

## Estudo da adesividade e do comportamento mecânico em misturas asfálticas com adição de cal hidratada e rejeito de mármore

### *Study of adhesiveness and mechanical behavior in asphalt mixtures with the addition of hydrated lime and marble waste*

### *Estudio de adhesividad y del comportamiento mecánico en mesclas asfálticas con adición de cal hidratada y residuos de mármol*

**Lucas Gonçalves**

**Pereira**    
Engenheiro da Mobilidade  
lucas960111@hotmail.com

**Marconi Oliveira de Almeida**  

Universidade Federal de Itajubá (Unifei) – Campus Itabira (MG)  
marconi.almeida@unifei.edu.br

**Sérgio Pacífico Soncim**  

Universidade Federal de Itajubá (Unifei) – Campus Itabira (MG)  
sergiops@unifei.edu.br

**Carlos Augusto de Souza Oliveira**  

Universidade Federal de Itajubá (Unifei) – Campus Itabira (MG)  
carlosoliveira@unifei.edu.br

#### Resumo

Esta pesquisa teve por objetivo analisar os efeitos da cal hidratada e do rejeito de mármore nas propriedades mecânicas e adesividade das misturas asfálticas. Foi realizada a substituição de 1,5% no peso total do corpo de prova por cal e rejeito de mármore, comparando-os com uma mistura convencional. Foram executados os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência, estabilidade e fluência, cântabro e dano por umidade. Os corpos de prova utilizados foram moldados conforme metodologia Marshall e distribuição granulométrica pertencente ao centro da faixa C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Os resultados mostraram que a utilização da cal e do rejeito de mármore melhoram consideravelmente a suscetibilidade ao dano e as propriedades mecânicas da mistura. Dessa forma, este trabalho corrobora com os efeitos benéficos da adição da cal em misturas asfáltica já descritos na bibliografia e identificou o potencial de uso do rejeito de mármore.

**Palavras-chave:** Mistura Asfáltica. Adesividade. Cal hidratada. Rejeito de mármore.

#### Abstract

*This research aimed to analyze the effects of hydrated lime and marble waste on the mechanical properties and adhesiveness of asphalt mixtures. 1.5% of the total weight of the specimen was replaced by lime and marble waste, comparing them with a conventional mixture. We performed tensile strength tests by diametral compression, modulus of resilience, stability and creep, Cantabro, and moisture damage. The specimens used were molded according to Marshall's methodology and granulometric distribution belonging to the center of the C range of the National Department of Transport Infrastructure. The results showed that lime use and marble waste considerably improve the susceptibility to damage and the mechanical properties of the mixture. Thus, this work corroborates the beneficial effects of adding lime to asphalt mixtures already described in the bibliography and identifies the potential use of marble waste.*

**Keywords:** Asphalt mixture. Adhesiveness. Hydrated lime. Marble waste.

#### Resumen

*Esta investigación analiza los efectos de la cal hidratada y de residuos de mármol en las propiedades mecánicas y adhesividad de las mesclas asfálticas. Fue realizada la sustitución de 1,5% en el peso total del cuerpo de prueba por cal y residuos de mármol, comparándoles con una mezcla convencional. Fueron ejecutados los ensayos de resistencia a la tracción por compresión diametral, módulo de resiliencia, estabilidad y fluencia, cántabro y daño por humedad. Los cuerpos de prueba utilizados fueron moldeados según metodología Marshall y distribución granulométrica perteneciente*

*al centro de la banda C del Departamento Nacional de Infraestructura de Transportes. Los resultados mostraron que la utilización de la cal y de los residuos de mármol mejoran considerablemente la susceptibilidad a los daños y las propiedades mecánicas de la mezcla. Así, este trabajo confirma con los efectos benéficos de la adición de cal en mezclas asfálticas ya descritos en la bibliografía e identificó el potencial de uso de residuos de mármol.*

**Palabras clave:** *Mescla asfáltica. Adhesividad. Cal hidratada. Residuo de mármol.*

## 1 Introdução

Atualmente, muito se estuda sobre a malha rodoviária e sua estrutura, visto que por meio dela é possível promover aspectos como a integração entre diversas regiões, escoamento de matéria-prima e deslocamento de pessoas. Entretanto, apesar do Brasil ser um país que prioriza o transporte rodoviário em detrimento dos demais, este não apresenta uma estrutura capaz de atender sua demanda interna. Segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2019a), apenas 12,4% da malha rodoviária do Brasil é pavimentada. Isso evidencia a necessidade de buscar formas de conservar o pavimento já existente, a fim de reduzir seu desgaste e fatores que contribuem para a sua degradação.

Relacionado a isso, uma das características mais importantes nesse contexto é a adesividade, que, de acordo com Bernucci *et al.* (2010), é a adsorção química entre o agregado e ligante asfáltico. Essa adsorção química é o resultado de uma forte atração entre as partículas dos agregados, que possuem átomos atraídos por átomos de outras superfícies que tenham contato. Essa adsorção pode ocorrer tanto em sólidos, líquidos ou gases e é isso que vai promover a adesão do ligante asfáltico com o agregado, fazendo com que o ligante cubra por completo a superfície do agregado.

Sabe-se que a falta de adesividade entre o agregado e o ligante asfáltico provoca diversos problemas na estrutura do revestimento asfáltico. Alguns dos principais problemas que podem ser citados são: o aparecimento precoce de fissuras por fadiga, uma vez que a resistência ao cisalhamento depende de uma boa textura superficial do agregado; deslocamento de partículas do revestimento asfáltico devido às desagregações, que vão gerar defeitos como panelas; e o aparecimento de problemas estruturais do pavimento como resultado da infiltração da água nas camadas inferiores.

Um das técnicas aplicadas atualmente para aumentar a adesividade agregado-ligante é a utilização de aditivos químicos. Esses aditivos químicos são considerados agentes melhoradores de adesividade, que podem ser usados em um determinado projeto que a mistura se mostra susceptível ao dano por umidade ou a desagregação. Os melhoradores de adesividade líquidos e a cal estão entre os tipos de agentes mais comumente usados (BOCK, 2009).

Além da busca pela melhoria da adesividade e do comportamento mecânico das misturas asfálticas, outras técnicas e diferentes tipos de materiais têm sido testados, a fim de verificar possíveis mudanças nas características das misturas asfálticas. Podemos citar, por exemplo, o aumento significativo de estudos científicos que realizaram testes com materiais provenientes de descartes, como os rejeitos de mármore (GURBUZ, 2015) e de minério de ferro (ARÊDES, 2016).

Sendo assim, o rejeito de mármore (RM) foi empregado neste estudo devido a dois motivos. O primeiro, está relacionado a sua finura, visto que, materiais de finura elevada proporcionam ao mástique uma melhora em sua rigidez. O outro motivo que influenciou esse estudo é o fato de que a aplicação do RM pode contribuir positivamente com o meio ambiente, com a redução da extração de agregados, a diminuição da disposição de resíduos em estruturas de contenção e a redução dos danos ambientais provocados por essas práticas.

Nesse contexto, este trabalho visa avaliar o comportamento mecânico e a adesividade de misturas asfálticas com adição de cal hidratada e rejeito de mármore (RM), comparando-as com uma mistura de referência. Nesse estudo empregou-se o teor de cal e de rejeito de mármore equivalente a 1,5% do peso total do CP (corpo de prova). Antes da elaboração das misturas e moldagem dos CPs foram realizados ensaios de caracterização da cal e do rejeito de mármore. Os CPs produzidos tiveram testados o seu módulo de resiliência, a resistência à tração por compressão diametral, a perda de massa por desgaste, o dano por umidade induzida, a estabilidade e a fluência.

## 2 Revisão bibliográfica

### 2.1 Mistura asfáltica

De acordo com Bernucci *et al.* (2010), o revestimento mais comumente utilizado no país é uma união entre agregados minerais (gráudo e miúdo que podem ser de diferentes fontes), material de enchimento (fíler) e um ligante asfáltico. Quando esses materiais são misturados, dão origem à mistura asfáltica, que após ser executada apropriadamente, tem a finalidade de resistir aos efeitos do tráfego, suportando a pressão exercida pelos veículos, e resistir às ações do clima, tendo ainda a função de ser um material impermeável que consiga manter a água fora de contato com as camadas inferiores do pavimento.

Bock *et al.* (2009) afirmam que misturas asfálticas devem possuir flexibilidade para reduzir os problemas causados pela variação térmica que geram trincas, e, ao mesmo tempo, ter uma característica de rigidez que garanta o suporte necessário para o tráfego de veículos. Além dessas características a adesividade se apresenta como aspecto fundamental, pois é ela que promove o contato agregado/ligante evitando problemas como desagregação e descolamento nas misturas asfálticas.

### 2.2 Adesividade

Hicks (1991) afirma que inúmeros fatores interferem na adesividade das misturas asfálticas. Um dos principais fatores é o volume de vazios, que vai determinar o quão suscetível a mistura é à umidade. Misturas asfálticas com volumes de vazios entre 6% e 13% são as misturas mais susceptíveis ao dano por umidade induzida, uma vez que não são consideradas nem drenantes e nem impermeáveis.

Desta forma, segundo Grande (2011), muitos aditivos têm sido empregados para melhoria de propriedades das misturas asfálticas. Uma das características dos aditivos é a redução da sensibilidade à umidade, desagregação e descolamento de partículas. Assim, os mais usados atualmente são a cal hidratada e dopes em ligantes asfálticos.

Conforme Little e Epps (2001), a utilização da cal melhora tanto os aspectos mecânicos quanto os químicos, melhorando a resistência à umidade e à fratura, juntamente com a redução do envelhecimento oxidativo dos betumes. Quando a cal hidratada é adicionada em misturas asfálticas, ela vai interagir com o agregado proporcionando melhorias na ligação química entre eles, e o mesmo ocorre com o ligante, pois a cal vai fornecer uma proteção contra a entrada da água em sua molécula.

De acordo com Bock (2009), isso ocorre porque, na interação, a cal vai reagir com as partículas polarizadas do ligante asfáltico, evitando que se formem sabões solúveis em água, o que resultaria em perda de adesividade. De acordo com Núñez (2007) as moléculas polarizadas ao interagirem com a cal, dão origem a sais insolúveis que se tornam hidrófobos. Além disso, a dispersão de pequenas partículas de cal hidratada na mistura vai torná-la rígida, reduzindo a possibilidade de ruptura mecânica da ligação.

Little e Epps (2001) afirmam ainda que o efeito da cal como fíler no asfalto minimiza os efeitos de deformação permanente em altas temperaturas, proporcionando maior resistência, especialmente durante o início de sua vida útil. Sabe-se que a mistura asfáltica tende a envelhecer devido não somente a oxidação sofrida, mas também pelo dano resultante do produto da oxidação. A cal atua, então, amenizando esses efeitos, fazendo com que a mistura se enrijeça e reforce a proteção à película de asfalto.

### 2.3 Rejeitos em misturas asfálticas

Outro recurso que vem sendo estudado atualmente são os rejeitos de rochas ornamentais. Durante o beneficiamento das peças de rochas ornamentais como granitos, mármore, gnaisses entre outras, uma porcentagem considerável do material vai virar rejeito na forma de lama, sendo posteriormente lançados no meio ambiente.

O rejeito em forma de lama, com o passar do tempo, tem sua parcela de água evaporada, resultando em um pó de granulometria bem fina que se espalha, causando diversos danos ambientais, promovendo a contaminação de recursos hídricos e a poluição do ar.

Dentro desse contexto o rejeito de mármore, resultado do beneficiamento da rocha ornamental, se apresenta com características interessantes. Sua finura, por exemplo, motiva pesquisas para analisar os seus benefícios dentro da mistura asfáltica. Ribeiro *et al.* (2007), por exemplo, estudou a aplicação de rochas ornamentais em misturas asfálticas, verificando que o rejeito em estudo apresentou características mecânicas dentro dos intervalos requeridos nas normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT, sendo apropriada sua utilização.

Destaca-se que o rejeito de mármore pode variar conforme o processo de beneficiamento, bem como das características das jazidas de onde a rocha mãe é extraída. Ainda assim, o material apresenta características interessantes, que sinalizam seu uso em materiais como concreto de cimento Portland e misturas asfálticas. Parte desta variabilidade pode ser controlada através de uma seleção granulométrica e minimizada por meio de estudos de dosagens.

### 3 Materiais e métodos

#### 3.1 Materiais utilizados

Neste estudo, utilizaram-se agregados, ligante asfáltico, cal hidratada e rejeito de mármore na forma de pó para a confecção dos CPs. Toda a caracterização e ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Unifei – *campus* Itabira, segundo as normas técnicas de cada ensaio.

##### 3.1.1 Agregados

Os agregados utilizados nessa pesquisa são provenientes da pedreira Belmont, situada em Itabira, Minas Gerais, que forneceu os agregados: brita de graduação 1, brita de graduação 0 e pó de pedra. Os agregados utilizados na pesquisa foram coletados em março de 2018 e são caracterizados como agregados gnáissicos. Os dados apresentados na Tab.(1) correspondem às propriedades e às características desse agregado.

**Tabela 1** - Propriedades e características dos agregados

Propriedades	Brita 0	Brita 1	Normas	Pó de pedra	Normas
Absorção	0,98%	0,65%	DNER-ME 195/97	-	-
Desgaste à abrasão	-	41,95%	DNER-ME 035/98	-	-
Formato predominante	Cúbica	Cúbica	ABNT NBR 7809/2006	-	-
Massa específica real	2,72 (g/cm <sup>3</sup> )	2,71 (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 195/97	2,747 (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 194/98
Massa específica aparente	2,64 (g/cm <sup>3</sup> )	2,68 (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 195/97	2,747 (g/cm <sup>3</sup> )	DNER-ME 195/97

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

##### 3.1.2 Cal hidratada

Neste estudo utilizou-se a cal hidratada, tipo CH III, marca Tradical, produzida no estado de Minas Gerais. A CHIII possui um grau de pureza menor em relação às outras cales (CH-I e CH-II), com uma produção mais econômica e contando com materiais não calcinados e impurezas de rochas. A escolha por essa cal se dá pelo uso em larga escala em obras de engenharia e pela facilidade de encontrar o produto no mercado. Na construção civil, a cal hidratada é altamente utilizada como insumo em argamassa de assentamento e revestimento, e como componente de tintas para caiação.

##### 3.1.3 Rejeito de mármore

O rejeito de mármore, na forma de pó (Fig. 1), utilizado neste trabalho, se origina da cidade de Cachoeiro Itapemirim, situada na região Sul do Estado do Espírito Santo (BR). O material foi coletado e disponibilizado

por uma empresa que atua no segmento de exploração e beneficiamento mineral, sendo produzido após o bloco de mármore passar pelo processo de desdobramento. As amostras foram conduzidas até o Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Unifei - campus de Itabira, onde foram realizados os ensaios de caracterização. Juntos aos ensaios de caracterização foram feitos ajustes na composição granulométrica através de destorroamento e peneiramento.

**Figura 1** - Processo de beneficiamento do Rejeito de mármore.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

### 3.1.4 Ligante asfáltico

Para a realização do trabalho foi utilizado o cimento asfáltico de petróleo CAP 50/70. O CAP é proveniente da refinaria Regap, localizada na cidade de Betim, Minas Gerais. Na Tabela 2 é possível observar as características do ligante utilizado.

**Tabela 2** - Características do ligante utilizado

Propriedade	Método	CAP 50/70
Ductilidade a 25 GC	D 113	>150
Densidade	D 70	1,007
Penetração (0,1 mm)	D 5	52
Ponto de amolecimento (°C)	D 36	50
Ponto de fulgor (°C)	D 92	235 min
Viscosidade. Brookfield 135°C (cP)	D 4402	314
Viscosidade. Brookfield 150°C (cP)	D 4402	155
Viscosidade. Brookfield 177°C (cP)	D 4402	59

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

### 3.2 Métodos

Para a elaboração dessa pesquisa foram realizadas três etapas: I) a caracterização física da cal hidratada e do rejeito de mármore; II) confecção dos corpos de prova; III) realização dos ensaios mecânicos e de adesividade.

Foi realizada a dosagem da mistura convencional apenas com agregados convencionais, de acordo com a metodologia Marshall, para a faixa granulométrica C da norma DNIT 031/2006. O teor de ligante utilizado para as misturas corresponde a 4,7% do peso total do corpo de prova (1.200g) e foram utilizados 18g de cal e RM, que correspondeu a 1,5%. Tal percentual foi escolhido baseado nos estudos de Bock (2009), que observou em seus resultados que aplicações de 1% e 2% de cal na mistura foram compatíveis em relação a suas características mecânicas, sendo que essa variação da porcentagem de cal não mostrou melhorias de resultados de uma em relação à outra.

### 3.2.1 Caracterização física da cal e RM

Para conhecimento da mineralogia do rejeito de mármore foi realizado ensaio de Difração por raios – X, que possibilitou descrever com maior precisão as porcentagens de cada elemento químico presente no RM. Os resultados obtidos foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Itajubá – *campus* de Itabira.

Para a granulometria do rejeito de mármore realizado o ensaio de sedimentação. O ensaio foi desenvolvido com base na norma NBR 7181/84.

Para a determinação da densidade real da cal hidratada e do rejeito de mármore optou-se pela utilização do ensaio de picnometria a gás hélio. O ensaio foi realizado no Laboratório de Espectroscopia da Unifei. A picnometria a gás hélio faz o uso de variação de pressão entre dois compartimentos, um com a amostra que se deseja medir a densidade e a outra com valores padrões conhecidos. Desta forma, a diferença nas duas pressões, combinada com o volume conhecido do compartimento de amostra vazia, permite que o volume da amostra seja determinado por meio da lei dos gases. De posse da massa da amostra, determinada em balança analítica, e conhecido o volume da amostra, determina-se a densidade do material.

### 3.2.2 Ensaio de caracterização mecânica e de adesividade das misturas asfálticas

Na determinação da resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas foi utilizada a norma DNER-ME 138/94.

Para avaliar o módulo de resiliência seguiu-se o prescrito na norma DNIT 135/2018, que estabelece os parâmetros a serem seguidos e a forma de execução do ensaio. Para este ensaio foram definidas as temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C. Essa norma determina que o módulo de resiliência de misturas betuminosas é a relação entre a tensão de tração aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica de mistura betuminosa e a deformação específica recuperável correspondente à tração aplicada, numa dada temperatura.

Em seguida foi feito o ensaio de determinação do dano por umidade induzida, utilizando como referência a norma ABNT NBR 15617/2015. A norma estabelece que para a realização do ensaio são necessários seis corpos de prova da mistura asfáltica a ser testada, sendo que três desses passaram por um processo de dano por umidade. O dano por umidade induzida é a relação entre a resistência à tração por compressão diametral da mistura asfáltica antes e depois de ser exposta ao processo de dano.

O ensaio de perda de massa por desgaste foi realizado conforme estabelece a norma DNER-ME 383/99. Esse ensaio consiste em submeter os corpos de prova (CPs) a 300 revoluções do tambor, sem as esferas metálicas, com o objetivo de determinar a resistência a abrasão, a coesão e a resistência à desagregação de misturas asfálticas

Após o ensaio, quantifica-se a perda de massa do corpo-de-prova betuminoso em porcentagem por meio da Eq. (1):

$$A = \frac{P - P'}{P} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

A = Perda no ensaio de desgaste Cântabro (%);

P = Peso inicial do corpo-de-prova (g);

P' = Peso após a realização do ensaio (g).

Por último foi realizado o ensaio de estabilidade e fluência, utilizando como referência a norma DNER-ME 043/95. A norma define a estabilidade Marshall como a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelo corpo de prova e a fluência Marshall como a deformação total apresentada pelo corpo de prova.

## 4 Resultados e discussões

### 4.1 Misturas e seus componentes

Na Tabela 3 é possível verificar as quantidades em massa de cada material utilizado na confecção dos CPs, sendo que tanto os CPs denominados de CAL quanto os denominados de RM utilizaram 18 gramas de material que corresponde a 1,5% em relação ao peso total do CP. Cabe destacar que essa porcentagem foi substituída da parcela correspondente ao material retido no fundo do conjunto de peneiras.

**Tabela 3** - Proporções dos materiais utilizados nas misturas asfálticas contendo cal e rejeito de mármore.

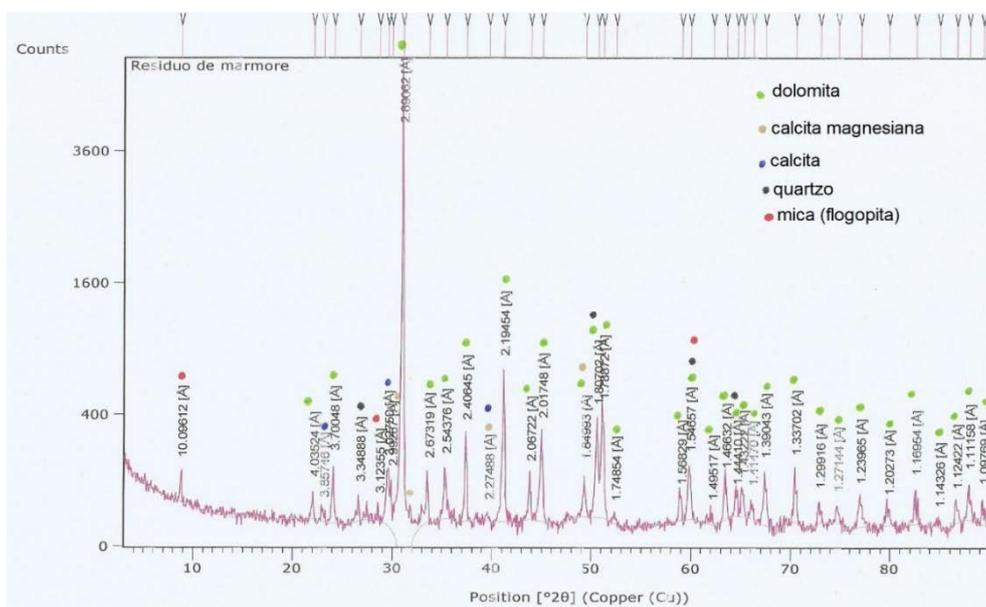
Serie ASTM	Abertura (mm)	% passando	% retido	Massa (g)	Mistura com CAL/ RM (g)	Mistura convencional (g)
3/4"	19,1	100	0	0	-	-
1/2"	12,7	90	10	120	114,34	114,34
3/8"	9,5	80	10	120	114,34	114,34
N° 4	4,75	58	22	264	251,54	251,54
N° 10	2	36	22	264	251,54	251,54
N° 40	0,42	17	19	228	217,24	217,24
N° 80	0,18	10	7	84	80,04	80,04
N° 200	0,075	6	4	48	45,73	45,73
	Fundo		6	72	50,60	68,60
		CAL/RM			18,00	0
		Total	100	1200	1.143,36	1.143,36
			Asfalto		56,64	56,64
			Total		1200,00	1200,00

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

### 4.2 Caracterização física da cal e RM

Inicialmente realizaram-se os ensaios de caracterização física do rejeito de mármore. Na Figura 2 é possível observar os resultados da análise mineralógica do rejeito de mármore.

**Figura 2** - Difratoograma de raios X do resíduo do mármore



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Por meio da Tabela 4 é possível observar que o resíduo de mármore apresenta, em sua composição, um maior percentual dos minerais dolomita e calcita e porcentagens menores de quartzo e mica, sendo 95,3% de dolomita, 3,7% de calcita, 0,7% quartzo e o restante de Mica. Nota-se na Figura 2 que há presença de picos típicos de dolomita e calcita, principais constituintes dos mármore, de acordo com Aguiar *et al.* (2016). Desta forma, conclui-se que sua composição do RM é típica de rochas carbonáticas.

**Tabela 4** - Composição estimada do rejeito de mármore

Propriedades	Valores (%)
Dolomita	95,3
Calcita	2,0
Calcita Magnésiana	1,7
Quartzo	0,7
Mica (flogopita)	0,3

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Em seguida, realizou-se o ensaio de granulometria do rejeito de mármore. É possível observar, portanto, que o rejeito de mármore possui uma predominância de diâmetro de grãos correspondente a silte, visto que o material ensaiado ficou em sua maior parte retido nas peneiras entre 2 micrometros e 60 micrometros. A Tabela 5 mostra o percentual de material passante em cada peneira, bem como o percentual retido.

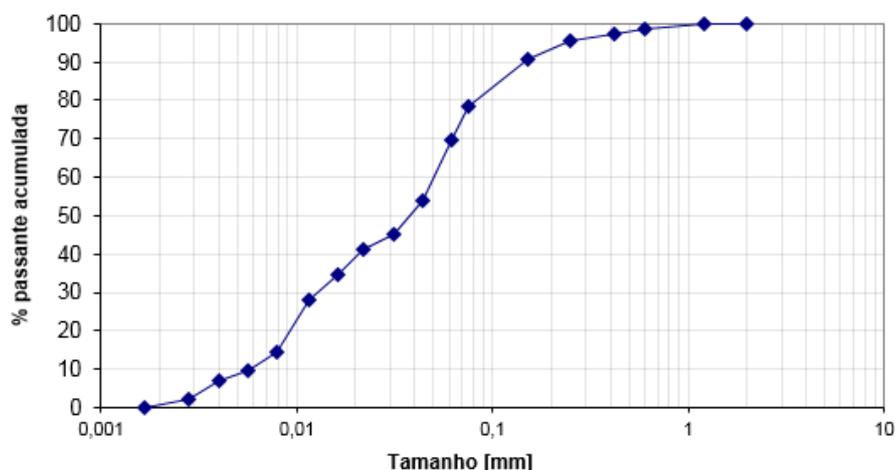
**Tabela 5** - Peneiramento grosso e fino.

d (mm)	% Material passante	% Material retido
50,80	100,0	0,0
38,10	100,0	0,0
25,40	100,0	0,0
19,10	100,0	0,0
9,52	100,0	0,0
4,76	100,0	0,0
2,00	100,0	0,0
1,190	99,8	0,2
0,590	98,6	1,4
0,420	97,5	2,5
0,250	95,7	4,3
0,149	90,6	9,4
0,074	78,5	21,5
0,0551	69,5	30,5
0,0412	54,0	46,0
0,0300	45,1	54,9
0,0206	41,2	58,8
0,0149	34,5	65,5
0,0111	27,9	72,1
0,0082	14,7	85,3
0,0058	9,6	90,4
0,0040	7,2	92,8
0,0028	2,3	97,7
0,0021	0,0	100,0

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Analisando a curva granulométrica apresentada na Figura 3 é possível notar que esse rejeito tem partículas predominantemente pequenas, totalizando 78,5% de material passante na peneira de 0,075 mm.

**Figura 3** - Curva granulométrica do rejeito de mármore



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Segundo Bardini *et al.* (2013), o tipo de filer mineral influencia muito na quantidade de ligante asfáltico necessária para produzir a máxima densidade e o volume de vazios adequado em misturas asfálticas, sendo que a quantidade de ligante é maior quanto mais fino é a granulometria dos finos. Sendo assim, o rejeito de mármore pode fazer a função do filer mineral em misturas asfálticas, devido a sua granulometria que apresenta mais de 78% passante na peneira de N° 200.

Posteriormente foi realizado o ensaio de picnometria, via gás hélio, para determinar a densidade do rejeito de mármore e da cal hidratada-III. Como resultado, obtiveram-se os valores de densidade de 2,836 g/cm<sup>3</sup> e 2,394 g/cm<sup>3</sup> para rejeito de mármore e cal, respectivamente, conforme mostra a Tabela 6. Esses valores foram obtidos por meio da realização de uma média aritmética entre cinco amostras.

**Tabela 6** - Densidade da Cal e do rejeito de mármore

Ensaio de massa real através do multipicnômetro (RM)					Ensaio de massa real através do multipicnômetro (CAL)			
	Volume (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Média	Volume (cm <sup>3</sup> )	Peso (g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Média
Amostra 1	1,3801	3,9125	2,835	2,836	0,7944	1,9007	2,393	2,394
Amostra 2	1,3805	3,9125	2,834		0,7911	1,9007	2,403	
Amostra 3	1,3791	3,9125	2,837		0,7977	1,9007	2,383	
Amostra 4	1,3831	3,9125	2,829		0,7934	1,9007	2,396	
Amostra 5	1,374	3,9125	2,848		0,7938	1,9007	2,394	

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

O resultado para o ensaio de densidade para o rejeito de mármore, na forma de pó, está compatível com a densidade apresentada em outras referências, como pode ser observado no estudo desenvolvido por Almeida (2014), que teve como resultado uma densidade equivalente a 2,810 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.3 Ensaio de caracterização mecânica e de adesividade

Diversos ensaios mecânicos foram realizados com o objetivo de verificar as mudanças ocorridas nas misturas asfálticas, tanto com adição de cal quanto com adição de rejeito de mármore. Na Tabela 7, por exemplo, é possível verificar os valores médios de resistência à tração por compressão diametral para cada tipo de CP, bem como os percentuais de melhoria em relação à mistura convencional. É possível observar que a adição de cal hidratada-III causou alteração favorável da resistência à tração por compressão diametral da mistura,

promovendo uma melhoria de 17,57% nesta propriedade, quando comparada à mistura convencional. Já a mistura contendo RM, trouxe valores menos significativos de melhoria, proporcionando um aumento de 6,88%.

Apesar de não apresentar os ganhos na proporção encontrada na mistura contendo cal hidratada, os resultados da resistência a tração por compressão diametral, ainda assim, superaram os valores definidos pela DNIT -ES031/2006 e DER/SP - ET-DE-P00/27 (2005), respectivamente de 0,65 MPa e 0,80 MPa.

Bock (2012) observou, em seu estudo, que de fato a cal hidratada promove melhorias nas propriedades mecânicas das misturas. Foi verificado uma melhoria na resistência à tração correspondente a 20% para mistura com adição de cal calcítica e 15% para mistura com cal dolomítica, quando comparadas com uma mistura convencional.

Cavalcante (2001) estudou sobre o efeito de diferentes teores de fileres (2% e 5%), e de 6 diferentes tipos de fileres (areia de campo, pó de pedra, cimento Portland, carbonato de magnésio e cal hidratada), nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas. A autora observou que, em relação aos valores obtidos na resistência à tração estática, estes aumentaram com o aumento do teor de todos os tipos de fileres.

**Tabela 7** - Melhoria percentual em relação à mistura convencional

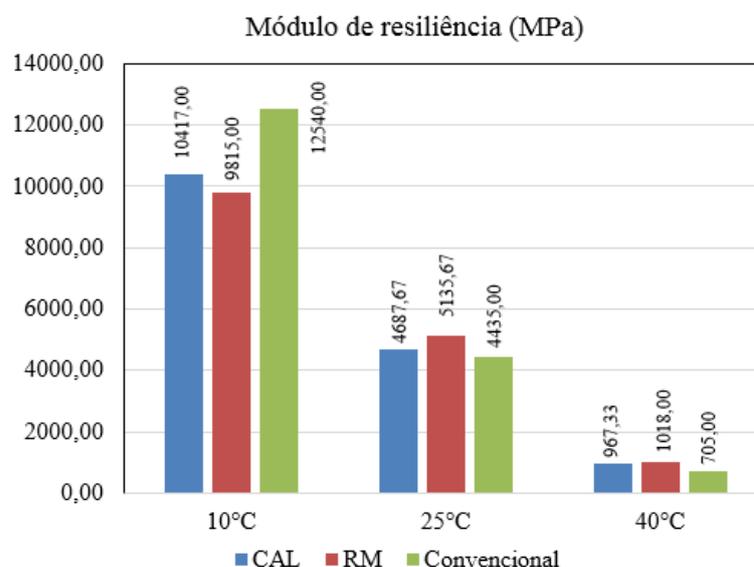
Mistura	Resistência média à tração (MPa)	Aumento percentual em relação à RT da mistura convencional (%)
CAL	1,7024	17,57
RM	1,5476	6,88
Convencional	1,4480	-

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Outro ensaio realizado foi o ensaio de módulo de resiliência. Na Figura 4 pode-se observar os resultados para os módulos de resiliência para cada uma das temperaturas ensaiadas. Quando comparados os módulos de resiliência para uma mesma temperatura, pode-se observar diferenças. As misturas com adição de cal e RM apresentaram valores inferiores quando comparados com o resultado apresentado para mistura convencional, na temperatura de 10°C. Esse foi um comportamento considerado positivo, uma vez que, em temperaturas mais baixas, módulos muito elevados podem contribuir para o surgimento de trincas em revestimentos asfálticos.

Já para as temperaturas de 25°C e 40°C, as misturas com rejeito de mármore e com cal obtiveram módulos superiores ao da mistura convencional, comportamento semelhante ao verificado por Bock (2012) em seu estudo para a temperatura de 25°C. Esse comportamento é desejável, uma vez que, para temperaturas mais altas, o módulo de resiliência precisa ser elevado para que o revestimento resista às deformações permanentes.

**Figura 4** - Comparação dos módulos de resiliência



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

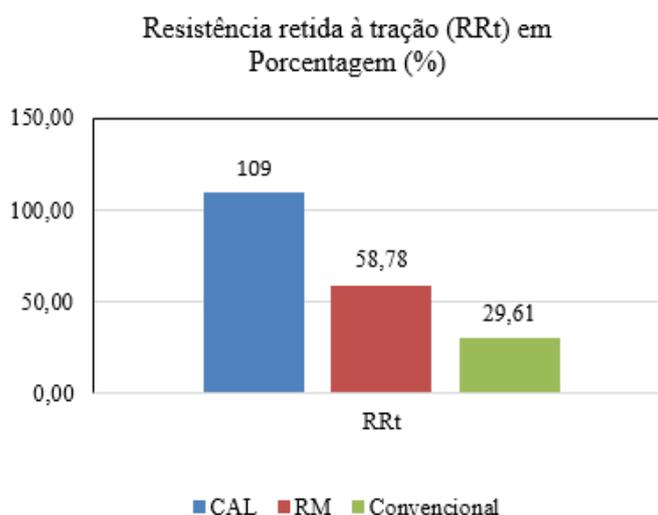
Segundo Núñez *et al.* (2007), a incorporação de 1% de cal com elevado teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  foi suficiente para aumentar de forma significativa os valores do módulo de resiliência. Os resultados relatados pelo pesquisador foram em linha com os obtido nesta pesquisa, com adição de 1,5% de cal a temperatura de 25°C e 40°C.

Em relação à adesividade, realizou-se o ensaio de dano por umidade induzida. O referido ensaio pretende mostrar a susceptibilidade de deslocamento da película de ligante que envolve o agregado, simulando no curto e no longo prazo, com relação ao desempenho e a vida de serviço.

Na Figura 5 é possível observar os resultados de resistência retida à tração, obtidos para as misturas com CAL, RM e a convencional. Os resultados correspondem sobre a razão da resistência à tração dos CPs que foram condicionados (RT2) pelos que não sofreram condicionamento (RT1), e, a partir das médias destes resultados, obteve-se o valor de RRt.

O valor apresentado para a mistura com adição de cal hidratada foi superior ao das misturas com rejeito de mármore e a convencional. De modo geral, a mistura com cal hidratada foi a única que obteve valor de resistência retida à tração acima de 70%, que a norma ASTM D 4867/1998 define como mínimo aceitável.

**Figura 5** - RRt (resistência retida à tração) das misturas



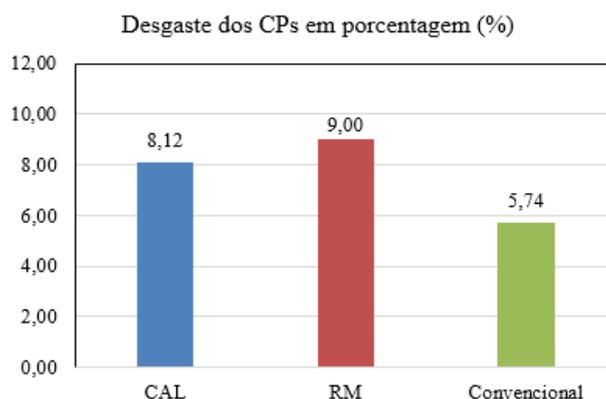
Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Paviani (2015) ao avaliar os efeitos da adição de cal calcítica a resistência retida à tração RRt de uma mistura asfáltica com ligante convencional, obteve um aumento de 68% para 76%. Nesta pesquisa, os resultados apresentaram a mesma tendência de comportamento, ou seja, de aumento da RRt, no entanto, em comparação com a mistura de referência, tivemos aumento para 58,78% contendo RM e para 109,00% na mistura com cal hidratada.

Foi realizado também o ensaio de perda de massa de desgaste por abrasão. O melhor resultado observado foi o da mistura convencional, que teve uma média de desgaste de 5,74%, como pode ser observado na Figura 6. Já para as misturas com adição de cal e rejeito de mármore, os valores ficaram em 8,12% e 9,00%, respectivamente.

Esses aumentos no percentual de desgaste por abrasão em relação à mistura convencional pode ser consequência de uma rigidez mais elevada dessas misturas, conforme se pode notar nos resultados apresentados na Tabela 8. Materiais com elevada rigidez são considerados mais frágeis e, conseqüentemente, podem apresentar uma menor capacidade de resistência a ensaios que realizam impactos, como o ensaio de abrasão Los Angeles.

**Figura 6:** Comparação dos desgastes sofridos



Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Por último realizou-se o ensaio de estabilidade e fluência. Na Tabela 8 são apresentados os valores médios dos ensaios realizados para três corpos de prova para cada mistura.

**Tabela 8 -** Resultados do ensaio de estabilidade e fluência

Mistura	Estabilidade (KN)	Fluência(mm)	Rigidez (KN/mm)
CAL	17,162	2,883	5,953
RM	16,286	2,547	6,394
Convencional	15,317	2,940	5,210

Fonte: Elaborado pelos autores, 2019.

Como se pode observar, o valor da estabilidade para a mistura com cal hidratada se mostrou superior às demais misturas. Já a mistura com rejeito de mármore é a que apresentou maior rigidez, sendo a que possui uma menor capacidade de se deformar até sua ruptura. A mistura convencional apresentou o maior valor de fluência. Todas as misturas apresentam valores de estabilidade dentro do mínimo que a norma DNIT 031/2006 estipula, sendo de 4903,32 KN.

## 5 Considerações finais

Os resultados desta pesquisa mostraram que a incorporação da cal-hidratada ou do rejeito de mármore influenciaram os resultados de adesividade e desempenho mecânico da mistura asfáltica convencional estudada.

A incorporação da cal e do RM propiciaram à mistura asfáltica uma melhora em suas características. Pode-se citar o ensaio de módulo de resiliência, que a tornou menos rígida em temperaturas mais baixas e mais rígida em temperaturas mais elevadas. Acrescenta-se que, no ensaio de resistência à tração, houve um aumento na resistência das misturas com adições se comparado a mistura convencional, ficando acima do especificado em norma.

Já em relação aos efeitos deletérios da água, houve um aumento no valor de RRT da mistura com adição de cal, tendo um desempenho superior ao mínimo especificado em norma de 70%. Também foi verificado que a mistura com adição de RM superou a mistura convencional.

Para os ensaios de estabilidade e fluência, as misturas com cal e com RM apresentaram resultados positivos, ficando dentro das especificações recomendadas pela norma do DNIT 031/2006. O mesmo ocorreu para o ensaio de perda de massa por desgaste, sendo que tanto a mistura com cal quanto a mistura com RM ficaram dentro dos limites da norma DNER – ES 386/99.

Como visto nas considerações realizadas sobre o estudo, a aplicação da cal hidratada e do rejeito de mármore, em substituição a uma pequena parcela do agregado natural, se apresentou apropriada na maioria dos ensaios realizados. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram melhorias das características mecânicas e de adesividade das misturas em relação à mistura convencional, com exceção do ensaio de RRT, onde a mistura com RM não apresentaram a resistência mínima exigida em norma.

Ressaltamos ainda que, uma vez que o efeito do  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  encontrado nas cales produzem benefícios no comportamento mecânico de misturas asfálticas, é provável que as melhorias associadas ao RM estejam ligadas ao efeito filer, promovendo alterações no mástique asfáltico, observando que o resíduo de mármore é basicamente constituído por carbonatos de elevada finura.

## Referências

- AGUIAR, M. C.; SILVA, A. G. P.; GADIOLI, M. C. B. **Caracterização de Resíduos de Mármore para Fabricação de Rocha Artificial**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 22., 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal: IAEA, 2016. Disponível em: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/48/069/48069721.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/069/48069721.pdf). Acesso em: 19 out. 2022.
- ALMEIDA, T. F. **Reaproveitamento de resíduo de pó de mármore e chamote na produção de material cerâmico para isolamento térmica**. 2014. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/completa.pdf>. Acesso em: 19 out. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D4867**: Standard Test for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. West conshohocken: ASTM, 1998.
- ARÊDES, M. L. A. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas utilizando resíduo do beneficiamento do minério de ferro**. 2016. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15617**: petróleo: misturas asfálticas: determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solos: solo: análise granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7809**: cimento, concreto e agregados: agregado graúdo: determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2006.
- BARDINI, V. S. S. **Influência do filer mineral em propriedades de misturas asfálticas densas**. 2013. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura de Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. DOI: 10.11606/T.18.2013.tde-17052013-090958. Acesso em: 19 out. 2022.
- BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: Petrobrás; ABEDA, 2010. Disponível em: <https://www.ufff.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-1-Introdu%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 19 out. 2022.
- BOCK, A. L., Hartmann, D. A., Budny, J., Ceratti, J. A. P., Specht, L. P. **Estudo Laboratorial Sobre os Efeitos de Diferentes Formas de Adição de Cal a Concreto Asfáltico**. Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)., v.09, p.60 - 69, 2009.
- BOCK, A. L. **Desempenho à fadiga de misturas em concreto asfáltico com diferentes formas de incorporação de cal**. 2009. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2009a.
- BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/56586>. Acesso em: 19 out. 2022.

- BOCK, A. L. *et al.* Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n.14, p. 59-69, out. 2009b. Disponível em: [http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art7\\_N14.pdf](http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art7_N14.pdf). Acesso em: 19 out. 2022.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER.. **ME 138/94 - Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. **ME 043/95 - Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro: DNER, 1995.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. **ME 195/97 – Agregados – determinação da absorção e da massa específica de agregados graúdos**. Rio de Janeiro: DNER, 1997.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. **ME 035/98 – Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Rio de Janeiro: DNER, 1998.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. **ME 194/98 – Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro: DNER, 1998.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. **ES 386/99 – Pavimentação – Pré-misturado a quente com polímero – camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro: DNER, 1999.
- BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - DNER. **ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Rio de Janeiro: DNER, 1999.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 031/2006 - Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificações de Serviço**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.
- BRASIL. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 135/2018 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro: DNIT, 2018.
- CAVALCANTE, V. T. F.; SOARES, J. B. O efeito do tipo e do teor de filer nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. *In: Reunião Anual de Pavimentação*, 33., 2001, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABPv, v. 1, 2001. p. 507-518.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT. Anuário CNT do Transporte 2019: estatísticas consolidadas. **CTN**, Brasília, 2019a. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2019/>. Acesso em: 19 out. 2022.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE - CNT (org.). **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT, 2019b. 236 p.
- GRANDE, W. R. **Efeitos da cal hidratada e do ácido polifosfórico nas propriedades mecânicas e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas**. 2011. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18143/tde-14092011-103353/publico/WRG.pdf>. Acesso em: 19 out. 2022.
- GURBUZ, A. Marble powder to stabilise clayey soils in sub-bases for road construction. **Road Materials And Pavement Design**, [S.l.], v. 16, n. 2, p. 481-492, 12 mar. 2015. DOI: 10.1080/14680629.2015.1020845. Acesso em: 19 out. 2022.
- HICKS, G. H. **Moisture damage in asphalt concrete**. Washington: Transportation Research Board, 1991. (National Cooperative Highway Research Program - NCHRP; Syntesis of Highway Practice, 175). Disponível em: [https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp\\_syn\\_175.pdf](https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/nchrp/nchrp_syn_175.pdf). Acesso em: 19 out. 2022.

LITTLE, D. N., EPPS, J. A. **The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt.** [S.l.]: National Lime Association; The Versatile Chemical, 2001. Disponível em: <https://www.lime.org/documents/other/ABenefit.pdf>. Acesso em: 19 out. 2022.

NÚÑEZ, W. P. *et al.* Produzindo misturas asfálticas de elevado desempenho com emprego de cal hidratada. *In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO*, 38.; *ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA*, 12., 2007, Manaus. **Anais [...]**. Manaus: RAVv/ENACOR, 2007. ISSN: 1807-5568 RAPv.

PAVIANI, T. M. **Efeitos da adição de cal hidratada no comportamento mecânicos de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico.** 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/131341>. Acesso em: 19 out. 2022.

RIBEIRO, R. C. C. *et al.* **Utilização de rejeitos de rochas ornamentais em misturas asfálticas.** Rio de Janeiro: CETEM, 2007. (Série Tecnologia Mineral, 87).

SÃO PAULO (Estado). DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. **ET-DE-P00/27 – Concreto Asfáltico.** São Paulo: DER/SP, 2005.

## Sobre os autores

---

### **Lucas Gonçalves Pereira**

Engenheiro da Mobilidade pela Universidade Federal de Itajubá (Unifei) - Campus Itabira (MG) e pós graduando em Processos de Manutenção da Faculdade Educamais.

### **Marconi Oliveira de Almeida**

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Vale do Rio Doce (Univale - 1996) e mestrado na área de Construção Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC - 1999). Trabalhou durante 10 anos na Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF - Juazeiro/BA), tanto na sua implementação como na consolidação do Curso de Engenharia Civil. Atualmente é Professor Adjunto IV Mestre da Universidade Federal de Itajubá - Campus Itabira/MG, estando lotado no Instituto de Engenharias Integradas (IEI), lecionando no curso de Engenharia da Mobilidade e exercendo o posto de coordenador do Laboratório de Pavimentação (LABPAV). Tem experiência na área de Engenharia Civil e Engenharia da Mobilidade, com ênfase em Materiais e Componentes da Construção, atuando principalmente nos seguintes temas: reciclagem, recuperação, concreto, patologia, concreto com fibras, pavimentação e manutenção de rodovias e ferrovias.

### **Sérgio Pacífico Soncim**

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Ouro Preto (1998), mestrado em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia (2002) e doutorado em Ciências - Infraestrutura de Transportes - pela Universidade de São Paulo (2011). Lecionou no Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal da Bahia entre 2004 e 2013. Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de Infraestrutura de Transportes, com ênfase em Pavimentação, atuando principalmente nos seguintes temas: pavimentos asfálticos e sistemas de gerência.

### **Carlos Augusto Souza Oliveira**

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (2000), mestrado (2004) e doutorado (2007) na área de Ciência e Engenharia de Materiais no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal de Itajubá, lecionando no Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Produção e no Curso de Graduação em Engenharia da Mobilidade. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em Materiais e Métodos Construtivos, atuando principalmente com os seguintes temas: aproveitamento de resíduos, desenvolvimento de produtos para a construção civil, estudos de concretos especiais, durabilidade de materiais e manifestações patológicas em edificações.

---

**Avaliado em:** 18.04.2022

**Aceito em:** 01.11.2022