

# **CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO DO RIO DE JANEIRO E DE BELO HORIZONTE PARA USO EM PAVIMENTAÇÃO**

**Cinconeui da Graça Fernandes**

Eletrobras

**Laura Maria Goretti da Motta**

COPPE/UFRJ

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta a caracterização por ensaios de carga repetida dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) dos Municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte, visando sua aplicação em base, sub-base e reforço de subleito de pavimentos rodoviários urbanos e rurais. Foram também realizados ensaios comuns à caracterização de agregados convencionais, bem como aqueles de enfoque ambiental. Verificou-se através de cálculo numérico a adequação do uso destes materiais em estruturas de pavimento a partir de um projeto rodoviário real, substituindo os agregados convencionais por estes originados da britagem dos RCD. Os resultados corroboram para a comprovação das viabilidades técnica, econômica, social e ecológica do emprego destes materiais em pavimentação.

## **ABSTRACT**

In this paper the recycled aggregates from construction and demolition's waste (CDW) proceeding from Rio de Janeiro County and from Belo Horizonte County are mechanistically characterized intending their employment in base, in subbase and in reinforcement layer of the urban and rural highway pavement. Also they were accomplished by same test used to the characterization of natural aggregates beside the environmental tests. Their application was checked by numeric calculus in pavement structures from actual design through the substitution the nature aggregates for theses one. The results confirm that their employment in highway pavement is technically, economically, socially and environmentally viable.

## **1. INTRODUÇÃO**

Ao longo das últimas décadas, pesquisadores brasileiros e estrangeiros estão caracterizando e estudando formas de aproveitamento técnico-econômico-ambiental dos denominados resíduos de construção e demolição (RCD), popularmente designados entulhos, que são gerados pelo progresso, dado que novas construções, reformas ou demolições daquelas já existentes, gera RCD que compõe a maior parte do lixo dos grandes centros urbanos. Em Salvador, por exemplo, são coletados cerca de 2750 t/dia de RCD, ou seja, 50% de todo o lixo dessa capital (Cassa et al, 2001). Portanto, ao se considerarem os custos, os impactos ambientais e restrições legais envolvidos na destinação de grandes quantidades desse resíduo, justificam-se pesquisas que venham propiciar um destino nobre a estes RCD.

A busca pelo chamado desenvolvimento sustentável levou países como os EUA e a Espanha a desenvolverem programas governamentais que visam diagnosticar os setores geradores de resíduos, suas fontes, tipos e quantidades, de forma a subsidiar o aproveitamento dos mesmos através da reciclagem. Países com pouco material primário tais como Holanda, Bélgica e Dinamarca são os que mais reciclam entulhos, atingindo percentual superior a 90 %, ainda assim precisando importar areia da Sibéria e entulhos da Inglaterra. Por outro lado, no Brasil, onde as técnicas de reciclagem de concreto começaram há cerca de 20 anos, recicla-se menos de 5% do entulho gerado a cada ano (Ciocchi, 2003).

Um dos primeiros trabalhos que relata o uso deste material em pavimentação no Brasil é o de Bodi et al (1995) e outro foi de Trichês e Krukyj (1999), entre outros.

A prefeitura de São Paulo possui uma especificação (PMSP, 2003) que serviu de base para a normas da ABNT NBR 15.115 e 15.116 de 2004.

Um aspecto que dificulta a utilização de agregados reciclados é a sua aparente heterogeneidade. No Brasil, o controle tecnológico necessário ao emprego efetivo destes materiais depende de estudos que forneçam parâmetros para a sua avaliação, visto ser este controle essencial ao emprego do agregado reciclado em pavimentação, objeto deste trabalho. A Resolução do CONAMA Nº 307, de 5 de julho de 2002, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil, apresenta-se como um agente essencial ao aumento sensível do percentual da reciclagem desse material. Por exemplo, o parágrafo 1º, art. 4º diz: “Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de “bota fora”, encostas, corpos d’água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei,...”.

Destaca-se ainda o desenvolvimento da mecânica dos pavimentos que permite considerar os novos materiais com outros critérios de qualificação, levando em conta os esforços transmitidos ao pavimento pelas rodas dos veículos, a ação da temperatura, as características elásticas e plásticas dos materiais que compõem as camadas dos pavimentos, considerações concernentes a uma visão mais mecanística e menos empírica do projeto rodoviário.

Portanto, neste trabalho, apresentar-se-ão os parâmetros mecânicos obtidos dos RCD provenientes dos municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte. Os ensaios de cunho ambiental (“Lixiviação, Solubilização e de Massa Bruta”) foram realizados pela TASQA Serviços Analíticos Ltda, e os demais foram realizados nos laboratórios da COPPE/UFRJ.

## **2. MATERIAIS**

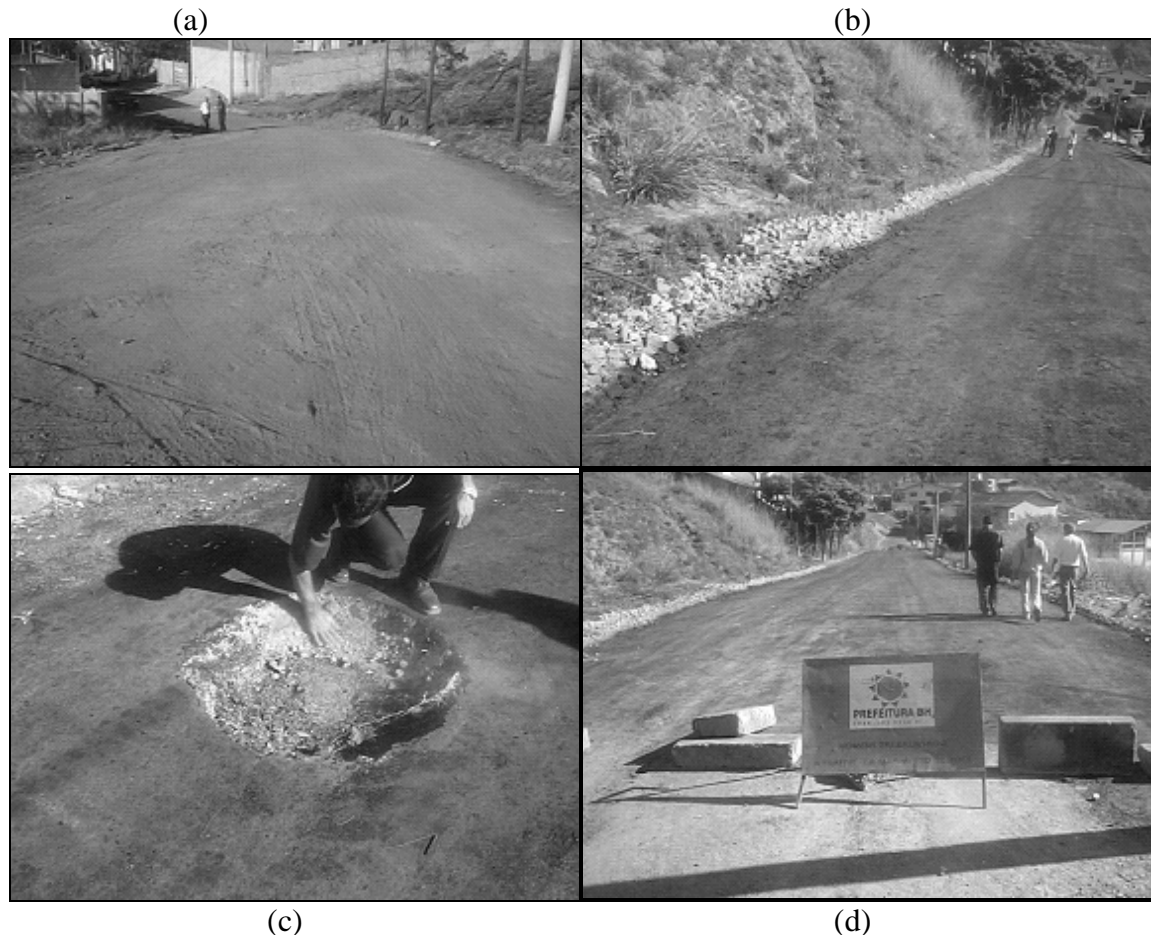
Neste trabalho, são referidas como agregado reciclado de RCD do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte, amostras de materiais oriundos de usinas ou estações de reciclagem de entulho da construção civil dos bairros do Catumbi (Rua Itapirú, 527) no Rio de Janeiro e do Estoril (Rua Nilo Antônio Gazire, 147) em Belo Horizonte, a primeira destas de propriedade privada e a segunda de propriedade pública municipal.

Além dos ensaios imprescindíveis ao dimensionamento mecanístico de pavimentos foram também executados os contemplados na norma NBR 15.116, foram realizados também ensaios de Lixiviação e Solubilização, que estão associados à classificação de resíduos quanto ao aspecto ambiental.

Em Belo Horizonte, já existem vias urbanas executadas com esse material, mas que foram dimensionadas empiricamente. Em visita a estas vias realizada em agosto de 2003, foram observados algumas trincas no revestimento, contudo, em menor proporção e gravidade das aquelas apresentadas em trechos adjacentes executados com agregados convencionais ou provenientes de minério de ferro. Além de ruas e avenidas em plena operação, visitaram-se outras em diferentes fases de execução, observando uma relevante deposição das maiores partículas da brita corrida (superiores a 19 mm) às margens das pistas (Figura 1).

Segundo Nunes (2004), dentre 5507 municípios brasileiros apenas onze possuem usinas de reciclagem operando ou em pré-operação, totalizando 14 usinas. A Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) possui as estações de reciclagem do Estoril e da Pampulha, sendo este

município o único a possuir as três diretrizes da gestão de RCD (facilitação da disposição, segregação na captação e alteração da destinação) implantadas e operando. A usina do Catumbi no Rio de Janeiro, por sua vez, pertence à iniciativa privada desprovida de qualquer apoio do poder público municipal à sua inserção no processo de limpeza pública urbana.



**Figura 1:** Rua em Belo Horizonte (a) antes da imprimação; (b) rua imprimada com partículas segregadas à margem; (c) ponto do pavimento a ser reparado e visualização da brita corrida compactada; (d) rua imprimada. (Fotos do autor, ago/2003).

Nesta pesquisa contou-se com dois tipos de agregados reciclados, denominados simplificadaamente de concreto e misto. O primeiro é o agregado reciclado obtido do beneficiamento de RCD, composto na sua fração graúda de no mínimo 90% em massa de fragmento à base de cimento Portland e rochas. O segundo é o agregado reciclado composto na sua fração graúda de menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento e rochas.

A usina do Catumbi disponibilizou para a pesquisa agregados do tipo misto separados por frações granulométricas, do pó-de-pedra à brita 1. Esta particularidade se mostrou importante a partir do momento que se pode graduar as britas para ensaio, variando-as em três granulometrias distintas (superior, intermediária e inferior) dentro da faixa D para base (DNER-ES 303/97). Salienta-se ainda que, embora não tenham sido utilizadas, esta usina forneceu britas de frações superiores, porém não separadas por peneiramento.

Em contrapartida, os agregados provenientes da estação de reciclagem do Estoril foram fornecidos nos dois tipos, concreto e misto, cuja denominação local é agregados tipo A e tipo B respectivamente. Devido à ausência de peneiramento na usina como aquele citado no parágrafo anterior, o produto da britagem disponibilizado foi a brita corrida ou bica corrida.

Na coleta das amostras de agregados nas usinas e na redução das mesmas para ensaios de laboratório, foram adotadas as normas DNER-PRO 120/97 e DNER-PRO 199/96 respectivamente, visando assim obter maior representatividade desses materiais nos ensaios.

Após a análise granulométrica das amostras de campo, os ensaios da pesquisa foram realizados nas combinações apresentadas no Quadro 1, contemplando: o tipo de material, a granulometria do material em função da posição dentro da faixa D ou não especificada chamada bica corrida, a energia de compactação e a sua fonte geradora (usina).

**Quadro 1:** Amostras ensaiadas em laboratório nesta pesquisa

Amostra	Agregado	Granulometria	Energia de compactação	Cidade
MSIRJ	<u>M</u> isto	<u>S</u> uperior	<u>I</u> ntermediária	<u>R</u> io de <u>J</u> aneiro
MSMRJ	<u>M</u> isto	<u>S</u> uperior	<u>M</u> odificada	<u>R</u> io de <u>J</u> aneiro
MMIRJ	<u>M</u> isto	Inter <u>m</u> ediária	<u>I</u> ntermediária	<u>R</u> io de <u>J</u> aneiro
MMMRJ	<u>M</u> isto	Inter <u>m</u> ediária	<u>M</u> odificada	<u>R</u> io de <u>J</u> aneiro
MIIRJ	<u>M</u> isto	<u>I</u> nferior	<u>I</u> ntermediária	<u>R</u> io de <u>J</u> aneiro
MIMRJ	<u>M</u> isto	<u>I</u> nferior	<u>M</u> odificada	<u>R</u> io de <u>J</u> aneiro
CIBH	<u>C</u> oncreto	Bica Corrida	Intermediária	<u>B</u> elo <u>H</u> orizonte
CMBH	<u>C</u> oncreto	Bica Corrida	<u>M</u> odificada	<u>B</u> elo <u>H</u> orizonte
MIBH	<u>M</u> isto	Bica Corrida	Intermediária	<u>B</u> elo <u>H</u> orizonte
MMBH	<u>M</u> isto	Bica Corrida	<u>M</u> odificada	<u>B</u> elo <u>H</u> orizonte

Com o intuito de se caracterizar os RCD do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte, realizaram-se os ensaios de análise granulométrica, compactação, triaxial dinâmico – módulo de resiliência e deformação permanente, abrasão Los Angeles, índice de forma, e ensaios sobre a massa bruta, de lixiviação e de solubilização, conforme normas técnicas brasileiras pertinentes listadas nas referências.

### 3. RESULTADOS DE ENSAIOS

São apresentados neste trabalho parte dos resultados obtidos ao longo da pesquisa completa, sendo que os demais resultados e maiores detalhes estão em Fernandes (2004).

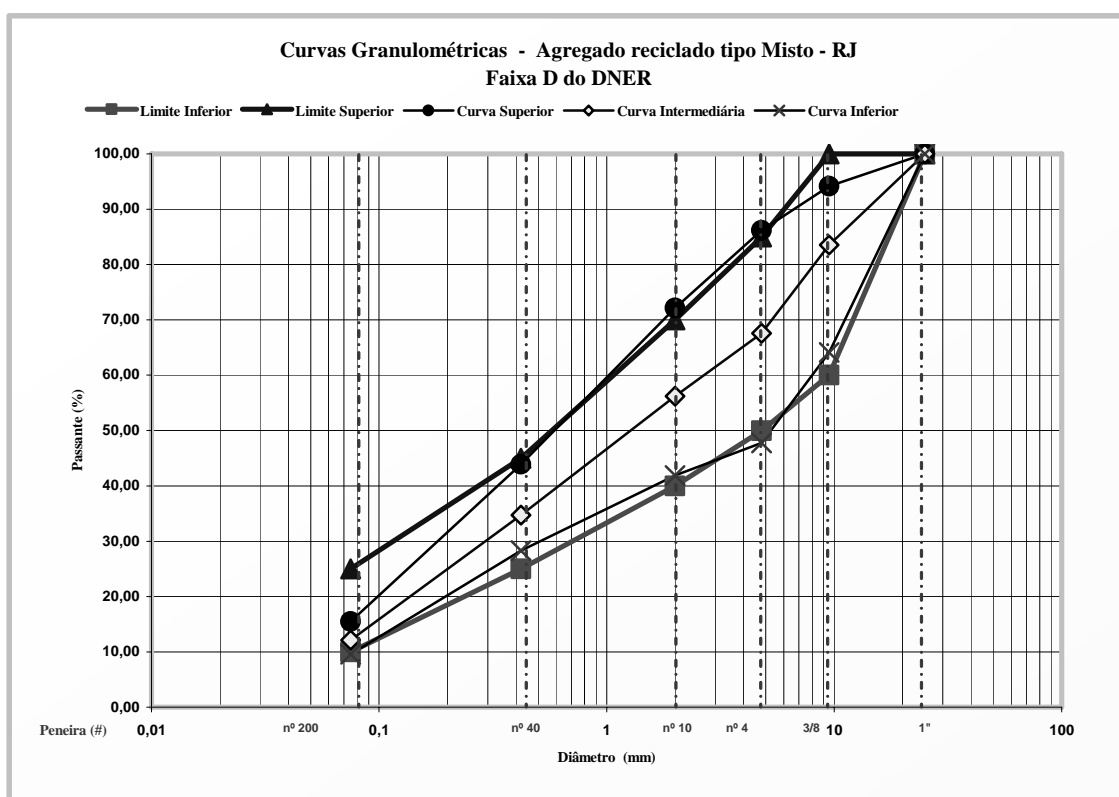
#### 3.1 Análise granulométrica

Determinou-se inicialmente a composição granulométrica dos agregados reciclados, ensaiando-se as britas 1 e 0, o pedrisco e o pó-de-pedra da usina do Catumbi e as bicas corridas da estação do Estoril. De posse da granulometria dos materiais do Rio de Janeiro, dosaram-se três grupos de amostras para a pesquisa, enquadrando-as na Faixa D do DNER para base como mostrado como exemplificado na Tabela 1 para uma delas: uma no limite

superior desta faixa, outra no limite inferior e o último numa posição intermediária em relação às duas primeiras (Figura 2). Assim, a pesquisa foi feita com três britas graduadas de agregados reciclados de RCD tipo Misto do Rio de Janeiro e duas britas corridas de Belo Horizonte: uma a partir de agregados de concreto e outra proveniente de agregados tipo misto.

**Tabela 1:** Dosagem - Brita graduada – Curva Superior.

Peneiras		Brita 1		Brita 0		Pedrisco		Pó de Pedra		DNER Faixa D		Curva Superior 100%
#	mm	Amostra Total %	Dosagem 5%	Amostra Total %	Dosagem 10%	Amostra Total %	Dosagem 50%	Amostra Total %	Dosagem 35%	100	100	
1"	25	100,00	5,00	100,00	10,00	100,00	50,00	100,00	35,00	100	100	100,00
3/8"	9,5	2,97	0,15	90,34	9,03	100,00	50,00	100,00	35,00	60	100	94,18
nº 04	4,8	0,65	0,03	13,10	1,31	99,80	49,90	99,90	34,97	50	85	86,21
nº 10	2	0,59	0,03	2,96	0,30	76,90	38,45	95,40	33,39	40	70	72,17
nº 40	0,42	0,42	0,02	1,52	0,15	39,70	19,85	68,20	23,87	25	45	43,89
nº 200	0,075	0,16	0,01	0,18	0,02	15,00	7,50	22,80	7,98	10	25	15,51



**Figura 2:** Curvas Granulométricas montadas para o estudo - Britas graduadas de Agregado reciclado tipo Misto – RJ

### 3.2 Ensaio de compactação

Com vistas ao emprego dos agregados reciclados de RCD em camadas de base e sub-base de pavimentos, submeteram-se as amostras neste ensaio às energias modificada e intermediária respectivamente, perfazendo as dez combinações apresentadas no Quadro 1.

As curvas de compactação foram traçadas a partir da adição de uma linha de tendência, obtida pela regressão polinomial de 2ª ordem, onde o ponto de máximo corresponde à umidade ótima e ao peso específico seco máximo ( $w_{ot}$ ,  $\gamma_{smax}$ ).

Realizaram-se ainda ensaios de módulo de resiliência (MR) com os três corpos-de-prova (pontos B, C e D da Figura 3) que apresentaram as umidades de compactação mais próximas àquelas definidas como ótima, definindo o intervalo de umidade para compactação dos futuros corpos-de-prova a serem ensaiados para a obtenção deste módulo.

### 3.3 Ensaio triaxial dinâmico – Módulo de Resiliência

Conhecido o intervalo de umidade de compactação a ser empregado, realizou-se a compactação e o ensaio de Módulo de Resiliência de mais 8 (oito) corpos-de-prova (CP) por amostra segundo a combinação de amostras listadas no Quadro 1, totalizando 10 CPs por amostra. Foram realizados 119 ensaios de MR nesta pesquisa (113 em CPs 10 x 20cm e 6 em CPs 15 x 30cm) O conjunto dos resultados está em Fernandes (2004). Os resultados de MR e das tensões estão em MPa.

A partir dos ensaios supracitados, realizou-se regressões com uma e duas variáveis, esta última resultou em um módulo de resiliência composto (contempla ambas as tensões  $\sigma_3$ ,  $\sigma_d$ ) que melhor representou as amostras estudadas:  $MR = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$ , onde  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são os coeficientes experimentais da equação. Os resultados apresentados nas Tabelas 2 e 3, referem-se a uma amostra específica do Rio de Janeiro e outra de Belo Horizonte, com valores em MPa e a partir de CPs 10x20 cm, como exemplo dos resultados obtidos.

De posse de todos os resultados para o MR de amostras provenientes de agregados reciclados, conclui-se que:

1. A composição granulométrica e a energia de compactação exerceram pouca influência no valor do módulo de resiliência dos agregados em geral;
2. O tipo de material, de Concreto ou Misto, é o principal responsável na diferenciação dos valores de módulo. Agregado tipo Concreto apresentam MR superior.

O fato deste material apresentar pouca influência da curva granulométrica e da energia é um ponto favorável ao seu emprego pois na prática, como se trata de um resíduo, é mais provável que a granulometria varie ao longo da exploração das pilhas, e no campo, energias menores são sempre mais econômicas além de degradarem menos o material.

Esses resultados foram comparados com aqueles obtidos a partir de agregados convencionais de granito e gnaiss do Rio de Janeiro relatados em Ramos (2003) e Ramos e Motta (2004) e de RCD de Brasília (ensaiados na COPPE e apresentados em Motta e Fernandes, 2003), apontando valores semelhantes, exceto pelo fato deste último ter seu MR representado em função apenas do  $\sigma_3$  (Fernandes, 2004).

Como exemplo destes valores típicos citam-se (valores em MPa):

- brita de granito-gnaiss do Rio de Janeiro:  $MR = 673 \sigma_3^{0,43} \sigma_d^{-0,12}$
- RCD de Brasília –  $MR = 1500 \sigma_3^{0,64}$
- RCD do Rio de Janeiro -  $MR = 564 \sigma_3^{0,47} \sigma_d^{-0,24}$
- RCD de Belo Horizonte -  $MR = 454 \sigma_3^{0,44} \sigma_d^{-0,25}$

**Tabela 2:** Módulo de Resiliência (MR em MPa) em função das tensões  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  (em MPa)  
Amostra do Rio de Janeiro

Amostra	$M_R = K_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$				Amostra	$M_R = K_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$			
CP 10 X 20	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R^2$	CP 10 X 20	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R^2$
MSIRJ01B	522	0,46	-0,21	0,9688	MSIRJ	528	0,47	-0,24	0,9633
MSIRJ01C	531	0,56	-0,34	0,9558					
MSIRJ02	560	0,49	-0,24	0,9719					
MSIRJ03	481	0,44	-0,27	0,9575					
MSIRJ04	496	0,46	-0,28	0,9692					
MSIRJ05	475	0,44	-0,26	0,9709					
MSIRJ06	552	0,48	-0,23	0,9668					
MSIRJ07	528	0,44	-0,18	0,9698					
MSIRJ08	561	0,49	-0,22	0,9633					
MSIRJ09	580	0,46	-0,14	0,9744					

**Tabela 3:** Módulo de Resiliência (MR em MPa) em função das tensões  $\sigma_3$  e  $\sigma_d$  (em MPa)  
Amostra de Belo Horizonte

Amostra	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$				Amostra	$M_R = k_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3}$			
CP 10 X 20	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R^2$	CP 10 X 20	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$R^2$
CIBH01B	632	0,39	-0,19	0,9620	CIBH	590	0,47	-0,29	0,8678
CIBH01C	731	0,47	-0,15	0,9354					
CIBH02	606	0,44	-0,17	0,9123					
CIBH03	489	0,53	-0,38	0,8474					
CIBH04	528	0,52	-0,38	0,8087					
CIBH05	604	0,50	-0,27	0,8532					
CIBH06	406	0,50	-0,48	0,7879					
CIBH07	474	0,36	-0,23	0,8895					
CIBH08	535	0,47	-0,32	0,8890					
CIBH09	528	0,48	-0,30	0,8287					

### 3.4 Ensaio triaxial dinâmico de deformação permanente

Com vista a caracterizar os agregados reciclados também sob o aspecto de contribuição para afundamento de trilha de roda, procurou-se verificar a evolução da deformação permanente através do número de aplicação de cargas no ensaio dinâmico e a existência ou não de seus limites, caso esta evolução fosse assintótica.

Considerando as limitações de materiais e de tempo, escolheram-se duas amostras de agregados reciclados de RCD do Rio de Janeiro para submetê-las ao ensaio de deformação permanente, MSIRJ e MIMRJ sob o par de tensão  $\sigma_d=0,3150$  MPa e  $\sigma_3=0,105$  MPa.. A primeira delas (MSIRJ) escolhida por apresentar os menores resultados de MR e a segunda (MIMRJ) os maiores valores dentre aqueles oriundos desta cidade.

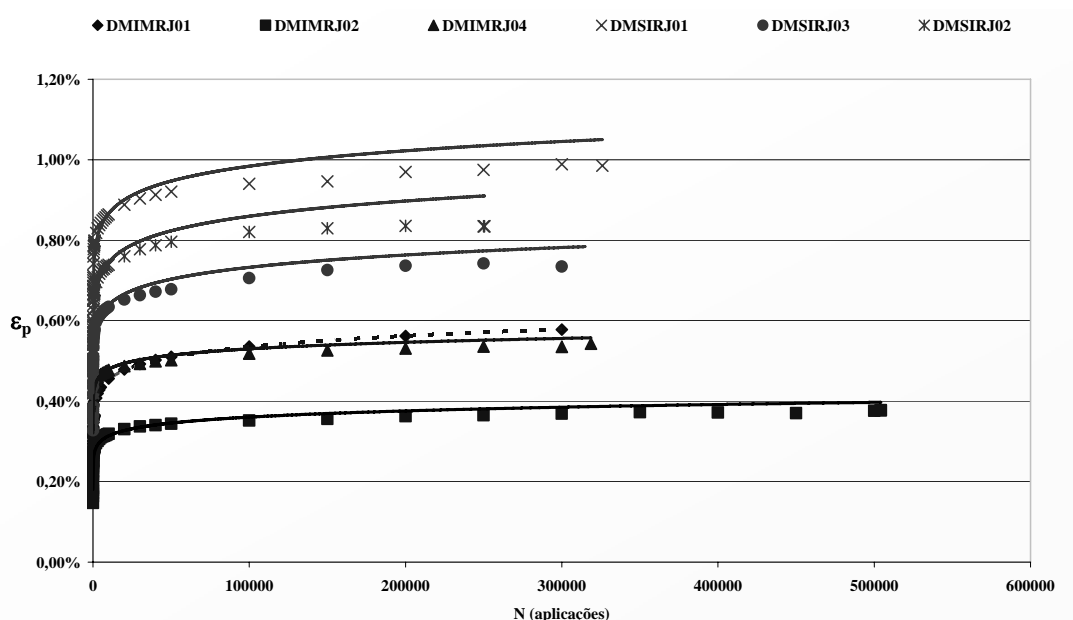
Por outro lado, este par de tensões foi escolhido por ser o de maior magnitude na fase de condicionamento do ensaio de MR, produzindo nos CPs as maiores deformações plásticas e por serem compatíveis com o estado de tensões de camada de base.

Na Tabela 4 são apresentadas as equações de deformação permanente das amostras anteriormente citadas do Rio de Janeiro, com codificação acrescida da letra D (deformação permanente) e na Figura 3 os gráficos.

Verificou-se que:

1. A equação potencial ( $\varepsilon_p = kN^A$ ) representou a deformação das duas amostras satisfatoriamente ( $R^2 > 0,91$ );
2. Um dos CPs da amostra MIMRJ (DMIMRJ02) levado a 504300 aplicações de carga, apresentou comportamento assintótico, o que se repetiu em todos os demais ensaios com número de ciclos variáveis;
3. A deformação permanente é muito mais sensível à distribuição granulométrica e à energia de compactação, analisadas em conjunto, do que ao Módulo de Resiliência, verificando-se uma variação de aproximadamente 50% entre as duas granulometrias e 10% para a energia de compactação, mas todos valores foram muito baixos.
4. Todos os corpos de prova ensaiados apresentaram deformação permanente muito baixa, com paráveis aos valores encontrados em britas convencionais.

As demais medições e observações, bem como os resultados para o MR realizados após os ensaios de deformação permanente, estão em Fernandes (2004).



**Figura 3:** Gráficos Deformação Permanente versus Número de Aplicações de Carga para amostras do Rio de Janeiro.

**Tabela 4:** Equações de deformação permanente de duas amostras de agregados reciclados

Amostra CP 10 x 20	$\varepsilon_p = kN^A$		
	k	A	$R^2$
DMSIRJ01	0,0052	0,0551	0,9191
DMSIRJ02	0,0042	0,0621	0,9131
DMSIRJ03	0,0037	0,0591	0,9535
DMIMRJ01	0,0024	0,0697	0,9380
DMIMRJ02	0,0018	0,0603	0,9402
DMIMRJ04	0,0032	0,0436	0,9432

### 3.5 Ensaio de abrasão Los Angeles

Este ensaio de abrasão Los Angeles – LA- foi realizado nos agregados disponibilizados pelas usinas de reciclagem do Catumbi (RJ) e do Estoril (BH): Britas 0 e 1 da primeira usina e as britas corridas de agregados reciclados tipo Misto e de Concreto da última. A Tabela 5 mostra os resultados de LA.

Salienta-se que na norma NBR 15.116 não consta nenhum parâmetro que diga respeito ao Ensaio de Abrasão “Los Angeles”. Adotando as especificações da NBR 11.804 para sub-base e base de pavimentos, tem-se que os resultados deste ensaio devem ser inferiores a 55%. Portanto, apenas os agregados da usina do Estoril enquadram-se dentro das especificações.

Contudo não se deve ter como relevante este ensaio para camada de sub-base e base tendo em vista os resultados dos ensaios de carga repetida. Correlacionando os resultados deste ensaio com os ensaios dinâmicos, verifica-se que os agregados reciclados com menor desgaste à abrasão, ou seja, as brita corridas de Belo Horizonte, necessariamente não apresentam os maiores resultados de módulo e, quanto à deformação permanente, os agregados reciclados do Rio de Janeiro que sofreram grandes desgastes à abrasão apresentaram pequenos acúmulos de deformações plásticas sob carga compatível com o tipo de esforço a que será submetida.

**Tabela 5:** Resultados do Ensaio de Abrasão Los Angeles de Agregados Reciclados de RCD do Rio de Janeiro e Belo Horizonte

Agregado Reciclado	Origem (Usina)	Graduação Los Angeles	Nº de Rotações do Tambor	Nº de Esferas	Massa da Carga Abrasiva (g)	Resultado de Ensaio (An)
Brita 0	Catumbi	C	500	8	3330+20	59
Brita 1	Catumbi	B	500	11	4584+25	66
Brita corrida - Misto	Estoril	A	500	12	5000+25	55
Brita corrida - Concreto	Estoril	A	500	12	5000+25	52

### 3.6 Ensaio de Índice de Forma

Adotou-se a norma NBR 7809, que prescreve o método através do qual se determina o índice de forma do agregado graúdo com dimensão máxima característica superior a 9,5 mm. A norma NBR 15.116 especifica valor inferior a 3,0 como limite ao emprego destes agregados. Na Tabela 6 são apresentados os resultados do ensaio de Índice de Forma da Brita 1 da usina do Catumbi e das britas corridas da usina do Estoril, respeitada a dimensão máxima supracitada. Todos estes agregados apresentaram-se adequados ao uso segundo a norma NBR 15.116, contradizendo a expectativa em contrário calcada no fato destes agregados tipo Misto possuírem visualmente sensível presença de fragmentos aparentemente lamelares cerâmicos oriundos de telhas, pisos e azulejos.

A cubicidade dos agregados reciclados, principalmente aqueles tipo misto, decorre em parte da sua suscetibilidade ao desgaste superficial das partículas. Tal afirmação foi facilmente verificável no próprio peneiramento inerente a este ensaio. A suscetibilidade à fragmentação é

outro aspecto relevante. Embora não seja evidente no ensaio de Índice de Forma, certamente contribuirá para a redução destes índices quando os agregados forem submetidos ao procedimento de compactação, seja em laboratório seja em campo.

**Tabela 6:** Índice de Forma de agregados reciclados de RCD do RJ e BH

Agregado Reciclado	Origem (Usina)	Índice de Forma (IF)
Brita 1	Catumbi	2,7
Brita corrida - Misto	Estoril	2,8
Bitra corrida - Concreto	Estoril	2,9

### 3.7 Ensaio sobre a massa bruta, ensaio de lixiviação e ensaio de solubilização

Duas amostras de agregados reciclados, uma da usina do Catumbi (misto) e outra da usina do Estoril (misto) foram enviadas ao laboratório da empresa TASQA Serviços Analíticos Ltda para ensaios de lixiviação e solubilização, de acordo com a Norma NBR 10004, 10005, 10006 de 1987 pois não haviam saído as normas revistas de 2004, quando da realização dos ensaios.

A partir dos resultados analisados, as amostras se classificaram como: Resíduo Classe **II (Resíduo Não-Inerte)**. Os agregados reciclados tipo Misto do Rio de Janeiro foram classificados desta forma devido às concentrações de Alumínio e Fenóis (solubilizados) e aqueles de Belo Horizonte devido às concentrações de Alumínio e Selênio (solubilizados).

Observa-se que um dos constituintes que apresentou concentração superior àquela preconizada por norma foi o Alumínio, tanto para a amostra do Rio de Janeiro quanto para a de Belo Horizonte. Este, por sua vez, é um metal abundante em solos tropicais, constituindo parte da matéria-prima de artefatos cerâmicos e também estão presentes “in natura” entre os RCD. Fenóis, no caso do Rio de Janeiro, e Selênio, em Belo Horizonte, também tiveram suas concentrações acima dos valores máximos permitidos. Contudo, suas origens vão desde de sabonetes e xampus anticaspa a ligas metálicas, passando por produtos plásticos abundantes em lixos metropolitanos. Portanto, considera-se que tais resultados não inviabilizam o uso de agregados reciclados de RCD. No entanto, estes indicam uma atenção especial ao seu emprego, por exemplo, cuidados a serem tomados com a drenagem de águas superficiais e subterrâneas.

## 4 Aplicação dos resultados

Objetivando verificar a viabilidade econômica da utilização dos agregados reciclados de RCD dos Municípios do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte, estudou-se a substituição em um trecho de pavimento da Via Light do agregado convencional formador da base (e sub-base) do pavimento por estes agregados artificiais. São apresentados os resultados de uma revisão do dimensionamento mecanístico desta via feito por Darous (2003).

O programa computacional utilizado foi o FEPAVE2, que possibilita a aplicação da elasticidade não-linear, utilizando os módulos de resiliência dos materiais determinados nos ensaios dinâmicos. Pode-se definir através da análise mecanística a deflexão máxima, a tensão vertical no subleito e da tensão de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico. Desta

forma, determina-se a estrutura que atenda ao número de eixos equivalentes de referência, assegurando-se a expectativa de vida de fadiga e de deformação permanente.

Apresenta-se na Tabela 7 o resultado do dimensionamento, segundo Darous (2003), para a estrutura desta via, denominada alternativa PR5: No redimensionamento da estrutura do pavimento desta via, consideraram-se as seguintes amostras de agregados reciclados: MIIRJ, MIMRJ, MIBH e MMBH (Quadro 1). Na Tabela 8 constam os resultados finais para as estruturas do pavimento associadas ao uso de cada uma destas amostras.

Pode-se verificar que, além da redução do volume da base a ser adotada e/ou do revestimento, em um dos casos, e nos outros se dispensaria a sub-base, a utilização do agregado reciclado também se mostra atrativa economicamente quando se considera o custo destes materiais em relação aqueles convencionais.

**Tabela 7:** Dimensionamento da Via Light - Trecho 2 - Alternativa PR5 (Darus, 2003).

Camada	Material	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\mu^*$	Espessura (cm)
Capa	CBUQ na Faixa nº IV A do Instituto de Asfalto (CAP-40)	50.000	0,35	15
Binder	CBUQ na Faixa B do DNER (CAP-40)	50.000	0,35	
Base	Brita Corrida (pedreira IBRATA)	2.769 $\sigma_3^{0,421}$ $\sigma_d^{0,075}$	0,5	17
Sub-base	Brita Corrida (pedreira IBRATA)	2.769 $\sigma_3^{0,421}$ $\sigma_d^{0,076}$	0,5	18
Subleito	Argila Amarela (jazida pertencente a H. J. Rodrigues Melo Ltda)	4.125 $\sigma_3^{0,062}$ $\sigma_d^{-0,473}$	0,5	-

**Tabela 8:** Via Light/Trecho 2 - Resultado final para as espessuras das camadas de pavimento utilizando agregado reciclado de RCD

Amostra Camada	Espessuras (cm)				
	MIIRJ	MIMRJ	MIBH	MMBH	MIIRJR
Revestimento	15	15	15	15	14
Base	20	20	20	20	13
$\epsilon_{lim}$	$8,71 \times 10^{-5}$	$8,64 \times 10^{-5}$	$8,92 \times 10^{-5}$	$8,72 \times 10^{-5}$	$8,87 \times 10^{-5}$
$\sigma_{vsl}^{**}$	0,351	0,354	0,336	0,349	0,511

(\*\*) Tensão vertical no topo subleito em kgf/cm<sup>2</sup>; MIIRJR = alternativa que contempla o uso da amostra MIIRJ com alteração espessura da camada de revestimento.

## 5. CONCLUSÃO

A caracterização mecânica dos agregados reciclados de RCD dos municípios do Rio de Janeiro e Belo Horizonte para uso em pavimentação mostra que é possível atender aos três aspectos: técnico, econômico e sócio-ambiental. Com base nos estudos realizados, e apoiado na observação de trechos construídos em Belo Horizonte já com alguns anos de uso, concluiu-se que o uso dos agregados reciclados de RCD como os estudados nesta pesquisa, é viável tecnicamente, economicamente motivador, ambientalmente benéfico e, além disso, uma resposta à necessidade de crescimento sustentável não apenas de um município, mas de um país, caracterizando a adoção da “filosofia” da racionalidade, da filosofia da preservação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, NBR 15.115, 2004, Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil –execução das camadas de pavimentação.
- ABNT, NBR 15.116, 2004, Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil –utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural- Requisitos.
- ABNT, NBR 10004, 1987 – Resíduos sólidos –classificação
- ABNT, NBR 10005, 1987 – Lixiviação de resíduos sólidos –procedimento para obtenção do lixiviado
- ABNT, NBR 10006, 1987- Solubilização dos resíduos sólidos –procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.
- Bodi, Janos, Brito Filho, J.A.e Almeida, S. 1995, “Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. 29. Reunião Anual de Pavimentação, ABPv. Cuiabá, MT, v3 pp408-436
- Cassa, José C. S.; Carneiro, Alex P.; Brum, Irineu A.. & Costa, Dayana B., Diagnóstico dos setores produtores de resíduos na região metropolitana de Salvador/BA . In: *Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção*, Editora da UFBA, pp 46-75, 2001.
- Ciocchi, Luis, 2003, *Reciclagem de concreto*, Associação dos Engenheiros Civis do Estado do Pará, pp 1-3. Site: [www.engepara.com.br/artigo06102006.htm](http://www.engepara.com.br/artigo06102006.htm)
- CONAMA Resolução Nº 307 de julho de 2002.
- Darous, João, 2003, *Estudo comparativo entre sistemas de cálculo de tensões e deformações utilizados em dimensionamento de pavimentos asfálticos novos*. (COPPE/ UFRJ, M.Sc.,Engenharia Civil, 2003).
- DNER, 1996, *Manual de Pavimentação*, IPR/DNER/ABNT ,Publicação 697, 2º Edição, Rio de Janeiro, Brasil, pp.320.
- DNER-PRO 120/97 – *Coleta de amostra de agregados*.
- DNER-PRO 199/96 – *Redução de amostra de campo de agregados ara ensaio de laboratório*.
- DNER-ES 303/97 *Base estabilizada granulometricamente*.
- Fernandes, Cinconegui 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*. 109 p. (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil)
- Motta, L. M. G, Fernandes, C. da G., 2003. Utilização de resíduo sólido da construção civil em pavimentação urbana. *Anais*. 12 Reunião de Pavimentação Urbana. ABPv. Aracajú.
- Nunes, Kátia R. A. *Avaliação de investimentos e de desempenho de centrais de reciclagem para resíduos sólidos de construção e demolição*. 2004. 276 p. (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia de Produção, 2004).
- PMSP, 2003, Portaria 32/SIURB G/2003 –PMSP /SP ETS 001/2002 – *Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil*.
- Ramos, C. R. e Motta, L. M. G. Estudo do comportamento resiliente de diversos solos e materiais britados do município do Rio de Janeiro.*Anais*. 35. Reunião Anual de Pavimentação. ABPv. Rio de Janeiro.
- Trichês, Glicério e Kruckyj, P. R., 1999, Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. *Anais*. 4 Congresso Brasileiro de geotecnia Ambiental , São José dos Campos, São Paulo.

Endereço eletrônico dos autores:

Cinconegui da graça Fernandes – [cinconegui@eletrobras.com](mailto:cinconegui@eletrobras.com)

Laura Maria Goretti da Motta – [laura@coc.ufrj.br](mailto:laura@coc.ufrj.br)