



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



## 25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

### AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

*Thiago Persike<sup>1</sup>; Breno Salgado Barra<sup>1</sup>; Yader Guerrero<sup>1</sup> & Rafael Cristyan Fronza<sup>1</sup>*

#### RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com a incorporação de resíduo de construção e demolição (RCD). Para a composição granulométrica adotou-se o método teórico, utilizando as equações de Fuller-Talbot. A incorporação do RCD compreendeu as frações passantes no intervalo de peneiras 2,20 mm a 0,075 mm, relacionadas à curva granulométrica de projeto, testando variações percentuais de 7,0 %, 15,0 % e 30,0 %, as quais foram comparadas às formulações de referência, integralmente compostas por granulares de origem gnáissica. Foi utilizado o ligante betuminoso 30/45, em sua forma pura, compreendendo diversas séries de dosagens em cada caso. As avaliações das misturas asfálticas consideraram o escopo da metodologia francesa e abrangeram aspectos relacionados à habilidade de compactação na prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG), resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18 °C e à deformação permanente a 60 °C. Os resultados obtidos indicaram que as partículas do RCD possuem macrotextura subangular e microtextura rugosa, com porosidade e superfície específica quase três vezes maiores que as frações de rocha britada e má afinidade elétrica com o ligante betuminoso. Logo, em comparação às formulações de referência, verificou-se a participação decisiva do RCD no aporte de maiores teores de ligante nas dosagens e na redução da trabalhabilidade das misturas asfálticas durante o processo de compactação, além de acarretar menor resistência à ação deletéria da água e aumento do fenômeno da fluência nos ensaios de deformação permanente.

**PALAVRAS-CHAVE:** RCD; metodologia francesa; misturas asfálticas; deformação permanente.

#### ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate the mechanical behavior of dense asphalt mixes so-called *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), by adding of civil construction and demolition waste (CDW). The aggregate gradation was conceived by using the Fuller-Talbot's equations. The insertion of CDW comprised the percent passing fractions between sieves from 2.20 mm to 0.075 mm, related to the design aggregate gradation, comprising percent variations of 7.0 %, 15.0 % and 30.0 %, which were compared to the reference formulations entirely formed by crushed gneissic rock particles. The asphalt binder 30/45 were used in its neat form, taking into account several dosing series in each case. The experimental campaign considered the scope of the French methodology and approached aspects related to the compaction ability with use of the Compaction Shear Press, resistance to the action of water in Duriez test at 18 °C and to rutting at 60 °C. The results obtained indicate that the CDW particles have subangular macrotexture and rough microtexture, with porosity and specific surface almost three times larger than the fractions of crushed rock and poor electrical affinity with the asphalt binder. Therefore, in comparison to the reference formulations, it was verified the decisive role of the CDW with regards to the use of higher binder contents in the dosages, reducing the workability of the asphalt mixes during compaction processes, besides causing lower resistance to deleterious action of the water and increasing of the creep phenomenon all over the rutting resistance tests.

**KEY WORDS:** CDW; French methodology; asphalt mixes; rutting.

**1** Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e-mail: thiagopersike.eng@gmail.com; breno.barra@ufsc.br; yagcivil@gmail.com; rafael.c.fronza@gmail.com



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



## INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é considerada uma atividade essencial para a economia, pois promove a geração de empregos e riquezas. No entanto, pode ser considerada também uma grande causadora de impactos ambientais, desde a modificação da paisagem natural até a produção de um significativo volume de resíduos, os chamados resíduos de construção e demolição (RCD) (DOMICIANO, 2019). Esta indústria é uma das principais fontes de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e é responsável por cerca de 7,0 % das emissões globais de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) (MISTRI *et al.*, 2021).

De acordo com o panorama dos resíduos sólidos no Brasil, elaborado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), apenas em 2021 foram coletadas mais de 48 milhões de toneladas de RCD no âmbito municipal.

No Brasil, atualmente, existem duas normas que regulamentam o uso do RCD como agregado reciclado em obras da construção civil, a ABNT NBR 15115 (2004) e ABNT NBR 15116 (2004), específicas para o uso de granulares em pavimentação.

Apesar do forte apelo ecológico que tem se observado no mundo acerca do reaproveitamento de recursos naturais, verifica-se no país a falta de incentivo público intenso às políticas de desenvolvimento sustentável, além de ainda haver reticências em muitos casos a respeito da utilização de materiais reciclados em obras de engenharia civil, incluindo a concepção de misturas asfálticas e a construção de estruturas de pavimento (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

Tendo em vista a enorme demanda de infraestrutura de pavimentação, tanto em novas construções quanto em serviços de reabilitação, as principais preocupações da indústria de pavimentação são a conservação dos recursos naturais e a utilização de materiais residuais para obter economia e proteger o meio ambiente (PUROHIT *et al.*, 2022).

Nesse contexto, esta pesquisa propõe a avaliação de misturas asfálticas densas do tipo *Béton Bitumineux Semi-Grenus* (BBSG), com foco na verificação da viabilidade técnica do uso de RCD, em substituição parcial às frações granulares oriundas de maciço rochoso gnáissico, considerando aspectos relacionados à metodologia francesa de formulação, com enfoque principal na resistência à deformação permanente.

## CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

O Estado de Santa Catarina aprovou em 2010 a Lei 15.251, a qual regulamenta a coleta, transporte e destinação final de resíduos. No ano de 2011 foi publicada a Lei 15.442, a qual alterou a ementa e os Arts. 1º, 2º, 3º e 4º da Lei nº 15.251, apresentando em seus anexos os modelos para manifesto de transporte de resíduos (MTR) e certificado de destinação final (CDF).

Em 2014, a Fundação Municipal do Meio Ambiente (FATMA) à época, lançou por meio da Portaria FATMA nº 242/2014, o sistema de controle de movimentação de resíduos e de rejeitos, o qual substituiu as vias físicas do MTR, possibilitando a geração *online* dos documentos previstos em Lei. O Instituto do Meio Ambiente (IMA; extinta FATMA) lançou no ano de 2020 o Boletim de Desempenho de Resíduos do Estado de Santa Catarina (BDRESC).

No município de Joinville/SC, visando assegurar a destinação adequada dos RCD, foi instituída no ano de 2010, a Associação Joinvillense de Condutores de Transportes de Resíduos (AJOCTRE).

Por meio de comunicação digital com a AJOCTRE, foram fornecidos dados das coletas de RCD, para os municípios de Joinville, Araquari, São Francisco e Garuva, abrangendo o período entre 2019 e 2022 (PERSIKE, 2023). A Figura 1 ilustra o comparativo dos dados disponibilizados.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

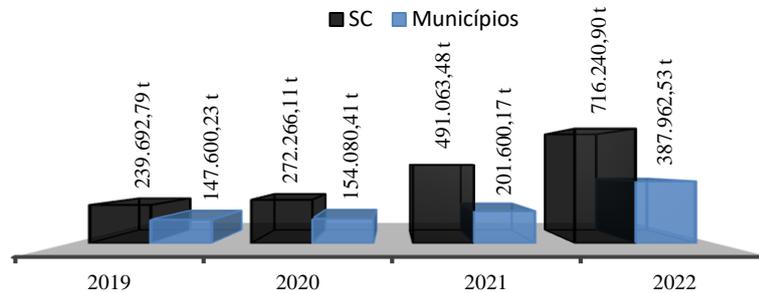


Figura 1. Comparativo do montante de RCD gerado no Estado de SC e municípios de Joinville, Araquari, São Francisco do Sul e Garuva, em toneladas (PERSIKE, 2023).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Materiais

As frações granulares desta pesquisa foram oriundas de britagem de maciço rochoso gnáissico, coletadas em jazida localizada na região metropolitana de Joinville/SC. Os ensaios de caracterização foram executados conforme as normas vigentes no Brasil (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização das frações granulares (PERSIKE, 2023).

Ensaio	Norma	Limites	Resultados	
			Quantitativo	Qualitativo
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNER-ME 035/1998 e DNER-ME 037/1997	Máx. 50,0 %	13,4 %	-
Índice de forma	ABNT NBR 7809/2006	Mín. 0,5	0,60	Boa angularidade
Resistência ao ataque químico (Durabilidade)	DNER-ME 089/1994 e DNER-ME 037/1997	Máx. 12,0 %	5,30 %	-
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 078/1994	-	-	Má
Equivalência de areia	DNER-ME 54/1997	-	78,0 %	-
Teor de material pulverulento	DNER-ME 266/1997 e DNER-ME 37/1997	Máx. 1,0 %	0,40 %	-
Absorção	-	-	0,33 %	-

O RCD utilizado nesta pesquisa foi proveniente de um serviço de demolição de um galpão industrial, sito à cidade de Joinville/SC, caracterizado pela predominância de alvenaria em tijolo à vista, em que os blocos residuais foram beneficiados a partir de processo de britagem para cominuição de partículas. As análises química, física e mineralógica das amostras de RCD foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Micropartículas (LACAMI), localizado em Criciúma/SC.

Neste contexto, a análise de textura superficial das partículas de RCD foi realizada a partir da técnica de adsorção de Nitrogênio (BET). A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos, em comparação ao pó de pedra gnáissico analisado por Clara (2020).

Tabela 2. Comparativo da análise de superfície específica do RCD (PERSIKE, 2023) e pó de pedra (CLARA, 2020).

Amostra	Área Superficial (m <sup>2</sup> /g)	Volume de poros (cm <sup>3</sup> /g)	Diâmetro médio de poros (Å)
RCD	7,990	0,03463	86,7
Pó de Pedra	3,052	0,012850	168,4

A composição mineralógica das amostras de RCD foi determinada por difratometria de Raios-X



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



(DRX), e a identificação das fases (Figura 2), procedida pela comparação dos resultados obtidos em relação aos difratogramas contidos no banco de dados *Crystallography Open Database* do LACAMI.

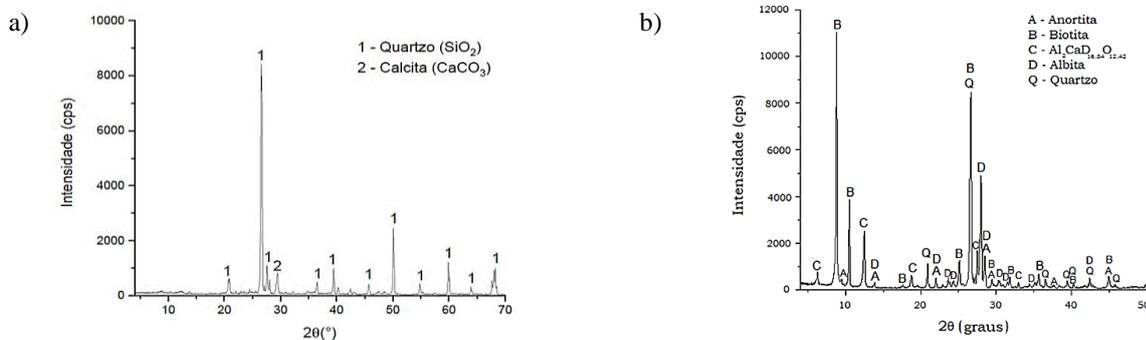


Figura 2. Difratograma do (a) RCD (PERSIKE, 2023) e do (b) pó de pedra, (CLARA, 2020).

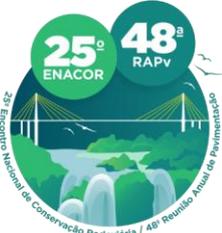
Comparando a difratometria do RCD (Figura 2a) com a do pó e pedra (Figura 2b), é notável a presença elevada de picos sucessivos de quartzo no primeiro, enquanto o segundo apresenta apenas um pico de intensidade do mesmo mineral. No entanto, este pico isolado de quartzo do pó de pedra divide importância com picos de silicatos secundários, como por exemplo, a biotita, anortita e albita. A composição química por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (FRX), foi realizada após o teste de perda ao fogo (PF), seguindo a Norma ASTM D7348-07 (2007), a fim de se eliminar os materiais orgânicos e água de constituição presentes no material, conforme resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Composição química do RCD (PERSIKE, 2023) comparada à do pó de pedra (CLARA, 2020).

Elementos	Teor (% em massa)	
	RCD	Pó de Pedra
SiO <sub>2</sub>	62,032	53,602
CaO	16,849	8,080
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,736	10,928
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,665	14,505
MgO	1,848	3,26
K <sub>2</sub> O	1,611	2,576
SO <sub>3</sub>	0,809	0,435
TiO <sub>2</sub>	0,754	1,228
PF	0,480	2,519

O RCD apresentou concentrações importantes dos óxidos Cálcio (CaO), Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Magnésio (MgO) e Potássio (K<sub>2</sub>O), porém, com forte destaque para a Sílica, respondendo por mais de 60 % de sua composição. Quanto ao pó de pedra, tem-se que a concentração de SiO<sub>2</sub> é da ordem de 53,062 %, ou seja, praticamente 9,0 % menor que a do RCD. Este cenário corrobora os resultados das análises de DRX, pois a maior concentração de picos de quartzo primário nas amostras de RCD conduz à obtenção de teores mais elevados de SiO<sub>2</sub> na composição química, quando comparado ao pó de pedra, que apresenta uma característica mineralógica mais difusa das fases cristalinas.

Desta forma, tem-se que ambos os materiais são considerados fortemente eletronegativos, fato que confirma a má adesividade com o ligante betuminoso (Tabela 1), de predominância Carbônica (C), ou seja, de mesma tendência iônica. Entretanto, não foram utilizadas adições ou aditivos melhoradores de adesividade, a fim de que não houvesse interferência no desempenho original do RCD estudado.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



No que diz respeito à análise morfológica das partículas de RCD, foi aplicada à técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (Figura 3).

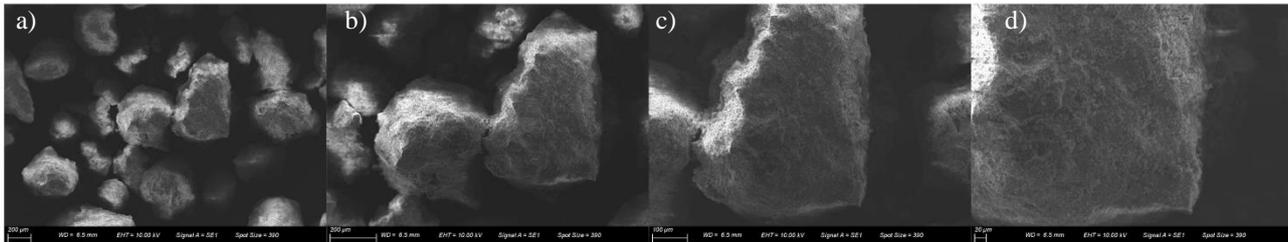


Figura 3. Análise das amostras de RCD com ampliação de: (a) 100x, (b) 200x, (c) 500x e (d) 800x (PERSIKE, 2023).

Verifica-se, com base nas imagens, que a amostra de RCD possui microtextura rugosa e macrotextura subangular, o que lhe confere bom intertravamento entre os grãos, bem como uma ancoragem adequada do ligante betuminoso sobre a superfície das partículas do material.

Todavia, é importante ressaltar o fato de que o RCD possui superfície específica e volume de poros quase três vezes maiores ao do pó de pedra (Tabela 2), ensejando o aspecto negativo quanto à demanda por um maior consumo de ligante betuminoso nas dosagens das misturas asfálticas.

Além disso, apesar de não terem sido realizados ensaios de dureza nesta pesquisa para as amostras de pó de pedra e RCD, tem-se registro na literatura indicando que materiais de origem cerâmica possuem de 3 a 5 na escala Mohs, enquanto as partículas derivadas de gnaiss alcançam a escala de 7 (ALESSANDRETTI *et al.*, 2023; TERRA, 2020), logo, mais duras e resistentes que as de origem cerâmica.

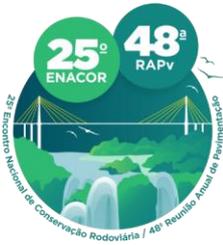
O ligante betuminoso utilizado foi o 30/45 classificado por penetração, em sua forma pura, proveniente de refinaria localizada em Paulínia/SP. As características técnicas são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros de caracterização do ligante betuminoso 30/45 (REPLAN, 2018).

Características	Método	Resultado	Especificação	Unidade
Penetração	D 5	34	30 a 45	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	53,5	52 mín.	°C
Ductilidade a 25 °C	D 113	>150	60 mín.	% massa
Solubilidade no tricloroetileno	D 2042	99,9	99,5 mín.	%
Ponto de fulgor	D 92	352	235 mín.	°C
Índice de suscetibilidade térmica	X 18	-1,2	-1,5 a 0,7	-
Densidade relativa da amostra a 20 °C	D 70	1,01	-	°C
Aquecimento a 177 °C	X 215	Não espuma	Não espuma	°C

Com base na Tabela 4, verifica-se que o índice de suscetibilidade térmica ou índice de Pfeiffer e Van Doormaal (IP) possui um valor muito próximo ao limite mínimo normativo, indicando forte termosusceptibilidade a elevadas temperaturas.

Os dados de viscosidade fornecidos pela refinaria, a partir do método Saybolt-Furol (DNER-ME 004, 1994), indicaram a temperatura adequada para usinagem do ligante em 155 °C, enquanto a de compactação da mistura asfáltica em 145 °C. Para tanto, foi adotada a temperatura de 13 °C acima de 155 °C para aquecimento dos granulares, alcançando a marca de 168 °C (PERSIKE, 2023).



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



## Métodos

### Curva granulométrica

Para a formulação da curva granulométrica das misturas asfálticas BBSG, foi adotado o método racional com o uso das Equações 1 e 2 de Fuller-Talbot, a partir dos pontos de controle estabelecidos pela metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007).

$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (1)$$

$$n = \frac{\log(\%p_{200}) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (2)$$

onde:

%p: percentagem em peso que passa na peneira de uma dada abertura d;

a: constante igual a 100;

d: abertura de uma dada peneira, em mm;

D: diâmetro máximo, abertura da peneira em que passa 100 % das frações, em mm;

n: expoente de graduação da curva granulométrica.

%p<sub>200</sub>: percentagem de material passante na peneira de nº 200 ou 0,075 mm;

Foi definido o diâmetro máximo (D) em 12,7 mm e o %p<sub>200</sub> em 7,0 %, resultando em um expoente 'n' de 0,52, constituindo uma curva de graduação densa (Figura 4) pelos critérios do DNIT (2006), devido encontrar-se no intervalo  $0,35 < n < 0,55$ .

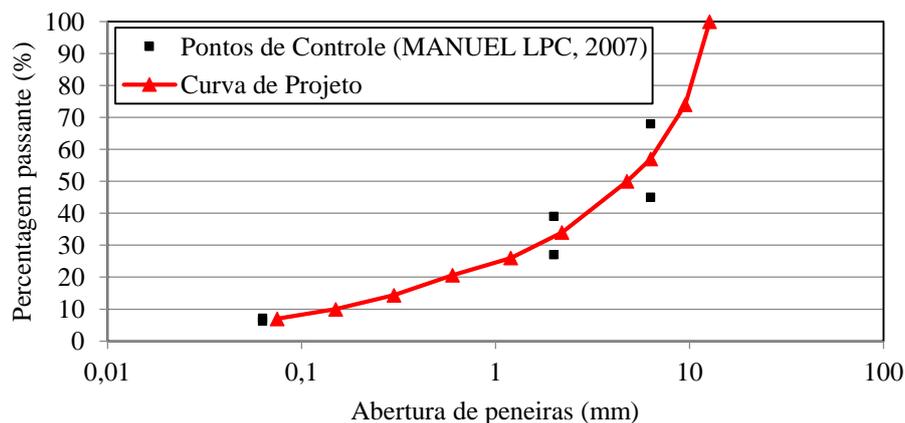
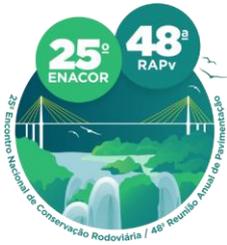


Figura 4. Curva granulométrica do tipo BBSG (PERSIKE, 2023).

Ainda, com o intuito de verificar quais frações do RCD possuíam maior representatividade percentual, foi realizada a análise granulométrica das amostras utilizadas, a qual indicou que o montante passante a partir da abertura de peneira 2,20 mm compreendia quantidades propícias para substituições em larga escala na produção de misturas asfálticas. Daí resultou a escolha substitutiva gradual de 7,0 % (< 0,075 mm), 15,0 % (< 0,30 mm) e 30,0 % (< 2,20 mm) de RCD no arranjo granulométrico de referência, composto apenas por partículas gnáissicas britadas, compreendendo quatro formulações distintas analisadas durante a campanha experimental.



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



## Ensaio Laboratoriais

Para a execução dos ensaios laboratoriais, aplicaram-se os níveis avaliativos sequenciais e eliminatórios 1 e 2 da metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007), compreendendo os parâmetros de: (nível 1) habilidade de compactação com a Prensa de Compactação por cisalhamento Giratório (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019) e resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 °C (AFNOR NF EN 12697-12, 2018), e; (nível 2) deformação permanente a 60 °C (AFNOR NF EN 12697-22, 2020). Foram consideradas para cada teor de ligante as quantidades de 3, 12 e 2 corpos de prova, respectivamente.

A Tabela 5 apresenta os limites normativos para cada classe de misturas do tipo BBSG (1, 2 e 3), em que a 3 é a mais nobre, enquanto a Figura 5 ilustra a sequência de testes executados durante a campanha experimental.

Tabela 5. Limites normativos considerados nos ensaios.

Ensaio	Norma	Classe da Mistura BBSG	Limites Normativos
PCG	AFNOR NF EN 12697-31 (2019)	1, 2 e 3	$\%V_{\min} \geq 4,0\%$ e $\%V_{\max} \leq 9,0\%$ a 80 giros
Duriez	AFNOR NF EN 12697-12 (2018)	1, 2 e 3	$r/R \geq 0,70$
Deformação Permanente a 60 °C	AFNOR NF EN 12697-22 (2020)	1	$7,5\% < \% \leq 10,0\%$ , após 30.000 ciclos
		2	$5,0\% < \% \leq 7,50\%$ , após 30.000 ciclos
		3	$\% \leq 5,0\%$ , após 30.000 ciclos

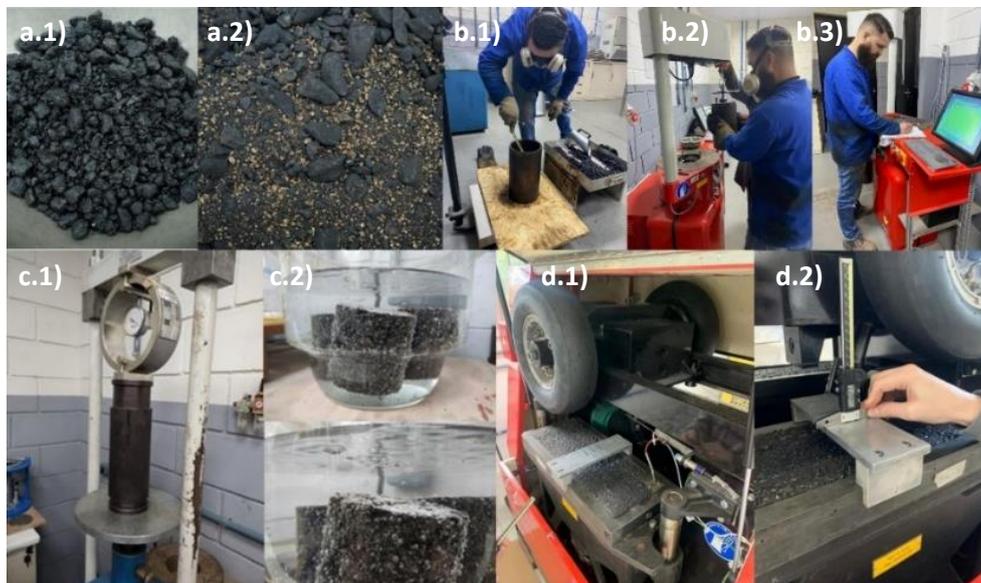


Figura 5. Sequência dos ensaios realizados na pesquisa: (a.1 e a.2) MVR; (b.1, b.2 e b.3) PCG; (c.1 e c.2) Duriez a 18°C; (d.1 e d.2) deformação permanente a 60°C (PERSIKE, 2023).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Habilidade de Compactação na PCG

Os resultados obtidos nos ensaios de habilidade de compactação com o uso da PCG são apresentados na Figura 6, indicando o cenário geral da evolução do volume de vazios (%V) no transcurso dos giros executados pela PCG, com aplicação de esforços de compressão axiais e cisalhantes sobre as



19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



amostras. Os limites normativos admissíveis quanto ao volume de vazios após 80 giros (4,0 % a 9,0 %, Tabela 1), estão representados por uma seta vermelha em cada situação. Assim, a formulação que ultrapassar os limites da referida seta é considerada reprovada, não estando apta a seguir para o nível 2.

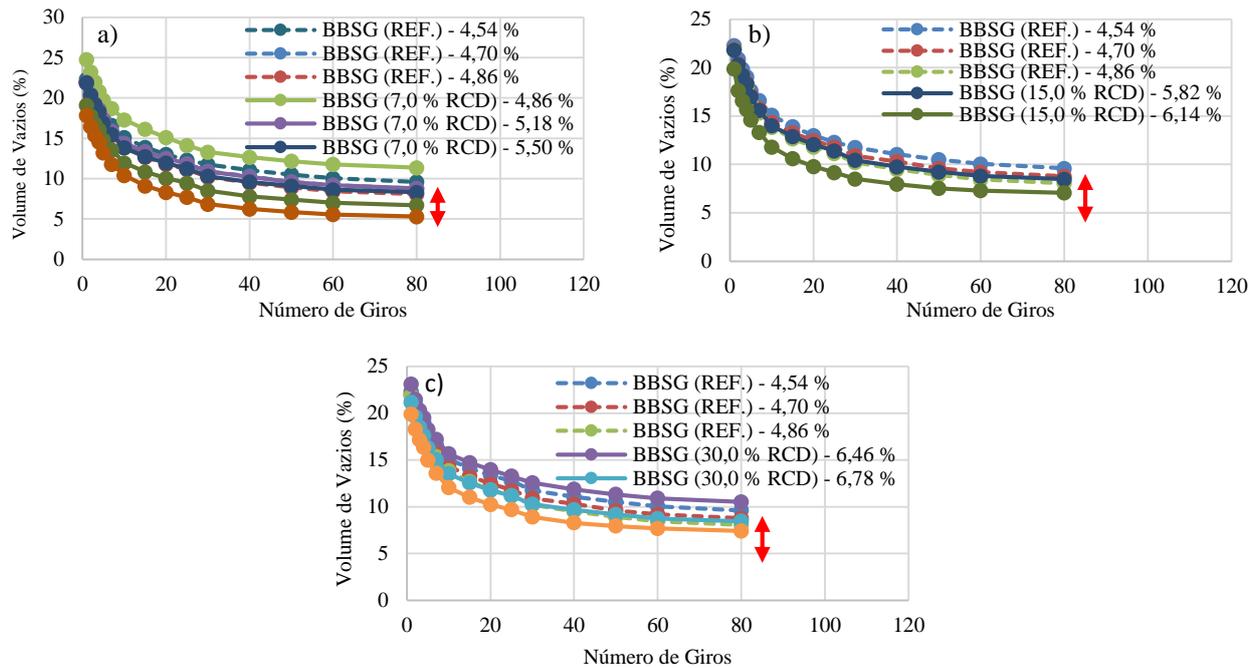


Figura 6. Habilidade de compactação das misturas: a) referência e com 7,0 % de RCD; b) referência e com 15,0 % de RCD; c) referência e com 30,0 % de RCD (PERSIKE, 2023).

É possível observar em todos os cenários comparativos com a mistura asfáltica de referência, que as incorporações de RCD necessitaram de maiores aportes de ligante betuminoso nas dosagens, implicando em menores volumes de vazios para os mesmos 80 giros estabelecidos normativamente. Esta tendência confirma a condição mencionada quanto à análise textural das partículas de RCD e pó de pedra, em que o primeiro possui tanto superfície específica como porosidade quase três vezes maior que o segundo. Logo, isto acarreta em menor área ocupada por de unidade de peso a ser preenchida, dificultando o envolvimento pelo ligante betuminoso, devido ter maior potencial de absorção tanto inter quanto intragranular, demandando teores de ligante superiores para que alcance o mesmo êxito de trabalhabilidade das misturas de referência.

Alia-se aos aspectos negativos discorridos, o fato do RCD estudado ser um material com partículas menos duras que as de pó de pedra, conforme já abordado, tornando-as mais compressíveis e menos resistentes aos esforços mecânicos aplicados no ensaio da PCG.

### Resistência à ação deletéria da água

Para a realização do ensaio de Duriez a 18 °C, procedeu-se os testes apenas com as formulações aprovadas no ensaio da PCG. A Figura 7 ilustra os resultados obtidos, em que os erros de repetitividade e os desvios padrões máximos obtidos foram da ordem de 5,0 % e 1,0 %, respectivamente, indicando boa homogeneidade da amostragem produzida, bem abaixo dos 10,0 % preconizados pelo Manual LPC (2007).



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

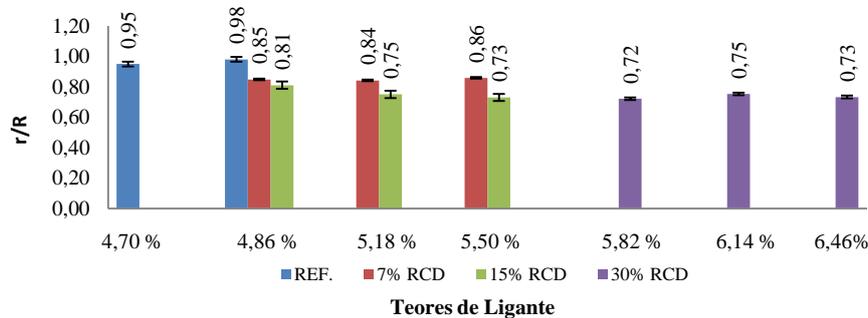


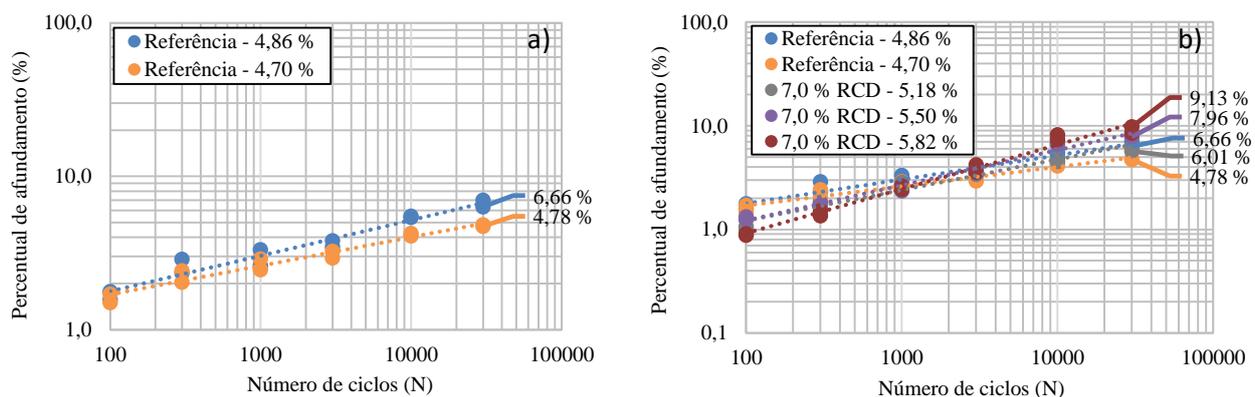
Figura 7. Relação  $r/R$  obtidas no ensaio de Duriez (PERSIKE, 2023).

Conforme discorrido no tópico sobre a caracterização dos materiais, a presença de  $\text{SiO}_2$  no RCD é da ordem de 9,0 % maior que no pó de pedra. Logo, as misturas asfálticas que possuem a incorporação deste material apresentam maior potencial de repelência elétrica às partículas granulares gnáissicas e ao ligante betuminoso, o que aumenta a hidrofília, dificultando ainda mais a adesão entre os compostos e prejudicando a adesividade entre eles. A mesma tendência ocorre entre as formulações com distintos teores de RCD incorporado, com maior prejuízo àquelas que portam maiores percentuais em suas composições.

Ainda assim, todas as formulações apresentaram relação  $r/R \geq 0,70$  para misturas asfálticas do tipo BBSG (Tabela 5), que dizem respeito aos conjuntos de corpos de prova condicionados a seco com 50 % de umidade do ar ( $r$ ), em relação aos condicionados sob imersão na água ( $R$ ), ambos por 7 dias a 18 °C e rompidos à compressão axial simples.

## Deformação Permanente

Para esta etapa de avaliação, foram testadas as formulações aprovadas no conjunto dos ensaios de PCG e Duriez a 18 °C, sendo os resultados ilustrados na Figura 8.





19 a 22 de Setembro de 2023  
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

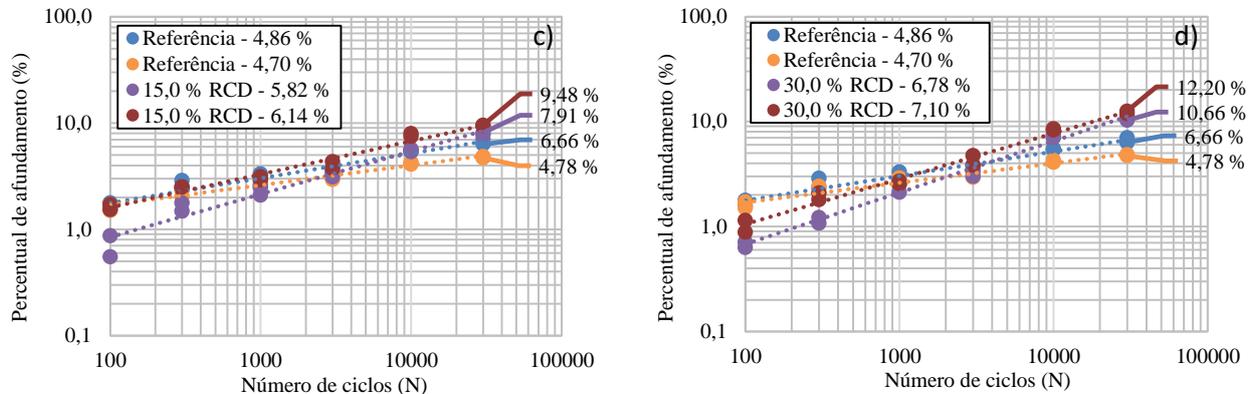


Figura 8. Evolução do afundamento na trilha de rodas das misturas: a) referência; b) referência e com 7,0 % de RCD; c) referência e com 15,0 % de RCD; d) referência e com 30,0 % de RCD (PERSIKE, 2023).

Nota-se que o percentual de afundamento na trilha de roda para as misturas com RCD são inicialmente menores quando comparados às misturas de referência, cenário que se inverte à medida que o número de ciclos aumenta, em razão de que nos primeiros ciclos de carregamento parte do ligante betuminoso encontra-se encapsulado na porosidade das partículas de RCD, a qual possui valor quase três vezes maior que as frações britadas de rocha gnáissica.

Com o aumento progressivo da aplicação dos ciclos de carregamento, aliado à submissão das misturas asfálticas a um período de maior exposição contínua ao calor (60 °C), o ligante betuminoso inicialmente encapsulado na porosidade das partículas de RCD flui e migra em maior volume para a superfície das partículas, aumentando a sua presença nos interstícios do material, maximizando a ocorrência do fenômeno da fluência devido ao aumento da suscetibilidade térmica do ligante betuminoso e, conseqüentemente, gerando maiores afundamentos nas trilhas de roda.

Analisando os percentuais ilustrados na Figuras 8, tomando em conta as três possíveis classificações para misturas asfálticas do tipo BBSG, tem-se que apenas a mistura de referência com teor de ligante em 4,70 % enquadra-se na Classe 3, a mais nobre entre todas, com afundamento na trilha de roda abaixo do limite máximo de 5,0 %.

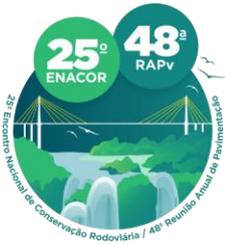
As misturas asfálticas de referência com teor de 4,86 % e, com 7,0 % de RCD e teor de ligante em 5,18 %, enquadraram-se na Classe 2, com valores de afundamento na trilha de roda entre 5,0 % e 7,50 %. As formulações com 7,0 % e 15,0 % de RCD, com teores de ligante em 5,50 %, 5,82 %, 5,80 % e 6,14 %, respectivamente, apresentaram percentuais de afundamento na trilha de roda entre 7,50 % e 10,0 %, enquadrando-se na Classe 1.

Para as misturas com 30,0 % de RCD e teor de ligante em 6,78 % e 7,10 %, foram verificados percentuais acima do limite máximo de 10,0 % para que pudessem ser enquadradas na Classe 1, tornando-as inaptas para aplicação em estruturas de pavimento.

## CONCLUSÕES

A partir da campanha experimental realizada, verificou-se que as características do RCD estudado, oriundo de matriz majoritariamente cerâmica, implicam de forma conjunta na obtenção de resultados menos qualificados quando comparados às formulações de referência, formada apenas por granulares britados de rocha gnáissica, destacando-se principalmente os aspectos de elevada superfície específica e porosidade, além do importante teor de Sílica presente em sua composição.

Estes aspectos em conjunto contribuem para que o RCD necessite de maior aporte de ligante betuminoso nas dosagens, o que conseqüentemente confere maior efeito lubrificador no contato



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



intergranular, diminuindo a resistência aos esforços de compressão axial e de cisalhamento aplicados nos testes de habilidade de compactação, culminando com uma forte redução do teor de vazios, e maiores afundamentos na trilha de roda. Corroborando também para a potencialização do efeito de repelência elétrica ao conjunto granular-ligante, minorando a adesividade entre os compostos e favorecendo o efeito deletério da água.

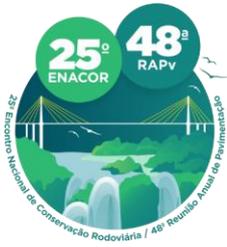
Cabe destacar que o ligante betuminoso utilizado 30/45, em sua forma pura, também não dispõe de indicadores característicos que o confira boa resistência mecânica, sobretudo baixo ponto de amolecimento e elevada suscetibilidade térmica. Neste âmbito, é possível que se as formulações fossem projetadas com matrizes betuminosas modificadas, poderiam auxiliar na aprovação de mais dosagens às classes 2 e 3, escopo que fica como recomendação para trabalhos futuros.

Dado o exposto, conclui-se que a utilização do RCD estudado na concepção de misturas asfálticas densas do tipo BBSG, quando comparados aos resultados das formulações de referência e considerando o contexto da campanha experimental realizada, apresentou-se pouco promissor e viável tecnicamente, pois indicou a geração de produtos finais mais onerosos, com menor trabalhabilidade nos procedimentos de compactação, além de menos resistentes à ação deletéria da água e aos esforços mecânicos aplicados pelo tráfego quanto ao afundamento nas trilhas de roda.

Recomenda-se também a continuidade desta pesquisa, porém, com a incorporação de RCD proveniente de matriz majoritariamente cimentícia, a fim de verificar se esta característica pode contribuir na obtenção de melhores resultados ao desempenho mecânicos das misturas asfálticas, quando comparados aos do RCD oriundo de matriz cerâmica.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE (2022), Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Disponível em <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2022/>, última consulta em janeiro de 2023.
- AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-31 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- ALESSANDRETTI, L.; GIANNINI, P. C. F.; WARREN, L.; BRÜCKMANN, M. P.; MARTINI, A. (2023). Earth, wind and fire: Interactions between Quaternary environmental dynamics and human occupation on the southern coast of Brazil, *Quaternary Science Reviews*, Volume 301, 2023, 107950, ISSN 0277-3791, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107950>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15115: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: execução de camadas de pavimentação: procedimentos. Rio de Janeiro, 2004a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15116: agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2004a.
- ASSOCIAÇÃO JOINVILENSE DE CONDUTORES DE TRANSPORTES DE RESÍDUOS (AJOCTRE), comunicação digital via e-mail. Consulta em janeiro de 2023.
- CLARA, E. (2020), Avaliação de Misturas Asfálticas Densas com a Incorporação de Cinza de Carvão Mineral. Joinville: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.
- DNER-ME 004 (1994), Material betuminoso: determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes.



19 a 22 de Setembro de 2023

Foz do Iguaçu - PR

[www.rapvenacor.com.br](http://www.rapvenacor.com.br)



DNIT (2006), Manual de Pavimentação. Publicação IPR-719. 3ª Edição. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 274 p. Rio de Janeiro, Brasil.

DOMICIANO, L. M. (2019), Influência da Granulometria do Resíduo de Construção e Demolição Reciclado (Rcd-R) no Dano Mecânico de Geossintéticos Empregados em Estruturas de Solo Reforçado. Goiânia: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal de Goiás – UFG.

INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA – IMA, Boletim Mensal de Resíduos. Disponível em: <https://www.ima.sc.gov.br/index.php/qualidade-ambiental/mtr/boletim-mensal>> Acesso em 10 de janeiro de 2023.

MANUEL LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST “Formulation des enrobés”. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 199 p. Paris, France.

MISTRI, A.; DHAMI, N.; BHATTACHARYYA, S.K.; BARAI, S.V.; MUKHERJEE, A.; BISWAS, W.K. (2021), Environmental implications of the use of bio-cement treated recycled aggregate in concrete Resources, Conservation and Recycling, 167 (2021), Article 105436.

NASCIMENTO, L. H. F. DO; KUHN, V. DE O.; MORAES, S.; CORREIA, N. (2020), Análise de Quebra de Grãos de Misturas de Solo com Resíduos de Construção Civil para Camadas de Pavimento. Revista Tecnológica, 29(2), 526-540. <https://doi.org/10.4025/revtecnol.v29i2.52110>.

PERSIKE, T. (2023), Avaliação da Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas com Incorporação de Resíduos de Construção e Demolição. Joinville: Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

PUROHIT, S.; PANDA, M.; DAS, A. K. (2022), Performance of waste polyethylene modified bituminous paving mixes containing reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate, Construction and Building Materials, Volume 348, 2022, 128677, ISSN 0950-0618.

TERRA, C. (2020), Gemologia: a ciência de mil cores. Terra Didática, 16, 1-13, e020016. doi: 10.20396/td.v16i0.8658362.