

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE RESÍDUO DE POLIMENTO DE PORCELANATO NAS PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Carlos Alexandre Scheffer (1), Luiz Renato Steiner (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)Carlosalexandres.1@hotmail.com, (2)Luizsteiner@unesco.net

RESUMO

Com a baixa qualidade das rodovias existentes no país, o emprego de novos materiais tem sido muito estudado com o objetivo de assegurar melhores condições de rolamento e prolongar a vida útil dos pavimentos, reduzindo assim os custos com manutenção. Aliado a crescente preocupação com a redução e tratamento dos resíduos industriais e urbanos, surge a possibilidade de implantação do Resíduo gerado no processo de polimento de placas de porcelanato (RPP) em misturas asfálticas densas. Para análise da influência que a adição do RPP terá nas propriedades das misturas asfálticas, foram formulados três traços de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ): o primeiro composto apenas por agregados minerais, um segundo com adição de 2% de cal hidratada do tipo CH-01 e um terceiro com adição de 2% de resíduo de polimento de porcelanato. A dosagem das misturas asfálticas foi realizada por meio da metodologia Marshall (DNER-ME 043/95) para a determinação do teor ótimo de ligante para cada composição. Após a determinação do teor ótimo de ligante, foram moldados seis corpos de prova cilíndricos para cada composição em seus respectivos teores ótimos e estes foram submetidos aos ensaios de resistência a tração por compressão diametral e ao ensaio de desgaste por abrasão (Cantabro). Os resultados destes ensaios mostraram que a mistura com adição de RPP apresentou o menor teor ótimo de ligante entre as misturas estudadas, mantendo uma alta resistência a tração e um percentual de desgaste por abrasão semelhante ao das misturas com maior quantidade de ligante em sua composição. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a adição de RPP tem influência positiva nas propriedades de misturas asfálticas de graduação densa, permitindo a utilização deste resíduo em composições de misturas asfálticas, desta forma contribuindo com a gestão ambiental, com economia no uso de agregados naturais e diminuindo a quantidade de ligante empregada na mistura.

Palavras-Chave: Resíduo do polimento de porcelanatos. Misturas asfálticas densas. Pavimentação.

1. INTRODUÇÃO

Pavimento é uma estrutura construída sobre a superfície final de terraplanagem, destinada a resistir e distribuir os esforços gerados pelo tráfego dos veículos, assegurando melhores condições de rolamento, conforto, economia e segurança. Os pavimentos rodoviários são classificados, de uma forma geral, em flexíveis, semi-

rígidos e rígidos. Sendo atualmente o pavimento flexível o tipo mais utilizado no Brasil e no mundo.

Os pavimentos flexíveis são formados por quatro camadas principais: reforço do subleito, sub-base, base, revestimento asfáltico. Onde o revestimento é constituído por uma mistura de agregados e ligante asfáltico.

“O revestimento asfáltico é a camada superior, destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento”. (BERNUCCI, et al., 2007; p. 9).

Segundo estudo realizado pela CNT (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2016), sobre as condições das rodovias brasileiras, mais de 60% apresentam algum tipo de problema e foram classificadas como regular, ruim ou péssima no estado geral. Além de registrar que 48,3% das rodovias pesquisadas possuem deficiências no Pavimento.

Com a baixa qualidade das rodovias já existentes, aliada ao crescente aumento de tráfego rodoviário no país, surge o desafio de prolongar a vida útil dos pavimentos, reduzindo assim custos com manutenção.

“Uma opção para promover o aumento da vida útil dos pavimentos é a adição de modificadores de asfalto, que elevam a resistência á fadiga e minimizam as deformações permanentes. Entre estes modificadores, a cal hidratada incorporada á mistura asfáltica vem sendo amplamente utilizada”. (NÚÑEZ, 2007 apud CASTRO, 2011, p.14).

Experiências de campo de órgãos estatais norte-americanos permitem estimar que a cal hidratada adicionada a mistura aumenta a durabilidade do revestimento de 20% a 50 % (EULA, 2010 apud BOCK, 2012, P.42).

A melhoria no desempenho de misturas com a adição de cal hidratada pode ser atribuída em parte ao efeito fíler que a mesma exerce na mistura, onde segundo Bardini, et al., (2010) o material fino preenche os vazios entre os agregados graúdos, diminuindo os vazios do esqueleto mineral e influenciando na lubrificação de agregados maiores interferindo diretamente em características como compactação e teor ótimo do ligante asfáltico. Bock (2012) afirma que a cal hidratada modifica as propriedades superficiais do agregado, permitindo o desenvolvimento de uma composição de superfície e rugosidade mais favoráveis à adesividade ligante-agregado.

A preocupação com a possibilidade de esgotamento dos recursos naturais e os efeitos que a extração dos agregados podem causar sobre o meio ambiente, estimulam o estudo de materiais alternativos. Somado a este fato, o grande número de indústrias cerâmicas na região sul do estado de Santa Catarina, e conseqüentemente o grande número de resíduos e subprodutos gerados por estas, surge como material alternativo o resíduo gerado durante o processo de polimento de placas de porcelanato (RPP).

A indústria do Sul de Santa Catarina, como pólo de produção cerâmica, no processo de produção dos revestimentos cerâmicos, gera, como um dos principais resíduos, a lama do processo de polimento. Segundo Jacoby e Pelisser, (2015) estima-se que as empresas localizadas no sul do estado de Santa Catarina geram 1.000 toneladas por semana.

Este trabalho tem como objetivo principal verificar a possibilidade de incorporação de resíduo de polimento de porcelanato como material alternativo a cal hidratada e analisar a sua influência nas propriedades de misturas asfálticas de graduação densa.

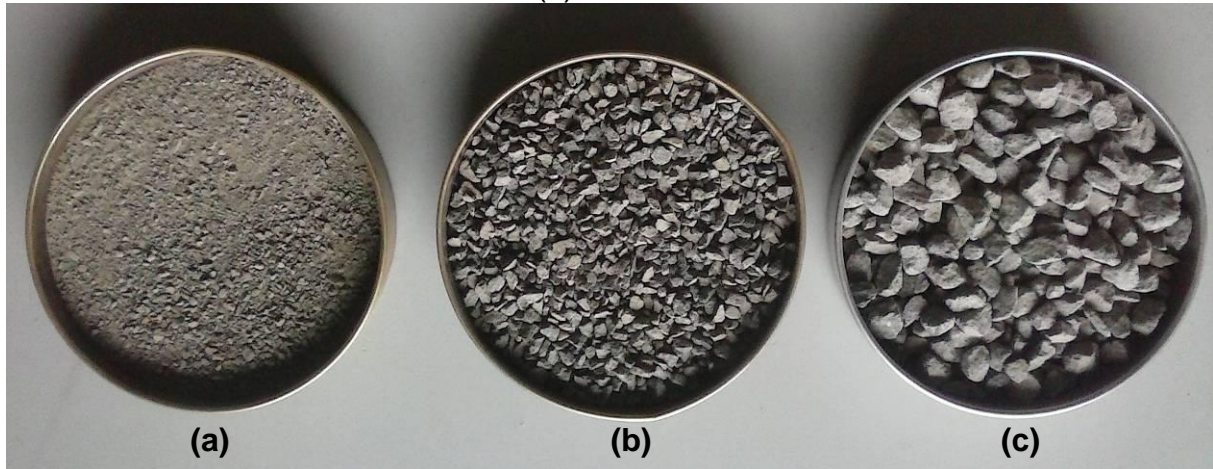
2.MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

2.1.1. Agregados minerais

Os agregados minerais utilizados na pesquisa são de origem diabásica, provenientes da pedreira SBM - Sul Brasileira de Mineração LTDA, localizada no distrito de Rio Maior, município de Urussanga-SC. A figura 1 apresenta os agregados pétreos utilizados na mistura ensaiada.

Figura 1 – Agregados pétreos utilizados na mistura: (a)Pó de pedra, (b)Pedrisco, (c)Brita ¾”



Fonte: Do Autor (2017).

2.1.2. Cal Hidratada CH-01 e Resíduo de Polimento de Porcelanato.

Cal hidratada do tipo CH-01, foi fornecida pelo Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMS), do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

O resíduo de polimento de porcelanato foi cedido por uma indústria de revestimentos cerâmicos da região Sul do estado de Santa Catarina. Devido ao elevado teor de umidade encontrado no material, este foi previamente peneirado em peneira de malhas quadradas de 4,75 mm (nº 4) e seco em estufa pelo período de 24 h a temperatura de $100\pm 5^{\circ}\text{C}$.

A figura 2 apresenta amostras de Cal hidratada e RPP que serão incorporadas as misturas.

Figura 2 – Adições: (a) Cal hidratada, (b) Resíduo de polimento de porcelanato



Fonte: Do Autor (2017).

2.1.4. Ligante Asfáltico

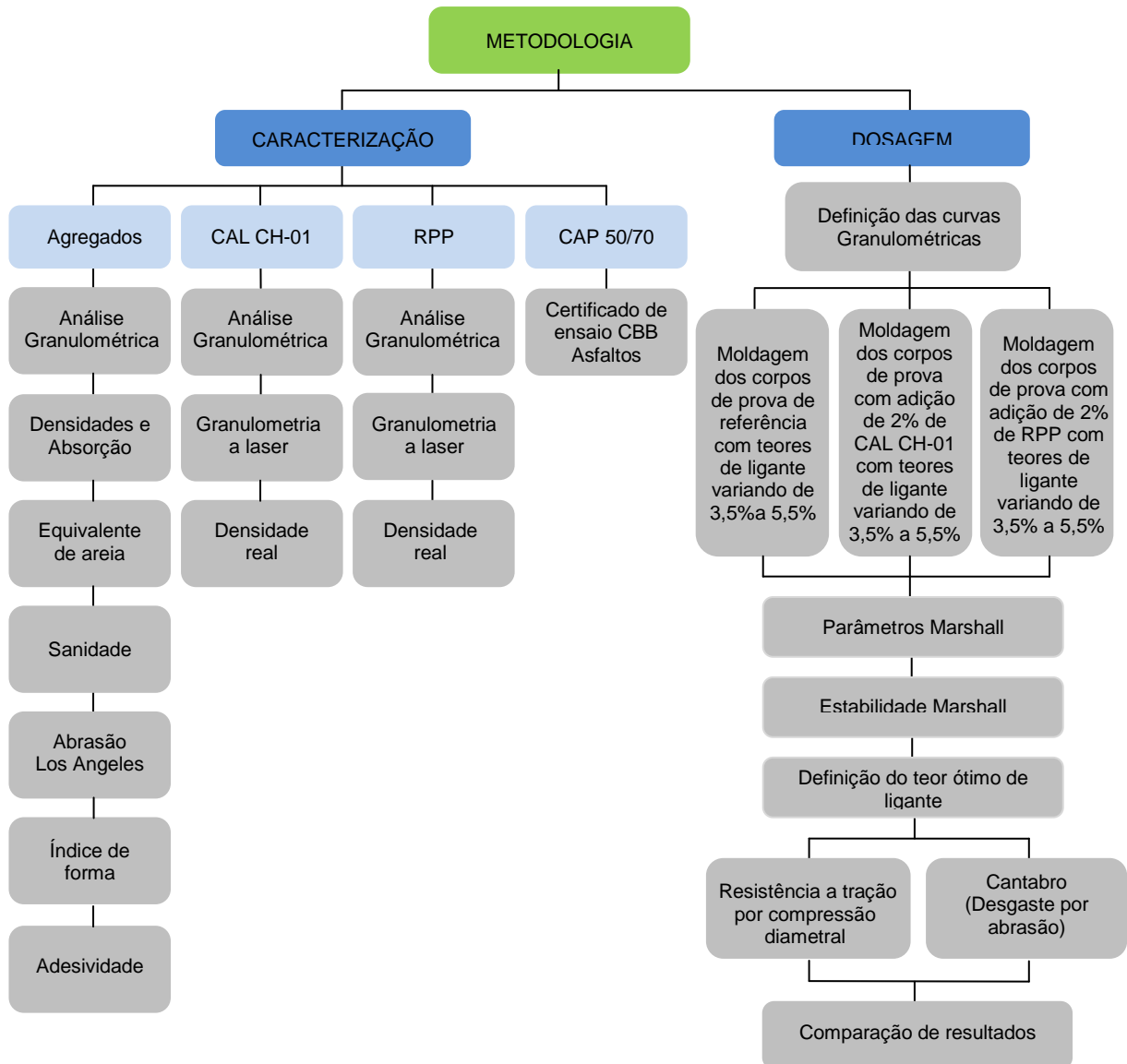
O ligante asfáltico do tipo CAP 50/70 é proveniente da CBB ASFALTOS, localizada na Cidade Industrial de Curitiba, Curitiba-PR e foi fornecido pela empresa SETEP Construções S.A..

2.2.METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa consistiu na moldagem de três traços de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) por meio da metodologia Marshall, conforme DNER-ME 043/95, cuja granulometria se encaixa na faixa C do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT 031/2006 - ES). A primeira composição foi denominada como traço de referência, composto apenas por agregados minerais, um segundo conjunto com adição de 2% de Cal CH-01 e uma terceira composição com adição de 2% de RPP.

As etapas de elaboração da pesquisa estão detalhadas no fluxograma da figura 3.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Do autor (2017).

2.2.1. Caracterização dos materiais

Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação (LMS) e no Laboratório de Caracterização de Materiais (CECAM), ambos do Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT), da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC).

2.2.1.1. Agregados minerais

Para a caracterização dos agregados foram realizados os seguintes ensaios:

- Granulometria (DNER-ME 083/98);
- Equivalente de areia (DNER-ME 054/97);
- Sanidade (DNER-ME 089/94);
- Abrasão “Los Angeles” (DNER-ME 035/98);
- Índice de forma (NBR 7809);
- Adesividade (DNER-ME 078/94);
- Densidade e Absorção (DNER-ME 081/98);
- Densidade do material finamente pulverizado (DNER-ME 085/94);
- Densidade Real – Picnômetro (DNER-ME 093/94).
- Granulometria a laser, medida com um analisador de partículas modelo CILAS 1064.

2.2.1.2. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico foi caracterizado segundo certificado de ensaios, fornecido pela CBB Asfaltos, que contem os seguintes ensaios:

- Penetração (NBR 6576/2007);
- Ponto de amolecimento (NBR 6560/2008)
- Viscosidade Saybolt-Furol (NBR 14950/2003);
- Viscosidade Brookfield (NBR 15184/2005);
- RTFOT – Penetração retida (NBR 6576/2007);
- RTFOT – Aumento do ponto de amolecimento (NBR 6560/2016);
- RTFOT – Ductilidade a 25 C° (NBR 6293/2015);
- RTFOT – Variação em massa (ASTM D 2872/1997);
- Ductilidade a 25 C° (NBR 6293/2001);
- Índice de suscetibilidade térmica (DNER-ME 204/95);
- Ponto de fulgor (NBR 11341/2014).

2.2.1.3. Cal hidratada CH-01 e Resíduo de polimento de porcelanato

Para a caracterização da Cal CH-01 e do RPP foram realizados os seguintes ensaios:

- Análise granulométrica (DNER-ME 083/98);
- Granulometria a laser, medida com um analisador de partículas modelo CILAS 1064;
- Densidade real (DNER-ME 093/94).

2.2.2. Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem das misturas asfálticas tem por finalidade a determinação, por meio de procedimentos experimentais, de um teor de ligante dito ótimo.

2.2.2.1. Definição da Curva Granulométrica.

O Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), na especificação técnica 031/2006-ES, apresenta três composições de concretos asfálticos, conforme tabela 1.

Tabela 1 – Composições de concretos asfálticos.

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95-100	100	-	±7%
1"	25,4	75-100	95-100	-	±7%
¾"	19,1	60-90	80-100	100	±7%
½"	12,7	-	-	80-100	±7%
3/8"	9,5	35-65	45-80	70-90	±7%
Nº4	4,8	25-50	28-60	44-72	±5%
Nº10	2	20-40	20-45	22-50	±5%
Nº40	0,42	10-30	10-32	8-26	±5%
Nº80	0,18	5-20	8-20	4-16	±3%
Nº200	0,075	1-8	3-8	2-10	±2%
Asfalto solúvel no CS2 (+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,7 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	±0,3%

Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

Visando a comparação de resultados, optou-se por utilizar na pesquisa a faixa C da DNIT 031/2006-ES, por ser a faixa mais usual na região.

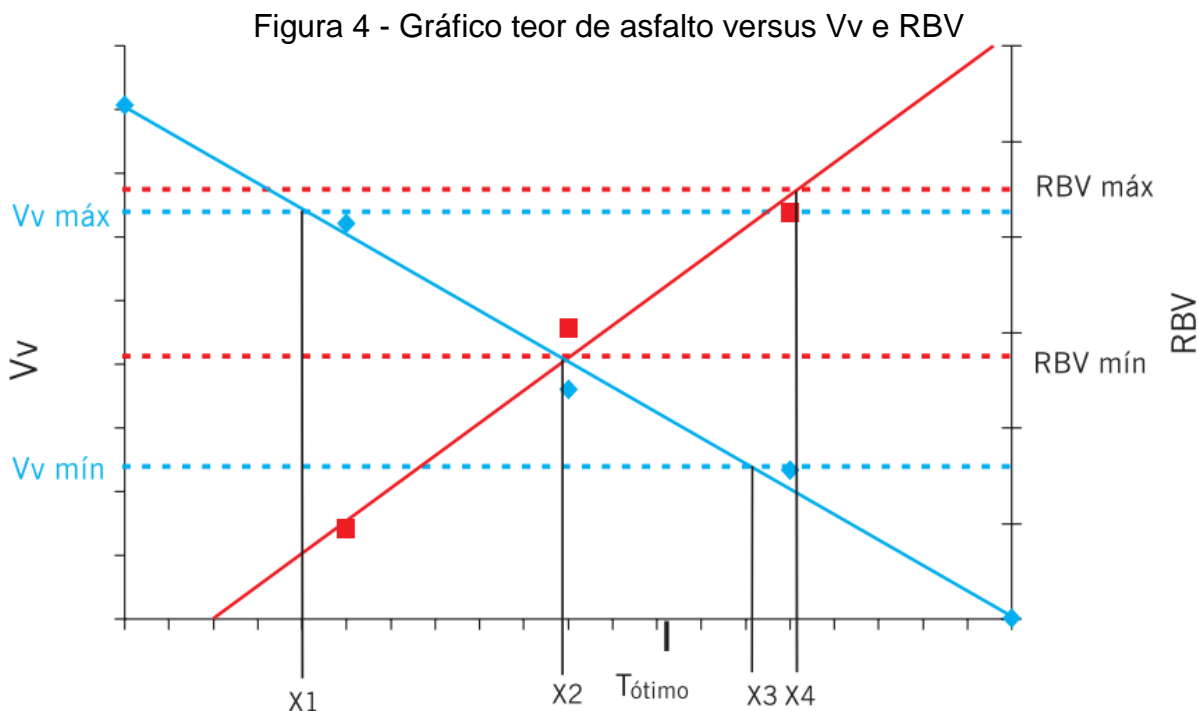
Após a definição da faixa granulométrica, os agregados foram peneirados e separados segundo a sequência de peneiras da sua composição, para que sejam moldados os corpos de prova, respeitando a faixa de projeto preestabelecida.

2.2.2.2. Definição do teor ótimo de ligante

As dosagens das misturas asfálticas foram realizadas de acordo com a metodologia Marshall (DNER-ME 043/95). Para isso moldaram-se três corpos de prova para cada teor, adotando 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% e 5,5% de CAP 50/70 e compactando com 75 golpes por face.

Para a determinação do teor ótimo de ligante foi utilizada uma metodologia sugerida por Bernucci, et al., (2007), baseada em dois parâmetros volumétricos, Volume de Vazios da mistura asfáltica (Vv) e Relação Betume Vazios (RBV). Onde é traçado um gráfico (figura 4) do teor de asfalto (eixo "x") versus Vv (eixo "y1") e RBV (eixo "y2"). A este gráfico são adicionadas linhas de tendência para os valores médios

encontrados para os dois parâmetros e os limites específicos das duas variáveis. A partir da interseção entre as linhas de tendência do Vv e do RBV com os seus respectivos limites, são determinados quatro teores de CAP (X1, X2, X3 e X4). O teor ótimo é determinado tomando a média entre os dois teores centrais.



Fonte: Do autor (2017).

A escolha por este método de determinação do teor ótimo de ligante se deve as diferenças volumétricas entre os materiais utilizados na pesquisa, em virtude das diferentes granulometrias e massas específicas dos materiais pétreos, da Cal CH-01 e do RPP.

As composições devem satisfazer alguns requisitos especificados pela norma DNIT 031/2006 – ES, conforme tabela 2.

Tabela 2 – Requisitos de dosagem pra misturas asfálticas densas.

Características	Método de ensaio	Camada de rolamento	Camada de ligação
Porcentagem de vazios, %	DNER-ME 043	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	DNER-ME 044	75-82	65-72
Estabilidade, mínima, (Kgf)	DNER-ME 045	500	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25 °C, mínima, (Mpa)	DNER-ME 138	0,65	0,65

Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes.

2.2.2.3. Resistência a tração por compressão diametral

Para a determinação da resistência a tração, foram moldados três corpos de prova no teor ótimo de cada conjunto e submetidos ao ensaio de resistência a tração por compressão diametral, segundo a norma DNIT 136/2010–ME.

2.2.2.4. Cantabro

O ensaio Cantabro foi realizado segundo a norma DNER-ME 383/99, com o objetivo de determinar a perda por desgaste em misturas betuminosas. Este ensaio é indicado para tipos de misturas asfálticas mais suscetíveis a desagregação, como por exemplo, as do tipo CPA (Camada Porosa de Atrito). Mas para verificar se o RPP irá influenciar na coesão da mistura, foi adotada esta metodologia de avaliação. Foram moldados três corpos de prova no teor ótimo predefinido, para cada composição, e estes foram submetidos, individualmente, a 300 revoluções na máquina “Los Angeles”, com velocidade de 30 r.p.m. a 33 r.p.m., a uma temperatura de 25°C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

3.1.1. Agregados minerais

Os ensaios de caracterização e a análise granulométrica dos agregados minerais são apresentados nas tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Características dos agregados minerais.

Ensaio	Brita 3/4	Pedrisco	Pó de pedra	Limites
Densidade real	3,057	3,036	3,02	---
Densidade aparente	2,978	---	---	---
Absorção	0,90%	---	---	---
Sanidade	0,61%	---	---	máx. 12%
Equivalente de areia	---	---	65%	mín. 55%
Adesividade	Satisfatório	---	---	---
Abrasão Los Angeles	13,62%	---	---	máx. 50%

Fonte: Do autor (2017).

Tabela 4 – Granulometria dos agregados minerais

Peneira		Porcentagem passante (%)		
Malha	mm	Brita 3/4"	Pedrisco	Pó de pedra
3/4"	19,1	100	100	100
1/2"	12,7	37,7	100	100
3/8"	9,5	12,8	100	100
Nº 4	4,8	0,1	7,8	97,7
Nº 10	2	0,1	0,6	65,3
Nº 40	0,42	0,1	0,6	34,5
Nº 80	0,18	0,1	0,6	23,1
Nº 200	0,075	0,1	0,5	12,5

Fonte: Do autor (2017).

A forma das partículas dos agregados foi caracterizada segundo a norma ABNT NBR 8809, definindo a forma do agregado utilizado como 87% cúbica, 12% lamelar e 1% alongada.

Todos os agregados minerais atenderam aos parâmetros estabelecidos na especificação de serviço do DNIT 031/2006.

3.1.2. Ligante asfáltico

As propriedades do ligante asfáltico são apresentadas na tabela 5 e enquadram-se dentro das especificações vigentes no Brasil.

Tabela 5 – Certificado de ensaios CAP 50/70.

Característica	Especificação	Resultado	Unidade
Penetração	50 a 70	55	0,1 mm
Ponto de amolecimento	46 min	49	°C
Viscosidade Saybolt-Furol			
a 135 °C, mín.	141 mín.	140,9	
a 150 °C, mín.	50	84,7	s
a 177°C, mín.	30	33,3	
Viscosidade Brookfield			
a 135°C, mín. SP 21, 20 rpm, mín.	274 mín.	278	
a 150 °C - SP 21	112 mín.	156	cp
a 177 °C - SP 21	57 a 285	60	
RTFOT - Penetração retida	55 mín.	65	%
RTFOT - Aumento do ponto de amolecimento	8 máx.	2,2	°C
RTFOT - Ductilidade a 25 °C	20 mín.	> 147	cm
RTFOT - Variação em massa	(-0,50) a (+0,50)	0,036	%
Ductilidade a 25 °C	60 mín.	>147	cm
Índice de Suscetibilidade Térmica	(-1,5) a (+0,7)	-1,2	
Ponto de Fulgor	235 mín.	>236	°C

Fonte: REFAP/OT/QP – PETROBRAS (2017)

3.1.3. Cal hidratada CH-01 e Resíduo de Polimento de Porcelanato

A tabela 6 apresenta a análise granulométrica das amostras de Cal CH-01 e RPP.

Tabela 6 – Análise granulométrica das amostras de Cal CH-01 e RPP

Peneira		Porcentagem passante (%)	
Malha	mm	Cal CH-01	RPP
3/4"	19,1	100	100
1/2"	12,7	100	100
3/8"	9,5	100	100
Nº 4	4,8	100	100
Nº 10	2	100	100
Nº 40	0,42	100	97,7
Nº 80	0,18	100	96,3
Nº 200	0,075	98	94,6

Fonte: Do autor (2017).

Com base nos dados exibidos na tabela 6, pode-se observar que a amostra de Cal CH-01 tem em sua composição apenas partículas com tamanho inferior a 0,18 mm. Já a amostra de RPP teve 2,3% de material retido na peneira nº40 (0,42 mm), o que segundo a especificação de material DNER 367 faz com que o resíduo não possa ser enquadrado em sua totalidade como material de enchimento para misturas betuminosas, essas partículas de maior dimensão são oriundas de fragmentos do porcelanato e de materiais abrasivos utilizados no processo de polimento e retífica das placas.

A densidade real média destes agregados, obtidas através do método do picnômetro, foram de 2,449 g/cm³ para a amostra de Cal CH-01 e de 2,550 g/cm³ para o RPP.

3.1.4. Análise granulométrica a laser.

O ensaio de granulometria a laser realizado nos agregados com material passante na peneira Nº200 determinou o diâmetro médio dessas partículas e possibilitou a análise da distribuição granulométrica das partículas com tamanho nominal inferior a 0,075 mm, como podemos observar na tabela 7.

Tabela 7 – Granulometria a laser dos agregados finos

Ø %	DIÂMETRO (µm)		
	Pó de pedra	Cal CH-01	RPP
Ø a 10%	2,65	1,64	2,01
Ø a 50%	21,07	11,19	9,15
Ø a 90%	52,88	31,73	27,06
Ø médio	25,05	14,27	12,00

Fonte: Do autor (2017).

A tabela 7 demonstra que a amostra de RPP foi a que apresentou partículas de menor dimensão entre os agregados utilizados na pesquisa. Essa granulometria menor do RPP é determinada pelas ferramentas abrasivas utilizadas no processo de polimento e retifica das peças cerâmicas.

3.2. Dosagem das misturas asfálticas

3.2.1. Composição granulométrica

Buscando o enquadramento das misturas com e sem adições na faixa C (DNIT 031/2006) foram formuladas as composições conforme as tabelas 8 e 9. A figura 5 apresenta as curvas granulométricas das misturas.

Tabela 8 – Composição granulométrica

Mistura	Brita "3/4"	Pedrisco	Pó de pedra	Cal CH-01	RPP
Referência	18%	37%	45%	0%	0%
2% Cal CH-01	18%	37%	43%	2%	0%
2% RPP	18%	37%	43%	0%	2%

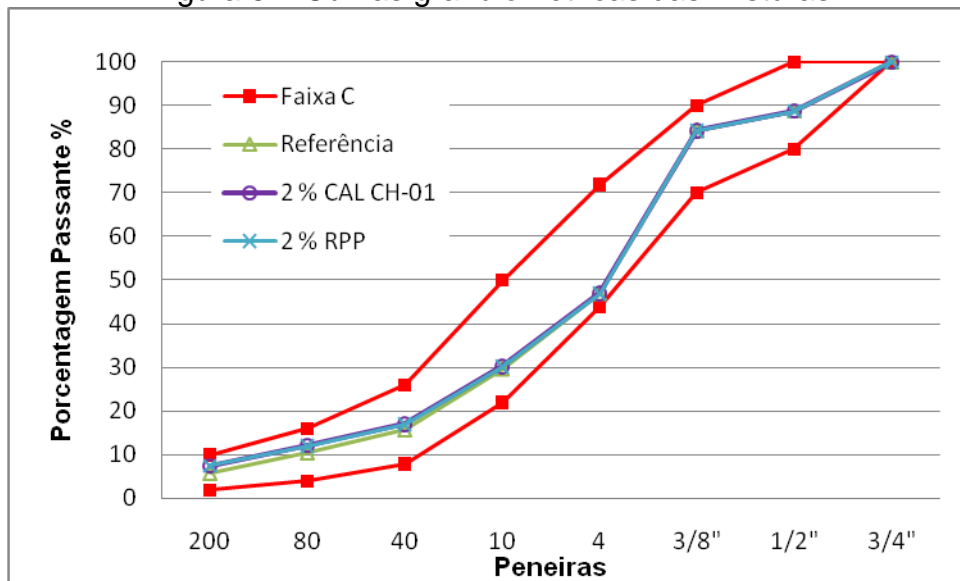
Fonte: Do autor (2017).

Tabela 9 – Granulometria das composições

Malha	Peneira mm	Porcentagem passante (%)		
		Referência	2% Cal CH-01	2% RPP
3/4"	19,10	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,70	88,78	88,78	88,78
3/8"	9,50	84,30	84,30	84,30
Nº 4	4,80	46,96	47,00	47,00
Nº 10	2,00	29,62	30,31	30,31
Nº 40	0,42	15,78	17,09	17,05
Nº 80	0,18	10,62	12,16	12,08
Nº 200	0,08	5,81	7,52	7,46

Fonte: Do autor (2017).

Figura 5 – Curvas granulométricas das misturas



Fonte: Do autor (2017).

Na tabela 9 e figura 5 pode-se observar que os traços com 2 % de RPP e 2% de CAL CH-01 tem granulometria muito semelhantes, já quando comparados ao traço de referência nota-se uma pequena alteração na curva granulométrica da mistura a partir da peneira nº 4, apresentando uma quantidade maior de agregados de menor dimensão nos traços com adições.

3.2.2. Parâmetros de dosagem.

Os resultados dos ensaios para a determinação dos teores ótimos de ligante das três composições estão detalhados nas tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10 – Resultado dosagem Marshall do traço de referência.

Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
3,50	2,689	4,80	14,20	66,20	1223,00	2,05
4,00	2,694	3,73	14,52	74,23	1529,00	2,26
4,50	2,687	3,10	15,20	79,70	1380,00	2,64
5,00	2,692	2,00	15,50	87,00	1155,00	2,10
5,50	2,692	1,10	15,91	93,07	898,70	1,26

Fonte: Do autor (2017).

Tabela 11 – Resultado dosagem Marshall traço com adição de Cal CH-01

Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
3,50	2,656	4,94	14,19	65,22	1507,10	2,34
4,00	2,654	4,14	14,70	71,89	1559,40	2,97
4,50	2,673	2,57	14,54	82,33	1477,30	2,52
5,00	2,670	1,79	15,08	88,10	1114,82	3,22
5,50	2,673	0,81	15,44	94,74	1037,83	3,05

Fonte: Do autor (2017).

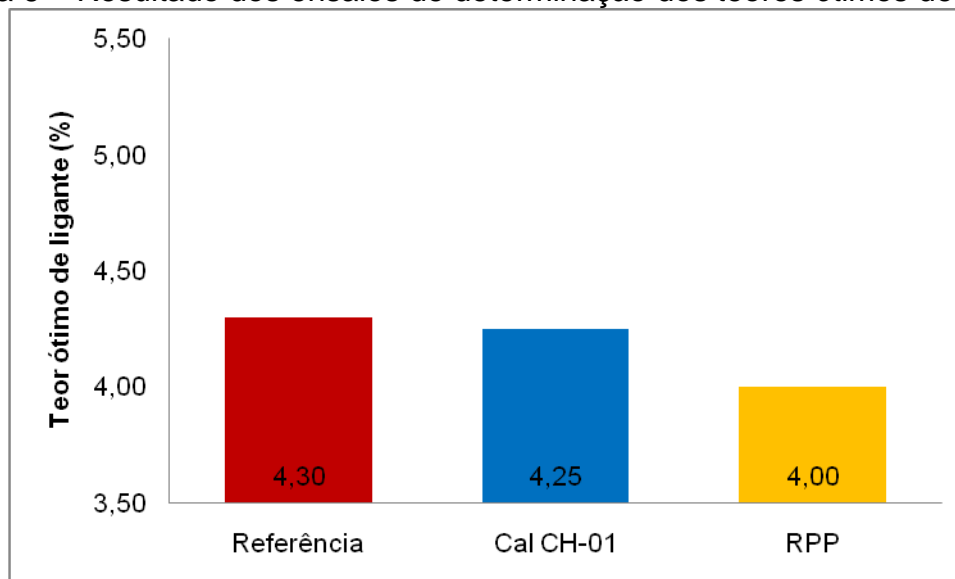
Tabela 12 - Resultado dosagem Marshall traço com adição de RPP.

Teor de ligante (%)	Gmb (g/cm ³)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	Estabilidade (Kgf)	Fluência (mm)
3,50	2,669	4,48	13,78	67,48	1398,70	2,45
4,00	2,683	3,10	13,78	77,52	1525,30	2,64
4,50	2,693	1,84	13,90	86,77	1103,50	2,32
5,00	2,679	1,47	14,80	90,07	1035,53	2,74
5,50	2,667	1,03	15,63	93,40	852,60	2,99

Fonte: Do autor (2017).

A partir dos parâmetros Vv e RBV apresentados nas tabelas 10, 11 e 12 foram determinados os teores ótimos de ligante de cada mistura, como pode ser observado na figura 6.

Figura 6 – Resultado dos ensaios de determinação dos teores ótimos de ligante



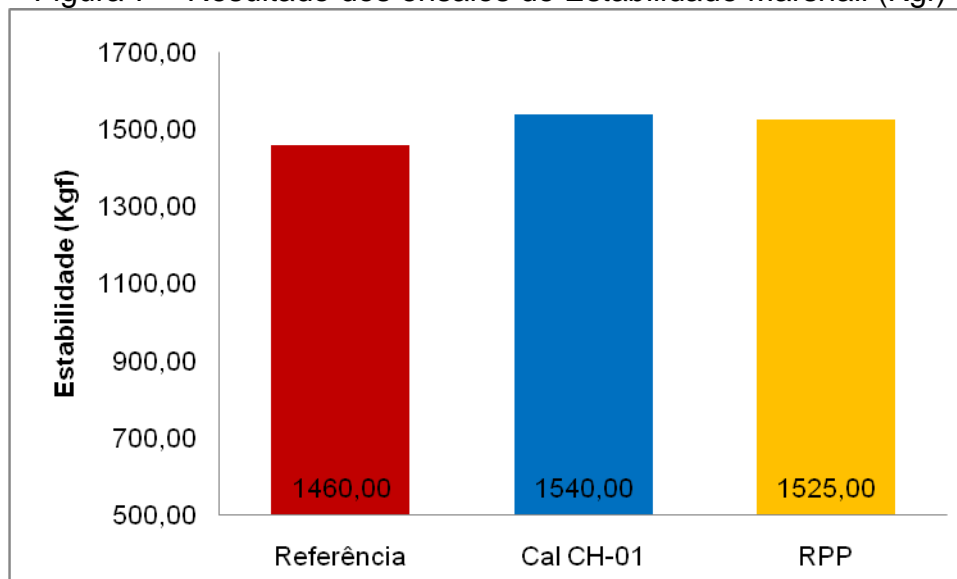
Fonte: Do autor (2017).

Pode-se observar na figura 6, que as adições proporcionaram uma redução no teor ótimo de ligante e que a mistura com adição de RPP apresentou o menor teor ótimo de ligante entre as composições estudadas, apresentando uma redução de 6,98% quando comparado a de referência e de 5,88% quando comparado a com adição de Cal CH-01. Este comportamento pode ser atribuído a maior quantidade de material fino e conseqüentemente ao menor volume de vazios contidos nas misturas com adições.

3.2.3. Estabilidade Marshall e Fluência.

A figura 7 apresenta os resultados dos ensaios de Estabilidade Marshall das composições em seus respectivos teores ótimos.

Figura 7 – Resultado dos ensaios de Estabilidade Marshall (Kgf)

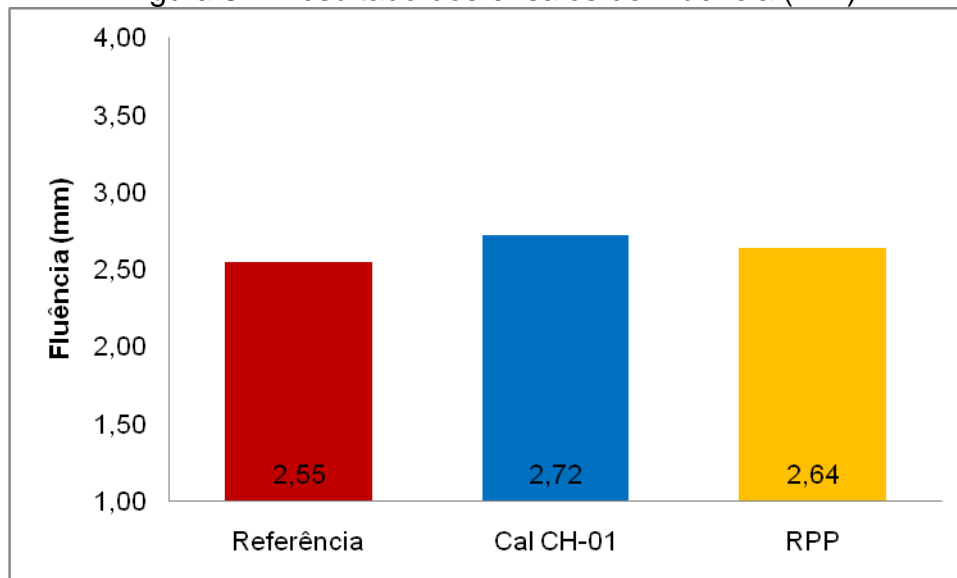


Fonte: Do autor (2017).

De posse dos dados exibidos na figura 7, observa-se que todas as composições apresentaram uma estabilidade média bem superior ao valor mínimo exigido pela especificação DNIT 031/2006-ES, que é 500 Kgf. A mistura que obteve o melhor desempenho foi a com adição de Cal CH-01 apresentando uma resistência ao cisalhamento (estabilidade) de 1540 Kgf, seguida pela composição com adição de RPP. Esse ganho de resistência ao cisalhamento não misturas com adições pode ser relacionado ao aumento da viscosidade da mistura, que segundo Bardini, et al., (2010) está relacionada com a consistência do mástique, que é a mistura de ligante

e fíler. O fíler ativa o asfalto, encorpando-o, e fazendo com que o mástique tenha maior viscosidade e conseqüentemente, aumentando o ponto de amolecimento, diminuindo a suscetibilidade térmica e aumentando a resistência aos esforços de cisalhamento. Na figura 8 pode-se observar a fluência obtida para cada uma das composições, em seus respectivos teores ótimos

Figura 8 – Resultado dos ensaios de Fluência (mm)



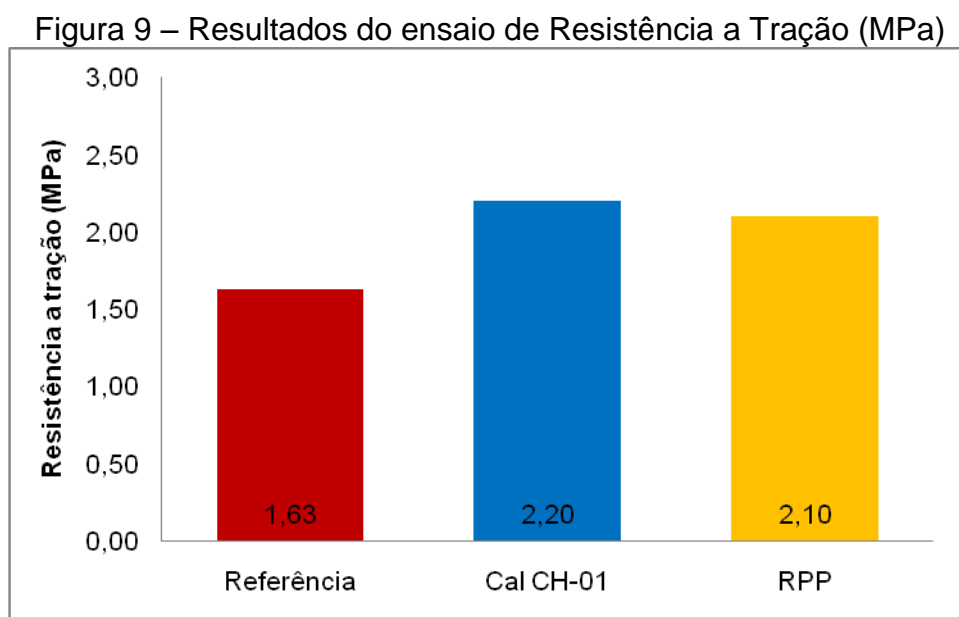
Fonte: Do autor (2017).

Quanto á fluência, vale lembrar que a especificação de serviço do DNIT 031/2006 não determina limites para este parâmetro, portanto para melhor avaliar estes dados foram buscados os limites estabelecidos na norma DEINFRA-SC-ES-P-05/16 que estabelece uma faixa de 2,0 a 4,0mm. Com relação aos dados apresentados na figura 8, pode-se observar que as composições com adições de Cal CH-01 e RPP apresentaram maiores deslocamentos verticais até a ruptura do corpo de prova, este aumento está relacionado ao efeito lubrificante que o fíler exerce no mástique das misturas, afastando os agregados de maior dimensão, dando mobilidade a estes e permitindo que as misturas asfálticas absorvam maiores deformações, minimizando o aparecimento de fissuras. Já o menor deslocamento da mistura com adição de RPP quando comparada a com adição de CAL CH-01 pode ser atribuída ao menor diâmetro das partículas do resíduo, o que segundo Bardini, et al., (2010) esta ligado diretamente a viscosidade do mástique, quanto menor a partícula, maior a incorporação do mineral no ligante, deixando a mistura mais rígida. Como o RPP dentre as misturas aqui estudadas apresenta o menor tamanho de partícula,

disponibiliza menos ligante livre no mástique e isto resulta em uma viscosidade mais elevada dando menos mobilidade às partículas maiores da mistura asfáltica.

3.2.4. Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os resultados encontrados no ensaio de Resistência a tração por compressão diametral das composições estudadas estão apresentados na figura 9.



Fonte: Do autor (2017).

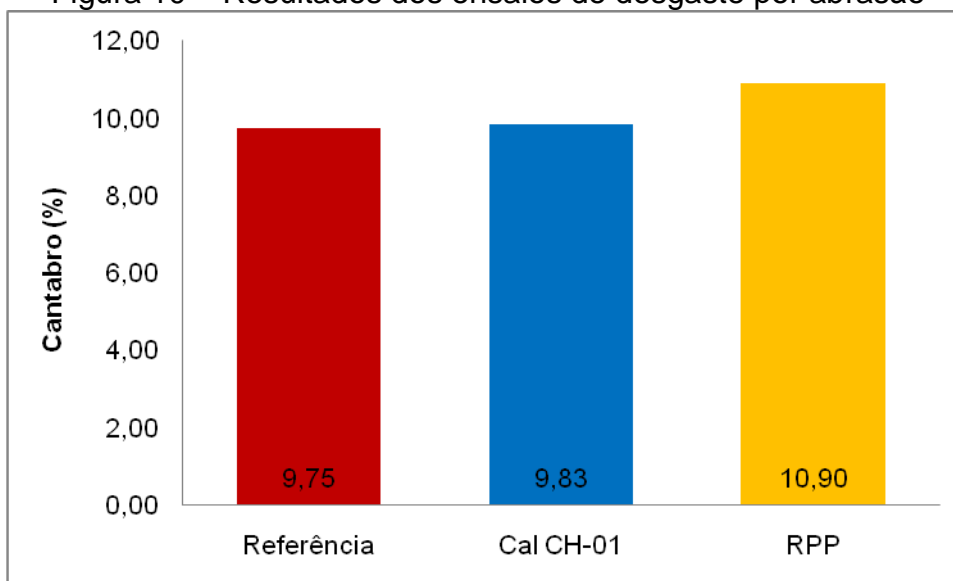
Pode-se constatar que as três composições estão de acordo com a especificação DNIT031/2006-ES, e que a mistura que apresentou maior resistência foi a composição com adição de Cal CH-01, seguida de perto pela composição com adição de RPP. A resistência na mistura que contém apenas agregados pétreos caiu 25,91% quando comparado a mistura com adição de Cal CH-01. Essa queda de resistência pode ser atribuída ao maior teor de ligante e a menor quantidade de material passante a partir da peneira nº4, ou seja, a Cal CH-01 e o RPP promovem o efeito filer, que conforme Bardini, et al., (2010) diminui os vazios do esqueleto mineral, dando maior compacidade ao sistema. Também, segundo Bock (2012), a Cal CH-01 modifica as propriedades superficiais do agregado mineral, aumentando à rugosidade e conseqüentemente a aderência entre o ligante e o agregado, fazendo com que a mistura fique mais coesa e assim aumentando sua resistência a tração. Desta forma podemos presumir que o RPP promove efeito semelhante sobre

o esqueleto mineral uma vez que os resultados são muito semelhantes, em torno de 4,55% menor, que a composição com adição de Cal.

3.2.5. Cantabro (Desgaste por abrasão)

De acordo com os resultados dos ensaios, apresentados na figura 10, é possível observar que a mistura que apresentou a menor porcentagem de desgaste foi a mistura de referência, seguida pela composição com adição de Cal CH-01. A maior porcentagem de desgaste apresentada foi com adição de RPP, isso se deve ao menor teor de ligante, que é o grande responsável pela coesão do esqueleto pétreo da mistura.

Figura 10 – Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão



Fonte: Do autor (2017).

3. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos nos ensaios realizados foi possível chegar às seguintes conclusões:

- A adição de RPP exerce uma influência positiva na mistura, visto que esta apresentou uma redução significativa do teor de ligante asfáltico, que foi de 6,98% com relação à mistura de referência, e de 5,88% em relação à composição com adição de Cal CH-01. Na prática essa redução pode proporcionar uma grande economia, levando em consideração que o componente de maior custo nas misturas é geralmente o ligante asfáltico.
- Para o ensaio de resistência a tração, a mistura que apresentou o melhor desempenho foi a com adição de Cal CH-01, seguida pela mistura com adição de RPP. Já a mistura de referência apresentou uma resistência de 22,38% inferior ao obtido na composição com adição de RPP. Mesmo com a redução no teor de ligante asfáltico as misturas com adição de RPP possui resistência a tração superior a de referência e bem semelhante a com adição de Cal CH-01, o que demonstra que o resíduo favorece a relação entre agregado e ligante.
- Com relação ao desgaste, a composição com incorporação de RPP apresentou a maior porcentagem de desgaste entre as misturas estudadas. Levando em consideração a tendência de se obter menores percentuais de desgaste em misturas com teor mais elevado de ligante e o pequeno acréscimo do percentual de desgaste obtido pela mistura com adição de RPP, pode-se dizer que RPP tem uma influência positiva na mistura.
- Quanto à estabilidade, todas as composições apresentaram resultados superiores aos estabelecidos na norma DNIT 031/2006-ES. A mistura que obteve o melhor desempenho nesse requisito foi a com adição de Cal CH-01. A composição com adição de RPP obteve um desempenho superior a mistura de referência, em 4,45%. Comprovando que as adições de RPP e cal CH-01 têm efeitos benéficos semelhantes quanto a propriedade de estabilidade nas misturas asfálticas.
- Em relação à fluência, as três misturas se comportaram dentro dos limites estabelecidos pelo Deinfra-SC na ES-P05/16, onde novamente a mistura com

adição de RPP apresentou um comportamento intermediário ao das composições com adição de Cal CH-01 e de referência. A incorporação de Cal CH-01 e RPP permitem que as misturas asfálticas absorvam maiores deformações, minimizando o aparecimento de fissuras.

- De forma geral, a incorporação de RPP apresentou melhorias significativas nas propriedades da mistura asfáltica, demonstrando dessa forma um grande potencial a ser estudado, para que assim possa colaborar com a gestão ambiental deste resíduo.

4. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

- Avaliar o comportamento do RPP quando adicionado em diferentes teores a mistura asfáltica.
- Verificar a influência da adição do RPP nas propriedades de misturas preparadas com ligantes modificados por polímeros.
- Realizar ensaios para a determinação do dano por umidade induzida nas misturas asfálticas com RPP em sua composição.
- Estudar a utilização da adição de RPP em outras camadas da estrutura do pavimento.
- Estudar a incorporação do RPP no processo de estabilização de solos argilosos.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: **Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro**. Rio de Janeiro, 2006.

BARDINI, V. S. S., KLINSKY, L. M. G., FERNANDES, J.L., A importância do filer para o bom desempenho de misturas asfálticas. **Minerva Pesquisa e Tecnologia**, São Paulo, v.7, n.1, p.71-78. Janeiro/abril 2010.

BERNUCCI L. B., MOTTA L. M. G., CERATTI, J. A. P. e SOARES J. B., **Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros**. Petrobras. ABEDA. Rio de Janeiro, 501p, 2007.

BOCK, A. L., **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado**. 2012. 143f. Dissertação de Mestrado para obtenção do título de Mestre em geotecnia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre.

BOEIRA, F. D., **Estudo laboratorial do desempenho de misturas asfálticas com diferentes tipos de cal**. 2011. 64f. Trabalho de conclusão de curso para o título de Engenheiro Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ. Ijuí.

CASTRO, S. F. **Misturas asfálticas com incorporação de cal: Análise volumétrica e mecânica**. 2011. 63f. Trabalho de Diplomação para o título de Engenheiro Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa Rodoviária 2016**. 2017. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/>>. Acesso em: março 2017.

DEINFRA-SC - Departamento Estadual de Infraestrutura do estado de Santa Catarina. ES-P 05/16: **Pavimentação: camadas de misturas asfálticas usinadas a quente**. Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina, Florianópolis, SC.2016.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-EM 367/97: **Material de enchimento para misturas betuminosas**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1997.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 035/98: **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 043/95: **Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1995.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1997.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 078/94: **Agregado Graúdo – adesividade ao ligante betuminoso**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 081/98: **Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 083/98: **Agregados – Análise granulométrica**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 085/94: **Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 089/94: **Agregado – Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 093/94: **Solos – determinação da densidade real**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNER-ME 383/99: **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero- ensaio Cantabro**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. DNIT 031/2006 – ES. **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2010.

DNIT- Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. DNIT 136/2010 – ES. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2010.

JACOBY Pablo Cardoso; PELISSER Fernando. Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 84-88, 2015.

STEINER, L. R. **Efeito do resíduo do polimento de porcelanato como material cimentício suplementar**. 2014. 126f. Dissertação de Mestrado para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma.