

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO DAS CIÊNCIAS EXATAS E DAS TECNOLOGIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA UTILIZAÇÃO DE RCD EM BASE OU SUB-BASE
DE PAVIMENTOS**

LEIDE HERLLANE FERREIRA DO NASCIMENTO

**BARREIRAS-BA
OUTUBRO-2017**

LEIDE HERLLANE FERREIRA DO NASCIMENTO

**ESTUDO DA VIABILIDADE PARA UTILIZAÇÃO DE RCD EM BASE OU SUB-BASE
DE PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheira Civil.

Orientador: MsC. Vinícius de Oliveira Kühn.

BARREIRAS-BA

OUTUBRO-2017

FICHA CATALOGRÁFICA

N244 Nascimento, Leide Herllane Ferreira do.

Estudo de viabilidade para utilização de RCD em base ou sub-base de pavimentos.
Leide Herllane Ferreira do Nascimento. – 2017.

75 f.; il.

Orientador: Prof. Vinícius de Oliveira Kühn.

Trabalho de Conclusão de Curso: (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias, Barreiras, BA, 2017.

1. Pavimentos. 2. Resíduos como materiais de construção. I. Kühn, Vinícius de Oliveira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias. III. Título.

CDD: 625.8

LEIDE HERLLANE FERREIRA DO NASCIMENTO

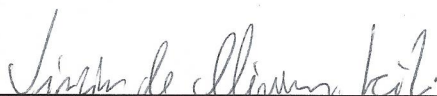
**ESTUDO DE VIABILIDADE PARA UTILIZAÇÃO DE RCD EM BASE OU SUB-BASE
DE PAVIMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial à
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

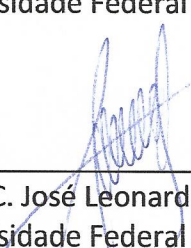
Aprovada em 03.10.2017

Banca Examinadora


Orientador (a):



Prof. (º) MsC. Vinícius de Oliveira Kühn
Universidade Federal do Oeste da Bahia



Prof. (º) MsC. José Leonardo Vanderlei de Carvalho
Universidade Federal do Oeste da Bahia



Prof. (º) DsC. Oisy Hernández Menéndez
Universidade Federal do Oeste da Bahia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar força e coragem para o alcance de meus objetivos.

A minha família por me apoiarem e estarem presentes em todos os momentos da minha vida.

Ao orientador Msc. Vinícius de Oliveira Kühn, pela orientação, dedicação, incentivo, paciência e comprometimento com o trabalho realizado.

Aos meus colegas Adolfo Júnior, Guilherme Moreira e Helves Guedes pelo apoio nos ensaios laboratoriais e nos trabalhos realizados em grupo durante a graduação.

A Sarha Gusmão pelo apoio na coleta dos resíduos.

A todos os colegas que incentivaram à realização do trabalho.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação.

Ao Centro das Ciências Exatas e das Tecnologias (CCET) da Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB), por ter proporcionado condições de desenvolver este trabalho.

RESUMO

A presente pesquisa objetiva avaliar a aplicação de agregados reciclados nas camadas de base e sub-base de pavimentos na cidade de Barreiras- BA realizando análise de um solo típico da região, do agregado reciclado e da mistura contendo 50% de cada material. Para a análise foram realizados ensaios laboratoriais para determinação de suas propriedades, os quais pudessem comprovar sua aplicabilidade em obras rodoviárias. Considerando os efeitos de quebra ocorridos sobre o solo e Resíduos de Construção e Demolição (RCD) realizou-se ainda análise de quebra do material aplicando-se ensaios de granulometria após compactação e *California Bearing Ratio* (CBR) e ensaios de compressão unidimensional, neste último sendo analisados apenas os grãos retidos na peneira 2,00mm e passante na 4,75mm do solo e RCD. Os resultados indicaram o RCD como redutores de plasticidade e de expansão, visto que os resultados obtidos na mistura foram inferiores aos valores do solo. Os valores de CBR obtidos indicaram que todos os materiais empregados na pesquisa são aptos para aplicação em reforço do subleito e sub-bases de pavimentos com baixo volume de tráfego, sendo que os materiais contendo RCD são aptos também para aplicação nas camadas de base de pavimentos visto que obtiveram CBR superior a 60%. Observou-se que a aplicação de RCD ao solo causou uma melhora de suas qualidades aumentando sua capacidade de suporte. Com a análise de quebra notou-se que ela está associada ao teor de umidade empregado durante os ensaios, e também ao tipo de grãos, visto que a quebra se mostrou mais intensa para os materiais contendo agregados reciclados. Os ensaios de compressão unidimensional indicou menor resistência dos agregados reciclados em relação ao solo. Com os resultados obtidos na pesquisa podemos considerar a viabilidade técnica de aplicação do RCD em obras de pavimentação de baixo volume de tráfego.

Palavras-chave: solo, RCD, pavimentos, quebra dos grãos, resistência.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos.....	12
1.2 Escopo do Trabalho	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
2.1 Constituição dos Pavimentos.....	13
2.2 Características das camadas granulares dos pavimentos	15
2.3 Definições e classificação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	17
2.4 Geração do RCD	18
2.4.1 Geração de RCD no Brasil	19
2.4.2 Geração de RCD na cidade de Barreiras- BA.....	21
2.5 Histórico de aplicação de RCD em pavimentos	23
2.6 Características de RCD para camadas em pavimentos	26
2.7 Estudos laboratoriais sobre a viabilidade do uso de RCD	27
2.8 Avaliação de quebra de materiais granulares e RCD	30
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1 Seleção e coleta das amostras	35
3.1.1 Amostra de Solo	35
3.1.2 Amostra de RCD	36
3.1.3 Misturas selecionadas	38
3.2 Metodologia.....	39
3.2.1 Ensaios de caracterização.....	39
3.2.2 Ensaios de Compactação, Expansão e CBR.....	41
3.2.3 Análise de quebra dos grãos	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Ensaios de Caracterização Física	46
4.1.1 Massa Específico dos Grãos	46
4.1.2 Composição Granulométrica	47
4.1.3 Limites de Atterberg.....	49
4.2 Compactação, Expansão e CBR.....	50
4.2.1 Compactação.....	50
4.2.2 Expansão e CBR	52

4.3	Análise de quebra dos grãos.....	56
4.3.1	Análise granulométrica após Compactação e CBR	56
4.3.2	Após ensaio de compressão unidimensional.....	60
5.	CONCLUSÕES	64
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	67
6.	REFERÊNCIAS.....	68
	APENDICE A.....	71
	APÊNDICE B.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura dos pavimentos flexíveis.	14
Figura 2- Total de RCD coletado no Brasil e Regiões (tx1000/ano).....	20
Figura 3 - Levantamento de usinas de reciclagem de RCD no país entre os anos 1993 a 2015.....	21
Figura 4- Locais de despejo irregular de RCD na cidade de Barreiras.	22
Figura 5 - Corte de pavimento com base executada com RCD reciclado em Belo Horizonte	25
Figura 6 - Curvas granulométricas em diferentes níveis de tensão: (a) Esfera A072 (diâmetro, 0,92mm); (b) Esfera A170 (diâmetro: 1,98mm).....	31
Figura 7- Variação da curva granulométrica após ensaio CBR com imersão para diferentes energias de compactação.....	33
Figura 8 - Variação de curva granulométrica após ensaio CBR verificados para o Agregado de Santo André em São Paulo.	34
Figura 9 - Local de coleta da amostra de solo.	35
Figura 10 - Solo após homogeneização.....	36
Figura 11 - Local de Coleta da amostra de RCD.....	36
Figura 12 - Coleta de RCD.....	37
Figura 13 - Processo para redução dos grãos com máquina de Abrasão Los Angeles	38
Figura 14 - Ensaio de massa específica dos grãos: a) etapa de saturação 12h; b) dispersão; c) Remoção de ar com bomba a vácuo; d) Aquecimento em chapa; d) Pesagem.....	39
Figura 15 - Materiais utilizados para os ensaios de limites de Atterberg: a) Limite de Liquidez; b) Limite de Plasticidade;	40
Figura 16 – Amostras de solo retido nas peneiras: a) peneiramento grosso; b) peneiramento fino.	41
Figura 17 - Etapas do ensaio de compactação. a) Solo úmido; b) Compactação; c) Rasamento.....	42
Figura 18 - Prensa CBR Marshal automática.	43
Figura 19 - Representação de molde com grãos (4,75mm-2,00mm).....	45
Figura 20 - Ensaio de compressão unidimensional.	46
Figura 21 - Curvas granulométricas das três amostras.....	47
Figura 22 - Curvas de compactação.	51

Figura 23 - Curvas CBR da amostra de solo.	52
Figura 24 - Curvas CBR para amostra de RCD.	53
Figura 25 - Curvas CBR da amostra de RCD+Solo (1:1).	54
Figura 26 - Fratura do RCD após compactação e CBR.	57
Figura 27 - Curvas granulométricas antes e após ensaio de compactação e CBR do solo.	57
Figura 28 - Curvas granulométricas antes e após ensaio de compactação do RCD.	57
Figura 29 - Curvas granulométricas antes e após ensaio de compactação do RCD+Solo (1:1).	58
Figura 30 - Amostra de RCD: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio de compressão unidimensional com tensão vertical de 10.000 kPa.	60
Figura 31 – Variação do índice de vazios em função da tensão das amostras de Solo e RCD (4,75-2,00 mm) do ensaio de compressão unidimensional.	61
Figura 32 - Granulometria após ensaio de compressão unidimensional com diferentes carregamentos.	62
Figura 33 - Variação do módulo secante em função da deformação axial das amostras de solo e RCD (2,00-4,75mm) do ensaio de compressão unidimensional.	63
Figura 34 - Variação do Módulo tangente em função da deformação axial (2,00-4,75mm).	64
Figura 35 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "A" do DNIT.	71
Figura 36 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "B" do DNIT.	71
Figura 37 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "C" do DNIT.	72
Figura 38 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "D" do DNIT.	72
Figura 39 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "E" do DNIT.	73
Figura 40- Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "F" do DNIT.	73
Figura 41 - Curva de compactação do Solo	74
Figura 42 - Curva de compactação da mistura RCD- Solo (1:1).	74
Figura 43 - Curva de compactação do RCD.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Granulometria para base granular	17
Tabela 2 – Estimativa do volume de RCD gerado em Barreiras entre os anos 2010 a 2015.	23
Tabela 3 - Características do trecho experimental em Goiânia-GO.	25
Tabela 4 - Aplicação do RCD para pavimentação requisitos mínimos no Brasil ETS-001 (PMSP, 2003) e NBR 15115.	26
Tabela 5 - Resultados das misturas adotadas para energia de compactação intermediária.	28
Tabela 6 - Valores de CBR e compressão simples para adição de 3% e 6% de cal e cimento Portland ao agregado reciclado.....	29
Tabela 7 - Caracterização física do RCD	30
Tabela 8 - Índice de quebra com variação do teor de umidade.....	33
Tabela 9 - Peneiras empregadas no ensaio de granulometria.....	41
Tabela 10 - Massa específica dos grãos da pesquisa e outros autores.	47
Tabela 11 - Classes Texturais dos materiais.	48
Tabela 12 - Parâmetros de curvatura.	49
Tabela 13 - Limites de Atterberg	50
Tabela 14- Resultados de Expansão e CBR.....	55
Tabela 15 - Índice de quebra e variação da umidade.....	59

1. INTRODUÇÃO

A construção civil representa uma das principais atividades de desenvolvimento do país, sendo também as maiores geradoras de impactos ambientais, devido o 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 são denominados resíduos da construção e demolição (RCD) os quais são decorrentes das atividades de construção, reformas, demolição e perdas inerentes ao processo produtivo.

A inadequada disposição do RCD tem gerado diversos problemas que abrangem aspectos ambientais, sociais e econômicos. Dentre os problemas podemos destacar a degradação da infraestrutura de drenagem, obstrução de mananciais hídricos, e problemas estéticos, pois as áreas de despejo muitas vezes se situam no entorno das cidades e próximos a cursos de água.

De acordo a resolução CONAMA nº 307 do ano de 2002, que estabelece os critérios e procedimentos para o gerenciamento dos resíduos da construção civil, os geradores do RCD são responsáveis pela destinação correta dos mesmos, devendo priorizar a reutilização e em segundo caso o descarte adequado do material, além de buscar a redução de geração de resíduos. Os resíduos são divididos em quatro classes de acordo a mesma resolução, sendo estabelecidos os materiais que possuem potencial para reutilização, dentre as classes apresentadas na resolução os resíduos de classe “A” são os que se adéquam para reutilização na construção civil.

Uma das maneiras de reduzir os problemas causados pela indústria da construção civil é desenvolver tecnologias que possibilitem a utilização dos materiais recicláveis em substituição à matéria prima ou pelo menos redução do consumo da mesma. Segundo Carneiro *et. al.* (2001) entre as formas de reutilização, o emprego do RCD 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, exigindo mais materiais provenientes de jazidas. A aplicação dos agregados poderia reduzir essa demanda, diminuindo os impactos ambientais decorrentes da exploração da mesma.

No Brasil, há duas normas que regulamentam o uso do RCD como agregado reciclado em obras da construção civil, a NBR 15115 e NBR 15116. Elas foram elaboradas em 2004 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), visando estimular e regulamentar o uso dos agregados na indústria da construção. A NBR 15115 é específica para o uso dos agregados em pavimentação.

Contudo, em nosso país se identificam poucas experiências realizadas com agregados, isso ocorre graças à falta de incentivo público nas políticas de desenvolvimento sustentável e aos preconceitos que prevalecem a respeito da utilização dos agregados reciclados. Diante disso, o presente trabalho visa contribuir com o conhecimento técnico e científico relacionados ao uso de RCD como agregados reciclados nas camadas estruturais de pavimentos flexíveis, além de estimular o uso do mesmo.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a viabilidade de aplicação de agregados reciclados provenientes da construção e demolição de obras civis nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis da cidade de Barreiras - BA.

Tem-se como objetivos específicos:

- Realizar a caracterização dos materiais e da mistura entre eles;
- Avaliar a expansão e o CBR dos materiais;
- Analisar a quebra de grãos após a compactação e CBR dos materiais;
- Avaliar o comportamento do Solo e RCD durante compressão unidimensional, bem como a evolução de quebra de grãos durante as solicitações de carregamento.

1.2 Escopo do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos estruturados como se segue:

- Introdução: é realizada uma abordagem prévia da pesquisa, apresenta os objetivos e estrutura do trabalho;
- Revisão Bibliográfica: apresenta em sua estrutura assuntos pertinentes a aplicação de RCD nas camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis,

faz-se uma breve abordagem sobre a quantidade de RCD gerados no país e na cidade de Barreiras- BA e aborda sobre quebra de partículas granulares;

- **Materiais e Métodos:** descreve a metodologia empregada, apresentado os materiais, equipamentos e procedimentos realizados para a caracterização dos materiais utilizados;
- **Resultados e Discussão:** apresenta os resultados e avalia o comportamento do material com base nos dados obtidos;
- **Conclusão:** é realizada a finalização do trabalho com as principais considerações e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

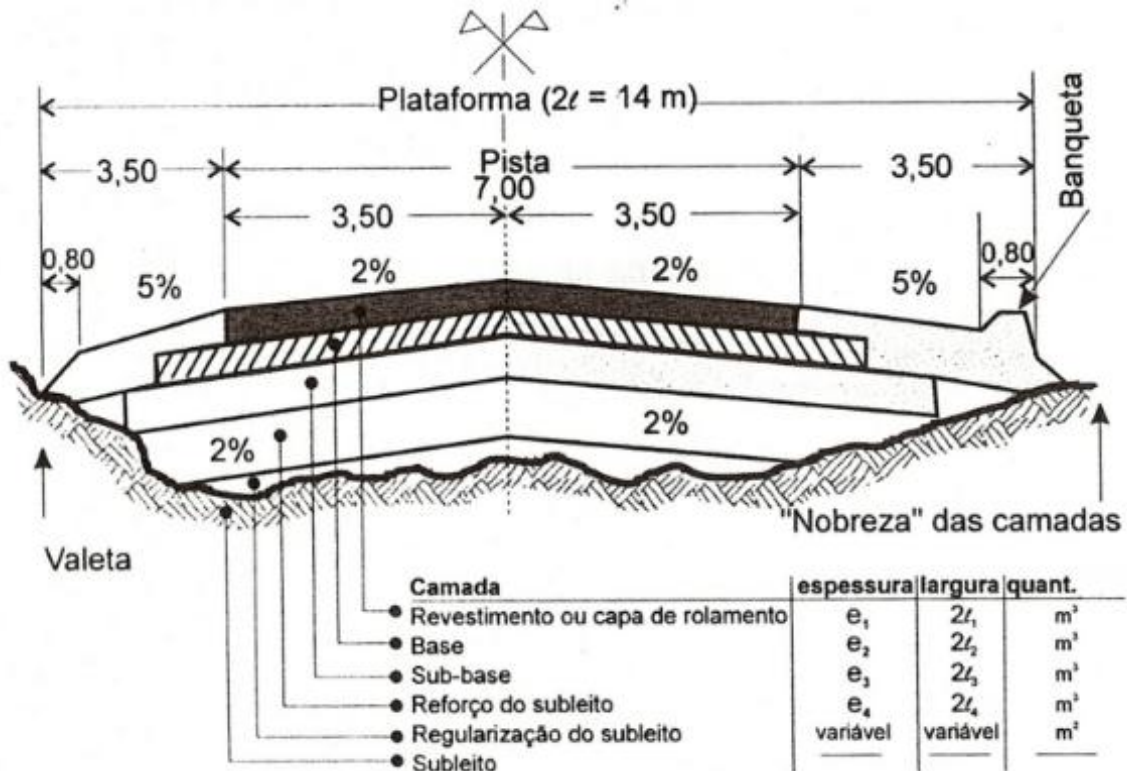
2.1 Constituição dos Pavimentos

Segundo Bernucci *et al.* (2006), o pavimento é uma estrutura composta de múltiplas camadas com espessuras finitas, com a finalidade técnica e econômica de resistir os esforços provenientes do tráfego de veículos e do clima, proporcionando melhorias nas condições de rolamento e trazendo conforto e segurança ao usuário.

Há diversas classificações para os pavimentos rodoviários. Em relação à sua estrutura eles podem ser classificados como rígidos, semi - rígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores, absorvendo praticamente todas as tensões que lhes são exigidas, sendo constituídos principalmente de concreto. Os semi - rígidos se caracterizam por possuírem uma base cimentada e um aglutinante com propriedade cimentícias. Os flexíveis são aqueles em que a carga se distribui de forma equivalente entre as camadas, havendo deformações elásticas significativas quando é aplicado o carregamento, esse tipo de pavimento é constituído de quatro camadas principais (DNIT, 2006).

Na Figura 01 podemos observar as camadas constituintes dos pavimentos flexíveis.

Figura 1 - Estrutura dos pavimentos flexíveis.



Fonte: SENÇO, 2007, p. 16.

Senço (2007) define as camadas da seguinte forma:

- Subleito: é o terreno de fundação do pavimento, destinada a absorver os esforços verticais;
- Regularização: é uma camada com espessuras diversas, construída sobre o subleito com o objetivo de conformá-lo transversalmente ou longitudinalmente, devendo dar ao pavimento as características geométricas do pavimento finalizado;
- Reforço do subleito: é uma camada com espessura constante, construída quando necessário acima da regularização com características superiores às camadas imediatamente inferiores, com capacidade de suporte capaz de resistir os esforços das camadas superiores;
- Sub-Base: é uma camada complementar à base, devendo ser construída quando por circunstâncias diversas não é aconselhável construir a base diretamente sobre as camadas de reforço e regularização;
- Base: é a camada destinada a resistir os esforços verticais oriundos do tráfego e distribuí-los;

- Revestimento: é a camada que recebe diretamente a ação do tráfego, devendo ser a mais impermeável possível sendo destinada a resistir às cargas de rolamento sem sofrer elevadas deformações seja ela elástica ou plástica, desgaste dos materiais ou perda de compactação, melhorando dessa forma a superfície de rolamento em relação às condições de conforto e segurança.

A estrutura do pavimento deve ser capaz de suportar as tensões solicitadas durante o tráfego, diluindo-as de forma que o subleito receba um carregamento compatível com sua capacidade de suporte (BERNUCCI *et al.*, 2006). Como cada camada está sujeita a diferentes influências do carregamento, elas devem possuir características distintas com camadas superficiais de maior resistência e conseqüentemente materiais mais nobres. A determinação das características da estrutura e revestimento do pavimento deve ser realizada considerando o tráfego, as condições climáticas e as características do solo, tanto do subleito quanto dos materiais que serão aplicados nas camadas imediatamente superiores (BERNUCCI *et al.*, 2006).

2.2 Características das camadas granulares dos pavimentos

Para a construção de um pavimento devemos ter informações sobre o tráfego, clima local e características do subleito para a escolha de materiais e espessuras das camadas. Para tanto deve-se realizar estudos preliminares de caracterização do solo e dos demais materiais que possam ser empregados sendo considerada sua disponibilidade local.

Entre os materiais aplicados em pavimentação Bernucci *et al.* (2006) apresenta em seu trabalho os mais frequentes de acordo sua classificação:

- Materiais granulares e solos: Brita graduada simples (BGS) e brita ou bica corrida, macadame hidráulico, macadame a seco, solo-agregado, solo natural, solo melhorado com cimento ou cal. Há ainda outros materiais que está com uma crescente aplicação na pavimentação, que são aqueles decorrentes de reutilização e reciclagem.
- Materiais cimentados: brita graduada tratada com cimento, solo-cimento, solo-cal e concreto rolado;

- Misturas asfálticas: solo-asfalto, solo-emulsão, macadame betuminoso e base asfáltica;

Para a especificação das características dos materiais constituintes dos pavimentos, adota-se coeficientes de equivalência determinada por meio de dados obtidos experimentalmente a partir de uma pista da AASHTO (DNIT, 2006).

Os materiais aplicados na pavimentação devem ser ensaiados, quanto à sua granulometria, limites de Atterberg, equivalente de areia, compactação e Índice de Suporte Califórnia (CBR), com prospecção considerada satisfatória quando os mesmos atendem o todo ou em parte as especificações vigentes, ou quando, houver a possibilidade de aplicação de materiais de outras ocorrências com a finalidade de correção das camadas (DNIT, 2006). Os materiais granulares a serem empregados na estrutura do pavimento devem possuir as seguintes características (DNIT, 2006, p.142):

- Materiais para reforço do subleito, os que apresentam C.B.R maior que a do subleito e expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10lb)
- Materiais para sub-base, os que apresentam: CBR $\geq 20\%$, I.G=0 e expansão $\leq 1\%$ (medida de sobrecarga de 10lb)
- Materiais para base, os que apresentam CBR $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb), Limite de liquidez $\leq 25\%$ e Índice de plasticidade $\leq 6\%$.

O Manual do DNIT (2006) especifica que os materiais de bases devem se encaixar em uma faixa granulométrica pré-definida, na qual devem possuir fração que passa na peneira nº 200 inferior a 2/3 daquela passante na peneira nº 40. A fração graúda deve possuir desgaste menor que 50%, sendo aceito valor maior caso se tenha experiência no uso do material, podendo ser usados outros ensaios representativos de sua durabilidade. O mesmo manual separa os tipos de granulometria segundo o volume de tráfego que é determinado de acordo o número "N" denominado como número de repetições do eixo padrão, um parâmetro utilizado para o dimensionamento de pavimentos pelo método do DNER, onde valores de $N > 5 \times 10^6$ representam altos volumes de tráfego e $N < 5 \times 10^6$ baixos volumes de tráfego. A Tabela 1 apresenta as faixas granulométricas permitidas pelo DNIT de acordo o tráfego.

Tabela 1 - Granulometria para base granular

Tipos	Para N > 5x10 ⁶			Para N < 5x10 ⁶			Tolerâncias da faixa de projeto
	A	B	C	D	E	F	
Peneiras	% em peso passando						
2"	100	100	-	-	-	-	±7
1"	-	75-90	100	100	100	100	±7
3/8"	30-65	40-75	50-85	60-100	-	-	±7
Nº 4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
Nº 10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
Nº 40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
Nº 200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

Fonte: DNIT, 2006, p. 143

Podemos observar na Tabela acima que os solos para pavimentos com baixo volume de tráfego possuem uma faixa granulométrica com grãos menores em relação aqueles de alto volume de tráfego que tem melhor distribuição granulométrica possibilitando um melhor preenchimento dos vazios e atribuindo maior capacidade de suporte ao solo. Nos casos em que projeto é executado para um baixo volume de tráfego, o DNIT (2006) permite que sejam utilizados materiais com $CBR \geq 60\%$ e faixas granulométricas "E" e "F".

O método DNER permite a determinação da espessura total de um pavimento a partir de um gráfico em função do número N e de ISC ou CBR, devendo considerar de acordo o Manual do DNIT (2006) os seguintes critérios:

- Espessura máxima de compactação: 20 cm;
- Espessura mínima de compactação: 10 cm;
- Espessura mínima construtiva: 15 cm;
- Espessura do pavimento: deve ser determinada considerando $CBR=20\%$ para a camada de base, mesmo que esse valor seja superior a ele;

2.3 Definições e classificação de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

A resolução nº 307 do CONAMA (2002), define os resíduos de construção civil como resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e escavação de terrenos. A mesma estabelece as diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos para a construção civil e classifica os resíduos em quatro classes como se segue:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, oriundos de atividades como a construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, obras de edificações e processo de fabricação de peças pré-moldadas de concreto.
- Classe B: resíduos recicláveis advindos de outras atividades, tais como: plásticos, papel, papelão, vidros, metais, madeira, embalagens vazias de tintas imobiliárias e gesso (alterado pela resolução do CONAMA nº 469 de 29 de julho de 2015).
- Classe C: resíduos não aplicáveis ou economicamente inviáveis para a reciclagem ou recuperação, como exemplo os produtos oriundos do gesso.
- Classe D: resíduos perigosos oriundos do processo de construção, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, que contenham produtos contaminados ou nocivos à saúde, tais como: tintas, solventes e óleos, telhas e outros materiais que contenham amianto.

Dentre as quatro classificações acima o único resíduo que pode ser aplicado às obras de construção civil e pavimentação são os resíduos de Classe A segundo prescrições da NBR 15116 (ABNT, 2004). Esta norma define os requisitos para o emprego desses agregados para aplicação em preparo de concreto sem função estrutural e obras de pavimentação viária em camadas de reforço do subleito, sub-base e base ou como revestimento primário de vias não pavimentadas.

De acordo Siqueira *et al.* (2006), o gesso por ser um resíduo de Classe C, é um dos maiores problemas enfrentados pela construção civil, por não possuir viabilidade técnica, econômica e ambiental para sua reciclagem, ao entrar em contato com resíduos de outras classes podem contaminar os mesmos impossibilitando sua reciclagem, dessa forma os resíduos advindos do gesso ou contaminados por ele, devem ser destinados aos locais apropriados.

2.4 Geração do RCD

A construção civil tem um papel importante para a economia do país, demandando um elevado consumo de recursos naturais, gerando também elevadas quantidade de resíduos que devem ser gerenciados. Cabral (2006) destaca as principais fontes geradoras dos resíduos da construção civil, dentre elas temos:

- As perdas no processo construtivo, causado por deficiência da tecnologia empregada, baixa qualidade de mão de obra, detalhamento insuficiente dos projetos e uso de produtos defeituosos;
- A falta de qualidade dos materiais e serviços executados, causando o mau funcionamento da edificação e provocando o aparecimento de manifestações patológicas, que ao serem corrigidas geram entulhos;
- O crescimento populacional, que aumenta a demanda de moradias, elevando a geração de resíduos;
- Demolição de edificações comprometidas devido ao término de sua vida útil ou qualquer fator que condene a construção por não satisfazer os critérios técnicos de desempenho;
- Grandes catástrofes mundiais sejam elas de origens naturais ou devido à ação humana.

Considerando o papel da construção civil no desenvolvimento do país é importante que se busquem maneiras de inserir tal atividade ao modelo de desenvolvimento sustentável, para isso é necessário conhecer a quantidade produzida para estudar formas de gerenciamento e aplicações adequadas.

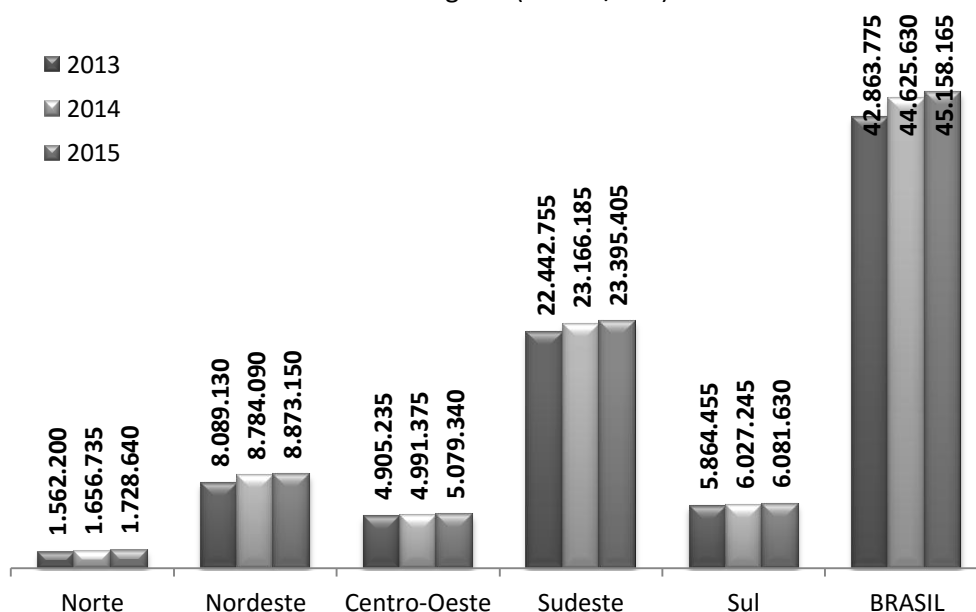
2.4.1 Geração de RCD no Brasil

Em cidades brasileiras de médio e grande porte os resíduos de construção e demolição chegam a representar de 51 a 70% de todos os sólidos gerados (BRASIL, 2006). A Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção Civil e Demolição - ABRECON (2015) afirma que a disposição irregular deste material tem provocado enchentes, perda de infraestrutura de drenagem causado por entupimento das galerias e assoreamento de canais, que implica no aumento da poluição, proliferação de vetores e elevação de custos com a administração pública.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, realiza uma pesquisa anual para levantamento da quantidade de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) gerada pelo país, para tanto a mesma considera apenas a parcela de RCD da coleta que esteja sob responsabilidade dos municípios, que apesar de não representar o total gerado são os únicos dados considerados confiáveis.

Os dados apresentados na Figura 2 mostra que o país coletou pouco mais de 45 milhões de toneladas de RCD no ano de 2015, havendo um crescimento de 1,2% em relação a 2014, aumento considerado baixo se comparado ao crescimento de 2013 a 2014 que foi de 4,1%. A região sudeste apresenta 51,8% de todo o RCD gerado no país, isso se justifica porque nessa região se concentra a maior parcela da população e o maior desenvolvimento econômico do país.

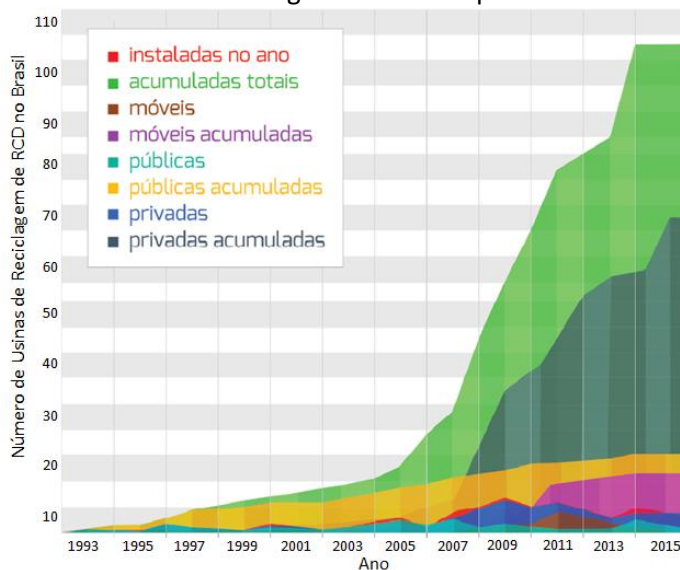
Figura 2- Total de RCD coletado no Brasil e Regiões (tx1000/ano).



Fonte: adaptado de Pesquisa ABRELPE *et al.* (2015).

Uma pesquisa realizada pela ABRECON afirma que até 2002 o crescimento máximo de usinas de beneficiamento de RCD era de três novas usinas por ano, após, essa taxa de crescimento chegou a alcançar nove usinas por ano. Esse aumento se explica porque em 2002 entrou em vigor a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que obriga os municípios a destinarem corretamente os resíduos e ainda que os resíduos de classe A sejam reaproveitados como agregados ou depositados em locais que possibilitam uma futura reciclagem. Com a Figura 03 podemos observar um crescimento na taxa de implantação de usinas entre os anos de 2003 a 2013 e uma estabilidade entre 2013 e 2015.

Figura 3 - Levantamento de usinas de reciclagem de RCD no país entre os anos 1993 a 2015.



Fonte: ABRECON, 2015, p.10

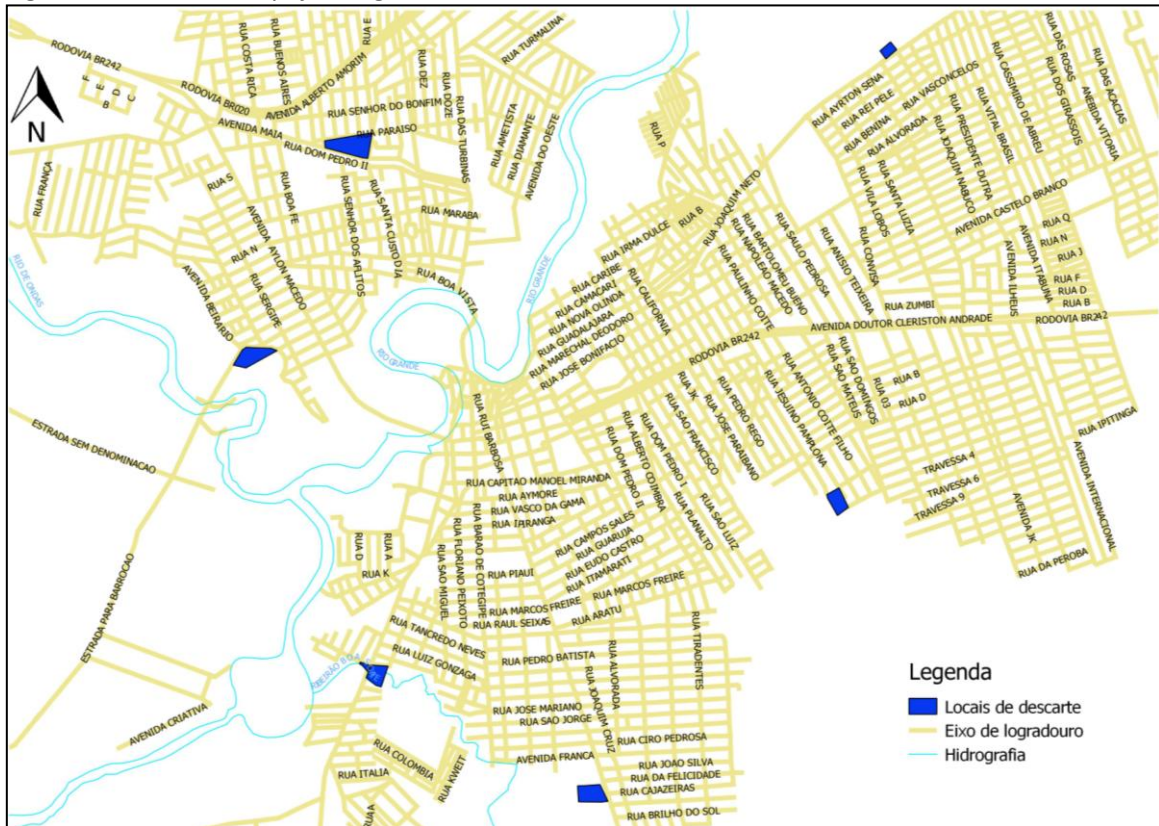
Segundo a ABRELPE (2015), o país possui uma produção média de 0,605 kg/hab/dia de RCD, estimativa baseada no RCD coletado nos municípios do Brasil. Pela estimativa do IBGE em 2015 o país atingiu 204.450.649 habitantes, com isso, estima-se que geramos aproximadamente 45 milhões de toneladas de RCD por ano. No Brasil recicla-se apenas 21% do RCD gerado, sendo assim temos cerca de 36 milhões de toneladas de RCD desperdiçados (ABRECON, 2015).

2.4.2 Geração de RCD na cidade de Barreiras- BA

De acordo o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Barreiras - PMGIRS (2014), o município não possui qualquer plano, programa ou ação pública para a coleta e gerenciamento de RCD, esse serviço é realizado irregularmente com descarte em lixões, terrenos baldios e áreas periféricas da cidade, com coleta realizada por duas empresas privadas que estimam um transporte médio diário de 20 m³, resultando em aproximadamente 1.600 toneladas por ano. Para estimar o volume de RCD gerado, o PMGIRS (2014) realiza uma estimativa com base na quantidade de alvarás de construção e demolição expedidos em 2013 e um estudo realizado por Marques e Schalch (2010) que estima a produção média de RCD em 137,02 Kg/m². Considerando que em 2013 a cidade gerou 838 alvarás e que cada unidade habitacional tem cerca de 80 m², obtém-se uma produção média de 9.185 toneladas por ano (PMGIRS, 2014). Observa-se que apenas 17,4

% do material gerado são coletados e que mesmo sendo realizado coleta o material não está sendo descartado corretamente. A Figura 4 apresenta alguns locais de despejo de RCD na cidade de Barreiras. A identificação dos locais de descarte foi realizada pelo autor.

Figura 4- Locais de despejo irregular de RCD na cidade de Barreiras.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Com a figura acima verificamos que os locais de despejo estão localizados nos extremos da cidade e próximos a cursos d'água, uma prática comum para descarte clandestino do material visto que essas áreas apresentam cotas naturalmente mais baixas.

Como não há gerenciamento dos resíduos gerados na cidade não possuímos dados locais para mensurar o volume gerado. Dessa forma, para estimarmos o volume de RCD gerado realizamos estimativas através de dados populacionais fornecidos pelo IBGE e índices de geração média anual de RCD de acordo proposta da ABRELPE para a região Nordeste. A Tabela 2 apresenta os índices e estimativas calculadas com os dados populacionais e índices de geração de resíduos por habitante.

Tabela 2 – Estimativa do volume de RCD gerado em Barreiras entre os anos 2010 a 2015.

Ano	População ¹	Índices (kg/hab/dia)	Geração de RCD (ton/ano)
2010	137.427	0,464 ²	23.274,64
2012	141.081	0,530 ³	27.292,12
2013	150.896	0,397 ⁴	21.865,58
2014	152.208	0,428 ⁴	23.777,93
2015	153.918	0,430 ⁵	24.157,43

¹ Estimativas populacionais segundo dados do IBGE.

² Geração média de RCD por habitante (ABRELPE, 2010, p. 102)

³ Geração média de RCD por habitante (ABRELPE, 2012, p. 83)

⁴ Geração média de RCD por habitante (ABRELPE, 2014, p. 84)

⁵ Geração média de RCD por habitante (ABRELPE, 2015, p. 64)

As estimativas apresentadas na Tabela 2 mostram poucas variações na geração de RCD nos últimos cinco anos, apresentando índice maior no ano de 2012. Entre os valores estimados observa-se que todos são superiores ao valor proposto pelo PMGIRS (2014) que estima em 9.185 toneladas por ano. Diante disso, considerando ambas as estimativas calcula-se uma diferença de 40% de geração de resíduos, sendo maior o valor estimado pela ABRELPE, isso ocorre, pois o plano da cidade considera apenas os resíduos gerados por construções regularizadas. Diante disso, destaca-se a necessidade da implantação de um sistema de gerenciamento e reaproveitamento desses resíduos de forma a adequar o município as exigências da Resolução CONAMA nº 307 (2002).

2.5 Histórico de aplicação de RCD em pavimentos

Em algumas cidades brasileiras já foram empregados o RCD como agregados reciclados em obras de pavimentação em vias de baixo volume de tráfego. De acordo Leite (2007) a primeira experiência do país foi realizada na cidade de São Paulo. Sendo que antes mesmo de serem realizadas pesquisas na área, a população já utilizava os resíduos de construção como revestimento em algumas vias não pavimentadas da cidade de São Paulo para evitar a ocorrência de lama nos períodos chuvosos e poeira na estiagem, verificou-se que essas vias passaram a necessitar de menos intervenções e com o passar do tempo estabilização do subleito (BODI, 1995 *apud* MOTTA, 2005).

Segundo Leite (2007) a primeira via executada com resíduo da construção civil foi realizada em São Paulo no ano de 1984. A construção da mesma teve acompanhamento executivo e desempenho pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

(IPT) obtendo desempenho considerado satisfatório. Os resíduos foram aplicados nas camadas de reforço do subleito e sub-base com 10 cm de espessura em cada camada.

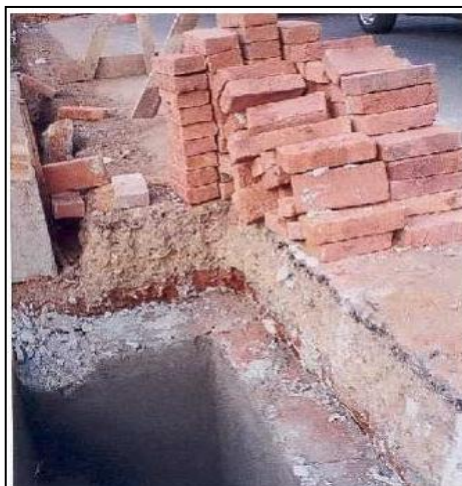
No ano de 2003 a Prefeitura Municipal de São Paulo - PMSP publicou a PMSP/SP ETS – 001/2003 uma especificação técnica de serviço que define os critérios para a execução de camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista de pavimentos com agregados reciclados da Construção Civil. De acordo Grubba (2009) as contratações de obras e serviços das vias públicas passaram a dar preferência ao uso de agregados reciclados e obrigação de projetos prevendo o uso dos materiais reciclados nos casos de viabilidade técnica a partir de julho de 2007. Segundo PMSP (2003) os custos das camadas executadas com materiais recicláveis são menores, apresentando um custo unitário de 16% abaixo para a base e 14% para a sub-base com solo melhorado.

Outro exemplo de reuso do material no estado de São Paulo se apresenta no município de Ribeirão Preto que produz cerca de 970 t/dia de entulho, com usina com capaz de reciclar aproximadamente 200 t/dia do material, os agregados produzidos são destinados em grande parte para a recuperação de vias públicas sem pavimentação asfáltica (LATERZA, 1998 *apud* CARNEIRO et al., 2001).

Desde 1993 a Prefeitura Municipal de Belo Horizonte (PMBH) desenvolve um programa de reciclagem que envolve a implantação de usinas, fiscalização e educação ambiental, visando a produção de 5.500 m³ por mês de agregados reciclados. Esse material tem sido empregado principalmente, na execução de sub-bases e tratamentos primários de vias públicas (CARNEIRO *et al.*, 2001). A PMBH vem utilizando os resíduos desde 1996 sendo empregadas até 2001, quase 137.000 toneladas de RCD na reconstrução e implantação de 271 vias (GRUBBA, 2009).

O trabalho de PINTO (1999) apresenta um fato interessante sobre o emprego desse material em Belo Horizonte, na qual os técnicos se impressionam com a coesão apresentada pelas bases, que foi reaberta alguns meses após sua execução (Figura 5). Com a reabertura pode-se confirmar que em oposição às bases com agregados naturais, aquelas executadas com RCD reciclado mostravam-se consolidadas, demonstrando ocorrência de componentes reativos no RCD que agiram com a exposição à umidade na execução e umidade natural dos solos locais (PINTO, 1999).

Figura 5 - Corte de pavimento com base executada com RCD reciclado em Belo Horizonte



Fonte: PINTO, 1999, p.156

Em Goiânia foi realizado um trecho experimental com 50 metros no ano de 2003, na qual foi empregada uma mistura de solo argiloso com agregado reciclado nas camadas de base e sub-base, com 75% e 83% de agregado reciclado, respectivamente. Podemos observar mais características das camadas na Tabela 3. O estudo realizado constatou a viabilidade do emprego desses agregados na pavimentação (MENDES, *et al.*, 2004 apud LEITE, 2007).

Tabela 3 - Características do trecho experimental em Goiânia-GO.

Camada	Energia de compactação	Espessura (cm)	Composição
Revestimento	-	5	CBUQ
Base	Intermediária	15	25% de brita 19 mm, 25% de brita 9,5 mm, 25% de areia e 25% de argila
Sub-base	Intermediária	15	33% de brita 19 mm, 33% de brita 9,5 mm, 17% de areia e 17% de argila

Fonte: Mendes et al., 2004 *apud* BEJA, 2014

Carneiro *et al.*, (2001), realizaram estudos da viabilidade do uso de agregados reciclados de Salvador/BA em pavimentação, para tanto foram feitas a caracterização do material com os seguintes ensaios: (i) granulometria; (ii) limites de Atteberg; (iii) compactação; (iv) ISC; (v) Índice de forma; (vi) massa específica; (vii) massa unitária;(viii) inchamento; (ix) absorção de água; (x) teores de cloreto; nitrato e sulfatos (xi) e (xii) abrasão Los Angeles. Os estudos foram feitos com as frações graúdas, miúdas e algumas misturas do agregado com o solo, apresentando resultados satisfatórios para a aplicação desses agregados às camadas de base e sub-base.

2.6 Características de RCD para camadas em pavimentos

Para aplicação de RCD em camadas de pavimentos é necessário que o mesmo apresente características que sejam adequadas, devendo-se considerar parâmetros para caracterização do material e demais propriedades geotécnicas.

As normas que determinam as características dos resíduos de construção e demolição para o emprego em pavimentação se limitam à sua aplicação em vias de baixo volume de tráfego, com o controle de propriedades através dos parâmetros de curvatura da distribuição granulométrica, forma dos grãos, percentual de contaminantes, capacidade de suporte por meio de CBR e outros requisitos (BEJA, 2014). A Tabela 4, apresenta um resumo das principais exigências para o uso do agregado reciclado segundo as normas ETS-001¹ e NBR 15115.

Tabela 4 - Aplicação do RCD para pavimentação requisitos mínimos no Brasil ETS-001 (PMSP, 2003) e NBR 15115.

Propriedade/Especificação	ETS-001			NBR 15115		
Dimensão máx. característica (máx /3 da camada)	50 mm			63,5mm		
Coeficiente de Curvatura	1 a 3			-		
Coeficiente de uniformidade	≥10			≥10		
Passante na peneira 0,42 mm	entre 10 e 30%			entre 10 e 40%		
Grãos lamelares na fração graúda (≥ 4,8 mm)	≤30%			≤30%		
Materiais indesejáveis	≤2 a 3%			≤2 a 3%		
Estabilização com aglomerante	Resistência à compressão simples após 7 dias ≥2,1 Mpa (energia especificada)					
Camada	CBR (%)	Expansão	Energia	CBR (%)	Expansão	Energia
Ref. do subleito	≥ 12	≤1	Normal	≥ 12	≤1	Normal
Sub-base	≥ 20	≤2	Intermed.	≥ 20	≤2	Intermed.
Aplicação à base quanto número de tráfego	Para N < 5x10⁶			Para N < 5x10⁶		
Base	≥ 60	≤0,5	Intermed.	≥ 60	≤0,5	Intermed.

Fonte: BEJA, 2014, p. 34

As normas vigentes não apresentam uma faixa granulométrica para os agregados reciclados, apenas uma limitação em diâmetros mínimos e máximos e uma relação de

¹ É uma especificação de serviço que define os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base ou base mista de pavimentos com agregado reciclado de resíduo da construção civil, em obras de pavimentação sob fiscalização da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP/SP ETS-001/2003).

suas porcentagens, diferente do manual de pavimentação do DNIT (2006) que determina também seis faixas granulométricas para a aplicação de material convencional nas camadas de base granular.

Nenhuma das normas determina qual a geometria mais adequada de agregados para aplicação em base ou sub-base, no entanto, vários pesquisadores têm identificado diferentes elementos da geometria de uma partícula, que pode ser expresso em três propriedades: forma, textura superficial e angularidade. A forma refere-se às mudanças de proporções, a angularidade às variações de arestas e a textura descreve a irregularidade da superfície (GOMEZ, 2016). Para Bernucci *et al.* (2006) a forma das partículas dos agregados influencia em sua trabalhabilidade e na resistência ao cisalhamento dos materiais granulares constituintes das camadas de base, sub-base e das misturas asfálticas. O formato desses grãos determina a energia de compactação, sendo que partículas irregulares ou angulares apresentam melhor intertravamento entre os grãos compactados.

2.7 Estudos laboratoriais sobre a viabilidade do uso de RCD

Nos últimos anos foram realizadas diversas pesquisas relacionadas à aplicação de RCD em pavimentos, tanto nas camadas estruturais como em revestimentos asfálticos, em muitos desses trabalhos foram comprovados a viabilidade do uso dos agregados reciclados para aplicação na estrutura do pavimento através de parâmetros de caracterização física, química e mecânica.

Carneiro *et al.* (2001) analisou agregados reciclados provenientes de entulhos da cidade de Salvador-BA para a aplicação em obras de pavimentação, tendo como base a caracterização do material a partir de ensaios normatizados objetivando analisar o seu desempenho em camadas de base e sub-base. Na pesquisa foram empregados dois tipos de faixas granulométricas para o entulho reciclado, nas frações graúda e miúda, além disso, foram utilizados dois solos típicos da região de Salvador, um com comportamento laterítico e outro com comportamento saprolítico.

Para avaliar o comportamento dos agregados reciclados em diferentes situações com relação a sua aplicação nas camadas estruturais do pavimento, Carneiro *et al.* (2001), realiza misturas com diferentes proporções dos materiais adotados, analisando as

diferentes características obtidas e se as mesmas foram significativas. As misturas com solos apresentou uma redução de expansão e aumento de resistência proporcional à adição de agregado reciclado, os solos lateríticos houve uma estabilização de expansão insignificante e queda de resistência para a mistura com 30% de agregado reciclado (Tabela 5)

Tabela 5 - Resultados das misturas adotadas para energia de compactação intermediária.

Materiais	Umidade ótima (%)	CBR (%)	Expansão (%)	Índice de Degradação (%)
100% Solo Laterítico	9,3	115	0,14	-
100% Solo Sapolítico	22,0	25	5,7	-
100% Ag. Rec. Miúdo	16,0	70	0	
100% Ag. Rec. Graúdo	-	-	0	15,9
70% Solo Laterítico 30% Ag. Rec. Miúdo	19,3	86	0	-
50% Solo Laterítico 50% Ag. Rec. Miúdo	18,5	115	0	1
30% Solo Laterítico 70% Ag. Rec. Miúdo	16,5	90	0	0,4
70% Solo Sapolítico 30% Ag. Rec. Miúdo	17,6	12	2,6	1,1
50% Solo Sapolítico 50% Ag. Rec. Miúdo	17,0	35	2,2	1,3
30% Solo Sapolítico 70% Ag. Rec. Miúdo	17,4	66	0,4	-
30% Solo Laterítico 70% Ag. Rec. Graúdo	14,2	112	0	9,9
30% Solo Sapolítico 70% Ag. Rec. Graúdo	25,8	51	0,65	11
30% Ag. Rec. Miúdo 70% Ag. Rec. Graúdo	16,2	100	0	8,8

Fonte: adaptado Carneiro et al. ,2001.

Os resultados obtidos por Carneiro *et al.* (2001) apresentados na tabela acima, comprovaram que os agregados reciclados nas frações graúdas e miúdas são adequadas para aplicação em pavimentos. Quanto às misturas realizadas concluiu-se que aquelas contendo solo laterítico não apresentaram ganhos com a adição do material reciclado, já no solo sapolítico que tem baixa capacidade de suporte a mistura com o agregado mostrou um ganho significativo de resistência, apresentando-se como um material estabilizador para solos plásticos.

Oliveira (2017) analisou as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos resíduos reciclados para utilização nas camadas de base e sub-base de pavimentos, com caracterização por ensaios laboratoriais com o agregado *in natura* e com diferentes proporções de aditivos. O material utilizado foi obtido na Usina de Reciclagem Ilha Grande na cidade de São Luís do Maranhão e é composto em maiores proporções de materiais cimentados, correspondendo mais de 36% do total. Constatou-se ainda uma presença significativa de areia, que pode facilitar o travamento dos grãos graúdos, quanto a presença de materiais indesejáveis os valores apresentaram proporção inferior a 1%.

Para a caracterização física foram realizados ensaios de compactação, CBR e compressão simples para as diferentes misturas, os resultados obtidos mostraram que os resíduos *in natura* podem ser aplicados com a energia intermediária nas camadas de sub-base e quando crescidos de 3% a 6% com cal ou cimento Portland, com o ensaio de compressão simples observou-se que as adições proporcionaram um ganho elevado de resistência, sendo que com 6% de cimento Portland houve um aumento de resistência cerca 5% superior aos demais materiais estudados (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores de CBR e compressão simples para adição de 3% e 6% de cal e cimento Portland ao agregado reciclado.

Misturas	CBR (%)	Resistência à compressão simples (Mpa)
100% RCD	44	0,65
Adição de 3% de cal	167	2,15
Adição de 6% de cal	177	2,25
Adição de 3% de cimento Portland	183	2,3
Adição de 6% de cimento Portland	286	3,2

Fonte: Adaptada Oliveira, 2017.

O trabalho de Gómez (2011) avaliou o comportamento de resíduos advindos do estádio Mané Garrincha em Brasília-DF a fim de caracterizar os agregados e verificar suas propriedades para utilização na camada de bases rodoviárias. O material utilizado na pesquisa é constituído principalmente de materiais cimentícios (41,44%), contrapisos (41,99%) e em menores proporções os materiais pétreos (14,45%), apresentando uma pequena parcela de contaminantes (0,002%). No mesmo trabalho foram desenvolvidos diversos ensaios para a determinação das propriedades dos agregados em relação as suas características, físicas, químicas e mecânicas, dentre os ensaios realizados é importante destacar: ensaios de compactação, CBR, módulo de resiliência, resistência à compressão

simples e determinação da atividade pozolânica.

A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos para caracterização do RCD aplicados nos trabalhos de Carneiro *et al.* (2001), Gómez (2011), e Oliveira (2017). Os valores obtidos nas três pesquisas se mostram satisfatórios para os fins estabelecidos se comparados com os limites impostos pelas normas vigentes, portanto estão adequados para a aplicação nas camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários de baixo tráfego.

Tabela 7 - Caracterização física do RCD

Propriedades físicas	Carneiro <i>et al.</i> (2001)	Gómez (2011)	Oliveira (2017)
Coefficiente de Uniformidade (C_u)	86,92	61	150
% que passa na peneira nº 40	35%	15%	30,74%
Teor passante na malha 0,075mm	3%	3% graúdo 12% miúdo	-
Absorção	10,4% graúdo 8,2% miúdo	7,70%	7,64%
Expansão	0%	0%	0
Materiais indesejáveis	-	0,56%	0,70%
Limite de Liquidez (LL)	NP	32%	NP
Limite de plasticidade (LP)	NP	NP	NP
Equivalente de areia (EA)	-	> 70%	72,81
Índice de forma	2,6	0,9	
Densidade das partículas sólidas	-	2,72	2,11
Durabilidade em sulfato de Mg	-	6,4% graúdo 11,2% miúdo	-
Abrasão Los Angeles	45% graúdo	35% graúdo 38% miúdo	49,53%

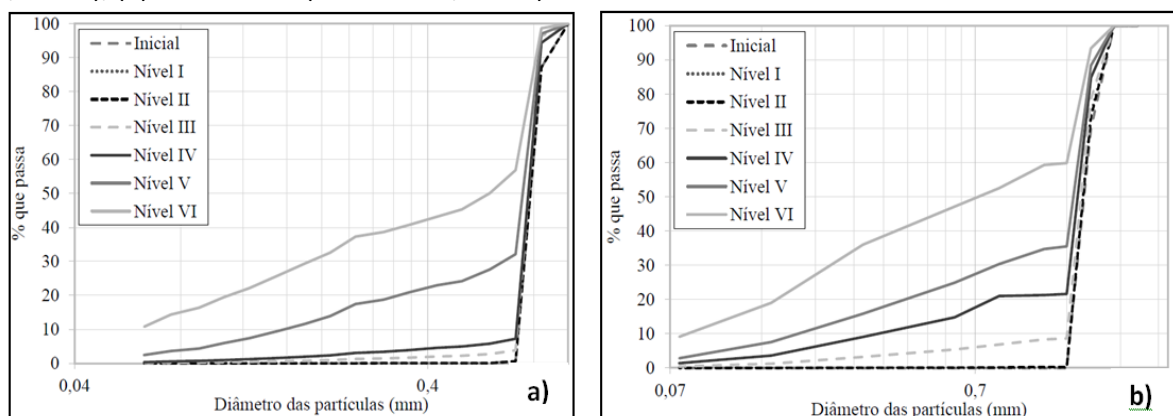
Fonte: Adaptada Carneiro et al. (2001); Gómez (2011); Oliveira (2017)

2.8 Avaliação de quebra de materiais granulares e RCD

A quebra dos grãos acontece em diversas aplicações da engenharia geotécnica, tais como, cravação de estacas, ferrovias, barragens, obras rodoviárias entre outras. Este fenômeno está normalmente associado a elevados níveis de tensão e gera impacto significativo no comportamento mecânico dos materiais, pois a fragmentação do material provoca efeitos em sua resistência, permeabilidade e modificações na distribuição granulométrica causando um acréscimo na compressibilidade (ZULUAGA, 2016).

Para o estudo da influência de determinadas propriedades em nível de partícula no comportamento dos materiais granulares Zuluaga (2016) realizou uma pesquisa com esferas de vidro secas sendo executados ensaios com compressão confinada com análise de quebra por meio de ensaios de granulometria e monitoramento por meio de emissão acústica. Foram realizadas também simulações numéricas com a finalidade de verificar a capacidade do Método dos Elementos Discretos para reproduzir os fenômenos de quebra dos grãos. Em uma primeira etapa o autor avalia a quebra dos grãos isoladamente, posteriormente são feitas análises com o material solto e com cimentação. Para a compressão o autor utilizou uma prensa e molde cilíndrico 5x10cm coberto de papel filme e vaselina visando reduzir o atrito entre os grãos e as laterais do molde. Na mesma pesquisa para a avaliação da quebra dos grãos foram realizadas curvas de compressibilidade parando em quatro níveis de cargas entre aos valores extremos da curva com posterior análise granulométrica em cada um dos níveis. Fez-se ainda a análise granulométrica para uma curva de compressibilidade com critério de parada de 20% de deformação vertical e outra carregada até uma carga de 450KN. Dessa forma, avaliou-se a evolução da quebra em seis níveis de referência. Na Figura 6 apresentamos as curvas granulométricas obtidas por Zuluaga (2016) na qual é possível observar que os efeitos de quebra ocorrem com maior intensidade para as amostras com grãos de maiores dimensões (esfera A170) para todos os níveis de tensão avaliados, enquanto as amostras com esfera de menor dimensão (esfera A072) só sofrem mudanças nos níveis mais elevados de tensão.

Figura 6 - Curvas granulométricas em diferentes níveis de tensão: (a) Esfera A072 (diâmetro, 0,92mm); (b) Esfera A170 (diâmetro: 1,98mm).



Fonte: Zuluaga, 2016, p. 114

Os efeitos de quebra estão associados às cargas aplicadas, dessa forma, os pavimentos quando solicitados estão sujeitos a esse fenômeno. Neste intuito, há algumas pesquisas realizadas que demonstram que a quebra ocorre desde as atividades de compactação do solo (GÓMEZ, 2011).

A pesquisa realizada por Zeghal (2009) mostra que a quebra dos grãos ocorre desde o processo de compactação da camada de base mesmo com o uso de materiais convencionais de boa qualidade. Para isso, ele realiza a caracterização antes e depois da compactação comparando diversos parâmetros, entre eles as curvas granulométricas obtidas antes e após a compactação em campo. Sua pesquisa indicou que a quebra dos grãos reduz pela metade o módulo resiliente² do agregado aumentando em três vezes suas deformações, além disso, observou redução dos grãos maiores e aumento dos grãos menores.

Considerando que os materiais granulares convencionais aplicados em obras de pavimentação sofrem fragmentação é pertinente verificar tal característica para os agregados reciclados. Há algumas pesquisas que realizam a avaliação da quebra do RCD aplicados em pavimentação, nestes estudos geralmente é realizada a análise com base nas curvas granulométricas obtidos antes e após o ensaio de compactação e índices de quebra.

Segundo Zuluaga (2016) vários índices de quebra têm sido propostos desde os anos de 1960, os quais são geralmente associados às curvas granulométricas obtidas antes e após o ensaio. Esses índices quantificam a quebra do material sendo maior quanto maior a fragmentação.

Gómez (2011) empregou dois métodos para avaliação da quebra dos grãos de RCDs, os quais se avaliou a quebra em diferentes energias de compactação. Um dos métodos empregados em sua pesquisa é denominado índice de degradação (ID_p) que possui metodologia descrita pela norma DNER-ME 398/99. Esta norma fixa o método para quantificação da degradação após compactação com 26 golpes com emprego de uma curva granulométrica padrão, e comparação através da subtração das porcentagens antes e após o ensaio (D).

² Módulo resiliente: o módulo de resiliência (MR) mensura a capacidade do solo em conservar as deformações após o término da ação da carga. O ensaio para sua determinação é regulamentado pela DNER-ME 133 (DNER, 1994) (Bernucci *et al.*, 2006)

$$ID_p = \frac{\sum D}{6} \quad (1)$$

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos por Gómez (2011) segundo ID_p , na qual pode se observar que as variações dos índices são dependentes da umidade e de energia aplicada. Em sua pesquisa Gómez (2011) compara os índices de quebra após ensaios de compactação e CBR e apenas compactação, observando que os mesmos sofrem poucas variações.

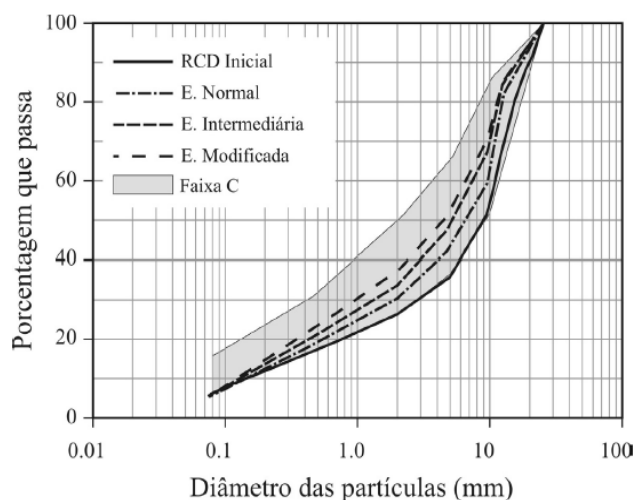
Tabela 8 - Índice de quebra com variação do teor de umidade.

Proctor Normal							
Umidade (%)	7	9	10	13	15	17	23
Índice de quebra (%)	5,6	5,3	5,0	5,3	4,4	4,4	3,4
Proctor Intermediária							
Umidade (%)	6	8	10	12	14	19	21
Índice de quebra (%)	9,2	8,1	7,9	7,8	6,7	6,8	4,2
Proctor Modificada							
Umidade (%)	7	9	11	13	15	25	
Índice de quebra (%)	13,5	12,2	10,8	10,5	10,1	6,10	

Fonte: Adaptado Gómez, 2011.

Observa-se que os efeitos de quebra ocorrem com maiores intensidades nos ramos secos e quando se é aplicado maiores energias de compactação. A Figura 7 apresenta curvas granulométricas obtidas por Gómez (2011) os quais podemos identificar maiores quebras para maiores energias, tal como foi observado nos índices apresentados na tabela acima.

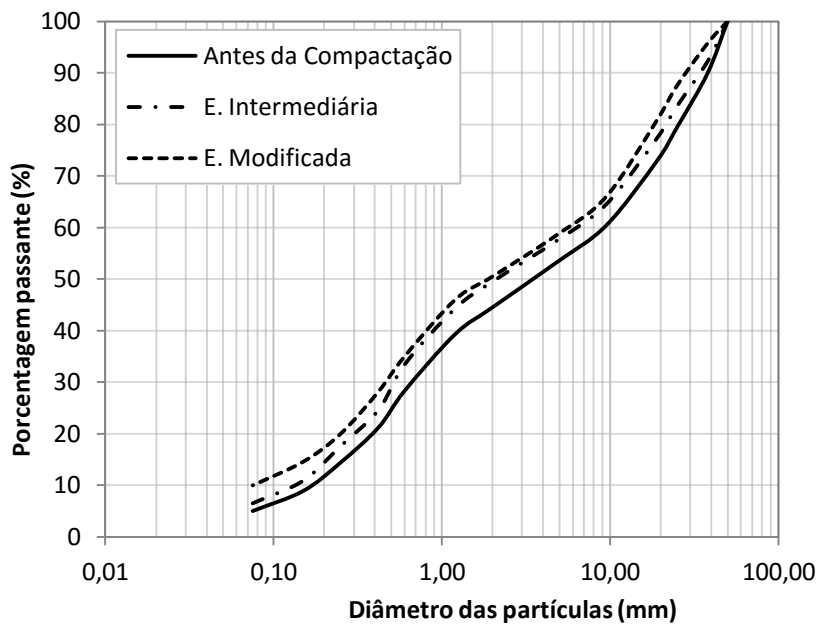
Figura 7- Variação da curva granulométrica após ensaio CBR com imersão para diferentes energias de compactação



Fonte: Gomez, 2011, p. 103.

Leite (2007) também analisa a influência da energia de compactação sobre a quebra dos grãos de agregados reciclados, no entanto é feito apenas a avaliação granulométrica. A partir da análise de seus resultados ele verifica que a quebra ocorre em maior intensidade nos corpos de prova que foram submetidos à compactação com energia modificada. A Figura 8 apresenta os resultados encontrados por Leite (2007) após os ensaios de compactação, na qual observamos que houve alterações na quantidade passante em todas as peneiras, com material fino, passante na peneira 0,075 apresentado valor dobrado após compactação modificada.

Figura 8 - Variação de curva granulométrica após ensaio CBR verificados para o Agregado de Santo André em São Paulo.



Fonte: Adaptado Leite, 2007.

Em seu estudo Leite (2007) considera que os efeitos de quebra dos grãos podem provocar patologias nos pavimentos, sendo assim ele admite a importância de utilização de energias mais elevadas quando se aplica agregados reciclados, pois a quebra em maior intensidade durante a compactação pode minimizar problemas de degradação futuras.

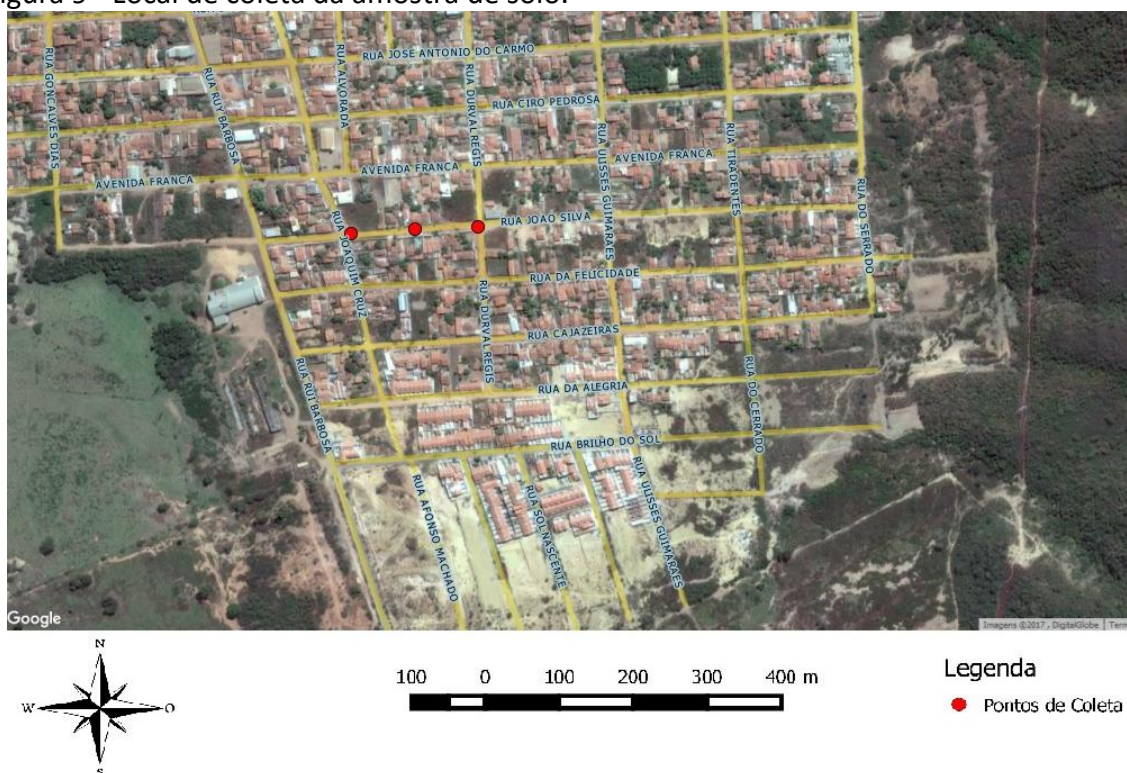
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Seleção e coleta das amostras

3.1.1 Amostra de Solo

O solo utilizado nesse estudo foi coletado na Rua João Silva, Bairro Morada da Lua em Barreiras- BA, a qual estava passando por obras de pavimentação na fase de movimentação de terra. Foram coletados cerca de 200 quilos de solo superficial em três pontos ao longo da via (Figura 9).

Figura 9 - Local de coleta da amostra de solo.



Fonte: Base de dados do IBGE, autora.

No reconhecimento preliminar observou-se que o solo apresentava algumas variações granulométricas no percurso, sendo escolhidos três pontos de coleta para garantir uma boa representação da amostra, além disso, notou-se que a mesma apresentava materiais indesejáveis tais como restos orgânicos (pedaços de madeira e galhos de árvores) e lixo, sendo realizada uma triagem posterior à coleta.

Para a garantia da uniformidade da amostra foi realizada uma homogeneização de todo o material coletado, considerando o aspecto visual de sua granulometria (Figura 10). Posteriormente deixou-se o material secar ao ar até atingir a umidade higroscópica. O solo obtido nesse processo foi armazenado em sacos com cerca de 50 Kg de material.

Figura 10 - Solo após homogeneização.



Fonte: A autora.

3.1.2 Amostra de RCD

Os resíduos de construção e demolição (RCD's) utilizados nessa pesquisa foram coletados de um canteiro de obras referente à reforma da Casa do Marceneiro, casa de materiais de construção localizada à Rua das Turbinas, Bairro São Pedro na cidade de Barreiras- BA (Figura 11).

Figura 11 - Local de Coleta da amostra de RCD.



Fonte: Google Earth, 2017.

Durante o reconhecimento preliminar observou-se que o resíduo era constituído principalmente de argamassa, concreto e blocos cerâmicos. O entulho apresentava alguns resíduos com tamanhos superiores a 30 cm e materiais contaminantes como gesso, tinta e pedaços de madeira, sendo realizada uma triagem para a retirada do material contaminante. Alguns pedaços de argamassa e bloco continham materiais indesejáveis incrustados, sendo descartados a fim de obtermos uma amostra mais adequada.

Figura 12 - Coleta de RCD.



Fonte: A autora.

Para a determinação da concentração e do tipo de material constituinte, a amostra passou por uma seleção tátil-visual, separando os materiais de acordo sua natureza, com seleção apenas da fração graúda, devido à facilidade de distinção para uma classificação. Como na preparação da amostra se retirou todo material contaminante, desconsideramos sua concentração para o estudo. Do material coletado, foi separado um volume de 80 Kg de RCD contendo apenas três tipos de materiais, a quantidade de cada um foi convertida em porcentagem na qual a argamassa apresentou valor predominante de 51%, seguida de 35% de cerâmica vermelha e 14% de concreto.

3.1.2.1 Redução do RCD

O material encontrado em campo continha grãos maiores que aqueles permitidos pela norma para aplicação em pavimentos, sendo assim, fez-se necessário a redução desses grãos. Inicialmente foi realizada uma pré-quebra por meio de apiloamento manual para a redução de grãos maiores que 15 cm, em seguida a amostra foi levada à máquina

de Abrasão Los Angeles de marca AMC com 12 esferas de 46,47 mm de diâmetro e revolução de 33rpm. Foram colocadas para o material de cerâmica vermelha e cimento uma carga de 7 kg e aplicados 250 revoluções. A redução obtida dessa maneira gerou uma granulometria com excesso de finos e pouca quebra dos grãos, principalmente para o material cimentício. Dessa forma o material obtido por este método foi descartado da pesquisa.

Figura 13 - Processo para redução dos grãos com máquina de Abrasão Los Angeles



Fonte: A autora.

Em uma segunda etapa optou-se por realizar a quebra manual dos grãos por meio de apiloamento, na qual foram obtidos grãos mais angulosos e granulometria mais graúda. Para a determinação da curva granulométrica da pesquisa obedecemos aos limites descritos pela NBR 15115 (ABNT, 2004), no qual é permitido o uso do material que passe 10% a 40% na peneira 0,42mm (nº 10) e não exceda 5% de grãos maiores que 63,5mm.

3.1.3 Misturas selecionadas

Para a pesquisa optou-se por utilizar três amostras: solo, RCD e mistura solo - RCD contendo 50% de cada um dos materiais, a fim de obter uma comparação dos respectivos comportamentos. Para a mistura solo - RCD (1:1) foi realizada a pesagem de frações iguais de solo e RCD e em seguida feita a homogeneização, os demais materiais foram preparados como apresentados nos itens 3.1.1 e 3.1.2.

3.2 Metodologia

O método de análise empregado nesse estudo se baseia na metodologia tradicional de caracterização física e mecânica para materiais aplicados como base ou sub-base de pavimentos. Neste capítulo são apresentados os ensaios empregados para a caracterização geotécnica do solo e do agregado reciclado, bem como comportamento da mistura.

Em uma segunda fase da pesquisa avaliamos a quebra dos materiais após ensaios de compactação e CBR e após ensaios de compressão unidimensional, sendo avaliado também a evolução de quebra com o último ensaio.

3.2.1 Ensaios de caracterização

As amostras ensaiadas foram preparadas segundo as recomendações da NBR 6457 (ABNT, 1986) que prescreve o método de preparação de amostras de solos para os ensaios de caracterização e compactação. Todos os ensaios foram realizados considerando a preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica e quarteamento realizado por meio de separador de amostras de 2".

3.2.1.1 Massa Específica dos Grãos

A massa específica dos grãos foi determinada aplicando o método descrito pela NBR 6508 (ABNT, 1984). Para a realização do ensaio separou-se a 500 g de material passante na peneira de 4,8 mm e tomaram-se três frações com aproximadamente 60 g cada. A Figura 14 apresenta algumas etapas referentes ao ensaio.

Figura 14 - Ensaio de massa específica dos grãos: a) etapa de saturação 12h; b) dispersão; c) Remoção de ar com bomba a vácuo; d) Aquecimento em chapa; e) Pesagem.



Fonte: A autora.

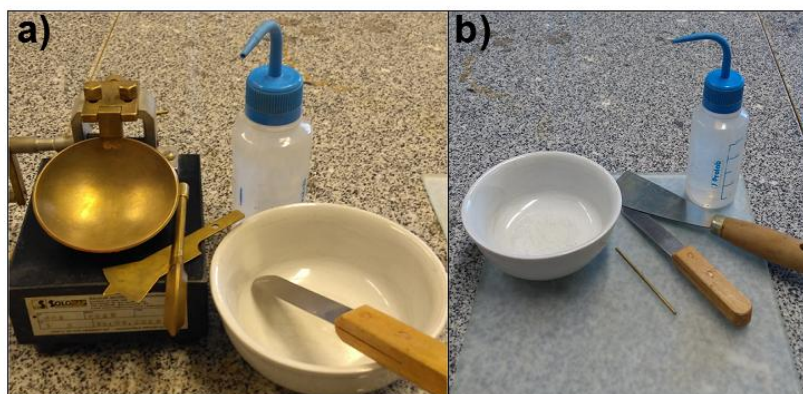
O balão volumétrico com o material foi pesado após a amostra atingir a temperatura ambiente, em seguida faz-se a pesagem com o picnômetro preenchido com água destilada até a marca de referência.

A NBR 6508 (ABNT, 1984), considera os resultados satisfatórios quando os valores não diferem de mais de $0,02 \text{ g/cm}^3$, com resultado final calculado da média de pelo menos duas amostras consideradas satisfatórias.

3.2.1.2 Limites de Atterberg

Foram realizados os ensaios de Limites de Liquidez e Plasticidade segundo as prescrições das normas NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente, para as amostras de solo, RCD e solo - RCD (1:1), com o intuito de avaliar a plasticidade dos materiais e uma possível redução de plasticidade do solo quando adicionado o RCD. A Figura 15 apresenta os materiais empregados.

Figura 15 - Materiais utilizados para os ensaios de limites de Atterberg: a) Limite de Liquidez; b) Limite de Plasticidade;



Fonte: A autora.

3.2.1.3 Granulometria

Para determinarmos a dimensão dos grãos e fração contida aplica-se a análise granulométrica, que é realizado em duas fases: peneiramento e sedimentação. Como o em estudos de pavimentação é corrente a não realização de ensaios de sedimentação, a determinação da curva granulométrica foi realizada apenas por peneiramento.

O ensaio foi realizado segundo recomendações da NBR 7181 (ABNT, 1964). Para a execução do ensaio tomou-se 8 kg tanto da amostra de solo quanto do RCD e mistura solo - RCD (1:1), por observar visualmente que os mesmos continham grãos maiores que 25 mm. O peneiramento foi realizado manualmente, empregando as peneiras apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Peneiras empregadas no ensaio de granulometria

Peneiramento grosso		Peneiramento fino	
Número	Abertura da malha (mm)	Número	Abertura da malha (mm)
2"	50,000	#20	1,180
1 1/2"	37,500	#40	0,600
1"	25,000	#60	0,425
3/4"	19,100	#100	0,250
3/8"	9,500	#140	0,150
#4	4,750	#200	0,075
#10	2,000		

Fonte: A autora.

Figura 16 – Amostras de solo retido nas peneiras: a) peneiramento grosso; b) peneiramento fino.



Fonte: A autora.

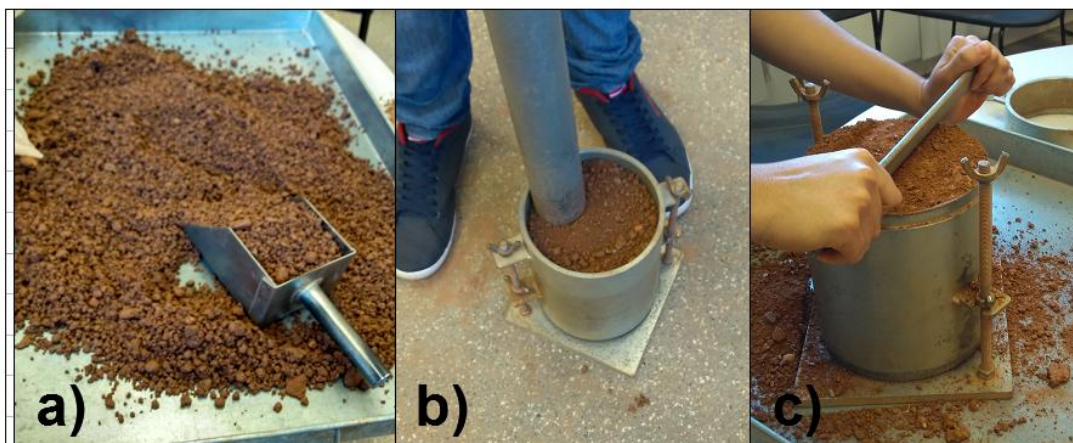
3.2.2 Ensaios de Compactação, Expansão e CBR

Os ensaios de compactação foram realizados de acordo as orientações da norma NBR 7182 (ABNT, 1986) que prescreve o método para a determinação da relação entre a massa específica seca e a umidade de solos quando compactados. Como a pesquisa está voltada ao uso de RCD em pavimentos optou-se por realizar a compactação aplicando-se apenas a energia intermediária, visto que não é permitido o uso do mesmo em vias com elevado volume de tráfego.

As amostras de solo e mistura de solo - RCD (1:1) possuíam grãos retidos na peneira de malha 19 mm, com quantidade menor que 10% sendo desprezado o material retido na mesma. No entanto para o RCD observou-se que os grãos na ordem de 19 mm ficavam entre 10% e 30%, sendo realizada a substituição do material por igual quantidade de material retido na peneira 4,8mm e passante na peneira de 19 mm como determinado pela NBR 6457 (ABNT, 1986).

Devido às dimensões dos grãos o ensaio foi realizado com molde cilíndrico com cerca de 150 mm de diâmetro e 180 mm de altura, anel espaçador com 60 mm e soquete grande com 4,5 kg, gerando um corpo de prova na ordem de 120 mm de altura. Para a execução do ensaio foram moldados cinco corpos de provas com cinco camadas, executadas com 26 golpes cada e possuindo diferentes umidades, determinadas empiricamente de forma a estimar as umidades próximas ao ramo seco, ramo úmido e ponto ótimo da curva de compactação. A determinação da umidade de compactação foi realizada utilizando o material rasado do corpo de prova, sendo realizados três repetições. A Figura 17 apresenta algumas etapas realizadas no ensaio.

Figura 17 - Etapas do ensaio de compactação. a) Solo úmido; b) Compactação; c) Rasamento.



Fonte: A autora.

Os corpos de prova obtidos na compactação foram submetidos ao ensaio CBR seguindo metodologia descrita pela NBR 9895 (ABNT, 1987). A amostra foi imersa por 96 horas, com realização de leituras a cada 24 horas para a determinação da expansão. Posterior à imersão os corpos de prova foram levados á penetração para a determinação do CBR. Para a penetração foi utilizado uma prensa CBR Marshal automática de marca

SOLOTEST, com capacidade de 5000 Kgf e pistão com 50 mm de diâmetro. A velocidade de penetração do pistão foi de 1,27 mm/min. A Figura 18 apresenta a prensa utilizada.

Figura 18 - Prensa CBR Marshal automática.



Fonte: A autora.

3.2.3 Análise de quebra dos grãos

3.2.3.1 Após compactação e CBR

Os corpos de prova obtidos após os ensaios de compactação e CBR foram submetidos a ensaios de granulometria a fim de identificar características que pudessem confirmar a ruptura dos grãos após o ensaio. Os ensaios foram realizados para as amostras de solo, mistura RCD – Solo (1:1) e RCD a fim de analisar a quebra em relação à variação da umidade de compactação.

As curvas granulométricas obtidas foram comparadas com a curva granulométrica característica da amostra, sendo avaliada apenas a granulometria com diâmetro inferior a 19,1 mm, visto que para o ensaio de compactação as amostras utilizadas não possuíam grãos superiores a isso.

Para a determinação do índice de quebra utilizaremos comparação análoga à proposta por Lee e Farhoomand (1967, apud Zuluaga 2016), no entanto será realizada a avaliação considerando as porcentagens passantes de 15%, 45% e 75%. O índice sugerido possui relação com as curvas granulométricas obtidas antes e após o ensaio, consistindo na comparação dos diâmetros D_{15} , em que “ D_{15} ” é o diâmetro correspondente à

porcentagem passante de 15% antes da compactação, “ $D_{15\text{final}}$ ” o diâmetro referente à porcentagem que passa de 15% após compactação e CBR e “ B_{15} ” é o índice de quebra. A equação utilizada está apresentada a seguir:

$$B_{15} = \frac{D_{15\text{ inicial}}}{D_{15\text{ final}}} \quad (2)$$

Considerando os resultados de Gómez (2011), as análises de quebra nesta pesquisa foram realizadas apenas após os ensaios de CBR, visto que haveria pouca mudança em relação aos resultados obtidos com o corpo de prova submetidos apenas ao ensaio de compactação.

3.2.3.2 Ensaio de compressão unidimensional

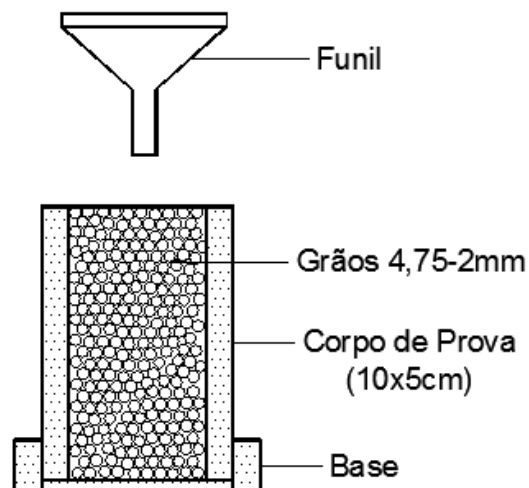
Foram realizados ensaios de compressão unidimensional com a finalidade de avaliar a influencia da quebra dos grãos sobre o comportamento do solo e RCD. Para a realização do ensaio utilizamos um cilindro de 5x10cm e ruptura do corpo de prova por meio de prensa CBR/Marshall automática com capacidade de 5000 Kgf e velocidade de 1,27mm/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. Em seu trabalho ele aplica velocidade variando entre 0,1 mm/min a 1mm/min possuindo como critério de parada deformação de até 20%, nessa pesquisa aplicou-se velocidade próxima a utilizado ao diâmetro de 1,98mm. Os materiais foram provenientes dos ensaios de granulometria após secagem em estufa. Desta forma, espera-se que a velocidade de carregamento elevada não apresente influência nos resultados, uma vez que trata-se de materiais granulares (alta permeabilidade) sem presença de água.

Em uma primeira etapa da pesquisa avaliou-se quais os diâmetros de grãos seriam utilizados para a análise, determinando a utilização dos diâmetros do material passante na peneira 9,5mm e retidos em 4,75 e uma segunda análise com material passante na peneira de 4,75mm e retido na peneira de 2,00mm. Em seguida, realizamos alguns testes nos quais se observa que os materiais empregados para compressão não eram adequados para os grãos de maiores diâmetros. Sendo assim, optou-se por realizar o ensaio apenas com os grãos com dimensões entre as peneiras de 4,75mm a 2,00 mm.

Para a preparação da amostra foram utilizados o material solto e o molde cilíndrico 5x10cm. O enchimento do molde foi realizado através de colocação por meio de um funil e tomando os devidos cuidados para que a amostra não sofresse qualquer tipo de vibração, visando obter um corpo de prova com índice de vazios próximo ao máximo. Além disso, procuramos manter as mesmas condições iniciais para que cada amostra de mesmo material possuíssem as mesmas características. Após o enchimento, o material excedente foi retirado com o uso de uma régua. Por fim foram coletados os dados iniciais do corpo de prova, tais como peso e altura. A Figura 19 representa o molde com os grãos soltos.

Figura 19 - Representação de molde com grãos (4,75mm-2,00mm).



Fonte: A autora.

Foram realizados a moldagem de seis corpos de prova, sendo três para o RCD e três para o solo, com cada amostra submetida a diferentes carregamentos, sendo eles, 2030 Kgf, 595 Kgf e 100 Kgf. A fim de avaliar a quebra do material realizou-se ensaios de granulometria após os ensaios de compressão e foram coletados os dados de penetração para identificar os efeitos da quebra durante o ensaio. A Figura 20 apresenta o corpo de prova durante o ensaio de compressão.

Figura 20 - Ensaio de compressão unidimensional.



Fonte: A autora.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de laboratório realizados para o solo escolhido, RCD e mistura solo - RCD (1:1). Esses compreendem os ensaios de caracterização, ensaios de compactação, expansão, CBR e ensaio de compressão unidimensional, bem como ensaios de granulometria após fases de carregamento para verificar a quebra de grãos dos materiais. Estes ensaios permitem avaliar a viabilidade do emprego do RCD em pavimentação e compreender seu comportamento em diferentes tipos de solicitações.

4.1 Ensaios de Caracterização Física

4.1.1 Massa Específico dos Grãos

A Tabela 10, apresenta as massas específicas dos grãos de solos passantes na peneira 4,75 mm obtidas a partir de três determinações. Os valores variam de 2,689 g/cm³ a 2,875 g/cm³, sendo a média entre as amostras de RCD e solo (2,782 g/cm³) próximo ao valor obtido para a mistura solo - RCD (1:1). Os desvios em relação à média das amostras apresentaram resultados aceitáveis de acordo às prescrições da NBR 6508 (ABNT, 1984) que o limita em 0,02 g/cm³. Em comparação com outras pesquisas observa-

se que o solo obteve valores próximos, no entanto o RCD apresentou maiores variações, isso ocorre, pois, as composições do RCD são muito variadas, o que dificulta a determinação de um valor característico.

Tabela 10 - Massa específica dos grãos da pesquisa e outros autores.

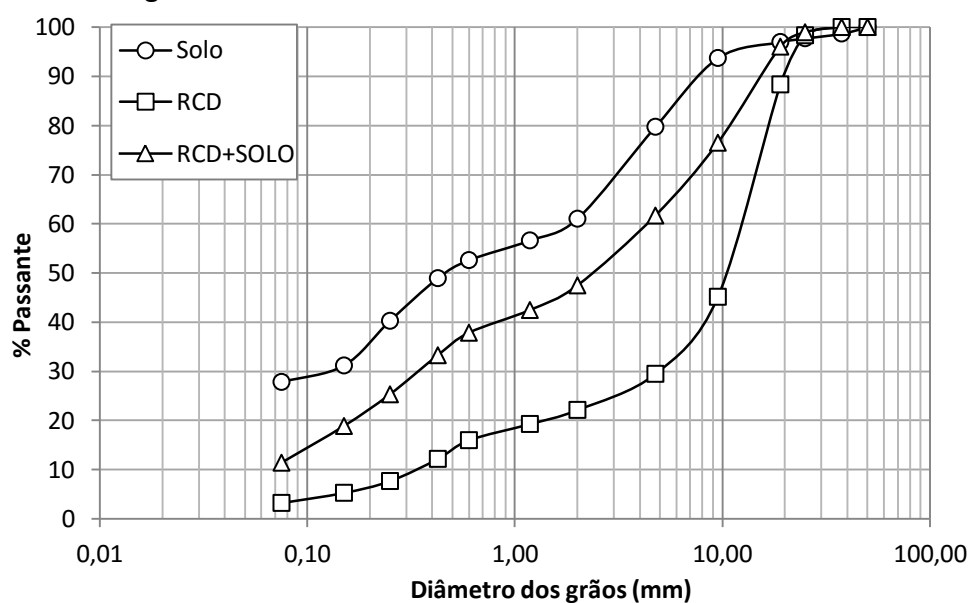
Material	Procedência	Massa específica (g/cm ³)	Autor
Solo	Barreiras- BA	2,875 \pm 0,001	Esta Pesquisa
RCD	Reforma da Casa do Marceneiro, Barreiras-BA	2,689 \pm 0,002	Esta Pesquisa
Solo+RCD	-	2,834 \pm 0,010	Esta Pesquisa
Solo	Barreiras- BA	2,85	Sodré (2017)
Solo	Barreiras- BA	2,68	Preuss (2016)
RCD	Entulho da cidade de Salvador-BA	2,59	Carneiro <i>et al.</i> (2001)
RCD	Demolição do Estádio Mané Garrincha, Brasília.	2,73	Gómez (2011)
RCD	Usina recicladora da PMSP	2,44	Motta (2005)

Fonte: A Autora.

4.1.2 Composição Granulométrica

As determinações da composição granulométrica das três amostras foram realizadas por meio de peneiramento, sendo calculados posteriormente seus parâmetros de curvatura. A Figura 21 apresenta as curvas granulométricas das amostras.

Figura 21 - Curvas granulométricas das três amostras.



Fonte: A autora.

A curva da mistura solo - RCD (1:1) apresentou comportamento intermediário em relação aos outros dois materiais. Deve-se considerar que o solo empregado na pesquisa apresenta uma porcentagem de pedregulho considerável, e curva granulométrica bem graduada.

A Tabela 11 exibe as classes texturais dos materiais, na qual foram determinadas a partir das curvas granulométricas. O solo apresentou 20% de pedregulho e fração de silte e argila de 28%. O RCD e a mistura solo - RCD apresentaram frações mais elevadas de pedregulho, 71% e 38% respectivamente. O teor de finos (silte e argila) dos três materiais apresentaram diferenças apreciáveis.

Tabela 11 - Classes Texturais dos materiais.

Textura	Fração (mm)	Quantidade (%)		
		Solo	RCD	RCD+Solo
Pedregulho	4,75-25,4	20	71	38
Areia grossa	2,00-4,75	20	7	15
Areia média	0,42-2,00	8	8	11
Areia fina	0,075-0,42	24	11	24
Silte e Argila	0,005-0,075	28	3	12

Fonte: A autora.

As faixas de enquadramento para cada material de acordo com o manual de pavimentação do DNIT (2006) estão apresentadas no Apêndice A. O Solo se adequou apenas para a Faixa F do DNIT. O RCD se enquadrou melhor na Faixa A e se encontrou nos limites para as Faixas B e C. A mistura Solo- RCD se enquadrou bem na Faixa D e E. As Faixas A, B e C são indicadas para alto volume de tráfego ($N > 5 \times 10^6$) e as Faixas D, E e F, para baixo volume de tráfego ($N < 5 \times 10^6$). Apesar do RCD está dentro da faixa granulométrica permitida para alto volume de tráfego a NBR 15115 (2004), limita seu uso em vias com baixo volume.

Para avaliar a uniformidade das curvas granulométricas, optou-se por empregar o coeficiente de não uniformidade (CNU) e coeficiente de curvatura (CC). O primeiro indica a diferença entre os tamanhos dos grãos e segundo representa melhor o formato da curva, permitindo identificar possíveis discontinuidades ou concentração elevada dos grãos. Os parâmetros de curvatura obtidos (Tabela 12) indicam que as amostras RCD e RCD+Solo (1:1), são materiais mal graduados, visto que apesar de possuírem um alto valor de CNU o coeficiente de curvatura encontra-se fora do intervalo $1 < CC < 3$.

A NBR 15115 (2004) estabelece que os agregados reciclados de resíduos da construção civil devem possuir coeficiente de uniformidade $CU \geq 10$ e porcentagem passante na peneira de 0,42 mm entre 10% e 40%. O RCD analisado possui 12% passante na peneira de 0,42mm e $CU \geq 10$, logo satisfaz essas condições exigidas para a aplicação em pavimentação nas camadas de base e sub-base.

Tabela 12 - Parâmetros de curvatura.

Amostra	CNU	CC
Solo	ND*	ND*
RCD	43,8	5,0
Solo-RCD (1:1)	60,0	0,4

*ND: Não definido

Fonte: A autora.

Com os parâmetros obtidos realizamos a classificação pelas metodologias de Classificação Unificada (SUCS) e Sistema Rodoviário de Classificação (HRB). Os mesmos consideram para essa determinação os parâmetros granulométricos e limites de consistência. O RCD se enquadra como um pedregulho bem graduado (GW) pela metodologia SUCS e como solos grossos bem graduados (A - 1a) pela HRB. A mistura Solo-RCD (1:1) foi classificada como areia mal graduada argilosa (SP-SC) e areia bem graduada (A - 1b), segundo as metodologias SUCS e HRB, respectivamente. Como o solo apresenta mais que 20% de finos sua classificação foi determinada através dos seus índices de consistência, sendo caracterizados como uma areia argilo-siltosa (SC-SM) ou areia fina (A2-4) de acordo a classificação SUCS e HRB, respectivamente.

Considerando as classificações dos materiais aquelas determinadas através da metodologia HRB apresentaram melhores características para o uso em base de pavimentos.

4.1.3 Limites de Atterberg

A caracterização das amostras quanto seus limites de consistência foram realizados para as três amostras. Para a determinação do Limite de Liquidez foram utilizadas cinco determinações com diferentes teores de umidade, assim como prescreve a NBR 6459 (ABNT, 1984). O limite de plasticidade foi calculado a partir de dez

determinações, sendo desconsiderados os pontos com diferenças maiores que 5% entre as amostras. Os valores estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Limites de Atterberg

Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade
Solo	17,15	14,32	2,83%
RCD	-	-	NP
Solo-RCD	-	-	NP

*NP: plasticidade nula.

Fonte: A autora

O índice de plasticidade do solo indica que se trata de um material pouco plástico. Para as demais amostras os resultados foram não definidos, indicando materiais não plásticos. Espera-se, portanto, materiais pouco compressíveis e de baixa expansão. Os resultados são condizentes com a porcentagem de finos das curvas granulométricas, onde a maior porcentagem foi do Solo (28%) seguido do Solo - RCD (12%) e RCD (3%).

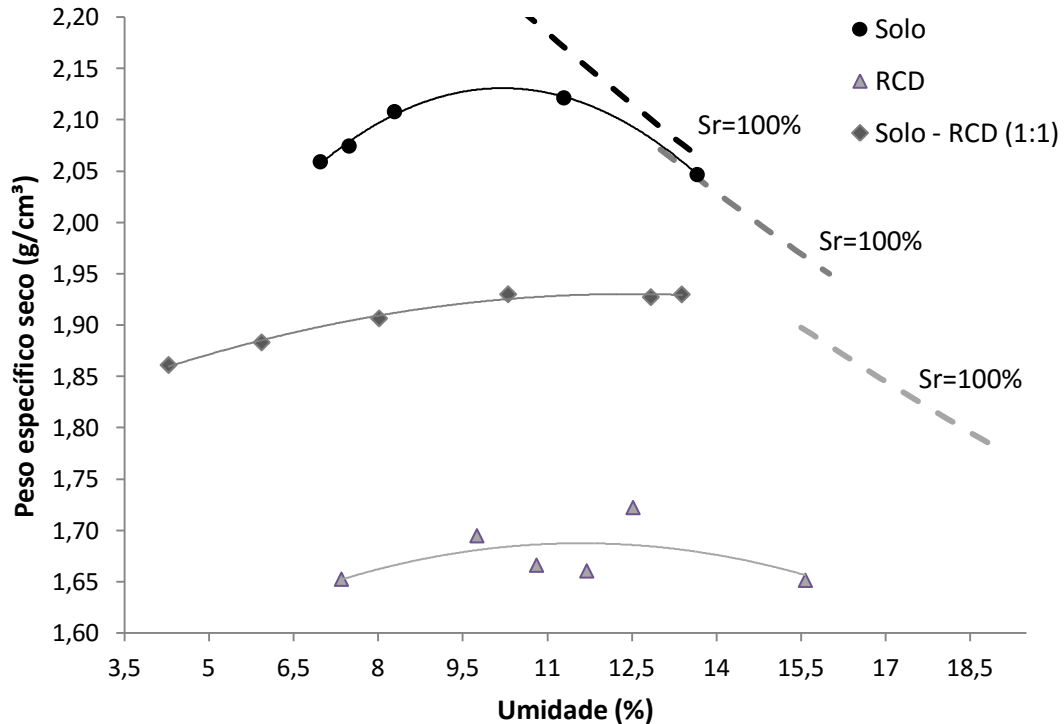
De acordo o manual DNIT (2006), os limites de liquidez e índices de plasticidade para o uso do solo em base ou sub-base de pavimentos devem ser no máximo 25% e 6%, respectivamente. Nenhum dos materiais utilizados ultrapassam os parâmetros definidos pelo manual. O que se observa com os limites determinados é que a adição de RCD ao solo provocou a perda total de plasticidade, indicando os agregados reciclados como redutores de plasticidade.

4.2 Compactação, Expansão e CBR

4.2.1 Compactação

As curvas de compactação obtidas para as três amostras ensaiadas estão apresentadas na Figura 22 e no Apêndice B. Todas as amostras foram compactadas aplicando energia intermediária indicada para bases de baixo volume tráfego. Podemos observar que o Solo apresentou massa específica aparente seca superior ao RCD, e a mistura (solo+RCD) valores intermediários.

Figura 22 - Curvas de compactação.



Fonte: A autora.

Espera-se que materiais mais pedregulhos apresentem massa específica seca superior a materiais arenosos ou argilosos. No caso em estudo, o RCD apesar de ser constituído de maior percentagem de pedregulhos (71%) gerou uma curva de compactação abaixo do solo e da mistura. Esse comportamento pode ser explicado pela estrutura dos grãos, onde a estrutura porosa do RCD atribuiu menor massa específica dos sólidos provocando uma diminuição da massa específica aparente seca.

A curva de compactação do RCD e da mistura solo- RCD (1:1) exibiram formato peculiar não apresentando variação significativa da massa específica aparente seca com a variação de umidade, não sendo possível determinação clara da umidade ótima e massa específica seca máxima. A curva de compactação do solo apresentou comportamento típico com ramo úmido paralelo à curva de saturação. O mesmo não foi observado com o RCD e com a mistura Solo- RCD (1:1).

Do ponto de vista da curva de compactação do RCD e sua aplicação no campo, não é necessário um rigor tão grande em relação aos ajustes de umidade quando comparado com solos, visto que a variação do peso específico seco não apresenta mudanças significativas com a alteração do teor de água. Esta característica pode ser considerada benéfica quanto aos trabalhos executados em campo já que os controles de umidade não

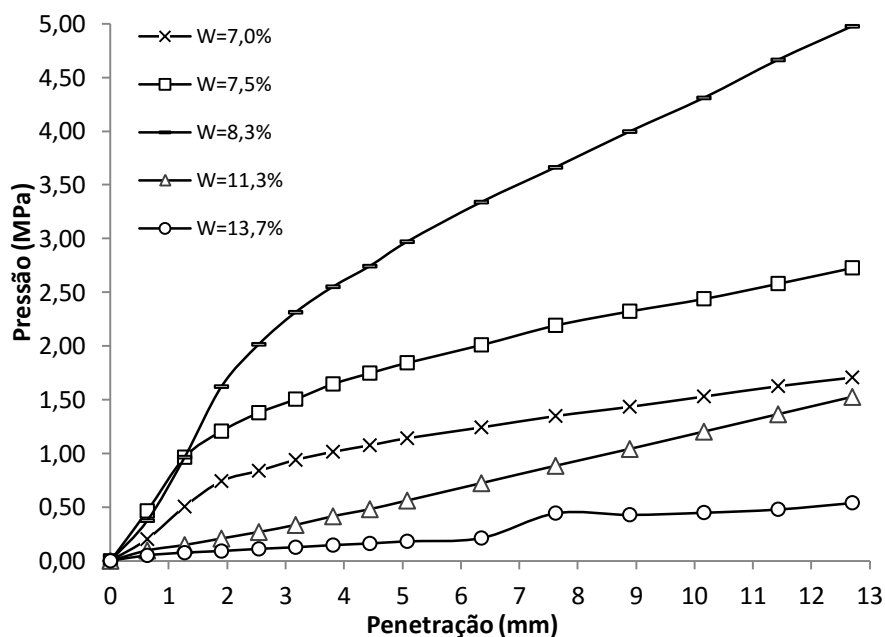
interfere de forma tão expressiva, se comparadas às variações que ocorrem na utilização do solo natural que apresentam maiores mudanças do peso específico com uma pequena variação de umidade.

4.2.2 Expansão e CBR

As amostras submetidas aos ensaios de CBR e expansão foram os mesmos utilizados para a compactação, na qual foi realizada a penetração após imersão do corpo de prova durante 96 horas.

A Figura 23 apresenta a variação de resistência à penetração com as diferentes umidades para o solo. Observa-se que a resistência à penetração mais elevada ocorre para a umidade de 8,3% que se encontra um pouco abaixo da umidade ótima. De forma geral as umidades do ramo seco apresentaram resistências superiores aos do ramo úmido. Esse comportamento já era esperado visto que no ramo seco o solo possui estrutura floculada, ou seja, o contato se faz entre as faces e arestas, provocando um maior travamento entre partículas e conseqüentemente maior resistência. A compactação no ramo úmido gera uma estrutura dispersa, neste caso as partículas se dispõem paralelamente reduzindo a resistência do solo.

Figura 23 - Curvas CBR da amostra de solo.

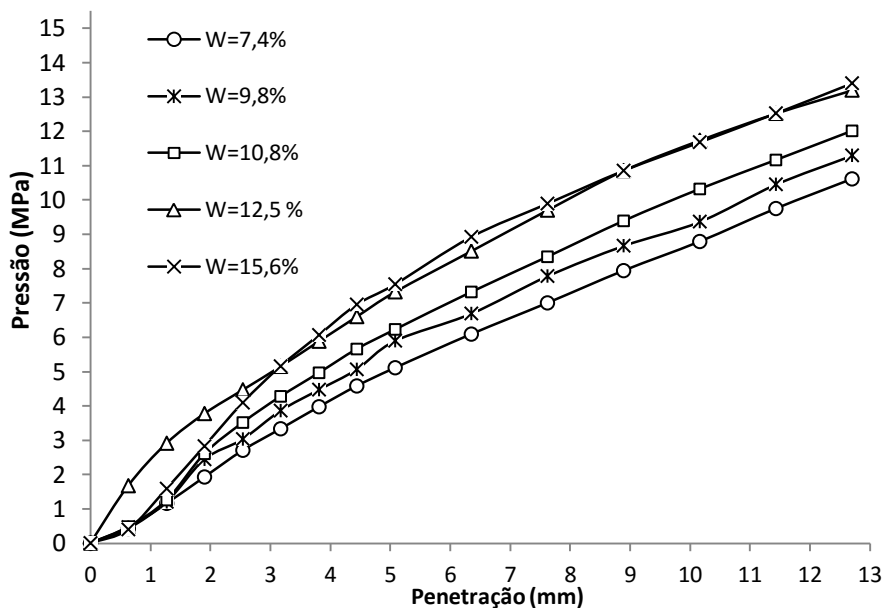


Fonte: A autora.

As curvas de penetração do solo são mais planas nas amostras para os ramos úmidos, isso devido à baixa resistência à penetração dos solos nesses teores de umidade. As curvas representam o padrão de ganho de resistência no processo de compactação em relação à umidade ótima presumida, observe que as curvas possuem maiores inclinações à medida que as umidades se aproximam umidade ótima.

Nos resultados de penetração para o RCD, diferentemente do solo tem-se uma crescente resistência com o aumento de umidade do material (Figura 24), esse comportamento pode ser justificado pela menor quebra dos agregados nas umidades mais elevadas como apresentadas na pesquisa desenvolvida por Gómez (2011). Observamos ainda que as inclinações das curvas de penetração variam menos com as mudanças de umidade, esse fato está diretamente relacionado com as pequenas variações de massa específica seca, reforçando o que foi afirmado no item 4.2.1.

Figura 24 - Curvas CBR para amostra de RCD.

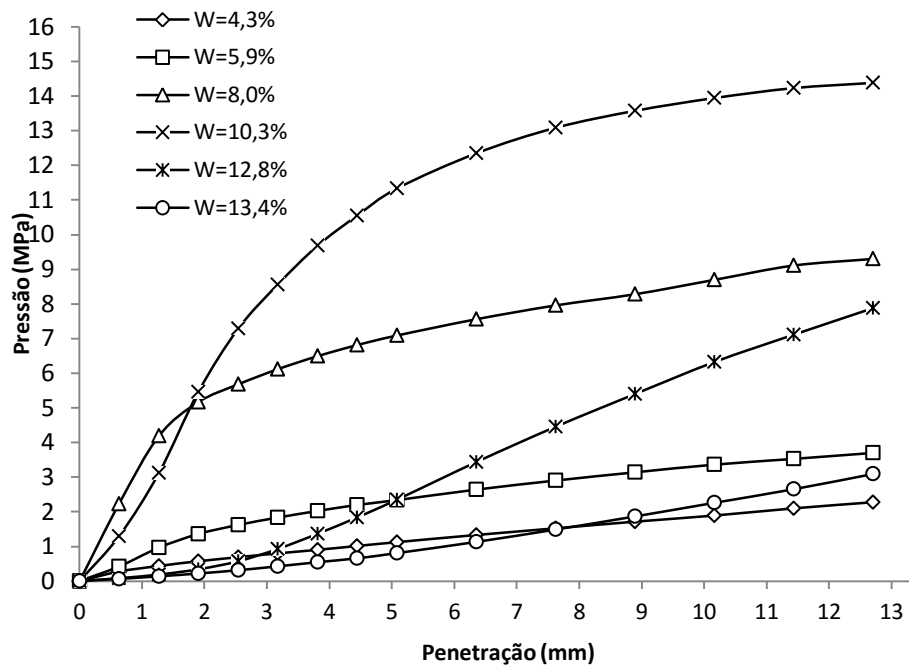


Fonte: A autora.

A Figura 25 apresenta os resultados do ensaio de penetração obtidos para a mistura RCD - Solo (1:1). Os resultados não apresentaram nenhum padrão quanto o ganho de resistência à penetração em relação às mudanças de umidade. No entanto apresentou um ganho de resistência de 65,41% comparando com a maior resistência a penetração do solo, referente ao teor de umidade de 8,3%. Esses resultados sem tendência clara podem ser atribuídos a uma combinação de fatores relacionados à

estrutura do material e efeito de quebra de grãos. Apesar disso, observamos um aumento de resistência da amostra com teor de água próxima à umidade ótima do solo indicando um melhor contato entre os grãos de solo e RCD nessa umidade.

Figura 25 - Curvas CBR da amostra de RCD+Solo (1:1).



Fonte: A autora.

A Tabela 14 exibe os resultados de CBR e expansão obtidos dos três materiais empregados. Os valores de CBR correspondem ao maior valor entre as deformações de 2,54 mm e 5,08 mm, conforme preconizado pela NBR 9895 (ABNT, 1987). A expansão para as amostras foram nulas para o agregado reciclado e praticamente nulas para os demais materiais. Apesar da baixa expansão do solo observamos que a adição de RCD provocou a redução de sua expansão e aumento da capacidade de suporte, indicando uma melhora da qualidade para pavimentação. Os maiores valores de expansão se apresentam para as amostras com menor teor de umidade, isso ocorre, pois as amostras mais secas absorvem maiores teores de água promovendo uma maior interação entre os componentes expansivos e a água.

Tabela 14- Resultados de Expansão e CBR

	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
RCD	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-RCD (1:1)	4,3	0,026	11,62
	5,9	0,010	25,45
	8,0	0,001	88,64
	10,3	0,000	124,00
	12,8	0,008	13,40
	13,4	0,008	6,15

Fonte: A autora.

Analisando a Expansão e CBR alcançados, observamos que os mesmos apresentaram-se adequados à utilização em sub-bases de pavimentos, pois alcançaram CBR acima de 20% e expansão menor que 1%, de acordo prescrições do DNIT (2006).

Os resultados de CBR mostram que as amostras de RCD e mistura (1:1) são satisfatórios para o uso em camadas de base, uma vez que ultrapassaram o valor mínimo de 60% exigido para base de pavimento e obtiveram expansão inferior a 0,5% segundo prescrições do manual de pavimentação do DNIT (2006) para baixo volume de tráfego. Considerando os pontos de maior CBR do solo e mistura solo - RCD (1:1) determina-se um ganho de resistência de 74,32% do CBR quando adicionado o RCD ao solo, adequando seu uso para a aplicação na camada de base, com valor absoluto de 124,00% de CBR.

A mistura (1:1) apresentou CBR superior ao RCD. Neste caso a adição de RCD ao solo gerou uma curva com melhor distribuição granulométrica, resultando em um melhor entrosamento da amostra em relação às demais.

As normas NBR 15115 (ABNT, 2004) e NBR 15116 (ABNT, 2004) recomenda o uso de agregados reciclados apenas em vias com baixo volume de tráfego ($N < 5 \times 10^6$), no entanto os resultados mostraram que o material contendo agregado reciclado e solo pode ser empregado nas camadas de base com alto volume de tráfego, já que o valor encontrado para o CBR é maior que 80%.

Deve se ressaltar que solos para base em alto volume de tráfego devem ser compactados com energia modificada e que por sua vez devem fornecer valores de CBR maiores que 80%. Espera-se que a mistura Solo- RCD (1:1) apresente valores de CBR superiores aos encontrados para energia intermediária quando compactados em energia modificada, atendendo também as exigências em norma.

Outro fator relevante é que a curva granulométrica da mistura solo- RCD (1:1) apresenta boa parte da fração granulométrica na faixa “C” e “B” referentes à granulometria adequada para alto volume de tráfego como podemos observar nas curvas apresentadas no Apêndice A.

4.3 Análise de quebra dos grãos

As avaliações de quebra de grãos foram realizadas com base nas curvas granulométricas obtidas antes e após os ensaios de compactação e CBR, bem como empregando curvas granulométricas antes e após os ensaios de compressão unidimensional.

A análise de ruptura após compactação e CBR foi realizada com as três amostras e os ensaios de compressão unidimensional foram realizados apenas com amostras de solo e RCD com objetivo de comparar a resistência dos grãos desses dois materiais.

4.3.1 Análise granulométrica após Compactação e CBR

As características dos grãos possuem função fundamental no comportamento de resistência do solo, sua composição mineralógica e tipo de formação influenciam diretamente em sua resistência. Nos agregados reciclados a composição também determina seu comportamento sendo interessantes de serem avaliadas

Após o ensaio de CBR observamos os efeitos da compactação em alguns grãos, na qual foi verificado diferentes tipos de fraturas. Os grãos provenientes de materiais cimentícios apresentaram dois modos de quebra do material, sendo eles a desintegração e pequenas trincas nos grãos. Os grãos de brita e de cerâmica vermelha apresentaram apenas trincas em sua estrutura. A Figura 26 mostra os grãos de cerâmica vermelha quebrados após os ensaios de CBR.

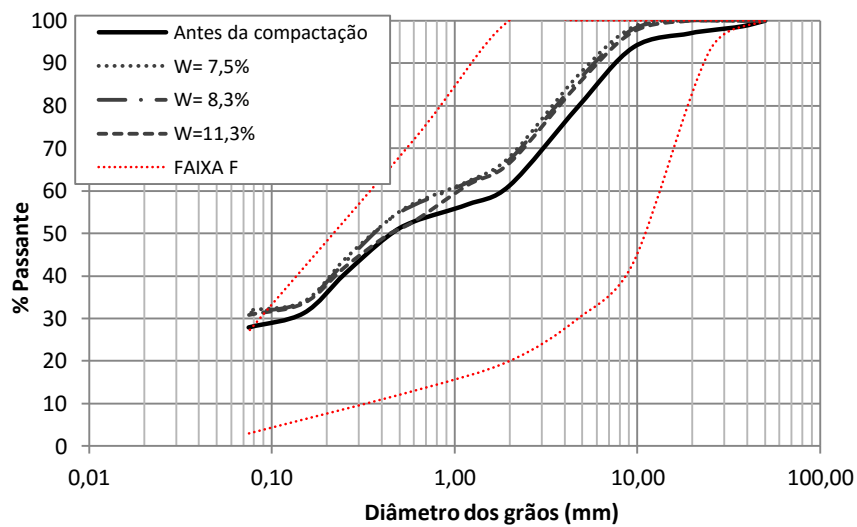
Figura 26 - Fratura do RCD após compactação e CBR.



Fonte: A autora.

As Figuras 27, 28 e 29 exibem as curvas granulométricas obtidas antes e após os ensaios de compactação, nas quais também são representadas as faixas do DNIT que melhor se enquadraram os materiais em estudo.

Figura 27 - Curvas granulométricas antes e após ensaio de compactação e CBR do solo.



Fonte: A autora.

Figura 28 - Curvas granulométricas antes e após ensaio de compactação do RCD.

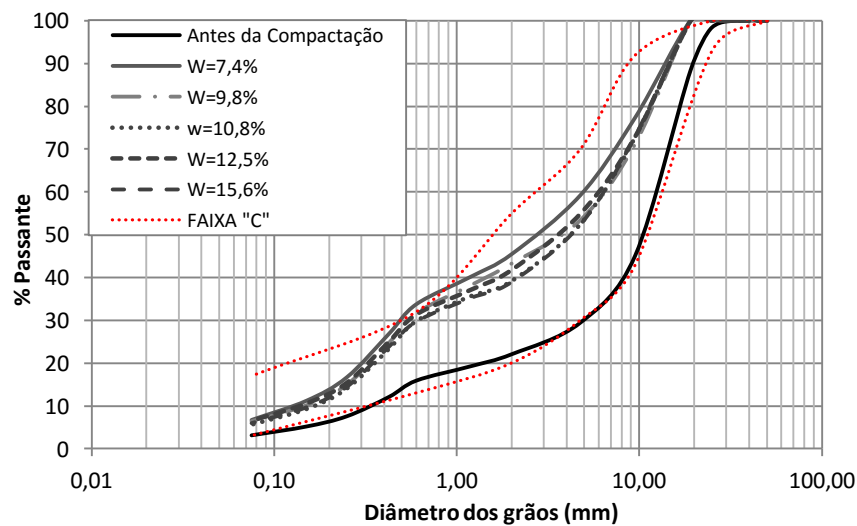
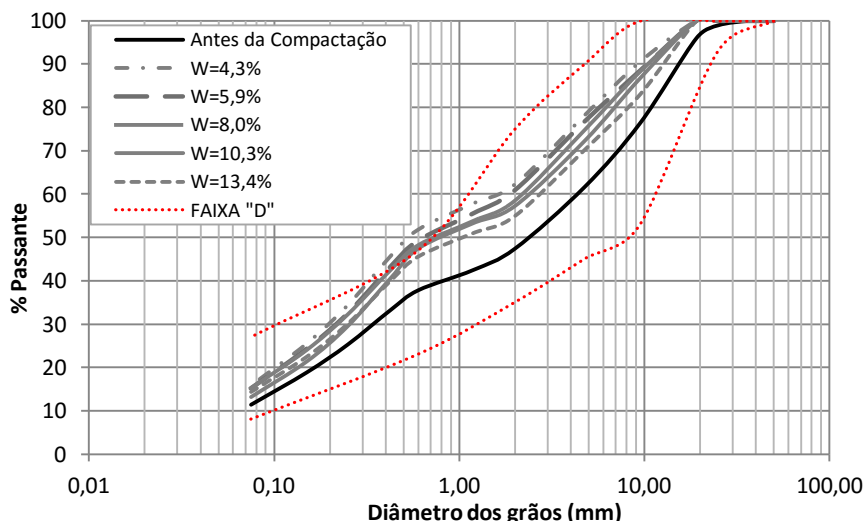


Figura 29 - Curvas granulométricas antes e após ensaio de compactação do RCD+Solo (1:1).



Fonte: A autora.

As curvas apresentadas acima mostraram que a mudança na distribuição granulométrica do material ocorreu de acordo às variações de umidade, apresentando maior variação no tamanho dos grãos para os ensaios de compactação e CBR com umidades mais baixas em todos os materiais. A maior quebra de grãos pode ser observada na compactação e CBR do RCD. O solo apresentou uma variação tímida das em relação aos demais materiais, indicando menor quebra. A mistura solo- RCD (1:1) apresentou comportamento intermediário.

Observa-se que após a compactação as curvas sofreram uma diminuição nos tamanhos de grãos, gerando um deslocamento para o interior da faixa do DNIT. Nas amostras com menor teor de umidade do RCD e Solo- RCD (1:1) as curvas apresentaram uma pequena fração de material fora da faixa considerada.

O RCD e mistura solo - RCD (1:1) apresentaram melhores distribuições granulométricas após os ensaios de compactação. Tal resultado pode ser constatado pela observação das curvas granulométricas obtidas os quais tiveram um aumento dos diâmetros referentes as porcentagens de 30% a 70%. Esta condição pode atribuir ao solo melhores características uma vez que contribui para melhor travamento dos grãos.

O aumento de CBR das amostras de RCD verificado na Figura 24 acompanham a tendência de menor quebra de grãos com o aumento da umidade. O mesmo não pode ser observado nas amostras de solos e Solo- RCD (1:1).

Para a verificação dos resultados obtidos, realizamos a determinação dos índices de quebra para cada teor de umidade, com comparação dos diâmetros em três áreas das

curvas granulométricas na qual se observava mudanças de comportamento. Os índices foram calculados de acordo com a comparação proposta por Lee e Farhoomand (1967, *apud* Zuluaga 2016), que consideram uma porcentagem passante fixa ($B = D_{15 \text{ inicial}} / D_{15 \text{ final}}$). Em nossa pesquisa foi realizada comparação análoga sendo aplicados outros diâmetros de grãos, os quais correspondem à porcentagem passante de 15%, 45% e 75%. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Índice de quebra e variação da umidade.

Material	Umidade	Índices de Quebra		
		B ₁₅	B ₄₅	B ₇₅
Solo	7,5%	-	1,19	1,41
	8,3%	-	1,14	1,31
	11,3%	-	1,10	1,27
RCD	7,4%	2,30	5,21	1,82
	9,8%	2,21	4,13	1,57
	10,8%	2,04	3,19	1,60
	12,5%	2,12	3,96	1,58
	15,6%	2,12	3,19	1,58
Solo-RCD	4,3%	1,33	4,25	2,25
	5,9%	1,33	3,78	2,09
	8,0%	1,33	3,40	1,88
	10,3%	1,11	3,27	1,67
	13,4%	1,25	2,98	1,43

Fonte: A autora.

Os índices mostraram que a mudança da distribuição granulométrica depende do teor de umidade contida no material. Nota-se que as amostras contendo teor de água mais baixo apresentaram um índice de quebra superior em relação aquelas com maior umidade. Isso acontece, pois o contato dos grãos secos que possuem maior travamento são mais propensos a ruptura que materiais dispostos com contato face a face como ocorrem em materiais com teores de umidade mais elevado.

O solo apresenta menor distanciamento dos índices com a variação de umidade, esse comportamento é decorrente da maior resistência dos grãos do solo em relação ao RCD, que possui estrutura porosa. Observamos ainda que a curva granulométrica do solo após a compactação se afasta paralelamente da curva inicial, indicando uma quebra uniforme dos grãos. Fica evidente que a compactação afeta o tamanho dos grãos dos materiais, agindo principalmente nos materiais contendo RCD.

Os índices B_{45} do RCD e mistura solo RCD, apontam que para esses materiais a maior quebra de grãos ocorre em diâmetros superiores a 45% passante, não sendo possível afirmar se a maior quebra ocorre em grãos de pedregulho ou de areia grossa. Os índices B_{75} indicam que a quebra de grãos maiores que 75% passante são semelhantes para as amostras de RCD e mistura solo- RCD.

Observa-se com os resultados que os efeitos de quebra no RCD é sempre superior aos valores encontrados para o solo podem provocar uma redução da vida útil do pavimento, pois a ruptura do material podem causar também afundamentos ou outros tipos de patologia. Apesar disso, deve-se considerar que o aumento de finos em certa proporção pode proporcionar melhorias na distribuição granulométrica melhorando o entrosamento das partículas e assim sua capacidade de suporte da estrutura. Uma forma de amenizar o problema da degradação seria a aplicação de compactação com energia modificada, visto que esses geram maiores quebras iniciais reduzindo a degradação futura, tal como observado por Leite (2007) em sua pesquisa.

4.3.2 Após ensaio de compressão unidimensional

Os ensaios de compressão unidimensional foram realizados empregando os grãos de solo e RCD retidos na peneira de 2 mm e passante na peneira de 4,75 mm, com o intuito de verificar as características mecânicas do grão de cada material.

A Figura 30 apresenta o corpo de prova do RCD antes e após o ensaio, na qual é possível observar visualmente a fragmentação da amostra de RCD.

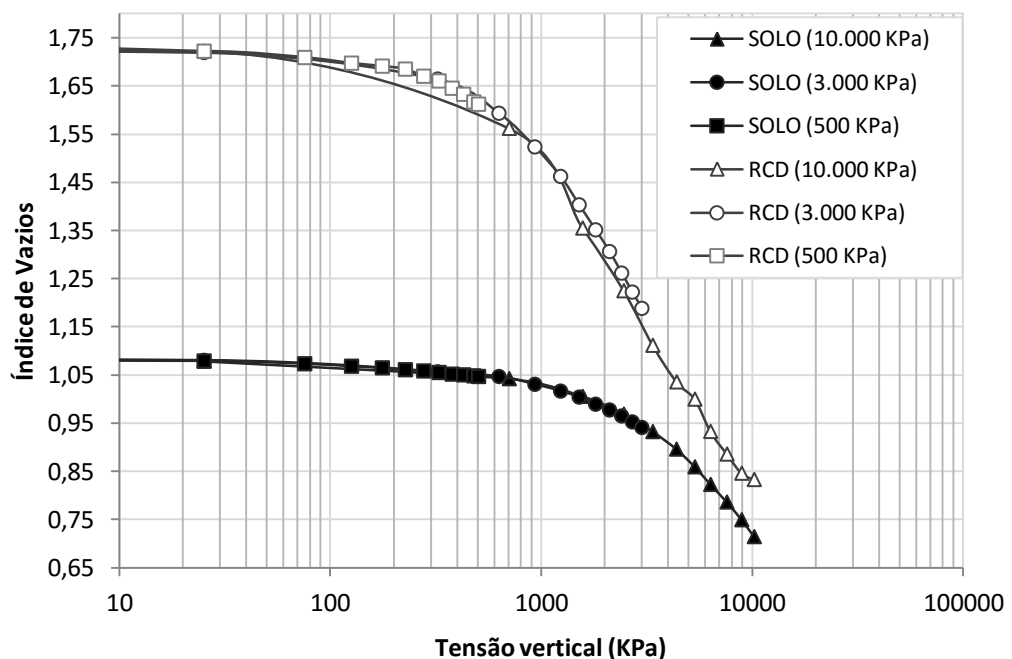
Figura 30 - Amostra de RCD: (a) antes do ensaio e (b) após o ensaio de compressão unidimensional com tensão vertical de 10.000 kPa.



Fonte: A autora.

A Figura 31 exibe as curvas de compressão para os três níveis de tensão vertical aplicados. Os índices de vazios máximos correspondentes ao início das curvas de compressibilidade das amostras foram de 1,72 para o RCD e 1,09 para o solo, indicando a maior porosidade dos grãos de RCD. Ambas as curvas mostraram formato típico de curvas de compressibilidade de solos, porém com inclinações e pontos de deflexão diferentes. Determinou-se os parâmetros de curvatura nos diferentes estágios de compressão, na qual obteve-se para o estágio antes (C_c) e após ruptura dos grãos (C_r) os seguintes coeficientes para o RCD, $C_c= 0,053$ e $C_r=1,278$ e para o solo, $C_c=0,007$ e $C_r=0,423$. Com isso observa-se que o RCD apresentou maior variação de índice de vazios para um mesmo acréscimo de carga. As curvas de compressibilidade de diferentes tensões finais exibiram o mesmo comportamento, indicando a repetição dos ensaios para ambos os materiais.

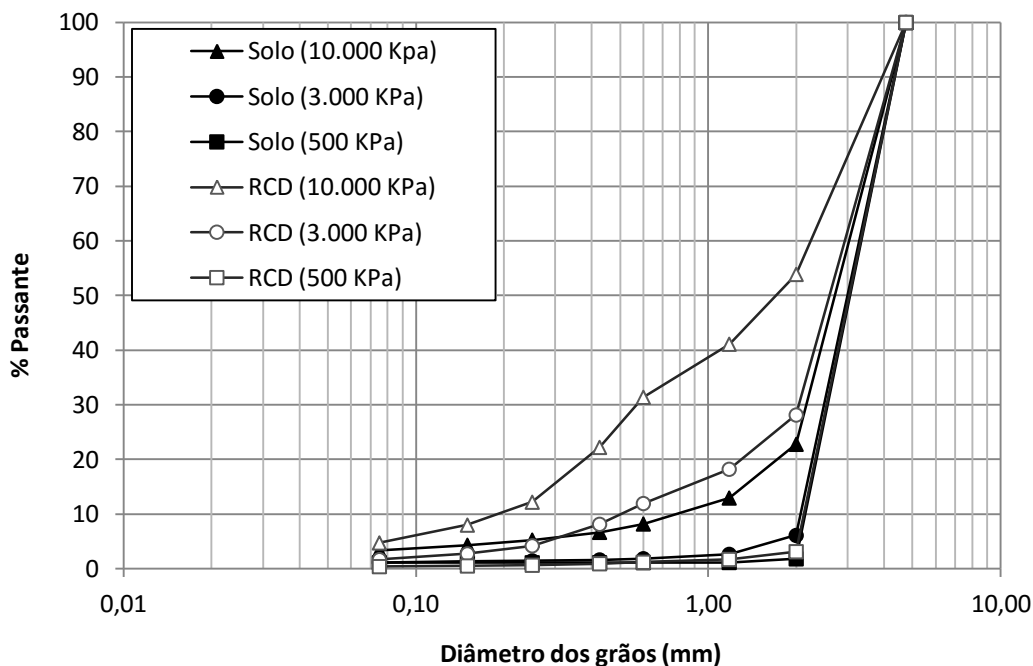
Figura 31 – Variação do índice de vazios em função da tensão das amostras de Solo e RCD (4,75-2,00 mm) do ensaio de compressão unidimensional.



Fonte: A autora.

Foram determinadas as distribuições granulométricas em cada nível de tensão aplicada, visando avaliar a variação da distribuição em cada uma delas. As curvas obtidas estão apresentadas na Figura 32. Observa-se que para uma mesma tensão aplicada o RCD sofre maiores quebras que o solo.

Figura 32 - Granulometria após ensaio de compressão unidimensional com diferentes carregamentos.



Fonte: A autora.

Através da análise gráfica identificamos que o solo apresenta menor índice de vazios em relação ao RCD, no entanto há uma pequena variação dos índices nos estágios iniciais da aplicação de tensão para ambas as amostras, comportamento decorrente da acomodação dos materiais na fase inicial havendo pouca quebra. Nas curvas granulométricas apresentadas observamos que até uma tensão de 500 KPa ocorre pouca mudança da granulometria dos materiais e pequena variação entre as curvas de solo e RCD, mostrando uma quebra próxima dos materiais quando submetidas até esta tensão. Com o aumento da aplicação da carga há um aumento significativo da quebra, e percebemos uma maior variação entre as curvas granulométricas do RCD e do Solo, onde o RCD apresenta maior quantidade de materiais finos como observado na Figura 32.

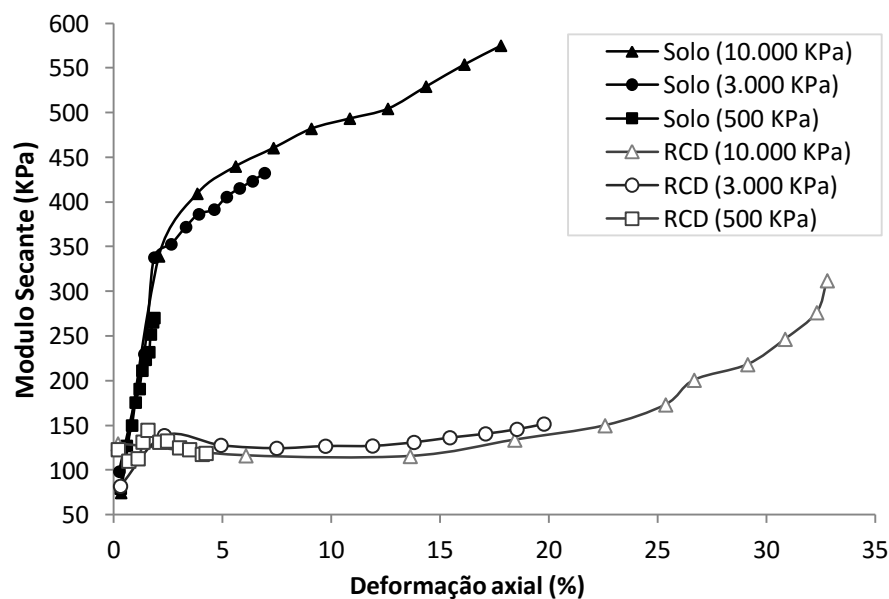
A quebra dos grãos é marcada pelo ponto de inflexão das curvas de compressibilidade. O solo apresenta mudança de comportamento a partir da aplicação de 1000 KPa, enquanto o RCD apresenta uma mudança a partir de 300 KPa, mostrando que a fragilidade dos grãos de RCD mesmo em baixas tensões já é relevante.

Os módulos das curvas de compressibilidade determinadas neste estudo indicam a taxa variação da tensão vertical em relação à deformação axial e foram calculadas com o intuito de verificar mais claramente a evolução da quebra do material e as variações na capacidade de suporte durante esse processo.

A Figura 33 apresenta a relação entre o módulo secante e a deformação axial durante os ensaios de compressão unidimensional. Através da sua análise percebe-se que nos estágios iniciais da aplicação de carga ocorre aumento do módulo secante dos materiais. Para o solo o seu aumento é linear até 3% de deformação axial, havendo uma diminuição dessa taxa de aumento após esse valor. Para o RCD observa-se comportamento diferente, em que o acréscimo de módulo ocorre até 2,5% de deformação axial, com posterior diminuição absoluta, e aumento a partir de 15% de deformação.

A redução do índice de vazios lhe atribui maior capacidade de suporte nas tensões iniciais, porém, à medida que a quebra de grãos se torna acentuada existe tendência de perda de capacidade de suporte. Tal comportamento é identificado para ambos os materiais. Obtivemos maiores deformações para os agregados.

Figura 33 - Variação do módulo secante em função da deformação axial das amostras de solo e RCD (2,00-4,75mm) do ensaio de compressão unidimensional.

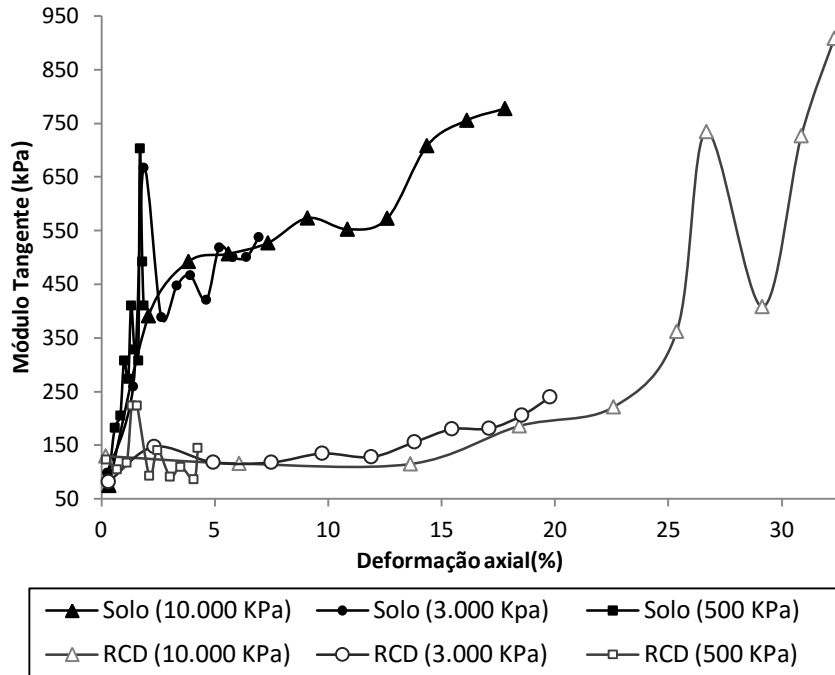


Fonte: A autora.

A Figura 34 apresenta a variação do módulo em relação à deformação axial. Com a análise gráfica identificamos que o solo possui módulos tangentes superiores ao RCD para uma mesma tensão aplicada. Ambos os materiais apresentam picos quando se atinge uma deformação em torno de 2,5% referente à carga de 500 KPa isso ocorre pois nesse intervalo ocorreu a ruptura do material, tanto do solo como do RCD. Estes picos representam a deformação ocorrida imediatamente antes da ruptura do material.

Considerando as características das amostras até então, podemos atribuir esse comportamento tanto as condições de índice de vazios iniciais quanto às características dos grãos.

Figura 34 - Variação do Módulo tangente em função da deformação axial (2,00-4,75mm).



Fonte: A autora.

A dispersão apresentada no gráfico acima pode ser explicada pelo alívio de tensões que ocorre após a acomodação e quebra de grãos, observa-se que para as tensões mais baixas a dispersão é mais acentuada. Para as deformações iniciais os módulos secantes e tangentes do solo são semelhantes. O mesmo pode ser observado com o RCD.

Os resultados apresentados indicaram que a quebra do grão ocorre com maior intensidade para os agregados reciclados.

5. CONCLUSÕES

Os estudos realizados nesta pesquisa analisaram as características de um solo da cidade de Barreiras- BA, de RCD coletado de uma obra de reforma na mesma cidade, e da

mistura de ambos considerando fração de 50% de cada material. Os mesmos foram submetidos a ensaios laboratoriais para que pudessem ser avaliados sua aplicabilidade em obras de pavimentação.

Com a caracterização do RCD observamos a predominância de materiais cimentícios. Após a triagem realizada garantimos que o mesmo não possuía quaisquer materiais contaminantes e que era composto basicamente de resíduos de cerâmica vermelha e materiais cimentícios classificando como resíduo de classe A de acordo a resolução nº 307 do CONAMA (2004) podendo ser utilizado como agregado em obras de pavimentação depois de verificada suas propriedades.

As curvas granulométricas possibilitaram a determinação das classes texturais predominantes, dos coeficientes de curvatura e das faixas de enquadramento em relação ao manual de pavimentação do DNIT (2006). Quanto à classificação textural, o solo apresentou 20% de pedregulho e fração de finos (silte e argila) em 28%. O RCD e mistura solo- RCD (1:1) apresentaram frações mais elevadas de pedregulho e conseqüentemente menores teores de finos. O RCD constitui-se de fração pedregulhosa de 71% com o maior diâmetro presente de 25 mm, e teor de finos de 12,6% referente ao material passante na peneira de 0,425mm. O RCD utilizado se enquadra nos valores prescritos pela norma NBR 15115 (ABNT, 2014) quanto os suas frações de agregado graúdo e miúdo.

Com os coeficientes de curvatura e os limites de consistência classificamos o material quanto às metodologias SUCS e HRB. O qual foi denominado o solo como sendo uma areia- siltosa (SC-SM) ou areia fina (A2-4) segundo as metodologias SUCS e HRB, respectivamente. O RCD e a mistura RCD- Solo (1:1) são classificados de acordo a SUCS como pedregulho bem graduado (GW) e areia mal graduada argilosa (SP-SC), respectivamente. Segundo metodologia HRB os mesmo são denominados como solo grosso bem graduado (A- 1a) e areia bem graduada (A-1b). Observou-se uma melhor distribuição da curva granulométrica do solo após adição de RCD.

Os limites de consistência obtidos mostraram o solo como material pouco plástico e RCD e mistura Solo- RCD (1:1) como não plástico, confirmando o RCD como redutor de plasticidade. Os limites de consistência dos três materiais atenderam as prescrições do manual de pavimentação do DNIT (2006) para o emprego nas camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

As curvas de compactação do solo exibiram comportamento típico de ensaios de compactação resultando em um ponto ótimo com teor de umidade de 10,2% correspondente a uma massa específica seca de 2,13 g/cm³. As curvas obtidas para o RCD e mistura solo - RCD (1:1) apresentaram formatos peculiares.

Os resultados de CBR e expansão dos três materiais empregados na pesquisa são adequados à utilização em sub-bases de pavimentos de acordo as prescrições do DNIT (2006), uma vez que obtiveram CBR acima de 20% e expansão menor que 1%. Em relação à aplicação dos mesmos para a camada de base, o RCD e a mistura solo – RCD (1:1) estão aptos para esta aplicação, pois resultou em CBR de 74,66% e 124,00%, respectivamente, os quais são maiores que o valor prescrito pela norma para materiais de base. Entre o CBR dos materiais analisados a mistura solo- RCD (1:1) apresentou melhor resultado com uma melhora da capacidade de suporte do solo em 74,32% adequando-o a aplicação na camada de base.

Com a análise granulométrica após os ensaios de compactação e CBR fica evidente a variação das curvas e a quebra do material após o ensaio. Os resultados obtidos para o solo exibiram variações menores que dos demais materiais, o que sugere menor quebra dos grãos. Observou-se uma menor quebra nos materiais com maiores teores de umidade, esse comportamento foi observado para todos os materiais empregados. Calculamos os índices de quebra para os materiais sendo possível confirmar as conclusões tiradas a partir das curvas granulométricas, os maiores índices de quebra se apresentaram para os materiais contendo RCD como era esperado.

O comportamento dos materiais quando submetidos aos ensaios de compressão unidimensional mostraram poucas variações nos estágios iniciais de aplicação de carga, com acomodação do material e pouca quebra. Através das curvas granulométricas obtidas após a compressão observou-se pouca variação entre as curvas do RCD e solo até a tensão de 500 KPa sugerindo quebras próximas até esta tensão. Nas tensões acima desse valor observou a quebra do RCD com maior intensidade devido a menor resistência do grão do agregado reciclado.

Através dos resultados obtidos conclui-se que o agregado reciclado avaliado nesta pesquisa apresenta viabilidade técnica para aplicação do RCD e de misturas de solo- RCD como materiais granulares das camadas de base e sub-base de pavimentos flexíveis. Com

a análise de quebra dos grãos observou-se que os efeitos do fenômeno atingem de forma mais agressiva ao RCD quando solicitados a tensões mais elevadas.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a pesquisa realizada, identificamos alguns estudos importantes para avaliação do RCD em obras de pavimentação, sendo recomendados:

- Avaliação do comportamento do RCD com diferentes tipos de solo da cidade de Barreiras;
- Análise de quebra dos materiais considerando diferentes granulometrias;
- Determinação da melhor granulometria para aplicação de RCD em pavimentos;
- Considerando as mudanças de granulometria após a compactação e analisar as influências de diferentes energias de compactação;
- Avaliar as propriedades dos constituintes do RCD e verificar os efeitos da mudança de composição do RCD;
- Avaliação do RCD em relação ao módulo resiliência;
- Análise verificando a interferência da absorção dos diferentes constituintes do RCD nas curvas de compactação.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). Resíduos Sólidos Urbanos. In: **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2010**. São Paulo, 2010. p. 102-103.

_____. Resíduos Sólidos Urbanos. In: **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, 2012**. São Paulo, 2012. p. 83-84.

_____. Resíduos Sólidos Urbanos. In: **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, 2014**. São Paulo, 2014. p. 83-84.

_____. Resíduos Sólidos Urbanos. In: **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, 2015**. São Paulo, 2015. p. 64-65.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6508 - Determinação da Massa Específica - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e caracterização**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6459: Solo - Determinação do Limite de Liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180: Solo - Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro 1984.

_____. **NBR 7182: Solo - Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 9895: Solo - Índice de Suporte Califórnia**. Rio de Janeiro, 1987.

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

_____. **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 - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (ABRECON). **Relatório de Pesquisa Setorial 2014/2015**. Brasil, 2015.

BERNUCCI, L.B.; CERATTI, J. A. P.; MOTTA, L. M. G.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**, Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BEJA, I. A. **Agregado reciclado de construção e demolição com adição de aglomerantes hidráulicos como sub-base de pavimentos** (2014). Tese (Mestrado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 221p.

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 º 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.

_____. **Resolução n º 409, de 29 de julho de 2015: Altera a resolução CONAMA n º 307, de 05 de Julho de 2002**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 jul. 2002.

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

GOMÉZ, A. M . **Estudo experimental de um resíduo de construção e demolição (RCD) para utilização em pavimentação** (2011). Tese (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília, Distrito Federal. 148p.

GOMÉZ, A. M . **Comportamento mecânico de um agregado reciclado a partir de resíduos de construção e demolição submetidas a carregamentos cíclicos** (2016). Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Brasília, Distrito Federal. 148p.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo de comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária (2009)**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Paulo. 163p.

LEITE, Fabiana C. **Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos** (2007). Tese (Mestrado)- Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo. 185p

MOTTA, R. S. **Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego** (2005). Tese (Mestrado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo. 161p.

OLIVEIRA, L. M. **Aproveitamento e derivação de RCD derivado da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentação na cidade de São Luís-MA**. 20ª Reunião de Pavimentação Urbana (RPU). Jun. 2017

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3ª Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PINTO, T. S. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana (1999)**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo. 218p.

PLANO MUNICIPAL DE GESTÃO INTEGRADA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE BARREIRAS (PMGRIS). Barreiras- Bahia. 2014. Disponível em: < http://barreiras.ba.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/Versao_PMGIRS_27_11_14.pdf> Acesso em 20 de jun.2017

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO (PMSP). São Paulo.2003. **PMSP/SP ETS - 001/2003 - Camadas de reforço de subleito, sub-base e base de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. Disponível em: < http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/Especific%C3%A7%C3%B5es%20T%C3%A9cnicas%20de%20Servi%C3%A7o/PMSP_ETS_001_2003%5B1%5D.pdf> Acesso em: 04 de jul. 2017.

PREUSS, M. S. **Análise do Potencial de um solo superficial na cidade de Barreiras- BA**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras- BA. 77p.

SENÇO, W de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2ª Edição. São Paulo: PINI, 2007

SIQUEIRA, M. S. *et al.* **Estudo de Viabilidade Técnica do uso de agregado reciclado de RCD em obras de pavimentação**. XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído (ENTAC). Agosto 2006.

SOUZA, M. V. R. **Comportamento mecânico de um agregado reciclado como base de pavimento flexível a partir de um modelo físico** (2015). Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental- Universidade de Brasília, Distrito Federal. 146p.

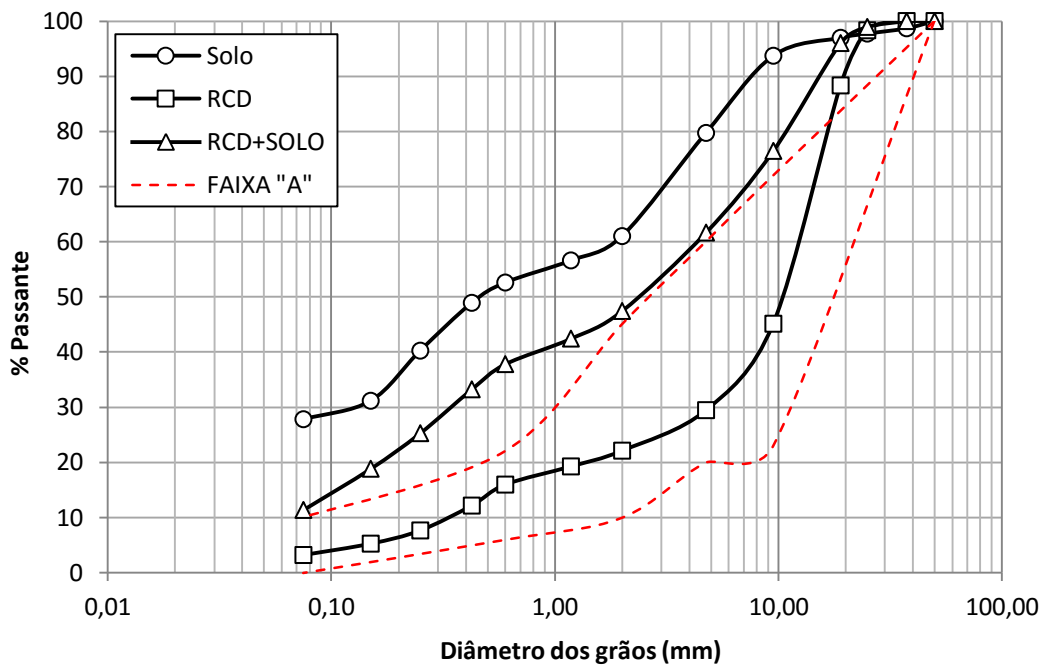
SODRÉ, N. R. **Estabilização de um solo de Barreiras- Ba para a adição de cal para fins rodoviários** (2017). Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras-BA.

ZEGHAL, M. **The impact of grain crushing on road performance**. Geotechnical & Geological Engineering, 27:p.549-558.

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

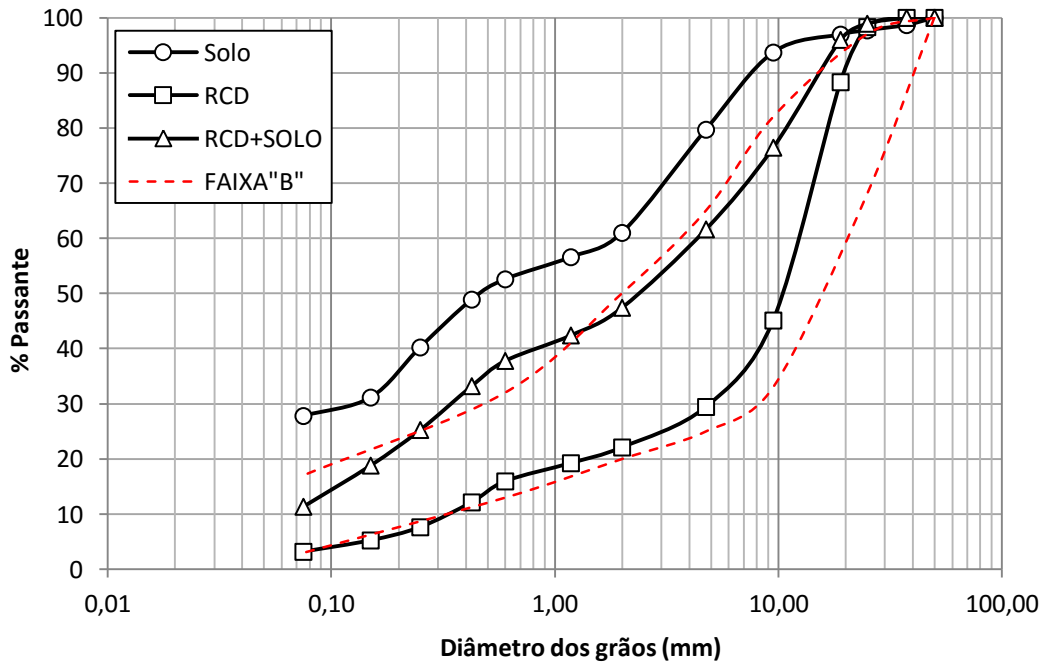
APÊNDICE A

Figura 35 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "A" do DNIT.



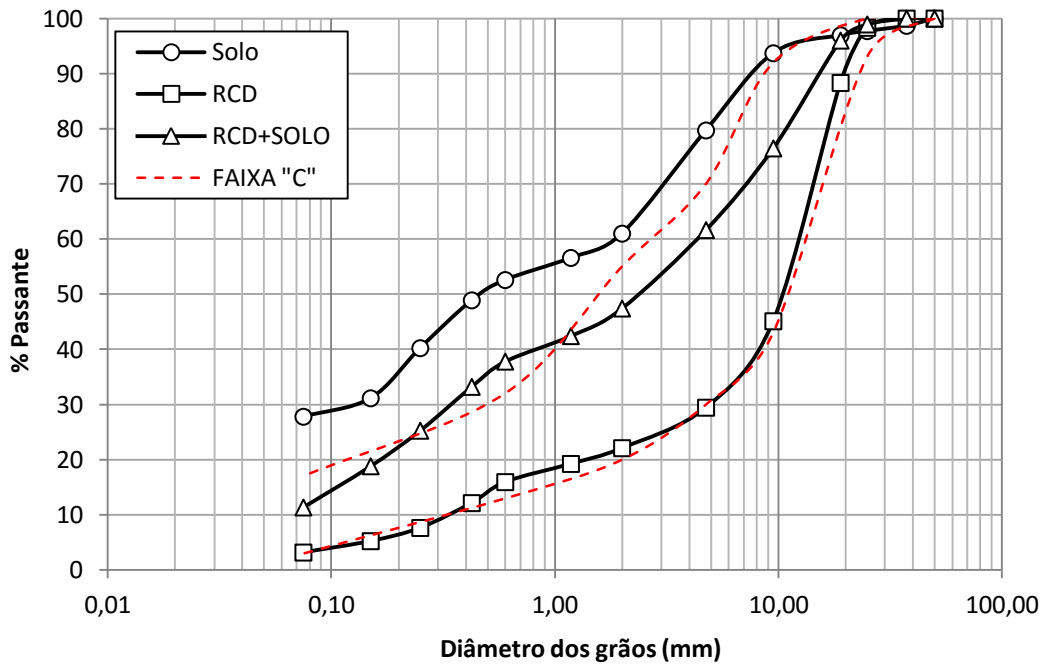
Fonte: A autora.

Figura 36 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "B" do DNIT.



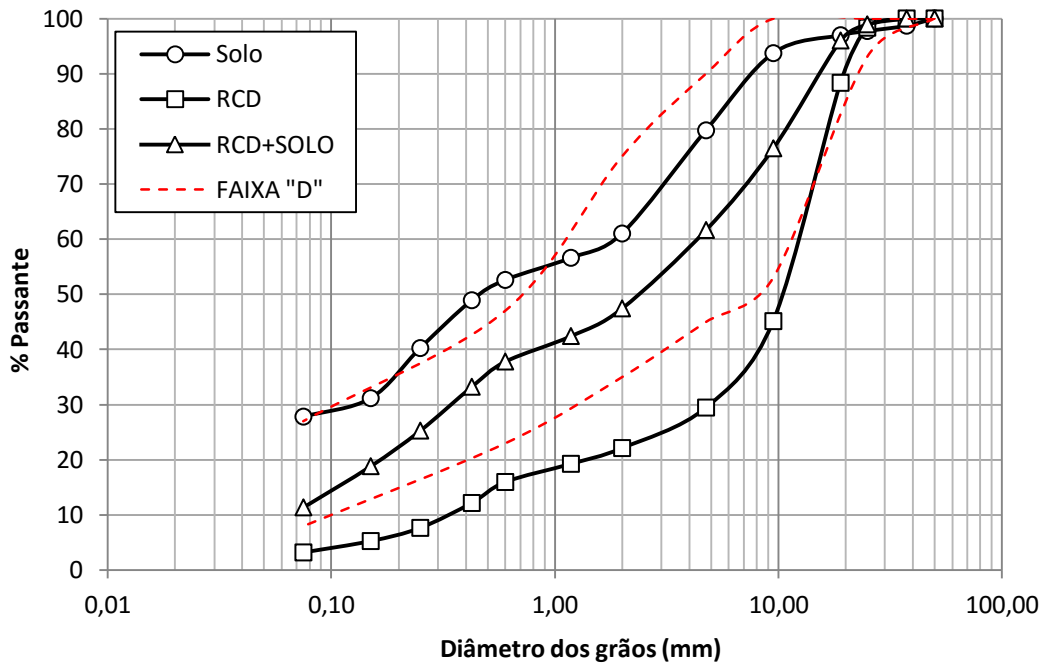
Fonte: A autora.

Figura 37 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "C" do DNIT.



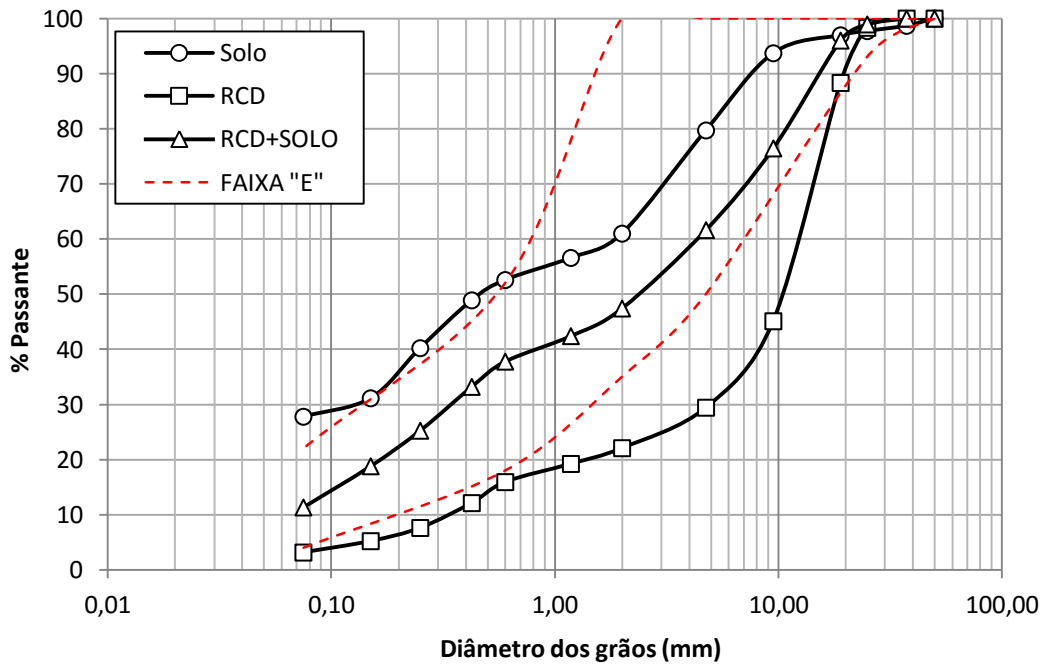
Fonte: A autora.

Figura 38 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "D" do DNIT.



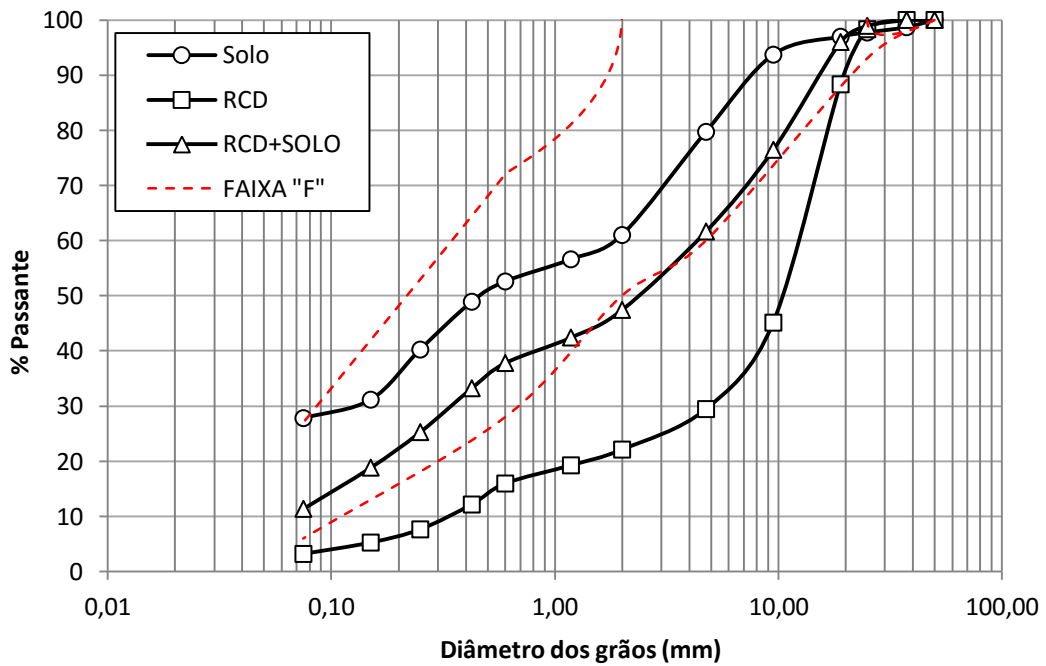
Fonte: A autora.

Figura 39 - Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "E" do DNIT.



Fonte: A autora.

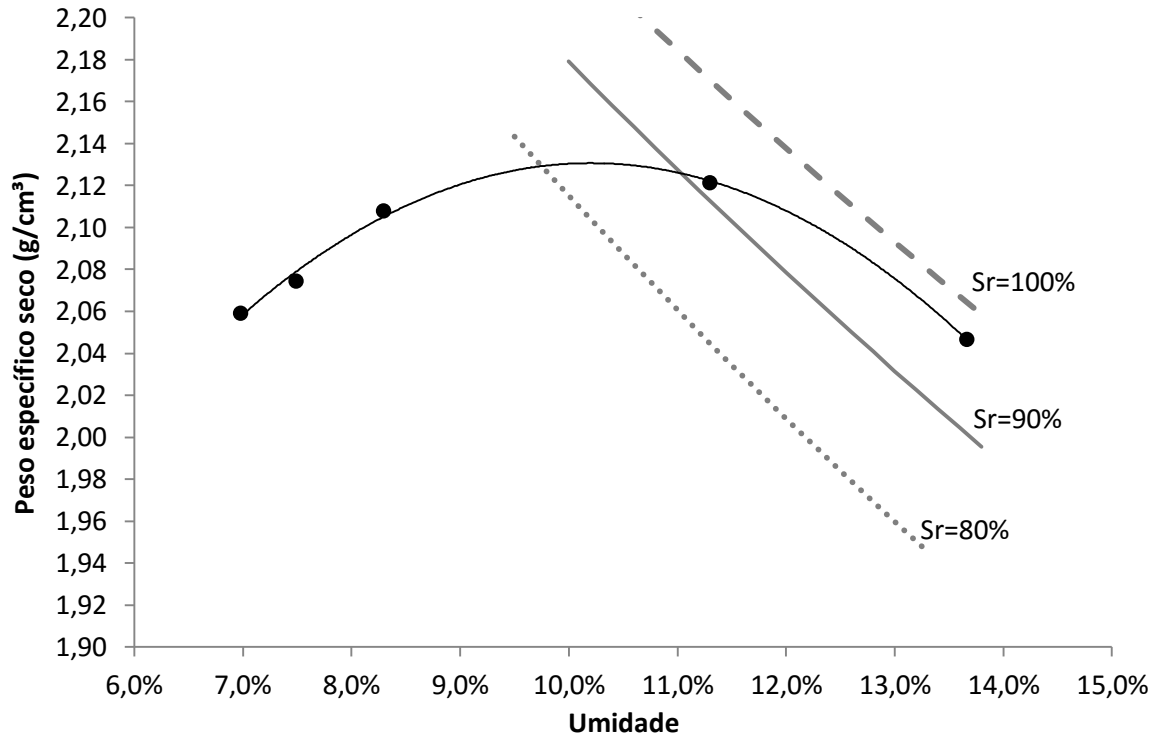
Figura 40- Curvas granulométricas dos materiais da pesquisa e faixa "F" do DNIT.



Fonte: A autora.

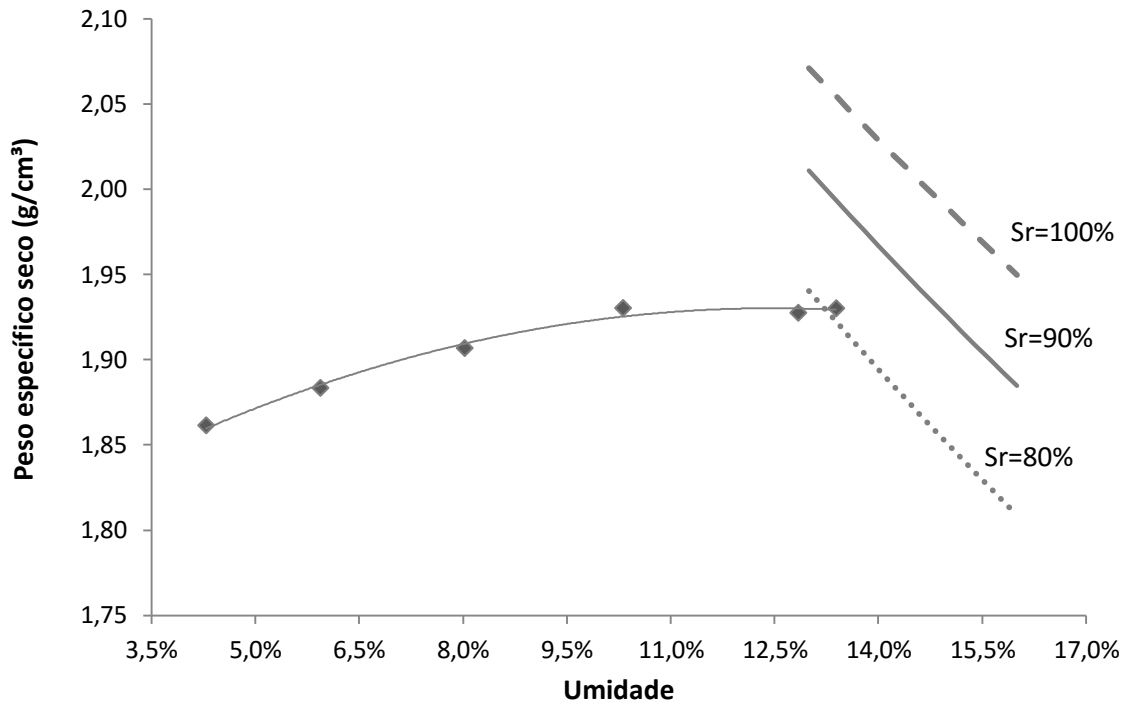
APÊNDICE B

Figura 41 - Curva de compactação do Solo



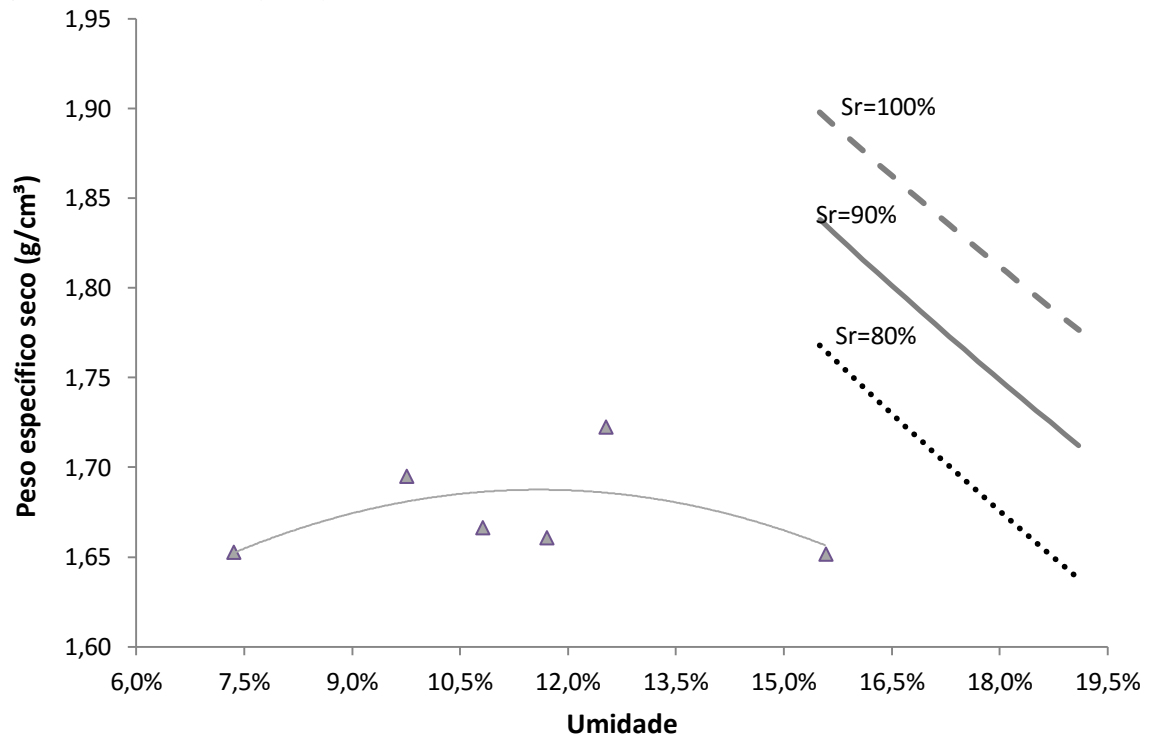
Fonte: A autora.

Figura 42 - Curva de compactação da mistura RCD- Solo (1:1).



Fonte: A autora.

Figura 43 - Curva de compactação do RCD.



Fonte: A autora.