

---

## ANÁLISE DE QUEBRA DE GRÃOS DE MISTURAS DE SOLO COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL PARA CAMADAS DE PAVIMENTO

### *GRAIN BREAKAGE ANALYSIS OF MIXTURES OF SOIL WITH CONSTRUCTION WASTE FOR PAVEMENT LAYERS*

*Leide Herllane Ferreira do Nascimento*<sup>1</sup>

*Vinícius de Oliveira Kühn*<sup>1</sup>

*Simone Cristina de Jesus*<sup>2</sup>

*Natália de Souza Correia*<sup>3</sup>

**Resumo:** Os resíduos da construção civil (RCC) possuem grande potencial de aplicação em obras de drenagem e pavimentação. No entanto, pesquisas apontam para a possível quebra de grãos mediante esforços de compactação no campo. Esta pesquisa visa contribuir com o entendimento do comportamento geotécnico de uma mistura solo-RCC para uso em camadas de pavimentos. A avaliação será realizada por meio da análise da potencial quebra dos agregados das misturas após análises de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e ensaios de compressão unidimensional dos pedregulhos do solo e do RCC. Constatou-se um ganho de capacidade de suporte CBR de 74% quando adicionado o RCC ao solo. Observou-se que os efeitos da quebra dos grãos no RCC foram superiores aos valores encontrados para o solo. No ensaio de compressão unidimensional, os pedregulhos do solo tiveram suas partículas rearranjadas para uma condição mais densa, diminuindo a compressibilidade. No caso dos pedregulhos de RCC, para maiores níveis de tensões, elevaram-se as tensões intergranulares, acarretando em quebra das partículas. De modo geral, os resultados indicaram que a quebra dos pedregulhos ocorreu com maior intensidade para os agregados reciclados do que para o solo.

**Palavras-chaves:** RCC, Solo, Quebra dos Grãos, Pavimentação, CBR, Compressibilidade.

**Abstract:** *Aggregates of civil construction and demolition waste (CDW) have great potential for application in drainage and paving works. However, researches point out to possible grain breakage due to compaction efforts in the field. This research aims to contribute to the understanding of geotechnical behavior of a soil-CDW mixture for the use in pavement layers. The evaluation will be carried out by analyzing the potential breakage of aggregate particles of these mixtures after California bearing ratio (CBR) analysis, and one-dimensional compression tests of gravel particles. An increase in CBR of 74% occurred when adding CDW to the soil. Results showed that the effects of grain breakage in CDW samples were higher than for the soil. In the one-dimensional compression tests, soil gravel had their particles rearranged to a denser condition, decreasing compressibility. While CDW gravel, for higher stresses levels, intergranular stresses raised, causing breakage of the particles. In general, results indicated that the breakage of gravel particles occurred with greater intensity for CDW than for the soil.*

**Keywords:** *CDW, Soil, Grain breakage, Pavement, CBR, Compressibility.*

---

<sup>1</sup> Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras-BA, e-mail: [leideherllane@gmail.com](mailto:leideherllane@gmail.com)

<sup>1</sup> Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras-BA, e-mail: [vinicius.kuhn@ufob.edu.br](mailto:vinicius.kuhn@ufob.edu.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba-MG, e-mail: [simone.jesus@uftm.edu.br](mailto:simone.jesus@uftm.edu.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, e-mail: [ncorreia@ufscar.br](mailto:ncorreia@ufscar.br)

## 1 Introdução

A construção civil representa uma das principais atividades de desenvolvimento do país, sendo também as maiores geradoras de impactos ambientais, devido ao alto consumo de recursos naturais, mudanças no ambiente e geração de resíduos. Segundo a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) de 2002 os resíduos gerados nas atividades da construção civil (RCC) são decorrentes das atividades de construção, reformas, demolição e perdas inerentes ao processo produtivo. De acordo com a última pesquisa da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), a coleta de RCC no Brasil, em 2018, está acima foi de 122.012 toneladas por dia, com um índice de coleta de 0,585 kg/hab./dia. A inadequada disposição do RCC tem gerado diversos problemas que abrangem aspectos ambientais, sociais e econômicos. Dentre estes problemas, podemos destacar o despejo no entorno das cidades e próximos a cursos de água, a consequente degradação da infraestrutura de drenagem, e obstrução de mananciais hídricos. Assim, uma das maneiras de reduzir os problemas causados pela indústria da construção civil é desenvolver tecnologias que possibilitem a reutilização destes recursos, reutilizando componentes que ainda possam desempenhar a função para a qual foram produzidos, ou mesmo serem utilizados em outra função (KILBERT, 1994).

Segundo Carneiro et al. (2001) entre as formas de reutilização, o emprego do RCC como agregado reciclado em obras de pavimentação se enquadra como uma das aplicações mais simples de serem executadas, já que o processo de reciclagem não exige técnicas tão sofisticadas. Além disso, deve se considerar que as mesmas demandam grandes quantidades de insumos naturais (solos e brita), exigindo mais materiais provenientes de jazidas. Assim, a aplicação dos agregados poderia reduzir essa demanda. Dentre as classes apresentadas na resolução do CONAMA nº 307/2002 para os resíduos reutilizáveis ou recicláveis, os de classe “A” são os que se adequam a reutilização como agregados para pavimentação e outras obras de infraestrutura. No Brasil, atualmente, existem duas normas que regulamentam o uso do RCC como agregado reciclado em obras da construção civil, a NBR 15115 (ABNT, 2004) e NBR 15116 (ABNT, 2004), específica para o uso dos agregados em pavimentação. Estas normas foram elaboradas visando estimular e regulamentar o uso dos agregados na indústria da construção. Contudo, no Brasil, verifica-se à falta de incentivo público nas políticas de desenvolvimento sustentável e aos preconceitos que prevalecem a respeito da utilização e das propriedades necessárias aos agregados reciclados para reuso na construção civil.

Diversas pesquisas apresentadas na literatura mostram os benefícios do emprego de RCC em obras de pavimentação (SANTOS e VILAR, 2008; HERRADOR et al., 2012; XUAN et al., 2015; CARDOSO et al., 2016; OSSA et al., 2016; ALMEIDA et al., 2018; ARTUSO e LUKIANTCHUKI, 2019). De acordo com WHITTAKER et al. (2019), o RCC pode ser aplicado em camadas acima de tubos enterrados, sub-base e base de pavimentos. HERRADOR et al. (2012) realizaram estudo experimental de campo e mostram que a capacidade de suporte apresentada com o uso do RCC apresentou comportamento similar ao observado para uma estrutura com agregados convencionais. Almeida et al. (2018), apresentaram um estudo da viabilidade econômica do uso de RCC proveniente de um aterro localizado no município de Passo Fundo-RS. Os autores demonstraram o adequado potencial para reuso deste em base, sub-base e reforço do subleito para pavimentação, com valor de Índice de Suporte Califórnia (CBR) de 82,59% e zero expansão.

Misturas de solo-RCC têm sido estudadas por diversos autores na literatura (LEITE, 2007; BULIGON, 2015; DA SILVA et al., 2016; ARTUSO e LUKIANTCHUKI, 2019). Da Silva et al. (2016) salientam que, com as possíveis melhorias das características físicas e mecânicas do solo natural misturado ao RCC, é possível diminuir o consumo de materiais novos

para a execução de vias, preservando jazidas e ambientes naturais. Artuso e Lukiantchuki (2019) avaliaram o uso de mistura solo-RCC (1:1) e concluíram que a mistura promoveu aumento considerável da resistência à compressão simples em comparação aos materiais isolados.

No entanto, um fator importante a ser considerado em projetos geotécnicos e de pavimentos que utilizam agregados reciclados é a possível quebra de grãos durante os esforços de compactação no campo. Que pode afetar negativamente o comportamento do material principalmente suas características hidráulicas. Cardoso et al. (2016) analisaram resultados de compactação de RCC de diversas pesquisas na literatura e salientam que a compactação por vibração tende a diminuir o peso específico aparente seco do material, pois a incidência de quebra de grãos é inferior à incidência de quebra com compactação por impacto. Já Santos e Vilar (2008) observaram na distribuição granulométrica de um RCC que não houve alteração significativa no tamanho dos grãos após ensaios de compactação Proctor normal.

Diante disso, o presente trabalho visa contribuir com o entendimento do comportamento de uma mistura solo-RCC, bem como apenas solo e RCC, para uso em camadas de pavimentos, por meio da avaliação da potencial quebra dos agregados dessas misturas após análises de Índice de Suporte Califórnia (CBR) e ensaio de compressão unidimensional de pedregulhos.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Materiais

O RCC utilizado nesse estudo é proveniente de um de um canteiro de obras localizada à Rua das Turbinas, Bairro São Pedro na cidade de Barreiras-BA. O material coletado foi transportado para o Laboratório Geotecnia da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), onde foi separado visualmente, sendo selecionados apenas os materiais considerados como resíduos Classe A conforme NBR 15116 (ABNT, 2004), isto é, argamassa, cerâmica e concreto. Os demais materiais que não se enquadraram na classificação, tais como gesso e metais, foram retirados da amostra. Após a separação, a análise gravimétrica indicou 51% de argamassa, seguida de 35% de cerâmica vermelha e 14% de concreto.

O solo utilizado nesta pesquisa, caracterizado como pedregulho siltoso, foi coletado no Bairro Morada da Lua da cidade de Barreiras-BA em três pontos ao longo da via. Trata-se de um solo de aterro, coletado previamente a realização da compactação de base do pavimento.

### 2.2 Preparação das misturas

Para a composição da amostra de RCC a ser utilizada nesta pesquisa, foi separado um volume de 80 kg contendo apenas três tipos de materiais (argamassa, cerâmica e concreto). O processo de britagem para a composição final da granulometria da amostra de RCC foi realizado apenas por apiloamento manual. Todo o RCC foi homogeneizado formando uma única amostra, a partir do qual foram realizados os ensaios posteriores, de modo que as análises de quebra de grãos consideram apenas as amostras obtidas após esta preparação.

A amostra de solo natural, após homogeneização, foi separada em porções para a realização dos ensaios. Para a composição da mistura solo-RCC, a proporção escolhida foi de 1:1 em termos de massa seca. Para fins de análise do comportamento da mistura, foram avaliados o comportamento dos três materiais (RCC, solo, e mistura solo-RCC). Todos os materiais foram devidamente homogeneizados a fim de obter maior uniformidade das amostras. A Figura 1 apresenta o processo de coleta do RCC e o solo utilizados neste estudo durante o processo de homogeneização.



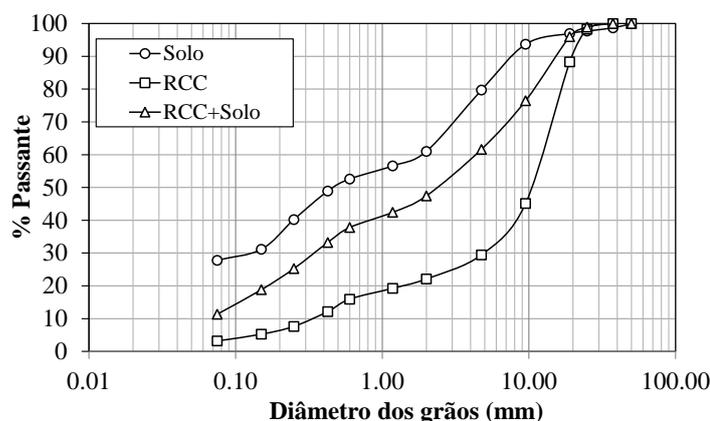
(a)

(b)

**Figura 1.** Materiais utilizados na pesquisa: (a) coleta do RCC utilizado; (b) solo durante processo de homogeneização. Fonte. Próprios autores (2020).

### 2.3 Caracterização das amostras

Para a caracterização das amostras, foram realizados ensaios de granulometria, conforme as recomendações da NBR 7181 (ABNT, 2016), com determinação das curvas apenas por peneiramento. A composição granulométrica obtida para os três materiais é apresentada na Figura 2.



**Figura 2.** Curvas granulométricas das amostras de solo, RCC e solo-RCC. Fonte. Próprios autores (2020).

Um dos requisitos mínimos para agregados reciclados classe A destinados a pavimentação, conforme NBR 15116 (ABNT, 2004), são: coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) maior que 10, dimensões máximas características menores ou iguais a 63 mm, e teor de material passante na peneira de 0,42 mm entre 10% e 40%. Assim, a partir das curvas granulométricas, foram determinados estes requisitos para as amostras de RCC, solo e mistura solo-RCC, os quais são apresentados na Tabela 1. Verifica-se na Tabela 1 que o solo, isoladamente, não atende a todos os requisitos. No entanto, tanto a amostra de RCC quanto a mistura solo-RCC podem ser utilizadas como materiais de camadas de pavimentação quanto às suas características granulométricas, conforme NBR 15115 (ABNT, 2004).

Foram ainda determinadas a massa específica dos grãos, limites de Liquidez e Plasticidade, e Índice de plasticidade das amostras, sendo utilizadas as normas NBR 6458 (ABNT, 2016), NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. A Tabela 2 apresenta as características geotécnicas do solo, RCC e mistura solo-RCC, bem a

classificação SUCS e HRB. Observa-se diminuição da plasticidade do solo ao se adicionar o RCC. Os resíduos de construção utilizados em outras pesquisas também apresentam a característica de serem não plásticos ou diminuírem a plasticidade do solo (BULIGON, 2015; SILVA, 2019).

**Tabela 1.** Parâmetros de curvatura dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Propriedade	Solo	RCC	Solo-RCC (1:1)
$C_u$	-	43,8	60,0
Dimensões máximas (mm)	20,0	25,0	25,0
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	53,0	12,0	33,0

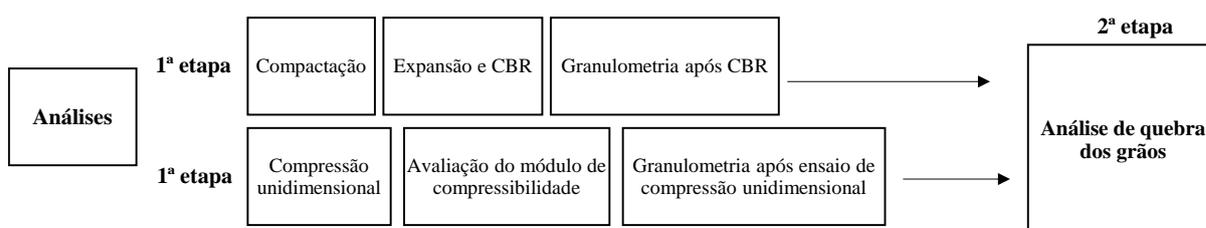
**Tabela 2.** Caracterização dos materiais utilizados nesta pesquisa.

Material	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS	HRB
Solo	2,875 ± 0,001	17,50	14,32	2,8	GM	A-2-4
RCC	2,689 ± 0,002	-	-	NP	GP	A-1a
Solo-RCC	2,834 ± 0,003	-	-	NP	GP-GM	A-1b

\*NP = não plástico.

## 2.4 Metodologia

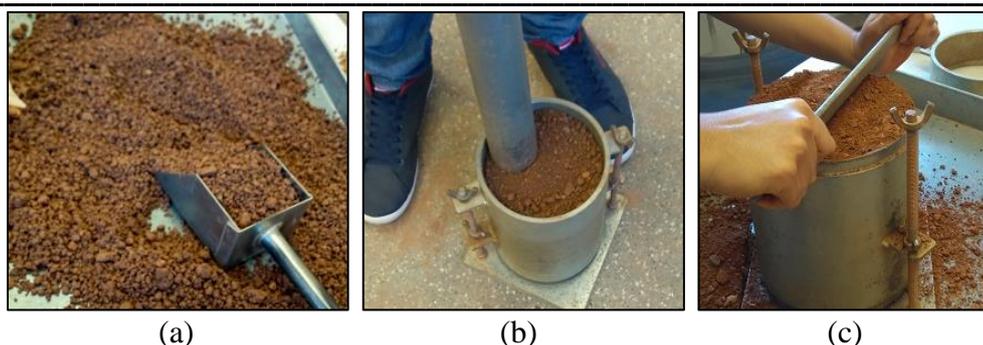
A Figura 3 apresenta um fluxograma da metodologia realizada nesta pesquisa, a qual contemplou duas fases: características mecânicas dos materiais e misturas por meio de ensaios mecânicos, e análise de quebra dos grãos.



**Figura 3.** Fluxograma da metodologia adotada no programa experimental. Fonte: Próprios autores (2020).

### 2.4.1 Ensaios de Compactação, CBR e Expansão – 1ª Etapa

Na primeira etapa dos estudos, foram analisadas as características mecânicas dos materiais (solo, RCC e solo-RCC) por meio de ensaios de compactação Proctor intermediário, onde foram obtidos os parâmetros ótimos de compactação de cada amostra. Em todos os pontos da curva de compactação, foram realizadas análises CBR e expansão. Como a presente pesquisa está voltada ao uso de misturas solo-RCC em pavimentos, optou-se por realizar a compactação aplicando-se apenas a energia Proctor intermediária. A Figura 4 apresenta algumas etapas do ensaio CBR: homogeneização, compactação e finalização do corpo de prova.



**Figura 4.** Etapas do ensaio CBR: (a) homogeneização; (b) compactação; (c) finalização do corpo de prova. Fonte: Próprios autores (2020).

#### 2.4.2 Quebra dos grãos após CBR – 2ª Etapa

Nesta etapa da pesquisa, foi analisada a quebra dos grãos após os ensaios CBR em diferentes pontos da curva de compactação. As amostras foram submetidas ao ensaio de granulometria (por peneiramento) a fim de quantificar a possível quebra dos grãos nos diferentes pontos da curva de compactação. As curvas granulométricas obtidas para os diferentes teores de umidade foram comparadas com a curva granulométrica característica de cada amostra (solo, RCC e solo-RCC) previamente a compactação.

O índice de quebra de grãos sugerido na proposta de Lee e Farhoomand (1967) possui relação com as curvas granulométricas obtidas antes e após o ensaio, consistindo na comparação dos diâmetros  $D_{15}$ ,  $D_{15\text{final}}$  e  $B_{15}$ . A equação utilizada está apresentada a seguir:

$$B_{15} = \frac{D_{15}}{D_{15\text{final}}} \times 100 \quad (1)$$

$D_{15}$  = diâmetro correspondente à porcentagem passante de 15% antes da compactação (mm);

$D_{15\text{final}}$  = diâmetro correspondente à porcentagem passante de 15% após a compactação (mm);

$B_{15}$  = é o índice de quebra (%).

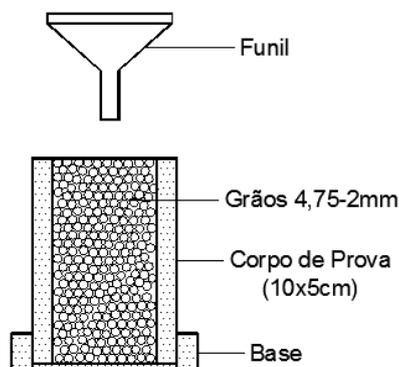
Nesta pesquisa, o índice de quebra (B) foi calculado considerando-se as porcentagens de 15%, 45% e 75%, ou seja,  $B_{15}$ ,  $B_{45}$  e  $B_{75}$ .

#### 2.4.3 Quebra dos grãos de pedregulho após ensaio de compressão unidimensional – 1ª e 2ª Etapas

Foram realizados ensaios de compressão unidimensional com a finalidade de avaliar o módulo de compressibilidade dos pedregulhos de solo e RCC (1ª etapa), bem como a influência da quebra destes grãos (2ª etapa). Nos ensaios de compressão unidimensional, o confinamento lateral da amostra foi adotado de modo a restringir deslocamentos laterais e induzir maior potencial de quebra dos grãos. Para a realização deste ensaio, foi utilizado um cilindro de 5x10 cm e ruptura do corpo-de-prova por meio de prensa CBR/Marshall automática com capacidade de 5000 Kgf e velocidade de 1,27 mm/min. A metodologia empregada baseia-se na metodologia de Zuluaga (2016) e a velocidade adotada nos ensaios foi definida com base nos valores adotados pelo mesmo autor.

Esses ensaios foram realizados apenas com pedregulhos, ou seja, dimensões acima de 2,00 mm, e até 4,57 mm. Esta limitação deve-se ao diâmetro do molde utilizado (50 mm), ou seja 10x o tamanho da maior partícula (ASTM D3080, 2011). Cada amostra foi preparada a partir da colocação do material no cilindro por meio de um funil, evitando vibrações ou

quaisquer tipos de perturbações, visando obter um corpo-de-prova de pedregulhos com elevado índice de vazios. Os ensaios foram realizados com três níveis de carregamento, 500, 3000 e 10000 kPa. Após cada ensaio, foi realizada análise de quebra dos grãos de pedregulho (2ª etapa) por meio de ensaio de granulometria (peneiramento).

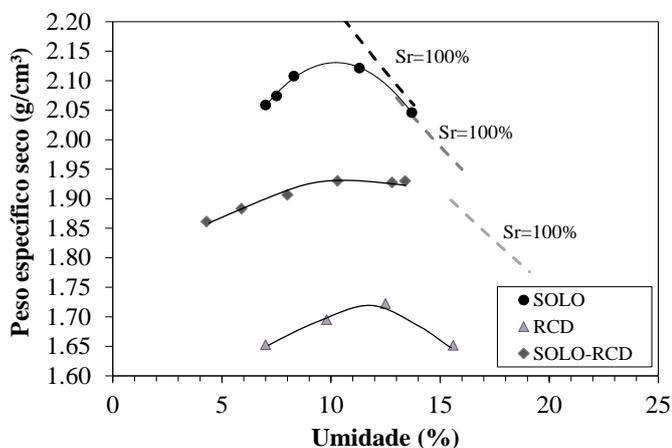


**Figura 5.** Representação de molde cilíndrico para análise de grãos de pedregulho. Fonte: Próprios autores (2020).

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Propriedades de compactação, CBR e expansão

As curvas resultantes do ensaio de compactação com energia Proctor intermediária para as três amostras ensaiadas (solo, RCC e solo-RCC) são apresentadas na Figura 6 e a Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de expansão e CBR. Observa-se que o solo apresentou massa específica aparente seca superior à do RCC e da mistura Solo-RCC. As curvas de compactação do RCC e da mistura solo-RCC não apresentando variação significativa da massa específica aparente seca com a variação de umidade. Já o solo, apresentou comportamento de compactação esperado para material granular. De acordo com os resultados, os valores de massa específica aparente máxima do solo, RCC e da mistura solo-RCC foram, respectivamente 2,13 g/cm<sup>3</sup>, 1,68 g/cm<sup>3</sup> e 1,94 g/cm<sup>3</sup>. O teor de ótimo de umidade do solo, RCC e da mistura solo-RCC foram definidos como 10,2%, 11,6%, 12,0%, respectivamente.



**Figura 6.** Curvas de compactação do solo, RCC e mistura solo-RCC. Fonte: Próprios autores (2020).

**Tabela 3.** Resultados de CBR e expansão das amostras para diferentes teores de umidade.

Amostras	Umidade (%)	Expansão (%)	CBR (%)
Solo	7,0	0,035	12,32
	7,5	0,034	21,25
	8,3	0,026	31,84
	11,3	0,021	5,42
	13,7	0,003	1,76
RCC	7,4	0,000	53,06
	9,8	0,000	59,96
	10,8	0,000	61,92
	12,5	0,000	74,59
	15,6	0,000	74,66
Solo-RCC (1:1)	4,3	0,026	11,62
	5,9	0,01	25,45
	8,0	0,001	88,64
	10,3	0,000	124,00
	12,8	0,008	13,4
	13,4	0,008	6,15

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2004) e DNIT (2006), os materiais para a execução de reforço de subleito devem possuir  $\text{CBR} \geq 12\%$  e para a execução de revestimento primário e sub-base devem possuir  $\text{CBR} \geq 20\%$ , ambos com expansão menor que 1%. De acordo com os resultados da Tabela 3, o solo natural, nos teores de umidade do ramo seco, apresenta-se adequado para estas finalidades. Já o RCC e a mistura solo-RCC enquadram-se em todos os teores de umidade analisados.

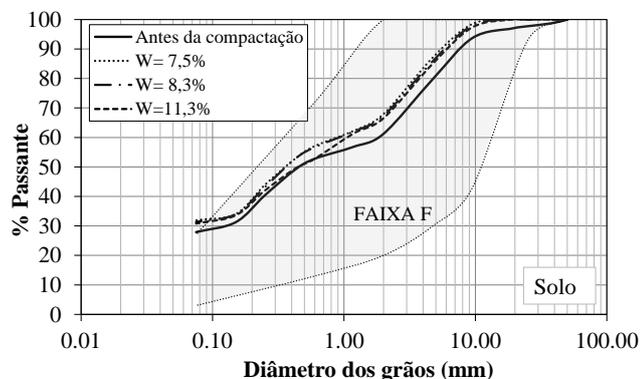
Especificamente para os casos de execução de base de pavimento (para vias de tráfego com  $n \leq 10^6$  repetições do eixo padrão), os materiais devem possuir CBR acima de 60% e expansão menor que 0,5%. Ainda de acordo com os resultados da Tabela 3, o RCC entre os teores de umidade de 10,8% e 15,6% e a mistura solo-RCC entre os teores de 8,0 e 10,3% também atenderiam a este requisito do DNIT (2006) para uso em bases de vias de baixo volume de tráfego.

Com os pontos de maior CBR do solo e mistura solo – RCC, também de acordo com os resultados da Tabela 3, determinou-se um ganho de capacidade de suporte CBR de 74% quando adicionado o RCC ao solo. A proposta de mistura solo-RCC apresentou valores de CBR superior ao RCC isoladamente, uma vez que o entrosamento dos grãos maiores e menores proporcionou melhor capacidade de suporte ao material.

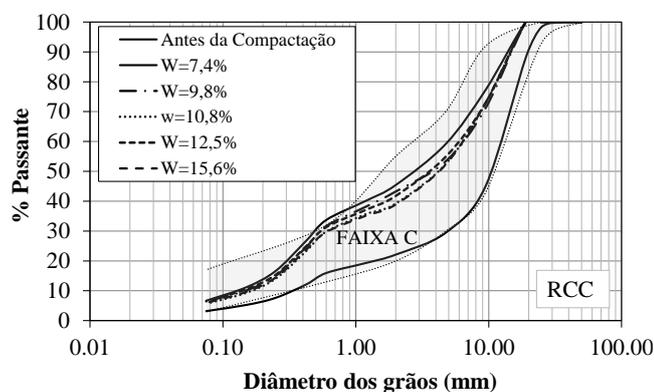
### 3.2 Análise de quebra dos grãos após ensaio CBR

Foram realizadas análises granulométricas para a verificação da quebra dos grãos após os ensaios CBR para os três materiais em análise neste estudo (solo, RCC e solo-RCC). Os resultados estão apresentados na Figura 7, na qual é também apresentada a faixa granulométrica do solo antes dos ensaios de compactação e a faixa do DNIT que melhor se enquadra em cada

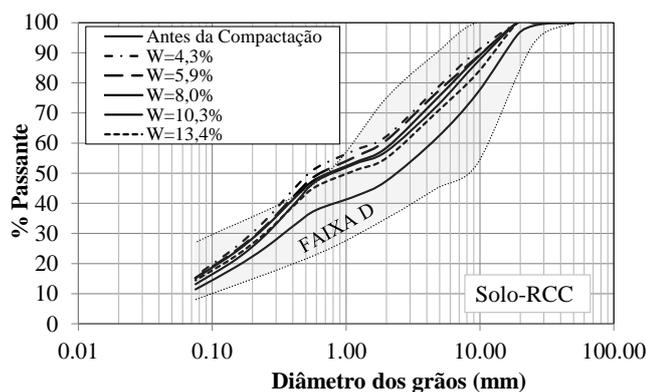
um dos materiais em estudo. Pode-se notar que houve alteração na granulometria para os diferentes teores de umidade em que os ensaios foram realizados e que, de modo geral, a quebra dos grãos provocou um deslocamento para os limites superiores das faixas do DNIT.



(a)



(b)

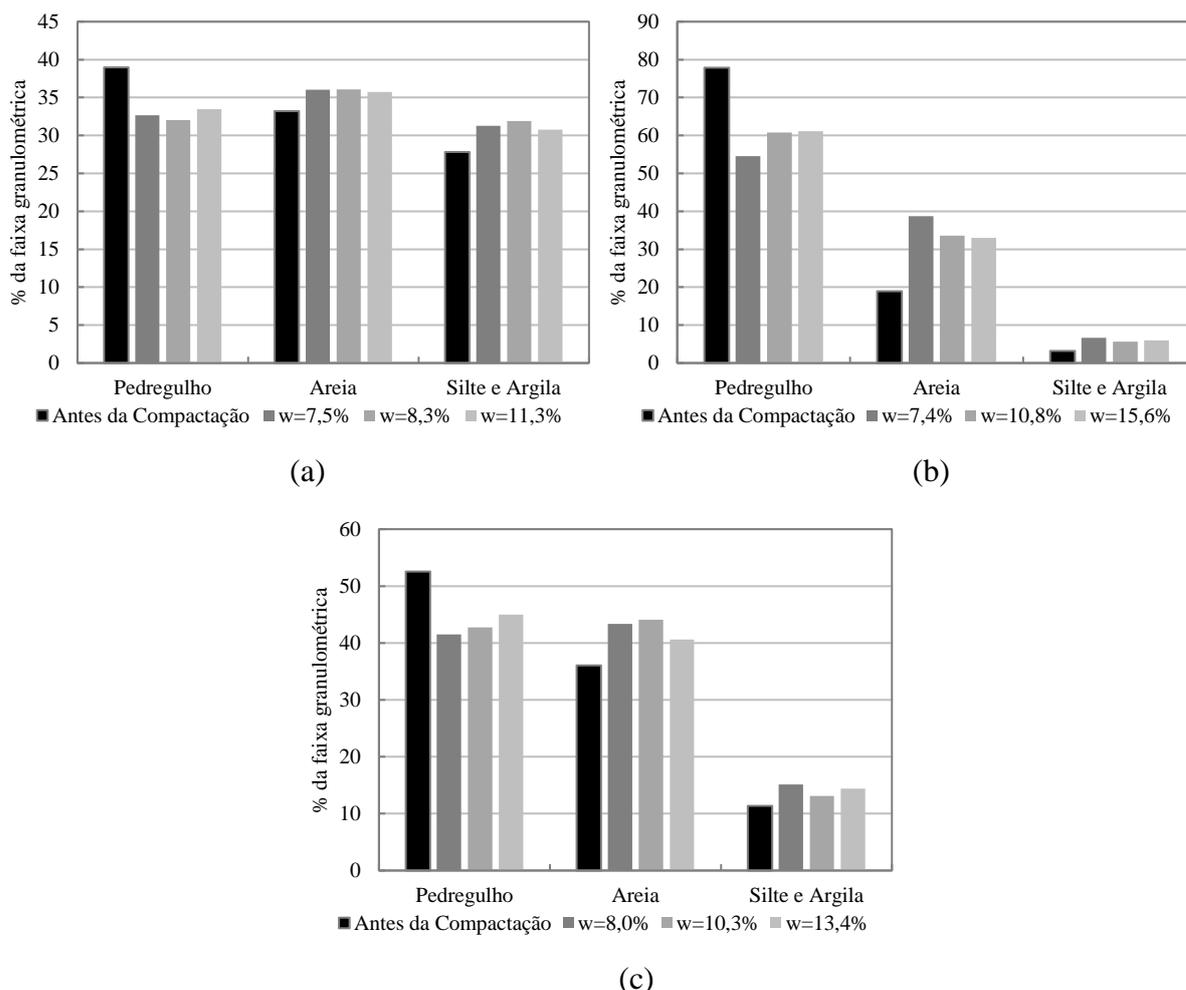


(c)

**Figura 7.** Curvas granulométricas antes e após ensaio CBR: (a) solo natural; (b) RCC; (c) solo-RCC. Fonte: Próprios autores (2020).

A Figura 8 apresenta as faixas granulométricas (pedregulho, areia, silte e argila) das amostras antes do ensaio CBR e após para três teores de umidades (abrangendo ramos secos e úmidos da curva de compactação). Verifica-se que a menor variação entre as faixas granulométricas ocorreu nas amostras de solo (Figura 8a), o que evidencia a menor quebra dos grãos de solo, seguido da mistura Solo-RCC (Figura 8c). A maior modificação em termos de

quebra de grãos ocorreu na amostra de RCC (Figura 8b). Em todas as amostras ocorreu diminuição do teor de pedregulho e aumento dos teores de areia e silte e argila, porém em magnitudes diferentes. Nas amostras de RCC, a maior parte dos pedregulhos se tornaram grãos de areia, bem como nas amostras mistura solo-RCC, mas em menor proporção. Já as amostras de solo apresentaram aumentos semelhantes tanto para as faixas granulométricas de areia quanto para as faixas de silte e argila. Estes resultados evidenciam que a quebra das amostras de RCC desta pesquisa, durante o processo de compactação, não geraram um aumento expressivo dos teores de finos, viabilizando o uso do agregado.



**Figura 8.** Faixas granulométricas antes da compactação e após para diferentes teores de umidades: (a) solo natural; (b) RCC; (c) solo-RCC. Fonte: Próprios autores (2020).

A Tabela 4 apresenta os índices de quebra  $B_{15}$ ,  $B_{45}$  e  $B_{75}$  obtidos. De acordo com a Tabela 4, com os índices de quebra determinados, nota-se que a mudança na distribuição granulométrica do RCC e da mistura solo-RCC depende do teor de umidade do material. Quanto menor o teor de umidade, maiores foram os índices de quebra. Isso ocorre, pois, os grãos secos possuem maior intertravamento, logo, são mais propensos a ruptura do que materiais dispostos com contato face a face como ocorrem em materiais na umidade ótima e com teores de umidade mais elevados. Já nas amostras de solo, os índices de quebra apresentam valores próximos, não havendo uma grande diferenciação em termos de teor de umidade de compactação.

**Tabela 4.** Índice de quebra para diferentes teores de umidade.

Material	Umidade (%)	Índices de Quebra		
		B <sub>15</sub>	B <sub>45</sub>	B <sub>75</sub>
Solo	7,5	-	1,19	1,41
	8,3	-	1,14	1,31
	11,3	-	1,1	1,27
RCC	7,4	2,3	5,21	1,82
	9,8	2,21	4,13	1,57
	10,8	2,04	3,19	1,6
	12,5	2,12	3,96	1,58
	15,6	2,12	3,19	1,58
Solo-RCC (1:1)	4,3	1,33	4,25	2,25
	5,9	1,33	3,78	2,09
	8,0	1,33	3,4	1,88
	10,3	1,11	3,27	1,67
	13,4	1,25	2,98	1,43

Tal como esperado, os índices de quebra do solo natural apresentaram menor mudança com a variação de umidade. Esse comportamento é decorrente da maior resistência dos grãos do solo, em relação ao RCC e da mistura Solo-RCC. Observa-se ainda na Figura 7 um afastamento paralelo à curva inicial (antes da compactação), indicando quebra semelhante dos grãos na amostra de solo.

Com estes resultados, observou-se que os efeitos da quebra dos grãos nas amostras contendo RCC foram superiores aos valores encontrados para o solo. Tal característica pode provocar uma redução da vida útil do pavimento, pois pode gerar perda de capacidade suporte e conseqüente afundamentos ou outros tipos de patologias. No entanto, deve-se considerar que a mudança na granulometria em determinadas proporções pode proporcionar um melhor entrosamento das partículas, o que pode também gerar aumento na capacidade de suporte da estrutura. Estudos para aprofundar esta hipótese devem ser realizados.

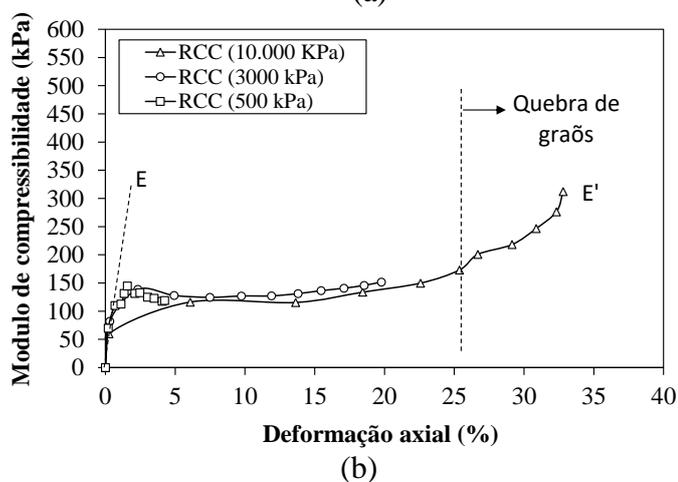
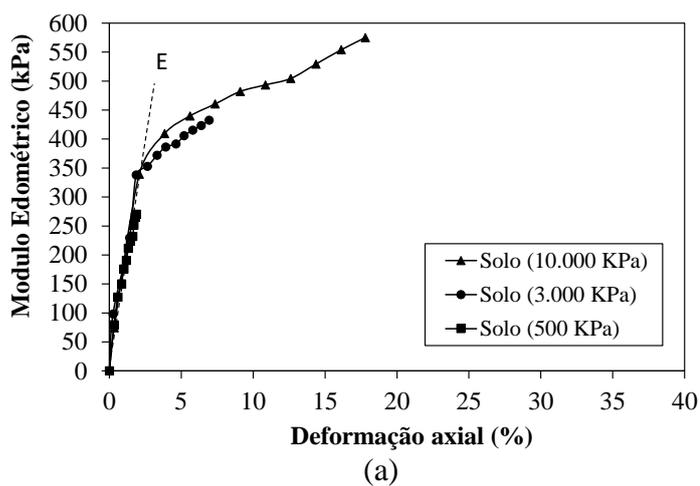
### 3.3 Análise de quebra dos grãos após ensaios de compressão unidimensional

Os ensaios de compressão unidimensional (com restrição lateral) foram realizados com o intuito de verificar as características dos pedregulhos das amostras estudadas em termos de módulo de compressibilidade e índice de quebra. A Figura 9 apresenta o corpo-de-prova de pedregulhos de RCC antes e após o ensaio, na qual é possível observar a fragmentação dos grãos após sobrecargas.



**Figura 9.** Amostra de pedregulhos de RCC antes e após ensaio de compressão unidimensional. Fonte. Próprios autores (2020).

A Figura 10 apresenta as curvas de módulo de compressibilidade versus deformação para os níveis de tensões aplicadas nos pedregulhos. O módulo de compressibilidade foi calculado com base na tensão aplicada dividida pela deformação, a qual foi calculada em termos da razão entre índice de vazios durante o ensaio ( $e$ ) com índice de vazios inicial ( $e_0$ ).

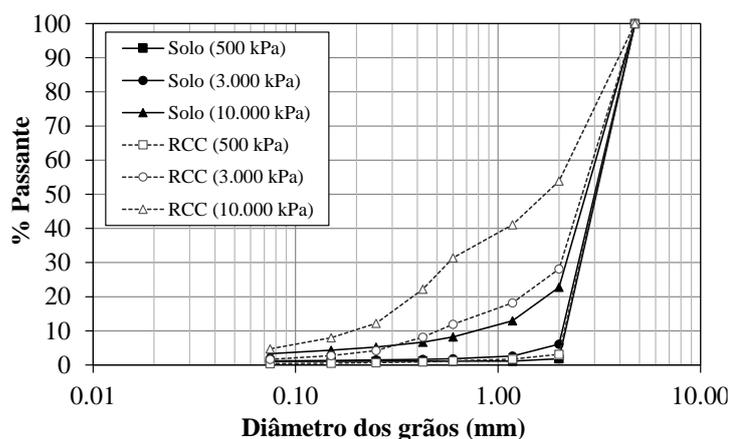


**Figura 10.** Módulo de compressibilidade em função da deformação axial das amostras: (a) solo; (b) RCC. Fonte: Próprios autores (2020).

Verifica-se na Figura 10a que nos estágios iniciais de aplicação de carga para o solo, o módulo de compressibilidade se manteve o mesmo. Para tensões de 3.000 kPa e 10.000 kPa aplicadas, os pedregulhos do solo foram comprimidos, tendo suas partículas rearranjadas para uma condição mais densa, diminuindo sua compressibilidade.

Já para o caso dos pedregulhos de RCC, com resultados apresentados na Figura 10b, o módulo de compressibilidade para baixos níveis de deformação é praticamente o mesmo nas tensões de 500 e 3.000 kPa. No entanto, para níveis de tensões mais elevados, tal como 10.000 kPa, elevam-se as tensões intergranulares, acarretando em quebra e/ou esmagamento das partículas. Com a quebra destes grãos, a compressibilidade aumentou sensivelmente, tal como verificado na Figura 10b. De modo geral e considerando uma mesma faixa de deformação, os resultados mostram maior módulo para os pedregulhos do solo em comparação com os pedregulhos de RCC, gerando maior quebra dos grãos nos agregados reciclados em comparação com o solo.

A Figura 11 apresenta as curvas de distribuição granulométrica do solo e do RCC para os três níveis de tensões aplicados. Com as curvas granulométricas, identificou-se que o RCC sofreu maiores quebras dos grãos do que o solo para elevados níveis de tensão, indicando a menor resistência do agregado reciclado. Este fato deve-se ao RCC conter partículas de cerâmica e argamassa em sua composição. Já para baixos níveis de carregamento (500 kPa), houve pouca modificação na granulometria, com resultado similar para solo e RCC. Assim, sugere-se melhores características mecânicas para as misturas solo-RCC.



**Figura 11.** Granulometria do solo e RCC após ensaios de compressão unidimensional para diferentes tensões aplicadas. Fonte: Próprios autores (2020).

#### 4 Conclusões

Esta pesquisa avaliou o comportamento geotécnico de uma mistura solo-RCC, bem como apenas solo e RCC, para uso em camadas de pavimentos, por meio da avaliação da potencial quebra dos agregados dessas misturas após análises de Índice de Suporte Califórnia (CBR), e ensaios de compressão unidimensional de pedregulhos do solo e RCC. Através dos resultados obtidos constatou-se que:

- Houve um ganho de capacidade de suporte CBR de 74% quando adicionado o RCC ao solo, viabilizando a mistura solo-RCC para uso como camada de suporte de pavimentos;
- Os efeitos da quebra dos grãos nas amostras contendo RCC foram superiores aos valores encontrados para o solo;

- A quebra de grãos nas amostras de RCC e solo-RCC foram influenciadas pelo teor de umidade das amostras, sendo que no ramo seco maiores ocorrem maiores quebras do que na umidade ótima e no ramo úmido;
- No ensaio de compressão unidimensional, os pedregulhos do solo tiveram suas partículas rearranjadas para uma condição mais densa, diminuindo a compressibilidade para as cargas aplicadas. No caso dos pedregulhos de RCC, para níveis de tensões mais elevados, elevam-se as tensões intergranulares, acarretando em quebra e/ou esmagamento das partículas
- De modo geral os resultados apresentados indicaram que a quebra dos pedregulhos ocorre com maior intensidade para os agregados reciclados do que para o solo.

A sugestão de mistura de agregado reciclado de construção civil com o solo avaliado nesta pesquisa mostra potencial para utilização em camadas de suporte de pavimentos. No entanto, a quebra de grãos mostrou ser um fator importante a ser investigado para cada caso estudado. Estes resultados não devem ser extrapolados para qualquer agregado reciclado ou solo, devendo cada situação ser cuidadosamente analisada.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J.; ROSA, F.D.; PANDOLFO, A.; BERTICELLI, R.; BRUM, E. M.; MARTINS, M.S. Estudo de viabilidade econômica do uso do agregado de RCC em pavimentação de vias urbanas, **Revista de Engenharia Civil**, No. 54, 16-25, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions**. West Conshohocken, United States of America, 2011.

ARTUSO, F.; LUKIANTCHUKI, J. M. A. Evaluation of the self-cementing effect of Construction and Demotion Waste (CDW) on mechanical performance over time for pavement support layers purpose, **Ambiente Construído**, v. 19, n. 2, p. 59-77, 2019

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos sólidos no Brasil**, 2018-2019, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458 - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.

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.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e caracterização**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

---

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895: Solo - Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 2016.

BARROS, M. C. **Avaliação de um resíduo da construção civil beneficiado como material alternativo para sistema de cobertura**. 96p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

BULIGON, L. B. **Estudo de Misturas de Solo Argiloso Laterítico e Resíduo de Construção Civil para Uso em Pavimentos Econômicos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Engenharia Civil. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI, Ijuí, RS, 2015.

CARDOSO, R.; SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**. Lisboa, p. 131-145. 2016.

CARNEIRO, A. P; BURGOS, P. C; ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/ Caixa Econômica Federal, 2001, 188-227p

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n° 307**, de 05 de julho de 2002: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

DA SILVA, D. A.; MARTINS, C. P.; OLIVEIRA, C. A. S. Análise do Comportamento de Solos com o Reaproveitamento de RCC. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. COBRAMSEG 2016, Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **IPR 719: Manual de Pavimentação. 3ª Edição**. Rio de Janeiro, 2006

HERRADOR, R.; PÉREZ, P.; GARACH, L.; ORDÓÑEZ, J. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. **Journal of Transportation Engineering**. v. 138, 182-190, 2012.

KILBERT, C. J. Principles of Sustainable Construction, Proceedings of the First International Conference on Sustainable Construction, 6-9 November, Tampa, FL, EUA (1994), 1-9.

LEE, K.L.; FARHOOMAND, I. Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 4, no. 1, 68-86, 1967.

LEITE, F. C. **Comportamento Mecânico de Agregado Reciclado de resíduo Sólido da Construção Civil em Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2007.

OSSA, A.; GARCÍA, J. L; BOTERO-JARAMILLO, E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. **Journal of clean production**, v. 135, 2016.

SANTOS, E. C. G.; VILAR, O. M. Use of recycled construction and demolition wastes (RCCW) as backfill of reinforced soil structures. Proceedings of the 4th European Conference on Geosynthetics – EUROGEO 4, Edinburgh, UK, IGS-UK Chapter, London, UK, paper 199. 2008.

SILVA, A. C.; FUCALE, S.; FERREIRA, S. R. M. Efeito da adição de resíduos da construção e demolição (RCD) nas propriedades hidromecânicas de um solo areno-argiloso. **Revista Matéria**. v. 24, n. 2, 2019.

WHITTAKER, M. J. et al. Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling, **Advances in Building Energy Research**, 2019.

XUAN, D.; MOLEENAR, A. A. A.; HOUBEN, L. M. J. Evaluation of Cement Treatment of Reclaimed Construction and Demolition Waste as Road Bases, **Journal of Cleaner Production**, 2015.

ZULUAGA, R. A. G. **Relação entre características microestruturais e o comportamento macroscópico de solos granulares**. Tese (Doutorado) - Faculdade de Tecnologia: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2016, 171p.