



26º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 49ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

UTILIZAÇÃO DO COMPACTADOR GIRATÓRIO SUPERPAVE® (CGS) NA DOSAGEM DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO CAMADA POROSA DE ATRITO (CPA)

*Edilza Rakel Nóbrega Cavalcanti¹; Talita Miranda de Sousa²; Adriano Elísio de Figueiredo
Lopes Lucena³; Osires de Medeiros Melo Neto⁴ & Maria Ingridy Lacerda Diniz⁵.*

RESUMO

No Brasil, país predominantemente rodoviário, tem-se motivado a busca por métodos de pavimentação que ofereçam conforto e segurança aos usuários garantindo entre outras características, uma boa aderência pneu-pavimento e a drenagem eficaz das águas superficiais. Neste contexto, surgem as Camadas Porosas de Atrito (CPA), uma tecnologia utilizada como revestimento de pavimentos, e que tem por característica o elevado índice de vazios, entre 18 e 25%. A finalidade dessa pesquisa foi contribuir nas investigações sobre a viabilidade do uso do compactador giratório Superpave (CGS) na dosagem da CPA. Desta forma, objetivou-se implementar a compactação por amassamento, que simula mais fielmente a compactação de campo, à realidade da dosagem brasileira para camadas porosas de atrito, que atualmente é feita por meio da metodologia Marshall. Avaliou-se os efeitos da compactação CGS na mistura CPA por meio de ensaios de caracterização volumétrica e mecânica, sendo eles: volume de vazios, vazios comunicantes, desgaste cântabro, resistência à tração, escorrimento, módulo de resiliência e dano por umidade induzida. Para isto, foram realizadas compactações no CGS de misturas asfálticas com cinco teores de ligante distintos, onde o teor de projeto definido foi de 4,5% de ligante para a CPA. Os resultados encontrados estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ES 386 e ASTM D7064, apontando a viabilidade do uso da compactação CGS em misturas asfálticas tipo CPA, dosadas de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira, acrescentando à metodologia nacional, às vantagens da compactação por amassamento.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação; Compactação; Camada Drenante; Volumetria; Desempenho Mecânico.

ABSTRACT

In Brazil, a predominantly road-based country, there's a growing interest in pavement methods ensuring user comfort, safety, good tire-pavement adhesion, and effective surface water drainage. Porous Friction Courses (PFC) have emerged as a pavement coating technology characterized by high void content, typically between 18 and 25%. This research aimed to explore the feasibility of using the Superpave Gyratory Compactor (SGC) in PFC mix design. It sought to adapt the compaction method to better simulate field conditions, aligning with Brazilian PFC design practices currently based on Marshall methodology. The study evaluated the effects of SGC compaction on PFC mixtures through volumetric and mechanical characterization tests including void volume, interconnected voids, Cantabro abrasion, tensile strength, rutting, resilience modulus, and moisture-induced damage. Compaction trials were conducted using SGC on asphalt mixtures with five different binder contents, with a target binder content of 4.5% for PFC. Results complied with DNIT-ES 386 and ASTM D7064 standards, indicating the feasibility of SGC compaction for PFC mixtures designed according to Brazilian standards, thus enhancing national methodology with the benefits of gyratory compaction.

KEY WORDS: Paving; Compaction; Drainage Layer; Volumetry; Mechanical Performance.

^{1,2,3,4,5} Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Engenharia de Pavimentos - UFCG/DEC/LEP, engedilzarakelnobrega@gmail.com; talita.miranda@hotmail.com; lucenaafb@uol.com.br; osiresdemedeiros@gmail.com; mariaingridydiniz@gmail.com.



INTRODUÇÃO

No Brasil, país predominantemente rodoviário, tem-se motivado a busca por métodos de pavimentação que permitam suprir as necessidades desse modal unindo qualidade, conforto e segurança aos usuários e à população aos seus arredores. Estudos sobre a funcionalização do pavimento, isto é, a utilização da estrutura do pavimento para o desempenho de funções para além das convencionais, sugerem o uso das misturas asfálticas porosas, dentre elas as Camadas Porosas de Atrito (CPA), que foram concebidas com a finalidade de conferir ao pavimento, sobretudo à superfície de rolamento, melhoria das condições de aderência pneu-pavimento, rápido escoamento das águas superficiais para o sistema de drenagem, dentre outras propriedades funcionais (BERNUCCI *et al.*, 2022; ALECRIM *et al.*, 2022).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) em sua especificação de serviço 386 (1999), define a CPA como um material utilizado como revestimento em rodovias, que tem por característica um processo de seleção de agregados que fazem com que a massa asfáltica apresente uma composição granulométrica aberta, com elevado índice de vazios (18 a 25%) após a compactação. Os parâmetros de dosagem analisados pela especificação brasileira, conforme metodologia Marshall, são volume de vazios, desgaste por abrasão- cântabro e resistência a compressão diametral (RT), (BERNUCCI *et al.*, 2022).

A American Society for Testing and Materials (ASTM) por meio da especificação D7064 (2021) normatiza a dosagem de mistura com granulometrias abertas, da qual o CPA faz parte, com a recomendação de que o índice de vazios após a compactação seja de no mínimo 18%. A norma recomenda ainda, a utilização do compactador giratório Superpave, sob uma aplicação de 50 giros. Esse método de compactação, por amassamento é o que mais se aproxima da compactação em campo, sendo essa uma das grandes vantagens do seu uso nas pesquisas sobre misturas asfálticas.

Numa mistura com graduação aberta, o movimento da água durante a drenagem e a ação de agentes externos tornam o pavimento vulnerável devido ao elevado volume de vazios e à fraca resistência de ligação entre o ligante e os agregados (WANG; LI, 2018; CHU; FWA, 2019). Rivera *et al.* (2022) destacam que uma das principais limitações na utilização das misturas porosas é sua vida útil reduzida, logo, comumente faz-se o emprego de ligantes asfálticos modificados (ligante modificado por polímero regular ou borracha asfáltica), com a finalidade de aumentar a durabilidade.

Del Carpio (2014) e Knabben (2017) destacam que para a dosagem de uma mistura porosa ainda não é embasada em método único e normativo, e que a dosagem realizada por meio do compactador giratório Superpave foi desenvolvida, basicamente, para misturas densas. Sendo assim, é possível que se dose misturas asfálticas porosas pela metodologia Superpave.

Portanto, com embasamento nos estudos já existentes acerca dessa tecnologia, e diante da necessidade de entendê-la e aprimorá-la a fim de tornar seu uso no Brasil viável e satisfatório, o objetivo dessa pesquisa é contribuir nas investigações sobre a viabilidade do uso do compactador giratório Superpave na dosagem da CPA com base os parâmetros estabelecidos pela norma DNIT-ES 386/99. Desta forma, objetivou-se acrescentar a vantagem da compactação por amassamento, que simula mais fielmente a compactação em campo, à realidade da dosagem brasileira para camadas porosas de atrito.



METODOLOGIA

Materiais

Ligante Asfáltico

Os ligantes-polímero elastoméricos são classificados pela DNIT 129/11 quanto ao ponto de amolecimento e a recuperação elástica a 25 °C, em 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E. Apesar da norma DNIT 386/99 especificar apenas o uso de ligante asfáltico modificado por polímero SBS em misturas do tipo CPA, Ceratti et al., (2015) destacam que entre os três tipos de asfalto borracha disponíveis no mercado brasileiro, aqueles mais indicados para o uso em camadas porosas de atrito são: o 60/85-E e o 65/90-E. No então, na região Nordeste, há uma maior disponibilidade do ligante Asfáltico Modificado por Polímero (AMP) 55/75-E, por isso, o ligante utilizado nesta pesquisa foi o asfalto borracha 55/75-E, adquirido na obra na BR 230 – Paraíba. A Tabela 1 apresenta a caracterização física do ligante, bem como as normas referentes a cada ensaio e seus limites. Todos os ensaios de caracterização do ligante, com exceção do ensaio de recuperação elástica, foram repetidos após o envelhecimento a curto prazo, por oxidação e evaporação.

Tabela 1. Caracterização do Asfalto borracha.

Característica	Normas	Limites	Resultados
Ponto De Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	55 (mín.)	48,5
Penetração (0,1mm)	ABNT NBR 6576	45 -70	57
Recuperação Elástica (%)	ABNT NBR 15086		76
Viscosidade Rotacional			
Temperatura 135°C (cP)		3000 (máx.)	1577,5
Temperatura 150°C (cP)	ABNT NBR 15184	2000 (máx.)	726,0
Temperatura 177°C (cP)		1000 (máx.)	245,5
RTFOT	ASTM D 2872		
Perda de Massa (%)		1,0 (máx.)	0,0205
Penetração Retida (%)	ABNT NBR 6576	-	82
Variação do Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	-5 a +7	+5
Recuperação Elástica Retida (%)	ABNT NBR 15086	80 (mín)	80

Como mostra a Tabela 1, todos os resultados obtidos nos ensaios, antes e após o envelhecimento pelo método Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT) do ligante, estão dentro dos limites estabelecidos por suas respectivas normas viabilizando, assim, o uso do ligante nesta pesquisa. O resultado variação de massa obtida pelo ensaio de RTFOT está dentro do limite de 0,5% estabelecido pela norma 095 (2006) do DNIT, logo, o ligante encontra-se dentro da tolerância de envelhecimento sem interferir na qualidade do pavimento.

Agregados

Os agregados graníticos utilizados foram: brita 19mm, brita 12,5mm e pó de pedra. Estes foram fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedreira própria com sede em Campina Grande – PB. O filer utilizado foi a cal hidratada proveniente do comércio local.



Para determinação da granulometria dos agregados esta pesquisa seguiu a metodologia de ensaio descrita na especificação 083 de 1998 do DNIT. Obtendo-se a curva granulométrica demonstrada na Figura 1.

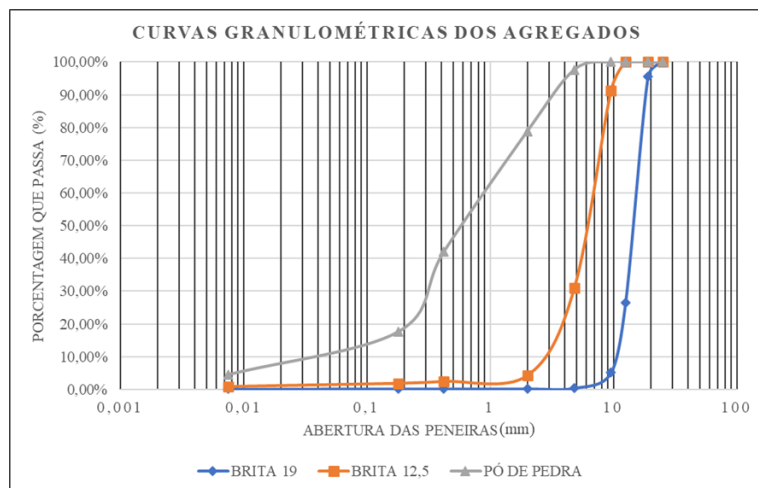


Figura 1. Curvas granulométricas dos agregados.

As curvas granulométricas da Figura 1, demonstram que os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa apresentam uma granulometria uniforme, já o pó de pedra apresentou uma granulometria densa. Os resultados da caracterização dos agregados utilizados nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física dos agregados

Ensaio	Normas	Limites	Brita 19mm	Brita 12,5mm	Pó de Pedra
Massa Específica Real (g/cm^3)		-	2,26	2,07	2,47
Massa Específica Aparente (g/cm^3)	DNIT ME 413/19 e DNIT ME 411/21	-	2,27	2,09	2,49
Absorção (%)		≤ 2	0,50	0,70	0,70
Abrasão Los Angeles (%)	DNIT ME 035/98	≤ 55	18,97	22,16	-
Equivalente Areia (%)	DNIT ME 054/97	≥ 55	-	-	56,38

As massas específicas calculadas foram utilizadas no cálculo das densidades máximas da mistura. Para o índice de absorção pode-se concluir que o agregado utilizado nessa pesquisa é pouco poroso. Quanto ao desgaste por abrasão Los Angeles, os agregados graúdos apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos por norma de 55%, no ensaio de equivalente areia, o agregado miúdo apresentou-se dentro dos limites estabelecidos por norma de 55%. Portanto, os agregados foram considerados adequados para uso em misturas asfálticas.

Métodos

Dosagem

Para determinação da composição granulométrica da mistura, analisou-se o resultado dos ensaios de granulometria dos agregados e constatou-se que a composição da mistura estudada se enquadra na faixa V recomendada pelo DNIT-ES 386/99, para CPA, como na figura 2.

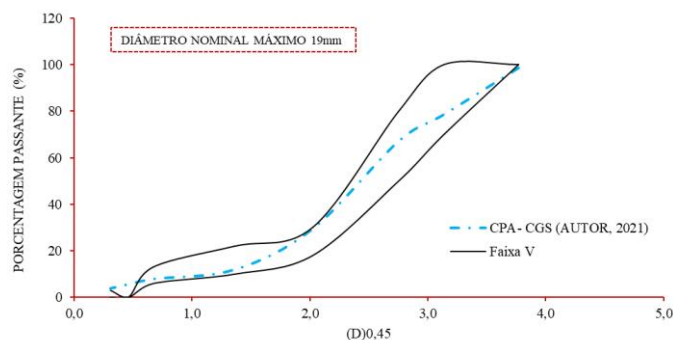


Figura 2. - Curva da composição granulométrica do CPA.

Desta forma, a composição da mistura asfáltica do tipo CPA desta pesquisa foi elaborada a partir de 29% de brita 19mm, 60% de brita 12,5mm, 8% de pó de pedra e para suprir uma carência detectada de finos foi acrescido a mistura 3% de filer. A composição elaborada por Schneider (2016) se aproximou bastante da desenvolvida nesta pesquisa e também se enquadrrou na Faixa V estabelecida pelo DNIT-ES 386 (1999).

A metodologia utilizada para determinação das temperaturas de usinagem e compactação consiste em determinar graficamente, na qual para a primeira, o ligante deve ter uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s, já para se definir a segunda, o ligante deve apresentar viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Logo, as temperaturas foram 185 °C para usinagem e 173 °C para compactação. As temperaturas encontram-se nos limites apresentados por Domingos et al (2012) em seu artigo, que demonstra a eficácia do uso desse método, que convencionalmente é utilizado para determinação de temperaturas em ligantes puro, em ligantes modificados.

Os corpos de prova foram compactados em cinco teores de ligante distintos, observando o intervalo estabelecido pela DNIT-ES 386 (1999) de 4% a 6%. A princípio, os teores foram determinados acrescentando ao limite inferior (4%) + 0,5%. Entretanto, nas primeiras misturas verificou-se que para teores acima de 5,0% a quantidade de ligante apresentava-se elevada, gerando grandes perdas do ligante no recipiente de mistura. Para evitar possíveis problemas como exsudação do ligante foi decidido excluir o maior teor e acrescentar um teor -0,5% ao limite inferior da norma, obtendo-se a seguinte configuração: 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%.

A fim de determinar o teor de projeto de ligante asfáltico, por meios dos ensaios de volume de vazios, determinação da perda de massa por abrasão cântabro e resistência à tração indireta por compressão diametral foram compactados três corpos de prova para cada um dos teores. A compactação foi feita no CGS, configurado para realizar 50 giros, com pressão aproximada de 600 kPa e ângulo de $1,25^\circ \pm 0,02^\circ$, segundo a ASTM D7064 (2021).

Caracterização Mecânica E Hidráulica Da Mistura CPA

Nesta pesquisa, os ensaios mecânicos e hidráulicos, apresentados na Tabela 3, permitiram analisar o comportamento das misturas asfálticas, mediante a dosagem realizada com base nos parâmetros determinados na especificação DNIT-ES 386 (1999) e a compactação com uso do CGS. Para que fosse possível a análise, os corpos de prova foram sujeitos aos ensaios de caracterização, estabelecidos pela norma americana que regulamenta misturas abertas do tipo CPA, ASTM D7064 (2021).



O ensaio de caracterização hidráulica permitiu que se verificasse a capacidade da mistura de manter sua característica funcional, sendo dosada pelos parâmetros da DNIT-ES 386 (1999) e compactada pelo CGS.

Tabela 3. Ensaios e normas utilizadas para caracterização mecânica e hidráulica das misturas.

Ensaios	Normas
Resistência à tração indireta por compressão diametral	DNIT ME 136/18
Módulo de resiliência	NBR 16018/11
Determinação do dano por umidade induzida	DNIT 180/18
Determinação da perda de massa por abrasão - Cântabro	DNIT 383/99
Escorrimento do ligante	ASTM D6390/21
Volume de vazios	DNIT 117/94 e 427/20
Vazios comunicantes	-

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinação do teor de projeto de ligante, foram dosadas e compactados no CGS misturas em cinco teores distintos, 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5%, a fim de analisar dentre os resultados de volume de vazios, cântabro e RT, a mistura que apresentou melhor desempenho com relação aos limites estabelecidos pela DNIT-ES 386/99. Em seguida, após definição do teor de ligante de projeto, realizou-se a caracterização mecânica e hidráulica da mistura CPA com o teor de projeto.

Determinação Do Volume De Vazios

Com base nos valores de densidade aparente e da densidade máxima das misturas, obtidos pelos métodos estabelecidos na especificação de serviço DNIT 117/94 no ensaio Rice, respectivamente, tornou-se possível calcular por meio da equação 1, o volume de vazios das misturas para cada teor de ligante e assim traçar o gráfico (Figura 3) volume de vazios *versus* teor de ligantes para a determinação de quais misturas apresentavam-se dentro dos limites estabelecidos pela norma brasileira DNIT-ES 386 (1999).

$$V_v(\%) = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \quad (1)$$

Onde: V_v : índice de vazios (%); G_{mb} : densidade aparente da mistura compactada; G_{mm} : densidade máxima medida da mistura.

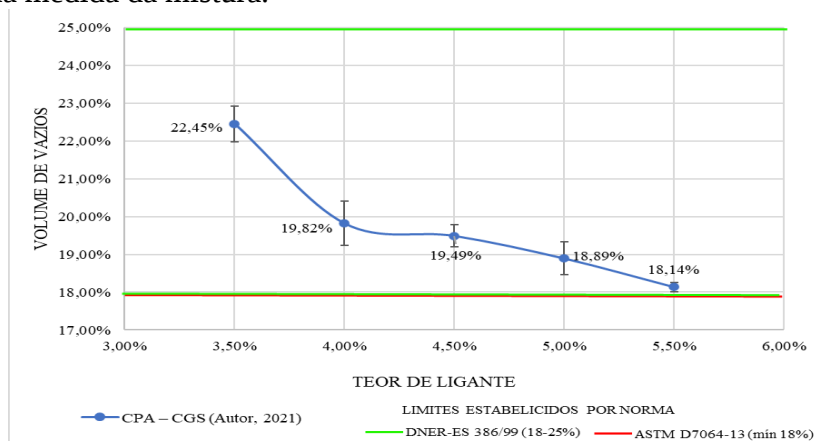




Figura 3. Gráfico de volume de vazios *versus* teor de ligante.

Como pode-se perceber pelo gráfico da Figura 3, todas as misturas CPA compactadas pelo CGS encontraram-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ES 386/99 (18-25%) e ASTM D7064-21 (>18%), entre elas os teores de 3,5%, 4,0% e 4,5% apresentaram-se melhor distribuídos dentro dos limites. Para o teor de 4,5% o autor Schneider (2016) apresentou um volume de vazios de 19,78% próximo ao desta pesquisa.

Segundo West e Morre (2006) quando comparadas à compactação CGS, amostras compactadas pelo método Marshall apresentam maior variabilidade nos resultados. Para misturas porosas tipo CPA, compactadas por impacto, espera-se que os volumes de vazios sejam ligeiramente menores aos encontrados para misturas com mesma composição granulométrica e mesmo teor de ligante compactadas por amassamento, devido a eventuais fraturas do esqueleto granular da mistura. Essa tendência ocorre por se tratar de uma mistura que apresenta um maior contato agregado-agregado. Na compactação por amassamento esses agregados são acomodados evitando essas fraturas que são mais comuns devido aos impactos da compactação Marshall. Garcia (2017) ressalta ainda que para misturas drenantes compactadas no CGS o volume de vazios tende a estabilizar-se após 100 giros.

Determinação Do Desgaste Por Abrasão - Cântabro

Os resultados do ensaio de desgaste cântabro para todos os teores estão apresentados no Figura 4.

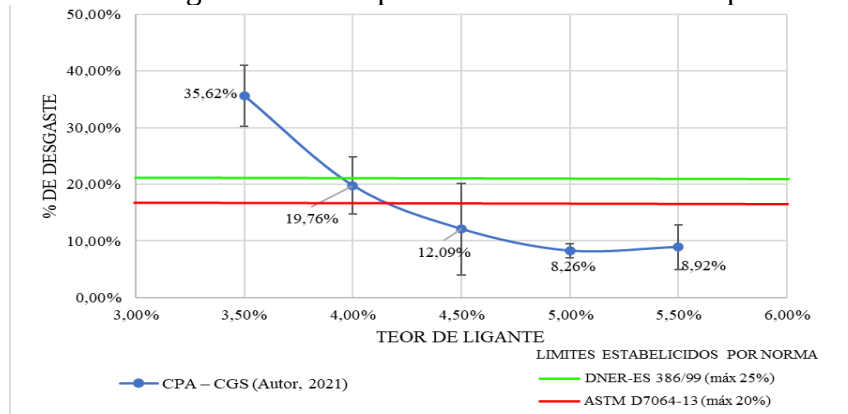


Figura 4. Gráfico % de desgaste versus teor de ligante.

Segundo a especificação 386 de 1999 do DNIT, o limite máximo de desgaste pelo ensaio de cântabro para uma mistura CPA é de 25%, enquanto que para a norma americana o limite aceitável é de 20%. Como pode-se perceber na análise da Figura 3, apenas as misturas com teores inferiores a 3,5% ultrapassaram esses limites, e a mistura com menor porcentagem de desgaste foi a com teor de 5,0% de ligante.

Os resultados obtidos apresentam uma tendência à linearidade, mostrando que quanto maior o teor de ligante, menor tende a ser o desgaste da mistura, fato relacionado à propriedade ressaltada por Bernucci *et al.* (2022) do ligante de ser um adesivo termoviscoplastico. Por tanto, quanto maior o teor de ligante maior adesão terá a mistura e mais resistirá ao desgaste. Meurer Filho (2001) concluiu que para uma determinada granulometria, o teor de ligante asfáltico influi no comportamento das misturas drenantes. O autor comprovou em suas análises que para teores de



ligante crescentes as perdas no ensaio Cântabro são decrescentes, comportamento comprovado no ensaio realizado nesta pesquisa.

Resistência À Tração Indireta Por Compressão Diametral

O gráfico apresentado na Figura 5 apresenta as resistências obtidas por meio do ensaio resistência à tração indireta por compressão diametral.

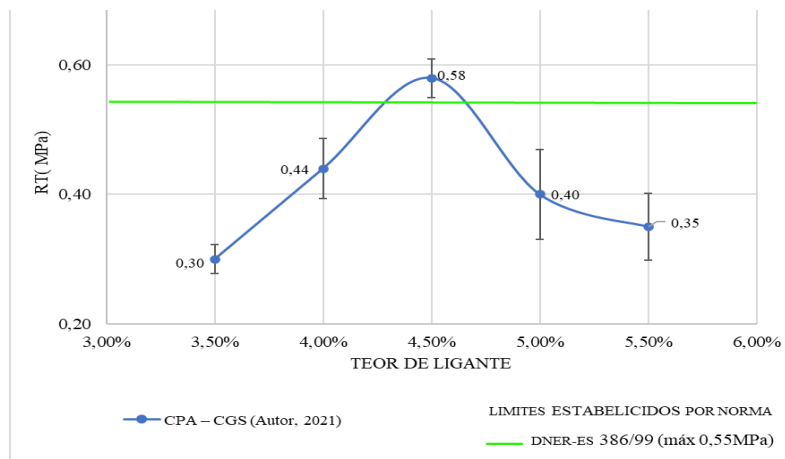


Figura 5. Gráfico da resistência a tração versus teor de ligante.

Para análise de qual mistura atendeu aos parâmetros estabelecidos para mistura do tipo CPA, quanto à resistência a compressão, foi levado em consideração o limite estabelecido na DNIT-ES 386 (1999), tendo em vista que a norma americana não apresenta análises ou limites quanto a resistência à tração indireta por compressão diametral. Como demonstrado na Figura 4, das misturas compactadas com CGS, apenas a mistura com 4,5% de ligante em sua composição atendeu a condição mínima exigida por norma que é 0,55 MPa.

Os resultados encontrados pelo autor Schneider (2016), que aplicou uma compactação Marshall para uma camada porosa de atrito, demonstram valores bem superiores para o ensaio de RT, acima de 0,78 MPa, aos apresentados por esta pesquisa que utilizou o compactador CGS. Entretanto outros fatores além do método de compactação podem estar diretamente relacionados a essa diferença, entre eles a idade dos corpos de prova que se apresentariam mais rígidos ao rompimento, com o passar dos dias e as características dos materiais utilizados para dosagem, principalmente os agregados.

Teor De Projeto De Ligante

Com base nos resultados obtidos pelos ensaios anteriormente descritos, determinou-se que para essa pesquisa seriam utilizadas misturas com teor de 4,5% de ligante, tendo em vista que esse teor apresentou resultados dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana. O teor de 4,5% de ligante foi o mesmo teor determinado por Schneider (2016) em sua pesquisa de dosagem de uma camada CPA seguindo a metodologia convencional brasileira de compactação.

Caracterização Da Mistura Com Teor De Projeto De Ligante



A partir da determinação do teor de projeto de 4,5% de ligante, foram compactados no CGS os corpos de prova para realização da caracterização da mistura, por meio dos ensaios estabelecidos pela norma americana de misturas abertas, como a CPA, ASTM D7064 (2021). A caracterização buscou verificar se o teor escolhido por meio dos parâmetros brasileiros atende também a norma americana que faz uso na compactação CGS. Os resultados apresentados foram obtidos pela média de valores de três corpos de prova para os ensaios de volume de vazios, cântabro, resistência a tração a compressão diametral, escorrimento, módulo de resiliência, Lottman e vazios comunicantes estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultado dos ensaios de caracterização da mistura.

Ensaio	Limites DNIT-ES 386/99	Limites ASTM D7064-21	CPA (4,5% De Ligante)
Volume de vazios (%)	18-25	18 (mín)	19,49
Desgaste por abrasão (%)	25 (máx)	20 (máx)	12,09
Resistencia à tração (MPa)	0,55 (mín)	-	0,58
Escorrimento (%)	0,3 (máx)	0,3 (máx)	0,16
Módulo de resiliência (MPa)	-	-	3071,5
Lottman (%)	80 (mín)	80 (mín)	82,14
Vazios comunicantes (%)	-	-	12,6

Como pode-se observar na Tabela 5, todos os resultados dos ensaios de caracterização da mistura com teor de 4,5% estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas, tanto brasileira (DNIT-ES 386, 1999), como americana (ASTM D7064, 2021).

Para o ensaio de volume de vazios, a mistura com teor de projeto de ligante apresentou uma porcentagem satisfatória de 19,49%, estando próximo a média do intervalo determinado pela DNIT-ES 386 (1999), garantindo a capacidade drenante do pavimento. O resultado determinado nesta pesquisa também é próximo ao encontrado na literatura, em Schneider (2016) que dosou a CPA pela metodologia convencional de compactação, o volume de vazios encontrado foi de 19,78% para a mistura com 4,5% de ligante.

No ensaio de desgaste por abrasão – cântabro, o resultado de 12,09% está dentro dos limites de 25% e 20% estabelecido pela especificação de serviço brasileira DNIT-ES 386/99 e americana ASTM D7064-21, respectivamente. Esse valor de desgaste mostra que a mistura CPA com um teor de ligante de 4,5% será resistente ao desgaste por abrasão causado pela fricção gerada entre pneu/pavimento.

O resultado obtido no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de 0,58 MPa, apresentou-se dentro do limite mínimo aceitável para misturas do tipo CPA, de 0,55 MPa estabelecido pela DNIT-ES 386/99. No entanto, apesar de não ter função estrutural, que demandaria do revestimento valores de RT elevados, o resultado foi muito próximo desse limite, o uso do ligante 55/75-E pode ser um dos motivos de valores de RT não tão satisfatórios.

Schneider (2016), que apresenta no geral uma proposta de dosagem muito próxima a desta pesquisa, mas com compactação por impacto, obteve um resultado de 0,78MPa, para uma mistura com o mesmo teor de ligante (4,5%) e uma composição granulométrica similar. Em contrapartida a esta variação, pode-se relacionar além da compactação por CGS, a questão do tempo de descanso da mistura para realização do rompimento, o esqueleto mineral dos agregados e até mesmo a qualidade do ligante utilizado em ambas as pesquisas, mesmo ambas utilizando o Asfalto borracha. Porto (1999) define que para aplicação de pavimentos drenantes, como o CPA, recomenda-se que os ligantes asfálticos sejam modificados por polímeros, pois além de apresentarem melhor



adesividade, envolvem os agregados com filme de maior espessura, conferindo à mistura maior coesão, reduzindo problemas como a perda por escoamento, justificando o uso do Asfalto borracha nessa pesquisa.

O ensaio de escoamento da mistura comprovou a afirmativa de Porto (1999) ao apresentar uma média de 0,16% para as duas amostras ensaiadas, estando bem abaixo do limite estabelecido pela ASTM D6390 (2021) de 0,3%. Desta forma, pode-se constatar que a mistura se apresenta estável quando mantida a temperaturas elevadas, sendo essas temperaturas comparáveis com aquelas usadas durante a produção, estocagem, transporte e espalhamento. Isso garante que durante todo esse processo a massa de ligante não terá um alto desprendimento dos agregados, ou seja, as características esperadas em projeto serão conservadas.

Bernucci *et al.* (2022) citam que misturas asfálticas a 25°C, temperatura de realização do ensaio de módulo de resiliência, costumam apresentar valores típicos de módulo de resiliência (MR) entre 2.000 a 8.000 MPa. Em específico nada foi encontrado sobre módulo de resiliência para misturas do tipo CPA, então considerando a abordagem de Bernucci *et al.* (2022), pode-se afirmar que a mistura estudada nesta pesquisa apresentou valores esperados para esse ensaio. Para o teor de ligante de 4,5% escolhido nessa pesquisa o valor de MR de 3071,5 MPa foi próximo ao resultado determinado em ensaio por Schneider (2016), de 3415,83MPa para o mesmo teor em uma mistura tipo CPA.

Para o ensaio de dano por umidade induzida – Lottman, a mistura asfáltica com teor de ligante de 4,5% apresentou uma porcentagem de resistência retida à tração de 82,14%, enquadrando-se no limite mínimo de 80%, estabelecido pela AASHTO T 283 (1989). Este limite foi adotado para comparação tendo em vista que a norma brasileira DNIT 180 (2018) não apresenta limite mínimo, mas tem o procedimento de ensaio similar a norma americana.

No entanto, durante o procedimento de ensaio, o grau de saturação mínimo de 55%, estabelecido pela especificação brasileira não foi atingido, por se tratar de uma camada drenante. Lu; Lou e Harvey (2011) sugerem que esta metodologia de ensaio não é adequada para misturas asfálticas porosas, para os autores a redução da resistência após o condicionamento, pode estar relacionada ao enfraquecimento do ligante e/ou alteração no esqueleto mineral da mistura devido ao ciclo de congelamento e descongelamento em que são submetidas, visto que as misturas por eles estudadas não apresentaram nenhuma sensibilidade aos efeitos deletérios da água, que causam a perda de adesão entre o ligante asfáltico e os agregados.

Por fim, o ensaio de vazios comunicantes mostrou que a mistura apresenta uma porcentagem de 12,6% de vazios que se interconectam, essa porcentagem é responsável pela percolação de água no interior da camada de atrito porosa, assegurando a capacidade drenante do pavimento, característica típica da CPA.

Por meio da quantificação dos vazios comunicantes da mistura com 4,5% de ligante foi possível também verificar a porcentagem de vazios ineficazes da mistura, resultado da diferença entre o volume de vazios e os vazios comunicantes. Para essa pesquisa a porcentagem de vazios ineficazes é de 6,89%, esses vazios são responsáveis pelo armazenamento de água no interior CPA.

CONCLUSÕES

A realização deste estudo objetivou analisar a viabilidade do uso do compactador giratório SUPERPAVE[®] (CGS) na dosagem das camadas porosas de atrito (CPA). Para alcançar este objetivo foram observados e analisados os resultados quanto aos parâmetros volumétricos, hidráulicos e mecânicos da CPA. Assim, este estudo permitiu apontar as seguintes conclusões:



- A porcentagem de volume de vazios para amostras compactadas por CGS apresentam valores satisfatórios e dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana, preservando a característica drenante da CPA.
- As misturas compactadas pelo CGS apresentaram uniformidade e coesão da mistura, apresentando-se pouco susceptíveis ao desgaste por abrasão.
- Quanto a resistência à tração por compressão diametral, mesmo não sendo uma camada com função estrutural, a mistura compactada pelo CGS apresentou resultado superior ao limite estabelecido pela norma brasileira.
- O índice de escoamento, módulo de resiliência e resistência ao dano deletério da água estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana, viabilizando o uso da CPA.
- O ensaio de vazios comunicantes comprovou que a compactação CGS preservou a característica drenante da CPA, onde a maioria dos vazios presentes na mistura são interconectados permitindo a percolação de água no interior da CPA.

Portanto, com base nas considerações feitas, pode-se concluir que a aplicação da compactação SUPERPAVE em uma mistura CPA dosada a partir dos parâmetros brasileiros não acarretou prejuízos às características volumétricas, mecânicas e hidráulicas da mistura.

Ao constatar a viabilidade de se realizar a compactação por amassamento em camadas porosas de atrito, garante-se aos estudos acadêmicos uma compactação mais próxima à realizada em campo, corroborando para mais um passo na evolução da utilização de mistura do tipo CPA no Brasil.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALECRIM, C. M. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; PEIXOTO, N. G. M.; ALVES, A.; PINHEIRO, G. M. Avaliação do desempenho acústico e das características de superfície de camada porosa de atrito em meio urbano. Revista Transportes, Rio de Janeiro, 2022.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T283: Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage. Anexo de normas traduzidas – Rede Temática de Ligante asfáltico – PETROBRÁS, 1989.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test), EUA, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard practice for open-graded friction course (OGFC): D7064. West Conshohocken, PA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for determination of draindown characteristics: D6390. West Conshohocken, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16018: Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida. São Paulo, 2011.

BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRÁS Asfaltos e ABEDA (Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Rio de Janeiro, RJ; Brasil, 2022.

CERATTI, J. A. P., BERNUCCI, L. B., SOARES, J. B. (2015) Guia Técnico - Utilização de Ligantes em Serviço de Pavimentação. 1a ed. (ABEDA). 166p. Rio de Janeiro, RJ. Brasil.



CHU, L.; FWA, T.F. Functional sustainability of single- and double-layer porous asphalt pavements. *Constr. Build. Mater.* 197, 436–443, 2019.

DEL CARPIO, J. A. V. Uso de Pigmentos de Óxidos de Metais Mistos na Pavimentação para a Mitigação da Ilha de Calor Urbana. 437 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pósgraduação em Engenharia Civil – Ppgec da Universidade Federal de Santa Catarina., Universidade Federal de Santa Catarina., Florianópolis, 2014

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT - ME 386/99. Pavimentação: pré-misturado a quente com asfalto polímero: camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999.

_____. DNIT 054/97: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNIT 083/98: Agregados: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNIT 383/99: Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro. Rio de Janeiro, 1999.

_____. DNIT 136: Pavimentação asfáltica – misturas asfálticas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2018.

_____. DNIT – ME 035/1998. Agregados – Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNIT– ME 131/2010 – Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - método do anel e bola. Rio de Janeiro. 2010a.

_____. DNIT – ME 155/2010 – Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2010d.

_____. DNIT 413/19 – Pavimentação - Misturas asfálticas – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado graúdo para misturas asfálticas –Método de ensaio. Brasília, 2019.

_____. DNIT 411/19 – Pavimentação - Misturas asfálticas – Pavimentação – Massa específica, densidade relativa e absorção de agregado miúdo para misturas asfálticas – Método de ensaio. Brasília, 2021.

DOMINGOS, M. D. I.; PAMPLONA, T. F.; FAXINA, A. L.; GIGANTE, A. C. (2012). Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho. *TRANSPORTES*, 20(2). <https://doi.org/10.4237/transportes.v20i2.560>

KNABBEN, R.M. Desenvolvimento Do Trailer-Cpx e de uma Mistura Asfáltica de Baixa Emissão de Ruído Pneu-Pavimento. Tese de Doutorado. Universidade Federal De Santa Catarina – UFSC Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil – PPGEC. Florianópolis, 2017.

LU, Q.; LUO, S.; HARVEY, J. Compaction of Noise-Reducing Asphalt Mixes in the Laboratory. *Road Pavement And Material Characterization, Modeling, And Maintenance*, [s.l.], p.1-9, 2011. American Society of Civil Engineers.

MEURER FILHO, E. Estudos de granulometria para concretos asfálticos drenantes. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC: UFSC, 2001.

RIVERA, C.; CARO, S.; ARÁMBULA-MERCADO, E.; SÁNCHEZ, D. B. e KARKI, P. Evaluation of the use of a HiMA binder to extend the durability of porous friction courses (PFC). *International Journal of Pavement Engineering*, 2022.

SCHNEIDER, Daniel. Determinação Do Teor De Asfalto Para Enquadramento De Uma Mistura Asfáltica Aberta Como Camada Porosa De Atrito. 2016. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2016.

WANG, Z; LI, X. Mechanical Properties and Flame Retardancy of Rigid Polyurethane Foams Containing SiO₂ Nanospheres/Graphene Oxide Hybrid and Dimethyl Methylphosphonate. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 57 (9), 884–892, 2018.

WEST R.C.; MOORE J.R. Evaluating Georgia’s compaction requirements for Stone Matrix Asphalt Mixtures. Final Report. The Georgia Department of Transportation – DOT. Georgia, 2006.