

EFEITOS DA VARIAÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE UM AGREGADO RECICLADO DE RCD DA REGIÃO DE AMERICANA-BRASIL PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO

Amaro G. Joaquim¹, Priscila S. Salgado², Ivonei Teixeira³ & Cassio E. L. de Paiva⁴

^{1,2}Eng° Civil Mestrando da FEC-UNICAMP, Departamento de Geotecnia e Transportes, Tel: + 55 193521 2394, amaro@fec.unicamp.br/priscilassalgado@outlook.com. Site: <http://www.fec.unicamp.br>.

³Mestre em Eng. Civil pela FEC-UNICAMP, Departamento de Geotecnia e Transportes, Tel: + 55 193521 2307, ivoneit@gmail.com.

⁴Professor Titular Doutor da FEC-UNICAMP, Departamento de Geotecnia e Transportes, Tel: +55 193521 2343, celpaiva@fec.unicamp.br.

^{1,2,3,4}Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Rua Saturnino de Brito, 224, Cidade Universitária Zeferino Vaz, CEP: 13083-889, Caixa Postal: 6143, Campinas - São Paulo, Brasil.

Resumo

A crescente quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) gerada pela construção civil, tem sido fonte de preocupação em todo o mundo devido aos grandes problemas ambientais, sociais, econômico e de saúde pública. Uma alternativa para esses problemas é o reaproveitamento desses resíduos na forma de agregado reciclado para emprego em pavimentação. Em função da heterogeneidade do RCD, o agregado apresenta características peculiares essenciais para compreender o seu comportamento. O presente trabalho tem como objectivo avaliar os efeitos da variação de energia de compactação nas propriedades físicas e mecânicas do agregado reciclado de RCD, gerado na região de Americana, SP, verificando sua viabilidade técnica para o emprego em camadas de base, sub base e reforço do subleito em vias públicas de baixo volume de tráfego. Para tal, estudou-se o agregado da usina Cemara Pró Ambiental, caracterizando-o fisicamente através de ensaios laboratoriais de composição, absorção, forma, granulometria, índice de degradação e forma após a compactação, e para a caracterização mecânica verificou-se o Índice de Suporte Califórnia (CBR).

Palavras chave: RCD; agregado reciclado; energia de compactação; pavimentação.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores de grande importância da indústria brasileira e vem apresentando um crescimento significativo nos últimos anos. Apesar de seus impactos socioeconômicos positivos, ainda é um dos segmentos que mais degradam o meio ambiente, seja pela violenta modificação da paisagem, pela utilização dos recursos naturais ou pela geração de resíduos sólidos.

A falta de gerenciamento dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) acarreta problemas ambientais, sociais e de saúde pública nos municípios. Alguns desses problemas estão diretamente ligados aos Resíduos de Construção e Demolição (RCD) que representam uma parcela significativa do RSU, variando entre 51 a 70%, segundo [1].

A aplicação do RCD em processos construtivos é uma forma de minimizar os impactos ambientais gerados pela construção civil e a sua utilização é ampla. Em pavimentação, pode ser empregado como material para as camadas de base, sub base e reforço do subleito.

Ao submeter o agregado reciclado de RCD às diferentes energias de compactação, esse pode variar o seu comportamento físico e mecânico. Portanto, há necessidade de avaliar os efeitos da variação de energia de compactação nas propriedades físicas e mecânicas de um agregado reciclado para uso em pavimentação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos deste trabalho, realizados na Faculdade de Tecnologia da UNICAMP, Limeira, SP, analisam propriedades físicas e mecânicas do agregado reciclado de RCD após a compactação com as diferentes energias Proctor.

O material analisado é o agregado reciclado de RCD classificado como Bica Graduada Simples (BGS), fornecido pela usina de reciclagem Cemara Pró Ambiental, localizado na cidade de Americana, SP. O material foi coletado aleatoriamente da pilha de BGS, apresentado na Figura 1, em um único dia, 20 de Junho de 2014, a fim de evitar possíveis variações de composição e granulometria.



Fig.1. Bica Graduada Simples

2.1 Caracterização física

2.1.1 Composição

Baseando-se na metodologia [2] adaptada em [3], para o ensaio de composição do agregado, fez-se a seleção de uma amostra de 12 kg de material seco, prosseguiu-se com o peneiramento separando os tamanhos graúdos dos miúdos. Após a separação granulométrica, seguiu-se com a classificação visual dos diferentes tipos de materiais encontrados na composição. Não foi possível classificar o material fino devido à sua dimensão.

2.1.2 Absorção e Forma

O ensaio de absorção foi realizado conforme [4]. Utilizou-se uma amostra de 12 kg, no entanto, somente a parte graúda, que são os materiais retidos na peneira de 4,75 mm. O ensaio de “forma” foi realizado com base em [5]. Toda análise foi feita com o paquímetro manual.

2.1.3 Granulometria

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação de acordo com [6]. Conforme [7], recomenda-se que o agregado de RCD para uso em pavimentação deve ter uma dimensão característica máxima de 63,5 mm, apresentar de 10 à 40% de material passante na peneira de 0,42 mm e ter coeficiente de não uniformidade (CNU) maior ou igual a 10.

2.1.4 Ensaio de compactação

Segundo [8], o objetivo do ensaio de compactação é determinar o teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima do solo quando compactado. A usina Cemara Pró Ambiental forneceu tais parâmetros referentes às energias de compactação normal e intermediária.

2.1.5 Índice de degradação e forma após a compactação

O Índice de Degradação foi realizado pelo método de ensaio [9]. Apesar da metodologia mencionar apenas a energia intermediária, o ensaio também foi realizado nas energias Proctor normal e modificada. O ensaio de forma após a compactação foi realizado de acordo com [5].

2.2 Caracterização mecânica

2.2.1 Índice de Suporte Califórnia

O ensaio do Índice de Suporte Califórnia (CBR) foi realizado pelo método [10]. Segundo [7], o ISC para pavimentos com baixo volume de tráfego deve ser igual ou superior a 60%, 30% e 12% para base, sub base e reforço do subleito, respectivamente. A expansão não deve ultrapassar 0,5%, para o uso em base e sub base, e 1,0% para reforço do subleito.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Ensaios de caracterização física

3.1.1 Composição

O agregado reciclado de RCD foi separado de acordo com a natureza de seus materiais constituintes. Verificou-se que este é composto por seis grupos distintos: material cimentício (argamassas e concretos); britas; tijolos e telhas; pisos e azulejos; asfalto e resíduos indesejáveis, tal como a Figura 2.



Fig.2. Composição do agregado reciclado em estudo.

Através do Quadro 1, é possível observar que o material cimentício (61,3%) é predominante. O agregado foi classificado como misto, pois apresenta menos de 90% de materiais cimentício e rochosos. A porcentagem total de materiais indesejáveis na amostra corresponde à 0,50%. Com a análise visual realizada por catação, verificou-se que os esses materiais eram de diferentes naturezas como gesso, vidro, madeira, papel, plástico e isopor.

Quadro 1. Porcentagem em massa dos materiais constituintes

Natureza do Material	Massa (g)	%
Cimentício	3382,29	61,30
Tijolos e Telhas	746,74	13,50
Pisos e Azulejos	363,45	6,60
Britas	431,35	7,80
Asfalto	566,29	10,30
Materiais indesejáveis	26,72	0,50
Σ	5516,84	100

Em [7] estabelece o valor limite de 3% de resíduos indesejáveis, portanto, o agregado atende as especificações da norma.

3.1.2 Absorção

O Quadro 2 apresenta os valores de absorção de cada material que compõe a amostra de RCD e a média ponderada.

Quadro 2. Absorção dos grãos retidos na peneira 4,75mm do agregado reciclado de RCD de Americana de acordo a natureza de material constituinte

Natureza do Material	Composição (%)	Absorção (%)	Absorção Média (%)
Cimentício	61,3	8,12	8,78
Tijolos e Telhas	13,5	20,12	
Pisos e Azulejos	6,6	6,48	
Britas	7,8	3,50	
Asfalto	10,3	2,66	
Resíduos Indesejáveis	0,5	19,01	

Observa-se no Quadro 2 que as telhas e tijolos apresentam uma absorção cerca de sete vezes maior que o asfalto e as britas. Segundo [2], as britas apresentam absorção inferior a 2%.

Portanto, durante o processo de compactação, deve-se adicionar uma quantidade de água maior ao agregado de reciclado do que nos materiais pétreos convencionais. Por meio de média ponderada, verificou-se uma absorção média de 8,78%.

3.1.3 Análise da forma

O Quadro 3 apresenta a porcentagem de grãos com formas cúbica, lamelar, alongada e alongada-lamelar do agregado em estudo.

Quadro 3. Forma dos grãos e porcentagens do agregado reciclado de RCD Americana estudado em laboratório

Classificação da Forma	Índice (%)
Cúbica	64,7
Alongada	5,3
Lamelar	28,7
Alongada-Lamelar	1,2

Conforme o Quadro 3, verifica-se que os grãos com forma cúbica (64,7%) apresentam predominância, devido à presença de materiais cimentícios. A predominância de grãos cúbicos é positiva em pavimentação, pois grãos com forma cúbica conduzem a um melhor entrosamento entre as partículas, aumentando a resistência ao cisalhamento e diminuindo a área específica [11].

Observou-se que o material apresenta 28,7% de grãos de forma lamelar devido à presença de materiais cerâmicos. Grãos com forma lamelar quebram com facilidade, logo, em grande quantidade, pode prejudicar a resistência da camada do pavimento [12]. Em [7] recomenda-se no máximo 30% de grãos com esse formato, portando o agregado atende a norma.

3.1.4 Granulometria

A análise granulométrica do agregado reciclado foi realizada através do ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação, de acordo com [6].

Verificou-se nos dados do ensaio granulométrico que o agregado reciclado tem dimensão característica máxima de 50,8 mm e apresenta 36,7% de material passante na peneira de 0,42 mm. A Figura 3 apresenta a curva granulométrica do agregado em estudo.

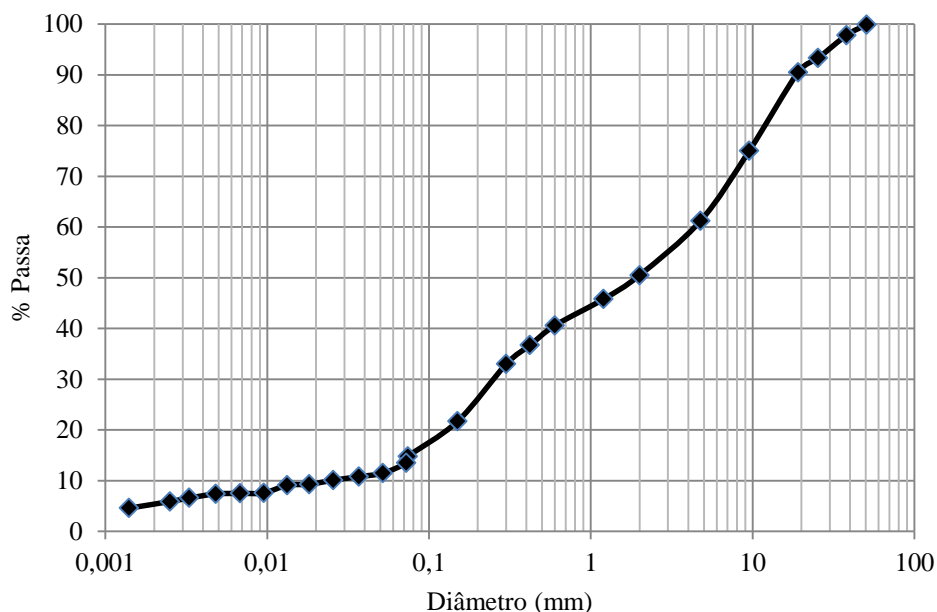


Fig.3. Curva granulométrica do agregado reciclado em estudo

Nota-se, através da Figura 3, que o material possui uma distribuição granulométrica não uniforme e mal graduada, com coeficiente de não uniformidade $C_{NU}=180$ e coeficiente de curvatura $C_C=0,56$. A não uniformidade dos agregados reciclados é uma característica positiva quando se pretende usar o material em camadas de pavimento [13].

Em [7] menciona que o agregado reciclado de RCD, para uso em pavimentação, deve ter uma dimensão característica máxima de 63,5 mm, apresentar porcentagem de material passante da peneira de 0,42 mm entre 10 à 40% e ter coeficiente de não uniformidade maior ou igual a 10. Assim, o material atende a os requisitos granulométricos estabelecidos pela norma.

3.1.5 Ensaios de compactação

Os resultados dos ensaios de compactação, fornecidos pela Cemara Pró Ambiental. Obteve valores de umidade ótima de 17,2% e 10,5% e massa específica aparente seca máxima de 1,705 g/cm³ e 1,936 g/cm³ para as energias normal e intermediária, respectivamente.

3.1.6 Índice de Degradação e forma após a compactação

O Índice de Degradação foi realizado conforme o método de ensaio [9]. Os valores obtidos foram 10,37%, 10,47% e 12,83% para as energias normal, intermediária e modificada, respectivamente. Segundo [14] citado por [15], o valor crítico do IDp ocorre quando é possível visualizar uma inflexão brusca na curva granulométrica.

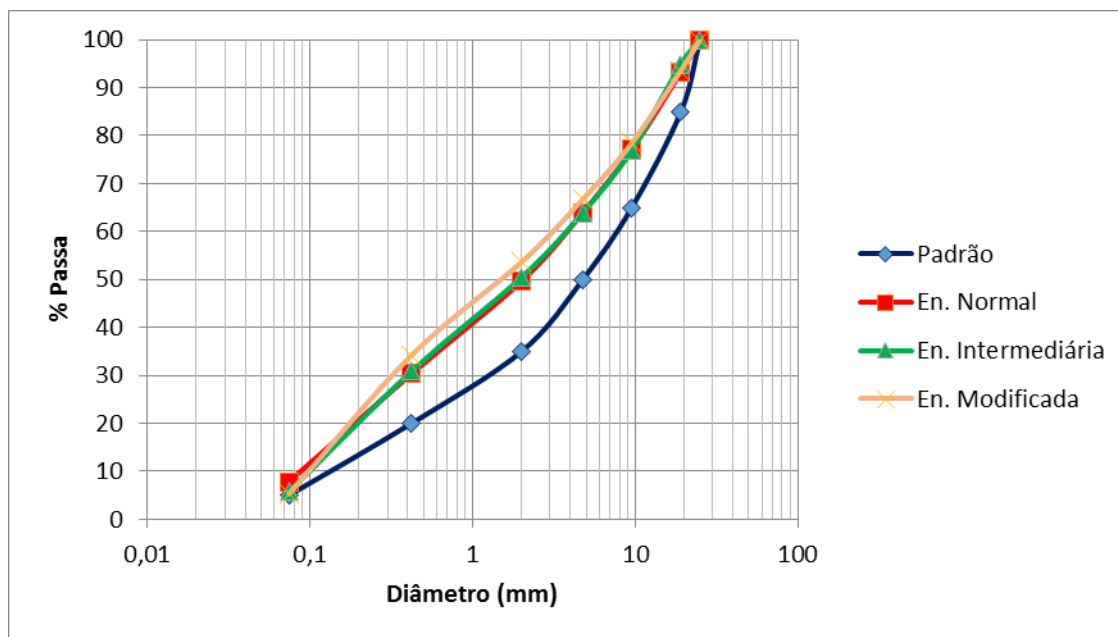


Fig.4. Curvas granulométricas do agregado em estudo

Na Figura 4, observa-se e que as curvas granulométricas possuem uma configuração semelhante à curva padrão e não apresentam brusca inflexão na granulometria. Portanto, o IDp não atingiu seu valor ou estado crítico.

Verifica-se que a maior fragmentação dos grãos ocorreu com a aplicação da energia modificada. Porém, a maior variação da degradação registrou-se entre o material natural e o compactado na energia normal. Entre as energias de compactação normal e intermediária a variação da degradação é pequena.

Após a compactação do agregado nas energias normal, intermediária e modificada foi realizado a análise dos efeitos da variação da energia de compactação na forma dos grãos, conforme [5]. O percentual de partículas com forma cúbica aumentou progressivamente obtendo os valores 73,8%, 75,1% e 82,9% nas energias normal, intermediária e modificada, respectivamente. Com aumento da energia de compactação, as partículas com forma lamelar diminuíram.

3.2 Caracterização mecânica

3.2.1 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O Índice de Suporte Califórnia foi executado com base no método [10]. Valores do ISC e expansão foram fornecidos pela Cemara Pró Ambiental. Os valores são iguais a 34% e 213% nas energias Proctor normal e intermediária respectivamente, e expansão nula para ambas.

Na energia intermediária, o ISC apresentou um valor superior (CBR=213%) aos encontrados na literatura. Esse valor elevado pode ser explicado levando em conta a distribuição granulométrica do material. Por apresentar considerável fração de agregado graúdo, uma dessas partículas pode se acoplar abaixo do pistão, dificultando a penetração e, conseqüentemente, aumentando a porcentagem do ISC [16].

Dessa forma, optou-se em realizar o ensaio somente na energia intermediária, obtendo uma resistência à penetração igual a 94% e expansão igual a 0,09%.

Devido à heterogeneidade do agregado reciclado e as variações nos Índices de Suporte Califórnia, recomenda-se que o comportamento mecânico seja avaliado, também, através de outros experimentos, como o módulo de resiliência e deformação permanente.

Em [7] recomenda-se que o ISC deve ser igual ou superior a 60%, 30% e 12% para base, sub base e reforço do subleito, respectivamente. A expansão não deve ultrapassar 0,5%, para o uso em base e sub base, e 1,0% para reforço do subleito. Portanto, o agregado atende a norma.

4 CONCLUSÕES

A partir da apresentação e análise dos resultados obtidos pelos ensaios laboratoriais pode-se concluir que:

- O agregado reciclado da usina de Americana é um material heterogêneo classificado como misto. No ensaio de composição, a fração graúda mostrou-se com predominância de material cimentício e, também, apresentou um percentual de asfalto. Portanto, a composição do agregado influencia no seu comportamento quando compactado.
- O teor de absorção da fração graúda do agregado reciclado é maior nos materiais cerâmicos, pois verificou-se que as telhas e tijolos presentes no RCD apresentam um teor de absorção elevado. Então, pode-se dizer que a natureza dos materiais constituintes do agregado reciclado influencia diretamente no teor de absorção. Portanto, o agregado reciclado de RCD necessita de maior quantidade de água durante o processo de compactação.
- A forma cúbica é predominante no material devido à presença de materiais cimentícios, sendo esta, uma característica considerada positiva quando se trata de pavimentação. Verificou-se ainda que forma lamelar é predominante em materiais cerâmicos. Portanto, quanto maior a quantidade de materiais cimentícios, maior a tendência do agregado reciclado apresentar partículas com formas cúbicas e quanto maior for a quantidade de cerâmicos, maior a propensão do agregado apresentar grãos com formas lamelares.
- O agregado reciclado atende as especificações granulométricas em [7], em relação à dimensão característica máxima dos grãos, às partículas passante da peneira de 0,42 mm e o coeficiente de não uniformidade C_{NU} . Conclui-se, também, que apesar da norma não mencionar valores para o coeficiente de curvatura C_c , deveria haver um limite fixo deste parâmetro após a compactação, pois, como foi verificado, é comum se deparar com coeficiente de curvatura inferior a 1. Esse valor representa uma curva granulométrica descontínua o que gera mobilidade entre os grãos e, conseqüentemente, maior quebra das partículas após a compactação.
- A degradação do agregado é maior quando este é submetido à energia modificada. A variação do desgaste do material entre as energias normal e intermediária não é acentuada.
- A energia de compactação influencia na granulometria do agregado reciclado. A variação da granulometria é maior entre o material virgem e o compactado na energia normal, pois na energia intermediária a curva granulométrica permanece praticamente igual à curva na energia normal, devido à degradação branda das partículas.
- Ao submeter o material as energias de compactação normal, intermediária e modificada aumentou gradativamente a quantidade de partículas com forma cúbica e, semelhantemente, diminuiu a quantidade de partículas com forma lamelar e alongada. Portanto, a energia de compactação influencia na forma das partículas, permitindo, assim, melhor acomodação entre os grãos do agregado reciclado.
- Com aumento da energia de compactação aumentou os valores de ISC. É sempre aconselhável fazer um controle dos valores de ISC devido à grande variabilidade da composição do agregado reciclado.

E por fim, conclui-se que o agregado reciclado de RCD da usina de Americana apresenta uma variação positiva nas suas propriedades físicas e mecânicas com aumento da energia de compactação. Através dos resultados dos ensaios laboratoriais comprova-se que com emprego da energia de compactação intermediária o material já atende as prescrições em [7] tornando-o tecnicamente viável para o uso nas camadas de base, sub base e reforço do subleito em vias públicas de baixo volume de tráfego.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores não poderiam deixar de expressar publicamente o seu agradecimento ao UNAP-EC, à Faculdade de Tecnologia da UNICAMP e à usina de reciclagem Cemara Pró Ambiental.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SNSA. *Panorama dos resíduos de construção e demolição (RCD) no Brasil*. Disponível em: <http://www.mp.go.gov.br/portalweb/hp/9/docs/rsudoutrina_24.pdf>. Acesso em: 4 de Novembro de 2014.
2. R. S. Motta. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil para a aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. São Paulo, 2005. 161f. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
3. A. M. G. Jiménez. Dissertação (Mestrado em Geotécnica), *Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD), para utilização em pavimentação*. Brasília, 2011. 148f. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6458: Grão de pedregulho retido na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro, 1984.
5. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6954: Lastro – Padrão – Determinação da forma do material*. Rio de Janeiro, 1989.
6. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos*. Rio de Janeiro, 2004.
8. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 1986.
9. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Método de ensaios ME 398: Agregados - Índice de degradação após compactação Proctor*. Rio de Janeiro, 1999.
10. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Método de Ensaio ME 049: Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Rio de Janeiro, 1994.
11. V. Q. Borba, A. A. Santos. Monografia, *Projeto de base drenante realizados de acordo com a especificação técnica DER/SP ET-DE-P00/008*. Criciúma, 2013. Universidade do Extremo Sul Catarinense.
12. R. D. Nóbrega, R. A. Melo. *Uso de Agregados de resíduos da construção civil na pavimentação urbana em João Pessoa*. In: Encontro Nacional sobre aproveitamento de Resíduos da Construção, 2009, Feira de Santana: ENARC, 2009.
13. D. C. R. P. Grubba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Transportes), *Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária*. São Carlos, 2009. 163f. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
14. J. A. G. Macêdo, R. C. Lima, C. R. V. Costa. *Estudos dos solos lateríticos: índice de degradação e sua influência na compactação e I.S.C*. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVAMINTAÇÃO, 1986. Anais. Salvador.
15. J. C. Oliveira. Tese (Doutorado em Ciências), *Indicadores de potencialidades e desempenho de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em pavimentos flexíveis*. Brasília, 2007. 190f. Universidade de Brasília.
16. F. B. M. Iyomasa. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana), *Utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil em camadas de pavimento de tráfego leve: estudo de caso no município de Americana*. São Carlos, 2013. 88f. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos.