



---

## CAPÍTULO VI

# USO DO AGREGADO RECICLADO EM CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS



Alex Pires Carneiro  
Paulo César Burgos  
Elaine Pinto Varela Alberte

**A** utilização de entulho como agregado reciclado, em camadas de pavimentos urbanos, é uma das formas de reciclagem mais difundidas para esse resíduo. Com a evolução das técnicas de pavimentação, que vem permitindo o aprimoramento de várias alternativas para a execução de pavimentos, têm-se desenvolvido estudos sobre formas de aproveitamento do entulho, sobretudo em camadas de base e sub-base de vias urbanas.

O aproveitamento do agregado reciclado na pavimentação apresenta diversas vantagens:

- utilização de quantidade significativa de material reciclado tanto na fração miúda, quanto na gráuda;
- simplicidade dos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado (separação e britagem primária), contribuindo para a redução dos custos e a difusão dessa forma de reciclagem;
- possibilidade de utilização dos diversos materiais componentes do entulho (concretos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.);
- utilização de parte do material em granulometrias gráudas reduzindo o consumo de energia necessário para a reciclagem do entulho.

O agregado reciclado apresenta propriedades interessantes para utilização na construção de pavimentos. Do ponto de vista geotécnico, é considerado um material não plástico, o que permite sua utilização em locais com presença de água, por gerar pouca ou nenhuma lama. Pode, ainda, ser utilizado como redutor de plasticidade, contribuindo, assim, na estabilização de solos. Apresenta, também, expansibilidade baixa ou nula, ou seja, mesmo sob saturação, não ocorre a expansão das camadas compactadas (Triches & Kryckj, 1999).

A reciclagem do entulho também representa vantagens econômicas para a administração pública municipal (Triches & Kryckyj, 1999), tais como:

- redução dos custos com a remoção do material depositado clandestinamente ao longo das vias públicas, terrenos baldios, cursos d'água e encostas;
- aumento da vida útil dos aterros sanitários, reduzindo a necessidade de áreas para a implantação de novos aterros;
- diminuição nos custos de operação dos aterros sanitários, pela exclusão do entulho;
- diminuição nos custos de pavimentação e infra-estrutura urbana.

Além das vantagens oriundas do baixo custo, da simplicidade do processo executivo e dos bons resultados obtidos em experiências anteriores, deve-se considerar, também, a preservação do meio ambiente gerada pela reciclagem desse material, uma vez que a sua disposição inadequada causa vários problemas urbanos (alagamentos, deslizamentos de encostas, doenças, entre outros). Essa forma de reciclagem do entulho contribui, ainda, para a preservação dos recursos naturais, reduzindo a degradação ambiental causada pela extração das matérias-primas convencionais. Por fim, o uso do agregado reciclado em pavimentos apresenta-se como alternativa interessante para os administradores públicos aumentarem a oferta de vias necessárias ao desenvolvimento urbano.

Desta forma, o Projeto Entulho Bom desenvolveu estudos buscando avaliar o desempenho do uso do agregado reciclado de Salvador em camadas de bases e sub-bases de pavimentos. Foi investigado o comportamento do agregado reciclado gráudo e miúdo, tanto misturados entre si, quanto com solos típicos da região de Salvador. Os materiais foram avaliados pelo método tradicional e

pelo método MCT (Miniatura, Compactado, Tropical). Os resultados obtidos permitiram comprovar a viabilidade técnica e econômica do agregado reciclado na execução de pavimentos e, assim, contribuir para a difusão desta forma de reciclagem.

## ○ **CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE PAVIMENTOS**

As camadas do pavimento têm como função oferecer resistência aos esforços oriundos do tráfego, distribuindo-os convenientemente ao subleito, além de melhorar as condições de rolamento e garantir comodidade e segurança ao usuário. Essas camadas, componentes da estrutura de um pavimento, podem variar quanto à espessura ou aos materiais utilizados.

Neste capítulo, serão abordados aspectos referentes às camadas de base e sub-base que compõem um pavimento granular flexível, uma vez que é bastante difundido o uso do agregado reciclado nesse tipo de pavimento.

### **MATERIAIS**

As sub-bases ou bases granulares são constituídas de solos, areias, seixos, pedregulhos, produtos de britagem de rochas ou de resíduos sólidos (entulho, escórias, entre outros). Essas camadas também podem ser constituídas, quando adequadamente compactadas, por combinações de materiais que apresentem estabilidade e durabilidade adequadas para resistir às cargas do trânsito e à ação dos agentes climáticos.

O solo é um material de fundamental importância, pois, mesmo não sendo utilizado na constituição das camadas do pavimento, na maioria das vezes, compõe a camada de suporte da estrutura.

Em várias regiões do Brasil, predominam os solos tropicais, que apresentam propriedades e comportamentos diferenciados dos

solos temperados, devido à atuação de processos geopedológicos típicos de regiões tropicais úmidas. Para que um solo seja classificado como tropical, não basta que tenha se formado numa região desse clima. É essencial que apresente as peculiaridades inerentes aos solos tropicais, caracterizados por apresentar dois comportamentos predominantes (Nogami & Villibor, 1995):

- **comportamento laterítico** — que caracteriza, pedologicamente, uma variedade de solo superficial pedogenético, típico das regiões tropicais úmidas, podendo ser tanto residual quanto transportado;
- **comportamento saprolítico** — que é resultante da decomposição e/ou degradação *in situ* da rocha que deu origem ao solo, cuja estrutura é mantida; assim, solos com comportamento saprolítico são considerados genuinamente residuais.

Os agregados são elementos importantes no estudo de bases e sub-bases, por corresponderem a mais de 90% do peso das diversas misturas utilizadas em pavimentos. Podem ser classificados, inicialmente, em agregados naturais e artificiais:

- **naturais** — são agregados utilizados como se encontram na natureza, salvo os procedimentos de britagem e lavagem, sendo a areia, a brita e o pedregulho seus exemplos mais comuns;
- **artificiais** — são agregados que se originam de alterações físicas e químicas de outros materiais, a exemplo do entulho, da escória de alto forno, da argila expandida, entre outros.

### **PROPRIEDADES E ESPECIFICAÇÕES DOS MATERIAIS**

Os solos e os agregados empregados na pavimentação devem apresentar determinadas propriedades, para que possam ser utilizados em bases, sub-bases ou reforços de subleito.

#### **GRANULOMETRIA**

Os solos e agregados são constituídos de partículas de diferentes dimensões em proporções variadas. A determinação da dimensão

dessas partículas e das suas respectivas percentagens de ocorrência permite obter a sua distribuição granulométrica, ou seja, a distribuição percentual da massa que determinadas faixas de tamanho de grãos, especificadas pela NBR 7181, representam em relação à massa seca total. Através da representação gráfica desse resultado, é obtida a curva granulométrica, cuja finalidade principal é classificar texturalmente um solo ou agregado.

O sistema de classificação de solos e agregados proposto pela AASHTO — American Association of State Highway and Transportation Officials (1978) — utiliza a curva granulométrica para avaliar e classificar o material de acordo com sua aplicação (vias secundárias, aterros, subleitos, bases e sub-bases de pavimentos flexíveis, entre outros). O Índice de Grupo é um parâmetro utilizado no auxílio dessa classificação, que depende dos resultados obtidos nos ensaios de granulometria e de limites de consistência.

A distribuição granulométrica também permite calcular, através da fórmula de Hazen, o coeficiente de permeabilidade do material — capacidade drenante da amostra —, constituindo um parâmetro complementar para a análise de desempenho de materiais para pavimentos.

A curva granulométrica de um solo ou agregado pode se apresentar sob duas formas típicas: granulometria contínua e granulometria descontínua.

Na **granulometria contínua**, estão presentes todos os tamanhos das partículas de um determinado intervalo granulométrico. Isso permite que os grãos menores do material se encaixem nos vazios intergranulares dos maiores, constituindo, assim, um material bem compactado, ou seja, mais resistente e menos deformável.

A **granulometria descontínua**, por sua vez, apresenta-se quando há uniformidade no tamanho dos grãos ou deficiência significativa

de uma faixa de diâmetro de grãos presentes no material. Essas características impedem que os grãos se encaixem adequadamente entre si, proporcionando, assim, um material mal graduado.

As especificações para materiais de base e sub-base de pavimentos estabilizados granulometricamente são apresentadas pela NBR 11804, a qual indica a necessidade de a curva granulométrica ser contínua e se enquadrar nas faixas granulométricas nela especificadas.

Ainda segundo essa norma, para a execução de camadas estabilizadas granulometricamente, a porcentagem de material que passa pela peneira de 0,075 mm deve ser inferior a  $2/3$  da porcentagem que passa pela peneira de 0,42 mm.

#### **LIMITES DE CONSISTÊNCIA OU DE ATTERBERG**

A influência das frações finas de um material não é definida apenas pela granulometria, pois suas propriedades dependem também do teor de umidade, da esfericidade, do arredondamento e da composição química e mineralógica das partículas. Nesse sentido, os ensaios de Limites de Consistência ou Limites de Atterberg (NBR 6459; NBR 7180) são comumente utilizados na avaliação do material, objetivando o estudo de seus diferentes estados em presença da água.

Nos ensaios de consistência, são obtidos os limites de liquidez e de plasticidade, bem como o índice de plasticidade. O limite de liquidez permite identificar a umidade de transição entre os estados líquido e plástico de um determinado material. Já o limite de plasticidade indica a umidade de transição entre o estado plástico e o semi-sólido. Por fim, o índice de plasticidade é obtido pela diferença entre esses dois limites.

A NBR 11804 estabelece, para a execução de base e sub-base de pavimentos, valores máximos admissíveis para o limite de liquidez ( $< 25\%$ ) e o índice de plasticidade ( $< 6\%$ ), buscando evitar a perda de suporte ou a expansão excessiva da camada do pavimento.



Esses comportamentos são causados, geralmente, pelo aumento de umidade ou pela infiltração de água, após o término da construção do pavimento.

#### **EQUIVALENTE DE AREIA**

O equivalente de areia é um ensaio que indica o teor de areia em relação à fração argila presente em um material. Consiste na relação volumétrica dada pela razão entre as alturas do nível superior da areia e da suspensão argilosa de uma amostra de solo ou de agregado miúdo, numa proveta, em condições estabelecidas pela NBR 12052.

A análise dessa propriedade passou a ser utilizada por algumas instituições, no auxílio à estabilização de solos com agregados, especialmente em solos agregados pobres em finos argilosos e/ou siltosos (Nogami & Villibor, 1995).

A NBR 11804 estabelece que materiais para base e sub-base de pavimentos devem apresentar equivalente de areia superior a 30%.

#### **ABRASÃO LOS ANGELES**

O ensaio de Abrasão Los Angeles tem o objetivo de avaliar o desgaste do material quando submetido a ações de impacto e de atrito. A NBR 6465, que apresenta o ensaio para determinação dessa propriedade, indica que a interpretação dos resultados deve considerar a origem do material, sua estrutura mineralógica e a respectiva aplicação. O valor máximo estabelecido pela NBR 11804 para base e sub-base de pavimentos é de 55% de perda de material. Entretanto, a AASHTO (1978) permite a utilização de agregados que possuam Índice de abrasão Los Angeles superiores, nos casos em que a experiência tem demonstrado comportamento adequado por parte desse material. No Brasil, tem-se muitas vezes preferido, no caso de materiais degradáveis, determinar as características após um certo número de moldagens e remoldagens, no ensaio de determinação de Índice de Suporte Califórnia (Souza, 1980).

### **MASSA ESPECÍFICA SECA MÁXIMA E UMIDADE ÓTIMA**

A compactação é um método de estabilização obtido pela transferência de energia a solos e agregados, através de processos manuais ou mecânicos (impacto, vibração, compressão estática ou dinâmica). Esses processos atuam conferindo ao material maior massa específica seca máxima (massa do metro cúbico de material sujeito a uma determinada compactação), aumentando sua resistência ao cisalhamento e diminuindo o seu índice de vazios, sua permeabilidade e sua compressibilidade.

Através do ensaio de compactação descrito na norma NBR 7182, é possível correlacionar o teor de umidade e a massa específica seca do material. Essa relação é obtida ao se aumentar o teor de umidade do material para cada estado de compactação. A massa específica da amostra crescerá até um limite máximo, para, então, decrescer. O teor de umidade correspondente ao valor de massa específica seca máxima é, então, o que se denomina de teor de umidade ótima e equivale ao teor de umidade do material, que proporciona ao pavimento maior estabilidade.

O ensaio de compactação pode ser realizado utilizando-se diferentes energias (Proctor Normal, Intermediário e Modificado). Quanto menor a energia de compactação empregada, menor será o valor do teor de umidade ótima, e maior será o valor de massa específica seca máxima. A escolha da energia é feita em função do uso que será dado ao material analisado.

### **ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA**

Através desse ensaio (NBR 9895), é possível conhecer, antecipadamente, a expansão do material constituinte de um pavimento submetido a um processo de saturação. O Índice de Suporte Califórnia (CBR - California Bearing Ratio) expressa as características de deformabilidade e de resistência do material submetido a carga estática, em condições saturadas.

Esse ensaio permite avaliar o desempenho dos materiais para leito, subleito, sub-bases e bases de pavimentos. Segundo a NBR 11804, os valores exigidos, nesse ensaio, são de CBR maior ou igual a 60% e expansão menor ou igual a 0,5%, para bases de pavimentos ( $N < 5 \times 10^6$ ), e CBR maior ou igual a 20% e expansão menor ou igual a 1%, para sub-bases.

#### **DEGRADAÇÃO**

O ensaio de degradação tem como objetivo analisar o comportamento do material em função do desgaste sofrido durante a compactação. O procedimento desse ensaio é baseado no artigo “Estudos dos solos lateríticos: índice de degradação e sua influência na compactação e I.S.C” (Macêdo; Lima; Costa, 1986). Consiste na análise das características granulométricas das misturas obtidas, com a realização de ensaios de granulometria antes e depois do processo de compactação. O índice de degradação é obtido através do deslocamento médio da curva granulométrica da amostra degradada pelo ensaio de compactação, em relação à amostra inicial, e apresenta-se como um parâmetro para avaliação, em laboratório, do desempenho de materiais compactados. Segundo Macêdo; Lima; Costa (1986), o valor crítico do índice de degradação ocorre quando a curva granulométrica ultrapassa os limites especificados para a faixa adotada, ou quando é possível identificar uma brusca inflexão da curva granulométrica, causada por uma fratura mais significativa de certo tamanho de partículas.



## **DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS**

Da mesma forma que em pavimentos convencionais, os pavimentos que utilizam agregado reciclado deverão adotar procedimentos de determinação das propriedades dos materiais, visando ao dimensionamento e ao controle da execução.

## **MÉTODOS TRADICIONAIS**

Com relação ao dimensionamento de pavimentos flexíveis, o método empírico da HRB (Highway Research Board, também conhecido como método de Índice de Grupo), baseado na granulometria, índice de plasticidade e limite de liquidez dos materiais, foi, durante muito tempo, empregado no Brasil. Segundo Bodi; Brito Filho; Almeida (1995), esse método, desenvolvido para regiões de climas temperados, não se adapta aos solos tropicais, pois, eventualmente, superdimensiona pavimentos executados com solos lateríticos e subdimensiona pavimentos executados com solos saprolíticos.

Devido a isso, o método mais utilizado no Brasil é o do Índice de Suporte Califórnia (ISC). Este método fornece a espessura de material granular necessária para evitar a deformação plástica ou a ruptura por cisalhamento da camada de subleito, durante a vida útil do pavimento (Bodi; Brito Filho; Almeida, 1995).

### **MÉTODO MCT (MINIATURA, COMPACTADO, TROPICAL)**

Essa metodologia foi desenvolvida, inicialmente, com a introdução do ensaio de Mini-CBR para solos tropicais, com base no procedimento desenvolvido pelo Iowa State University. Posteriormente, foi ampliada, sobretudo para possibilitar o melhor aproveitamento de solos arenosos finos lateríticos em pavimentação, considerando a capacidade de suporte em várias condições (inclusive sem imersão em água) e outras propriedades consideradas relevantes, tais como contração, permeabilidade e infiltrabilidade (Nogami & Villibor, 1995).

A classificação geotécnica MCT, desenvolvida por Nogami & Villibor (1981) especificamente para fins rodoviários, surgiu em virtude das limitações dos procedimentos tradicionais de caracterização e classificação dos solos tropicais, com o propósito de corrigir as discrepâncias do método tradicional.

Vargas (1982) comenta que a ambigüidade da classificação tradicional, quando aplicada aos solos tropicais, vem sendo constantemente denunciada por vários autores, destacando-se Villibor e Nogami.

A classificação MCT constitui o exemplo mais bem sucedido das novas propostas que enfocam adequadamente as características e peculiaridades dos solos desenvolvidos em ambiente de clima tropical (Burgos, 1997).

Esse método utiliza dois conjuntos de ensaios, um para a classificação do solo quanto ao comportamento lateítico e não lateítico (Mini-MCV e associados) e o outro para a determinação das propriedades mecânicas e hidráulicas (Mini-CBR e associados). Utilizam-se, também, dois procedimentos diferentes de compactação: o método Mini-MCV e o método Mini-Proctor, ambos compactados em corpos de prova de dimensões reduzidas (Mini ou Subminiatura), desenvolvidos especialmente para o estudo de solos tropicais.

#### **MINI-MCV E ASSOCIADOS**

O método Mini-MCV consiste na compactação, em diferentes umidades, de mini corpos de prova, submetidos a energias sucessivamente crescentes, até o momento em que seja identificada a falta de densificação do material. Após o término desse ensaio, é obtida uma família de curvas de compactação. Através da avaliação de alguns índices característicos obtidos a partir da análise dessas curvas (coeficiente  $e'$ , coeficiente  $c'$ , entre outros), é possível identificar as características lateíticas ou saprolíticas do material.

Nesse processo, está inclusa a realização do ensaio de Perda de Massa por Imersão ( $P_i$ ), cujo objetivo é avaliar o efeito da imersão em água de solos tropicais compactados e, conjuntamente com o ensaio de Mini-MCV, classificar o material analisado quanto às suas propriedades lateíticas ou saprolíticas.

### **MINI - CBR E ASSOCIADOS**

Esse ensaio tem o objetivo de determinar o índice de suporte Mini-CBR de corpos de prova compactados em laboratório, além de determinar a expansão desse material, por imersão em água, e a contração, por secagem ao ar. O procedimento de compactação Mini-Proctor, utilizado nesse ensaio, é caracterizado por apresentar teor de umidade que varia em torno da umidade ótima de compactação do material e energia constante (Normal ou Intermediária).



### **UTILIZAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO EM PAVIMENTOS**

A utilização de resíduos de construção reciclados em várias das camadas dos pavimentos tem-se mostrado viável na base tecnológica existente. Em várias cidades do Brasil (São Paulo, Belo Horizonte, Ribeirão Preto, entre outras) e no exterior, tem-se utilizado agregados reciclados em pavimentação, e seus resultados satisfatórios vêm demonstrando a boa adequação desse material.

As experiências realizadas em países desenvolvidos vêm consolidando o uso de agregado reciclado como material para nivelamento de terrenos, para drenagem e para a sub-base de vias e estradas (Hansen, 1996 citado por Pinto, 1999). Países em desenvolvimento, como o Brasil, recentemente iniciaram suas experiências com a reciclagem desse resíduo em pavimentação (Pinto, 1998).

A Prefeitura Municipal de São Paulo, pioneira no Brasil nesse tipo de reciclagem, implantou, em 1991, a primeira usina de reciclagem do Hemisfério Sul, conhecida como usina de Itatinga. Essa usina passou algum tempo desativada, voltando ao funcionamento com produção abaixo do seu potencial máximo de 700 m<sup>3</sup> de agregado reciclado por dia (Laterza, 1998).

Essa experiência comprovou o potencial de reciclagem dos resíduos de construção. Em regime de plena utilização, o custo do material produzido na usina de reciclagem chegou a ser 20 a 30% do preço de mercado da pedra britada (Camargo, 1995).

Os estudos sobre o uso de agregado reciclado em obras de pavimentação, desenvolvidos por técnicos da Usina de Asfalto da Prefeitura Municipal de São Paulo, basearam-se em metodologias adequadas às características específicas dos solos tropicais típicos da região estudada (solo laterítico e solo saprolítico). Os resultados indicaram que, ao se utilizar o agregado reciclado em substituição ao agregado convencional, foi possível reduzir a quantidade de material necessário para atingir a mesma capacidade de suporte (Pinto, 1998).

As pesquisas desenvolvidas nessa região mostraram ainda que, em misturas de solo e agregado reciclado, a estabilização da camada com utilização de solo laterítico apresentou resultados satisfatórios, com baixas adições de resíduo reciclado (20 a 30%), produzindo, assim, expressiva elevação da capacidade de suporte (aumento de até 100% do CBR). No caso das misturas de solo e agregado natural, houve aumento de suporte apenas para as adições a partir de 40%. Comportamento similar foi verificado com adição do agregado reciclado aos solos saprolíticos (Bodi; Brito Filho; Almeida, 1995).

Além dos bons resultados do CBR, foi verificado que o resíduo de construção reciclado, sendo material não expansivo, ao ser adicionado ao solo, contribui para a redução da taxa de expansão da mistura. A massa específica do material praticamente não se altera com a mistura, diminuindo, assim, a possibilidade de segregação dos materiais. Os teores de umidade ótima do agregado reciclado também apresentaram comportamento similar ao do solo, simplificando o

processo de execução da camada do pavimento, por possibilitar melhor homogeneização dos materiais e menor dispersão da umidade para qualquer teor da mistura solo /agregado reciclado (Pinto, 1998).

Em **Belo Horizonte**, desde 1993, a Prefeitura desenvolve um programa de reciclagem de resíduos de construção que contempla a instalação de quatro estações de reciclagem (duas já em funcionamento), além de um amplo trabalho de fiscalização e educação ambiental. A Prefeitura, através da Superintendência de Limpeza Urbana — SLU, visa à reciclagem de cerca de 8.800 t/mês de resíduos, com produção de 5.500 m<sup>3</sup> de agregados reciclados (Pinto, 1995). O material reciclado nas usinas em operação tem sido utilizado, principalmente, na execução de sub-bases e tratamentos primários de vias públicas em obras de órgãos da Prefeitura, entre os quais se destaca a SUDECAP — Superintendência de Desenvolvimento da Capital.

Há, também, o exemplo do município de **Ribeirão Preto**, que, com mais de 500 mil habitantes, produz cerca de 970 t/dia de entulho. Sua usina de reciclagem de entulho, com capacidade de reciclar 200 t/dia de material, entrou em operação no final de 1996. Os agregados reciclados são produzidos sob a forma de bica corrida e são destinados, em sua maioria, para recuperação de vias públicas sem pavimentação asfáltica (Laterza, 1998).

Verifica-se, portanto, o grande potencial de utilização dos resíduos de construção civil na execução de camadas de pavimentos. Esse potencial já é conhecido pelos gestores urbanos, sendo usual, em várias cidades brasileiras, o lançamento de entulho bruto para a regularização de camadas de vias periféricas e a manutenção de condições mínimas de tráfego.

Apesar de as experiências realizadas em muitas cidades se mostrarem satisfatórias, as condições nas quais foram executadas e o



desempenho dos materiais utilizados apresentam variações significativas, de acordo com cada região, o que indica a necessidade de **estudos regionais** para a comprovação da viabilidade da utilização do agregado reciclado ou do entulho bruto na execução de pavimentos (Carneiro et al, 2000a).

## **EXPERIÊNCIA REALIZADA**

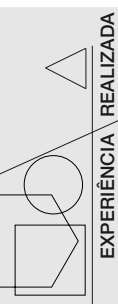
### **USO DO AGREGADO RECICLADO DE SALVADOR EM CAMADAS DE BASE E SUB-BASE DE PAVIMENTOS**

Com a implantação, a partir de 1997, do projeto de gestão diferenciada do entulho de Salvador, promovido pela LIMPURB (apresentado no capítulo IV), a partir da implantação da usina de reciclagem serão produzidos cerca de 200 t/dia de agregado reciclado.

Para viabilizar o uso desse material, foram desenvolvidos estudos laboratoriais, pelo Projeto Entulho Bom, sobre o uso do agregado reciclado de Salvador em pavimentos. Esses estudos buscam contribuir para o aumento da oferta de pavimentação de vias necessárias à expansão urbana e à fundamentação do meio técnico/empreiteiro a respeito dessa forma de reciclagem.

A avaliação da viabilidade do uso do agregado reciclado de Salvador, em camadas de base e sub-base de pavimentos, consistiu na:

- determinação das características físicas dos solos e do agregado reciclado de Salvador para utilização em base e sub-base de pavimentos;
- avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos materiais produzidos;
- identificação das proporções mais adequadas dos materiais e análise das diferentes situações em que é viável a utilização do agregado reciclado de Salvador em pavimentação, de modo que suas propriedades sejam maximizadas para esse uso.



## MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados **dois solos** geneticamente distintos e típicos da região de Salvador: um solo de comportamento **laterítico**, proveniente da formação Barreiras, classificado pedologicamente como latossolo amarelo de textura arenosa, e um solo de comportamento não laterítico, do horizonte pedológico C **saprolítico**, de rocha metamórfica de fácil granulito.

Foi utilizado, também, entulho de Salvador reciclado (britado e classificado) nas frações **agregado reciclado miúdo** (material passante na peneira 4,8 mm) e **agregado reciclado graúdo** (material passante na peneira 19 mm).

As características e a classificação AASHTO — American Association of State Transportation Highway Officials (1978) dos materiais utilizados estão apresentados resumidamente, na **Tabela 1**.

**TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS**

PROPRIEDADES	MÉTODO UTILIZADO	UNIDADE	SOLO LATERÍTICO	SOLO SAPROLÍTICO	AG. REC. MIÚDO	AG. REC. GRAÚDO	
Análise Granulométrica	Pedregulho	NBR 7181	%	0	0	0	50
	Areia		%	80	32	82	44
	Silte		%	1	30	2	3
	Argila		%	19	38	16	3
Coefficiente de permeabilidade	Hazen	—	—	—	—	$2,22 \times 10^{-2}$	
Classificação AASHTO / HRB (Índice de grupo)	AASHTO / HRB	—	A-2-4 (0)	A-7-5 (15)	A-2-4 (0)	A-2-4 (0)	
Limite de liquidez	NBR 6459	%	20	62	NL	—	
Limite de plasticidade	NBR 7180	%	5	42	NP	—	
Índice de plasticidade	NBR 7180	%	15	20	—	—	
Equivalente de areia	NBR 12052	%	14	2	68	—	
Massa unitária	NBR 7251	g/cm <sup>3</sup>	1,27	1,05	1,30	1,07	
Massa específica dos sólidos	NBR 6508	g/cm <sup>3</sup>	2,59	2,65	2,59	2,19	
Abrasão Los Angeles	NBR 6465	%	—	—	—	45	

O agregado reciclado miúdo e o agregado reciclado graúdo são predominantemente constituídos de areia (grossa, média e fina) e pedregulho, respectivamente, ambos apresentando baixos percentuais granulométricos de argila e silte. Esse resultado indica que o agregado reciclado apresenta-se como material adequado para ser utilizado em base e sub-bases de pavimentos (Carneiro et al, 2000b).

O agregado reciclado miúdo apresenta **limites de consistência e equivalente de areia** de acordo com as especificações da NBR 11804. Devido à ausência de plasticidade, o agregado reciclado apresenta comportamento adequado para a estabilização de solos plásticos, como é o caso do solo saprolítico utilizado neste trabalho. Suas **características granulométricas** e seu **coeficiente de permeabilidade** também indicaram a possibilidade de utilização desse material na execução de camadas drenantes de pavimentos, ou em locais onde o lençol freático é elevado.

O agregado reciclado graúdo apresentou 45% de desgaste no ensaio de **abrasão Los Angeles**. Esse material atendeu às especificações da NBR 11804 para sub-base e base de pavimentos (< 55%).

As proporções dos materiais adotadas neste estudo e apresentadas na **Tabela 2** foram definidas com o objetivo de analisarem-se diferentes situações que permitam a utilização de agregado reciclado na execução de camadas de base e sub-base.

As amostras que continham apenas solo (Am 0 e Am 1) serviram de referência para a análise das demais amostras. Esse procedimento permitiu analisar e comparar o comportamento do agregado reciclado, bem como o comportamento da sua mistura com dois solos típicos da região de Salvador.

**TABELA 2 - PROPORÇÕES E MATERIAIS AVALIADOS**

IDENTIFICAÇÃO DA AMOSTRA	MATERIAIS	PROPORÇÃO EM MASSA DE AG. REC. NA MISTURA (%)
Am 0	Solo Laterítico	0
Am 1	Solo Sapolítico	0
Am 2	Ag. Rec. Miúdo	100
Am 3	Ag. Rec. Graúdo	100
Am 4	Solo Laterítico / Ag. Rec. Miúdo	30
Am 5	Solo Laterítico / Ag. Rec. Miúdo	50
Am 6	Solo Laterítico / Ag. Rec. Miúdo	70
Am 7	Solo Sapolítico / Ag. Rec. Miúdo	30
Am 8	Solo Sapolítico / Ag. Rec. Miúdo	50
Am 9	Solo Sapolítico / Ag. Rec. Miúdo	70
Am 10	Solo Laterítico / Ag. Rec. Graúdo	70
Am 11	Solo Sapolítico / Ag. Rec. Graúdo	70
Am 12	Ag. Rec. Miúdo / Ag. Rec. Graúdo	70 *

\* proporção em massa de agregado reciclado graúdo na mistura

## MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Os métodos utilizados para avaliação das propriedades dos materiais foram baseados em normas técnicas da ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas, procedimentos consolidados no meio técnico e métodos específicos para a análise dos solos tropicais. Assim, a caracterização e a avaliação dos materiais foram realizadas de acordo com o Método Tradicional e MCT.

A avaliação pelo **método tradicional** visou à análise das propriedades dos materiais e à compreensão do seu comportamento mecânico. Além dos ensaios de caracterização dos materiais, foram realizados ensaios para avaliação das misturas estudadas: distribuição granulométrica (NBR 7181), compactação na energia

intermediária (NBR 7182), Índice de Suporte Califórnia (NBR 9895) e degradação (Macêdo; Lima; Costa, 1986).

A análise dos materiais realizada pelo **método MCT** teve por objetivo determinar a classificação geotécnica (Mini-MCV e ensaios associados) e as propriedades mecânicas e hidráulicas (Mini-CBR e ensaios associados) dos materiais utilizados, visando à avaliação do seu uso em bases e sub-bases de pavimentos.

Para o método MCT, foram realizados ensaios com os solos lateítico e saprolítico, com o agregado reciclado miúdo e com as misturas constituídas de 50% de cada material (amostras Am 0, Am 1, Am 2, Am 5 e Am 8). As misturas foram estudadas para análise e comparação das características e propriedades geotécnicas obtidas pela junção desses materiais.

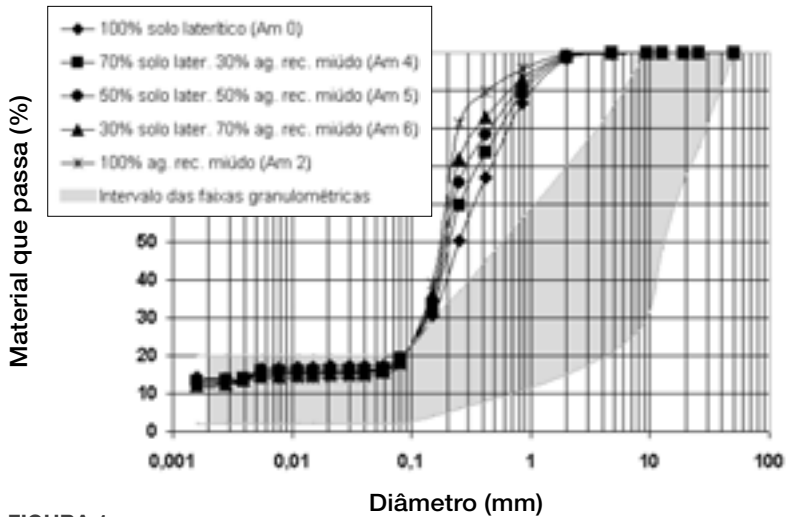
As atividades laboratoriais necessárias para o desenvolvimento da pesquisa foram realizadas no laboratório de Geotecnia da Escola Politécnica da UFBA e no Setor de Pesquisa Tecnológica do Departamento de Infra-estrutura e Rodagens da Bahia (DERBA).

Foi realizada, ainda, a **avaliação econômica** preliminar da implementação dos processos de produção de bases e sub-bases de pavimentos com utilização do agregado reciclado de Salvador. Essa avaliação teve por objetivo analisar a viabilidade econômica dessa forma de reciclagem e colaborar, assim, no desenvolvimento dos processos de gestão de resíduos da construção civil.

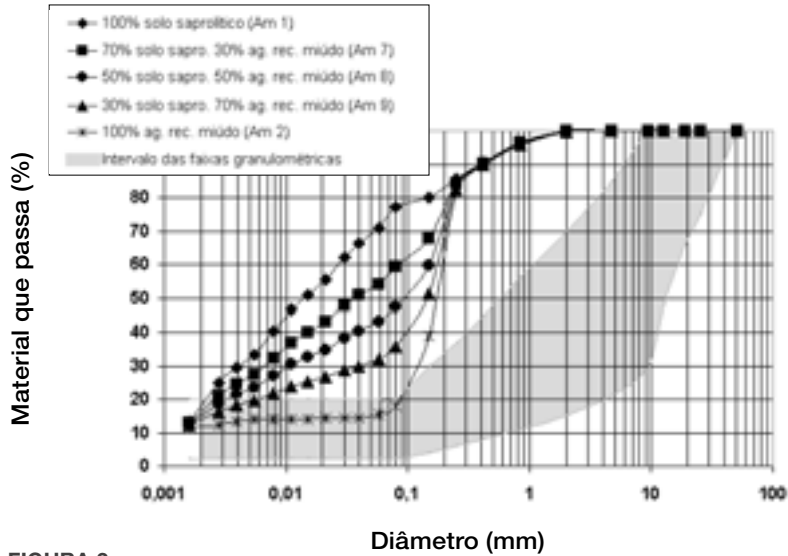
## APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### MÉTODO TRADICIONAL

As **curvas granulométricas** das misturas dos dois solos estudados com o agregado reciclado miúdo não se enquadraram nas faixas granulométricas especificadas pela NBR 11804 para pavimentos produzidos com **materiais convencionais** (**Figuras 1 e 2**).



**FIGURA 1**  
**CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO SOLO LATERÍTICO, DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO E SUAS MISTURAS**

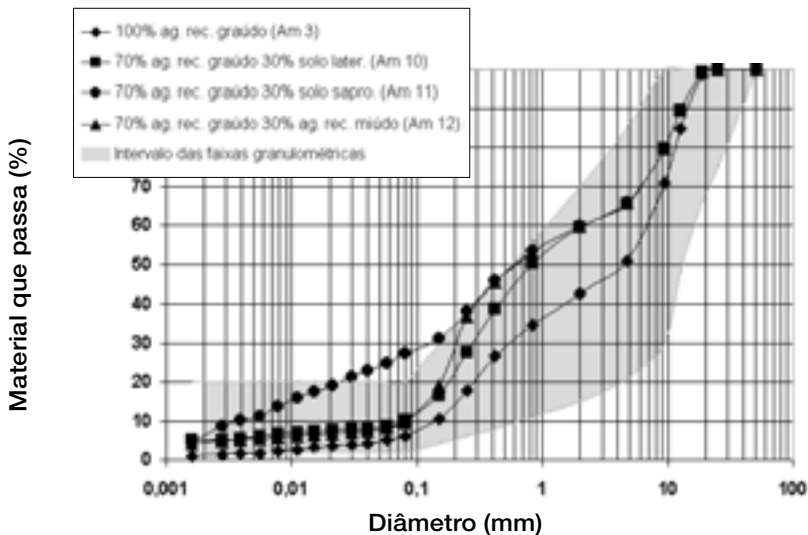


**FIGURA 2**  
**CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO SOLO SAPROLÍTICO, DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO E SUAS MISTURAS**



Contudo, a prática tem mostrado que, no caso de solo-agregado que contém finos lateríticos, a deficiência granulométrica do material fica compensada pela melhor qualidade das partículas finas (Nogami & Villibor, 1995). Além disso, o agregado reciclado é um material pouco estudado e com características diferentes dos agregados naturais. Nesse sentido, as especificações desenvolvidas para materiais tradicionais não devem ser consideradas como fatores limitantes para utilização do material, e sim como referência para a análise do desempenho desses insumos alternativos.

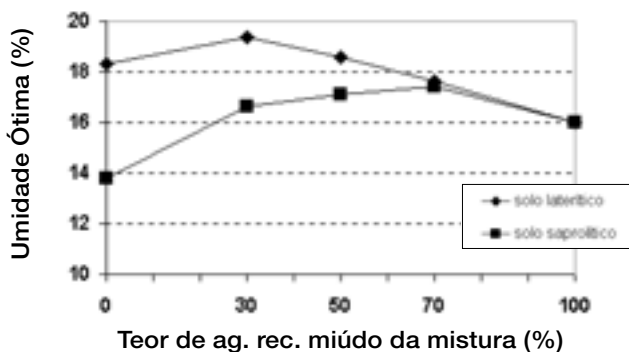
As curvas granulométricas das misturas contendo agregado reciclado graúdo (**Figura 3**) apresentaram-se dentro do intervalo das faixas granulométricas especificadas pela NBR 11804. Pode-se perceber que os materiais estudados apresentam granulometria contínua e as curvas não apresentaram patamares.



**FIGURA 3**  
CURVAS GRANULOMÉTRICAS DO AGREGADO RECICLADO GRAÚDO E SUAS MISTURAS COM OS SOLOS E O AGREGADO RECICLADO MIÚDO

Além disso, as misturas estudadas (com exceção da Am 1) atenderam à especificação da NBR 11804 relativa à quantidade de material passante na peneira 0,075 mm ser inferior a 2/3 do material passante na peneira 0,42 mm.

A **umidade ótima** das misturas que continham agregado reciclado miúdo e solo laterítico tenderam a crescer na medida em que houve o aumento da proporção de material reciclado na dosagem. Esse comportamento, apresentado na **Figura 4**, pode ser justificado pela alta absorção de água das partículas do agregado reciclado. Conforme exposto no capítulo anterior, o agregado reciclado miúdo apresentou 10,4% de absorção de água, enquanto que o agregado reciclado grúdo apresentou 8,2%.

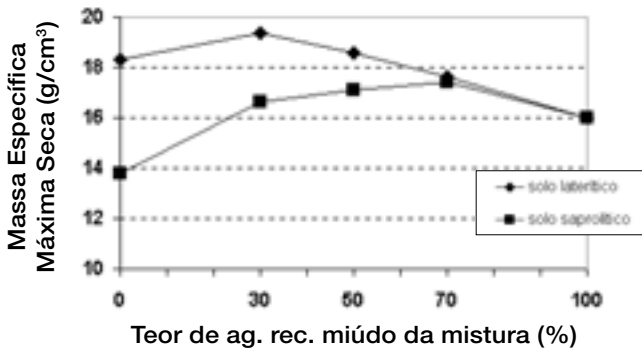


**FIGURA 4**  
**UMIDADE ÓTIMA DOS SOLOS LATERÍTICO E SAPROLÍTICO E**  
**DAS RESPECTIVAS MISTURAS COM AGREGADO RECICLADO MIÚDO**

Nas misturas de agregado reciclado miúdo e solo saprolítico, o comportamento foi inverso. Nesse caso, a redução da umidade ótima pode ser atribuída ao decréscimo significativo de partículas finas presentes na mistura, visto que o agregado reciclado apresenta partículas finas com melhor qualidade (não plásticas) e



menor quantidade que o solo saprolítico. Comparando-se, ainda, as **massas específicas secas máximas** do solo saprolítico e suas respectivas misturas, pode-se perceber que houve um ganho de densificação até aproximadamente 70% de adição do agregado reciclado miúdo, tendo um pequeno decréscimo a partir desse referido ponto (**Figura 5**). As misturas contendo solo laterítico, por sua vez, apresentaram tendência ao decréscimo nos valores de massa específica seca máxima com o aumento da proporção de agregado reciclado.

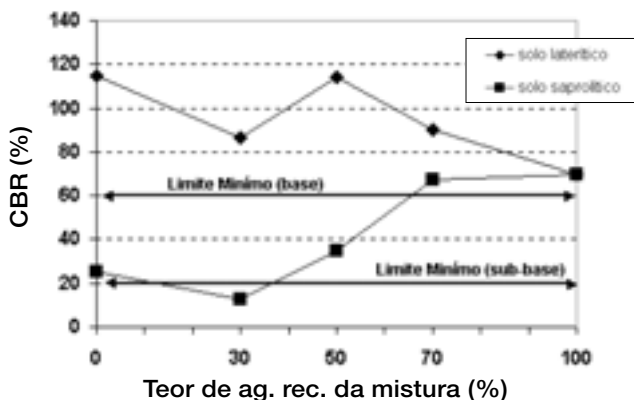


**FIGURA 5**  
MASSA ESPECÍFICA MÁXIMA SECA DOS SOLOS LATERÍTICO E SAPROLÍTICO E DAS RESPECTIVAS MISTURAS COM AGREGADO RECICLADO MIÚDO

Através da análise dos resultados de **CBR** obtidos para as misturas de solo laterítico e saprolítico com **agregado reciclado miúdo** (**Figura 6**), pode-se perceber que as misturas e materiais estudados (com exceção da amostra Am 7) apresentaram-se adequadas à utilização em **sub-bases** de pavimentos, visto terem sido obtidos valores de CBR acima de 20%, conforme a especificação da NBR 11804.

Os valores de CBR obtidos para as misturas que continham solo laterítico e **agregado reciclado miúdo** mostraram-se satisfatórios,

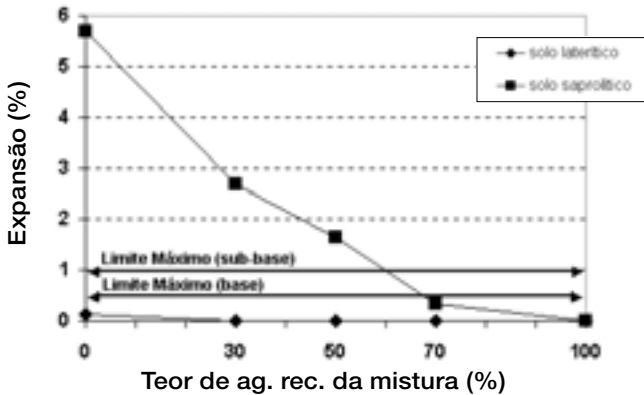
uma vez que todos se apresentaram acima de 60% (limite mínimo exigido para **bases** de pavimentos de acordo com a NBR 11804). Contudo, o aumento da proporção de agregado reciclado miúdo nas misturas que continham solo laterítico mostrou uma tendência ao decréscimo desses valores de CBR. Essa redução pode ser explicada pela diminuição da coesão das amostras, uma vez que tanto o agregado reciclado miúdo quanto o solo laterítico são materiais arenosos. As misturas que continham solo saprolítico, por sua vez, aumentaram a resistência com o aumento da proporção de agregado reciclado miúdo e passaram a apresentar valores de CBR adequados às especificações da ABNT para bases de pavimentos, a partir da adição de 70% de agregado reciclado.



**FIGURA 6**  
RESULTADOS DE CBR DOS SOLOS LATERÍTICO E SAPROLÍTICO E DAS RESPECTIVAS MISTURAS COM AGREGADO RECICLADO MIÚDO

A **expansão** das misturas que continham solo saprolítico diminuiu significativamente à medida que se aumentou o teor de **agregado reciclado miúdo** na mistura (Figura 7). Tem-se, portanto, que a adição de agregado reciclado miúdo ao solo saprolítico

utilizado neste trabalho melhora significativamente a estabilidade do material. Além disso, a expansão das misturas que continham solo laterítico e agregado reciclado miúdo foi praticamente nula, confirmando a possibilidade de empregá-las em locais com lençóis freáticos elevados.



**FIGURA 7**  
RESULTADOS DE EXPANSÃO DOS SOLOS LATERÍTICO E SAPROLÍTICO E DAS RESPECTIVAS MISTURAS COM AGREGADO RECICLADO MIÚDO

Adicionando-se **agregado reciclado gráudo** aos solos e ao agregado reciclado miúdo, a maioria dos valores de umidade ótima e **CBR** aumentaram (**Tabela 3**). A **expansão** nas misturas com agregado reciclado gráudo se mostrou praticamente nula. Com base nesses resultados, percebe-se o grande potencial de utilização do agregado reciclado gráudo em pavimentos, visto que as misturas se apresentaram adequadas à utilização em camadas de base (com exceção da amostra Am 11) e sub-base (sem exceção).

Foram realizados ensaios de distribuição granulométrica antes e após a compactação das amostras que continham agregado reciclado, com o objetivo de calcular o **índice de degradação** desse material. Esse procedimento, baseado em Macêdo; Lima; Costa (1986), tinha como objetivo analisar o comportamento do agregado

**TABELA 3 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MISTURAS  
CONTENDO AGREGADO RECICLADO GRAÚDO**

AMOSTRA	MATERIAIS	UMIDADE ÓTIMA (%)	MASSA ESPECIF. SECA (g/cm³)	CBR (%)	EXPANSÃO (%)
Am 0	100% Solo Laterítico	9,3	1,83	114,6	0,14
Am 10	30% Solo Laterítico / 70% Ag. Rec. Graúdo	14,2	1,82	112,0	0
Am 1	100% Solo Saprólítico	22,0	1,38	25,5	5,69
Am 11	30% Solo Saprólítico / 70% Ag. Rec. Graúdo	25,8	1,52	50,7	0,65
Am 2	100% Ag. Rec. Miúdo	16,0	1,60	70,0	0
Am 12	30% Ag. Rec. Miúdo / 70% Ag. Rec. Graúdo	16,2	1,69	100,0	0

reciclado miúdo e graúdo em função do desgaste sofrido durante a compactação, além de comparar as características granulométricas das misturas analisadas, antes e depois do processo de compactação.

As amostras que continham agregado reciclado miúdo não apresentaram índice de degradação significativo (**Tabela 4**). Por sua vez,

**TABELA 4 - ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO DAS AMOSTRAS  
CONTENDO AGREGADO RECICLADO**

AMOSTRA	MATERIAIS	ÍNDICE DE DEGRADAÇÃO (%)
Am 2	Ag. Rec. Miúdo	—
Am 4	Solo Laterítico / Ag. Rec. Miúdo	—
Am 5	Solo Laterítico / Ag. Rec. Miúdo	1,0
Am 6	Solo Laterítico / Ag. Rec. Miúdo	0,4
Am 7	Solo Saprólítico / Ag. Rec. Miúdo	1,1
Am 8	Solo Saprólítico / Ag. Rec. Miúdo	1,3
Am 9	Solo Saprólítico / Ag. Rec. Miúdo	—
Am 3 *	Ag. Rec. Graúdo	15,9
Am 10 *	Solo Laterítico / Ag. Rec. Graúdo	9,9
Am 11 *	Solo Saprólítico / Ag. Rec. Graúdo	11,0
Am 12 *	Ag. Rec. Miúdo / Ag. Rec. Graúdo	8,8

\* Amostra modificada: agregado reciclado graúdo com 92 % de material retido na peneira 4,8 mm

as amostras que continham agregado reciclado gráudo apresentaram valores altos nos índices de degradação, entre 8,8% e 15,9%.

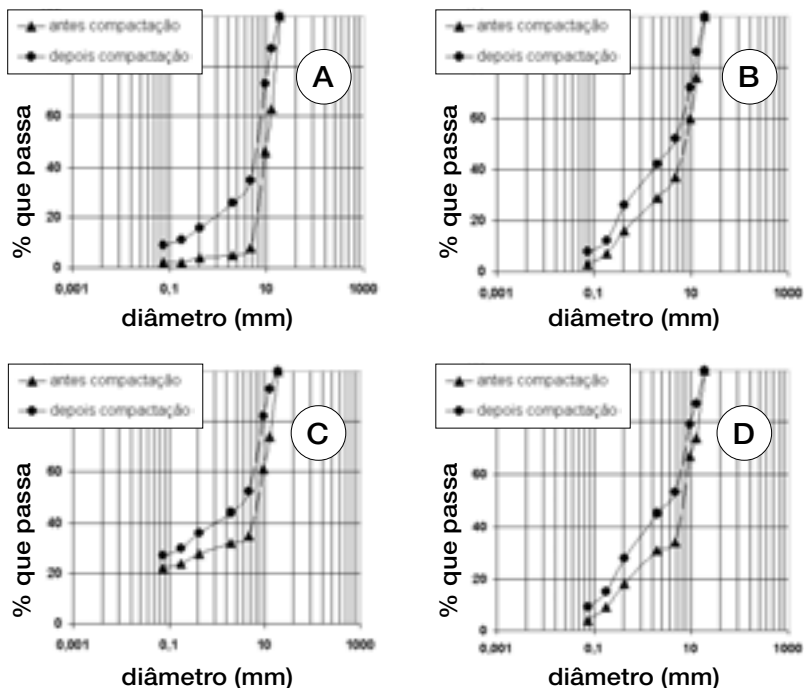
É válido ressaltar que as amostras com agregado reciclado gráudo, avaliadas nesse ensaio, foram compostas pelo material retido na peneira 4,8 mm, ou seja, retirou-se a fração “areia” do agregado reciclado gráudo. Esse procedimento contribui para maximizar os resultados de degradação das misturas contendo agregado reciclado gráudo.

Tem-se observado que os solos agregados, constituídos de pedregulhos lateríticos e saprolíticos, que não satisfazem às condições impostas pelas especificações tradicionais, sobretudo no que se refere à faixa granulométrica e à resistência dos grãos, têm apresentado desempenho adequado para material de base de pavimentos (Nogami & Villibor, 1995).

Os elevados índices de degradação das amostras com agregado reciclado gráudo indicam a fragmentação parcial dos grãos durante a compactação. Essa fragmentação pode ser percebida analisando-se as curvas granulométricas das misturas com agregado reciclado gráudo obtidas após a compactação (**Figura 8**), que se apresentaram mais contínuas que as obtidas antes desse procedimento. A quebra de grãos resultou numa mudança na granulometria do material, possibilitando o aumento do grau de entrosamento das partículas. O melhor entrosamento dos grãos influi na coesão e resistência do material, melhorando as propriedades da camada compactada.

### **MÉTODO MCT (MINIATURA, COMPACTADO, TROPICAL)**

Os resultados obtidos nos ensaios de **classificação geotécnica MCT (Figura 9)** confirmaram o comportamento laterítico das proporções que continham esse solo (LA — areias com baixo teor de finos lateríticos, permeáveis, com baixa coesão e pouco contrácteis,



**FIGURA 8**  
**CURVAS GRANULOMÉTRICAS OBTIDAS ANTES E APÓS A COMPACTAÇÃO**  
**DAS AMOSTRAS CONTENDO AGREGADO REICLADO GRAÚDO**  
**A - 100% Ag. Rec. Graúdo (Am 3\*)**  
**B - 30% Solo Laterítico / 70% Ag. Rec. Graúdo (Am 10\*)**  
**C - 30% Solo Saprolítico / 70% Ag. Rec. Graúdo (Am 11\*)**  
**D - 30% Ag. Rec. Miúdo / 70% Ag. Rec. Graúdo (Am 12\*)**

mas com características adequadas para sua utilização em bases e sub-bases de pavimentos). A mistura do agregado reciclado miúdo com o solo laterítico apresentou **coeficiente e'** superior ao da proporção de 100% de solo laterítico, indicando que a adição de agregado reciclado miúdo reduz o seu comportamento laterítico.

O solo saprolítico foi classificado como NS' (solos silto-arenosos saprolíticos com baixa capacidade de suporte e elevada expansibilidade). Esse tipo de material apresenta características

inadequadas para sua utilização em bases e sub-bases de pavimentos (Nogami & Villibor, 1995).

A mistura que continha solo saprolítico e agregado reciclado miúdo apresentou comportamento lateítico (LA). Tem-se, portanto, que a adição de agregado reciclado ao solo saprolítico melhora as características relativas à aplicação do material em pavimentos.

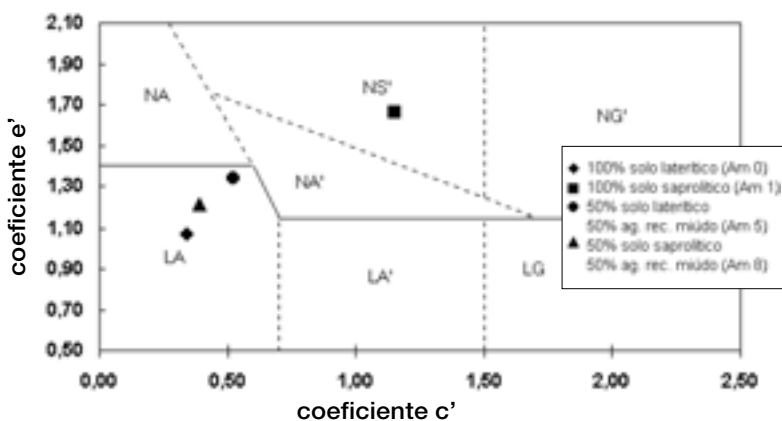
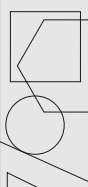


FIGURA 9  
GRÁFICO DE CLASSIFICAÇÃO MCT CONTENDO A LOCALIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Como esperado, a mistura que continha agregado reciclado miúdo e solo saprolítico apresentou maior valor de **Mini-CBR** (umidade de moldagem) que a mistura contendo apenas solo (**Tabela 5**). As misturas que continham solo lateítico não apresentaram diferença significativa de capacidade de suporte. Esse comportamento mostra que a adição do agregado reciclado melhorou as propriedades do material, no caso das misturas com solo saprolítico, e não alterou significativamente suas propriedades, no caso das misturas com solo lateítico, fato confirmado pelo método tradicional.

As amostras estudadas, com exceção da amostra Am 0 após imersão, apresentaram-se adequadas à utilização em sub-bases de



pavimentos, visto que seus valores de Mini-CBR se mantiveram iguais ou acima de 20%, como estabelecem as especificações para essa camada de pavimento (NBR 11804). A adição de agregado reciclado miúdo melhorou significativamente a capacidade de suporte após imersão do solo laterítico, possibilitando a utilização desse material também em bases de pavimento (Mini-CBR > 60%).

O RIS, parâmetro que indica a perda de resistência dos materiais após a imersão, permitiu comparar os valores de Mini-CBR obtidos antes e após a saturação das amostras analisadas. Como esperado, o solo saprolítico apresentou significativa perda de resistência (RIS em torno de 10%), enquanto que o solo laterítico apresentou RIS próximo de 45%. Nota-se, ainda, que as misturas de solo laterítico e saprolítico com o agregado reciclado miúdo (Am 5 e Am 8) apresentaram RIS em torno de 80%, evidenciando a estabilidade do material proporcionada pela presença do material reciclado.

A amostra constituída apenas de agregado reciclado miúdo (Am 2), um material bastante arenoso, não se mostrou adequada para a realização do ensaio de Mini-CBR. Portanto, não foi possível comparar os valores de Mini-CBR obtidos para esse material com os obtidos para as demais amostras.

**TABELA 5 - MINI-CBR MÁXIMO DAS MISTURAS ESTUDADAS**

AMOSTRA	MISTURAS	MINI-CBR (%)		RIS (%)
		NA UMIDADE DE MOLDAGEM	APÓS IMERSÃO	
Am 0	100% Solo Laterítico	80,5	35,4	43,97
Am 5	50% Ag. Rec. Miúdo / 50% Solo Laterítico	78,0	63,1	80,90
Am 1	100% Solo Saprolítico	33,9	3,5	10,32
Am 8	50% Ag. Rec. Miúdo / 50% Solo Saprolítico	46,0	38,5	83,70



## AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A avaliação de aspectos econômicos é de fundamental importância para promover a aceitação dessa forma de reciclagem do entulho. Os aspectos tecnológicos, apresentados nos itens anteriores, comprovam que o agregado reciclado possui desempenho adequado para utilização em camadas de pavimentos. Contudo, a efetiva aplicação do material só será bem sucedida caso o material presente também competitividade no mercado.

Nesse sentido, foi realizada a avaliação preliminar dos aspectos econômicos da utilização do agregado reciclado em base e sub-base de pavimentos.

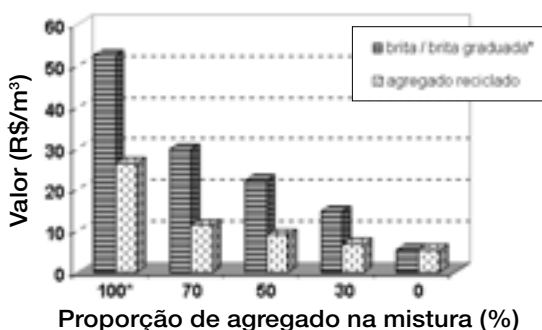
Comparou-se o custo de execução de pavimentos que utilizam agregado reciclado com o daqueles que utilizam materiais convencionais (solo, brita e brita graduada). A composição de custo foi baseada nas obras desenvolvidas pela Prefeitura de Salvador e expressa em reais por metro cúbico de camada executada, pois a espessura dos pavimentos varia em cada caso. As despesas com equipamento, mão-de-obra e materiais foram cotadas no mercado de Salvador, no período de abril / maio de 2000.

As camadas de base e sub-base produzidas com agregado reciclado apresentam custo de construção significativamente menor que as camadas produzidas com brita graduada ou brita adicionada ao solo (**Figuras 10 e 11**). Essa redução pode representar uma economia entre 50% e 62% ao se utilizar o agregado reciclado em substituição aos materiais convencionais.

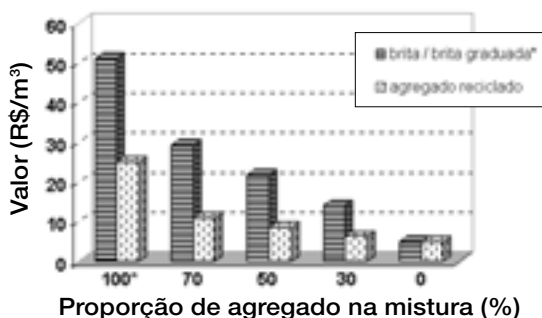
Essa economia se deve ao menor preço do agregado reciclado (cerca de R\$ 11,00/m<sup>3</sup>), em relação à brita graduada (cerca de R\$ 26,00/m<sup>3</sup>) e brita (cerca de R\$ 35,00/m<sup>3</sup>). Contribuem para essa redução de custo:

- a menor distância de transporte — a brita é produzida em locais distantes do centro, enquanto que as usinas que irão reciclar o entulho estão localizadas na área urbana;

- a simplicidade do processo de produção — a produção do agregado natural utiliza explosivos no desmonte da rocha e necessita de diversas etapas de britagem para reduzir o tamanho das partículas; a reciclagem do entulho não utiliza explosivos, a sua britagem é feita em uma única etapa e a produtividade (t/hora) pode ser maior, pois parte do entulho bruto já se encontra com granulometria reduzida.



**FIGURA 10**  
COMPARAÇÃO DE CUSTO POR M<sup>3</sup> DE BASE DE PAVIMENTO UTILIZANDO MATERIAL CONVENCIONAL E MATERIAL RECICLADO MISTURADOS COM SOLO DO PRÓPRIO LOCAL



**FIGURA 11**  
COMPARAÇÃO DE CUSTO POR M<sup>3</sup> DE SUB-BASE DE PAVIMENTO UTILIZANDO MATERIAL CONVENCIONAL E MATERIAL RECICLADO MISTURADOS COM SOLO DO PRÓPRIO LOCAL

Buscando compreenderem-se, efetivamente, os aspectos econômicos da reciclagem, deverão ser analisados, além dos custos de execução, os custos de manutenção dos pavimentos. Deve-se também acrescentar a essa análise as vantagens para a administração pública, pela redução dos custos de coleta, transporte e disposição em aterro desse material com alto potencial de reciclagem. A grande quantidade de entulho gerado tem reduzido significativamente a vida útil dos aterros, e encontrar novas áreas para disposição é uma tarefa cada vez mais difícil nos centros urbanos.

Além disso, a reciclagem de um resíduo que causa tantos problemas ao meio ambiente urbano contribui para a redução de impactos ambientais e sociais tais como a degradação das áreas de extração de matéria prima natural, o esgotamento de jazidas, o consumo de combustíveis fósseis e a geração de poluição na produção e transporte dos materiais, além dos problemas causados pela destinação inadequada dos resíduos de construção e demolição (alagamentos, deslizamentos de encostas, proliferação de vetores de doenças, entre outros). Esses impactos têm um custo para a sociedade, nem sempre mensurado, mas que deve ser considerado ao se fazer uma análise global dos aspectos econômicos da reciclagem do entulho.

Estudos realizados em outras cidades também têm demonstrado que essa forma de reciclagem possibilita economia significativa à Prefeitura na execução de pavimentos (Pinto, 1997). Entretanto, deve-se evitar a generalização dos resultados, uma vez que os fatores que mais influem no custo (produção e distância de transporte dos materiais, qualidade do solo, entre outros) variam em cada caso.

Nos casos em que a utilização de agregado reciclado em pavimentação não for economicamente atrativa aos empresários, a

administração pública deverá fazer uma análise dos custos de gestão desse resíduo e avaliar as vantagens econômicas que a reciclagem do entulho poderá proporcionar. Quando for o caso, poderá introduzir benefícios fiscais para fomentar essa forma de reciclagem.

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos comprovaram que o agregado reciclado de Salvador, tanto na fração miúda quanto na graúda, apresentou-se como material adequado para execução de bases e sub-bases de pavimentos.

As misturas contendo solo laterítico, como era de se esperar, não apresentaram ganhos de resistência com a adição de agregado reciclado. Já para o solo saprolítico, que apresenta baixa capacidade de suporte, houve significativos ganhos de resistência e redução de expansão ao se adicionar o agregado reciclado. Portanto, o material reciclado apresentou-se como um estabilizador de solos plásticos, como é caso do solo saprolítico utilizado no Projeto Entulho Bom.

Além disso, o agregado reciclado graúdo apresentou abrasão Los Angeles inferior ao limite especificado na NBR 11804 e o agregado reciclado miúdo apresentou limites de consistência e equivalente de areia de acordo com as especificações dessa norma. As amostras com teor de agregado reciclado igual ou superior a 70% (exceto Am 11) apresentaram desempenho adequado, tanto para base quanto para sub-base de pavimentos. Apesar de algumas amostras com agregado reciclado miúdo não se enquadrarem nas faixas granulométricas especificadas na NBR 11804, e as amostras com agregado reciclado graúdo apresentarem índice de degradação elevado, esses fatores não devem ser considerados como limitantes

para a utilização do material, e sim como referência para a análise do desempenho desses insumos alternativos.

A análise dos resultados obtidos pelo método MCT indicou uma melhoria significativa do desempenho do material com a adição do agregado reciclado miúdo ao solo saprolítico e a pouca influência ao adicioná-lo ao solo laterítico, confirmando, portanto, as análises realizadas pelo método tradicional.

Estudos realizados em outras cidades também verificaram o bom desempenho dessa matéria-prima alternativa em camadas de pavimentos. Contudo, compreende-se a importância da realização de estudos específicos para os materiais regionais, visto que tanto o solo quanto o agregado reciclado possuem características próprias, que podem variar de acordo com cada região e, portanto, as experiências realizadas em outras localidades não podem ser generalizadas.

A execução de um pavimento experimental e de ensaios de durabilidade é de significativa importância para se analisar o comportamento, em longo prazo, do uso do agregado reciclado em pavimentos. Nesse sentido, torna-se fundamental a execução de trechos de pavimentos-piloto em Salvador, buscando monitorar propriedades relevantes e avaliar o desempenho do material em condições de uso e ao longo do tempo.

O uso do agregado reciclado nas camadas de base e sub-base pode proporcionar, ainda, uma economia significativa nos custos de execução do pavimento, quando comparados com os de materiais convencionais.

A utilização do agregado reciclado em pavimentos pode apresentar vantagens tanto em relação a aspectos técnico-econômicos, quanto em relação a questões ambientais e sociais. Essa forma de reciclagem do entulho contribui para o desenvolvimento

sustentável local, reduzindo a extração de matérias-primas não-renováveis, otimizando o uso dos aterros e contribuindo para aumentar a oferta de infra-estrutura urbana.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION FOR STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). *Standard specification for transportation materials and methods of sampling and testing*. 12th ed. Washington, 1978. 2v.

BODI, Janos; BRITO FILHO, J. A.; ALMEIDA, S. Utilização de entulho de construção civil reciclado na pavimentação urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. *Anais...* Cuiabá, 1995.

BURGOS, Paulo César. *Aplicação da classificação MCT e da técnica de adsorção de azul de metileno a solos da cidade de Salvador (Ba)*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

CAMARGO, Antônio. Minas de entulho. *Techne*, São Paulo, n.15, p. 15-19, mar./abr. 1995.

CARNEIRO, Alex P., et al. Geotechnical properties of processed debris from Salvador in application in bases and sub-bases of road. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENVIRONMENTAL GEOTECHNOLOGY AND GLOBAL SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 5., Belo Horizonte, 2000. *Anais...* Belo Horizonte, 2000a.

CARNEIRO, Alex P., et al. Reciclagem do entulho da Região Metropolitana de Salvador para a produção de materiais de construção de baixo custo. In: SIMPÓSIO LUSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 9., Porto Seguro, 2000. *Anais...* Porto Seguro, 2000b.

HANSEN, T.C. *Recycling of demolished concrete and masonry*. 2nd ed. London: E&FN Spon, 1996. Part. 1, p.395.

LATERZA, Luciano M. *Concreto com agregado gráúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

MACÊDO, J. A. G.; LIMA, R. C.; COSTA, C. R. V. Estudos dos solos latelíticos: índice de degradação e sua influência na compactação e I.S.C. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 21., Salvador, 1986. *Anais...* Salvador, 1986.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. *Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos*. São Paulo: Villibor, 1995. 240 p.

NOGAMI, Job Shuji; VILLIBOR, Douglas Fadul. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1981, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 1981. v.1, p.30-41.

PINTO, T. P. De volta à questão do desperdício. *Construção*, São Paulo, n. 2491, p. 18-19, nov. 1995.

PINTO, T. P. *Manual de uso dos resíduos de construção reciclados*. São Paulo: I & T, 1998.

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

PINTO, T. P. Resultados da gestão diferenciada. *Techne*, São Paulo, n.31, p. 31-34, nov./dez., 1997.

SOUZA, Murillo L. de. *Pavimentação rodoviária*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1980. 361 p.

TRICHES, G.; KRYCKYJ, P. R. Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL 4., 1999, São José dos Campos. *Anais...* São José dos Campos, 1999.

VARGAS, M. O uso dos limites de Atterberg na classificação dos solos tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDACÕES, 1992, Olinda. *Anais...* Olinda, 1982. v.5, p. 262-278.



## NORMAS TÉCNICAS CITADAS<sup>1</sup>

NBR 6459 - *Solo*: determinação do limite de liquidez: método de ensaio. 1984.

NBR 6465 - *Agregado graúdo*: determinação da abrasão Los Angeles: método de ensaio. 1984.

NBR 6508 - *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm*: determinação da massa específica: método de ensaio. 1984.

NBR 7180 - *Solo*: determinação do limite de plasticidade: método de ensaio. 1984.

NBR 7181 - *Solo*: análise granulométrica: método de ensaio. 1984.

NBR 7182 - *Solo*: ensaio de compactação: método de ensaio. 1982.

NBR 7251 - *Agregado em estado solto*: determinação da massa unitária: método de ensaio. 1982.

NBR 9895 - *Solo*: índice de Suporte Califórnia: método de ensaio. 1987.

NBR 11804 - *Materiais para sub-base ou base de pavimentos estabilizados granulometricamente*: especificação. 1991.

NBR 12052 - *Solo ou agregado miúdo*: determinação de equivalente de areia: método de ensaio. 1992.

<sup>1</sup> Publicação ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.



Alex Pires Carneiro - Engenheiro Civil, Mestrando em Engenharia Ambiental Urbana - UFBA, Coordenador do Projeto Entulho Bom

Paulo César Burgos - Engenheiro Civil, Mestre em Geotecnia - USP, Pesquisador do Laboratório de Geotecnia, Escola Politécnica, UFBA

Elaine Pinto Varela Alberte - Estudante de Engenharia Civil - UFBA, Pesquisadora do Projeto Entulho Bom