



## ***ANÁLISE DE PROTOCOLOS DE ENVELHECIMENTO PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS POROSAS DE ATRITO***

**Flávia Medeiros Melo<sup>1</sup>, Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

Os alagamentos nas grandes cidades, os acidentes rodoviários e o excesso de ruído nas áreas urbanas têm como uma de suas causas, a pavimentação. Entretanto, com o objetivo de mitigar os efeitos da chuva e de proporcionar um maior conforto e segurança ao usuário, é utilizada como solução a aplicação do revestimento denominado de camada porosa de atrito (CPA). Essa pesquisa teve como objetivo analisar o comportamento de diferentes protocolos, para que seja identificado o que melhor simule o envelhecimento em camadas porosas de atrito, com base no comportamento funcional e mecânico destas. A análise foi realizada por meio de ensaios laboratoriais e utilizou-se a combinação de dois importantes parâmetros que são a umidade e a temperatura. Sendo assim, foi definido a melhor metodologia e parâmetros para aplicação do protocolo que combine os efeitos desses parâmetros, além de compará-lo com o protocolo padrão da AASHTO R-30, que é embasada somente na variável temperatura. Foi possível concluir que há uma grande necessidade de uma abordagem criteriosa na escolha dos protocolos de envelhecimento, para que seja garantido o melhor desempenho das misturas asfálticas em condições reais de serviço, especialmente em ambientes com variações significativas de umidade e temperatura.

**Palavras-chave:** Camada porosa de atrito, Envelhecimento, Misturas asfálticas, AASHTO R-30.

---

<sup>1</sup>Aluna de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, UFCG, Campina Grande, PB, e-mail: flavia.medeiros@estudante.ufcg.edu.br.

# ***ANÁLISE DE PROTOCOLOS DE ENVELHECIMENTO PARA APLICAÇÃO EM CAMADAS POROSAS DE ATRITO***

## **ABSTRACT**

One of the causes of flooding in large cities, road accidents and excessive noise in urban areas is paving. However, in order to mitigate the effects of rain and provide greater comfort and safety to the user, the application of a coating called porous friction layer (CPA) is used as a solution. This research aimed to analyze the behavior of different protocols, so that the one that best simulates aging in porous friction layers can be identified, based on their functional and mechanical behavior. The analysis was carried out through laboratory tests and used the combination of two important periods, humidity and temperature. Therefore, the best methodology and parameters were defined for applying the protocol that combines the effects of these parameters, in addition to comparing it with the AASHTO R-30 standard protocol, which is based only on variable temperature. It was possible to conclude that there is a great need for a judicious approach when choosing aging protocols, to ensure the best performance of asphalt mixtures in real service conditions, especially in environments with variations in humidity and temperature.

**Keywords:** Porous friction layer, Aging, Asphalt mixtures, AASHTO R-30.

## 1. INTRODUÇÃO

Por ter o clima tropical como predominante no país, o Brasil possui um alto índice pluviométrico registrado em um intervalo de tempo pequeno, além de chuvas intensas que provocam consequências em diversos âmbitos, um deles, o aumento do risco de acidentes causado pela diminuição da aderência do pneu-pavimento. (SCHNEIDER, et al. 2019).

A redução da aderência ocorre devido ao envelhecimento mais severo de revestimentos com alto teor de vazios em comparação com revestimentos de misturas asfálticas densas, devido à sua maior área superficial (JING, 2019). Esse envelhecimento resulta em um aumento da rigidez da mistura, contração e microrrachaduras, levando ao rompimento da interface da matriz pétreo e à perda dos agregados para a superfície (SCHLANGEN et al., 2017).

A CPA é um revestimento empregado como camada de rolamento com a finalidade funcional de aumentar a aderência pneu-pavimento em dias de chuva, aumentando assim a segurança nas rodovias, além de possibilitar a absorção de ruídos oriundos do tráfego. Apesar das vantagens, a estrutura aberta do CPA causa uma maior exposição aos agentes deteriorantes, o que pode causar a colmatação dos poros, o desprendimento dos agregados, o escoamento do ligante e, uma baixa resistência mecânica. O elevado teor de vazios influencia na piora dessas deteriorações.

Pinto (2011) realizou um monitoramento do desempenho de pavimentos permeáveis e concluiu que houve uma redução da vazão afluente entre 56% e 85% na CPA. Por outro lado, os estudos de Kannaben (2017) e Alves et al. (2018) demonstraram uma boa capacidade de absorção acústica, com uma redução no nível de pressão sonora de mais de 6 decibéis no pavimento com CPA em comparação com o pavimento tradicional avaliado.

Sendo assim, com o intuito de expandir os conhecimentos e a utilização de revestimentos do tipo CPA, para que o desempenho desse revestimento apresente uma melhora significativa com relação aos efeitos da chuva, é necessário entender as consequências dos processos de envelhecimento e desgaste nas propriedades do ligante e do pavimento.

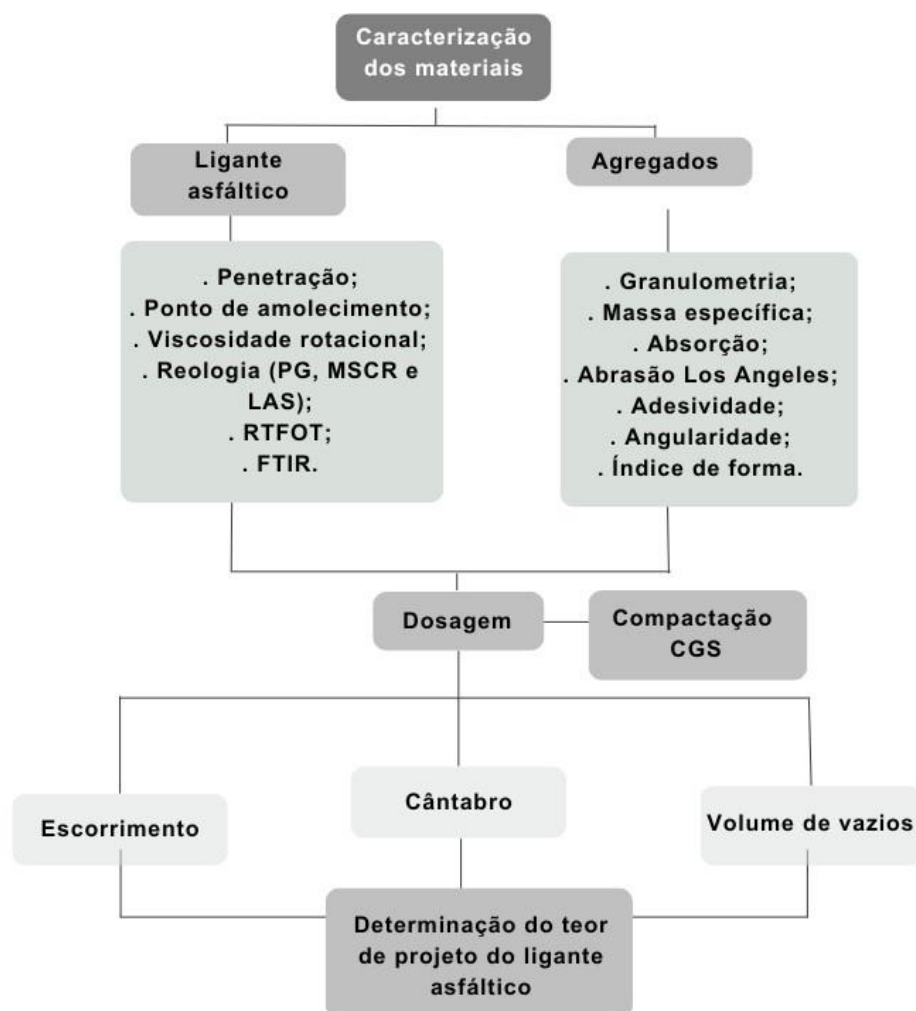
A partir de metodologias que recriaram o envelhecimento em laboratório, essa pesquisa analisou o processo de desagregação que ocorre em consequência do

envelhecimento precoce do ligante asfáltico, observando a influência da temperatura e umidade nesse processo. Os resultados dessa pesquisa comprovam a necessidade de uma abordagem criteriosa na escolha dos protocolos de envelhecimento, com o intuito de garantir o melhor desempenho das misturas asfálticas em condições reais, especialmente em ambientes com variações significativas de umidade e temperatura.

## 2. METODOLOGIA

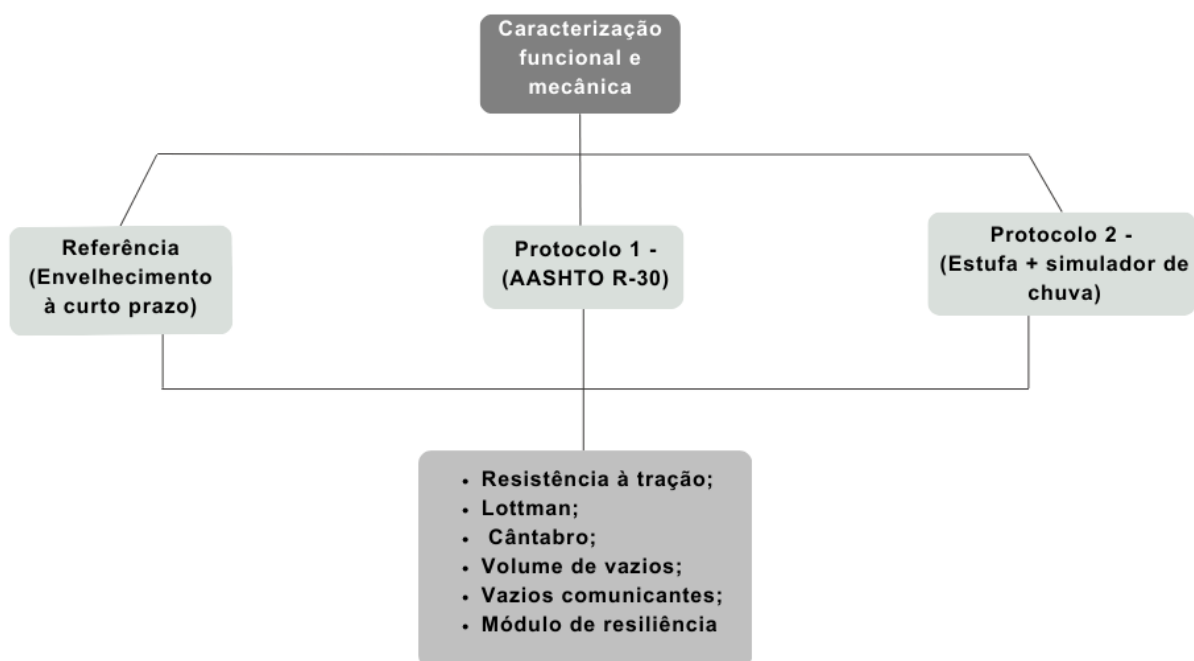
Com a finalidade de atingir os objetivos desta pesquisa, foram desenvolvidas uma sequência de atividades ao longo do trabalho. A primeira etapa da pesquisa consistiu na caracterização física dos agregados e do ligante, dando condições para a realização da dosagem, como esquematizado no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Esquema experimental da 1ª etapa da pesquisa



A dosagem da mistura asfáltica do tipo CPA foi realizada seguindo a especificação americana ASTM D7064, que determina o uso do Gyratory Compactor (CGS). Além disso, foram considerados os parâmetros da norma brasileira DNIT 386/99 para determinar o teor de projeto de ligante. Na terceira etapa, conforme delineado na Figura 2, foram moldados corpos de prova para aplicação posterior das condições de envelhecimento e caracterização funcional e mecânica.

Figura 2 – Etapa de caracterização das misturas



A caracterização funcional e mecânica das misturas asfálticas foi realizada em três condições distintas. A primeira condição foi a mistura de referência, que foi submetida apenas ao envelhecimento a curto prazo. A segunda condição foi a mistura submetida ao protocolo 1, baseado na norma AASHTO R-30. A terceira condição foi a mistura submetida ao protocolo 2, que combinou os efeitos da temperatura (estufa) com a aplicação de um simulador de chuva.

## 2.1. MATERIAIS

### 2.1.1 Ligante asfáltico

A norma DNIT 386/99 prevê o uso de ligante modificado por polímero, logo, o ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa é o AMP 55/75, fornecido pela Instalfe Engenharia, com sede em Maracanaú, Ceará. A escolha desse ligante se deve a sua comum utilização no nordeste brasileiro.

### 2.1.2 Agregados

Os agregados utilizados foram: Brita 19mm, Brita 12,5mm e Pó de Pedra. Eles foram fornecidos pela empresa Rocha Cavalcante, oriundos de pedreira própria com sede em Campina Grande – PB. O filer utilizado nesta pesquisa foi a cal hidratada, proveniente do comércio local. As Figuras 3, 4, 5 e 6 apresentam os agregados utilizados durante a pesquisa.

Figura 3 – Brita 19mm



Figura 4 – Brita 12,5mm



Figura 5 – Pó de pedra



Figura 6 – Cal hidratada



## 2.2. MÉTODOS

### 2.2.1. Caracterização física, reológica e química do ligante

A Tabela 1 a seguir contém todos os ensaios que foram realizados com o intuito de avaliar se o ligante está dentro dos parâmetros necessários para utilização. Os resultados obtidos são essenciais para verificar a viabilidade de seu uso na produção de misturas asfálticas.

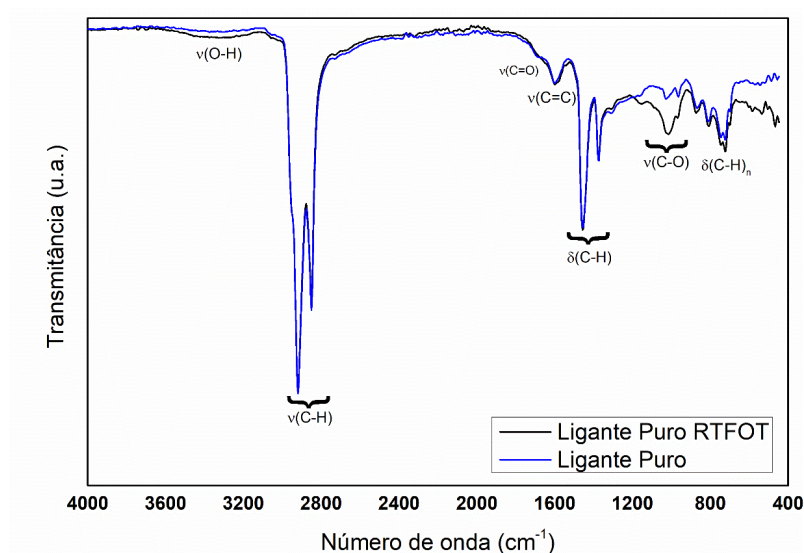
Tabela 1 - Características físicas e reológicas do AMP 55/75 utilizado na pesquisa.

Ensaio	Norma	Limite	Resultado
Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	mín. 55	62,0
Penetração (mm)	ABNT NBR 6576	45-70	60,7
Recuperação Elástica (%)	ABNT NBR 15086	mín. 75	86,5
Viscosidade Rotacional	ABNT NBR 15184		
- Temperatura 135 ° C (cP)		máx. 3000	1073,1
- Temperatura 150 ° C (cP)		máx. 2000	146,4
- Temperatura 177 ° C (cP)		máx. 1000	177
RTFOT	ASTM D 2872		
Perda de Massa (%)		máx. 1,0	0,354
Penetração Retida (%)	ABNT NBR 6576		73,18
Variação do Ponto de Amolecimento (°C)	ABNT NBR 6560	-5 a +7	+ 3
Recuperação Elástica Retida (%)	ABNT NBR 15086	mín. 80	80
PG (°C)	AASHTO M 320	-	76
MSCR $R_{0,1\%}$		-	61,83
$R_{3,2\%}$		-	41,26
$R_{diff}$	ASTM D7405:2020	-	33,27
$Jnr_{0,1\%}(kPA^{-1})$			0,657
$Jnr_{3,2\%}(kPA^{-1})$			1,19
$Jnr_{diff}(\%)$			81,60

### 2.2.1.1 Caracterização química – FTIR

Os espectros obtidos por meio do FTIR para essas amostras estão representados na Figura 7.

Figura 7 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico



Os espectros dos ligantes, antes e após RTFOT, mostraram perfis semelhantes. No ligante pós-RTFOT, foram observados picos indicativos de alta oxidação após o tratamento, como estiramentos de hidroxilas (O-H) e grupos C-O. Os principais sinais da composição do ligante estão em regiões comuns a hidrocarbonetos, com picos intensos para estiramentos em grupos alifáticos saturados e grupos metila ( $\text{-CH}_3$ ), metileno ( $\text{CH}_2$ ), e metila ( $\text{CH}$ ).

Picos de baixa intensidade sugerem a presença de aromáticos substituídos e grupos carbonilas ( $\text{C=O}$ ). Insaturações em anéis são indicadas por picos em torno de 1600  $\text{cm}^{-1}$ , enquanto deformações angulares de grupos metileno e metila são observadas em 1475  $\text{cm}^{-1}$  e 1375  $\text{cm}^{-1}$ , respectivamente. Por fim, a vibração em torno de 723  $\text{cm}^{-1}$  confirma a presença de cadeias saturadas com mais de 4 carbonos no ligante.

### 2.2.2. Caracterização dos agregados

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados estão listados na Tabela 2. Os resultados obtidos são essenciais para verificar a viabilidade do uso



dos agregados na produção de misturas asfálticas, bem como para determinar o teor de projeto de ligante por meio da dosagem.

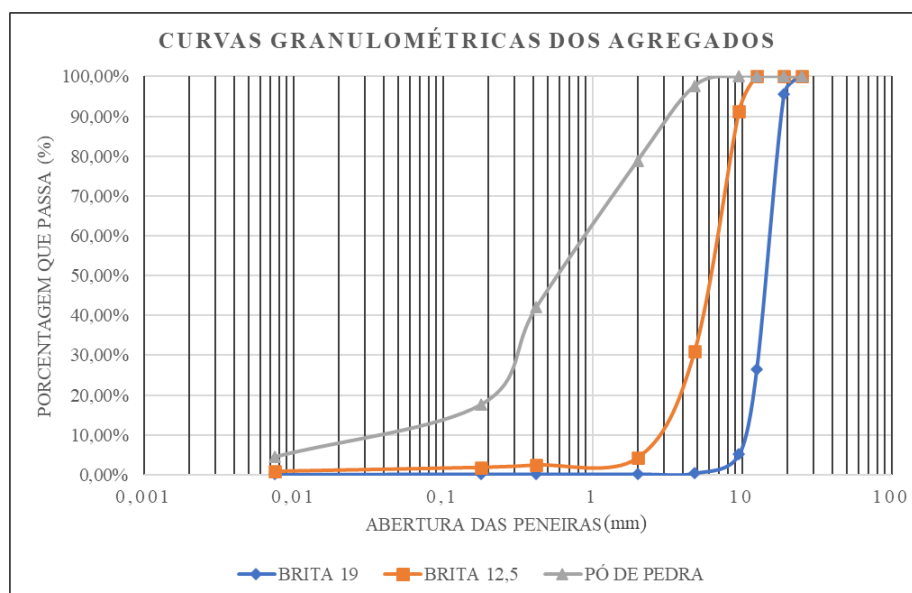
### 2.2.2.1 Granulometria

A Tabela 2 exposta a seguir apresenta os resultados da granulometria da brita 19mm, brita 12mm e do pó de pedra. A Figura 8 apresenta a curva granulométrica dos agregados.

Tabela 2 - Quantidade passante acumulada (%)

PENEIRA	DIÂMETRO (mm)	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA
1"	25,40	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,10	95,5	100,0	100,0
1/2"	12,70	26,5	100,0	100,0
3/8"	9,50	5,1	91,2	100,0
Nº 4	4,80	0,4	31,0	97,6
Nº 10	2,00	0,2	4,3	78,9
Nº 40	0,420	0,2	2,5	42,0
Nº 80	0,180	0,2	1,9	17,7
Nº 200	0,074	0,2	0,9	4,5

Figura 8 – Distribuição granulométrica dos agregados



A partir da análise da curva granulométrica, é possível verificar que a porcentagem que passa do pó de pedra, desde a peneira com menor abertura até a maior, é consideravelmente maior que a dos agregados. Isso se deve a diferença de

graduação existente entre os agregados, diferença essa que define a quantidade de cada um que estará presente na mistura, de forma ajustada a faixa escolhida.

### 2.2.2.2 Caracterização Física dos Agregados Graúdos

A Tabela 3 a seguir contém os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos.

Tabela 3 - Caracterização física dos agregados graúdos

ENSAIOS	LIMITES	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	-	2,779	2,771
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	-	2,765	2,740
Absorção (%)	≤ 2	0,52	0,70
Abrasão Los Angeles (%)	≤ 55	18,97	22,16
Índice de forma	≤ 1	1,02	0,65
Partículas planas e alongadas	-	2,5	1,5

As massas específicas serão essenciais para determinar as densidades máximas da mistura. Através do resultado do índice de absorção, pode-se concluir que os agregados possuem um baixo índice de porosidade, o que torna viável seu uso nas misturas asfálticas. Caso o resultado desse índice fosse alto, não seria recomendado utilizar esses agregados, quanto maior a porosidade maior a quantidade de ligante a ser utilizada.

O ensaio de índice de forma também apresentou resultados satisfatórios para a brita 12,5mm, e para a 19mm excedeu o limite estabelecido em uma porcentagem pouco significativa.

Com relação ao desgaste por abrasão *Los Angeles*, todos os agregados apresentaram um valor abaixo do limite estabelecido por norma, que é de 55%. Sendo assim, através da caracterização realizada foi possível afirmar que os agregados graúdos são considerados adequados para uso em misturas asfálticas.

### 2.2.2.3 Caracterização Física dos Agregados Miúdos

A Tabela 4 apresenta os resultados da caracterização do agregado miúdo utilizado na pesquisa.

Tabela 4 - Caracterização física do agregado miúdo

ENSAIOS	LIMITES	PÓ DE PEDRA
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	-	2,47
Massa Específica Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	-	2,49

<b>Absorção (%)</b>	$\leq 2$	0,70
<b>Equivalente Areia (%)</b>	$\geq 55$	56,38

A determinação das densidades máximas da mistura varia de acordo com o resultado das massas específicas. O pó de pedra, por ter baixa porosidade, apresentou um índice de equivalente areia superior ao mínimo requerido pela norma, que é de 55%. Assim, o pó de pedra selecionado mostrou-se adequado para utilização em misturas asfálticas.

### 2.2.3. Dosagem

Para determinar o teor de projeto de ligante, a dosagem foi realizada analisando os resultados de volume de vazios, cântabro e escorrimento. A norma americana ASTM D7064 recomenda que a compactação seja realizada com 50 giros, entretanto, o desempenho ao utilizar 100 giros permaneceu dentro do limite estabelecido para os volumes de vazios e apresentou uma melhor interação entre os constituintes da mistura, sendo assim, foi decidido utilizar 100 giros na compactação. Os ensaios e as normas correspondentes utilizadas para a dosagem da mistura estão detalhados na Tabela 5.

Para determinar a composição granulométrica da mistura a ser estudada, foi feita uma análise da distribuição dos grãos dos agregados e em seguida foi feito o enquadramento na faixa V, conforme a norma DNIT-ME 386/99. Essa faixa foi escolhida por ser a mais comumente utilizada no Brasil.

Tabela 5 – Ensaios e normas utilizados para a dosagem do CPA

<b>ENSAIOS</b>	<b>MÉTODOS</b>
Volume de vazios	DNIT- ME 427/2020 e 428/2022
Desgaste por abrasão – Cântabro	DNIT-ME 383/1999
Escorrimento	ASTM D6390/2017

#### 2.2.3.1. Composição granulométrica da mistura

As Tabelas 6 e 7 apresentam, respectivamente, as proporções e a curva granulométrica que foi realizada com base nesses dados e a Figura 9 apresenta a curva granulométrica da CPA.

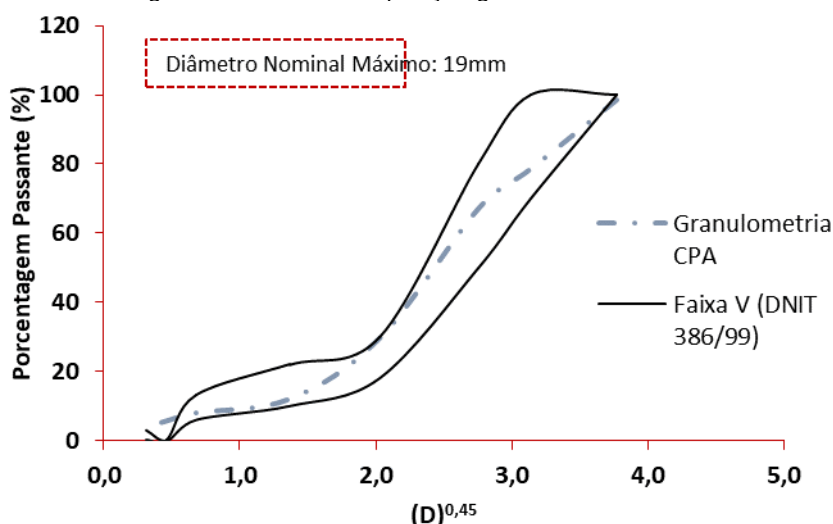
Tabela 6 – Proporção de cada agregado na mistura

PROPORÇÕES DOS AGREGADOS NA MISTURA CPA	BRITA 19mm	BRITA 12,5mm	PÓ DE PEDRA	FILER
	29%	60%	8%	3%

Tabela 7 – Porcentagem passando da mistura de projeto

PENEIRA	ESPECIFICAÇÃO DNIT – FAIXA V		% PASSANTE EM PESO
	% Mín.	% Máx.	
3/4"	100	100	98,69
1/2"	70	100	78,69
3/8"	50	80	67,18
Nº 4	18	30	29,52
Nº 10	10	22	11,94
Nº 40	6	13	7,92
Nº 80	-	-	5,62
Nº 200	3	6	3,82

Figura 9 - Curva da composição granulométrica da CPA.



### 2.2.3.2. Temperaturas de usinagem e compactação

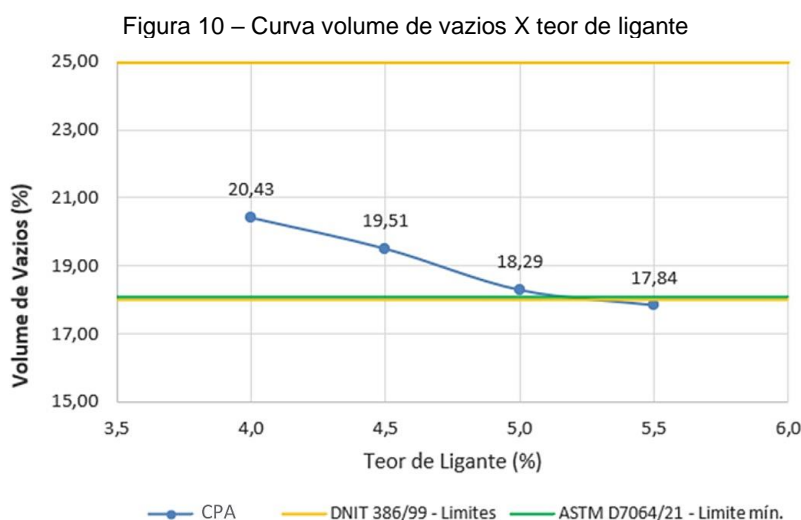
Na dosagem de corpos de prova de Concreto Asfáltico (CPA), a temperatura de usinagem e compactação refere-se à temperatura em que o material asfáltico é aquecido e compactado durante o processo de produção. A temperatura de usinagem é a temperatura em que o agregado mineral é aquecido antes de ser misturado com o ligante asfáltico, enquanto a temperatura de compactação é a temperatura do CPA quando ele é compactado para formar o corpo de prova.

Ambas as temperaturas são cruciais, pois afetam diretamente as propriedades do CPA, como sua fluidez, capacidade de compactação e densidade final.

A norma DNIT-ME 385/99 informa que a temperatura de usinagem deve ser de 150°C, e para cada 1% de polímero existente no ligante, essa temperatura deve ser acrescida de 3°C. Com a temperatura de compactação da mesma forma, deve ser de 140°C, mas a cada 1% de polímero acrescenta-se 3°. Por possuir 3% de polímero SBS, o ligante utilizado nessa pesquisa (AMP 55/75) deve possuir uma temperatura de usinagem de 159°C e de compactação 149°C.

### 2.2.3.3. Volume de vazios

A Figura 10 apresenta uma curva com os resultados dos volumes de vazios para cada teor de ligante utilizado.



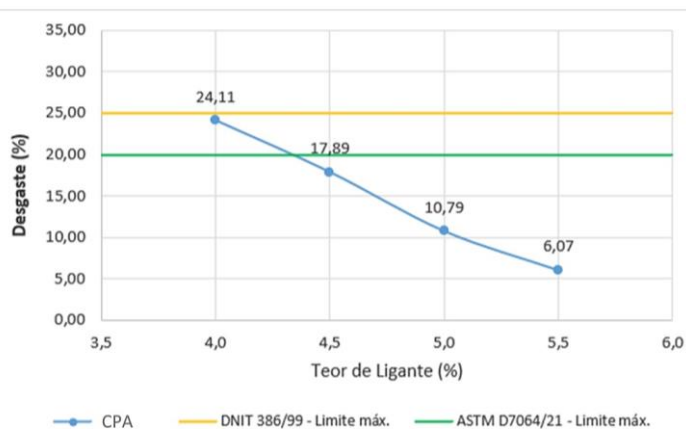
A partir da análise da curva, é possível afirmar que todas as misturas apresentaram volumes de vazios dentro dos limites estabelecidos pelas normas DNIT-ME 386/99 e ASTM D7064-13, com exceção do teor de 5,5%, que apresentou um valor abaixo do limite. Pode-se observar também, que a medida em que o teor de ligante aumenta, o volume de vazios diminui, apresentando uma relação inversamente proporcional.

### 2.2.3.4. Desgaste por abrasão – Cântabro

A porcentagem de desgaste é calculada e os resultados são utilizados para traçar o gráfico apresentado na figura a seguir, juntamente com os teores de projeto.

A Figura 11 apresenta a porcentagem de desgaste para cada teor de ligante utilizado.

Figura 11 - Curva da % de desgaste X teor de ligante.



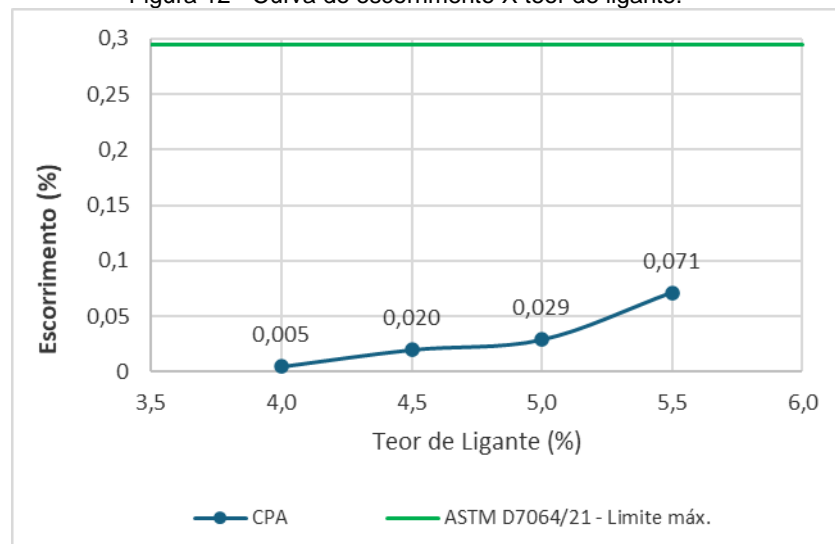
Após a análise da curva, verificou-se que todos os teores apresentaram valores abaixo do limite estabelecido pela norma brasileira, e o teor mais próximo ao limite foi o de 4,0%. Entretanto, com relação ao limite estabelecido pela norma americana, o teor de 4,0% excedeu o valor, e o teor de 4,5% de ligante, apresentou uma porcentagem de desgaste próxima a esse limite.

A partir dos resultados é possível afirmar que há uma linearidade quanto ao teor de ligante e o desgaste da mistura, e uma relação inversamente proporcional, tendo em vista que quanto maior o teor de ligante, menor o desgaste da mistura. O ligante proporciona a mistura uma maior adesão e resistência ao desgaste, porém, se colocado em proporção maior ao teor estabelecido, pode dificultar a compactação e pode levar a problemas de aderência entre as camadas do pavimento, além de causar trincas por fadiga e reduzir a resistência do pavimento.

#### 2.2.3.5. Escorrimento

A Figura 12 apresenta o resultado do ensaio de escorrimento para os teores de ligante utilizados.

Figura 12 - Curva do escoamento X teor de ligante.



Percebe-se que todos os teores apresentaram valores de escoamento inferiores ao limite máximo, que é de 0,3%, estabelecido nas normas, brasileira e americana. Diante dos resultados, é possível afirmar que todos os teores calcularam ficaram inferiores ao valor de referência de 0,3% estabelecido na norma americana.

#### 2.2.3.6 Determinação do teor de projeto

Com base nos resultados dos ensaios de volume de vazios, desgaste por abrasão e escoamento, foi determinado o teor de projeto de ligante, e ao analisar os resultados da mistura compactada, observou-se que, para todos os ensaios, o teor de 4,5% foi o que apresentou os valores que melhor satisfazem os limites estabelecidos pelas normas brasileira e americana.

É importante ressaltar que o objetivo da dosagem é encontrar o menor teor de ligante que atenda aos requisitos de qualidade da mistura asfáltica, tornando-a menos dispendiosa.

### 2.2.4 Protocolos de envelhecimento

#### 2.2.4.1 Referência – Envelhecimento à curto prazo

A mistura de referência será utilizada como base para avaliar o efeito dos dois protocolos de envelhecimento estudados nesta pesquisa. Essa mistura irá seguir a metodologia Superpave, que recomenda um envelhecimento de duas horas em estufa, com a mesma temperatura utilizada para a compactação da mistura. Esse tipo de envelhecimento, conhecido como de curto prazo, tem como objetivo simular o processo que ocorre durante a fase de usinagem da mistura asfáltica.

#### **2.2.4.2 Protocolo 1 – AASHTO R-30 (Temperatura)**

O protocolo padrão AASHTO R-30, desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa de Rodovias Estratégicas (SHRP), envolve a aplicação de um envelhecimento de curto prazo, seguido de um envelhecimento prolongado. O envelhecimento inicial será realizado na mistura solta por 4 horas a 135°C. Posteriormente, essa mistura vai ser compactada e mantida em estufa por 5 dias a 85°C. A Figura 13 apresenta a estufa utilizada.

Figura 13 – Estufa utilizada (Bloco CT)



#### **2.2.4.3 Protocolo 2 – Efeito combinado (Temperatura + umidade)**

A CPA possui um volume de vazios maior em comparação com as misturas densas, o que a torna mais suscetível aos efeitos negativos da água. Como a metodologia comumente usada para simular o envelhecimento das misturas asfálticas, a AASHTO R-30, considera apenas o efeito da temperatura, este protocolo não aborda a variável umidade.

Portanto, para analisar a influência da umidade, as amostras serão envelhecidas na estufa para simular o efeito da temperatura, e logo após submetidas à simulação de ciclos de chuva em laboratório. A etapa do envelhecimento na estufa será realizada com base na metodologia recomendada pela ASTM D7064/2021, cujo processo consiste em manter os corpos de prova na estufa à 60°C, por sete dias. A Figura 14 apresenta o simulador de chuva utilizado.



Figura 14 – Simulador de ciclos de chuva (Bloco CR)



#### 2.2.4.4 Caracterização funcional e mecânica

Os ensaios listados na Tabela 7 serão conduzidos para analisar o comportamento funcional e mecânico das misturas asfálticas do tipo CPA, submetidas aos protocolos de envelhecimento 1 e 2, e compará-las com a mistura de referência, que será submetida apenas ao envelhecimento a curto prazo.

Tabela 7 - Ensaios e normas utilizadas para caracterização, funcional e mecânica, das misturas.

Ensaio	Método
Vazios comunicantes	AFNOR -NF-P98-254-2/1993
Volume de vazios	DNIT-ME 427/2020 e 428/2022
Módulo de resiliência	DNIT-ME 135 /2018
Resistência à tração indireta por compressão diametral	DNIT-ME 136/2018
Determinação do dano por umidade induzida - Lottman	DNIT-ME 180/2018
Desgaste por abrasão - Cântabro	DNIT-ME 383/1999

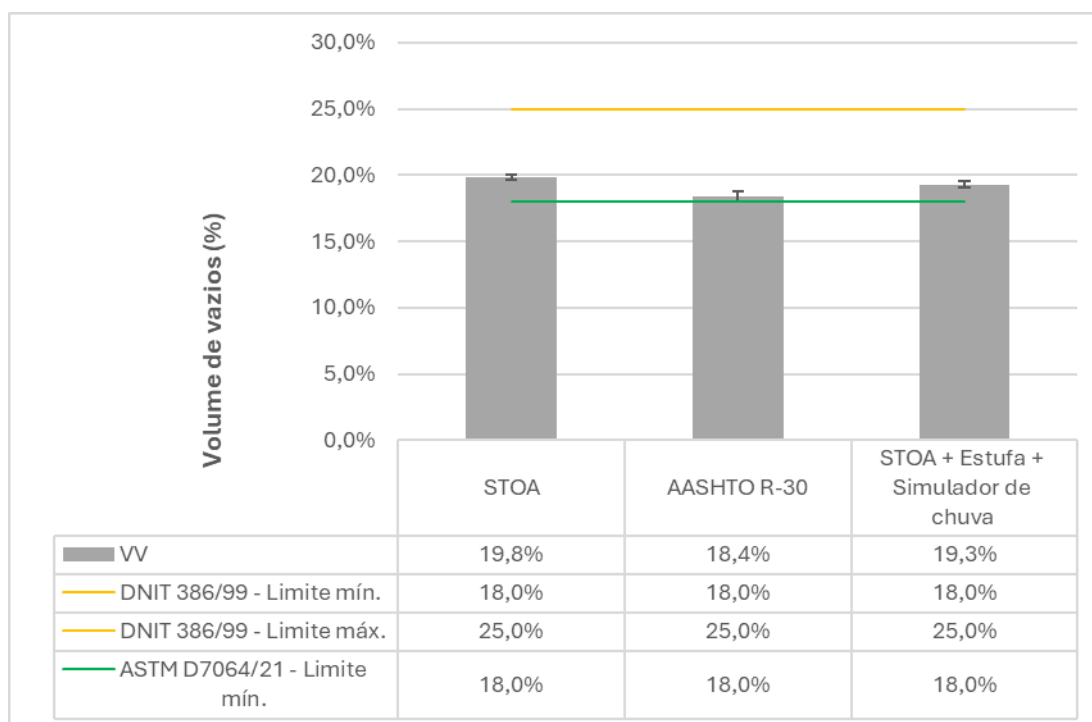
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.2 Comparação entre os protocolos de envelhecimento

##### 3.2.2 Volume de vazios

Os resultados da avaliação volumétrica das misturas submetidas aos diferentes protocolos de envelhecimento estão ilustrados na Figura 15.

Figura 15 – Volumes de vazios das misturas envelhecidas



Observa-se que todas as misturas apresentaram volumes de vazios próximos do limite mínimo de 18%, conforme estipulado pelas normas ASTM D7064/21 e DNIT 386/99. Esse resultado é atribuído principalmente ao número de ciclos de compactação empregados neste estudo, que foi de 100, contrastando com os 50 ciclos recomendados pela norma americana.

Para determinar a significância da variação do volume de vazios, em decorrência da aplicação dos protocolos de envelhecimento, foi realizada a análise de variância dos resultados do ensaio. Essa análise foi conduzida utilizando um coeficiente de determinação de 5% e, o resultado é apresentado na Tabela .

Tabela 8 – ANOVA dos VVs das misturas envelhecidas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Protocolos</b>	0,000264215	2	0,0001321	33,60671	0,00055	5,1432528
<b>Dentro dos grupos</b>	2,35859E-05	6	3,931E-06			
<b>Total</b>	0,000287801	8				

De acordo com a análise estatística, verificou-se que existe uma diferença significativa no volume de vazios das misturas submetidas aos diferentes protocolos de envelhecimento. Esta constatação é baseada no valor calculado de F, que foi de 33,60 e, que supera o valor de F crítico de 5,14. Como resultado, a hipótese inicial é

rejeitada, indicando que os protocolos propiciaram diferenças significativas nos valores de VV.

Devido à identificação de diferenças significativas nos resultados de volume de vazios entre as misturas, foi conduzido o teste de Tukey para identificar quais misturas distinguem entre si. Na Tabela , é possível verificar entre quais protocolos existem distinção expressiva nos volumes de vazios das misturas.

Tabela 9 – Resultado das comparações múltiplas entre os VVs das misturas envelhecidas

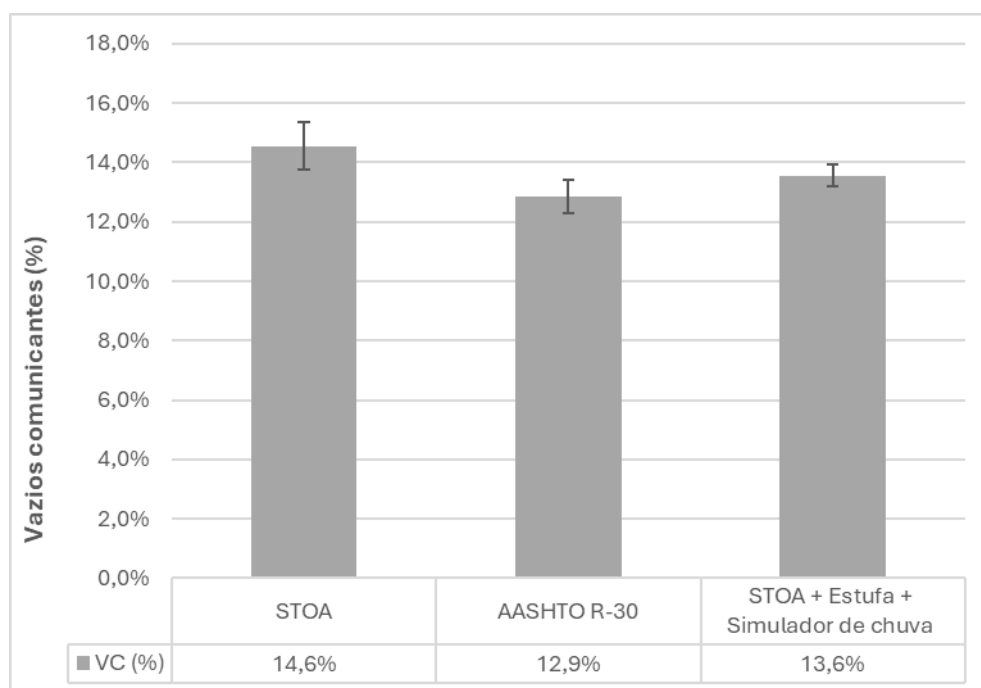
<b>Test Tukey para os protocolos</b>	
<b>Protocolos</b>	<b>Diferença significativa</b>
STOA – R-30	Sim
STOA – Temperatura + Umidade	Não
R-30 – Temperatura + Umidade	Sim

O teste de Tukey indicou que entre as misturas submetidas aos protocolos STOA e AASHTO R-30 existe diferença significativa, quando se trata da porcentagem de vazios. O mesmo comportamento foi observado ao se comparar os resultados das misturas envelhecidas em decorrência dos dois protocolos de envelhecimento de longo prazo. No entanto, entre as misturas submetidas ao protocolo STOA e o protocolo combinado de temperatura e umidade, o teste indicou que não existe diferença significativa no volume de vazios.

### **3.2.3 Volume comunicantes**

O ensaio de vazios comunicantes foi realizado para cada mistura analisada, submetidas aos protocolos de envelhecimento. Na Figura são mostrados os resultados obtidos na presente pesquisa.

Figura 15 – Vazios comunicantes das misturas envelhecidas



A norma NF P98-254-2/93 estabelece uma porcentagem mínima de vazios comunicantes de 10% para misturas com elevado volume de vazios. Logo, nota-se que todas as misturas apresentaram um valor de vazios comunicantes acima do indicado pela norma francesa.

Após a aplicação dos protocolos de envelhecimento de longo prazo, percebe-se que ocorrem ligeiras reduções nos VCs das misturas, de 1,7% para o protocolo AASHTO R-30 e 1,0% para o protocolo que combina os efeitos da temperatura e umidade, quando comparadas às misturas submetidas somente ao envelhecimento de curto prazo. Diante disto, com o intuito de avaliar a relevância da variação dos vazios comunicantes, realizou-se uma análise de variância dos dados. Essa avaliação tem como base um nível de significância de 5%, e os resultados estão apresentados na Tabela .

Tabela 10 – ANOVA dos VCs das misturas envelhecidas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Protocolos</b>	4,638523	2	2,3192614	7,796868	0,021452126	5,143253
<b>Dentro dos grupos</b>	1,784764	6	0,2974606			
<b>Total</b>	6,423287	8				

A análise estatística permitiu constatar que existe uma disparidade significativa nos vazios comunicantes das misturas envelhecidas. Isso é evidenciado pelo valor calculado de F, que foi de 7,79, e que ultrapassa o valor crítico de F

estabelecido em 5,14. Com isto, a hipótese nula inicial é rejeitada, ou seja, há significância do modelo quanto aos protocolos de envelhecimento.

Diante da determinação de que existem diferenças significativas nos valores de vazios comunicantes das misturas submetidas aos protocolos de envelhecimento, o teste de Tukey foi aplicado a fim de identificar entre quais protocolos estas diferenças ocorrem. Na Tabela é possível observar que existem distinções significativas entre os vazios comunicantes dos pares de protocolos.

Tabela 11 – Resultado das comparações múltiplas entre os VCs das misturas envelhecidas

<b>Test Tukey para os protocolos</b>	
<b>Protocolos</b>	<b>Diferença significativa</b>
STOA – R-30	Sim
STOA – Temperatura + Umidade	Não
R-30 – Temperatura + Umidade	Não

O teste de Tukey indicou uma diferença significativa nos vazios comunicantes das misturas submetidas aos protocolos STOA e AASHTO R-30. Contudo, esse padrão não foi observado ao comparar as misturas submetidas ao protocolo STOA com o protocolo combinado de temperatura e umidade, bem como ao confrontar os dois protocolos de envelhecimento a longo prazo.

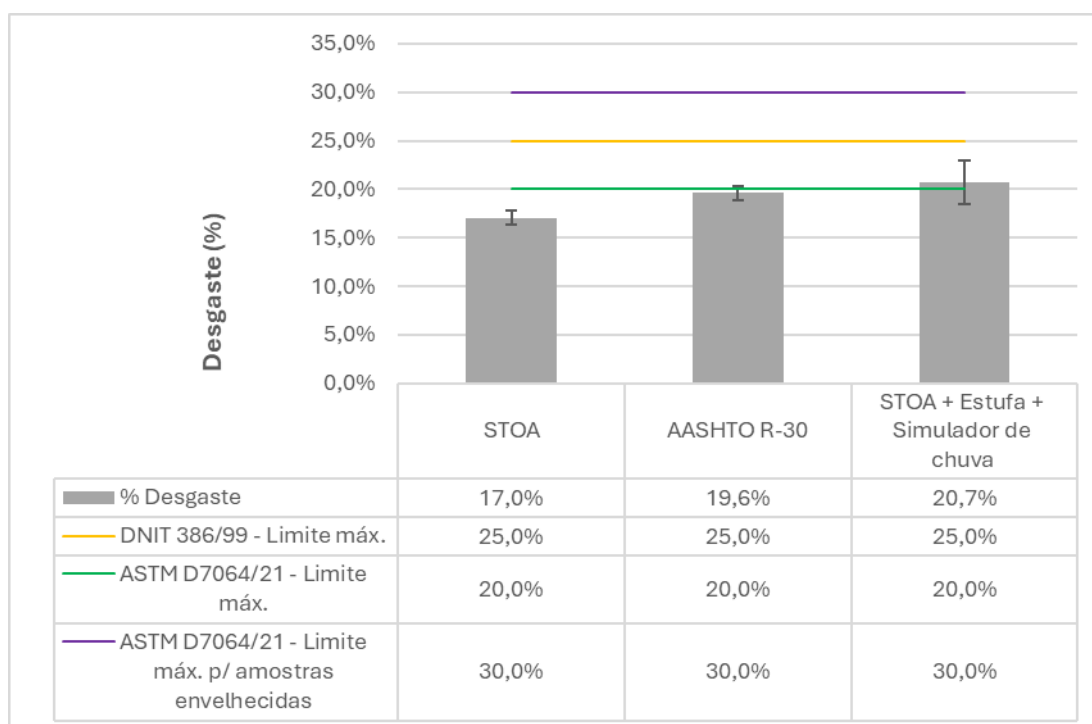
De maneira geral, o resultado do ensaio de vazios comunicantes apresenta tendência similar ao resultado do ensaio de volume de vazio. No entanto, o teste de Tukey do primeiro indicou diferença significativa entre os resultados do protocolo AASHTO R-30 e do protocolo combinado de temperatura e umidade, o que não foi identificado no segundo.

Schneider *et al.* (2019) justificam que a grande variabilidade dos resultados de misturas com elevado volume de vazios ocorre devido ao volume de vazios presente nas misturas. Essa elevada porcentagem de vazios pode conferir uma não homogeneidade as misturas, propiciando a formação de regiões mais frágeis, as quais interferem em diferentes proporções nos resultados, fazendo com que esses não tenham uma orientação bem definida.

#### **3.2.4 Cântabro**

Os resultados do ensaio de cântabro, das misturas sujeitas aos protocolos de envelhecimento, são apresentados na Figura .

Figura 16 – Porcentagens de desgaste das misturas envelhecidas



As misturas apresentaram uma porcentagem de desgaste abaixo do limite máximo estipulado pela DNIT 386/99. Em relação à norma ASTM D7064/21, que define um limite específico para amostras envelhecidas de 30%, todas as misturas envelhecidas satisfizeram também esse critério.

Ao comparar as três misturas, nota-se que houve um acréscimo de 2,6% e 3,7%, para as misturas submetidas ao protocolo AASHTO R-30 e ao protocolo que combina os efeitos da temperatura e umidade, respectivamente, quando comparadas a mistura submetida ao protocolo STOA. Para identificar se estas variações na porcentagem de desgaste foram realmente significativas, realizou-se a ANOVA e os resultados podem ser verificados na Tabela .

Tabela 12 – ANOVA das porcentagens de desgaste das misturas envelhecidas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Protocolos</b>	0,001793	2	0,000896	3,998467	0,142487	9,552094
<b>Dentro dos grupos</b>	0,000673	3	0,000224			
<b>Total</b>	0,002465	5				

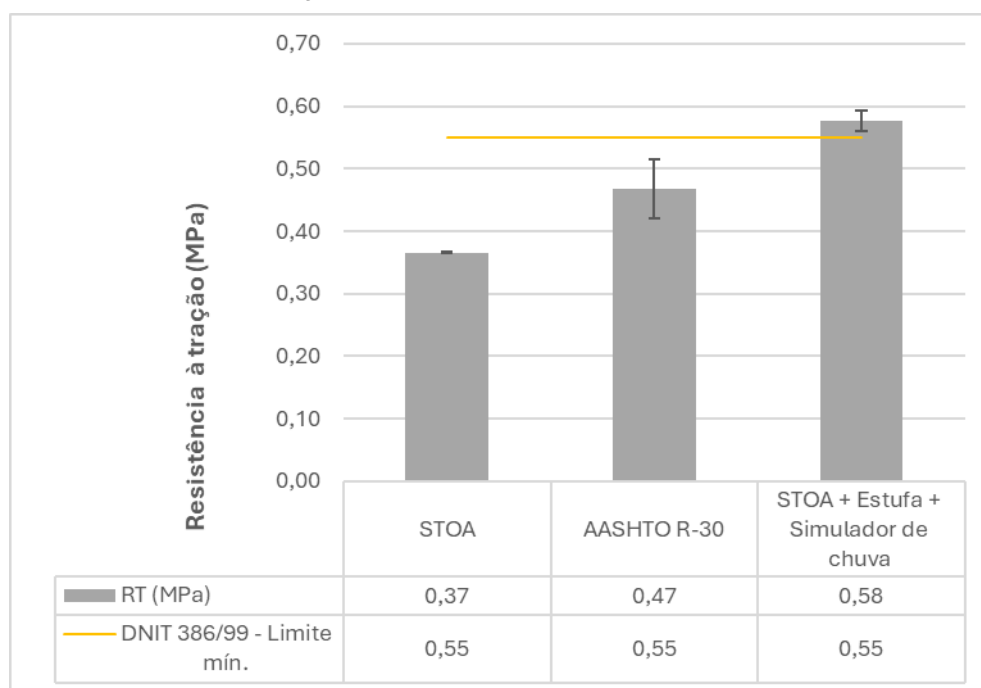
A partir dos resultados da análise de variância apresentados na Tabela , percebe-se que o valor calculado de F foi de 3,99, abaixo do valor crítico de F, estabelecido em 9,55, com um coeficiente de determinação de 5%. Assim, a

hipótese inicial é aceita, o que sugere que os protocolos de envelhecimento não têm uma influência significativa sobre a porcentagem de desgaste das misturas.

### 3.2.5 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura são exibidos os valores médios da resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas envelhecidas, acompanhados pelos respectivos desvios-padrão. Os dados apresentados são a média obtida a partir de três corpos de prova ensaiados.

Figura 17– RT das misturas envelhecidas



Ao analisar os resultados presentes na 7 é possível observar a existência de tendências de aumento da resistência a tração com a realização do condicionamento de envelhecimento a longo prazo. No entanto, a norma DNIT 386/99 estipula um valor mínimo de 0,55 MPa, que só foi atingido pela mistura que acrescenta os efeitos da umidade ao envelhecimento.

Nota-se um acréscimo progressivo na RT, em decorrência do aumento de rigidez que ocorre com a adição de parâmetros intempéricos aos protocolos. Em relação a mistura submetida ao protocolo AASHTO R-30, se comparada com à mistura submetida ao protocolo STOA, o aumento de resistência foi de 10%. Já quando se compara o protocolo combinado dos efeitos de umidade e temperatura, com o protocolo STOA, o acréscimo de resistência foi de 21%. Este comportamento

ocorreu devido à ação do ligante oxidado proveniente do processo de envelhecimento.

Para verificar se o acréscimo de resistência foi realmente significativo, realizou-se a análise de variância dos resultados do ensaio de RT, com um nível de significância de 5%. Estes resultados podem ser verificados na Tabela 13.

Tabela 13 – ANOVA das RTs das misturas envelhecidas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Protocolos</b>	0,04463659	2	0,022318	7552,07	2,80E-06	9,552094
<b>Dentro dos grupos</b>	8,86577E-06	3	2,96E-06			
<b>Total</b>	0,044645456	5				

Pelos resultados da Tabela , observa-se que o valor calculado de F (7552,07) excede o valor tabelado de F (9,55). Assim, a hipótese inicial é rejeitada, indicando que os dados são significantes para o modelo. Consequentemente, pode-se concluir que as misturas asfálticas envelhecidas a longo prazo demonstraram um aumento na resistência à tração em comparação com a mistura asfáltica submetida somente ao envelhecimento de curto prazo. Esse comportamento era esperado, pois um envelhecimento prolongado tende a conferir maior rigidez à mistura.

Ao considerar o resultado da ANOVA, que revelou diferenças significativas entre as misturas, fez-se necessário realizar o teste de Tukey para determinar quais misturas distinguem entre si. Na Tabela , são indicadas se existem disparidades consideráveis na resistência à tração, ao comparar os diferentes pares de protocolos de envelhecimento.

Tabela 14 – Resultado das comparações múltiplas entre as RTs das misturas envelhecidas

<b>Test Tukey para os protocolos</b>	
<b>Protocolos</b>	<b>Diferença significativa</b>
STOA – R-30	Sim
STOA – Temperatura + Umidade	Sim
R-30 – Temperatura + Umidade	Sim

O teste de Tukey confirmou que existe uma diferença significativa nos resultados de RT entre as misturas submetidas a todos os protocolos. Diante disto, é importante destacar a diferença constatada entre o procedimento padrão da AASHTO R-30 e o protocolo combinado de efeitos de temperatura e umidade, já que



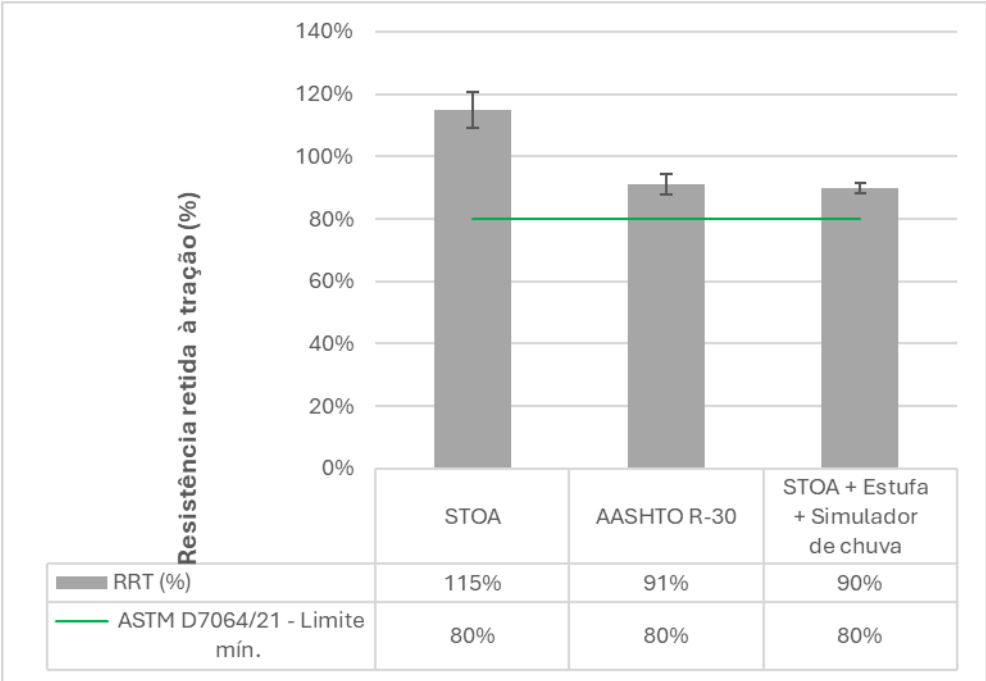
pesquisas anteriores, como a de Silva Lopes *et al.* (2023), ao analisarem misturas densas e comparar diferentes protocolos de envelhecimento, verificaram que a adição da umidade nos protocolos não foi preponderante para o aumento de RT, pelo contrário a umidade influenciou negativamente na rigidez da mistura. Logo, acredita-se que para o caso de misturas com elevado volume de vazios, o protocolo torna-se mais agressivo.

Além disso, propriedades como coesão da mistura e o tipo de esqueleto pétreo têm influência no desempenho da mistura frente ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A coesão/adesão é um fator fundamental na resistência da mistura envelhecida e está ligada a capacidade de união do ligante e os agregados. Portanto, considerando que a matriz de agregados é semelhante em todas as misturas, é possível concluir que a presença de umidade influenciou positivamente na adesão dos componentes.

### 3.2.6 Dano por umidade induzida

A Figura apresenta os valores médios da resistência retida à tração das misturas asfálticas envelhecidas.

Figura 18 – RRTs das misturas envelhecidas



De acordo com a ASTM D7064 (2021), é recomendado que o critério para determinar a suscetibilidade à umidade de uma mistura seja de pelo menos 80% de

RRT. Portanto, as misturas analisadas estão dentro do limite estabelecido pela especificação americana, já que seus valores de RRT atendem a esse valor.

Conforme previsto, a resistência das amostras diminuiu após a aplicação dos protocolos de envelhecimento a longo prazo, indicando que estas misturas são mais propensas a apresentar falha no deslocamento de filme das partículas. Esta redução foi praticamente a mesma para os dois protocolos, o que indica que equivalência destes, o que combina os efeitos da temperatura e umidade, bem como o que se baseia somente nos efeitos da temperatura sobre as misturas.

Para verificar a significância da redução da RRT entre a mistura submetida ao protocolo STOA e os protocolos de envelhecimento de longo prazo, realizou-se uma análise de variância. Na Tabela estão disponíveis os dados da ANOVA para o ensaio de Lottman, com um nível de significância de 5%.

Tabela 15 – ANOVA das RRTs das misturas envelhecidas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Protocolos</b>	0,097901	2	0,048951	31,29522	0,000669	5,143253
<b>Dentro dos grupos</b>	0,009385	6	0,001564			
<b>Total</b>	0,107286	8				

Observa-se uma disparidade significativa na RRT das misturas estudadas, visto que o valor calculado de F, que foi de 31,29 ultrapassou o valor crítico de F, estabelecido em 5,14. Consequentemente, a hipótese inicial é rejeitada, o que indica que a redução na resistência retida à tração foi considerável. Além disso, para comparar os protocolos em pares, foi aplicado o teste de Tukey e os resultados podem ser observados na Tabela .

Tabela 16– Resultado das comparações múltiplas entre a RRT das misturas envelhecidas

<b>Test Tukey para os protocolos</b>	
<b>Protocolos</b>	<b>Diferença significativa</b>
STOA – R-30	Sim
STOA – Temperatura + Umidade	Sim
R-30 – Temperatura + Umidade	Não

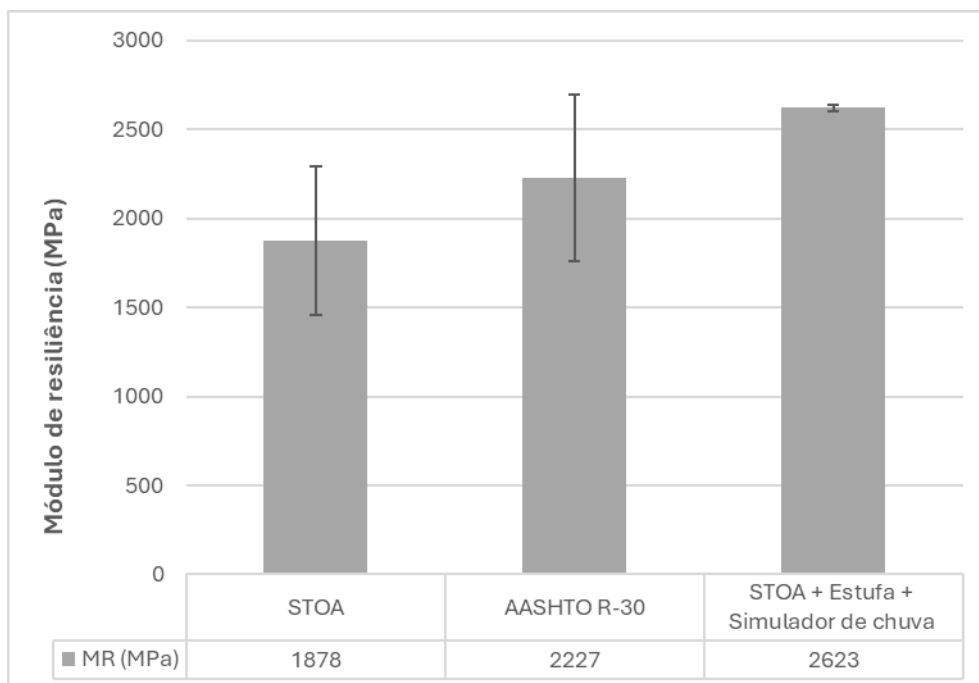
Frente à susceptibilidade à umidade, o teste de Tukey indicou que não existe diferença significativa entre os protocolos de envelhecimento de longo prazo, está só é percebida entre o protocolo de curto prazo e os de longo prazo. Logo, conclui-se que a presença de umidade não propiciou o enfraquecimento do desempenho de

adesão do ligante, diferente do que Das *et al.* (2022) verificaram, ao afirmarem que no decorrer do envelhecimento, a mistura asfáltica experimenta uma perda de resistência, rigidez e durabilidade à presença de umidade.

### 3.2.7 Módulo de resiliência

Na Figura são apresentados os resultados de módulo de resiliência das misturas asfálticas submetidas aos protocolos de envelhecimento.

Figura 19 – MRs das misturas envelhecidas



Ao analisar os resultados, de uma maneira geral é possível verificar tendências similares no comportamento do módulo de resiliência das misturas com condicionamento ao envelhecimento. Além disso, verifica-se que as misturas apresentaram valores de MR em torno de 2000 MPa, que é o valor estipulado por Motta *et al.* (2010) para misturas com elevado volume de vazios, já que estas tendem a apresentar maior flexibilidade, quando comparadas as misturas densas.

Apesar dos valores similares, observa-se um aumento nos valores de MR das misturas submetidas aos protocolos de envelhecimento de longo prazo, comportamento já esperado pois quanto mais envelhecida a mistura maior é a sua rigidez, como já verificado no ensaio de RT. Diante disto, a fim de verificar a significância dessa alteração na rigidez das misturas, foi realizada a análise de variância e o resultado pode ser observado na Tabela .

Tabela 17 – ANOVA dos MRs das misturas envelhecidas

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
<b>Protocolos</b>	660117	2	330058,5	4,579545	0,1225548	9,552094
<b>Dentro dos grupos</b>	216217	3	72072,33			
<b>Total</b>	876334	5				

Ao analisar a Tabela , percebe-se que o valor calculado de F (4,58) é inferior ao valor tabelado de F (9,55) para um nível de significância de 5%, e ainda, o valor-p foi superior a 5%. Portanto, a hipótese inicial é aceita, indicando que não há diferenças significativas nos dados, assim o parâmetro de rigidez, em relação ao envelhecimento, demonstra ser semelhante.

#### 4 CONCLUSÃO

Diante da análise dos resultados obtidos da caracterização do ligante e dos agregados, é possível inferir que o ligante possui propriedades que estão dentro dos limites exigidos pelas normas e especificações. Além disso, os agregados utilizados também estavam dentro dos parâmetros exigidos para que a qualidade da mistura fosse garantida.

A partir dessas caracterizações, a pesquisa realizou uma análise aprofundada de misturas asfálticas submetidas a diferentes protocolos de envelhecimento, abordando tanto o comportamento mecânico quanto as propriedades volumétricas das amostras. Ao longo dos ensaios, foi possível observar que as variações nos protocolos de envelhecimento afetam diversos parâmetros das misturas, com destaque para o volume de vazios (VV), vazios comunicantes (VC), resistência à tração por compressão diametral (RT), desgaste por abrasão e módulo de resiliência (MR).

Na avaliação do volume de vazios, os resultados mostram que todas as misturas apresentaram valores próximos do limite mínimo de 18%, conforme exigido pelas normas ASTM D7064/21 e DNIT 386/99. No entanto, a análise de variância (ANOVA) mostrou que os diferentes protocolos provocaram variações significativas nos VV das misturas, com destaque para as distinções entre o protocolo STOA e o AASHTO R-30, evidenciadas pelo teste de Tukey. Esse comportamento reforça a importância da escolha adequada do protocolo de envelhecimento, uma vez que o

número de ciclos de compactação, maior que o recomendado pela norma americana, teve impacto direto nos resultados de VV.

Quanto aos vazios comunicantes, todas as misturas apresentaram valores acima do mínimo estipulado pela norma francesa NF P98-254-2/93. As reduções nos VC, especialmente nos protocolos de envelhecimento a longo prazo, indicam que o tempo de exposição e as condições ambientais influenciam diretamente no desempenho das misturas. A ANOVA também apontou variações significativas, com o teste de Tukey destacando diferenças entre os protocolos STOA e AASHTO R-30. Esses resultados reforçam que o envelhecimento prolongado possui grande relação com a conectividade dos vazios, podendo impactar a permeabilidade e a durabilidade da mistura.

Os resultados do ensaio de Cântabro mostraram que todas as misturas satisfizeram os critérios de desgaste estabelecidos pela DNIT 386/99 e ASTM D7064/21. Os protocolos de longo prazo (AASHTO R-30 e o protocolo combinado de temperatura e umidade) apresentaram aumentos de desgaste de 2,6% e 3,7%, respectivamente, em relação ao STOA. No entanto, a análise de variância indicou que essas variações não foram estatisticamente significativas, sugerindo que, embora o envelhecimento prolongado aumente o desgaste, esse aumento não compromete significativamente a integridade das misturas dentro dos limites estabelecidos pelas normas.

A resistência à tração por compressão diametral (RT) mostrou uma tendência de aumento com o envelhecimento a longo prazo. A ANOVA confirmou que as variações entre os protocolos foram estatisticamente significativas, e o teste de Tukey apontou diferenças expressivas em todos os pares comparados. Esse aumento progressivo da RT ocorre devido a maior rigidez, devido ao envelhecimento e à oxidação do ligante. A presença de umidade, ao contrário de algumas pesquisas anteriores, influenciou positivamente a adesão dos componentes, aumentando a coesão da mistura.

Em relação ao dano por umidade induzida, os valores de resistência retida à tração (RRT) indicaram que todas as misturas estavam acima do limite mínimo de 80% estipulado pela ASTM D7064/21. No entanto, a aplicação dos protocolos de longo prazo resultou em uma redução da RRT, o que sugere que as misturas se tornaram mais suscetíveis a falhas de adesão. A ANOVA confirmou que houve variações significativas na RRT, com o teste de Tukey destacando diferenças entre

o protocolo de curto prazo STOA e os protocolos de longo prazo. Esses resultados são importantes para a avaliação da durabilidade das misturas em condições de exposição prolongada à temperatura e umidade.

Por fim, o módulo de resiliência (MR) das misturas envelhecidas apresentou uma leve tendência de aumento, especialmente para os protocolos de longo prazo, conforme esperado, já que misturas mais envelhecidas tendem a ser mais rígidas. No entanto, a ANOVA não indicou diferenças significativas entre os protocolos, sugerindo que, apesar do aumento da rigidez, o módulo de resiliência das misturas não foi substancialmente afetado pelos diferentes métodos de envelhecimento.

Diante dos resultados obtidos, pode-se inferir que os protocolos de envelhecimento, especialmente aqueles que combinam temperatura e umidade, têm um impacto significativo nas propriedades volumétricas e mecânicas das misturas asfálticas. O aumento da rigidez, resistência à tração e desgaste são consequências diretas do envelhecimento prolongado, enquanto a suscetibilidade à umidade e a conectividade dos vazios também são afetadas, com implicações diretas na durabilidade e desempenho das misturas.

Esses resultados reforçam a necessidade de uma abordagem criteriosa na escolha dos protocolos de envelhecimento para garantir o melhor desempenho das misturas asfálticas em condições reais de serviço, especialmente em ambientes com variações significativas de umidade e temperatura.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, no âmbito do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq-UFCG). Gostaria de expressar minha gratidão ao meu orientador, Prof. Adriano Elisio de Figueiredo Lopes Lucena, pela oportunidade de contribuir com essa pesquisa, e por sua orientação ao longo de todo o projeto. Agradeço também à minha coorientadora, Talita Miranda de Souza, cuja dedicação, apoio e auxílio foram fundamentais para o desenvolvimento e para a conclusão deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

PEREIRA, C. Análise da aderência pneu-pavimento em rodovias do estado de Pernambuco e da Paraíba com elevado índice de acidentes, 2010.

GARCIA, E. Análise da redução da permeabilidade de misturas asfálticas drenantes em função da redução do volume de vazios, 2017.

JACQUES, G. Aplicabilidade de misturas mornas em revestimentos do tipo camada porosa de atrito (CPA), 2018.

DRESH, F. Comportamento de misturas asfálticas do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA), 2016.

MOREIRA, M.; JUNIOR, M.; TOLOI, R. O transporte rodoviário no Brasil e suas deficiências, 2018.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6560: Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 6576: Materiais betuminosos: determinação da penetração. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas -. NBR 15184: materiais betuminosos: determinação da viscosidade em temperatura elevada usando um viscosímetro rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

ASTM - American Society for Testing and Materials. D 2872: ASTM: American Society for Testing and Materials - D 2872 – Effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin film oven test)

ASTM - American Society for Testing and Materials. D 7155: ASTM: American Society for Testing and Materials - D 7155 – Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer

BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007. 501p.

ARRUDA, J. Análise de pavimentação e sua relação com acidentes de trânsito (br 101 - km 76), 2016.

LUGÃO, W. Análise da aderência entre pneu e pavimento com camada porosa de atrito no aeroporto internacional Tancredo Neves – MG, 2008.

BAIA, S. Avaliação da camada porosa de atrito (CPA) como alternativa para agilidade no escoamento superficial na praça Cesário Alvim em Caratinga/MG, 2017.

APS, M.; BERNUCCI, L. Mitigação do ruído proveniente do tráfego de rodovias por meio da implantação do revestimento asfáltico do tipo Camada Porosa de Atrito (CPA) - c caso brasileiro, 2020.

SILVA, L.; SILVA, J. P. Modelo de envelhecimento de ligantes asfálticos rejuvenescidos, 2020.

MISTURAS asfálticas: Conceituação, Materiais e Dosagem: Tipos de Revestimentos Asfálticos. Brasília: Instituto de pesquisas em transportes, 2022. Módulo 3.