

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM AGREGADO RECICLADO
DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) PARA
UTILIZAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

ALEJANDRA MARÍA GÓMEZ JIMÉNEZ

ORIENTADOR: MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD.

1. INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A proteção do meio ambiente é um fator básico que está ligado à sobrevivência da raça humana. Temas como consciência ambiental, proteção dos recursos humanos e desenvolvimento sustentável desempenham um importante papel nos requerimentos modernos para os projetos de construção (Oikonomou, 2005).

Oikonomou (2005) ressalta que os materiais de construção são muito significativos em nossas vidas considerando que em 90% do tempo estamos dentro de edifícios ou infra-estruturas (rodovias, estradas, pontes, barragens, etc.). Isso faz com que a construção seja responsável por utilizar pelo menos 50% de materiais primários da natureza, o consumo de 40% da energia total produzida e a produção de 50% do lixo das cidades.

A construção civil é reconhecida como uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento de qualquer país, porém, é uma grande geradora de impactos ambientais devido ao intenso consumo de matéria prima, à modificação da paisagem e à grande geração de resíduos (DeLongui *et al.*, 2010). A indústria da construção civil, em função das características particulares do seu processo produtivo, constitui-se em uma grande geradora de resíduos denominados resíduos de construção e demolição (RCD). Esse resíduo consiste em produção de entulho gerado durante a construção, renovação e demolição de edifícios, estradas e pontes. O RCD é composto por materiais volumosos e pesados como concreto, madeira, metais e vidro, entre outros.

Esses resíduos geralmente não têm um tratamento ou disposição final adequado sendo levados, no melhor dos casos, para aterros sanitários onde devido a seu grande volume diminuem consideravelmente a vida útil desses locais. Em outros casos são simplesmente colocados em botas-foras ilegais onde o material vai-se acumulando por vários anos ou mesmo décadas até formar terrenos artificiais aparentemente estáveis que geralmente viram assentamentos humanos. O acúmulo desse tipo de resíduos em encostas favorece os movimentos de massa como os que aconteceram em Niterói, estado de Rio de Janeiro, em abril de 2010, ou no município de Bello, Colômbia, em dezembro de 2010, onde após fortes chuvas ocorreram escorregamentos classificados como fluxos de detritos e lodos. Os dois deslizamentos deixaram 100 pessoas mortas e

foi comprovado, em ambos os casos, a existência prévia de botas-foras de resíduos de construção e outros materiais antrópicos. Esses fenômenos geram grande preocupação entre autoridades governamentais e ambientais.

A quantidade de RCD gerada em nível mundial e local é significativa e o incremento de volume é cada vez maior devido à construção de novos edifícios e estruturas, que permitam o desenvolvimento das cidades; demolição de edifícios e estruturas que chegaram ao final da sua vida útil; reforma de estruturas para cumprir com novos requisitos ou necessidades; fenômenos naturais como terremotos, tormentas, enchentes e fenômenos antrópicos com as guerras.

Na União Européia, são gerados em torno de 300 milhões de ton/ano. Segundo a *Environmental Protection Agency* dos Estados Unidos (EPA), em 2003, a produção de RCD chegou a um total de 170 milhões de toneladas provenientes das diferentes fontes ou atividades da construção como apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Quantidade estimada de RCD produzido nos Estados Unidos durante 2003 (modificado de EPA, 2003)

Fonte	Residencial		Não Residencial		Total	
	Milhões de toneladas	Porcentagem (%)	Milhões de toneladas	Porcentagem (%)	Milhões de toneladas	Porcentagem (%)
Construção	10	15	5	5	15	9
Renovação	38	57	33	32	71	42
Demolição	19	28	65	63	84	49
Total	67	100	103	100	170	100
Porcentagem (%)	39		61			

Em Hong Kong a produção de resíduos era de 19,6 ton/ano em 2004. Segundo Tam *et al.* (2008), na Austrália a produção de RCD é o 44% dos resíduos sólidos urbanos (RSU) o que equivale a seis milhões de ton/ano. No Brasil, considerando a geração de 0.4 toneladas de entulho por habitante/dia, seriam produzidos 68 milhões de ton/ano. Somente na cidade de São Paulo, são gerados seis milhões de ton/ano (Kazmierczak, 2008). A estimativa da Associação das Empresas de Coletores de Entulho de Obra e Similares de Brasília (ASCOLES) é que 70% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no DF são constituídos por RCD, com uma carga de 6000 toneladas por dia o

que equivale a 2.2 milhões de toneladas por ano (Farias, 2009), considerando apenas resíduos coletados pelo Serviço de Limpeza Urbana (SLU).

A quantidade de resíduos gerados varia consideravelmente de uma comunidade para outra. Essa variação é originada em parte pelas diferentes técnicas de construção e o crescimento histórico e econômico da comunidade. Em zonas de crescimento rápido, o fluxo de resíduos RCD decorre principalmente de materiais de construção de novos edifícios, geralmente com pequenas quantidades de material de demolição. Grandes volumes de resíduos de demolição são gerados quando edifícios antigos são derrubados completa ou parcialmente. Os materiais que compõem os RCD também variam conforme o tipo de edificação e os métodos empregados na indústria da construção (EPA, 2003).

Além da preocupação com a geração de RCD, existe o fato de que a exploração indiscriminada dos recursos naturais provocou a escassez desses e uma rápida deterioração do entorno e das jazidas, obrigando a exploração de novas fontes de materiais. No Brasil, a região do Distrito Federal é conhecida nacionalmente pela carência de materiais adequados para a estrutura do pavimento. As jazidas de cascalho, tradicionalmente utilizadas como material de base rodoviária, encontram-se hoje em fase de exaustão. Há também insuficiência de britas de qualidade que possam ser utilizadas como agregados para as camadas de base, sub-base ou para as misturas asfálticas dos revestimentos (Farias, 2009).

Pesquisas desenvolvidas em países como Holanda, Hong Kong, Espanha, Alemanha, Estados Unidos e Brasil indicam que os resíduos de construção civil e demolição apresentam potencialidades na substituição de agregados usados para concreto e pavimentação, considerando que em seu primeiro uso foram selecionados como matéria prima essencial desses produtos, e ainda conservam muitas das suas propriedades originais. Então os agregados reciclados poderiam ocupar o lugar das britas graduadas e de areias de diferentes tamanhos, entre outros.

Dentro dessas perspectivas e tendo-se em conta a capacidade instalada da Universidade de Brasília (UnB) em termos de recursos físicos e humanos, esta pesquisa foi desenvolvida, abordando a possibilidade de re-uso dos RCD produzidos

em Brasília como materiais convenientes para utilização em pavimentação. Para isso, foi necessário separar e classificar o resíduo, com o intuito de que cada leva de material obtida fosse adequada a uma faixa granulométrica normalizada, possibilitando uma comparação entre os materiais alternativos e os naturais atualmente usados, determinando as propriedades físicas e mecânicas a fim de obter-se informações sobre sua composição e estabilidade química; tamanho, forma e distribuição das partículas e seu comportamento mecânico quando for submetido a carregamentos cíclicos.

Uma vez avaliado o comportamento físico e mecânico dos RCD do DF, se teria uma base sólida para a efetiva promoção do resíduo triturado como material adequado para uso na estrutura de pavimentos, o qual ainda sofre preconceitos.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral verificar a aplicabilidade de um resíduo de construção civil e demolição na estrutura de pavimentos.

Para atender a esse objetivo, serão desenvolvidos os seguintes passos específicos:

- Caracterização física do resíduo de construção civil e demolição mediante os ensaios tradicionais empregados para agregados naturais;
- Análise da influência do processo de compactação na variação de tamanho, distribuição e forma das partículas;
- Avaliação do comportamento mecânico do resíduo de construção e demolição, submetido a diferentes períodos de cura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de análise do RCD como material para camadas de base de pavimentos, utilizada nesta pesquisa é baseada nos métodos tradicionais de caracterização física, química e mecânica de agregados naturais. O fato de testar o material alternativo como um agregado natural, permite fazer uma comparação entre a qualidade oferecida pelo RCD e pelos materiais tradicionais, usados em diferentes obras de infraestrutura. Neste capítulo são apresentados todos os ensaios de caracterização feitos sobre uma amostra de RCD de Brasília resultante da demolição do estádio Mané Garrincha.

2.1 SELEÇÃO E COLETA DE MATERIAL

O resíduo de construção e demolição sobre o qual se fizeram todas as caracterizações físicas, químicas e mecânicas desta pesquisa, foi fornecido por Areia Bela Vista, empresa dedicada à exploração e produção de areia natural para fabricação de concreto e argamassa e à reciclagem de RCD para a produção de areia utilizada em concreto asfáltico. O material selecionado faz parte do entulho gerado durante a demolição do estádio Mané Garrincha da cidade de Brasília. Esses resíduos foram levados e estocados em Sobradinho II onde a empresa Areia Bela Vista tem suas instalações, a fim de serem submetidos ao processo de reciclagem.

Dentro do reconhecimento preliminar de campo, foi possível observar que o entulho era composto em maior parte por pedaços de concreto, argamassa, tijolos, telhas, contra pisos e azulejos (ver Figura 2.1). Materiais contaminantes como: barras de aço, tubos de ferro, tubos de PVC e pedaços de madeira com tamanhos superiores a 50 cm também estavam presentes no local. Materiais incluídos na classe C da resolução CONAMA N° 307/2002 tais como o gesso, não foram encontrados. Foram necessários dois processos de triagem e britagem antes do RCD ser considerado como agregado reciclado. Esses dois processos se descrevem a seguir.



Figura 2.1. Entulho gerado pela demolição do estádio de futebol Mané Garrincha

2.1.1 Triagem e Britagem Primária

Uma vez feito o reconhecimento preliminar do material, começou-se o processo de triagem para a separação do material contaminante de tamanho maior e se iniciou a britagem. Durante este processo pequenos fragmentos metálicos foram retirados com

ajuda de uma banda magnética instalada no britador. A Figura 2.2 apresenta o britador de mandíbulas da empresa Areia Bela Vista utilizado para a trituração primária.

O material foi reduzido a um tamanho médio entre 10 e 12 cm. Durante a britagem e como processo adicional, foi retirado o aço restante por meio de bandas magnéticas instaladas na esteira de saída do britador; uma quantidade aproximada de 12 toneladas de entulho foi transformada em RCD e transportada em caminhão para o Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER) da Universidade de Brasília (UnB), sendo armazenado em um local protegido da chuva e posteriormente re-britado e caracterizado.



Figura 2.2. Britador de mandíbulas, empresa Areia Bela Vista

2.1.2 Triagem e Britagem Secundária

A segunda britagem foi feita no laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da UnB. O britador de mandíbulas utilizado neste processo se apresenta na Figura 2.3. Antes de levar o material até o laboratório de Geocronologia para britagem, foi feita uma segunda triagem, retirando pedaços de madeira, plástico e ferro que ainda estavam presentes no resíduo. A Figura 2.4, ilustra estes materiais.

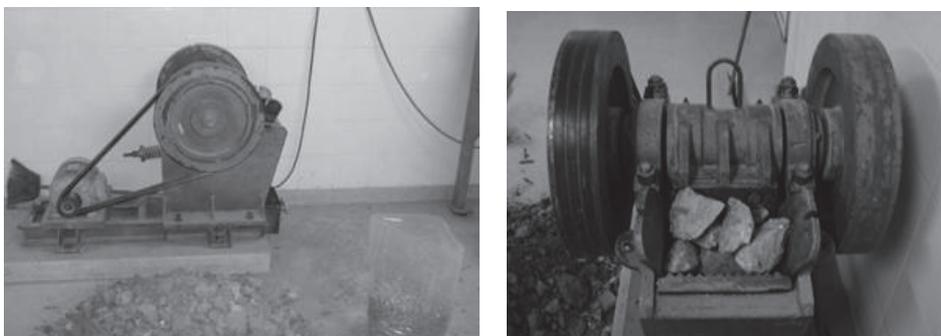


Figura 2.3. Britador de mandíbulas utilizado na britagem secundária. Laboratório de Geocronologia



Figura 2.4. Triagem de materiais contaminantes: a) madeira, b) plásticos, c) ferro

Após do segundo processo de britagem foi realizado um ensaio de granulometria por peneiramento. As curvas granulométricas obtidas sobre três amostras do agregado reciclado de RCD são apresentadas na Figura 2.5. Com estas curvas, foi possível definir a faixa granulométrica sobre a qual seriam feitos todos os ensaios da pesquisa sendo essa a faixa C da especificação de serviço (DNER-ES 303/97) apresentada na Tabela 2.1.

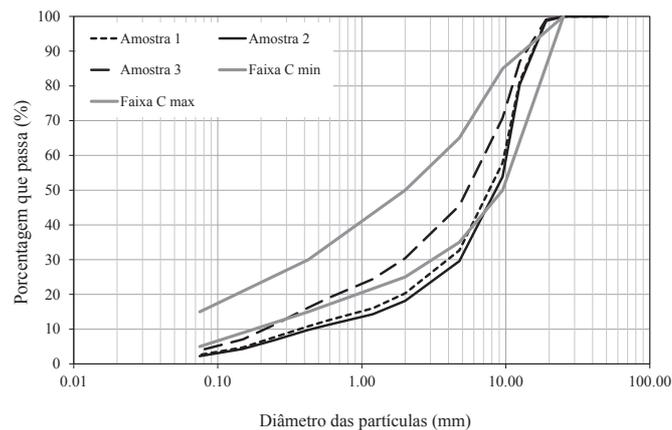


Figura 2.5. Distribuição granulométrica do RCD após britagem no laboratório de Geocronologia

Aproximadamente 1600 quilos de material com tratamento primário foram transportados até o laboratório de Geocronologia e britados. Logo após deste procedimento, o material foi misturado até conseguir uma homogeneidade granulométrica aparente e colocado em sacos plástico com um peso aproximado de 16 quilos cada e que foram consideradas amostras representativas do agregado reciclado de RCD. Antes de começar os ensaios de caracterização, as amostras foram secas ao ar até atingir a sua umidade higroscópica. Durante o processo de secagem, o material foi cuidadosamente misturado com o intuito de gerar amostras homogêneas e evitar perda de finos.

Tabela 2.1. Faixas granulométricas para base estabilizada granulometricamente (DNER-ES 303/97)

Tipos	N>5x10 ⁶				N<5x10 ⁶		Tolerâncias
	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
N°4	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	10-100	±5
N°10	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100	±5
N°40	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70	±2
N°200	2-8	5-15	5-15	10-25	6-20	8-25	±2

2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os ensaios de caracterização física e mecânica foram realizados no LER e no laboratório de Geotecnia da UnB, utilizando normas de ensaio nacionais e internacionais como as ABNT - NBR, DNER, ASTM, AASHTO e BS.

2.2.1 Materiais Constituintes do Agregado Reciclado de RCD

A metodologia de ensaio empregada para conhecer os materiais constituintes do RCD estudado foi adotada da pesquisa de Motta (2005). Foram selecionados 13 quilos de material seco os quais foram misturados para homogeneizar a amostra e posteriormente submetidos a peneiramento visando separação dos tamanhos grãos (1" – N°4), dos miúdos (N°4 – fundo), as peneiras usadas para a separação do material foram: 25.4 mm (1"), 19.0 mm (3/4"), 12.5 mm (1/2"), 9.5 mm (3/8"), 4.75 mm (N°4), 2.0 mm (N°10), 0.425 mm (N°40), 0.075 mm (N°200) e fundo (< 0.075 mm).

Uma vez separado o material por tamanho, a classificação visual dos diferentes materiais encontrados na sua composição foi facilitada. Inicialmente o material foi separado de forma manual e dividido nas seguintes classes: materiais cimentícios (concreto e argamassa); materiais pétreos (britas e seixos rolados); cerâmicos vermelhos (telha e tijolo); cerâmicos brancos (azulejos e pisos); contrapisos; materiais contaminantes (telhas de amianto, gesso, madeira, aço e arame). Os materiais que

passaram na peneira N°4 (4.75 mm) foram classificados como finos e não foi possível a separação manual desses.

2.2.2 Distribuição Granulométrica do Agregado Reciclado de RCD

A curva de distribuição granulométrica mostra tanto o tamanho das partículas presentes em um solo como a distribuição de partículas dos diferentes tamanhos. Essa distribuição tem uma influência direta na forma com que os vazios do solo serão ocupados pelas partículas sendo que um material granular bem graduado apresentará menor índice de vazios e mais entrosamento entre grãos, gerando um maior ângulo de atrito macroscópico.

Tendo em vista o interesse de a pesquisa ser a aplicação do agregado reciclado como material de base para pavimentos, a análise granulométrica do RCD foi feita somente por peneiramento seguindo os procedimentos descritos na norma DNER-ME 080/94. Um total de seis curvas granulométricas foram obtidas, e com elas foi possível conhecer o diâmetro máximo nominal do agregado do RCD, classificá-lo como agregado pedregulhoso, arenoso ou fino, assim como os coeficientes de curvatura e uniformidade do material.

2.2.3 Teor de Materiais Pulverulentos

Materiais pulverulentos são partículas minerais com dimensão inferior a 0.075 mm, inclusive os materiais solúveis em água, presentes nos agregados. No geral a presença desses materiais é indesejável na constituição do concreto. Um agregado com alto teor de materiais pulverulentos diminui aderência do agregado a pasta ou argamassa, prejudicando de forma direta a resistência do concreto caso esse seja produzido com alto índice de material pulverulento. Para a realização do ensaio a amostra de agregado deve ser seca em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$. As massas do material são selecionadas segundo a dimensão máxima característica do agregado como apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Massa mínima requerida para a determinação de material pulverulento

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima por amostra de ensaio (kg)
< 4.75	0.50
4.75 < 19.00	3.00
> 19.00	5.00

Após determinar o peso da amostra de ensaio, essa é colocada num recipiente metálico e a seguir é coberta com água. Com ajuda de uma haste mexe-se o material sem provocar abrasão a fim de que os materiais mais finos se soltem das partículas maiores. A água deve ser despejada através das peneiras, 1.2 mm e 0.075 mm, e o processo deve ser realizado até que a água da lavagem fique limpa. Finalizando o processo, o material deve ser colocado em estufa a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ até atingir peso constante, e finalmente o peso final do material deve ser determinado. O teor de material pulverulento será a média aritmética do resultado obtido entre duas amostras. A equação para o cálculo é dada por:

$$TP = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad (2.1)$$

em que:

TP = teor de material pulverulento;

W_i = peso inicial da amostra;

W_f = peso final da amostra.

2.2.4 Limites de Atterberg

No início do ano 1900 o cientista sueco chamado Atterberg desenvolveu um método para descrever a consistência dos solos fino granulares segundo a variação do teor de umidade. Consequentemente Atterberg definiu quatro estados do solo dependentes da sua capacidade de reter água, os quais se relacionam da seguinte forma: a quantidade de água em porcentagem que o solo precisa para passar do estado sólido a semi-sólido está definida como o limite de contração; a quantidade de água necessária para que o solo passe do estado semi-sólido ao estado plástico se define como limite de plasticidade e, finalmente, a quantidade de água que um solo fino granular precisa para passar do estado plástico ao estado líquido se define como limite de liquidez.

Dentro desta pesquisa, se fizeram os limites de liquidez e de plasticidade. No limite de liquidez, o procedimento de ensaio utilizou a norma britânica BS 1377-2/90 que prescreve o uso de um cone de penetração com ângulo e peso padronizado (ver Figura 2.6) em substituição ao uso do aparelho de Casagrande para determinar a umidade na qual o solo começaria a fluir. O ensaio de limite de plasticidade foi feito mediante o procedimento da norma DNER-ME 082/94.

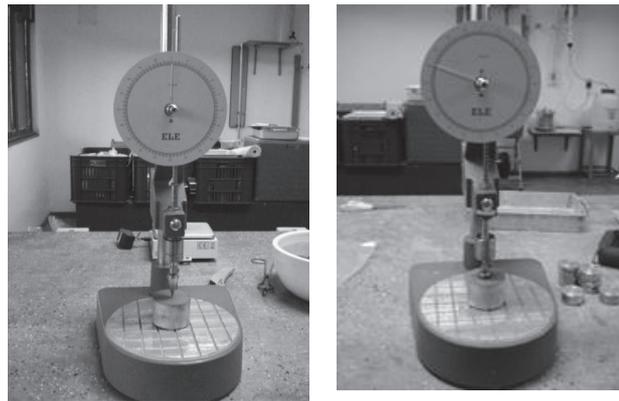


Figura 2.6. Cone de penetração para o ensaio de limite de liquidez

2.2.5 Absorção do Agregado Reciclado de RCD

A absorção é uma das propriedades prioritárias para o uso do material granular na composição de estruturas de pavimentos, uma vez que a quantidade de água presente nas misturas pode variar dependendo da capacidade de retenção de água do material selecionado.

O procedimento adotado para a realização do ensaio de absorção sobre o agregado de RCD graúdo se encontra na norma DNER-ME 081/98. Esse ensaio fornece o aumento percentual de massa que o agregado sofre devido ao preenchimento por água de seus vazios permeáveis, em relação à massa seca. O valor da absorção é obtido mediante a expressão:

$$a = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \quad (2.2)$$

em que:

a = absorção;

M_s = massa, ao ar, do agregado seco em estufa;

M_{SSS} = massa, ao ar do agregado na condição saturada superfície seca.

2.2.6 Massa Específica e Densidade dos Agregados Graúdos e Miúdos que Compõem o RCD

A densidade aparente é definida como a razão entre o peso ao ar da unidade de volume de um agregado (porção impermeável), a uma dada temperatura e o peso ao ar da massa de igual volume de água destilada, livre de gases, à mesma temperatura (Souza, 2010). O procedimento de ensaio para a obtenção da densidade aparente do RCD encontra-se descrito detalhadamente na norma de ensaio DNER-ME 081/98. A Figura 2.7 apresenta as diferentes etapas do RCD durante o ensaio de absorção e densidade aparente.

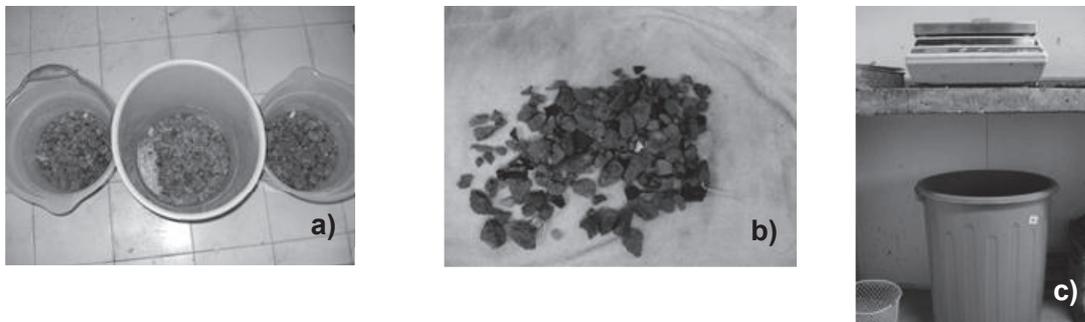


Figura 2.7. Ensaio de absorção e densidade aparente do agregado graúdo de RCD: a) etapa de saturação 24 h; b) massa saturada superficialmente seca e c) massa saturada submersa

O cálculo da densidade aparente do agregado graúdo é dado por:

$$D_{ap} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{Sub}} \quad (2.3)$$

em que:

D_{ap} = densidade aparente;

M_s = massa, ao ar, do agregado seco em estufa;

M_{SSS} = massa, ao ar, do agregado na condição saturada superfície seca;

M_{Sub} = massa submersa do agregado

No caso da fração fina do RCD, dois métodos de ensaio foram utilizados. Para determinar a massa específica foi utilizado o método do frasco Chapman, descrito na norma DNER-ME 194/98. Nesse método a amostra é formada pelos grãos que passam na peneira de abertura 4.75 mm e ficam retidos na malha de abertura 0.075 mm. O ensaio consiste em colocar uma amostra de 500 g dentro do frasco, o qual contém

água destilada até a marca de 200 cm³. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume ocupado pelo conjunto água e agregado, o cálculo da massa específica é dado por:

$$\rho = \frac{500}{L - 200} \quad (2.4)$$

com:

ρ = massa específica real do agregado miúdo de RCD;

L = leitura no frasco Chapman.

2.2.7 Equivalente de Areia

Alguns agregados contêm certos materiais que os tornam impróprios para utilização em estruturas de pavimentação. Dentro desse grupo de materiais encontram-se: vegetação, conchas e grumos de argila presentes sobre a superfície das partículas do agregado graúdo, entre outros (Bernucci *et al.*, 2006). No caso do RCD podem existir partículas de solo que poderiam mudar o comportamento mecânico do material considerado como inerte.

O ensaio de equivalente de areia determina a proporção relativa de materiais tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos. Nesse ensaio, uma amostra de agregado com tamanhos de partículas menor do que 4.75 mm, medida em volume numa cápsula padrão, é colocada em uma proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio, e após 10 minutos sob saturação a amostra é misturada durante 45 segundos, com ajuda de um equipamento mecânico. Após tais procedimentos deve-se preencher o conjunto com solução até a marca de 15 in e deixá-lo em repouso por 20 minutos, a fim de permitir a sedimentação e separação entre areia e argila. O procedimento de ensaio se encontra na norma ASTM D2419-09. O equivalente de areia se calcula como:

$$EA = \frac{\text{leitura de areia}}{\text{leitura de argila}} \times 100 \quad (2.5)$$

com: EA = equivalente de areia.

2.2.8 Índice de Forma

A forma das partículas dos agregados influi na trabalhabilidade e resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas e muda a energia de compactação necessária para se alcançar certa densidade. A forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f) calculado como:

$$f = \frac{P_1 + 0.5P_2}{100n} \quad (2.6)$$

sendo:

f = índice de forma;

P_1 = soma das porcentagens retidas nos crivos I, de todas as frações que compõem a graduação;

P_2 = soma das porcentagens retidas nos crivos II, de todas as frações que compõem a graduação;

n = número de frações que compõem a graduação escolhida.

Para começar o ensaio deve-se conhecer a faixa granulométrica na qual o agregado a analisar se enquadra, que no caso particular desta pesquisa é a faixa C, como citado anteriormente. Para essa faixa usa-se um conjunto de crivos de abertura circular e de crivos redutores definidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Crivos circulares e redutores utilizados para a faixa granulométrica C (DNER-ME 086/94)

Graduação	Crivos de abertura circular (mm)		Pesos das frações da amostra (g)	Crivos redutores correspondentes (mm)	
	Passando	Retido		Crivo I	Crivo II
C	19.0	16.0	2000	9.5	6.3
	16.0	12.7	2000	8.0	5.3
	12.7	9.5	2000	6.3	4.2

Nessa pesquisa, o ensaio de índice de forma foi realizado antes e após submeter o RCD ao ensaio de compactação com a energia Proctor intermediária, o procedimento adotado encontra-se descrito na norma DNER-ME 086/94.

2.2.9 Durabilidade em Sulfato de Magnésio

A característica de resistência à desintegração química é quantificada através de ensaio que consiste em atacar o agregado com solução saturada de sulfato de

magnésio, em cinco ciclos de imersão com duração de 16 a 18 horas, à temperatura de 21°C, seguido de secagem em estufa a 110°C ± 5°C, até atingir peso constante (Bernucci et al., 2006). Durante o desenvolvimento da pesquisa, um ensaio de durabilidade com sulfato de magnésio foi efetuado sobre o agregado graúdo e miúdo de RCD. O procedimento adotado para a realização do ensaio encontra-se descrito com detalhe na norma ASTM C 88-05.

2.2.10 Resistência ao Desgaste por Abrasão Los Angeles

Durante o processo construtivo de estradas, os agregados estão sujeitos a quebras e abrasão. A abrasão ocorre também durante a ação do tráfego, devendo os agregados apresentar resistência às quebras, degradação e desintegração (Bernucci *et al.*, 2006). No ensaio de resistência à abrasão Los Angeles sobre o RCD, duas amostras foram testadas: uma com a graduação B e outra com a graduação C, segundo o procedimento da norma DNER-ME 035/98. Tal procedimento objetiva abranger a totalidade da faixa granulométrica C definida dentro da pesquisa como a faixa de estudo. O ensaio consiste em colocar uma amostra de agregado com aproximadamente 5000 g no interior de um cilindro de um equipamento padronizado ver (Figura 2.8 a), acrescentando-se um número variado de esferas de aço conforme a granulometria da amostra. As esferas induzem impactos nas partículas durante as suas revoluções. Após do ensaio (Figura 2.8 b), o resultado é avaliado pela redução de massa dos agregados retidos na peneira N°12 (12.7 mm) em relação à massa inicial da amostra especificada (Bernucci *et al.*, 2006).

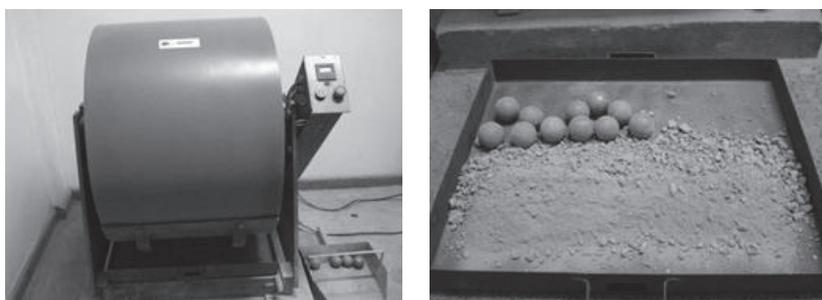


Figura 2.8. Ensaio de abrasão Los Angeles: a) equipamento, b) amostra após ensaio

2.3 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Neste grupo de ensaios encontram-se: compactação Proctor com diferentes energias de compactação, índice de suporte Califórnia (CBR), módulo de resiliência e compressão simples. A descrição da metodologia usada em cada um deles é apresentada nos itens seguintes.

2.3.1 Ensaio de Compactação em Laboratório

O ensaio de compactação em laboratório é geralmente usado para determinar a umidade ótima e o peso específico aparente seco máximo do material analisado para uma determinada energia de compactação. No caso da pesquisa além desses dois parâmetros, este ensaio forneceu dados da influência da umidade sobre o RCD quando compactado e da influência da energia de compactação sobre a mudança da curva granulométrica original. Os ensaios de compactação foram feitos em totalidade no Laboratório de Engenharia Rodoviária (LER), com ajuda de um compactador mecânico (marca ELE) como apresentado na Figura 2.9. A energia de compactação adotada para esta pesquisa corresponde à energia Proctor intermediária estabelecida na norma NBR 7182/86. Para alcançar esta energia um soquete grande com uma massa equivalente a 4536 ± 10 g e altura de queda de 452 ± 2 mm, foi utilizado. O corpo de prova foi compactado em um molde metálico de 152 mm de diâmetro e 115 mm de altura, a compactação foi feita em cinco camadas de 26 golpes cada.



Figura 2.9. Compactador mecânico e corpo de prova de RCD após compactação Proctor

2.3.2 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O ensaio de CBR foi concebido para avaliar a resistência do material frente a deslocamentos significativos impostos por meio de um ensaio de penetração em laboratório. A resistência à penetração do ensaio CBR foi definida com referência a um valor padrão equivalente a 100%. A resistência no ensaio CBR é uma resposta que combina indiretamente a coesão com o ângulo de atrito do material. O CBR é expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de um solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão de referência.

Para fazer a penetração dos corpos de prova utilizou-se uma prensa Contenco (I-1006-F) com capacidade máxima de 50 kN, localizada no laboratório de Geotecnia da UNB. A velocidade de penetração do pistão padrão foi 1.27 mm/min. A Figura 2.10 apresenta a prensa usada para todos os ensaios CBR. Os ensaios foram feitos segundo o procedimento da norma ASTM D1883-07. A penetração foi feita por ambas as faces dos corpos de prova a fim de verificar os resultados.



Figura 2.10. Equipamento usado na penetração do ensaio CBR sobre RCD

2.3.3 Módulo de Resiliência (MR)

Até a década de 70, os métodos de dimensionamento usualmente empregados no Brasil caracterizavam-se por focar, basicamente, a capacidade de suporte dos pavimentos em termos de ruptura plástica sob carregamento estático, retratada através do valor de CBR. No entanto, observa-se que boa parte da malha rodoviária vinha

apresentando uma deterioração prematura, que era atribuída à fadiga dos materiais gerada pela contínua solitação dinâmica do tráfego atuante.

A resposta resiliente dos materiais granulares se obtém usualmente pelo módulo de resiliência. Para ensaios triaxiais cíclicos com tensão confinante constante, o módulo de resiliência se define como a relação entre a tensão desvio aplicada repetidamente e a deformação axial recuperável da amostra.

$$MR = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{\varepsilon_1} \quad (2.7)$$

em que:

MR = módulo de resiliência;

σ_1 = tensão principal maior ou tensão axial;

σ_3 = tensão principal menor ou tensão confinante;

ε_1 = deformação axial resiliente, correspondente a um número particular de repetição da tensão-desvio.

Os ensaios de módulo de resiliência foram feitos sobre corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura em uma prensa triaxial cíclica da ELE/IPC Global (Figura 2.11 a). Os procedimentos adotados para a realização dos ensaios encontram-se descritos de forma detalhada na norma AASHTO T307 - 99. A compactação dos corpos de prova foi feita com a energia intermediária em um molde metálico tripartido. Para garantir a energia de compactação, todos os corpos de prova foram compactados em três camadas de 32 golpes cada, em umidade ótima teórica de 13% e peso específico aparente seco médio de 17.5 kN/m³.

O ensaio começa com o pré-condicionamento da amostra mediante a aplicação 500 repetições de uma tensão desvio de 103.4 kPa. O tipo de onda utilizado é Haversine. Começa então uma sequência de carregamentos aplicados em estágios, de forma que tanto a tensão de confinamento (σ_3) quanto a tensão desvio (σ_d) são variáveis. Inicialmente a tensão confinante é definida, e a tensão desvio é aumentada. Num segundo momento, a tensão de confinamento é incrementada e a tensão desvio varia. Os valores de módulo de resiliência são calculados para uma tensão desvio e uma tensão confinante específicas.

2.3.4 Resistência à Compressão não Confinada ou Simples (RCS)

O ensaio de compressão não-confinada é um tipo especial de ensaio não adensado e não drenado feito normalmente para argilas com a pressão de confinamento σ_3 igual a zero. Uma carga axial é aplicada a uma velocidade de 2 mm/min num corpo de prova para causar ruptura. No momento da ruptura, a tensão principal menor total é zero e a tensão vertical será a tensão principal maior σ_1 . Ensaios de compressão simples sobre amostras cilíndricas de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura foram feitos. Os corpos de prova testados passaram primeiro por ensaios de módulo de resiliência e a seguir foram levados até a ruptura na compressão não confinada. Uma prensa Contenco (I-1006-F) com capacidade máxima de 50 kN localizada no laboratório de Geotecnia da UNB foi adaptada e utilizada na execução dos ensaios (Figura 2.11 b). Os corpos de prova tinham diferentes períodos de cura sendo eles: imediato, 1, 7, 15, 30, 60 e 90 dias. A velocidade de aplicação de carga e o procedimento de ensaio encontra-se descrito de forma detalhada na norma ASTM D2166-06.

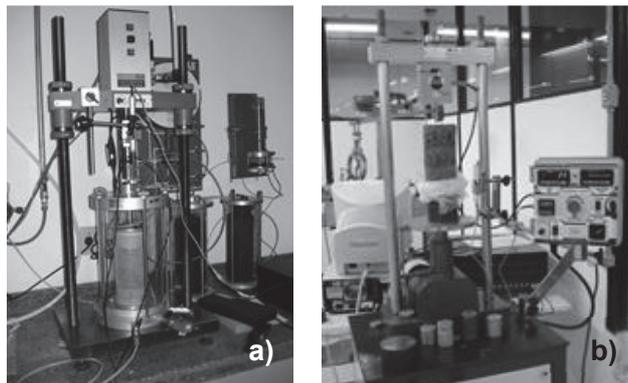


Figura 2.11. Equipamentos: a) Prensa triaxial cíclica b) Prensa para compressão simples

2.3.5 Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento Portland

Os materiais pozolânicos são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes. Existem dois grupos de materiais pozolânicos:

- As pozolanas naturais são de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (- 65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânicas;
- As pozolanas artificiais se originam de tratamentos térmicos ou subprodutos industriais com atividades pozolânicas. Dentro deste grupo se encontram: argilas calcinadas, cinzas volantes, escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral, entre outros.

A atividade pozolânica das amostras do material foi determinada pelo índice de atividade pozolânica com cimento Portland, de acordo com a Norma NBR-5752/92. Os ensaios foram feitos no laboratório de FURNAS.

Para realização dos ensaios mecânicos, foram preparadas argamassas com dois traços diferentes. A argamassa de controle deve conter somente uma areia padrão e cimento Portland com um traço 1:3 (uma parte de cimento e três partes de areia). Para a argamassa com o resíduo de interesse, foi incorporado teor de 35% de RCD em substituição a parte do aglomerante (cimento). Os corpos de prova foram moldados utilizando-se moldes cilíndricos com dimensões de 50 x 100 mm (diâmetro, altura) conforme a NBR-7215/97.

Após a moldagem os corpos de prova foram mantidos nos respectivos moldes e colocados em câmara úmida à temperatura de $23 \pm 2^\circ C$, durante as primeiras 24 horas. Após este período os corpos de prova são desmoldados e colocados em recipientes herméticos que devem assegurar uma temperatura de $38 \pm 2^\circ C$ durante 27 dias. Após completada a cura, os corpos de prova foram retirados do reservatório e submetidos a ensaios de resistência à compressão não confinada, segundo a norma NBR-7215/97, sendo o resultado apresentado em MPa.

2.4 AVALIAÇÃO DA QUEBRA DE GRÃOS DO RCD

Dois métodos foram empregados na avaliação da quebra de grãos. O primeiro é o método descrito na norma DNER-ME 398/99. Esse método fornece o índice de degradação ID_p que tem como objetivo analisar o comportamento do material em função do desgaste sofrido durante a compactação Proctor. Ensaios de granulometria foram feitos sobre o RCD, antes e após os ensaios de compactação, CBR e módulo de resiliência.

O índice ID_p é estabelecido para agregados de rochas naturais e consiste em determinar o deslocamento médio da curva granulométrica da amostra degradada pelo ensaio de compactação, em relação à amostra inicial. É um parâmetro para avaliação laboratorial do desempenho de materiais compactados (Oliveira, 2007). O valor limite sugerido pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) é de 6%, tendo como referência as rochas naturais. Outra forma de avaliar a quebra dos grãos do material foi mediante o parâmetro B_g , proposto por Marsal (1975), no qual é utilizado o material que fica retido entre duas peneiras, diferentemente do método do DENER.

2.5 GANHO DE RESISTÊNCIA POR CIMETAÇÃO DOS RCD

Como apresentado no capítulo dois, diversas pesquisas têm mostrado a possibilidade de ganho de resistência para os RCD e os agregados reciclados de concreto (RCA). Isso se deve à capacidade reativa das partículas cimentícias em presença de água. Para verificar a ocorrência desse comportamento nos resíduos provenientes do Mané Garrincha, foram realizados ensaios de módulo de resiliência e compressão não confinada com diferentes períodos de cura (imediate, 1 dia, 7, 15, 30, 60 e 90 dias).

Os corpos de prova foram compactados segundo o descrito no ensaio de MR e envolvidos em papel filme, sendo colocados posteriormente em tubos de PVC de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura e envolvidos novamente em papel filme. Os corpos de prova foram colocados sobre uma grade em um tanque com água em nível inferior à da grade, visando evitar a perda de umidade dos corpos de prova. A temperatura da sala de armazenagem foi de aproximadamente 25°C durante todo o processo de cura.

3. RESULTADOS E DISCUSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados das caracterizações físicas e mecânicas realizadas sobre o agregado reciclado de RCD. Os valores obtidos foram comparados com as normas e especificações que atualmente involucram o uso destes resíduos em obras de infraestrutura.

3.1 MATERIAIS CONSTITUINTES DO RCD

Para quantificar os materiais que compõem o RCD proveniente do estádio Mané Garrincha, dois procedimentos foram realizados. O primeiro a nível macro,

considerando a amostra total usada na pesquisa, 1600 kg de material. O segundo processo foi realizado em escala menor considerando uma amostra de RCD de 13 kg.

No primeiro nível o material é composto por materiais que são inclusos na classe A da resolução CONAMA 307/2002 – brita, concreto, argamassa, telha e tijolo - além de madeira, plástico e metal, considerados como contaminantes. Na Figura 3.1 percebe-se que a maior parte do material é composto pelo RCD, correspondendo a mais de 99% do total. A parcela composta por materiais contaminantes é formada por madeira, plástico e metal, constitui apenas 0.56% da amostra. Segundo a norma NBR 15115/04, materiais indesejáveis mistos não podem ser usados na construção de bases granulares, podendo estar presentes no resíduo de construção e demolição sempre que a quantidade total for menor que 3%. Assim o resultado obtido para a amostra total se enquadrou no valor especificado pela norma.

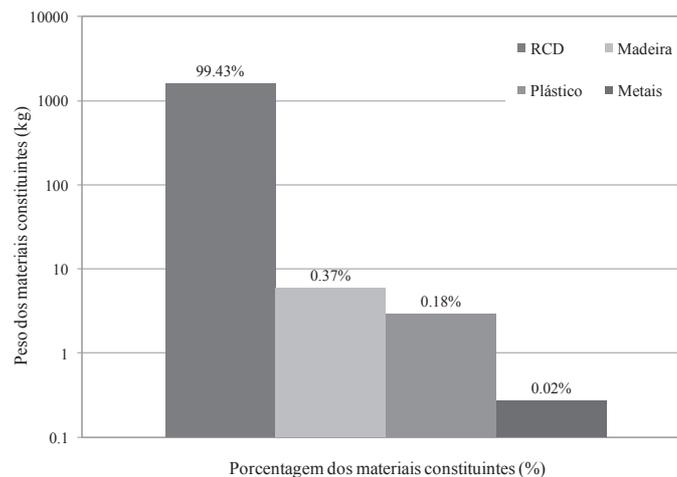


Figura 3.1. Composição da amostra total de resíduo usada na pesquisa

Na segunda etapa foram considerados materiais cimentícios (concreto e argamassa), materiais pétreos (britas e seixos rolados), cerâmicas vermelhas (telha e tijolo), cerâmicas brancas (azulejos e pisos) contrapisos, materiais contaminantes (telhas de amianto, gesso, madeira, aço e arame) e materiais finos menores a 4.75 mm. A representação gráfica do ensaio é apresentada na Figura 3.2. Nessa figura se observa que os materiais cimentícios (concreto e argamassa) fazem a maior contribuição na composição do RCD chegando a 41%, seguido da brita e seixo rolado com 14%, e em menor porcentagem encontram-se os materiais cerâmicos vermelhos e contrapisos com

aproximadamente 1 % cada, e as cerâmicas brancas com 0.3 %. A porcentagem de materiais contaminantes foi de 0.002 %. Vale ressaltar que dentro do material contaminante quantificado não foram encontrados amianto nem gesso.

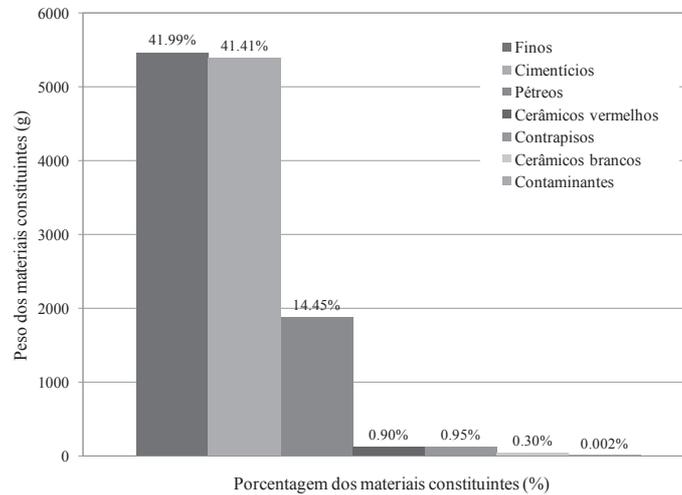


Figura 3.2. Materiais que compõem o RCD segundo a sua natureza

A norma NBR 15116/04 apresenta um procedimento para classificar o RCD em agregado de resíduo de concreto (ARC) e agregado de resíduo misto (ARM), considerando apenas o material retido na peneira N°4 (4.75 mm). No primeiro caso a quantidade de materiais cimentícios (G1) e pétreos (G2) deve ser maior ou igual a 90 %, no segundo, esta quantidade deve ser menor que 90 %. A Tabela 3.2 apresenta as porcentagens de cada material considerado na referida norma.

A porcentagem de fragmentos à base de cimento e rochas presentes no RCD analisado na pesquisa é de 96 %, sendo classificado como um agregado reciclado de concreto (ARC).

Tabela 3.1. Classificação do RCD analisado segundo a norma NBR 15116/04

Unidades	G1	G2	G3			G4	Total
	Cimentício	Pétreo	Cerâmicas vermelhas	Contrapisos	Cerâmicas brancas	Contaminantes	
(g)	5382.4	1878.1	117.0	123.2	39.5	0.2	7540.2
(%)	71.0	25.0	2.0	2.0	1.0	0.003	100.0

3.2 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO RCD

Como foi apresentado no capítulo dois, a granulometria do material após a segunda britagem mostrou que o agregado reciclado de RCD poderia ser enquadrado na faixa granulométrica “C” descrita na norma DNER ES 303/97. A Figura 3.3 apresenta uma curva granulométrica média correspondente ao agregado reciclado (RCD original). Esta curva é bem graduada, não uniforme, com coeficiente de uniformidade $Cu = 49$ e um coeficiente de curvatura $Cc = 3$. A porcentagem de material que passa a peneira 0.42 mm (N°40) é 16%.

Tendo em conta a expectativa de quebra dos grãos, decidiu-se utilizar uma curva granulométrica no limite inferior da faixa C da norma DNER-ES 303/97. Esta curva é mostrada na Figura 3.3 com a denominação RCD analisado. A curva RCD analisado é bem graduada, não uniforme, com um coeficiente de uniformidade $Cu = 61$ e um coeficiente de curvatura $Cc = 5$. O material passante na peneira N°40 corresponde a 15%. Segundo a norma NBR 15115/04, os agregados reciclados de resíduos de construção civil, devem apresentar valores de coeficiente de uniformidade $Cu \geq 10$ e uma porcentagem passante na peneira N°40 (0.42 mm) entre 10% e 40%. O RCD em análise atende estes valores, sendo apropriado no uso em camadas de base.

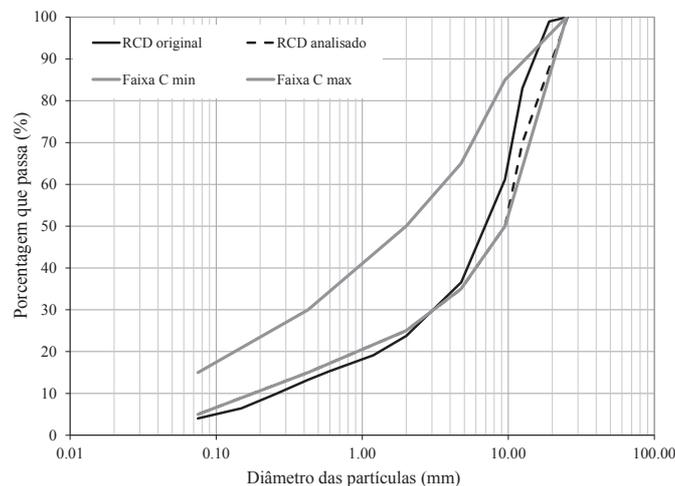


Figura 3.3. Curva granulométrica do agregado reciclado de RCD

A classificação textural do agregado reciclado de RCD foi gerada a partir da curva granulométrica. No caso do RCD original, a textura predominante é o pedregulho fino

(54%) seguido de uma fração arenosa de 41%. Para o RCD analisado a fração composta por pedregulho fino aumenta para 65% e a fração total de areia é de 30%.

Para avaliar a quantidade de finos menores que 0.075 mm lavaram-se as frações graúdas e miúdas do RCD sobre a peneira N°200 segundo o recomendado na norma DNER-ME 266/97. O resultado obtido foi de 3% para a fração graúda e de 12% para a fração fina. A norma NBR 15116/04 dentro dos requerimentos estabelecidos para agregados reciclados, define que o teor de material fino passante na malha 0.075 mm, deve ser menor ou igual a 10% para a fração grossa, e menor ou igual que 15% para a fina. O RCD usado na pesquisa satisfaz a esses requerimentos.

3.3 LIMITES DE ATTERBERG

Os ensaios de limites de consistência ou limites de Atterberg foram feitos com três amostras de RCD, para a fração passante a peneira N°40. A norma BS 1377-2/90 foi empregada para a obtenção do limite de liquidez (LL). A umidade média obtida nos três ensaios por regressão linear para uma penetração de 20 mm foi de 32%. A Figura 3.4 é a representação gráfica dos ensaios de limite de liquidez feitos sobre o RCD analisado.

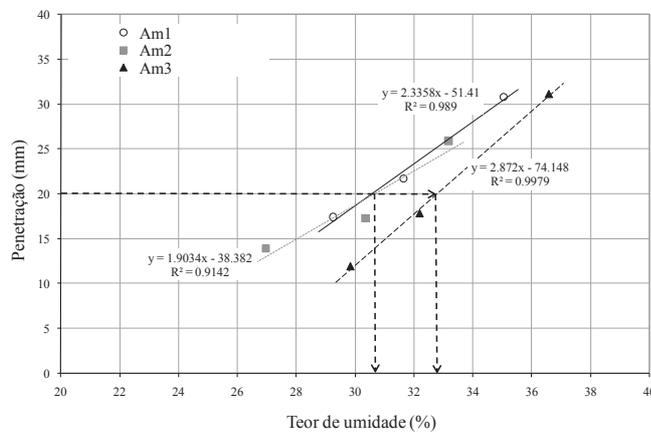


Figura 3.4. Ensaio de limite de liquidez por cone de penetração

O ensaio de limite de plasticidade (LP) sobre as mesmas amostras foi feito segundo o procedimento da norma DNER-ME 082/94. O resultado do ensaio não foi definido, portanto, o material é classificado como não plástico (NP). Segundo a norma NBR EB-2103/91 quando os valores obtidos para LL e IP ultrapassam 25% e 6%, respectivamente, o ensaio de equivalente de areia deverá ser feito e deverá ter um

valor superior a 30%. Sendo este o caso do material testado, o resultado do equivalente de areia será apresentado a seguir.

3.4 EQUIVALENTE DE AREIA (EA)

Para garantir a repetibilidade do ensaio, três testes completos (4 determinações de EA por ensaio) foram feitos e na Tabela 3.2 são apresentados os valores médios obtidos para cada ensaio.

Tabela 3.2. Resultado do ensaio de equivalente de areia para o agregado reciclado de RCD

Ensaio	Massa RCD (g)	Leitura de argila (mm)	Leitura de areia (mm)	Equivalente de areia (%)
1	110	128.9	97	75
2	110	128.3	91	71
3	110	127.0	93	74

Na Tabela 3.2 é possível observar que o valor médio de EA é superior a 70%, o que indica baixo conteúdo de material argiloso satisfazendo a exigência da norma NBR EB-2103/91.

3.5 ABSORÇÃO DO AGREGADO RECICLADO DE RCD

O teor médio de absorção de água obtido para a fração graúda do RCD foi de 7.7%. Diferentes pesquisadores tem estudado esta propriedade. A Tabela 3.3 apresenta alguns resultados de teor de absorção encontrados em outras pesquisas com agregados reciclados. Os resultados apresentados nessa tabela exibem uma variação significativa. Isso se deve à diferença em composição (heterogeneidade) dos agregados reciclados avaliados. Também é possível observar que os resultados mais próximos ao valor de absorção da presente pesquisa (7.67%), foram obtidos por Motta (7.80%) e Carneiro (8.20%).

Motta (2005) verificou que os teores de absorção em britas são inferiores a 2%. É possível dizer que o agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural e portanto a quantidade de água que deve ser adicionada para a compactação deve ser maior que a dos materiais pétreos convencionais. De outro lado a norma NBR 15116/04 considera que a absorção do agregado reciclado graúdo, destinado ao preparo de concreto sem função estrutural deve ser menor ou igual a 7%, mas não há limite

quando o agregado for usado na pavimentação. Isso não descarta a possibilidade de uso do RCD da pesquisa como material de base.

Tabela 3.3. Teores de absorção encontrados em diferentes pesquisas com RCD

Tipo de agregado reciclado	Procedência	Teor de absorção (%)	Autor
NE [*]	Porto Alegre	4.95	Leite (2001)
NE [*]	Salvador (BA)	8.20	Carneiro <i>et al</i> (2001)
RCA ^{**}	São Paulo	7.80	Motta (2005)
RCA ^{**}	Hong Kong	3.17 ^a	Poon <i>et al</i> (2006)
RCA ^{**}	Grécia	3.00	Oikonomou (2005)
RCA ^{**}	Hong Kong	8.93	Tam <i>et al.</i> (2008)
ARC ^{**}	Brasília	7.67	Esta pesquisa

*NE: Não especificado

**RCA-ARC: Agregado reciclado de concreto

^a amostra com tamanho menor que 0.42 mm

3.6 MASSA ESPECÍFICA E DENSIDADE DOS AGREGADOS GRAÚDOS E MIÚDOS QUE COMPÕEM O RCD

É consenso que tanto a massa específica, quanto a massa unitária dos agregados reciclados geralmente apresentam valores um pouco menores que os apresentados pelos agregados naturais correntemente utilizados na produção de concretos (Leite, 2001). Três ensaios para cada fração (graúda ou miúda) de RCD foram realizados. Os ensaios para a determinação da densidade do agregado graúdo foram feitos mediante a norma DNER-ME 081/98, e para o agregado miúdo foi obtida com o procedimento da norma DNER-ME 084/95. Finalmente as massas específicas do agregado graúdo e miúdo foram obtidas segundo os procedimentos das normas DNER-ME 195/97 e DNER-ME 194/98 respectivamente. A Tabela 3.4 apresenta os resultados de densidade e massa específica para os agregados graúdos e miúdos que compõem o RCD e o valor desses parâmetros obtidos mediante cálculo da média ponderada considerando a composição granulométrica do material.

Tabela 3.4 Densidade e massa específica do RCD

Agregado	Densidade das partículas sólidas (Gs)	Massa específica aparente ρ (g/cm ³)
Graúdo	2.14	2.14
Miúdo	2.73	2.38
Média ponderada para RCD*	2.35	2.22

* média segundo a composição granulométrica (65% agregado graúdo, 35% agregado miúdo)

Segundo Leite (2001) os resultados de massa específica encontrados na bibliografia são muito variáveis, mesmo para materiais com composição parecida. Este fato pode ser atribuído à própria composição do material, o tipo de beneficiamento realizado, ou a granulometria entre outros fatores que podem interferir na densidade dos agregados reciclados. Outro ponto a considerar é o método utilizado na determinação destas propriedades.

3.7 ÍNDICE DE FORMA

O ensaio de índice de forma se fez segundo o procedimento na norma DNER-ME 086/94, O resultado do ensaio foi obtido em duas amostras, um antes de compactação e outra após de compactação, ambas com energia Proctor intermediária. A graduação definida para a obtenção do índice de forma para ambas as amostras é a faixa C. Antes compactação o valor de índice de forma foi $f = 0.9$ e após a compactação o valor caiu para $f = 0.8$. Embora o material apresente um valor menor, pode-se concluir que o RCD em análise tem uma cubicidade muito boa. Segundo Bernucci *et al.* (2006) o limite superior para o índice avaliado é $f = 1.0$ quando o material possui uma ótima cubicidade e, $f = 0.0$ quando o material é lamelar. O valor de aceitação para agregados em quanto a forma é $f = 0.5$ valor que é superado pelo RCD usado na pesquisa.

3.8 DURABILIDADE EM SULFATO DE MAGNÉSIO

O ensaio de sanidade em sulfato de magnésio foi realizado conforme a norma ASTM C88 – 05, com duas frações de RCD. A parte graúda engloba grãos entre 37.5 mm e 4.75 mm, e a miúda, de 4.75 mm até 0.3 mm. O resultado do ensaio obteve-se após 5 ciclos de molhagem e secagem em sulfato de magnésio para as duas frações de agregado reciclado de RCD. A fração graúda teve um desgaste de 6.4% e a fração miúda de 11.2%. Segundo a norma ASTM C88 – 05, uma avaliação qualitativa deve ser feita sobre a fração graúda. Durante a realização do ensaio, foi evidente que as partículas entre 25.4 mm e 19.0 mm compostas por cerâmicas vermelhas apresentaram a partir do terceiro ciclo um desgaste em forma lamelar. Durante a lavagem final, as partículas afetadas sofreram desintegração total.

O valor da durabilidade em sulfato de magnésio obtido para o agregado graúdo de RCD (6%) satisfaz o valor de 30% requerido na norma NBR EB-2105/91. Para o agregado miúdo não há referência de valor mínimo ou máximo.

3.9 RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO LOS ANGELES

O ensaio de abrasão Los Angeles foi realizado de acordo o procedimento da norma DNER-ME035/98, utilizando as graduações B e C da especificação. Para cada graduação foram realizados três ensaios, e a média é apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Ensaio de desgaste por abrasão Los Angeles com RCD

Amostra	Graduação	Ciclos	Esferas	Peso inicial da amostra (g)	Abrasão (%)
1	B	500	11	5000	35
2	C	500	8	5000	38

Os valores de desgaste obtidos para o RCD em ambas as graduações, cumprem o requerimento da norma NBR EB-2103/91, onde os materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente devem apresentar uma perda por abrasão Los Angeles inferior a 55%. As normas NBR 15115 e 15116 (2004) não fazem alusão a valor ou faixa de valores limites para esse ensaio.

3.10 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO EM LABORATÓRIO

A avaliação do comportamento do agregado reciclado de RCD devido à compactação do material foi feita mediante o ensaio de compactação utilizando a energia Proctor intermediária uma vez que os materiais usados para as bases rodoviárias são compactadas com essa energia. Foram feitos três ensaios de compactação seguindo o procedimento da norma NBR 7182. Para definir a umidade inicial do ensaio de compactação foi considerado o valor de absorção (7.7%) obtido para o agregado graúdo de RCD a fim de garantir o completo umedecimento do material antes da compactação. Decidiu-se então começar o ensaio de compactação com uma umidade dois pontos abaixo do valor de absorção, 6%, e fazer incrementos de dois em dois pontos até 16%. Acima desta umidade o material apresentou sinais de saturação. As amostras foram compactadas 24 horas após do umedecimento do material.

3.10.1 Compactação com energia Proctor Intermediária

As três curvas obtidas com energia intermediária apresentam uma forma e comportamento similar com os pesos específicos numa faixa de valores entre 17.0 kN/m^3 e 17.9 kN/m^3 . As variações dos valores de peso específico entre um teor de umidade e outro não são muito grandes como pode ser observado na Figura 3.5. Um pequeno pico observa-se quando a umidade chega perto de 15% sugerindo um peso específico seco máximo. No entanto, nesse teor de umidade o material apresentava água em excesso fazendo que os finos presentes na amostra aderissem ao agregado graúdo. Observou-se que, o melhor comportamento da amostra compactada ocorreu quando o teor de umidade estava perto de 13%, chegando a um peso específico seco de 17.5 kN/m^3 .

Na Figura 3.5 é possível observar que, para um teor de umidade superior a 20%, ocorre uma queda no valor do peso específico aparente seco (γ_d), como esperado quando os materiais encontram-se no ramo úmido. Os índices de vazios calculados para os diferentes pontos obtidos na compactação com energia intermediária não apresentaram variações significativas sendo $e_{\min} = 0.27$ correspondente a um peso específico aparente seco de 17.5 kN/m^3 .

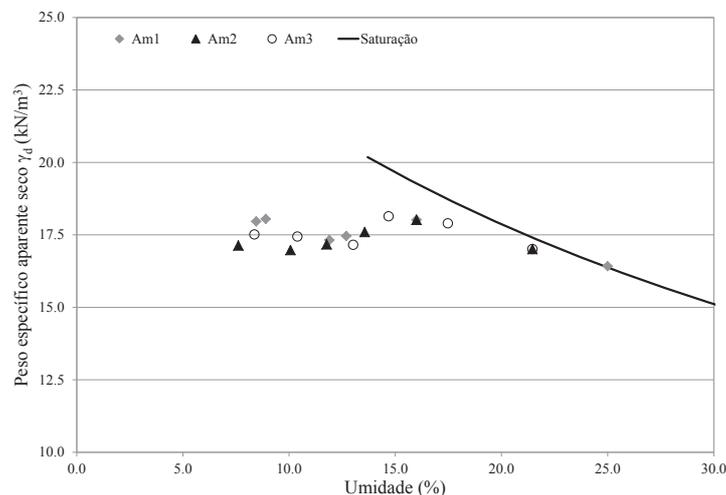


Figura 3.5. Curvas de compactação do RCD obtidas com energia Proctor intermediária

Considerando os dados obtidos com a energia intermediária, foi realizada uma análise de variância simples. Observou-se que a função Fischer ($F=0.719$) apresentava um

valor menor que 1 e que o valor crítico esperado, o que indica a boa repetibilidade do ensaio. Também indica que a hipótese adotada pode ser aceita uma vez que as médias amostrais são significativamente similares. A Tabela 3.6 apresenta os resultados obtidos mediante a ANOVA.

Tabela 3.6. Resultado da análise de variância simples (ANOVA) para a energia intermediária

RESUMO

Grupos	Contagem	Soma	Média (kN/m ³)	Variância	Desvio padrão
Amostra 1	7	118.501	16.9	2.936	1.713
Amostra 2	7	121.201	17.3	0.140	0.374
Amostra 3	7	123.164	17.6	0.189	0.435

ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade	Valor crítico F
Entre grupos	1.566	2	0.783	0.719	0.501	3.555
Dentro dos grupos	19.591	18	1.088			
Total	21.157	20				

Os resultados da compactação mostram que a água usada na compactação não influencia o comportamento do material durante o ensaio, mas, funciona como agente lubrificante para favorecer a acomodação das partículas maiores.

Considerando o comportamento que o material apresentou durante os ensaios de compactação, se observou que a água atua como lubrificante das partículas permitindo uma melhor acomodação entre elas, porém não afeta a densidade aparente seca do material.

O melhor comportamento do agregado reciclado foi observado com um teor de umidade de 13%, sendo este adotado como valor ótimo e foi utilizado então na compactação dos corpos de prova de CBR e módulo de resiliência.

Diversos trabalhos foram consultados a fim de fazer uma comparação entre os valores obtidos em outras pesquisas similares. Contudo a variabilidade nos valores de umidade ótima, peso específico aparente seco e formato da curva de compactação foram muito grandes. Estas diferenças são possíveis porque diversos fatores determinam o comportamento do agregado reciclado. Esses fatores são: a origem do RCD, a sua

composição, granulometria, energia de compactação, quantidade de água utilizada para compactação, entre outros. A Tabela 3.7 apresenta valores de umidade ótima e pesos específicos aparentes obtidos em pesquisas usando agregados reciclados.

Tabela 3.7. Umidade ótima e peso específico aparente seco máximo em diferentes RCD

Tipo de agregado reciclado	Procedência	Energia Proctor de Compactação	ω_{ot} (%)	γ_d (kN/m ³)	Autor
RCA*	Suécia	Modificada	9.0	20.0	Arm, (2001)
RCA	Coreia do Sul	Modificada	9.0-13.0	18.1-22.1	Park, (2003)
AR** misto	Brasília (Brasil)	Normal	13.5	18.1	Motta & Fernandes (2003)
		Intermediária	16.5	18.2	
		Modificada	12.5	18.4	
ARC	Belo Horizonte (Brasil)	Intermediária	15.0	18.2	Fernandes (2004)
AR Misto		Intermediária	17.0	17.6	
AR cerâmico	Goiânia (Brasil)	Intermediária	20.8	15.8	Oliveira <i>et al.</i> , (2005)
AR concreto		Intermediária	14.5	18.4	
ARCV***	Uberlândia (Brasil)	Intermediária	19	15.6	Dias <i>et al.</i> , (2006)
ARCV		Intermediária	21	16.1	
RCA	São Paulo (Brasil)	Modificada	13.5	17.6	Leite <i>et al.</i> , (2011)
		Intermediária	14.5	18.3	

*RCA: Agregado reciclado de concreto. **AR: Agregado reciclado. ***ARCV: Agregado reciclado de telha cerâmica vermelha.

3.11 ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA (CBR)

Foram realizados ensaio de CBR, com e sem imersão, para amostras de RCD compactadas na energia intermediária. As normas brasileiras NBR 15115 e 15116 dispõem que para agregados reciclados, o valor de CBR para material de base deve ser maior que 60% quando usada à energia intermediária. Este valor de referência é amplamente superado pelo RCD em análise já que para o CBR sem imersão o valor médio obtido foi de 95% e para o CBR com imersão o valor médio foi de 114%. A expansão dos ensaios com imersão foi nula para todos os casos. A Figura 3.6 apresenta os resultados obtidos para todos os ensaios CBR. Ao se comparar os valores do CBR sem e com imersão, observa-se para os corpos de prova com imersão os valores médios do CBR são 22% superiores aos sem imersão. Os parâmetros de expansão (nula) e CBR do agregado reciclado do RCD avaliado nesta pesquisa apresentam valores bastante satisfatórios para emprego em camadas de base de pavimentos flexíveis.

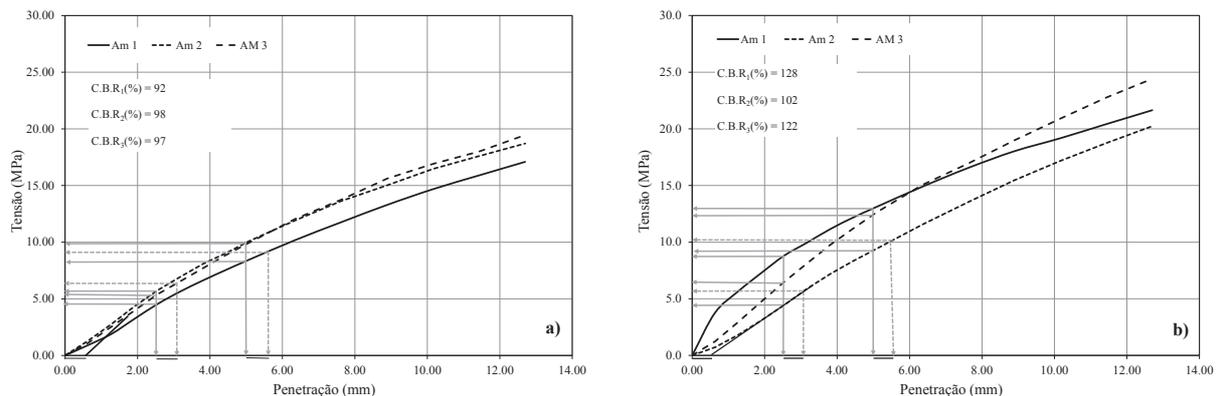


Figura 3.6. Valores de CBR para energia intermediária: a) sem imersão, b) com imersão

Como critério de comparação foram usados alguns trabalhos desenvolvidos no Brasil com agregados reciclados. Contudo esses estudos consideram mistura em diferentes proporções de solos lateríticos ou elementos estabilizadores como cal ou cimento para as suas análises. (Carneiro *et al.*, 2001; Oliveira *et al.*, 2005; Leite, 2006) mostraram que os valores de CBR obtidos com agregados reciclados variam entre 80 % e 115%. Conforme descrito anteriormente os valores de CBR desta pesquisa se enquadraram no intervalo de valores obtidos pelos diversos autores citados, e podem ser considerados satisfatórios para a construção de camadas de base para pavimentos flexíveis. Apesar da recomendação das normas NBR 15115 e 15116 ser não usar o agregado reciclado em vias com alto volume de tráfego, $N > 10^6$, o material empregado nesta pesquisa poderia ser usado para esta condição uma vez que o parâmetro CBR obtido para energia intermediária supera amplamente o 60% recomendado.

3.12 ENSAIO TRIAXIAL CÍCLICO E OBTENÇÃO DE MÓDULO DE RESILIÊNCIA (MR)

Os valores de módulo de resiliência experimentais foram calculados fazendo uma média dos últimos cinco ciclos de cada sequência de carregamento e foram fornecidos pelo programa de aquisição de dados da prensa triaxial cíclica utilizada. Os valores mínimos encontram-se num intervalo entre 70 e 250 MPa, e os valores máximos variam de 300 a 600 MPa, dentro desses intervalos, os valores inferiores foram obtidos para os períodos de cura imediato ou nas primeiras 24 horas (1 dia). Os valores médios estão entre 180 e 420 MPa. A Figura 3.7 apresenta os valores de MR mínimos, máximos e

médios obtidos durante o ensaio triaxial cíclico, para corpos de prova submetidos a diferentes períodos de cura.

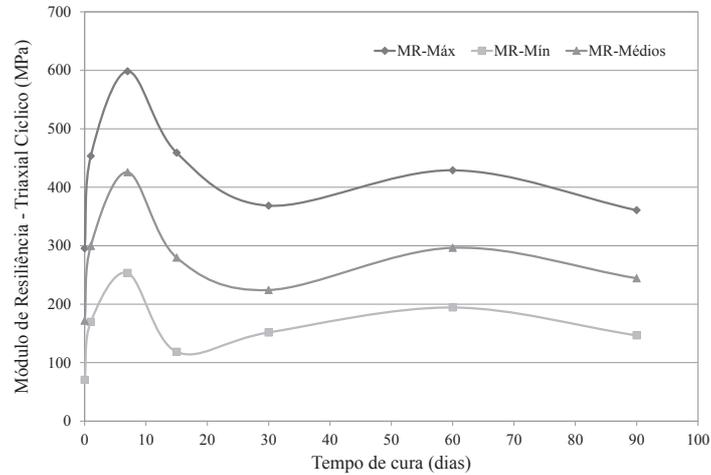


Figura 3.7. Variabilidade dos valores de módulo de resiliência ao longo do tempo

A Figura 3.7, mostra que entre zero e sete dias o módulo de resiliência aumenta consideravelmente passando de um valor médio de 172 MPa na condição imediata para 300 MPa com um dia de cura e para 426 MPa em 7 dias. Houve uma queda inesperada no valor de MR para 15 dias. Após este período de cura o módulo apresenta valores mais ou menos próximos indicando um processo de estabilização.

A autora não tem uma explicação racional para este comportamento restando apenas à hipótese de algum erro na realização do ensaio. Entretanto para os demais períodos de cura (≥ 30 dias) houve uma elevação não desejada no nível de água no tanque de cura, implicando na inundação do terço inferior dos corpos de prova. Isso pode explicar a queda de MR para os períodos de 30, 60 e 90 dias.

Os módulos de resiliência variaram segundo as tensões de confinamento e desvio foram aplicadas. A Figura 3.8, apresenta a mudança do MR imediatamente após compactação (0 dias de cura), observa-se que o módulo de resiliência cresce quando cresce a tensão confinante e é crescente também com o incremento da tensão desvio. A mesma tendência foi comprovada para os períodos de cura correspondentes a 1, 7, 15, 30, 60 e 90 dias de cura.

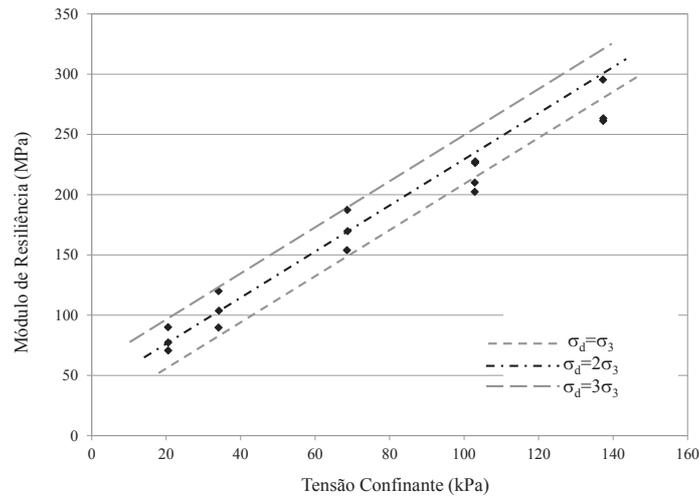


Figura 3.8. Variação do módulo de resiliência com a tensão confinante, após compactação

Espera-se que em materiais granulares, o módulo de resiliência decresça com o incremento da tensão desvio. No obstante, as diferentes pesquisas desenvolvidas com agregados reciclados (Arm, 2001; Motta & Fernandes, 2003; Fernandes, 2004; Motta, 2005) apresentam módulos de resiliência crescentes com o aumento da tensão desvio. Isso poderia estar relacionado com o aumento de rigidez provocada pela quebra das partículas gerada durante a compactação.

O modelo constitutivo misto foi usado na predição dos valores de módulo de resiliência para o agregado reciclado de RCD estudado nesta pesquisa. Este modelo depende da tensão de confinamento (σ_3) e da tensão desvio (σ_d)

$$MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad (3.1)$$

Com:

MR = módulo de resiliência;

σ_3 = tensão confinante;

σ_d = tensão desvio ($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$);

σ_1 = tensão principal maior

σ_3 = tensão principal menor

k_1, k_2 e k_3 = coeficientes de regressão.

A relação entre os valores dos módulos de resiliência experimentais com os obtidos pelo modelo Misto é apresentada na Figura 3.9. Nessa figura se observa que a

dispersão ao redor da curva de regressão proposta é muito pequena, o que fornece um coeficiente de correlação igual a 0.9807, indicando que o modelo pode ser utilizado de forma confiável na predição do módulo de resiliência com o agregado reciclado utilizado nesta pesquisa.

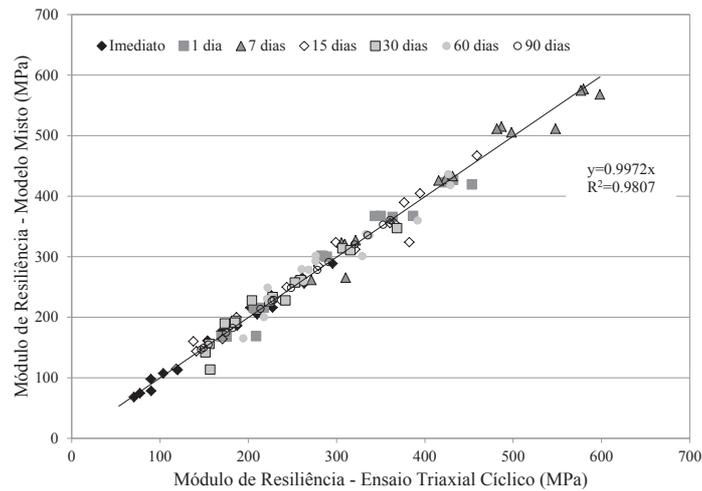


Figura 3.9. Variação do MR do Triaxial Cíclico vs. Modelo Misto ao longo do tempo

3.13 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO NÃO CONFINADA (RCS)

Neste ensaio foram utilizados os mesmos corpos de prova empregados no ensaio de módulo de resiliência e, portanto nos mesmos períodos de cura desse ensaio. A Figura 3.10 apresenta as curvas tensão-deformação, obtidas durante o ensaio de compressão não confinada. Todas elas apresentam um comportamento côncavo para cima no início da curva. Esse comportamento é considerado normal uma vez que no início dos carregamentos os vazios e as pequenas fissuras geradas no ensaio de módulo de resiliência são fechados até o nível que o corpo de prova testado consegue receber carregamentos incrementais até a sua ruptura.

Diferentes níveis de tensão e deformação foram alcançados. Os valores de tensão foram crescentes segundo o período de cura. Contudo o corpo de prova com um dia de cura chegou à ruptura em uma tensão de 0.22 MPa com apenas uma deformação unitária de 0.8%, menor que as deformações alcançadas pelos outros corpos de prova, o corpo de prova com um período de cura de 90 dias, rompeu em 0.33 MPa e apresentou a maior deformação axial.

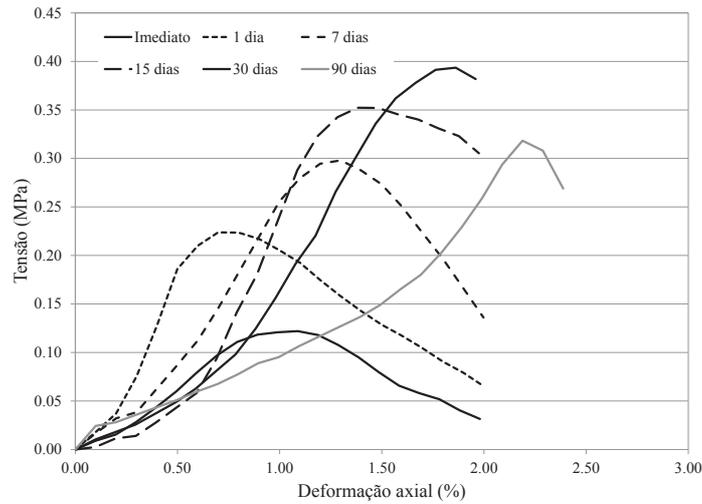


Figura 3.10. Variação da resistência à compressão simples ao longo do tempo

Durante a desmontagem do ensaio de módulo de resiliência, os corpos de prova com 60 dias de cura foram rompidos e não foi possível fazer o ensaio de compressão não confinada em nenhum deles. Todos os corpos de prova ensaiados apresentaram o mesmo padrão de ruptura, fissuras e trincas longitudinais, no sentido de aplicação do carregamento. Uma vez que as trincas não aparecem sobre o eixo dos corpos de prova, pode-se pensar em ruptura por cisalhamento provocada pelo atrito entre a placa e o corpo de prova.

3.14 DETERMINAÇÃO DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO PORTLAND

Os ensaios para determinar a atividade pozolânica do agregado reciclado miúdo do RCD foram feitos no laboratório de FURNAS. Os resultados são apresentados na Tabela 3.8.

A norma NBR 12653/92 exige que o índice de atividade pozolânicas com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle seja de 75%. Observa-se que o RCD avaliado não atende às exigências da norma e não pode ser considerado material pozolânico puro. Contudo, a resistência à compressão simples alcançou um valor razoável (15.7 MPa).

Tabela 3.8. Índice de atividade pozoalânica

Moldagem NBR 7215	Areia NBR7214 (g)	Cimento (g)	Material em análise (g)	Água (g)	Consistência (mm)	Carga de ruptura 28 dias (kgf)	Tensão (MPa)	Tensão Média (MPa)	IAP NBR 5752
C o n t r o l e	936.0	312.0	0.0	165.0	226.0	6.386	31.9	30.2	52%
						5.716	28.6		
						6.021	30.1		
A m o s t r a	936.0	202.8	109.2	177.0	225.0	3.126	15.6	15.7	
						3.237	16.2		
						3.075	15.4		

3.15 AVALIAÇÃO DA QUEBRA DOS GRÃOS

Como apresentado no item 2.4, a avaliação da quebra dos grãos para o RCD foi realizada nos ensaios de compactação, CBR e módulo de resiliência. Inicialmente foi avaliado o efeito da energia de compactação e do teor de umidade na quebra do agregado de RCD. A Figura 3.11, apresenta as curvas granulométricas obtidas após compactação Proctor intermediária para cada teor de umidade utilizado. Nessa figura observa-se claramente que a maior mudança na curva granulométrica do material deu-se quando o agregado reciclado estava mais seco (umidade de 6%) e a menor variação com relação à granulometria original, deu-se com o maior teor de umidade (21%).

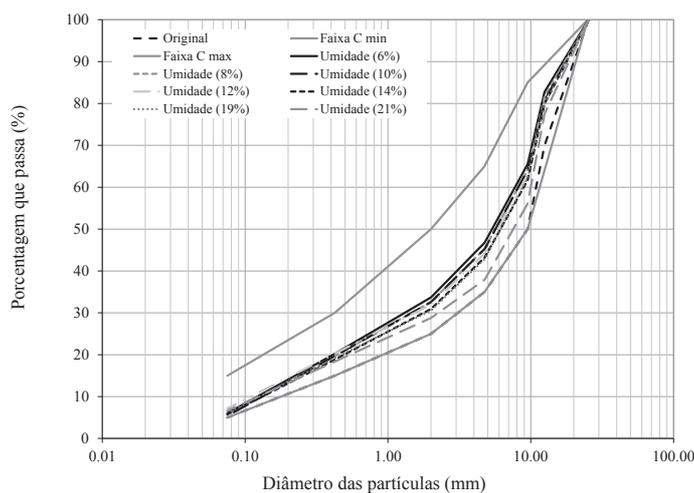


Figura 3.11. Variação da curva granulométrica com o teor de umidade

Os índices de quebra após compactação Proctor (ID_p) foram calculados para cada uma das curvas granulométricas, tendo em conta o teor de água da compactação. Os valores obtidos mostram que o índice de quebra decresce com o aumento do teor de umidade. A Tabela 3.9 apresenta os resultados obtidos para os índices de quebra referenciados.

Tabela 3.9. Índices de quebra calculados com variação do teor de umidade

Umidade (%)	6	8	10	12	14	19	21
ID_p (%)	9.2	8.1	7.9	7.8	6.7	6.8	4.2

Para avaliar o efeito da energia de compactação no RCD, foram feitos três ensaios de compactação. A mudança de tamanho dos grãos à medida que a energia do ensaio aumentava foi evidente. Nesse caso, a menor mudança na forma da curva granulométrica ocorreu quando foi utilizada a energia normal e a maior quebra ocorreu com a energia modificada. A Figura 3.12 apresenta três curvas granulométricas compactadas com diferentes energias e uma umidade fixa de 13%. Observa-se também que as curvas granulométricas foram deslocadas para a esquerda da curva original, mas, sem ultrapassar o limite máximo da faixa C do DNIT.

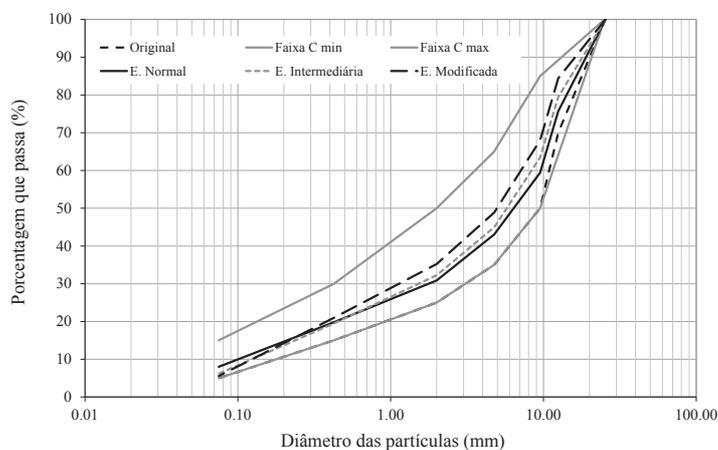


Figura 3.12. Efeito da energia de compactação na curva granulométrica

Foram também calculados os índices de quebra devido à compactação Proctor (ID_p) e o índice B_q segundo a metodologia proposta por Marsal (1975). Esses índices indicaram como apresentado anteriormente que a energia modificada é a que mais afeta o tamanho das partículas, gerando a maior quebra de grãos. A Tabela 3.10 apresenta os

resultados obtidos para cada índice. É possível observar que existe uma diferença nos valores entre o método do DNER (ID_p) e o método de Marsal (B_g), devido às diferentes definições empregadas.

Tabela 3.10. Índices de quebra obtidos para diferentes energias de compactação

Energia Proctor Utilizada	DNER (ID_p) %	Marsal (B_g) %
Normal	6	9
Intermediária	8	13
Modificada	11	18

Os valores médios de índice de quebra ID_p calculados após os diferentes ensaios, compactação, CBR e módulo de resiliência para o agregado reciclado de RCD, apresentam semelhanças. Essas semelhanças se observam nas duas metodologias de cálculo empregadas. Uma vez que estes valores são todos parecidos, uma ANOVA foi realizada usando os valores da metodologia do DNER (ID_p) os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 3.11. A hipótese da análise de variância supõe que todos os dados possuem a mesma média amostral. O resultado da análise estatística mostrou que apesar desses valores serem próximos existem diferenças entre eles e por tanto não pertencem ao mesmo grupo amostral o que significa que cada ensaio afeta de forma diferente a quebra de grãos do agregado de RCD.

Tabela 3.11. Resultado da ANOVA para índice de quebra considerando diferentes ensaios

RESUMO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
Compactação	6	47.697	7.949	1.225
CBR	6	51.918	8.653	1.082
Módulo de resiliência	6	41.000	6.833	0.967

ANOVA

Fonte da variação	Soma dos quadrados (SQ)	Graus de liberdade (gl)	Média dos quadrados (MQ)	F	Probabilidade de	Valor crítico F
Entre grupos	10.104	2	5.052	4.630	0.027	3.682
Dentro dos grupos	16.368	15	1.091			
Total	26.473	17				

Embora a análise de variância mostre que a quebra de grãos é diferente dependendo do ensaio aplicado sobre o agregado reciclado de RCD, as curvas granulométricas obtidas, mostram que a distribuição dos grãos permanece igual após de compactação, CBR e módulo de resiliência, pelo menos durante nas primeiras idades de cura no caso do módulo de resiliência, como apresentado na Figura 3.13. Esse comportamento indica que a maior quebra de grãos ocorre durante o processo de compactação ou construção, (Zeghal, 2009; Leite et al., 2011) e não durante a vida do pavimento.

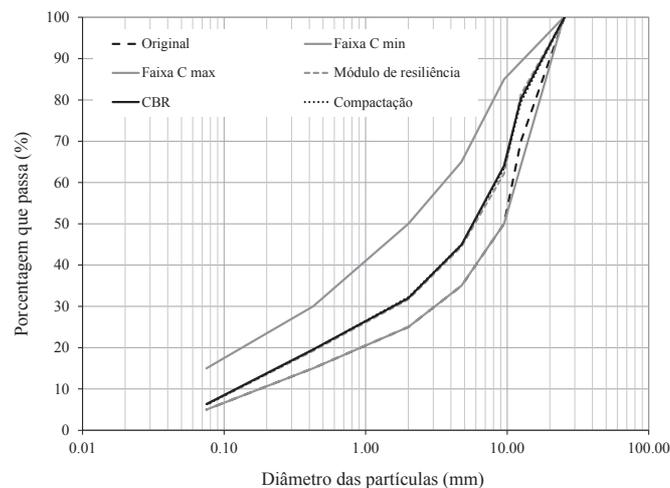


Figura 3.13. Variação das curvas granulométricas após ensaios de compactação, CBR e módulo de resiliência

3.16 GANHO DE RESISTÊNCIA POR CIMENTAÇÃO DOS RCD

A primeira fase de avaliação do ganho de resistência do agregado reciclado foi feita com os ensaios triaxiais cíclicos. Eles mostraram um incremento no valor de módulo de resiliência ao longo do tempo, sendo maior nos primeiros dias de cura (1 e 7 dias), em 15 dias apresentou-se uma queda nos valores de módulo e após disso os módulos obtidos permaneceram estáveis, a Figura 3.14 apresenta as variações do módulo de resiliência nos diferentes períodos de cura.

Os módulos de deformabilidade (D) calculados, também apresentaram um comportamento crescente. Para quantificar o incremento na rigidez do RCD avaliado, os valores de módulo, foram normalizados, dividindo-os por um valor de referência, sendo este o módulo obtido a zero dias de cura. A relação D/D_{ref} apresentada na

Tabela 3.12, mostra claramente que durante os primeiros sete dias o crescimento é acelerado e de 15 a 90 dias o crescimento é pequeno e o valor de D fica quase constante.

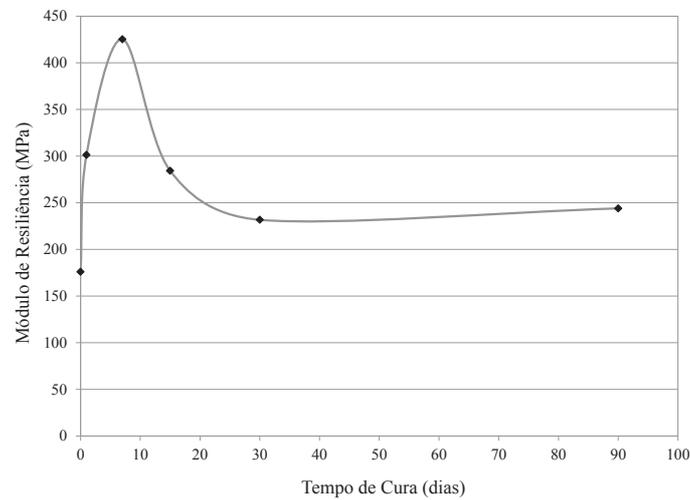


Figura 3.14. Variação do módulo de resiliência ao longo do tempo

Os módulos de deformabilidade (D) calculados, também apresentaram um comportamento crescente. Para quantificar o incremento na rigidez do RCD avaliado, os valores de módulo, foram normalizados, dividindo-os por um valor de referência, sendo este o módulo obtido a zero dias de cura. A relação D/D_{ref} apresentada na Tabela 3.12, mostra claramente que durante os primeiros sete dias o crescimento é acelerado e de 15 a 90 dias o crescimento é pequeno e o valor de D fica quase constante.

Tabela 3.12. Normalização dos valores de módulo de deformabilidade

Tempo (dias)	D (MPa)	D/D_{ref}	Curva de regressão
0	88	1.000	1.000
1	178	2.028	2.029
7	232	2.647	2.604
15	222	2.531	2.606
30	226	2.575	2.606
90	234	2.669	2.606

O fato de o módulo de deformabilidade aumentar com o tempo de cura (Figura 3.15) indica um aumento na rigidez do agregado reciclado de RCD avaliado. Isso é bastante

positivo para um material granular ser empregado como base para pavimentação, já que esse ganho na rigidez distribuirá adequadamente as tensões geradas pelos carregamentos cíclicos do tráfego e evitará a fadiga prematura do revestimento asfáltico.

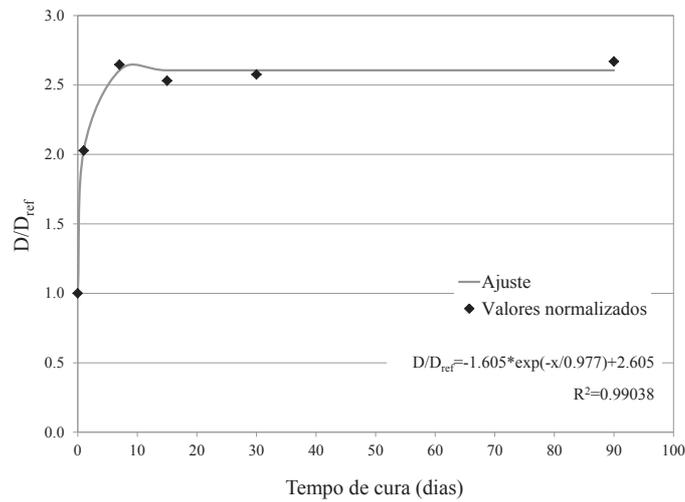


Figura 3.15. Variação do módulo de deformabilidade normalizado (D/D_{ref}) com o tempo de cura. O ensaio de compressão simples apresentou um ganho de resistência variando de forma crescente com o período de cura dos corpos de prova como observado nas curvas tensão deformação apresentadas anteriormente na Figura 3.10. Foi comprovado que esse aumento não foi provocado pela perda de umidade durante os períodos de cura, pois esta foi verificada após cada ensaio.

As tensões obtidas são apresentadas na coluna resistência à compressão não confinada ou simples (RCS) da Tabela 3.13.

Tabela 3.13. Normalização dos valores de resistência à compressão simples

Tempo (dias)	RCS (MPa)	RCS/RCS _{ref}	Curva de regressão
0	0.120	1.000	0.000
1	0.220	1.833	1.818
7	0.300	2.500	2.535
15	0.350	2.917	2.887
30	0.390	3.250	3.249

Os valores de resistência foram normalizados dividindo-os por um valor de referência sendo este a resistência obtida no ensaio a zero dias. A relação RCS/RCS_{ref} mostra

que à medida que o tempo de cura aumenta, a relação entre as resistências cresce chegando a ser 3 vezes maior em 30 dias. O ensaio a 60 dias não foi feito pois o corpo de prova rompeu-se na desmontagem do ensaio triaxial, e o corpo de prova com 90 dias de cura foi bastante danificado durante o ensaio de módulo de resiliência.

A Figura 3.16 apresenta a variação da resistência à compressão uniaxial ao longo do tempo. Observa-se que a relação entre as resistências do material crescem conforme se incrementa o período de cura.

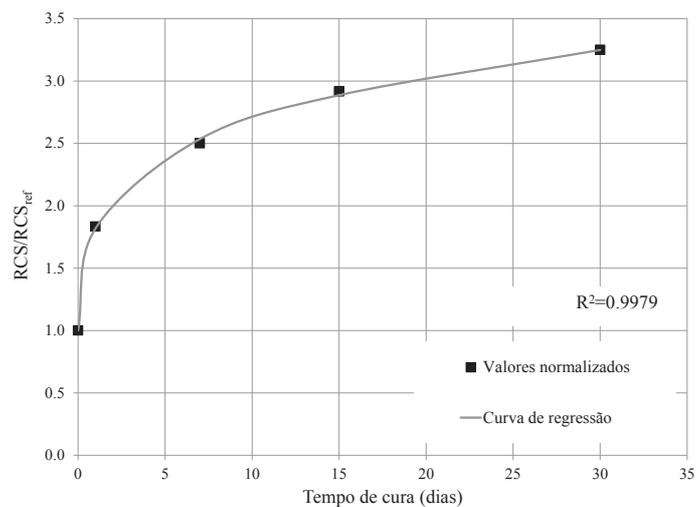


Figura 3.16. Variação da resistência à compressão simples em função do tempo de cura

De forma geral conclui-se que o agregado reciclado de RCD avaliado neste trabalho cumpre todas as condições para ser usado como agregado na construção de bases granulares para pavimentação.

4. CONCLUSÕES

O resíduo utilizado nesta pesquisa provém da demolição do estádio de futebol Mané Garrincha. O ensaio de composição do RCD estudado durante esta pesquisa permitiu determinar que o 99.44% pertence a materiais classificados na classe A da resolução CONAMA 307/02 (concreto, cimento, argamassa, tijolo, telha). A parcela composta por materiais contaminantes, formada por madeira, plástico e metal, constitui apenas 0.56% da amostra. Segundo a norma NBR 15115/04, materiais indesejáveis mistos não podem ser usados na construção de bases granulares, podendo estar presentes no

resíduo de construção e demolição sempre que a quantidade total for menor que 3%. Assim o resultado obtido para a amostra total se enquadrou no valor especificado pela norma.

Com base nestes resultados é possível afirmar que o RCD obtido da demolição do estádio Mané Garrincha não apresenta uma quantidade significativa de materiais indesejáveis e poderia ser usado como agregado para base, uma vez verificadas as propriedades físicas e mecânicas.

Segundo a composição gravimétrica do material e seguindo a classificação da norma 15116/04, o RCD proveniente do Mané Garrincha classifica-se como agregado reciclado de concreto (ARC).

A curva granulométrica do material permitiu definir a classe textural predominante do agregado reciclado de RCD analisado, sendo esta constituída por 65% de pedregulho fino e 30% de areia. A parcela de finos menores a 0.075 mm para as frações graúdas e miúdas do RCD se enquadram nos valores exigidos pela norma NBR 15116/04.

Os valores de limites de Atterberg obtidos para o agregado reciclado de RCD que passa a peneira 0.425 mm, não atenderam os requisitos da norma NBR EB-2103/91, quanto ao valor de limite de liquidez ($LL = 32\% > 25\%$). No entanto, o material atendeu à condição de equivalente de areia superior a 30%, e, portanto o agregado reciclado de RCD avaliado é considerado apto para ser usado na pavimentação rodoviária uma vez que o teor de material argiloso é muito pequeno.

O teor médio de absorção de água obtido para a fração graúda do RCD foi de 7.7%, valor semelhante aos resultados obtidos por outros pesquisadores no Brasil e considerado alto uma vez que agregados naturais possuem um valor da absorção em torno de 2%. A norma NBR 15116/04, estabelece 7% como valor máximo de absorção para agregados reciclados graúdos, contudo, essa condição é para preparação de concreto sem função estrutural e não estabelece um intervalo de valores quando for usado em pavimentação.

O valor da durabilidade em sulfato de magnésio obtido para o agregado graúdo de RCD foi de 6% e satisfaz o valor requerido na norma NBR EB-2105/91. Para o agregado

miúdo não há referência de valor mínimo ou máximo, mas, foi comprovado que os agregados de materiais cerâmicos vermelhos foram bastante afetados pelo sulfato utilizado. Esses materiais apresentaram desgaste lamelar até a sua desintegração total.

Os valores de desgaste obtidos para o RCD em ambas as graduações cumprem o requerimento da norma NBR EB-2103/91, segundo a qual os materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente devem apresentar uma perda por abrasão Los Angeles inferior a 55%.

Os resultados dos ensaios de compactação com o agregado reciclado de RCD mostraram que a curva de compactação não apresenta o pico tradicional que indica a umidade ótima antes de alcançar o ramo úmido. Para a energia Proctor utilizada, o melhor comportamento do material foi observado para um teor de umidade em torno de 13%. Para valores de umidade acima de 16%, o agregado reciclado apresentou sinais de saturação. Observou-se que a água de compactação atua como lubrificante entre as partículas, permitindo uma melhor trabalhabilidade sem afetar a densidade aparente seca.

Os valores de CBR obtidos para o agregado reciclado de RCD utilizado nesta pesquisa são satisfatórios uma vez que todos eles superaram o limite da norma NBR 15115 60%.

Os resultados dos CBR com imersão de 96 horas foram superiores aos resultados sem imersão, sendo o aumento de 20% quando foi usada à energia intermediária. Este incremento foi atribuído ao processo de hidratação do material cimentante presente no agregado reciclado de RCD durante a fase de imersão em água.

Os resultados dos ensaios de módulo de resiliência mostraram que o agregado reciclado utilizado durante a pesquisa tem comportamento similar ao de agregados pétreos normalmente utilizados, uma vez que os valores determinados nesta pesquisa variaram entre 200 e 500MPa.

O ensaio com sete dias de cura mostrou módulos de resiliência entre 300 e 600 MPa indicando um ganho de módulo muito alto em um período de tempo pequeno. Este comportamento foi verificado nos ensaios triaxiais cíclicos feitos com três corpos de prova dessa idade. Apesar disso é recomendável revisar o comportamento do material para este período de cura em particular uma vez que se observou uma queda

significativa após este período seguido de um período de ganho e estabilização do módulo de resiliência.

A atividade pozolânica com cimento Portland mostrou que a fração analisada de agregado reciclado de RCD tem uma atividade de 52% com relação à mistura. Apesar do material não alcançar os valores exigidos pelas normas ASTM e NBR de 75%, não se deve descartar que a capacidade pozolânica do RCD analisado influa positivamente na resistência do material de base.

As curvas granulométricas obtidas após compactação intermediária mostraram que existe uma influência direta entre o teor de umidade da compactação e a quebra de grãos do agregado reciclado de RCD sendo que quanto mais seco o material, maior será a quebra de grãos e quanto mais perto da saturação, menor a quebra do material.

Os índices de quebra ID_p e B_g foram calculados para os ensaios de compactação na energia intermediária, ensaios de CBR e ensaios de módulo de resiliência. Os índices mostraram pequenas diferenças já que as curvas granulométricas ao final dos ensaios não mostraram variações. Isso sugere que a maior quebra de partículas se apresenta durante a compactação.

O ganho de resistência para o ensaio de compressão simples foi de 250% após de 30 dias de cura. Os ensaios de CBR também mostraram um aumento na resistência 20% após o período de imersão. Todos esses resultados sugerem que há materiais cimentícios reagindo com a água, provocando um aumento de resistência que pode ser significativo.

Finalmente conclui-se que o agregado reciclado de RCD utilizado nesta pesquisa, apresenta características físicas, químicas e mecânicas que permitem o seu uso como insumo na construção de bases rodoviárias e podem substituir aos materiais convencionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 307-99: Determining the resilient modulus of soils and aggregate materials.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR EB-2103: Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente, Rio de Janeiro, 1991.

___NBR 10004: Resíduos Sólidos Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

___NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

___NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

___NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos, Rio de Janeiro, 2004.

___NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação, Rio de Janeiro, 2004.

___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.

___NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânicas com cimento Portland – índice de atividade pozolânicas com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

___NBR 7182: Solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1988.

___NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da Resistência a Compressão. Rio de Janeiro, 1997.

___NBR 7219: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 1987.

Arm, M. (2001). Self cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial test and field test. *Waste Management*, 21, pp. 235 – 239.

ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM C88 - 05. Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.

___ASTM D1883 – 07. Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils.

___ASTM D2166 – 06. Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil.

___ASTM D2419 - 09. Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate.

___ASTM D4972 – 01. Standard Test Method for pH of Soils.

Bernucci, L. B., Motta, L. M. G, Ceratti, J. A. P. (2006). Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro, 504 p.

BS - British Standard. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes . BS 1377-2/90: Classification test.

Carneiro, A. P., Quadros, B. E. C., Oliveira, A. M. V., Schadach de Brum, I. A., Sampaio, T. S., Alberte, E. P. V., Costa, D. B. (2001). Características do entulho e do agregado reciclado. Em: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção.

Projeto entulho bom. Organizado por Cassa J. C. S (em memória), Carneiro A. P, Schadach de Brum I. A, pp. 142-188.

Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução N° 307 de 5 de Julho de 2002. Processo N° 02000.001641/2000-15. Assunto: dispõe sobre resíduos da construção civil. Brasília, DF.

Delongui, L., Pinheiro, R. J. B., Pereira, D. S., Piovezan, G. T. A. (2010). Caracterização dos Resíduos da construção civil em Santa Maria (RS) e sua aplicação em pavimentação.

Dias, J. F., Agopyan, V., Bernucci, L. L. B., Moura, E. (2006). Avaliação do módulo de resiliência de misturas solo agregado reciclado cerâmico em função do esqueleto granular do agregado. 13ª Reunião de Pavimentação Urbana. Maceió.

DNER (1996). Manual de Pavimentação. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Diretoria de Desenvolvimento Tecnológico - IPR/DNER, Rio de Janeiro - RJ, 320p.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. DNER-ME 035/98: Agregados – determinação da abrasão Los Angeles.

___DNER-ES 141/10: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.

___DNER-ES 303/97: Pavimentação – base estabilizada granulométricamente.

___DNER-ME 080/94: Solos - análise granulométrica por peneiramento.

___DNER-ME 081/98: Agregados – determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo.

___DNER-ME 082/94: Solos – determinação do limite de plasticidade.

___DNER-ME 084/95: Agregado miúdo – determinação da densidade real.

___DNER-ME 086/94: Agregado – determinação do índice de forma.

___DNER-ME 194/98: Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman.

___DNER-ME 266/97: Agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos.

EPA. Estimating 2003. Building Related Construction and Demolition Materials Amounts. Environmental Protection Agency of United States. 60 pp.

Farias, M. M. (2009). Materiais reciclados para utilização em pavimentação. FAPDF processo n° 2009/00111-1.

Fernandes, C. G. (2004). Caracterização Mecânica de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição para uso em Pavimentação dos Municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 109 p.

Kazmierczak, C. (2008). Resíduos de construção e demolição: um problema ou uma oportunidade de negócios?. Revista mensal do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Rio Grande do Sul. N°43, pp. 28.

- Leite, F. C., Motta, R. S., Vasconcelos, H. L., Bernucci, L. L. B. (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, 25, 2011, pp. 2972-2979.
- Leite, M. B. (2001). Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 270p.
- Marsal, R.J. & Resendiz, D. (1975). Earth and Earth-Rock Dams (in Spanish). Limusa, Ciudad de Mexico, Mexico, 546 p.
- Motta, L. M. G., Fernandes, C. (2003). Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana. 12^a Reunião Anual de Pavimentação. Aracaju.
- Motta, R. S. (2005). Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 134 p.
- Oikonomou, N. D. (2005). Recycled concrete aggregates. *Concrete & Cement Composites*. 27: pp 315 – 318.
- Oliveira, J. C. (2007). Indicadores de Potencialidades e Desempenho de Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-049/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, DF, 167 p.
- Oliveira, J. C., Rezende, L. R., Guimarães, R. C., Carvalho, J. C. (2005). Variação dos parâmetros de compactação e CBR de agregados reciclados de resíduos da construção civil. 36.a Reunião Anual de Pavimentação RAP v. Curitiba, Brasil.
- Park, T. (2003). Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement. *Journal of Transportation Engineering*. ASCE, 129, (5): pp. 558 – 563.
- Poon, C. S., Qiao, X. C., Chan, D. (2006) The cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base. *Waste Management and Research*, 26: pp. 1166 – 1172.
- Souza, M. V. R. (2010). Efeitos de Fibras Sintéticas nas Propriedades de Ligantes e Concretos Asfálticos. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-185/10, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150 p.
- Tam, W. Y., Wang, K., Tam, C. M. (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 152: pp. 703 – 714.