

DESEMPENHO TÉCNICO DE MISTURAS DE SOLO COM RCD PARA USO EM OBRAS DE PAVIMENTAÇÃO

A. C. BARRETO¹, E. F. AMORIM²

Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte¹, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte²

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9850-7488>
alissomcb@hotmail.com¹

Submetido //2020 - Aceito 14/12/2020

DOI: 10.15628/holos.2020.9696

RESUMO

O processo de urbanização tem provocado um aumento na construção civil e, conseqüentemente, aumento na geração de resíduos. O resíduo de construção e demolição (RCD) representa grande parcela do volume de resíduos que são gerados em grandes centros urbanos, sendo necessária uma destinação adequada para mitigar os impactos ambientais e os problemas sociais que são gerados. Diante deste contexto, este artigo tem como objetivo analisar o uso do RCD associado a diferentes tipos de solos, adicionando ao solo porcentagens de RCD de 25%, 50% e 75%, em massa, visando o seu emprego em obras de pavimentação. O programa experimental foi

realizado a partir de amostras de RCD obtidas por uma empresa privada e amostras de solos extraídas de três grandes regiões do estado do Rio Grande do Norte. Os métodos de investigação de laboratório basearam-se nos ensaios de caracterização física, compactação, CBR e análise de quebra dos grãos. Os resultados obtidos mostram que dependendo da porcentagem de resíduo e do tipo de solo, o incremento de RCD ao solo faz com que os valores do CBR se elevem e melhorem as propriedades das amostras. Deste modo, a substituição de parte do agregado natural por RCD é um potencial alternativa para aplicação em obras de pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: RCD, CBR, Pavimentação.

TECHNICAL PERFORMANCE OF SOIL MIXTURES WITH RCD FOR USE IN PAVING WORKS

ABSTRACT

The urbanization process has caused an increase in civil construction and, consequently, an increase in waste generation. Construction and demolition waste (RCD) represents a large portion of the volume of waste that is generated in large urban centers, requiring an appropriate destination to mitigate the environmental impacts and social problems that are generated. In this context, this article aims to analyze the use of RCD associated with different types of soils, adding to the soil RCD percentages of 25%, 50% and 75%, en masse, aiming at its use in paving works. The experimental program was

carried out using RCD samples obtained by a private company and soil samples extracted from three large regions in the state of Rio Grande do Norte. The laboratory investigation methods were based on physical characterization, compaction, CBR and grain break analysis tests. The results obtained show that depending on the percentage of residue and the type of soil, the increase of RCD to the soil causes the CBR values to rise and improve the properties of the samples. Thus, the replacement of part of the natural aggregate by RCD is a potential alternative for application in pavement works.

KEYWORDS: CDW, CBR, Paving.



1 INTRODUÇÃO

Atualmente, de acordo com a pesquisa da confederação nacional dos transportes (CNT, 2019), no Brasil apenas 12,4% das rodovias são pavimentadas, enquanto a malha não pavimentada representa 78,5%. Esses dados evidenciam que, embora o modal rodoviário seja importante para o país, existem, relativamente, poucos trechos pavimentados. Deste modo, é necessário que ocorra investimentos em pavimentação de rodovias, como também em manutenção das mesmas. No entanto, a manutenção e recuperação de rodovias requer a adição de novos materiais, provocando a exploração de recursos naturais e elevando os custos das obras.

A extração de recursos naturais não renováveis e a geração de resíduos estão relacionadas com o rápido processo de urbanização que ocorre mundialmente. A indústria da construção civil é responsável por gerar os resíduos denominados por RCD – Resíduos de Construção e Demolição, oriundos de obras de demolição, reformas, reparos e de desperdícios durante a execução de obras. Tendo em vista os problemas que a geração dos resíduos de construção pode causar, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu por meio da resolução N° 307, de julho de 2002 (BRASIL, 2002), que os agentes geradores de resíduos são responsáveis por oferecerem uma destinação adequada a eles. Dessa forma, a reciclagem do RCD se torna uma maneira viável e adequada para que os responsáveis por obras de construção civil destinem seus resíduos, minimizando os problemas provenientes do descarte inadequado. A utilização em pavimentação se torna mais adequada, uma vez que não necessita de alto controle dos materiais que são utilizados.

A maioria das pesquisas relacionadas ao uso do RCD em obras de pavimentação avalia o seu uso em subleito e em todas as camadas do pavimento, até mesmo em camadas de base, que requer materiais com propriedades superiores. Assim, a utilização do resíduo proveniente de construção civil pode promover um aumento na oferta de vias pavimentadas no Brasil, uma vez que se torna uma alternativa interessante aos materiais convencionalmente utilizados. Além do aspecto ambiental, um dos principais atrativos dessa alternativa é o aspecto econômico, visto que geralmente os preços desses materiais são inferiores aos materiais convencionais.

Deste modo, este trabalho visa contribuir com uma destinação mais adequada para os resíduos de construção e demolição, considerando sua utilização em obras de pavimentação. Isso será possível através de uma avaliação do comportamento técnico em misturas de solo com o RCD, analisando os possíveis benefícios que serão originados. Além do mais, é de suma importância verificar qual camada do pavimento é a mais adequada para a utilização desse resíduo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais e ambientais

De acordo com Trannin *et al.* (2019), os principais materiais utilizado em todas as obras de construção civil do Brasil são os agregados, sendo recursos não renováveis derivados de técnicas de extração que provocam impacto ao meio ambiente. Os impactos gerados são: a exploração



descontrolada de recursos naturais não renováveis, a emissão de gás carbônico na atmosfera devido à fabricação de cimento, e a poluição do ar devido o transporte até os grandes centros (SANTOS, 2007).

O setor da construção civil colabora de forma significativa nos impactos ambientais, devido à necessidade da extração dos materiais naturais, a mudança de paisagem original e a geração de resíduos sólidos. Os resíduos sólidos de construção originam problemas devido a grande quantidade produzida e a sua disposição final, sendo geralmente depositados em locais inadequados (Novais *et al.*, 2017).

Segundo a Resolução n.º 307, de 05 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2002), os resíduos sólidos de construção e demolição são os materiais derivados de construções, reparos, reformas, demolições de obras de construção civil, e, os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: blocos cerâmicos, tijolos, concreto em geral, rochas, solos, metais, tintas, resinas, colas, madeiras e compensados, argamassa, telhas, gesso, pavimento asfáltico, plásticos, vidros, fiação elétrica, tubulações, dentre outros, rotineiramente chamados de entulhos de obra, calça ou metralha.

De acordo com Souza (2015), analisando as definições de RCD é notório que este resíduo se trata de um material com composição extremamente heterogênea que é diretamente dependente da fonte geradora do resíduo.

De acordo com dados do Eurostat (2014, apud Cardoso *et al.*, 2016), no ano de 2010 a união Europeia gerou um total de 2,51 bilhões de toneladas de resíduos. Conforme Hongping Yuan (2011, apud Li *et al.*, 2017), na China os resíduos de construção e demolição são responsáveis por 30% à 40% da totalidade de resíduos sólidos gerados anualmente. Na Austrália, aproximadamente 11,2 milhões de toneladas de resíduos são armazenados anualmente em depósitos ilegais (Mohammadinia *et al.*, 2017).

De acordo com uma pesquisa setorial realizada pela ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição (ABRECON, 2015), 50% dos municípios brasileiros ainda destinam os resíduos para locais irregulares e, não realizam a reciclagem para utiliza-los em obras de construção civil. Em um estudo realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (ABRELPE, 2011) foi constatado que os resíduos de construção civil são cerca de 50% do total de resíduos que são gerados em todo o país.

Perina e Trannin (2019) realizaram uma avaliação dos principais resíduos que são gerados em determinado canteiro de obra, no município de Pindamonhangaba (SP) e, verificaram que com a execução de alvenaria estrutural a maioria destes são concreto e bloco, correspondentes a 51%. Já na execução do revestimento, a predominância dos materiais é da argamassa (38%), gesso (26%), solo e areia (23%). No geral, concreto, bloco e argamassa, correspondem a 67% da quantidade total de resíduos que são gerados, sendo estes possíveis de ser reciclados e transformados em agregados reciclados.



Segundo Cardoso *et al.* (2016), a utilização de agregados reciclados na construção civil pode originar a exploração de novas oportunidades de mercado e, colaborar de forma significativa para o desenvolvimento sustentável.

De acordo com Arulrajah *et al.* (2012), diversos autores realizaram pesquisas avaliando a sustentabilidade dos resíduos de construção e demolição e, com isso muitos países tem utilizado esses materiais em aplicações de engenharia. No entanto, esta aplicação ainda não é muito abrangente, assim, o aumento do uso em obras de pavimentação podem preservar os recursos naturais e reduzir o problema de armazenamento do resíduo.

De acordo com Triches & Kryckyj (1999), a realização da reciclagem dos resíduos representa diversas vantagens econômicas, tais como: diminuição dos custos com a remoção do material depositado em encostas, cursos d'água e ao longo de vias públicas; Redução da necessidade de novas áreas para aterros sanitários devido ao aumento da vida útil dos já existentes; Diminuição dos custos de operação dos aterros sanitários; Diminuição nos custos de obras de pavimentação.

A Resolução 307 de 2002 do CONAMA (BRASIL, 2002) classifica os resíduos de construção civil de acordo com as possibilidades de reciclagem, em que o RCD pode ser dividido em quatro classes: Classe A, resíduos que são recicláveis ou reutilizáveis como agregados; Classe B, resíduos que são recicláveis para outras finalidades; Classe C, resíduos em que ainda não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis; Classe D, os resíduos provenientes do processo de construção que são perigosos. Para a utilização do RCD como material de construção é necessário que este esteja classificado na categoria A, passe pelo processo de reciclagem e atenda as especificações da resolução 307 de 2002 do CONAMA.

2.2 RCD aplicado à pavimentação

De acordo com Cardoso *et al.* (2016), os resíduos de construção e demolição começaram a ser utilizados em aplicações geotécnicas, como em camadas de base, sub-base e revestimento, devido à sua distribuição de tamanho reportar a do solo natural.

No Brasil, os agregados reciclados são utilizados em todas as camadas do pavimento, proporcionando excelentes resultados no produto final. Segundo Leite *et al.* (2011), diversos estudos admitem que os resíduos de construção e demolição são adequados para ser utilizados como agregados na construção de pavimentos. Conforme Motta (2005), as primeiras experiências referentes ao uso de agregados reciclados em pavimentação no Brasil começaram a ser realizadas em meados da década de 1980.

O material reciclado utilizado em obras de construção deve ser submetido a testes análogos aos do material natural. O agregado reciclado deve atender a resistência mínima, estabilidade, durabilidade, entre outras especificações, necessárias a qualquer aplicação geotécnica. Além disso, o material não deve apresentar, em sua composição, contaminantes, componentes perigosos e impurezas orgânicas (Gautam *et al.*, 2018).

De acordo com Souza (2015), realizando uma comparação entre os valores da caracterização física do RCD com os valores citados na literatura pra agregados naturais, nota-se que o agregado reciclado apresenta valores análogos ou superiores aos mínimos exigidos pelas



normas de materiais para obras de pavimentação. Leite *et al.* (2011) consideram o RCD uma adequada opção alternativa para materiais de base e sub-base devido à sua alta resistência e comportamento não expansivo.

Conforme Cardoso *et al.* (2016), é necessário definir a camada em que será incorporado o agregado reciclado (AR), para assim, definir as propriedades que são relevantes para o bom desempenho do pavimento, bem como qual AR é mais apropriado.

De acordo com Ângulo *et al.* (2002) a utilização de RCD em pavimentação proporciona diversas vantagens, tais como: menor custo do processo de reciclagem; admite a utilização de todos os componentes minerais do entulho (argamassas, tijolos, materiais cerâmicos, areia, etc.), sem necessitar realizar a separação deles; economia de energia no processo de moagem do entulho; possibilidade de utilizar uma maior parcela do entulho produzido; a adição do resíduo aos solos saprolíticos proporciona maior eficiência em relação à mesma adição feita com brita. Ao adicionar 20% de RCD ao solo ocorre um aumento de 100% do CBR, enquanto nas adições de brita natural o aumento do CBR só é perceptível com dosagens a partir de 40%.

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

As amostras de solo utilizadas neste artigo foram coletadas em jazidas de três grandes regiões do estado do Rio Grande do Norte: Oeste, Agreste e Seridó. A amostra da região Oeste foi coletada no município de Caraúbas/RN e foi denominada de Solo 01. A amostra da região Agreste foi denominada de Solo 02 e coletada no município de Macaíba/RN. Já a amostra da região do Seridó foi coletada no município de Ipueira/RN e denominada por Solo 03.

O Resíduo de Construção e Demolição (RCD) utilizado foi coletado na empresa privada Duarte Usina de Reciclagem de RCD LTDA, situada nas proximidades do município de São José do Mipimbu/RN. Os materiais de RCD coletados se enquadram na classificação comercial de Brita 01. As misturas utilizadas foram compostas do solo natural e do resíduo de construção nas proporções de 0%, 25%, 50% e 75%, em massa, em relação à porcentagem total das misturas. As porcentagens das misturas foram determinadas com base na viabilidade técnica e econômica de acordo com dados de pesquisas presentes na literatura.

3.2 Métodos

O programa experimental relativo à caracterização física e, ao comportamento mecânico dos materiais utilizados, foi realizado de acordo com as metodologias e os procedimentos presentes em normas regulamentadoras, tais como: a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER).

3.2.1 Caracterização física dos materiais

Para a avaliação da composição granulométrica do solo natural foi realizado o ensaio de Análise granulométrica, executado de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 1984). Este ensaio é



composto por duas etapas, peneiramento e sedimentação, em que nesta segunda optou-se por avaliar as amostras com e sem o uso de defloculante, a fim de conferir a eficiência da utilização do hexametáfosfato de sódio. Para as análises granulométricas realizadas para as frações do RCD foram utilizadas as premissas da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Para o ensaio de massa específica dos solos foi utilizada a norma NBR 6508 (ABNT, 1984) para grãos que passam na peneira de 4,8 mm. Para as frações de RCD, a norma ME 081(DNER, 1998) foi utilizada para determinar a absorção d'água e a massa específica do agregado graúdo.

O ensaio de Abrasão "Los Angeles" foi realizado de acordo com a norma ME 035(DNER, 1998). Segundo Arulrajah et al. (2012), o ensaio de abrasão "Los Angeles" é utilizado, de forma abrangente, como indicador da qualidade e capacidade relativa de diversos agregados com composições minerais semelhantes. O Índice de forma do RCD foi realizado conforme as premissas da norma ME 086 (DNER, 1994). Este índice tem a função de analisar a qualidade de um agregado graúdo em relação à forma dos grãos, em que agregados com partículas cúbicas apresentaram índices próximos a 01.

Para concluir a caracterização dos solos, analisou-se a plasticidade através dos limites de Atterberg. Assim, realizou-se o ensaio de limite de liquidez de acordo com as premissas da NBR 6459 (ABNT, 1984) e o ensaio de limite de plasticidade, de acordo com os procedimentos da NBR 7180 (ABNT, 1984). Com os resultados dos ensaios de caracterização foi possível realizar a classificação dos materiais através das metodologias SUCS e HRB/TRB.

3.2.2 Ensaio de compactação proctor

O ensaio de compactação Proctor é executado segundo as premissas da norma NBR 7182 (ABNT, 1986). Todas as amostras da pesquisa foram submetidas às três energias de compactação. Para todas as misturas Solo/RCD de 100/0 (solo natural), 75/25, 50/50 e 25/75 foi realizada a compactação manual com reuso de material, tomando-se 7 kg de amostra total para cada mistura.

3.2.3 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (CBR)

Para a execução do ensaio de CBR foi utilizado os procedimentos da norma NBR 9895 (ABNT, 1987), em que o principal objetivo é verificar a expansão e o suporte dos materiais destinados a pavimentação. Embora tenha um caráter empírico, o ensaio de CBR serve de embasamento para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, além de ser mundialmente difundido. No geral, este ensaio foi realizado a partir dos parâmetros obtidos no ensaio de compactação com reuso de material, em que os corpos-de-prova foram moldados com o teor de umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo.

Como no ensaio de compactação, os ensaios de CBR foram realizados para todas as energias de compactação com a finalidade de verificar a sua influência no resultado final do ensaio. Com a finalização do ensaio de penetração, os CP foram destorreados, secos em estufa e submetidos ao ensaio de análise granulométrica. Os resultados dos ensaios de granulometria após o CBR são comparados com os resultados da granulometria antes do CBR, para assim verificar a quebra dos grãos que ocorre com a aplicação de cargas nas amostras.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização física dos solos

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de caracterização física para o Solo 01, Solo 02 e o Solo 03 estão apresentados na Tabela 1. Já as Figuras 1, 2 e 3 apresentam as curvas granulométricas na condição natural para os Solos 01, 02 e 03, respectivamente.

Tabela 1: Valores da caracterização dos solos estudados.

Solo	Parâmetros	CNU	CC	γ_s (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Atividade das argilas
Solo 01	Com defloculante	85,00	8,90	2,55	0,00	0,00	0,00	0,00
	Sem defloculante	94,44	9,89	2,55	0,00	0,00	0,00	0,00
Solo 02	Com defloculante	-	-	2,59	28,00	23,00	5,00	0,15
	Sem defloculante	29,33	0,66	2,59	28,00	23,00	5,00	0,15
Solo 03	Com defloculante	-	-	2,57	31,00	28,00	3,00	0,12
	Sem defloculante	34,62	0,23	2,57	31,00	28,00	3,00	0,12

(a) CNU – Coeficiente de não uniformidade; (b) CC – Coeficiente de curvatura; (c) γ_s – massa específica dos sólidos; (d) LL – Limite de Liquidez; (e) – LP – Limite de Plasticidade; (f) IP – Índice de Plasticidade.

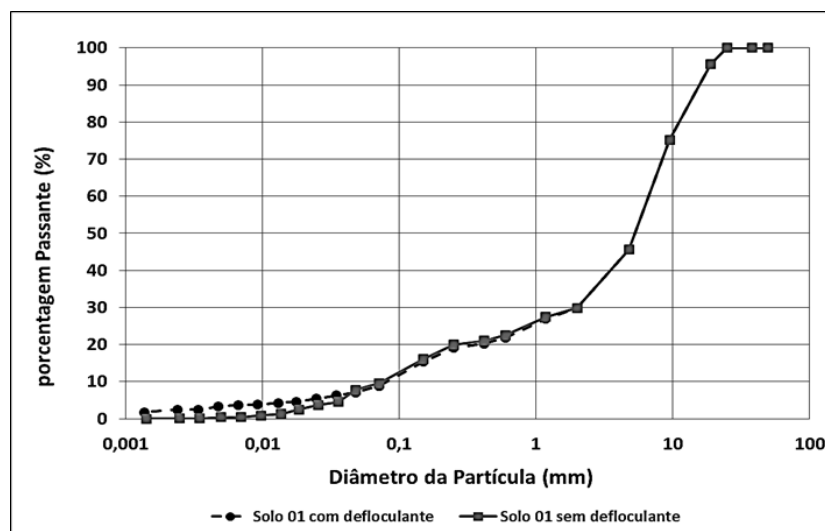


Figura 1: Curva granulométrica do Solo 01.

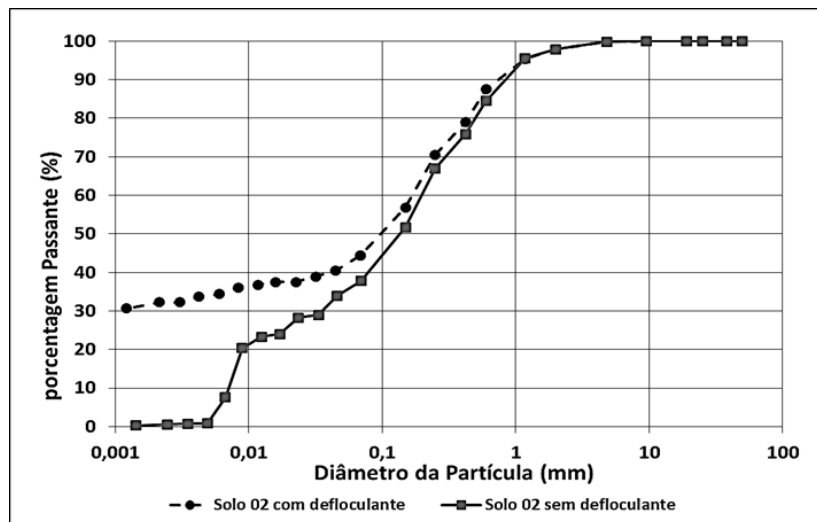


Figura 2: Curva granulométrica do Solo 02.

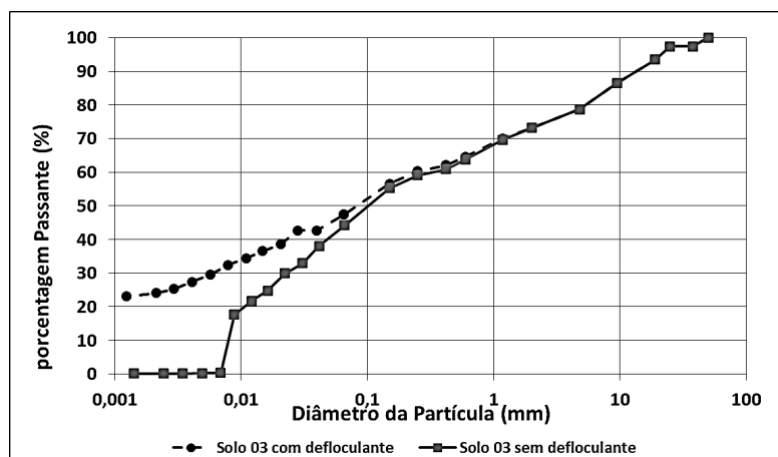


Figura 3: Curva granulométrica do Solo 03.

De acordo com a Figura 1 observa-se que o uso da solução defloculante causa pouca influência para o Solo 01. No entanto, segundo as Figuras 2 e 3, os Solos 02 e 03 apresentam uma diferença significativa entre os resultados obtidos com e sem o uso do defloculante. A ação da solução é mais significativa após o diâmetro da partícula de 0,01 mm, em que a diferença entre as curvas é mais acentuada. Assim, o uso da solução influencia no resultado final da granulometria.

Conforme a Tabela 1 as três amostras de solo podem ser caracterizadas como mal graduadas. A Tabela 2 apresenta a classificação das três amostras de solo na condição natural com a influência da solução defloculante.

Tabela 2: Classificação dos Solos

Solo	Parâmetros	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	Highway Research Board (HRB)
Solo 01	Com defloculante Sem defloculante	pedregulho mal graduado (GP)	A-1-a



Solo 02	Com defloculante	Areia – siltosa (SM)	A - 4
	Sem defloculante		
Solo 03	Com defloculante	Silte de baixa compressibilidade (SM)	A - 4
	Sem defloculante	Areia siltosa (SM)	

Conforme a Tabela 2 é possível perceber que a classificação dos Solos 01 e 02, na condição natural, não é influenciada pelo uso do defloculante. No entanto, para o Solo 03 na classificação SUCS o uso da solução interfere no resultado, uma vez que para a condição “com defloculante” a porcentagem P#200 é maior que 50%, sendo assim um solo de granulação fina. Já para a condição “sem defloculante”, a porcentagem P#200 é menor que 50%, sendo classificada principalmente como solos granulares.

Conforme o DNIT, através da norma ES 141 (DNIT, 2010b), o material utilizado na camada de base do pavimento deve possuir composição granulométrica que satisfaça a uma das seis faixas de enquadramento. Assim, o Solo 01 se enquadra na faixa de trabalho “C”, de acordo com a ES 141 (DNIT, 2010b), enquanto o Solo 02 e o Solo 03 não conseguem se enquadrar em nenhuma das faixas do DNIT. A Figura 4 apresenta a curva granulométrica do Solo 01 enquadrada na Faixa C do DNIT.

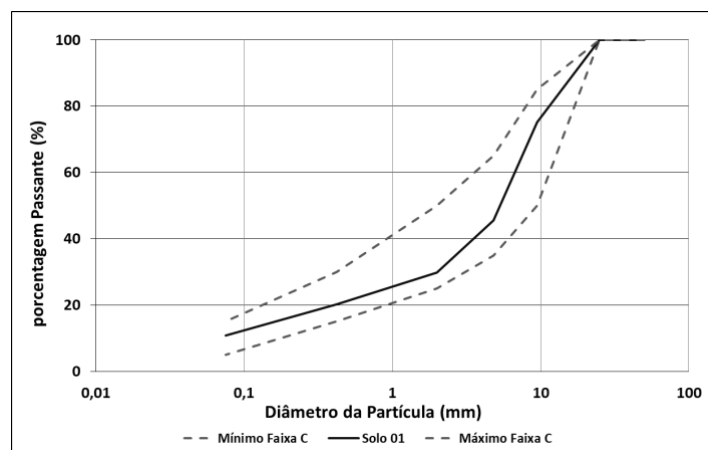


Figura 4: Solo 01 dentro da Faixa C do DNIT.

4.2 Caracterização física do RCD

Os resultados da caracterização do RCD estão resumidos na Tabela 3, enquanto a Figura 5 apresenta a curva granulométrica do RCD.

Tabela 3: Valores da caracterização do RCD estudado

Norma	Parâmetro	Resultado
NM 248 (ABNT, 2001)	Módulo de Finura (%)	6,74
	Dimensão máx (mm)	19,00
ME 081(DNER, 1998)	Massa específica (g/cm ³)	2,10
	Absorção (%)	8,05
ME 035(DNER, 1998)	Abrasão LA (%)	49,72

ME 086 (DNER, 1994)

Índice de forma

0,92

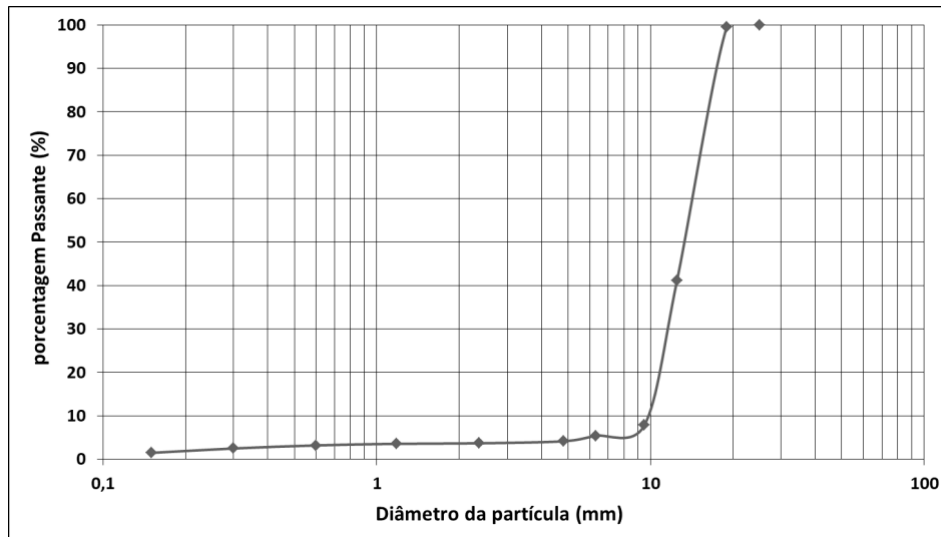


Figura 5: Curva granulométrica do RCD.

De acordo com a Figura 5 pode-se definir o material como mal graduado, em que a graduação é aberta, com ausência de partículas finas na composição. O módulo de finura obtido no ensaio é de 6,74% e a dimensão máxima característica é de 19 mm. O valor do índice de forma encontrado nessa pesquisa se aproxima da condição cúbica.

O alto desgaste do RCD no ensaio de Los Angeles pode ser devido à presença de materiais cerâmicos, uma vez que esses proporcionam baixa resistência quando sofrem solicitações de esforços. Desse modo, ao analisar os resultados de abrasão Los Angeles e índice de forma, o material atende aos limites prescritos na ES 141 (DNIT, 2010) e pode ser utilizado em camadas de base e sub-base, uma vez que, o desgaste sofrido foi inferior a 55% e o índice de forma inferior a 0,5, apresentando boa cubicidade.

De acordo com a literatura, os valores de absorção são maiores quanto maior forem as frações de argamassa e cerâmica vermelha na composição do RCD. O elevado grau de absorção pode estar relacionado a argamassa antiga aderida às partículas do RCD, como também a elevada porosidade dos grãos. Entretanto, o elevado valor de absorção obtido neste artigo se assemelha aos valores encontrados na literatura, como demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4: Valores de absorção de diversos RCD.

Fonte	Absorção (%)	Origem
Carneiro <i>et al.</i> (2001)	8,20	Salvador/BA
Motta (2005)	7,80	São Paulo /SP
Leite <i>et al.</i> (2011)	12,20	Santo André/SP
Amorin (2013)	8,23	Campo Verde/MT
Souza (2015)	7,60	Brasília/DF
Novais e Crispim (2017)	8,10	Sinop/MT



4.3 Compactação e CBR das misturas

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de compactação e CBR para as misturas do Solo 01. Nota-se que o solo em questão sem a adição do resíduo já apresenta resultados satisfatórios de resistência para o uso em camadas de pavimento, entretanto, foi analisada a necessidade da adição do RCD.

Tabela 5: Parâmetros da compactação e CBR das misturas Solo 01/RCD.

Solo / RCD	Energia proctor	W _{ótima} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
100/0	Normal	7,90	2,09	78,00	0,00
	Intermediária	7,80	2,15	99,00	0,00
	Modificada	7,80	2,17	97,00	0,00
75/25	Normal	7,80	2,05	48,00	0,00
	Intermediária	8,30	2,07	133,00	0,00
	Modificada	7,60	2,16	88,00	0,00
50/50	Normal	10,20	1,93	25,00	0,00
	Intermediária	11,40	2,00	134,00	0,00
	Modificada	8,90	2,06	161,00	0,00
25/75	Normal	10,60	1,90	22,00	0,00
	Intermediária	11,40	2,00	69,00	0,00
	Modificada	11,10	2,02	185,00	0,00

É possível observar na Tabela 5 que os valores da umidade ótima e do peso específico variaram de acordo com a energia aplicada e a adição do resíduo. O aumento da umidade ótima pode estar relacionado com a absorção da água utilizada no ensaio por parte das partículas de RCD nas misturas. A absorção do material é mais acentuada quanto maior for as frações de materiais cerâmicos presente no resíduo.

Na realização dos ensaios de compactação e CBR para este solo, ao adicionar as porcentagens de resíduo aumentava-se a dificuldade em moldar os corpos-de-prova. À medida que se adicionava água à mistura, conseqüentemente aumentava-se a umidade, no entanto, o peso específico também continuava aumentando, até um ponto em que a mistura ficasse completamente saturada. Esse evento pode estar relacionado ao alto valor de absorção dos resíduos empregados. Outra justificativa para este fenômeno é a possibilidade de um alto teor de materiais pulverulentos presente no RCD, uma vez que esse alto teor juntamente com as partículas ásperas e porosas fazem com que demandam mais água para conseguir lubrificar os grãos. O elevado teor de materiais pulverulentos pode estar relacionado aos resíduos cerâmicos em sua composição e fazem com que os materiais se apresentem mais esfarelados.

Quando o incremento de RCD é de no máximo 25%, percebe-se que não houve uma alteração expressiva em relação aos resultados da compactação para os materiais avaliados. Apesar da pequena diferença, o valor da umidade ótima quando aplicada a energia modificada foi

o menor na maioria das misturas. Já os valores do peso específico aparente seco máximo, foram maiores quando aplicada a energia modificada e quanto menor o incremento de RCD ao solo.

Conforme ilustrado na Figura 6, quando aplicada a energia normal o CBR é maior quanto menor for a porcentagem de RCD associado ao solo. No entanto, para as demais energias, esse padrão não se aplica. Assim, é possível definir como as misturas são heterogêneas, uma vez que é complicado determinar uma tendência da variação do CBR com a variação da porcentagem de RCD e da energia aplicada.

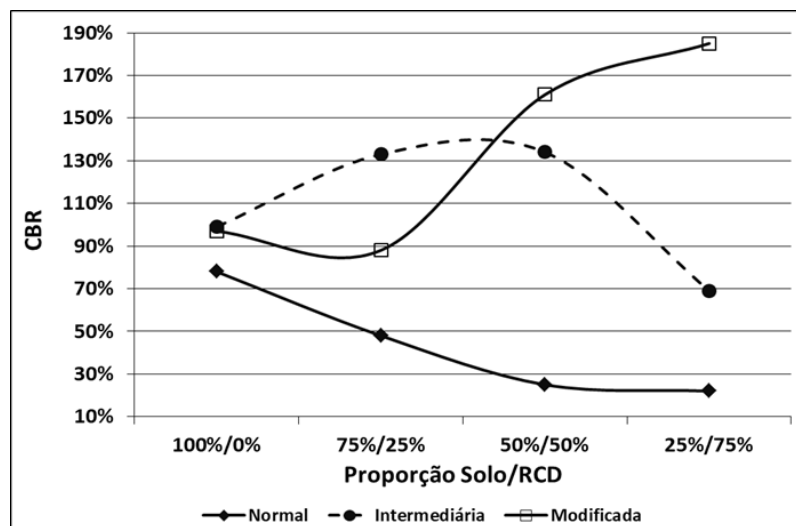


Figura 6: Relação do CBR com o incremento de RCD ao Solo 01.

Para as misturas 50/50 e 25/75 o valor do CBR aumenta com o acréscimo de energia aplicada. Na mistura 100/0 o CBR para a energia modificada é menor que para a energia intermediária, no entanto são valores muito próximos e essa diferença é insignificante. Já os valores mais discrepantes são para a mistura 75/25, em que o valor do CBR diminui 45% entre a energia intermediária e modificada. Essa discrepância pode ser explicada pela heterogeneidade das amostras e a dificuldade em conseguir executar os ensaios.

Contudo, de acordo com os limites estabelecidos pelas normas ES 139 (DNIT, 2010f) e ES 141 (DNIT, 2010b), pode-se inferir que todas as misturas de solo/RCD exibiram valores satisfatórios para o uso em obras de pavimentação. Entretanto, quando aplicada a energia normal, as misturas de 75/25, 50/50 e 25/75 só podem ser utilizadas como camadas de sub-base. Assim, ao adicionar o RCD ao solo e comparar seus resultados com o solo puro, observa-se que essa adição não causou ganhos expressivos de resistência, aliás, dependendo da porcentagem do resíduo e da energia aplicada, o desempenho dessas misturas em pavimentação é menor que o do solo puro.

Para o Solo 02 a Tabela 6 apresenta os parâmetros dos ensaios de compactação e CBR para as diversas misturas. Percebe-se que este solo apresenta baixos valores de CBR na condição pura e que a adição do RCD na composição do material pode melhorar as suas propriedades de resistência.

Tabela 6: Parâmetros da compactação e CBR das misturas Solo 02/RCD.

Solo / RCD	Energia proctor	W _{ótima} (%)	γ _{dmáx} (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
------------	-----------------	------------------------	--	---------	--------------

100/0	Normal	15,30	1,85	10,00	0,01
	Intermediária	13,30	1,92	14,00	0,07
	Modificada	12,50	2,0	6,00	0,29
75/25	Normal	13,60	1,83	7,00	0,03
	Intermediária	11,90	1,91	7,00	0,06
	Modificada	9,90	2,05	44,00	0,01
50/50	Normal	10,50	1,83	25,00	0,01
	Intermediária	12,00	1,93	14,00	0,01
	Modificada	9,10	1,98	18,00	0,01
25/75	Normal	14,30	1,83	21,00	0,00
	Intermediária	13,10	1,93	38,00	0,00
	Modificada	8,80	1,93	118,00	0,00

Com base nos resultados é possível definir que o aumento na energia aplicada provocou um aumento no peso específico aparente seco máximo, cabendo a mistura 75/25 ter o maior acréscimo, de aproximadamente 12,2%. Quando a energia modificada é aplicada, a umidade ótima é a menor em todas as misturas e, decresce com o incremento do RCD. No que diz respeito às porcentagens de RCD associadas ao solo, percebe-se que quando aplicada a energia normal, os valores de $\gamma_{dm\acute{a}x}$ das misturas são constantes e menores se comparados ao solo na condição pura. A Figura 7 apresenta a relação entre as porcentagens de RCD e os valores do CBR para as misturas do Solo 02.

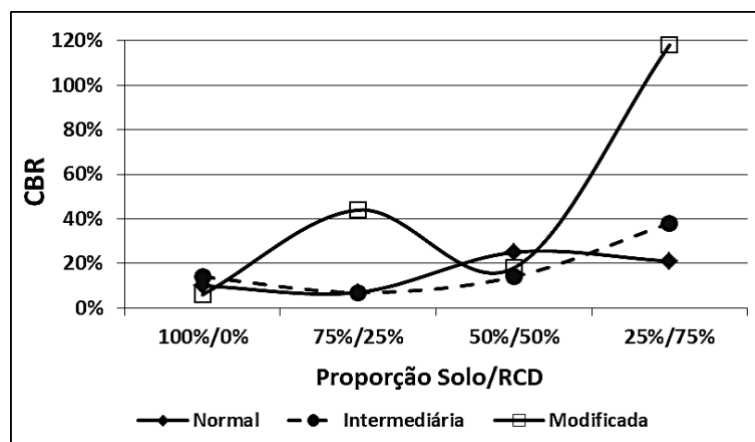


Figura 7: Relação do CBR com o incremento de RCD ao Solo 02.

Com base na Figura 7 é possível observar que nem sempre a aplicação de uma maior energia de compactação faz com que gere um maior CBR. Contudo, para as misturas 75/25 e 25/75 a aplicação da energia modificada provocou um acréscimo significativo no valor do CBR. Além do mais, ao analisar as porcentagens de RCD adicionadas ao solo para uma mesma energia de compactação observa-se que, na energia intermediária e modificada, a adição de 75% do resíduo incorporado ao solo faz com que o valor do CBR aumente consideravelmente gerando um ganho

significativo de desempenho. Dessa forma, para o uso em camadas de base de pavimento, o incremento do RCD ao solo só é significativo se for adicionado 75% aplicando a energia modificada, uma vez que, de acordo com a norma ES 141 (DNIT, 2010b), essa mistura é a única que atende aos limites propostos. Todavia para ser utilizado em camadas de sub-base, de acordo com a ES 139 (DNIT, 2010f), as misturas de 75/25 e 50/50 atendem aos limites estabelecidos dependendo da energia de compactação aplicada.

Para o Solo 03 a Tabela 7 apresenta os parâmetros dos ensaios de compactação e CBR. Análogo ao que foi mencionado para o Solo 02, a adição do RCD tende a melhorar os baixos valores do solo puro.

Tabela 7: Parâmetros da compactação e CBR das misturas Solo 03/RCD.

Solo / RCD	Energia proctor	W _{ótima} (%)	$\gamma_{dm\acute{a}x}$ (g/cm ³)	CBR (%)	Expansão (%)
100/0	Normal	14,20	1,83	6,00	0,17
	Intermediária	12,70	1,88	6,00	0,11
	Modificada	11,30	1,95	24,00	0,10
75/25	Normal	10,70	1,93	1,00	0,09
	Intermediária	11,10	1,93	9,00	0,22
	Modificada	9,20	1,97	38,00	0,38
50/50	Normal	9,60	1,94	6,00	0,00
	Intermediária	10,00	1,98	30,00	0,04
	Modificada	9,80	1,97	31,00	0,04
25/75	Normal	13,10	1,98	20,00	0,09
	Intermediária	12,20	1,91	24,00	0,02
	Modificada	9,30	1,97	90,00	0,05

A aplicação de uma maior energia de compactação causa uma modificação nos resultados das misturas. A energia modificada provoca um aumento significativo no peso específico aparente seco máximo para o solo puro e para a mistura 75/25, mas para as demais misturas com maior quantidade de RCD, o acréscimo de energia origina valores abaixo do esperado. Em relação aos valores da umidade ótima, o aumento de energia provoca diminuição da umidade na maioria das misturas. A Figura 8 apresenta a relação entre o CBR e o incremento de RCD ao Solo 03.

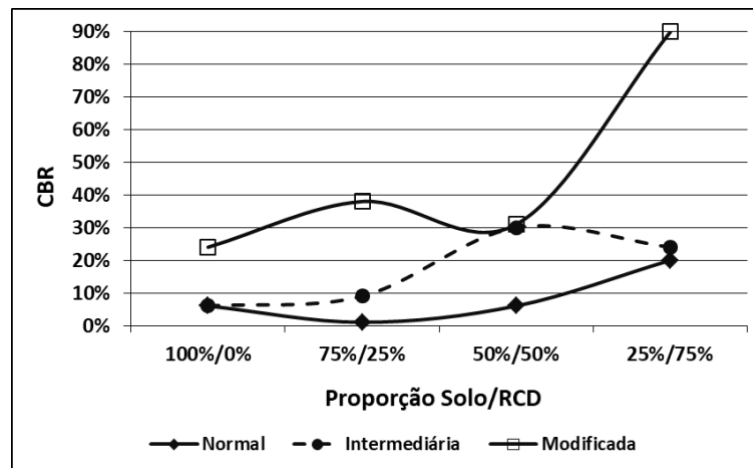


Figura 8: Relação do CBR com o incremento de RCD ao Solo 03.

Conforme ilustrado na Figura 8 para a maioria das amostras o acréscimo no valor do CBR é maior quanto maior foi a energia aplicada. Mesmo assim, o ganho de resistência em função do aumento da energia só se tornou expressivo se comparar a energia normal com a modificada. Com relação à expansão, no geral, a aplicação da energia normal foi a que gerou menores valores de expansão. No entanto, todos os valores são aceitáveis dentro dos limites das normas para pavimentação.

Com relação às porcentagens de RCD integradas ao solo para uma mesma energia de compactação, o valor de CBR da maioria das misturas Solo/RCD é maior que o valor para o solo na condição pura. Se comparar o valor de CBR do solo puro com o valor da mistura com 75% de RCD observa-se um aumento expressivo no valor do CBR, de aproximadamente 233%, gerando um ganho significativo no desempenho da amostra. A incorporação de 75% do resíduo à mistura apresentou um valor de CBR superior aos demais encontrados para o Solo 03. Deste modo, o incremento de 25% do RCD ao solo só proporciona melhorias se for aplicada a energia modificada, podendo assim, essa mistura ser utilizada como material para camada de sub-base. Ao incorporar 50% do resíduo, as misturas também podem ser utilizadas como material de subbase, sendo necessária apenas a aplicação da energia intermediária. A mistura com 75% de RCD quando aplicada a energia modificada proporciona um valor de CBR que atende aos limites propostos pela ES 141 (DNIT, 2010b) para uso como material em camadas de base de pavimentos.

4.4 Análise da quebra dos grãos após o ensaio de CBR

A adição do RCD aos solos acarretou em aumento na porcentagem de pedregulho e diminuição da fração de finos de todas as amostras. No entanto, ao realizar os ensaios de compactação e CBR era perceptível que, com a aplicação da energia de compactação a composição granulométrica das misturas alterava-se durante o ensaio. Alguns materiais presentes na composição do RCD, como cerâmica vermelha e materiais cimentícios, têm maior probabilidade de se decompor com a aplicação da energia. Assim, após a realização do ensaio de CBR foi realizado um novo ensaio de granulometria com a finalidade de verificar a quebra dos grãos para cada amostra.

Ao comparar as curvas granulométricas antes e depois do ensaio de CBR para todas as misturas dos três tipos de solo, é possível definir que a realização do ensaio provoca mudanças na granulometria das amostras. Quanto maior a porcentagem de RCD adicionada à mistura, maior será a quebra dos grãos. A Figura 9 apresenta as curvas granulométricas antes e após o ensaio de CBR para a mistura 25/75 do Solo 01.

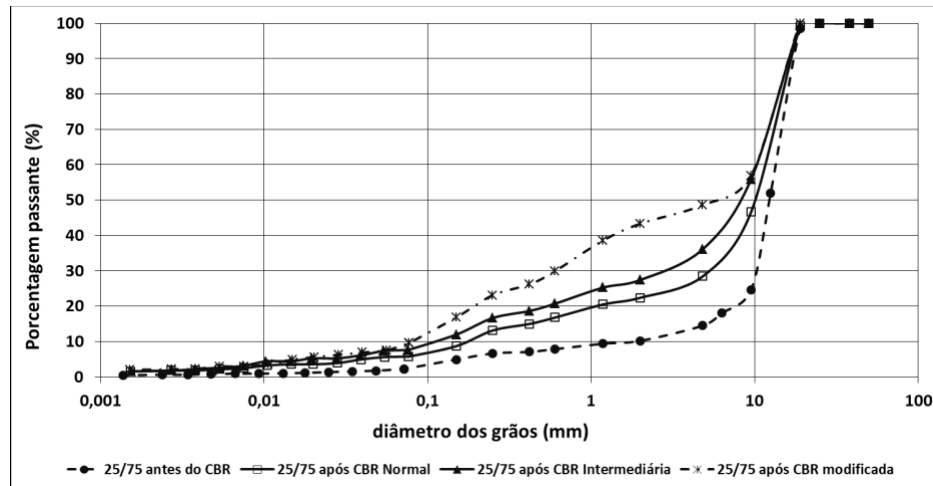


Figura 9: Curvas granulométricas para mistura 25/75 do Solo 01.

Assim, independente da amostra de solo, a mistura com maior quantidade de RCD foi a que obteve maior quebra dos grãos. Este fenômeno pode ser explicado devido ao RCD ser composto por partículas de fácil desagregação e a porcentagem de RCD na mistura ser maior que a porcentagem de solo.

5 CONCLUSÃO

Os resultados da caracterização dos solos serviram como indícios da diversidade de materiais nas regiões do estado do Rio Grande do Norte. A amostra da cidade de Caraúbas/RN (Solo 01) foi caracterizada como um material granular com granulometria que se enquadra numa faixa de trabalho de boa qualidade para ser utilizado em camadas de base (Faixa C), além de atender aos limites impostos pela norma ES 141 (DNIT, 2010b) para uso em camadas de base. Contudo, as amostras da cidade de Macaíba/RN (Solo 02) e Ipueira/RN (Solo 03) apresentaram um material menos granular e mais plástico que não se enquadram em nenhuma das faixas limites impostas pelo DNIT, e, os valores de LL foram superiores ao recomendado na norma para uso em base de pavimento. Em todas as amostras o incremento de RCD ao solo promoveu um aumento na porcentagem de partículas grossas.

Quanto aos ensaios de compactação e CBR, verificou-se que para o Solo 01 o incremento de RCD ao solo só é satisfatório caso seja adicionado 50% e 75% de resíduo com a aplicação da energia modificada. Para o Solo 02 foi considerado que na condição pura o material só pode ser utilizado como material de subleito, no entanto, quando adicionado 75% de RCD ao solo aplicando a energia modificada, as propriedades são melhoradas e a mistura pode ser utilizada como material em camada de base de pavimento, atendendo aos limites da norma ES 141 (DNIT, 2010b). Para o

Solo 03, enquanto na condição pura só poderia ser utilizado como sub-base quando aplicada a energia modificada, com o incremento do RCD ao solo ocorre um ganho significativo em termos de resistência e, ao adicionar 75% do resíduo aplicando a energia modificada, a amostra pode ser utilizada como material de base granulometricamente estabilizada.

Com relação a degradação, para as misturas do Solo 01, no geral, à medida que se aumentava a energia de compactação a porcentagem de finos das misturas também crescia. Já para o Solo 02 e o Solo 03 a energia de compactação tem pouca influência na quebra dos grãos. Entretanto, para as misturas das três amostras de solo, à medida que se aumentava a porcentagem de RCD ao solo a quebra dos grãos também aumentava. Esse fato pode ser explicado pela presença de materiais de fácil degradação na composição do RCD, como por exemplo, os materiais cerâmicos.

Assim, tendo em vista os resultados apresentados, pode-se inferir que a utilização do RCD em conjunto com os solos estudados apresentam parâmetros satisfatórios para a sua utilização como material alternativo em obras de pavimentação. Dessa forma, o incremento de RCD a solos com características semelhantes aos estudados também podem apresentar alto potencial para uso em pavimentos.

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.** 151 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- Angulo S.C., Miranda, L.F.R., John, V.M. (2002). Construction and demolition waste, its variability and recycling in Brazil. **Proceedings of sustainable building**, Oslo;.
- Arulrajah, A.; Ali, M. M. Y.; Piratheepan, J.; M. W. Bo, M.Asce. (2012, jul.). Geotechnical Properties of Waste Excavation Rock in Pavement Subbase Applications. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Australia, v.24, n. 7.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. (2003). **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. (1984). **NBR 6508:** Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. (1984). **NBR 6459:** Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas - ABNT. (1984). **NBR 7180:** Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro.



- Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. (1986). **NBR 7182**: Ensaio normal de compactação de solos. Rio de Janeiro: ABNT,.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. (1987). **NBR 9895**: Solo - Índice de Suporte Califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira Para Reciclagem De Resíduos Da Construção Civil E Demolições – ABRECON. (2015, set.). **Relatório da Pesquisa setorial da reciclagem de resíduos da construção 2014/2015**.
- Associação Brasileira De Empresas De Limpeza Pública E Resíduos Especiais – ABRELPE. (2011). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2011**. São Paulo.
- Brasil, Ministério Do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. (2002). Resolução CONAMA nº 307 – **Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**, Brasília.
- Cardoso, R.; Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. (2016). Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. **Waste Management**, v.49, p. 131-145.
- 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, p. 190-227.
- Confederação Nacional do Transporte. (2019). **Pesquisa CNT de rodovias 2019, relatório gerencial**, Brasília, CNT: SEST, SENAT.
- Departamento Nacional De Estradas E Rodagens – DNER. (1998). **ME 035**: Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional De Estradas E Rodagens – DNER. (1998). **ME 081**: Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional De Estradas E Rodagens – DNER. (1994). **ME 086**: Agregado - determinação do índice de forma. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes – DNIT. (2010). **ES 139**: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro.
- Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes – DNIT. (2010). **ES 141**: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro.
- Eurostat, (2014, jul.). Waste statistics in Europe. < <https://epp.eurostat.ec.europa.eu/>>
- GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; JETHOO, A. S.; AGRAWAL, R.; SINGH, H. Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 239-253.



- Triches, G., Kryckyj, P. R.. (agost. 2018). **Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana**. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos, 1999.
- Leite, F. C.; Motta, R. S.; Vasconcelos, K. L; Bernucci, L. (2011, jan.). Laboratory evaluation of recycled **construction** and demolition waste for pavements. **Construction And Building Materials**, Brasil, v. 25, n. 6, p. 2972-2979.
- Li, Y.; Zhou, H.; Su, L.; Hou, H.; Dang, L. (2017). Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. **Advances In Materials Science And Engineering**, v. 2017, p.1-12.
- Mohammadinia, A.; Arulrajah, A.; Haghghi, H.; Horpibulsuk, S. (2017, abr.). Effect of lime stabilization on the mechanical and micro-scale properties of recycled demolition materials. **Sustainable Cities And Society**, [s.l.], v. 30, p.58-65.
- Motta, R. S. (2005). **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego**. 2005. 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Novais, C. M.; Crispim, F. A. (2017). Caracterização de Agregados Reciclados de Resíduos da Construção Civil para Uso em Base e Sub-Base de Pavimento Urbano em Sinop – MT. **Anais inovação, tecnologia, gestão e sustentabilidade – Revista eletrônica de iniciação científica**, Mato Grosso, v. 3.
- Perina, J.M.; Trannin, I.C.B. (2019). Proposta para aproveitamento de resíduos da construção civil gerados em canteiros de obras. **Revista Sodebras [on line]**, v. 14, n. 159, p. 192-197.
- Santos, E. C. G. dos (2007). **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado**. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, EESC -- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Souza, M. V. R. e (2015). **Comportamento Mecânico de um Agregado Reciclado como Base de Pavimento Flexível a partir de um Modelo Físico**. 2015. 125 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília-DF.
- Trannin, I. C. B.; Pancieri, T. A. (2019, jul.). Uso de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição como alternativa sustentável para a pavimentação. **Revista Sodebras [on line]**, 163(14), p. 26-31.
- Yuan, H.; Shen, L. (2011). Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste Management**, v.31, p. 670-679.



COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Barreto, A. C., Amorim, E. F. (2020). Avaliação do desempenho técnico de diferentes misturas de solo com Resíduos De Construção (RCD) para uso em obras viárias. *Holos*. 36 (7), 1-20.

SOBRE OS AUTORES**ALISSON CABRAL BARRETO**

Mestre em Engenharia Civil pelo o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civi da UFRN (2020). E-mail: alissomb@hotmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7386-3956>

ENIO FERNANDES AMORIM

Engenheiro Civil (2003) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Mestre (2007) e Doutor (2013) em Geotecnia pela Universidade de Brasília. Sócio Representativo da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos (ABMS) e Sócio Afiliado da Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), desde abril de 2010. Trabalha como Professor Efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Campus - Natal-Central, lotado na Diretoria Acadêmica de Construção Civil, e atua como Professor Colaborador no Programa de Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). E-mail: enio.amorim@ifrn.edu.br

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7386-3956>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento

Pareceristas Ad Hoc: PAULO FILIPE LOPES E RAFAELA SOUZA

