



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

GIAN MELO DE SOUZA

**ESTUDO DE MISTURAS DE SOLO COM AGREGADO
RECICLADO PARA EMPREGO EM CAMADAS DE BASE DE
PAVIMENTOS URBANOS DE BAIXO VOLUME DE
TRÁFEGO**

**NATAL-RN
2017**

Gian Melo de Souza

Estudo de misturas de solo com agregado reciclado para emprego em camadas de base de pavimentos urbanos de baixo volume de tráfego

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Natal-RN
2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Souza, Gian Melo de.

Estudo de misturas de solo com agregado reciclado para emprego em camadas de base de pavimentos urbanos de baixo volume de tráfego / Gian Melo de Souza. - 2017.

20 f.: il.

Artigo Científico (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

1. Engenharia civil - Artigo. 2. Agregado reciclado - Artigo. 3. Pavimentação - Artigo. 4. Camadas de base - Artigo. I. França, Fagner Alexandre Nunes de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

Gian Melo de Souza

Estudo de misturas de solo com agregado reciclado para emprego em camadas de base de pavimentos urbanos de baixo volume de tráfego

Trabalho de Conclusão de Curso na modalidade Artigo Científico, submetido ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 23 de novembro de 2017:

Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França – Orientador

Prof. Dr. Olavo Francisco dos Santos Júnior – Examinador interno

Prof. Esp. Otacílio Alves de França Júnior – Examinador externo

RESUMO

A indústria da construção civil ocupa posição de destaque na economia nacional e em todo o mundo em virtude da sua importância no processo de desenvolvimento socioeconômico. Uma vez que esse setor está fortemente ligado ao consumo de recursos naturais e à geração de resíduos sólidos, a utilização de agregados reciclados apresenta extrema relevância. No cenário internacional, o desenvolvimento tecnológico da reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) ganhou impulso após a Segunda Guerra Mundial (1939-1945) e atualmente os países europeus encontram-se em avançado estágio nesse setor. Diversos autores têm demonstrado a viabilidade da utilização de agregado reciclado de RCC em diferentes aplicações, particularmente em obras de infraestrutura de pavimentação. O objetivo deste trabalho é estudar as propriedades de misturas de solo com agregado reciclado visando o emprego em camadas de base de pavimentos urbanos de baixo volume de tráfego. O solo foi coletado em jazida localizada no município de Macaíba/RN e o resíduo consiste em uma composição agregados reciclados com graduações de brita nº 1, brita nº 0 e areia. O solo e as misturas solo-agregado reciclado foram caracterizados através de ensaios de análise granulométrica, limites de consistência, densidade real, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e expansão. Os agregados reciclados foram submetidos a ensaios de determinação da composição, análise granulométrica, índice de forma, massa específica e absorção, abrasão *Los Angeles*, Índice de Suporte Califórnia e expansão. Com base nos resultados obtidos, verificou-se que a mistura com 75% do agregado reciclado utilizado pode ser empregada em camadas de base de pavimentos, uma vez que atende aos requisitos definidos pela especificação de serviço DNIT ES-141/2010.

Palavras-chave: agregado reciclado, pavimentação, camadas de base

ABSTRACT

The industry of construction occupies an outstanding position in the national and world economy because of its importance to the socio-economic development process. Since it is closely linked with the consumption of natural resources, the use of coarse recycled aggregates is exceptionally important. On the international scene, the technological development in the civil construction and demolition waste (CDW) recycling gained strength after World War II (1939-1945) and the European countries are leaders in this industry. Several authors have demonstrated the feasibility of applying CDW in many different contexts, particularly in paving works. The objective of this work was to study the properties of soil and CDW mixtures having view the use in base layers of roads with a small traffic volume. The soil collection was in Macaíba/RN and three types of recycled aggregates form the waste: gravels nº 0 and nº 1, and sand. Soil and mixtures characterizations were made by determining of particle sizes, plastic limit and plasticity index, specific gravity, California Bearing Ratio (CBR) and expansion. Recycled aggregates characterizations were made by determining of determining of composition, particle sizes, specific gravity, absorption, cubicity, resistance to abrasion, California Bearing Ratio (CBR) and expansion. Based on achieved results, the mixture containing by weight 75% of recycled aggregate is in conformity with the DNIT ES-141/2010 criteria.

Keywords: recycled aggregates, pavements, base layers

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil ocupa posição de destaque na economia nacional e em todo o mundo em virtude da sua importância no processo de desenvolvimento socioeconômico, considerando a significativa parcela do Produto Interno Bruto (PIB) e o contingente de pessoas que, diretamente ou indiretamente emprega (JOHN, 2000). Essa indústria é apontada como responsável por algo entre 20% e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade e pela maior parte dos resíduos sólidos gerados pelo conjunto das atividades humanas (FIEB, 2005).

Os resíduos da construção civil (RCC), especialmente oriundos de obras de demolição, reformas e desperdícios nos canteiros de obra, apresentam-se como grave problema em muitas cidades brasileiras, representando de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos (BRASIL, 2005). Quando destinados inadequadamente, isto é, em vias, rios, córregos, terrenos baldios e outras áreas impróprias, esses resíduos podem provocar assoreamento dos recursos hídricos, enchentes, obstrução de vias de tráfego e de sistemas de drenagem, proliferação de transmissores de doenças e degradação da paisagem. Desse modo, visando a redução desses impactos ambientais e a diminuição da extração de recursos naturais, é extremamente interessante para a cadeia da construção civil promover a reciclagem de agregados a partir do processamento dos resíduos gerados.

Os agregados reciclados podem substituir parcial ou totalmente o uso de material natural e ser empregados em diversas aplicações, tais como em serviços de drenagem, na confecção de argamassa e concreto, na fabricação de pré-moldados, na construção de aterros e de camadas de pavimentos, entre outros (GRUBBA, 2009). Segundo Carneiro et al. (2001) a utilização de entulho como agregado reciclado (AR) em camadas de pavimentos urbanos é uma das formas de reciclagem mais difundidas, sobretudo em camadas de base e sub-base. Do ponto de vista geotécnico, a aplicação desse resíduo em pavimentação é interessante, pois pode ser utilizado na estabilização de solos e, por tratar-se de material não plástico, em locais com presença de água.

Nesse contexto, esta pesquisa analisou misturas solo-agregado reciclado com teores de 25%, 50% e 75% do resíduo, em massa, associados a um solo proveniente do município de Macaíba/RN, visando o atendimento a requisitos da especificação de serviço ES 141 (DNIT, 2010) para materiais de base de pavimentos urbanos, considerando baixo volume de tráfego.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Estruturas de pavimentos

O pavimento de uma rodovia é a superestrutura constituída por um sistema de camadas de espessuras finitas, assentes sobre um semiespaço considerado teoricamente como infinito – a infraestrutura ou terreno de fundação, a qual é designada de subleito (DNIT, 2006). Cada camada, em função de sua espessura e rigidez, juntamente com o subleito condicionam o comportamento da estrutura. De acordo com Bernucci et al. (2010), os materiais de pavimentação compactados devem apresentar, basicamente: resistência adequada, baixa deformabilidade e permeabilidade compatível com a função na estrutura. Os pavimentos são classificados em rígidos, flexíveis e semirrígidos.

Os pavimentos rígidos consistem em placas de concreto, com ou sem armação, que são apoiadas em uma camada denominada sub-base, composta por material granular ou material estabilizado com cimento, e que é assente sobre o subleito ou sobre o reforço deste. Os

pavimentos flexíveis, normalmente remetidos aos pavimentos asfálticos, são formados por revestimento asfáltico apoiado sobre camadas de base, sub-base e reforço do subleito, compostas por materiais granulares, solos ou misturas de solos, sem acréscimo de agentes cimentantes. Quando essas camadas possuem algum aglutinante com propriedades cimentícias, o pavimento é classificado como semirrígido (BERNUCCI et al., 2010).

A camada de base, que se localiza imediatamente abaixo da camada de revestimento e acima da sub-base, quando existente, destina-se a resistir aos esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los (SENÇO, 2007). A sua estabilização granulométrica é realizada através da compactação de um material ou de mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações (DNIT, 2006).

2.2 Requisitos para materiais de base

A especificação de serviço DNIT 141/2010 apresenta os seguintes requisitos para materiais de base estabilizada granulometricamente:

- a) Devem ser compostos por solos, mistura de solos ou mistura de solos e materiais britados;
- b) Índice Suporte Califórnia – $ISC \geq 60\%$ para Número $N \leq 5 \times 10^6$, $ISC \geq 80\%$ para Número $N > 5 \times 10^6$, e Expansão $\leq 0,5\%$, determinados através dos ensaios:
 - Ensaio de Compactação, na energia Proctor modificado, indicada no projeto;
 - Ensaio de Índice de Suporte Califórnia, com a energia empregada no ensaio de compactação.
- c) O agregado retido na peneira n° 10 deve ser constituído de partículas duras e resistentes, isentas de fragmentos moles, alongados ou achatados, e isento de matéria vegetal ou outra substância prejudicial. Quando submetidos ao ensaio de abrasão *Los Angeles*, não devem apresentar desgaste superior a 55%, admitindo-se valores maiores, no caso de, em utilização anterior, terem apresentado desempenho satisfatório.
- d) Composição granulométrica que satisfaça uma das faixas da Tabela 1, de acordo com o número N de tráfego calculado segundo a metodologia da USACE (*United States Army Corps of Engineers*).

Tabela 1. Faixas granulométricas para material de base

Tipos Peneiras	Para $N > 5 \times 10^6$				Para $N < 5 \times 10^6$		Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	± 7
1"	-	75-90	100	100	100	100	± 7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	± 7
N° 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100	± 5
N° 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	± 5
N° 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	± 2
N° 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	± 2

Fonte: DNIT-ES 141/2010 (adaptado)

- A fração passante na peneira n° 40 deve apresentar limite de liquidez inferior ou igual a 25%, e índice de plasticidade inferior ou igual a 6%; quando esses limites forem ultrapassados, o equivalente de areia deve ser maior que 30%;
- Porcentagem passante na peneira n° 200 (0,075 mm) não deve ultrapassar 2/3 da porcentagem que passa na peneira n° 40.

2.3 Resíduos da construção civil

De acordo com a Resolução nº 307 (CONAMA, 2002) são resíduos da construção civil (RCC) os materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Essa Resolução subdivide os resíduos de construção nas seguintes classes:

- a) Classe A – são materiais recicláveis ou reutilizáveis como agregados e podem ser provenientes de obras de construção, demolição, reforma ou reparo em obras de infraestrutura e de edificações, ou derivados de processos de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas;
- b) Classe B – são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso;
- c) Classe C – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;
- d) Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

2.3.1 Legislação e normas técnicas

Apontada como um marco na gestão dos resíduos da construção civil no Brasil, a Resolução nº 307/2002 do CONAMA estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos pertinentes a essa atividade. Exige-se de pessoas físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos geradores de resíduos da construção, a busca pela não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição ambientalmente apropriada, nesta ordem de prioridade.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou em 2004 quatro normas que abrangem os resíduos sólidos da construção civil no tocante às diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de triagem, áreas de reciclagem (NBR 15114) e aterros (NBR 15113); ao estabelecimento de requisitos para os agregados reciclados empregados em pavimentação e preparo de concreto não-estrutural (NBR 15116); e aos critérios para execução de camadas de pavimentos (NBR 15115).

2.3.2 Reciclagem de agregados de resíduos da construção civil

2.3.2.1 Histórico

Diante da necessidade de destinação de subprodutos da construção, já na época da edificação das cidades no Império Romano construtores já empregavam tijolos, telhas e louça cerâmica moída como pozolanas (MOTTA, 2005). Segundo Levy (1995), apenas a partir de 1928 começaram a ser desenvolvidas pesquisas de forma sistemática visando avaliar o consumo de cimento, a quantidade de água e o efeito da granulometria dos agregados oriundos de resíduos de alvenaria e concreto. No entanto, as primeiras aplicações desses materiais

ocorreram após a Segunda Guerra Mundial, numa época em que as cidades europeias, visando atender à demanda da época, recorreram à produção de agregados a partir dos escombros resultantes do conflito. A partir de então, os países europeus passaram a liderar o desenvolvimento das técnicas de reciclagem (GRUBBA, 2009).

No Brasil, de acordo com Lima (1999), a reciclagem dos RCC de forma significativa foi iniciada na década de 80 com o reaproveitamento de resíduos de alvenaria na produção de argamassas. Carneiro et al. (2001) apontam que em 1991 a Prefeitura Municipal de São Paulo implantou a primeira usina de reciclagem do Hemisfério Sul, e que pesquisas posteriores na região demonstraram a viabilidade do emprego de agregados reciclados em camadas de pavimentos. Conforme esse autor, desde então diversas cidades brasileiras, como São Paulo, Belo Horizonte, Ribeirão Preto, Salvador e outras passaram a utilizar esses materiais em obras de infraestrutura (FIEB, 2005; CARNEIRO et al., 2001).

2.3.2.2 Processo de reciclagem

De acordo com Motta (2005) o processo de reciclagem de agregados é composto por basicamente quatro operações unitárias: concentração, em que são removidas substâncias estranhas à fração mineral através de catação, separação magnética ou outro processo; britagem, que consiste na redução das dimensões dos grãos de modo a atender a determinada finalidade ou favorecer as operações subsequentes; peneiramento, em que através de peneiras é feita a produção de agregados com classificações granulométricas específicas; e operações auxiliares, que dão assistência ao processo de reciclagem através de, por exemplo, esteiras transportadoras e sistemas nebulizadores para contenção de poeira.

2.3.2.3 Pesquisas desenvolvidas quanto ao uso de RCC em obras de pavimentação

A nível internacional, pesquisa de O'Mahony et al. (1991, apud AMORIM, 2015) envolvendo resíduos de construção britados, em substituição a materiais usualmente empregados no Reino Unido, indicou potencialidade quanto à aplicação em camadas de sub-base de pavimentos.

No Brasil, diversos pesquisadores têm comprovado a potencialidade dos RCC quanto ao emprego em obras de pavimentação rodoviária. Bodí et al. (1995), após coleta e britagem de resíduos de construção oriundos de diversos locais de despejo na cidade de São Paulo, realizaram ensaios de determinação do Índice de Suporte Califórnia em misturas solo-agregado natural, solo-agregado reciclado e em agregados reciclados puros. Para uma mesma proporção de agregados, as misturas de solo com materiais reciclados apresentaram valores de ISC mais elevados que as misturas com materiais naturais. Amorim (2013), em pesquisa que propôs uma solução alternativa para construção de camadas de base de pavimentos urbanos no município de Campo Verde/MT, observou ganhos expressivos em misturas solo-RCC em termos de estabilização granulométrica e comportamento mecânico.

2.3.2.4 Requisitos para emprego de agregados reciclados em pavimentação

A norma NBR 15116 (ABNT, 2004) estabelece os requisitos técnicos para os agregados reciclados destinados a obras de edificações e infra-estrutura. Conforme apresentam as Tabelas 2 e 3, os materiais destinados ao emprego em pavimentação devem atender a requisitos gerais e específicos. De modo geral, exige-se que os materiais sejam bem graduados, atendam aos limites relacionados à dimensão máxima característica, à forma dos grãos e ao teor de materiais não minerais, bem como apresentem ISC e expansão conforme o tipo de camada de pavimento onde serão empregados.

Tabela 2 - Requisitos gerais para agregado reciclado destinado a pavimentação

Propriedades		Agregado reciclado classe A		Normas de ensaios	
		Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Composição granulométrica		Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica		≤ 63 mm		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma		≤ 3	-	ABNT NBR 7809	
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm		Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características ¹⁾	2		Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas	3		Anexo A	Anexo B
	Sulfatos	2		ABNT NBR 9917	

¹⁾ Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Fonte: NBR 15116 (adaptado)

Tabela 3 - Requisitos específicos para agregado reciclado destinado a pavimentação

Aplicação	ISC %	Expansão %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento ¹⁾	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

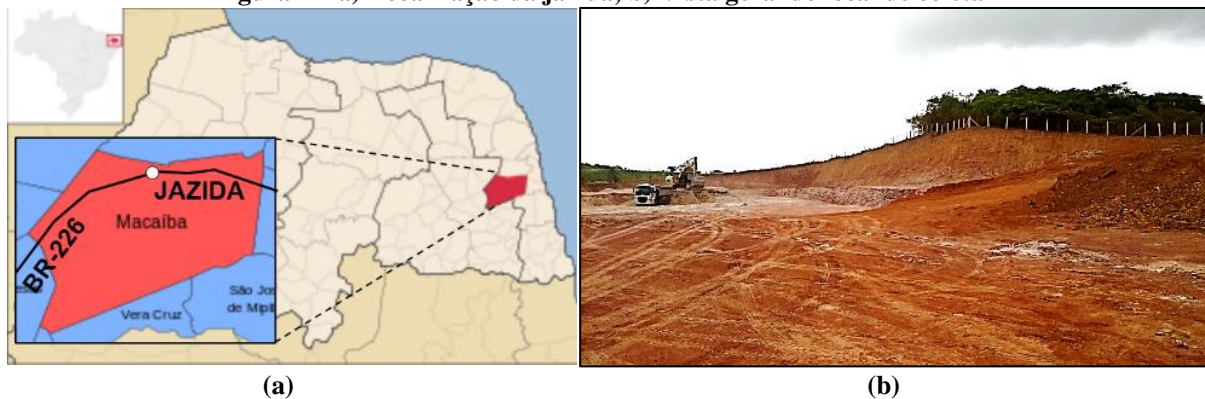
¹⁾ Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN) no período de projeto.

Fonte: NBR 15116 (adaptado)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Solo

O solo utilizado na presente pesquisa foi coletado em jazida localizada nas proximidades do quilômetro 24 da rodovia BR-226, em latitude $5^{\circ}51'57.1''$ sul e longitude $35^{\circ}25'07.6''$ oeste, no município de Macaíba – RN, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – a) Localização da jazida; b) Vista geral do local de coleta

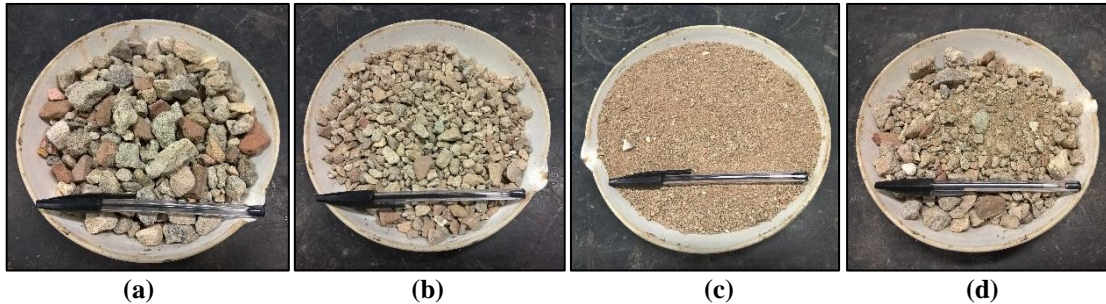
Fonte:
<https://pt.wikipedia.org/wiki/Maca%C3%ADba>

Fonte: Autor, 2017

3.2 Agregados reciclados

Os agregados reciclados utilizados nesta pesquisa, conforme ilustrados na Figura 2, consistem em britas nº 1, brita nº 0, areia, que foram fornecidos pela empresa Duarte Usina de Reciclagem Ltda., localizada no município de São José do Mipibu/RN. Trata-se de material que deriva do beneficiamento de resíduos da construção civil provenientes da cidade de Natal/RN.

Figura 2 – Agregados reciclados. (a) Brita nº 1, (b) Brita nº 0, (c) Areia, (d) Agregado reciclado composto



Fonte: Autor, 2017

3.3 Misturas solo-agregado reciclado

Previamente à mistura do solo com o resíduo, baseando-se no método das tentativas (SENÇO, 2007), preparou-se um agregado reciclado composto a partir da combinação de partes iguais de brita nº 1, brita nº 0 e areia (vide Figura 2d). Essa composição foi associada ao solo com teores de 25%, 50% e 75%, em massa seca, e possibilitou enquadramentos nas faixas granulométricas “C” e “D” do DNIT.

3.4 Caracterização dos agregados reciclados

Realizou-se a caracterização dos agregados reciclados através dos ensaios de: (a) Composição granulométrica (NBR NM 248/2003) antes e após compactação; (b) Índice de forma (NBR 7809/2006); (c) Índice de Suporte Califórnia na energia Proctor modificada (DNIT 172/2016 – ME); (d) Massa específica e absorção (NBR NM 53/2009); (e) Abrasão *Los Angeles* (NBR NM 51/2001); e (f) Determinação da composição por análise visual (NBR 15116/2004).

3.5 Caracterização do solo e das misturas solo-agregado reciclado

Tendo em vista verificar o atendimento a exigências normativas contidas na especificação de serviço ES 141 (DNIT, 2010) para base estabilizada granulometricamente, foram realizados os seguintes ensaios com o solo e com as misturas: (a) Análise granulométrica (DNER-ME 051/94) antes e após compactação; (b) Densidade real (DNER-ME 093/1994); (c) Determinação do limite de plasticidade (DNER-ME 082/94); (d) Determinação do limite de liquidez (DNER-ME 122/94); e (e) Índice de Suporte Califórnia na energia Proctor modificada (DNIT-ME 172/2016).

Conforme ilustra a Figura 3, realizou-se os ensaios de ISC para o solo a partir da moldagem de cinco corpos-de-prova com amostras não-trabalhadas em diferentes teores de umidade. O mesmo procedimento foi empregado nos ensaios com o agregado reciclado composto e com as misturas solo-agregado reciclado, obtendo-se o ISC final mediante extrapolação gráfica.

Figura 3 – Realização de ensaio de ISC. (a) Aparelhagem e amostras para ensaio; (b) Homogeneização de mistura de solo com agregado reciclado; (c) Corpos-de-prova submersos em ensaio de expansão; (d) Ensaio de penetração em prensa para ensaio de ISC



(a)



(b)



(c)



(d)

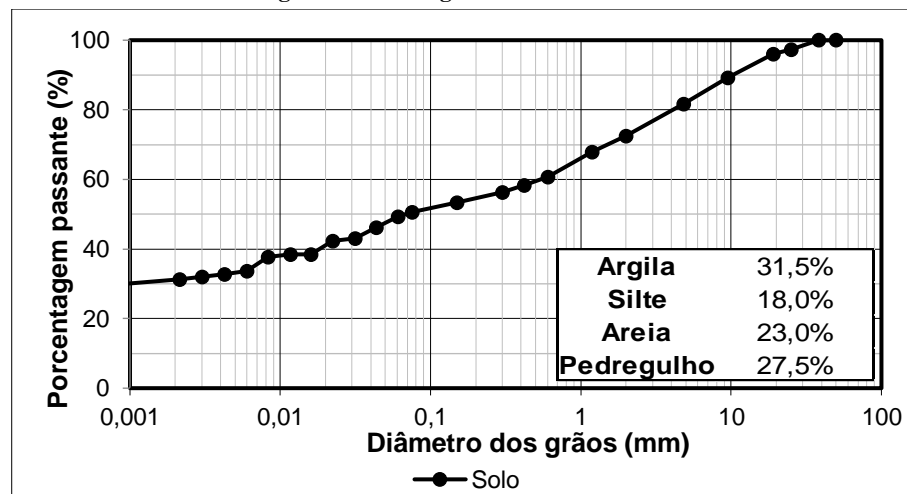
Fonte: Autor, 2017

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização do solo

A Figura 4 apresenta a curva granulométrica do solo em estudo e as porcentagens das frações que o compõem, obtidas com base nos limites definidos pela NBR 6502 (ABNT, 1995). A Tabela 4 reúne resultados de ensaios de caracterização física.

Figura 4 – Curva granulométrica do solo



Fonte: Autor, 2017

Tabela 4. Caracterização física do solo

LL (%)	LP (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm ³)
44	28	16	2,72

Nota: LL – Limite de liquidez; LP – Limite de plasticidade;
IP – Índice de plasticidade; ρ_s – Massa específica dos sólidos

Fonte: Autor, 2017

De acordo com a Figura 4 e a Tabela 4, os índices de consistência e a curva granulométrica obtidos para o solo indicam tratar-se de uma argila inorgânica de baixa compressibilidade (CL), de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Com base no sistema de classificação rodoviário HRB (*Highway Research Board*) o solo pertence ao grupo A-5, com índice de grupo (IG) igual a 6. Desse modo, supõe-se baixa capacidade de suporte, visto que o valor provável de ISC é no máximo 15% (DNIT, 2006).

A Tabela 5 e a Figura 5 apresentam dados relativos ao ensaio de ISC com o solo. Observou-se que o valor máximo de ISC ocorre no ramo seco da curva de compactação, em umidade ligeiramente inferior à umidade ótima. Devido à grande inclinação do ramo seco da curva, pequenas variações de umidade provocam mudanças significativas na massa específica seca e, no campo, influência no comportamento das camadas compactadas.

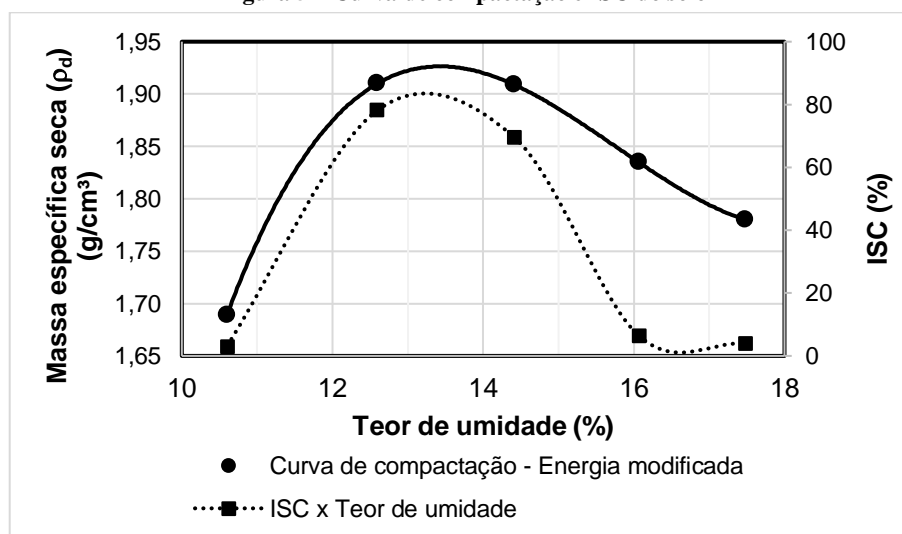
Tabela 5. Parâmetros de compactação, ISC e expansão do solo

$w_{ót}$ (%)	ρ_d (g/cm ³)	ISC (%)		Expansão (%)
		Valor máximo	Na umidade ótima	
13,4	1,93	84	83	0,05

Nota: $w_{ót}$ – Umidade ótima; ρ_d – Massa específica seca máxima;
ISC – Índice de Suporte Califórnia.

Fonte: Autor, 2017

Figura 5 – Curva de compactação e ISC do solo



Fonte: Autor, 2017

Com exceção dos valores de ISC e expansão apresentados na Tabela 5, verificou-se que o solo não atende à especificação de serviço ES 141 (DNIT, 2010) para emprego como material

de base, visto que a composição granulométrica do solo não enquadra-se em uma faixa granulométrica específica (vide Tabela 1); os valores de limite de liquidez e índice de plasticidade ultrapassam os limites normativos ($LL \leq 25\%$ e $IP \leq 6\%$); e a porcentagem passante na peneira nº 200 (50,6%) ultrapassa 2/3 daquela passante na peneira nº 40 (38,9%), indicando alto teor de finos.

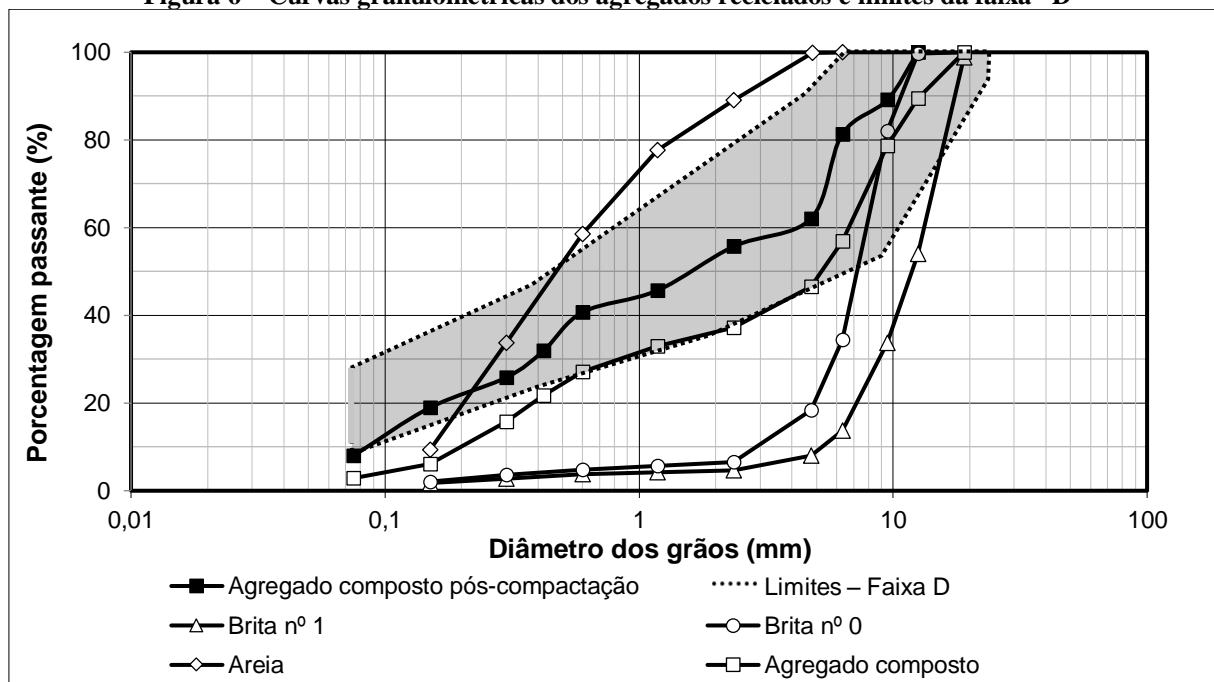
No entanto, com base nos parâmetros apresentados na Tabela 5, constata-se discrepância entre as propriedades inferidas pelos métodos de classificação geotécnica tradicionais e o comportamento observado para solo em estudo. Bernucci (1995) aponta que o emprego dos sistemas de classificação tradicionais em países africanos e latino-americanos a solos tropicais, particularmente solos lateríticos, tem levado à exclusão de solos de bom desempenho em estruturas de pavimentos.

4.2 Caracterização dos agregados reciclados

De acordo com o método apresentado no Anexo A da NBR 11516 (ABNT, 2004), obteve-se a seguinte composição para a brita nº 1: (a) grupo 1: fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume (59%); (b) grupo 2: fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume (23%); (c) grupo 3: fragmentos de cerâmica branca ou vermelha, com superfície não polida, mais de 50% do volume (14%); (d) grupo 4: fragmentos de materiais não minerais de natureza orgânica (madeira, plástico, etc.) e de contaminantes como vidros, vidrados cerâmicos e gesso (4%). Dado que a soma dos percentuais dos grupos 1 e 2 (82%) é inferior a 90%, esse agregado caracteriza-se como ARM (agregado reciclado misto). O percentual obtido para o grupo 4, em virtude do percentual de vidrados cerâmicos (2,9%), não atende ao requisito apresentado na Tabela 2.

Na Figura 6 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados reciclados utilizados e os limites da faixa granulométrica “D” do DNIT.

Figura 6 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados e limites da faixa “D”



Fonte: Autor, 2017.

Os resultados apresentados na Tabela 6 indicam que isoladamente os agregados são muito uniformes, dado que apresentaram coeficientes de uniformidade inferiores a 5

(CAPUTO, 1988). O agregado reciclado composto e a areia caracterizam-se por ter granulometria aberta, evidenciada por coeficientes de curvatura inferiores a 1. Apenas os parâmetros granulométricos referentes à composição de agregados atenderam aos requisitos da NBR 11516 (ABNT, 2004) quanto ao emprego em pavimentação. Conforme observa-se na Figura 6, a curva granulométrica do agregado composto pós-compactação na energia Proctor modificada enquadrou-se dentro dos limites da faixa “D” do DNIT.

Tabela 6. Parâmetros granulométricos dos agregados reciclados

Característica	Agregado reciclado			
	Brita nº 1	Brita nº 0	Areia	Composto
Coeficiente de uniformidade (Cu)	2,45	3,93	4,64	33,50
Coeficiente de curvatura (Cc)	1,18	2,08	0,69	0,60
Passante na peneira de 0,42 mm (%)	3	5	67	21
Dimensão máxima característica (mm)	19,00	12,50	4,75	19,00
Módulo de finura	6,42	5,77	2,32	4,59

Fonte: Autor, 2017

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos dos ensaios de abrasão *Los Angeles*, massa específica, absorção de água e índice de forma das britas nº 1 e nº 0.

Tabela 7. Propriedades dos agregados reciclados

Característica	Brita nº 1	Brita nº 0
Abrasão Los Angeles (%)	47	53
Massa específica (g/cm ³)	2,48	2,54
Absorção (%)	7,73	8,48
Índice de forma (IF)	2,20	2,40
Grãos de forma lamelar (%)	12,5	15,5

Fonte: Autor, 2017

Os desgastes apresentados pelos agregados graúdos no ensaio de abrasão *Los Angeles* atendem à especificação de serviço ES-141/2010 para materiais de base, visto serem inferiores a 55%. Os valores encontrados para os índices de forma, inferiores a 3, e para os percentuais de grãos lamelares, inferiores a 30%, atendem aos requisitos da NBR 11515 e NBR 11516 (ABNT, 2004). Essas normas, no entanto, não apresentam requisitos quanto ao teor de absorção de água, ainda que essa seja uma das propriedades que mais notadamente distingue os materiais naturais dos materiais reciclados. O teor de absorção encontrado para a brita nº 1 é semelhante ao encontrado por Motta (2005) para um agregado graúdo proveniente de usina recicladora de São Paulo (7,8%).

Os valores de ISC e expansão apresentados na Tabela 8 satisfazem os requisitos da NBR 11516 (ABNT, 2004) quanto ao emprego em camadas de base de pavimento cujo número “N” seja inferior a 10⁶. Na Figura 7 observa-se que o pico para o ISC ocorre no ramo seco da curva de compactação. Grubba (2009) e Jiménez (2011) obtiveram para agregados reciclados de concreto (ARC) resultados de ISC respectivamente iguais a 176% e 162%, superiores ao valor encontrado para o agregado reciclado misto empregado nesta pesquisa. Esse fato reforça que variabilidade das propriedades desses materiais está fortemente ligada à sua composição.

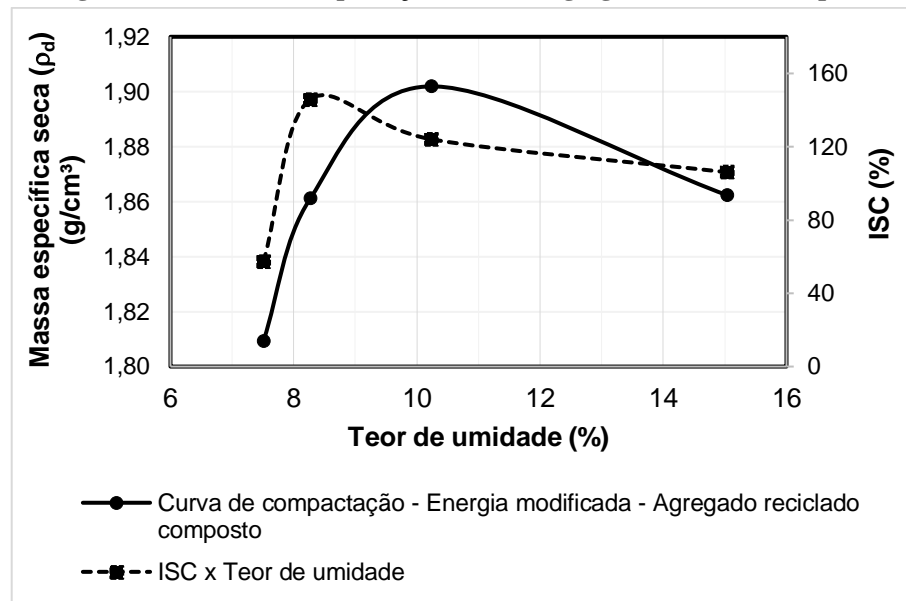
Tabela 8. Parâmetros de compactação, ISC e expansão do agregado reciclado composto

$w_{ót}$ (%)	ρ_d (g/cm ³)	ISC (%)		Expansão (%)
		Valor máximo	Na umidade ótima	
10,2	1,90	146	124	0,03

Nota: $w_{ót}$ – Umidade ótima; ρ_d – Massa específica seca máxima;
ISC – Índice de Suporte Califórnia.

Fonte: Autor, 2017

Figura 7 – Curva de compactação e ISC do agregado reciclado composto



Fonte: Autor, 2017

4.3 Caracterização das misturas solo-agregado reciclado

Com base nos resultados apresentados na Tabela 9, apenas a mistura contendo 75% de resíduo atendeu aos requisitos da especificação ES-141/2010, visto que apresentou limite de liquidez inferior a 25% e caracterizou-se como não plástica (NP). É oportuno destacar a necessidade de avaliação do equivalente de areia das misturas contendo 25% e 50% de resíduo, visto que seus os valores de LL são superiores a 25%.

Tabela 9. Caracterização física das misturas solo-agregado reciclado

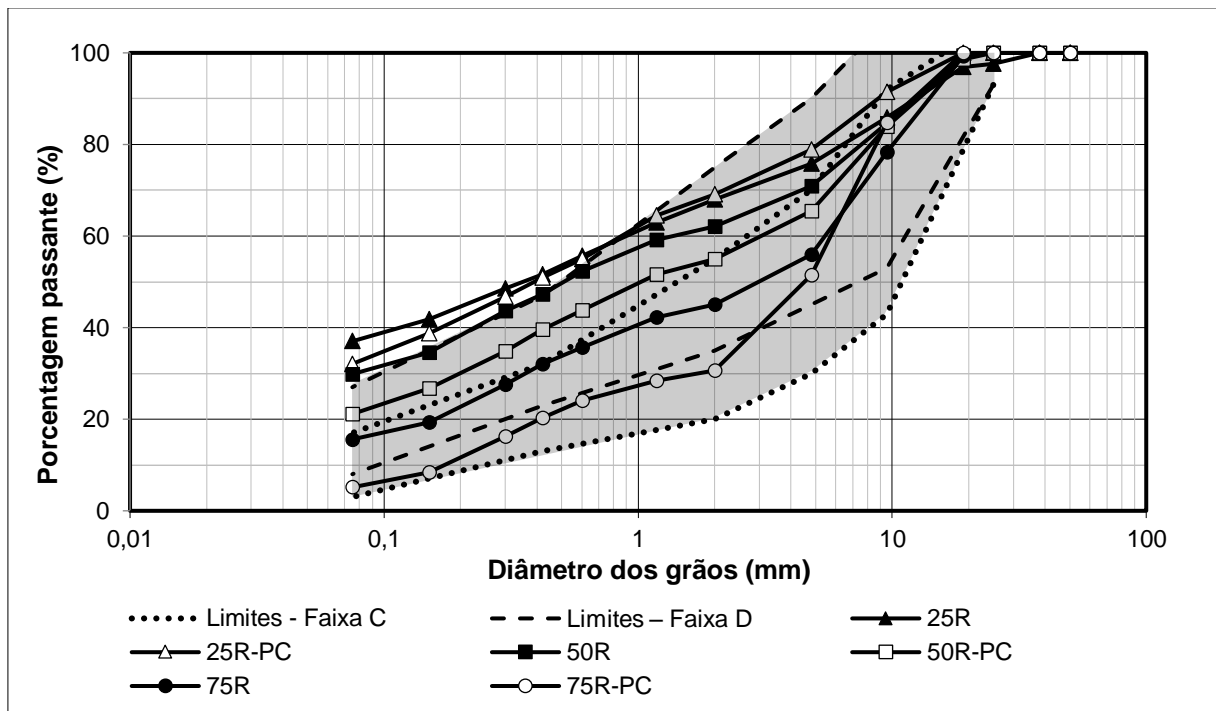
Mistura	LL (%)	LP (%)	IP (%)	ρ_s (g/cm ³)
25R	36	23	13	2,68
50R	30	Não plástico		2,65
75R	20	Não plástico		2,64

Nota: LL – Limite de liquidez; LP – Limite de plasticidade; IP – Índice de plasticidade; ρ_s – Massa específica dos sólidos; AR – Agregado reciclado; 25R – Mistura com 25% de AR; 50R – Mistura com 50% de AR; 75R – Mistura com 75% de AR

Fonte: Autor, 2017

Conforme observa-se na Figura 8, no tocante à composição granulométrica, as misturas contendo 50% e 75% de agregado reciclado, após compactação na umidade ótima, enquadraram-se, respectivamente, dentro dos limites especificados para a faixa “D” e “C” do DNIT. Para as misturas também verificou-se que, após compactação, os percentuais passantes na peneira nº 200, respectivamente 32,1%, 21,1% e 5,13%, foram inferiores a 2/3 das porcentagens passantes na peneira nº 40 (33,9%, 26,4% e 13,5%).

Figura 8 – Curvas granulométricas das misturas solo-agregado reciclado antes e após compactação e limites das faixas “C” e “D”



Fonte: Autor, 2017.

Nota: PC – Pós-compactação

A Tabela 10 reúne os resultados dos ensaios de compactação, ISC e expansão para o solo, para as misturas e para o agregado reciclado composto.

Tabela 10. Parâmetros de compactação, ISC e expansão do solo puro, do agregado reciclado composto e das misturas

Material	W _{ót} (%)	ρ _d (g/cm ³)	ISC (%)		Expansão (%)
			Valor máximo	Na umidade ótima	
Solo	13,4	1,93	84	83	0,05
25R	9,4	2,02	103	97	0,05
50R	11,3	1,93	103	60	0,07
75R	8,4	1,94	142	136	0,10
ARC	10,2	1,90	148	124	0,03

Nota: w_{ót} – Umidade ótima; ρ_d – Massa específica seca máxima; ISC – Índice de Suporte Califórnia; ARC - Agregado reciclado composto

Fonte: Autor, 2017

Observou-se que a presença de resíduo nas misturas promoveu, em relação ao solo puro, redução na umidade ótima e aumento ou conservação da massa específica seca máxima. Em particular, a mistura com teor de 25% apresentou a máxima compactação. O acréscimo de agregado reciclado também promoveu aumento do ISC em relação ao solo puro, exceto para a mistura com teor de 50%, cuja umidade ótima e ISC não obedeceram à tendência relativa às demais misturas. Em todos os casos os valores máximos de ISC ocorreram no ramo seco das curvas de compactação, no entanto, o resultado final deve ser fornecido com base na umidade ótima (DNIT, 2016). Caputo (1988) observa que pareceria mais conveniente compactar o solo com uma umidade inferior à ótima, visto que sua resistência seria mais elevada. No entanto, o maior volume de vazios facilitaria o acesso da água, levaria o material ao ramo descendente da curva e provocaria significativa perda de resistência. De outro modo, se compactado na umidade ótima, mesmo saturado o solo apresentaria resistência apreciável.

Os valores de ISC e massa específica seca máxima obtidos não apresentaram correlação. Gidigas et al. (1987) e Porter (1942), citados por Luz (2003), chegaram à conclusão que não há correlações satisfatórias do ISC com as propriedades índices dos solos.

Quanto aos critérios de ISC e expansão, todas as misturas solo-agregado reciclado, o agregado reciclado composto e o solo puro apresentaram conformidade quanto às exigências para camadas de base estabilizada granulometricamente, considerando tráfego com $N \leq 5 \times 10^6$ ($ISC \geq 60\%$ e $Expansão \leq 0,5\%$). Salienta-se que a norma NBR 11516 não permite a aplicação de agregados reciclados na pavimentação de vias com número N superior a 10^6 .

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um estudo envolvendo misturas de solo com agregados reciclados tendo em vista o atendimento aos requisitos técnicos para emprego em camadas de base de pavimentos de vias com baixo volume de tráfego. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A mistura contendo 75% de agregado reciclado atendeu aos requisitos mencionados, visto que adequou-se aos limites fixados pela norma ES 141 (DNIT, 2010) e possibilitou o enquadramento na faixa granulométrica “C”.
- Exceto quanto ao percentual de contaminantes, o agregado reciclado composto atendeu aos requisitos impostos pela NBR 15116 para emprego em camadas de base em pavimentação.

6. REFERÊNCIAS

AMORIM, E.F. (2013). **Viabilidade Técnica Econômica de Misturas de Solo-RCD em Camadas de Base de Pavimentos Urbanos. Estudo de Caso: Município de Campo Verde - MT.** Tese de Doutorado, Publicação G.TD-090/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15116 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2004. 12p.

_____. **NBR 15115 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos.** Rio de Janeiro, 2004. 10p.

_____. **NBR 6502 – Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 1995. 18p.

_____. **NBR NM 248 – Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. **NBR 7809 – Agregado graúdo – Determinação do índice de forma.** Rio de Janeiro, 2006. 3p.

_____. **NBR NM 53 - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009. 8p.

_____. **NBR NM 51 - Agregado graúdo - Ensaio de abrasão *Los Angeles*.** Rio de Janeiro, 2001. 6p

BERNUCCI, L. L. B. (1995). **Considerações sobre o dimensionamento de pavimentos utilizando solos lateríticos para rodovias de baixo volume de tráfego.** Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 237 p.

BERNUCCI, L. L. B., MOTTA, L. M. G., SOARES, J. B., CERATTI, J. A. P. (2010). **Pavimentação Asfáltica - Formação Básica para Engenheiros.** PETROBRAS - ABEDA. 3ª Reimpressão. Rio de Janeiro - RJ. 500p.

BODI, J., FILHO, J. A. B., ALMEIDA, S. (1995). **Utilização de Entulho de Construção Civil Reciclado na Pavimentação Urbana.** 29ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Cuiabá - MT. p.409-436.

BRASIL. Ministério das Cidades. Ministério do Meio Ambiente. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos: orientação para o seu licenciamento e aplicação da Resolução Conama 307/2002.** 2005.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações – vol. 1.** 6ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1988.

CARNEIRO, A. P., BURGOS, P. C., ALBERTE, E. P. V. (2001). **Uso do Agregado Reciclado em Camadas de Base e Sub-Base de Pavimentos. Projeto Entulho Bom.** Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal. Salvador - BA. p.190-227.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - Ministério do Meio Ambiente, Governo Federal, Brasil. (2002). **Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002.** Brasília - DF, 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de pavimentação,** 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ: IPR, 2006.

_____. **DNER-ME 035/98:** Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 1998. 6p.

_____. **DNER-ME 051/94:** Solos - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1994. 12p.

_____. **DNER-ME 082/94:** Solos – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1994. 3p.

_____. **DNER-ME 122/94: Solos – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1994. 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010 – ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2010. 9p.

_____. **DNIT 172/2016 – ME: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2016. 17p.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** 2009. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infra-Estrutura de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

GÓMEZ, A. M. J. **Estudo Experimental de um Resíduo de Construção e Demolição (RCD) para Utilização em Pavimentação.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília - DF. 148p

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil – contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento.** São Paulo, 2000. 102p. Tese (livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

LEVY, S. M. **Reciclagem do Entulho de Construção Civil para Utilização como Agregado de Argamassas e Concretos.** São Paulo, 1997. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

LIMA, J. A. R. **Proposição de Diretrizes para Produção e Normalização de Resíduos de Construção Reciclado e Suas Aplicações em Argamassas e Concretos.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP. 240p.

LUZ, M. P. **Análise dos resultados do ensaio CBR realizado em condições variadas de umidade pós-compactação.** São Carlos, 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

MOTTA, R. S. **Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego.** Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 134p.

SENÇO, W. (2007). **Manual de Técnicas de Pavimentação - volume I - 2ª edição.** PINI. São Paulo - SP. 761p.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DA BAHIA. **Gestão de Resíduos na Construção Civil: Redução, Reutilização e Reciclagem.** Projeto Competir. 2013. Disponível em: <<http://www.fieb.org.br/bancafieb/detalhe/gestao-de-residuos-na-construcao-civil-reducao-reutilizacao-e-reciclagem/177>>. Acesso: 20 set. 2017.

7. AGRADECIMENTOS

É indispensável prestar agradecimentos ao prof. Dr. Fagner França pela notável dedicação demonstrada na orientação desta pesquisa; ao IFRN pela disponibilidade dos laboratórios e infraestrutura; ao técnico Kélio Jefferson, em razão do apoio na coleta do solo em jazida; à UNIFACEX, na pessoa do técnico Murilo Rodrigues, pela cessão de aparelhagem para ensaios; à empresa Duarte Usina de Reciclagem Ltda. pelo fornecimento dos agregados reciclados; aos alunos Wan Farias, Lílian Santos e André Luiz pelo auxílio na realização dos ensaios; e a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a produção deste trabalho.