

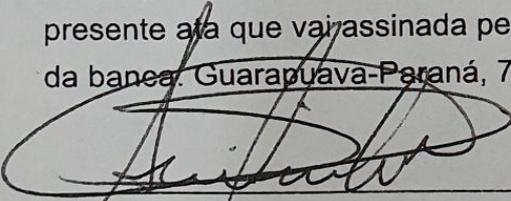
**Ata Nº 005 da Reunião da Comissão Examinadora de Defesa do Trabalho de Conclusão De Curso (TCC) em Eng Civil N**

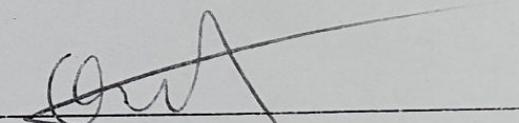
Aos 7 dias do mês de Dezembro do ano de 2020, nas dependências do(a) Centro Universitário Campo Real, em Guarapuava, Paraná, no Bloco II - Sala 22, às 21:40 horas, em sessão pública, reuniu-se a Comissão Examinadora, composta pelo(a) Professor(a) Orientador(a) Osmar de Carvalho Martins, na qualidade de Presidente da Comissão Examinadora e os Professores Bárbara Pergher Dala Costa e Kerson Carlos do Nascimento, integrantes da banca examinadora, para análise do TCC intitulado "ESPELHAMENTO NA PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO DE CASO NA RODOVIA PRC-466, TRECHO DISTRITO DA PALMEIRINHA.", elaborado na forma escrita e apresentado na forma ORAL pelo(a) acadêmico(a) Silvio do Prado Castro, como um dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Eng Civil N desta instituição. Aberta a reunião, o(a) senhor(a) Presidente concedeu a palavra ao(a) acadêmico(a) para que no prazo de até 20 minutos expusesse seu trabalho. Aos professores componentes da comissão Examinadora foi concedido tempo de até 20 minutos para suas considerações e debate com o(a) autor(a) do trabalho. Uma vez esgotado o prazo concedido aos professores e ao(a) acadêmico(a), o(a) senhor(a) Presidente convocou a participação dos professores componentes da Comissão Examinadora para avaliação final do Trabalho de Conclusão de Curso, tendo o seguinte parecer:

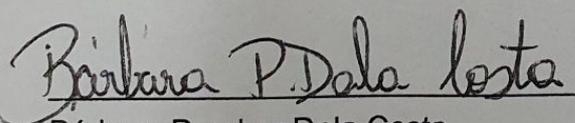
- Aprovado com nota:  
 Aprovado mediante alterações propostas pela comissão:  
 Reprovado:

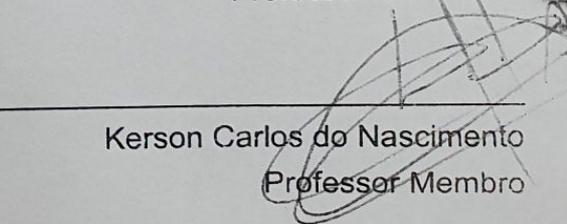
10,00

O(A) acadêmico(a) deverá apresentar ao(a) Professor(a) Orientador(a), durante o prazo máximo de trinta dias, a contar da data de apresentação oral do trabalho as reformulações sugeridas. Agradecendo a presença de todos, o(a) Senhor(a) Presidente encerrou a reunião. Do que para constar, lavrou-se a presente ata que vai assinada pelos senhores membros da Comissão Examinadora e por mim, presidente da banca. Guarapuava-Paraná, 7 de Dezembro de 2020.

  
\_\_\_\_\_  
Silvio do Prado Castro  
Acadêmico(a)

  
\_\_\_\_\_  
Osmar de Carvalho Martins  
Professor Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Bárbara Pergher Dala Costa  
Professor Membro

  
\_\_\_\_\_  
Kerson Carlos do Nascimento  
Professor Membro

# ESPELHAMENTO NA PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO DE CASO NA RODOVIA PRC-466 TRECHO DISTRITO PALMEIRINHA

Silvio do Prado Castro<sup>1</sup>

Osmar Martins<sup>2</sup>

## RESUMO

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é uma mistura de ligante asfáltico com agregados de alto desempenho formando a camada asfáltica de um pavimento onde cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas. As cargas aplicadas sobre a superfície do pavimento desencadeiam determinados estados de tensões na estrutura, que dependerá do comportamento mecânico de cada uma das camadas e do conjunto de que fazem parte. Esse trabalho visa investigar o fenômeno de espelhamento na PRC-466, uma rodovia de alto tráfego com média superior a 5 mil veículos por dia, que faz a ligação da região Centro-Sul e o Norte do estado do Paraná. A metodologia utilizada foi quali-quantitativa e contou com a participação de engenheiros e laboratoristas de grande experiência profissional. Para as análises laboratoriais, utilizou-se o método Marshall, em que foram extraídos nove corpos de prova de diâmetro 10cm e divididos em três grupos de três para extração de betume e granulometria lavada. Os resultados demonstraram a ascensão do betume para a superfície bem como a segregação do agregado e que esse fenômeno pode ocorrer de maneira rápida ou lenta. Qualquer problema não previsto pode ter como consequência o espelhamento na pista. Conclui-se que há uma lacuna na literatura sobre essa temática, tornando relevante essa pesquisa para contribuir com futuros estudos na área.

**Palavras-chave:** *Espelhamento. Pavimento. Alto tráfego.*

## ABSTRACT

Hot bituminous concrete (CBUQ) is a mixture of asphalt binder with high-performance aggregates, forming the asphalt layer where each floor layer has one or more specific functions. The loads applied on the pavement surface trigger certain stress states in the structure, which will depend on the mechanical behavior of each layer and the set of which they are part. This research aims to investigate the mirroring phenomenon on PRC-466, a high-traffic highway with an average of more than five thousand vehicles per day, which connects the Center-South region and the North of the state of Paraná. The methodology used was quali-quantitative and counted on the participation of engineers and laboratories with great professional experience. For laboratory analysis, the Marshall method was used, in which nine specimens of 10cm diameter were extracted and divided into three groups of three for bitumen extraction and washed granulometry. The results demonstrated the rise of the bitumen to the surface, as well as aggregate segregation and that this phenomenon can occur quickly or slowly. There is a gap in the literature about the theme of this research, making this study relevant to contribute to future studies in the area.

**Keywords:** *Mirroring. Pavement. High-traffic.*

---

<sup>1</sup> eng-silvioprado@camporeal.edu.br – Engenheiro civil – Centro Universitário Campo Real

<sup>2</sup> prof\_osmarmartins@camporeal.edu.br – Engenheiro civil – Centro Universitário Campo Real – Departamento de Engenharia Civil

## 1 INTRODUÇÃO

As estradas foram criadas pelo homem a fim de obter melhor acesso às áreas cultiváveis, fontes de madeira, rochas, minerais e água, além da intenção de expandir sua área ou território de influência. Segundo Balbo (2007), o surgimento e os registros das primeiras estradas provêm da China e, mais tarde, foram aperfeiçoadas pelos romanos, com a instalação de pavimentos e drenagem. Desde essa época já se tinha o entendimento de que esses caminhos pavimentados sofriam degradação ao longo dos anos e sua manutenção era imprescindível.

Pavimentar uma via de circulação de veículos é uma obra civil que visa uma melhoria operacional para o tráfego, criando uma superfície mais regular, mais aderente e menos ruidosa. Além desses requisitos na pavimentação de vias, as estruturas de pavimento têm como função suportar os esforços oriundos de cargas e ações climáticas, sem apresentar processos de deterioração de modo prematuro (BALBO, 2007).

De acordo com Balbo (2007), o objetivo na escolha e seleção dos materiais a serem empregados na pavimentação é de fundamental importância. Em seu sentido estrutural, todas as peças que compõem o pavimento devem trabalhar deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portante, de modo que não ocorram processos de ruptura ou deformação em seus materiais. Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas. As cargas aplicadas sobre a superfície do pavimento desencadeiam determinados estados de tensões na estrutura, que dependerá do comportamento mecânico de cada uma das camadas e do conjunto de que fazem parte.

Sabe-se que o primeiro caso de espelhamento e trilha de roda surgiu na área de influência da primeira refinaria da Petrobras, proveniente de uma obra que utilizou agregados oriundos de britagem de uma rocha extrusiva (BERNUCCI *et al.*, 2008). Outros casos posteriores foram relatados, no entanto, há uma lacuna na literatura técnica sobre o fenômeno do espelhamento.

O objeto de estudo desta pesquisa é a PRC-466, uma rodovia com média superior a 5 mil veículos por dia, evidenciando o alto tráfego do trecho. É a principal ligação de escoamento da produção agrícola e demais setores produtivos da região de Campo Mourão (PR) até o porto de Paranaguá (PR). Essa rodovia foi construída no ano de 1978, executada e implantada pela Construtora Varneq e Construtora de obras Prieto LTDA.

A rodovia PRC-466 faz a ligação da região Centro-Sul e o Norte do estado do Paraná, ligando as cidades de Guarapuava a Apucarana, passando pelos municípios de Turvo, Boa Ventura de São Roque, Pitanga, Manoel Ribas, Ariranha do Ivaí, Ivaiporã, Jardim Alegre,

Lidianópolis, Borrazópolis, Kalore, Marumbi e Jandaia do Sul. Este estudo pesquisou o trecho da rodovia entre os municípios de Guarapuava e Pitanga.

Em 1990, foi executada a primeira restauração na referida rodovia pela empresa DM Construtora de Obras Ltda. Em 2008, foi executada a segunda restauração, sendo que o trecho Guarapuava à ponte do Rio Bonito foi realizado pela empresa Dalba Engenharia e Empreendimentos LTDA, e o trecho da ponte do Rio Bonito à Pitanga foi executado pela empresa Antonio Moro Construtora de Obras.

No ano de 2018, o Governo do Estado do Paraná iniciou obras do CREMEP na mesma rodovia, que foram executadas pela empresa Dalba Engenharia e Empreendimentos Ltda., lugar onde é realizado este presente estudo.

Essa pesquisa teve a participação de engenheiros e laboratoristas que convivem com o fenômeno de espelhamento desde o seu início, contando com suas experiências profissionais para a realização desse estudo. Por essa razão, essa pesquisa pode ser caracterizada como quali-quantitativa, visto que segundo Ensslin e Vianna (2008), esse tipo de estudo pode ser utilizado para explorar questões pouco estruturadas, territórios ainda não mapeados e problemas que envolvem atores, contextos e processos poucos explorados.

De modo a analisar as variáveis mais significativas para um bom desempenho de mistura asfáltica, o engenheiro Bruce Marshall desenvolveu o método Marshall em 1939, levando em consideração o teor de asfalto e a densidade da mistura. O desempenho da mistura estaria relacionado ao teor ótimo de cimento de asfalto e à densidade da mistura. Esse método é um dos mais utilizados em nível mundial e faz uso da compactação da mistura asfáltica por impacto (golpes). Dessa maneira, os corpos de prova são submetidos ao impacto manual ou automático (SOUZA, 2012). Esse aspecto do estudo corresponde à abordagem quantitativa do fenômeno estudado.

Para realizar a abordagem qualitativa, o presente trabalho foi realizado baseado em entrevistas realizadas com engenheiros experientes na produção e manutenção de pavimentação asfáltica no Brasil. Foram consultados quatro engenheiros para inferir as causas e as relações do fenômeno do espelhamento.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Estradas Pavimentadas**

Na literatura há vastos registros das primeiras estradas construídas no mundo. Localizadas na Ásia, provavelmente as estradas primitivas coincidiram com o surgimento dos primeiros veículos com rodas. Com o surgimento do Império Romano, em 27 a.C., a

engenharia rodoviária era importante para manter a unidade do vasto império, visando governar e conquistar territórios (GOUVEIA, 2006).

Por essa razão, as estradas romanas caracterizavam-se pela solidez de sua construção, bem como pelo seu traçado reto, sendo construído por terrenos instáveis, vales e montanhas. É importante destacar, também, a engenhosidade das estradas chinesas, que se caracterizavam por serem largas, bem construídas e pavimentadas com pedras (GOUVEIA, 2006).

No Brasil, o pano de fundo das estradas se deu durante o período da colonização, em que os transportes de mercadorias eram feitos por burros de carga e por carros de boi. Os passageiros viajavam a cavalo e raramente havia passagem de carruagem, tendo em vista a precariedade de estradas apropriadas a esses veículos. Algumas estradas foram construídas no período imperial, como por exemplo, a Via Anchieta (ligando São Paulo a Santos) e a Graciosa (ligando Paranaguá a Curitiba) (GOUVEIA, 2006).

Segundo Gouveia (2006), em 1858 iniciou-se a história do asfalto no Brasil, quando D. Pedro II autorizou a exploração do carvão, turfa e betume. Em 1939, foi obtido petróleo em um poço do campo de Lobato, no Recôncavo Baiano e, atualmente, o Brasil encontra-se autossuficiente na produção desse material, sendo referência mundial devido a atuação da Petrobras.

O petróleo pode ser encontrado na natureza sob forma gasosa (gás natural), sólida (asfalto) e líquida (óleo cru). Esse material é produto de milhões de anos de decomposição de sedimentos orgânicos armazenados no subsolo terrestre, apresentando uma estrutura química muito complexa e de enorme flexibilidade. Em estado bruto, todo petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos, ou seja, uma estrutura formada por átomos de hidrogênio e carbono (GOUVEIA, 2006).

Antes da introdução do asfalto como material de pavimentação, as estradas eram construídas com partículas rochosas de vários diâmetros que proporcionavam travamento à estrutura (GOUVEIA, 2006). Nessa época, as ruas e vias principais eram constituídas por paralelepípedos ou barro batido (RIBEIRO *et al.*, 2005).

Devido ao crescimento da indústria de veículos automotores e do aumento de tráfego, aperfeiçoaram-se os meios e recursos de exploração e processamento de petróleo, principalmente após 1953, com a criação da Petrobras. A partir desse momento, as ruas e as estradas passaram a ser amplamente asfaltadas, concretizando o sistema rodoviário como principal meio de transporte do país (RIBEIRO *et al.*, 2005).

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, sendo o revestimento a camada que se destina a receber a carga dos veículos e a ação direta das mudanças climáticas.

Portanto, essa camada deve ser o tanto quanto possível impermeável e resistente às pressões exercidas pelas cargas em movimento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

De acordo com Bernucci *et al.* (2008), a maioria dos pavimentos brasileiros usa como revestimento uma mistura de agregados minerais de vários tamanhos, que podem variar com relação à fonte, com ligantes asfálticos para que garanta os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, à fadiga e ao trincamento térmico.

O pavimento asfáltico é formado pela mistura entre um conjunto de agregados minerais com granulções pré-definidas e um ligante, chamado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Os agregados minerais constituem 94-95%, em peso, da mistura, correspondendo a um conjunto de rochas (pedras britadas) em diferentes frações granulométricas, sendo um dos principais componentes da pavimentação rodoviária (MARTIN *et al.*, 2007).

Dentre as inúmeras rochas encontradas no Brasil, as mais utilizadas no processo de pavimentação são as basálticas, as graníticas, as gnáissicas e os calcários. O basalto é uma rocha magmática extrusiva, gerada pelo resfriamento da lava vulcânica quando em contato com a superfície durante a erupção. É caracterizada por uma cor escura, podendo formar quartzos quando o resfriamento ocorre de forma brusca (MARTIN *et al.*, 2007).

O gnaisse é uma rocha de origem metamórfica, resultado da deformação de sedimentos graníticos; o granito, por sua vez, é uma rocha ígnea, apresenta grão grosseiro (porfiróide) e é composto essencialmente por quartzo e feldspato; por fim, os calcários são rochas sedimentares, constituídas por carbonatos de cálcio e/ou magnésio (MARTIN *et al.*, 2007).

Segundo Gouveia (2006), os agregados são de importância indiscutível na produção de misturas asfálticas de qualidade, no entanto “as tentativas incessantes de produzir pavimentos de qualidade superior e duráveis deparam-se com a falta de conhecimento profundo sobre os materiais usados na pavimentação” (p. 38).

O termo “agregado” é definido como material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassas e de concreto. Ainda, pode ser definido como sendo uma mistura de pedregulho, areia, pedra britada, escória ou outros materiais minerais usada em combinação com um ligante para formar um concreto, uma argamassa, uma massa asfáltica, etc. (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Uma vez associados a ligantes asfálticos como parte de uma estrutura de pavimento, o desempenho potencial do agregado depende, entre outros fatores, das propriedades geológicas da rocha de origem, por isso, informações sobre o tipo de rocha, composição mineralógica, composição química, granulção, seu grau de alteração, tendência à

degradação, abrasão ou fratura sob tráfego, são informações importantes de se levar em consideração (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Devido ao elevado crescimento industrial e aumento excessivo de veículos circulantes, os asfaltos passaram a sofrer grandes danos, tendo em vista que não foram, inicialmente, construídos para suportar a tração que vinham sofrendo. Atualmente, verifica-se que mesmo após inúmeros consertos em pistas de asfalto, as deformações retornam em alguns meses ou dias (RIBEIRO *et al.*, 2005).

### **2.3 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)**

Os cimentos asfálticos podem ser divididos de três maneiras: Cimento Asfáltico Natural (asfalto natural), Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e os de origem do Alcatrão. Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros e viscosos até líquidos mais fluídos de cor castanha. Os CAPs são constituídos de 90-95% de hidrocarbonetos e de 5-10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais), unidos por ligações covalentes (SOUZA, 2012).

Durante o processo de destilação do petróleo, forma-se um resíduo no fundo da torre de destilação a vácuo definido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Durante os primeiros anos de funcionamento das refinarias, esse material foi considerado um problema ambiental, uma vez que era obtido involuntariamente e os produtos principais a serem extraídos eram os combustíveis, portanto não havia preocupações com os subprodutos gerados (RIBEIRO *et al.*, 2005).

O CAP é definido como um líquido extremamente viscoso, semi-sólido ou sólido a temperatura ambiente, que apresenta comportamento termoplástico. O CAP é um sistema coloidal constituído por duas fases distintas: os maltenos e os asfaltenos (MARTIN *et al.*, 2007). A característica de termoviscoelasticidade desse material se deve ao seu comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade do carregamento e à temperatura de serviço (BERNUCCI *et al.*, 2008). No Brasil, há quatro tipos de CAPs classificados por penetração: CAP 20/45, CAP 50/60, CAP 85/100 e CAP 150/200. A classificação brasileira, com base na viscosidade a 60°C, engloba os CAPs 7, 20 e 40.

A estocagem de CAP nos tanques das usinas de fabricação necessita de controle automático do nível de estocagem, sendo necessário conferir os limites permitidos de altura de estocagem antes de se adicionar o ligante adicional. Segundo Bernucci *et al.* (2008), o CAP deve ser sempre estocado e manuseado à temperatura mais baixa possível, levando em consideração a viscosidade adequada para a operacionalidade das ações necessárias aos processo de mistura em linha ou transferência para os sistemas de transportes.

Quanto à densidade, os petróleos se diferenciam entre pesados e leves. Até um tempo atrás, a Petrobras refinava apenas petróleos pesados (densidade = 1,025 e 1,030 kg/l), por razões logísticas e econômicas. Por essa razão, o resíduo presente no asfalto se mantinha com suas características constantes. Na medida em que foram sendo processados os petróleos leves (podem chegar a 1,003 kg/l), aliados a uma melhor técnica de refino, o resíduo asfáltico se alterou em suas características, embora ainda atendesse à especificação brasileira.

A forma da partícula dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ou cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar determinada densidade. Pedras britadas, com partículas irregulares ou de forma angular, bem como cascalhos e algumas areias de brita tendem a apresentar melhor intertravamento entre os grãos compactados (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A mistura de agregados e ligante é realizada em usina estacionária e transportada, posteriormente, por caminhão para a pista, onde é lançada por equipamento apropriado. Em seguida, é compactada até atingir um grau de compressão que resulte em um arranjo estrutural estável e resistente. Um dos tipos mais empregados no Brasil é o concreto asfáltico (CA), também chamado de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ).

A partir da experiência técnica no campo, foi possível perceber que antes era possível que o passante ficasse entre 5 a 10% da faixa granulométrica na peneira #200. No entanto, isso não é mais possível.

## **2.4 Espelhamento**

Os defeitos de superfície podem aparecer precocemente (por erros ou inadequações) ou a médio ou longo prazo (por conta do tráfego e efeitos climáticos).

Os defeitos de superfície podem ser caracterizados como danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser identificados a olho nu (BERNUCCI *et al.*, 2008). O DNIT 005/2003 apresenta a terminologia utilizada para padronizar a linguagem adotada para referir-se aos defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Para fins didáticos, serão citados os defeitos apontados pelo documento: 1) fenda; 2) afundamento; 3) ondulação ou corrugação; 4) escorregamento; 5) exsudação; 6) desgaste; 7) panela ou buraco; 8) remendo.

A exsudação, comumente utilizada como sinônimo de espelhamento, é definida pelo DNIT 005/2003 como “excesso de ligante betuminoso na superfície do pavimento, causado pela migração do ligante através do revestimento” (BRASIL, 2003, p. 3). É importante ressaltar

que a palavra “espelhamento” não consta no documento e, por essa razão, é válido apontar a lacuna na literatura quanto ao fenômeno do espelhamento.

A ação do tráfego é um aspecto fundamental para ocasionar problemas de deformação permanente em trilha de roda ou, no caso, o espelhamento e, segundo Moura (2010), a ação do tráfego deve ser limitada, caso contrário essa deformação pode ocorrer. No entanto, sabe-se que essa não é a realidade na PRC-466, objeto de estudo desta pesquisa, visto que a rodovia conta com uma média superior a cinco mil veículos por dia, sendo uma rodovia de alto tráfego.

### **3 METODOLOGIA APLICADA E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Esse estudo tem uma abordagem quali-quantitativa. A abordagem quanti-qualitativa não é oposta ou contraditória em relação à pesquisa puramente qualitativa ou quantitativa. No entanto, é de predominância necessária quando é levada em consideração a relação dinâmica entre o mundo real, os sujeitos e a pesquisa (ESSLIN; VIANNA, 2008). Nesse sentido, esta pesquisa enquadra-se na abordagem mista, visto que além das análises quantitativas referentes aos testes laboratoriais, foram também realizadas entrevistas estruturadas dirigidas a engenheiros especialistas e com vasta experiência profissional na área, visando responder e compreender os questionamentos que emergiram dos dados. Ainda, este estudo enquadra-se em um estudo exploratório, visto que há pouco conhecimento inicial sobre o problema investigado, não tendo ampla disponibilidade de literatura sobre a temática.

A utilização de métodos quantitativos busca incorporar as questões qualitativas para sua eficácia, visto que resolver problemas e investigar fenômenos é um processo, com o surgimento imprescindível de novos questionamentos e novos contextos.

Segundo Ensslin e Vianna (2008, p. 9)

A estrutura teórica é o esqueleto da pesquisa. Nessa estrutura são apresentados os questionamentos da pesquisa, a identificação do que é relevante, o projeto de como representá-lo e mensurá-lo a forma como será feito o levantamento de dados, que métodos serão utilizados para analisar os dados coletados e de que forma os dados serão interpretados.

Dessa maneira, entende-se que a abordagem quali-quantitativa é um modelo teórico e prático dinâmico, ou seja, articula essas duas maneiras metodológicas de se pesquisar. Dito isso, a presente pesquisa teve o percurso metodológico dividido em duas etapas, a saber:

#### **Etapa 1 - abordagem quantitativa:**

Figurando esta etapa da pesquisa, foi utilizado o método Marshall, desenvolvido por Bruce Marshall em 1939. É o método de dosagem mais utilizado mundialmente e faz uso da compactação por impacto.

A execução do ensaio Marshall em laboratório, com todos os seus passos, determina o teor de betume que deve ter a massa asfáltica, de modo a se conseguir, após a compactação na pista, os parâmetros da durabilidade projetada. Quanto ao teor de betume, este deve ser tal que conduza a um volume de vazios entre 3 e 5%. A massa possui vazios em seu meio, e em um corte poderão ser identificadas fissuras ligando os vazios, com aparelhos específicos.

Para a realização do ensaio, segue-se um roteiro estruturado onde são feitos conforme o protocolo: 1) Preparação dos corpos de prova; 2) Agregados e asfalto são aquecidos separadamente até temperatura especificada; 3) Agregados e asfalto são misturados, mantendo-se a temperatura da mistura; 4) A mistura é colocada em molde aquecido e compactada com soquete de 10 libras de peso (4,54 kg), caindo de altura de 45,72 cm; 5) É feita a compactação; 6) Aplica-se 45 golpes do soquete por face do CP; 7) Devem ser moldados 3 CP para cada teor de ligante utilizado na dosagem; 8) Os CP são cilíndricos, com 10,16 cm de diâmetro e 6,35 cm de altura.

Após a compactação, deve-se esperar que os corpos de prova esfriem, para então realizar sua extrusão retirando-os do molde metálico. Em seguida, os CP devem ser pesados ao ar livre e imersos para determinação de seu peso específico aparente (se necessário, devem ser parafinados antes da determinação do peso imerso).

Foram realizadas medidas de seu diâmetro e de sua altura com paquímetro (três medidas de cada para se chegar a uma média confiável). Os CP devem ser colocados em banho-maria a 60°C, por 40 minutos. Imediatamente após a retirada do banho-maria, são levados à prensa do aparelho Marshall, em que a carga é aplicada continuamente ao longo da superfície do cilindro (compressão diametral) à média de 50,8 mm por minuto até o rompimento. A carga máxima aplicada que provoca o rompimento do CP é o valor de instabilidade Marshall (kgf).

A deformação sofrida pelo CP até o momento da ruptura (deformação máxima) é o valor da fluência, em que a Unidade de Fluência é um centésimo de polegada (0,254 mm).

Com relação ao volume de vazios ( $V_v$ ), o cálculo é feito através de simples fórmulas: para a densidade teórica ( $D$ ) são necessários os dados dos percentuais e densidades respectivas do agregado graúdo, do agregado fino, do filler e do betume. Para a densidade média ( $d$ ) são necessárias as massas dos CP imersos em água. Com os valores calculados de  $D$  e  $d$ , o volume de vazios é a diferença entre as duas grandezas, dividida pela densidade teórica, e o resultado multiplicado por 100.

Após esse procedimento, para cada teor de betume dos CP, com seus resultados lançados em um gráfico, surge uma curva de união de pontos. Escolhe-se, então, um teor de betume para a massa asfáltica que se situe entre 3 a 5%.

Após a massa asfáltica ser usinada e lançada sobre a base imprimada, ela sofre a compactação dos rolos de chapa e de pneus, até que o grau de compactação atinja um valor superior a 97% da compactação atingida no ensaio Marshall. Com o tráfego liberado, a camada asfáltica começa a sofrer uma deflexão a cada passagem de eixo do veículo automotor, ou seja, o pavimento “afunda e volta” em cada passagem de eixo.

Esse processo de “afundar e voltar” é chamado de deflexão recuperável e pode ser medida, onde a área “afundada” leva o nome de bacia de deformação. A capacidade da camada asfáltica de fletir e voltar, em cada passagem de eixo por inúmeras vezes, leva o nome de resiliência.

Ao se deformar, a camada asfáltica tem sua parte superior comprimida e sua parte inferior distendida. Quanto maior for a deflexão, maior será a força de distensão na parte inferior da camada de asfalto e isso acabará forçando o surgimento de trinca. No ponto em que esse fenômeno acontecer, diz-se que o pavimento esgotou sua resiliência e entrou no processo de fadiga. A partir dessa primeira trinca, a deflexão deixa de ser recuperável na medida em que a trinca vai se expandindo até surgir na superfície, permitindo a entrada de água da chuva. Esse local passa a ser, então, o início da deterioração do pavimento.

A medida da deflexão é dada em centésimos de milímetros e é medida pela Viga Benkelman, um aparelho de laboratório criado em 1953, tendo o seu uso em pavimentos normatizado pelo DNER (atual DNIT), no Brasil, em 1994. O aparelho é de baixo custo e fácil aplicação, sem apresentar dificuldades no manejo.

No mesmo momento do ensaio, além da deflexão, pode-se determinar a bacia de deformação e, por meio de fórmulas, calcula-se o raio da bacia. Compreende-se facilmente que quanto menor a deflexão, maior será a vida útil do pavimento, dificultando o surgimento de trincas na parte inferior da camada asfáltica, evitando o fenômeno da fadiga. Dessa maneira, as especificações para as obras rodoviárias exigem uma deflexão medida menor que 0,5 mm na superfície de capa acabada.

Na medida em que a estrutura do pavimento vai sendo construída, mede-se a deflexão na camada final da terraplanagem, no topo da sub-base e no topo da base. A experiência de poucas obras determina os valores que devem ser atingidos em cada etapa, para que se tenha no topo da camada final de capa asfáltica, a deflexão exigida pela norma técnica.

Após a pavimentação asfáltica ter sido executada na PRC-466 e ter seu tráfego liberado, surgiu um espelhamento na superfície, apresentado em meia pista no topo de uma curva vertical, na altura da estaca 5866 (km 251+450m), como pode ser verificado nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 - Espelhamento na estaca 5.886 da PR-466



Fonte: Armando Morilha Junior (2020)

Figura 2 - Diferença nas pistas



Fonte: Armando Morilha Junior (2020)

Neste segmento foram extraídos, através de sondagem rotativa, nove corpos de prova de diâmetro 10 centímetros e, tendo como espessura a mesma da camada executada. O CAP usado foi o convencional (CAP 50/70).

Os nove corpos de prova foram divididos em três grupos de três para extração de betume e granulometria lavada. Os corpos de prova foram serrados, segundo sua altura, em

metade inferior, um quarto mediano e um quarto superior (Figuras 3 e 4). As pastilhas superiores foram designadas por “Grupo A”, as pastilhas medianas por “Grupo B”, e as pastilhas inferiores por “Grupo C”.

Figura 3 – Amostra dos corpos de prova



Fonte: Silvio do Prado Castro (2020)

Figura 4 – Amostra dos corpos de prova



Fonte: Silvio do Prado Castro (2020)

Cada grupo foi dividido em três partes devido à restrita capacidade do Rotarex e, assim, extraído o betume, calculado o teor e feito a granulometria lavada, com ênfase nos finos do agregado, nas peneiras #200 (0,075mm), #80 (0,177mm) e #40 (0,42mm).

Os resultados dos ensaios foram tabelados e estão apresentados abaixo (Tabela 1), bem como as suas representações gráficas.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios

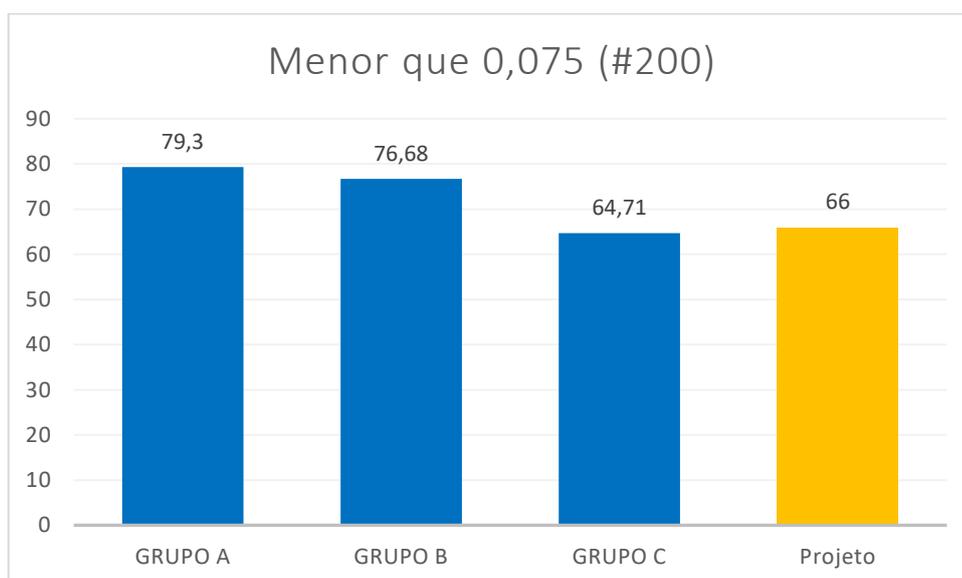
	% BETUME	RELAÇÃO F/B	Gramas de material/1000g do agregado		
			Menor que 0,075 (#200)	0,075 (#200) a 0,177 (#80)	0,177 (#80) a 0,42 (#40)
GRUPO A	5,596	1,53	79,3	19,46	44,48
GRUPO B	5,207	1,38	76,68	19,07	48,03
GRUPO C	4,888	1,28	64,71	26,28	67,23
Projeto	5,23	1,06	66	41	51
3 CPs da Pista	5,241	1,48	81,77	19,48	41,39

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Pelos resultados, nota-se uma migração para cima do betume, bem como de finos abaixo de 0,075 mm, acontecendo este fenômeno ao longo de toda a altura dos corpos de prova.

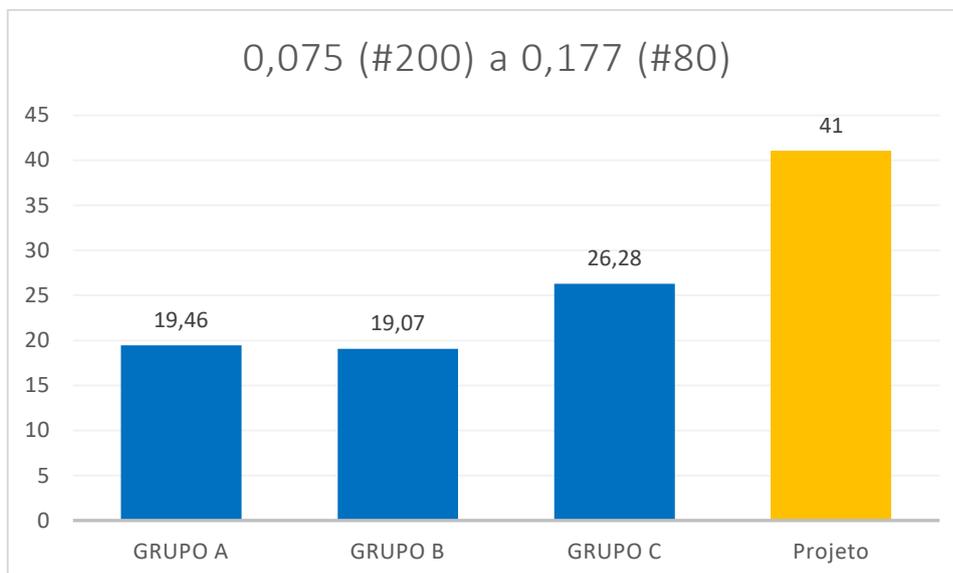
Para os finos entre a peneira #200 e a peneira #40 (0,075 mm e 0,42 mm) há uma migração para baixo, como a ocupar o lugar dos finos que subiram. Em resumo, existe uma segregação do agregado. Isto aparece melhor visualizado na representação gráfica, disposta abaixo (Gráficos 1, 2 e 3).

Gráfico 1 – Comparativo entre os dados do projeto e malha 200



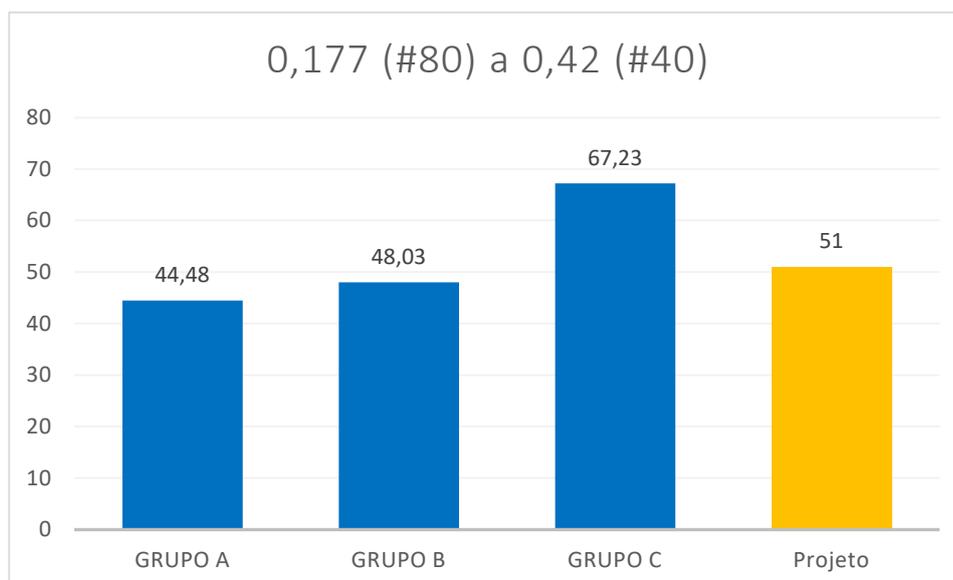
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Gráfico 2 – Comparativo entre os dados do projeto e malha 80



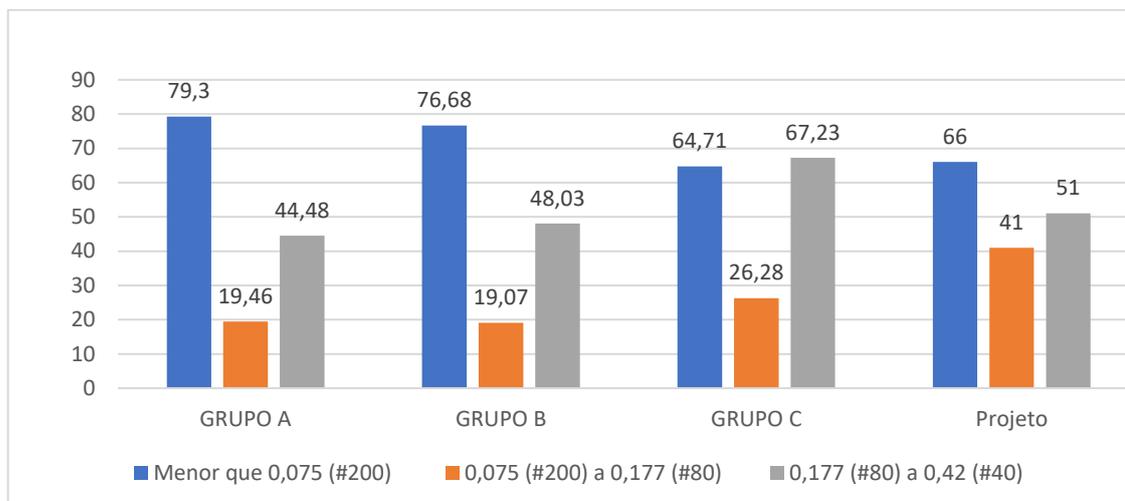
Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Gráfico 3 - Comparativo entre os dados do projeto e malha 40



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Gráfico 4 – Comparativo dos Grupos A, B e C com o projeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

Nos gráficos, as barras com a indicação “Projeto” são indicativas, mostrando que se deveria ter, para o betume e os finos, a mesma massa nas três pastilhas, por mil gramas do agregado.

A ascensão do betume e a segregação do agregado podem se dar de maneira muito rápida, quando o espelhamento surge logo após a liberação do tráfego, ou de maneira extremamente lenta, como quando o espelhamento surge após um ano ou mais. A experiência mostrou que ocorrem os dois casos.

A migração do betume para cima explica a deformação permanente na superfície, deformação esta denominada de “trilha de roda”.

Mais betume nas pastilhas superiores faz com que diminua o Módulo de Elasticidade na parte da massa asfáltica junto à superfície, permitindo que as forças dos pneus sobre a camada asfáltica causem a deformação.

Os fatos presenciados neste caso, ensaiados e medidos, podem estar ocorrendo desde antes do beneficiamento dos petróleos leves, em menor proporção, uma vez que não se encontrou literatura a respeito. Se assim ocorreram, não houveram estudos, uma vez que não se transformavam em patologias.

Cabe ressaltar que, exceto o estudo objeto deste TCC, são conhecidas as causas que originam o fenômeno do espelhamento para esta rocha e este betume, bem como os cuidados a tomar para que isto não ocorra.

A Engenharia trabalha com especificações onde são estabelecidas faixas de trabalho, ou máximos e mínimos, justamente para que se possa absorver as variações dos processos produtivos, ou as variações da capacidade dos equipamentos, sem prejuízo da qualidade técnica.

O beneficiamento de petróleo leve fez com que as faixas de trabalho se estreitassem e que os equipamentos operassem dentro de especificações extremamente rígidas. Qualquer problema não previsto, ou qualquer trabalho que não foi feito, pode ter como consequência o espelhamento na pista: uma mudança de bancada na pedreira; um dia de umidade alta na britagem; uma manutenção que não foi feita; uma entrada de ar falso num equipamento pneumático; um desgaste não visto num bico injetor; um mau funcionamento de um rolo compactador ou, entre outras causas, um ensaio de laboratório feito sem o devido cuidado.

## **Etapa 2 - abordagem qualitativa:**

A segunda etapa contou com as entrevistas e relatórios técnicos realizadas com três engenheiros experientes em pavimentação asfáltica no Brasil, que já presenciaram o fenômeno do espelhamento e ofereceram seus relatos acerca desse evento.

O engenheiro Armando Morilha Junior forneceu informações para a execução deste trabalho a partir de um relatório técnico realizado nas obras de reparação da PRC-466, onde foi observado o fenômeno de espelhamento. Essa visita foi realizada em companhia de uma equipe com bastante experiência na área.

O engenheiro Nei Damo foi um dos profissionais consultados para a execução desse trabalho, que contribuiu sobremaneira com seus conhecimentos de prática de campo na interpretação dos resultados laboratoriais e das suas experiências com o fenômeno do espelhamento.

O engenheiro Antônio Santos forneceu informações relevantes para a discussão desse trabalho, tendo sido responsável pela construção e manutenção de pavimentação asfáltica, por mais de quarenta anos, em todo o território nacional. Profundo conhecedor do assunto, atualmente atua como Engenheiro de Qualidade junto à Neovia, uma empresa que detém mais de 5.000 quilômetros contratuais de manutenção de rodovias asfaltadas pelo Brasil. Segundo as respostas que forneceu para a entrevista semiestruturada, Antônio afirma que observou o espelhamento pela primeira vez em outubro de 2005 na BR 282 logo após a mudança, realizada em julho de 2005, na especificação do CAP de viscosidade (CAP 7, CAP 20 e CAP 40) para penetração (CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200).

Segundo Antônio, existem várias causas relacionadas ao espelhamento, no entanto, uma das mais importantes está vinculada à mudança no tipo de petróleo e, principalmente, no processo de obtenção do CAP.

Quando questionado sobre por qual razão a massa asfáltica executada com CAP com polímeros espelha menos do que com a CAP convencional, Antônio respondeu que normalmente asfaltos que são modificados na obra em que hajam falhas no processo de modificação e no tipo de CAP utilizado, podem ocasionar em um leve espelhamento.

Ainda, sobre a relação entre espelhamento e a deformação de capa asfáltica, Antônio sugeriu que pela ação do tráfego lento e alta temperatura ambiente, o espelhamento pode transformar-se em Deformação Permanente do Revestimento Asfáltico.

No sentido de evitar o espelhamento, recomenda-se, entre outras providências, que se trabalhe em campo no ramo seco do traço asfáltico. O engenheiro Antônio afirma que há risco de redução da vida útil do pavimento por fadiga do revestimento asfáltico, visto que a variação especificada para o teor ótimo é necessária, pois a bomba de asfalto não consegue injetar exatamente o percentual em peso definido no projeto de dosagem da mistura asfáltica, em função da mudança de viscosidade do ligante com a temperatura. Quando se trabalha com o teor de asfalto no ramo seco, pode-se correr o risco desse teor de asfalto estar abaixo do limite especificado e, dessa forma, ocorrer a fadiga precoce.

Também, sobre amenizar o problema do espelhamento, o engenheiro Antônio sugere que usar usina de fluxo contínuo ou gravimétrica faz diferença, especialmente quando se tem agregado com alta absorção.

Na entrevista, questionamos o que mudou substancialmente no CAP de agora, visto que antes do fenômeno de espelhamento, a faixa C do DNIT permitia de 5 a 10% passantes na peneira 200, e hoje órgãos governamentais e empresas de fiscalização sugerem o limite de 6,5% o passante nesta peneira. O engenheiro Antônio respondeu que, no Brasil, houve uma mudança no tipo de petróleo utilizado no processo de obtenção do CAP, devido à segunda crise do petróleo ocorrida em 1978, obrigando o estreitamento da faixa granulométrica, justamente para evitar o espelhamento.

Sobre o método Marshall, o engenheiro Antônio reconhece que esse ensaio continua sendo o mais utilizado no Brasil para a dosagem de misturas asfálticas a quente, entretanto, reconhece o advento do método SUPERPAVE que vem sendo utilizado de forma acadêmica através de algumas pesquisas, ainda que não seja predominante sua escolha como método de projeto.

Quando questionado sobre a razão pela qual alguns segmentos de um mesmo trecho espelham antes que outros, o engenheiro Antônio respondeu que pode ocorrer uma variação no teor do asfalto permissível ou da granulometria da mistura fora da faixa de trabalho. Misturas densas contínuas são muito sensíveis à variação do teor de asfalto e, com o tipo de ligante utilizado atualmente, as misturas (granulometria), o processo de usinagem (temperatura da injeção do CAP) e o medidor de vazão (nas usinas), devem ter um controle extremamente rigoroso para evitar as variações que vem ocorrendo.

Por fim, o engenheiro Antônio afirma não ter conhecimento sobre estudos específicos sobre o fenômeno do espelhamento.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio desta pesquisa, percebeu-se que há uma lacuna na literatura quanto ao fenômeno do espelhamento, o que foi corroborado pelos engenheiros entrevistados que afirmam não ter conhecimento de um estudo acadêmico ou técnico realizado sobre essa temática.

Segundo as entrevistas e os dados obtidos neste estudo, existem diversas causas relacionadas ao espelhamento, no entanto, uma das mais importantes está vinculada à mudança no tipo de petróleo e, principalmente, no beneficiamento de petróleo leve, o que fez com que as faixas de trabalho se estreitassem, tornando as especificações extremamente rígidas. Por essa razão, qualquer problema não previsto pode ter como consequência o espelhamento na pista.

Este estudo sugere que futuras pesquisas devem ser feitas sobre esse fenômeno, de modo a contribuir na literatura para elucidar as causas e os efeitos do espelhamento e, dessa maneira, possibilitar que absorvam-se as variações dos processos produtivos sem o prejuízo da qualidade técnica.

### ***Agradecimentos***

À Dalba Engenharia e Empreendimentos pela realização dos ensaios laboratoriais.

Ao Engenheiro Civil Luiz Carlos de Cristo, Diretor Técnico DER-PR, CREA PR 5.127/D.

Ao Engenheiro Civil Armando Morilha Junior, Consultor de Pavimentação, CREA PR 15.859/D.

Ao Engenheiro Civil Nei Benito Damo, Consultor de Britagem de Agregados, CREA RS 5.996/D.

Ao Engenheiro Civil Antônio Santos, Consultor de Pavimentação, CREA SC 4.435/D.

## REFERÊNCIAS

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

GOUVEIA, Lilian Taís de. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. Tese (Doutorado). EESC – USP, São Paulo, 2006.

SOUZA, Leonardo José Silva. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

ENSSLIN, L.; VIANNA, W. B. O design na pesquisa quali-quantitativa em Engenharia de Produção – questões epistemológicas. **Rev. Produção Online**, Florianópolis, v. 8, n. 1, 2008.

MARTIN, C. M. S.; RIBEIRO, R. C. C.; CORREIA, J. C. G. **Avaliação química da utilização de aditivos no processo de pavimento asfáltico**. XV Jornada de Iniciação Científica, CETEM, 2007.

MOURA, Edson. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda misturas asfálticas em pisa e em laboratório**. 2010. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo – Escola Politécnica: São Paulo, 299p., 2010.

BERNUCCI, L. B *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, Brasil: Petrobras, 2008.

BRASIL. NORMA DNIT 005/2003 - TER: **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos**. Rio de Janeiro, Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de planejamento e pesquisa. Coordenação geral de estudos e pesquisa. Instituto de Pesquisas 112 Rodoviárias, 2003.

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ESPELHAMENTO NA PAVIMENTAÇÃO: ESTUDO DE CASO NA RODOVIA PRC-466 TRECHO DISTRITO PALMEIRINHA**

**SILVIO DO PRADO CASTRO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DO CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO REAL, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL, CONSIDERADO APROVADO PELA BANCA EXAMINADORA E AVALIADO COMO NOTA: 10,0 EM SUA DEFESA PÚBLICA.**

---

**ORIENTADOR: ENGENHEIRO CIVIL - OSMAR DE CARVALHO MARTINS**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO REAL**

---

**MEMBRO DA BANCA: ENGENHEIRA CIVIL – BÁRBARA PERGHER DALA COSTA**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO REAL**

---

**MEMBRO DA BANCA: ENGENHEIRO CIVIL – KERSON CARLOS DO NASCIMENTO**

**CENTRO UNIVERSITÁRIO CAMPO REAL**