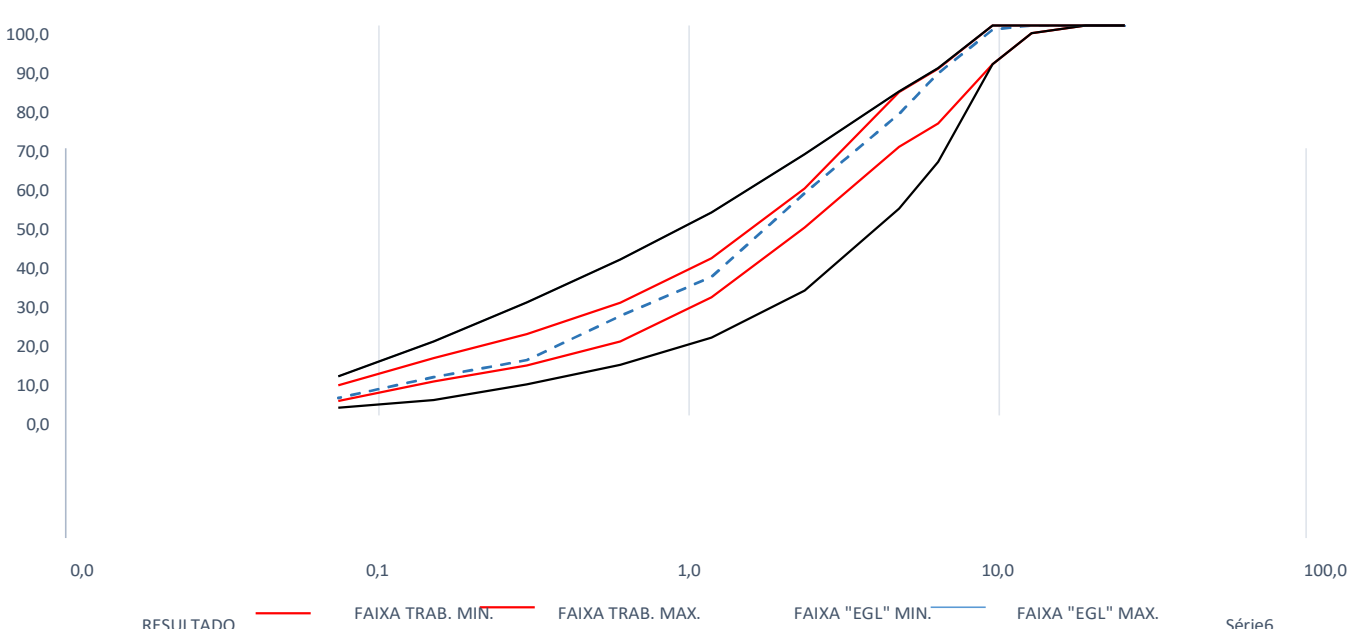
COLETA:	UFU	PLACA:		LOCAL APLICADO:			
OBRA:		TRECHO:		CONTRATO:		HORA:	
MATERIAL:	CBUQ	USINA:	DREST	FAIXA/CAP:	C 30 / 45	DATA:	11/06/2025

Peneiras mm	Peneiras	PESO ACUMULADO	% RETIDO	% ACUM.	% PASSANTE	F.TRABALHO		FAIXA C 30/45		TEOR DE PROJETO:	
						MÍN	MÁX	MÍN	MÁX	5,3%	
38,100	11/2"							100	100	SOXHLET☐ ROTAREX☒ FORNO NCAT.☐ EXTRAÇÃO DE BETUME PESO AM. ANTES712,90 PESO AM. DEPOIS675,00 DIF. DOS PESOS37,90 % DE LIGANTE5,3 TEOR CORRIGIDO DENSIDADE CAP1,009 CONST. DA PRENSA1,979 DENS. DA MISTURA2,887	
25,400	1		0,00	0,00	100,0			100	100		
19,100	3/4"	0,0	0,00	0,00	100,0			100	100		
12,500	1/2"	14,2	2,10	2,10	97,9			85	100		
9,500	3/8"	77,6	9,39	11,49	88,5			75	100		
4,800	nº4	151,1	10,89	22,38	77,6			50	85		
2,000	nº10	419,5	39,76	62,15	37,9			30	75		
0,420	nº40	561,1	20,98	83,13	16,9			15	40		
0,180	nº80	611,7	7,49	90,62	9,4			8	30		
0,074	nº200	636,6	3,70	94,32	5,7			5	10		
	TOTAL	674,4									



ANEXO C – Curva granulométrica da mistura do Trecho 2

				FORMULÁ							
ANÁLISE GRANULOMÉTRICA E TEOR DE BETUME											
DNIT-ES 112/09											
REGISTRO	OBRA/CONTRATO	KM INICIAL	KM FINAL	SENTIDO	FAIXA	PLACA	ESP. (cm)	MATERIAL	HORARIO	DATA COLETA	DATA ENSAIO
										22/09/2025	22/09/2025
Peneira		Material retido				(%) Amostra total	FAIXA TRAB.		FAIXA "D"		
Pol.	mm	Peso (g)	Peso retido (%)	Peso retido acumulado (%)	Min.		Max.	Min.	Max.		
1"	25,4	0,0		0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		
3/4"	19,0	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0		
1/2"	12,7	0,0	0,0	0,0	100,0	98,0	100,0	98,0	100,0		
3/8"	9,5	8,0	1,1	1,1	98,9	90,0	100,0	90,0	100,0		
1/4"	6,4	81,1	11,2	12,3	87,7	74,9	88,9	65,0	89,0		
4	4,8	75,3	10,4	22,7	77,3	68,9	82,9	53,0	83,0		
8	2,4	146,9	20,3	43,0	57,0	48,2	58,2	32,0	67,0		
16	1,2	155,6	21,5	64,5	35,5	30,3	40,3	20,0	52,0		
30	0,60	72,4	10,0	74,5	25,5	19,0	29,0	13,0	40,0		
50	0,30	81,8	11,3	85,8	14,2	12,9	20,9	8,0	29,0		
100	0,15	31,8	4,4	90,2	9,8	8,8	14,8	4,0	19,0		
200	0,074	38,4	5,3	95,5	4,5	3,7	7,7	2,0	10,0		
Fundo		32,6	4,5	100,0		-	-	-	-		
Peso da amostra (g)		723,7			Determinação Teor de Betume		Peso Inicial	Peso Final	Teor Betume		
							765,8	723,7	5,50		
										Teor de Projeto	5,3%



RESULTADO — FAIXA TRAB. MIN. — FAIXA TRAB. MAX. FAIXA "EGL" MIN. — FAIXA "EGL" MAX. Série6

 Laboratorista	Supervisor de Laboratório
--	---------------------------

Fonte: BT Construções, 2025.