

# PAVIMENTO ECOLÓGICO: UMA OPÇÃO PARA A PAVIMENTAÇÃO DE VIAS DAS GRANDES CIDADES

*Moisés Ribeiro Abdou  
Liedi Légi Bariani Bernucci*

## Resumo

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são gerados em grande escala em todo o mundo. Paralelamente a isso, uma conscientização de um desenvolvimento sustentável é necessária para a perduração da humanidade. Uma alternativa para o RCD é sua utilização em camadas de pavimentos após ser submetido ao beneficiamento da reciclagem. Este projeto tem como objetivo o estudo da utilização de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de pavimentos em vias de baixo volume de tráfego, particularmente no sistema viário do novo campus da USP na zona leste de São Paulo (USP-Leste). O sistema viário foi executado com uma solução inovadora, denominada pelos proponentes de “Pavimento Ecológico”, por empregar materiais reciclados nas diferentes camadas do pavimento: agregado reciclado de RCD nas camadas de sub-base e base, e revestimento asfáltico com asfalto-borracha sendo a borracha moída derivada da reciclagem de pneus inservíveis de veículos. Ensaios em laboratório de caracterização e resistência dos agregados reciclados de RCD foram realizados, tais como: granulometria, forma do agregado, materiais constituintes, compactação e Índice de Suporte Califórnia. Em campo, a estrutura do pavimento foi avaliada por *Falling Weight Deflectometer* (FWD), e a partir de seus resultados foi feita uma retroanálise estrutural para avaliar o comportamento mecânico dos materiais. As amostras coletadas para esse estudo são provenientes da usina recicladora da Prefeitura Municipal de São Paulo (PMSP) e do canteiro de obras da USP-Leste. Os resultados obtidos afirmam que o agregado reciclado tem potencial adequado para ser utilizado em camadas de pavimentos de vias de baixo volume de tráfego.

**Palavras-chave:** reciclagem; agregado reciclado; pavimentação; pavimento ecológico.

## 1. Introdução

O presente trabalho é resultado de uma pesquisa realizada em equipe, com a participação deste graduando de Engenharia Civil, Bolsista PIBIC-CNPq, com a parceria das alunas de mestrado Rosângela Motta, bolsista CNPq, e Fabiana Leite, bolsista FAPESP, sob a orientação da Profa. Liedi Bernucci, do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP.

### 1.1 Problema Ambiental

A indústria da construção civil tem exercido um papel importante no desenvolvimento econômico e social do país, responsável por parcela significativa do PIB brasileiro. No entanto, as obras civis tem ocasionado um grande problema ambiental para a sociedade e para as administrações das cidades por conta do excessivo volume de resíduos sólidos gerados provenientes de novas construções e demolições. A

quantidade de resíduo por habitante vem aumentando de forma mais acelerada que o crescimento populacional. Apesar dos problemas econômicos que o Brasil vem enfrentando nos últimos anos, a indústria da construção civil continua exercendo um papel fundamental no desenvolvimento urbano e absolutamente necessário em um país em desenvolvimento. A cidade de São Paulo, por exemplo, tem sofrido transformações urbanas bem significativas, atingindo patamares de produção de resíduos de construção expressivos. A Prefeitura do Município de São Paulo calcula que sejam gerados diariamente aproximadamente 16.000 toneladas de resíduo de construção, resultando numa geração per capita de 0,50 toneladas por habitante por ano (SCHNEIDER, 2003).

## 1.2. Solução Estudada

Uma política e conscientização sustentável por meio da reciclagem desses resíduos de construção e demolição, problema ambiental existente há décadas nos centros urbanos, seriam alternativas eficientes para solucionar esta questão. Em alguns países desenvolvidos a reciclagem do entulho está se tornando uma alternativa em diversos setores da construção civil. O RCD, após passar por um processo de reciclagem, pode ser empregado nas mais diferentes aplicações como, por exemplo, na confecção de elementos pré-moldados e na execução de camadas em estruturas de pavimentos (TRICHÊS e KRYCKYJ, 1999). Na Holanda, por exemplo, 85% dos resíduos de construção são submetidos a um processo de beneficiamento para serem utilizados nestas duas finalidades principalmente (HENDRIKS e JANSSEN, 2001).

Além dessa medida reduzir gastos públicos com aterros e materiais de construções para pavimentos, essa política propicia um aumento da vida útil dos aterros em funcionamento, visto que os atuais aterros teria aumentada sua capacidade pela inibição das descargas clandestinas ao longo das vias públicas, melhorando o aspecto visual das cidades e inibindo gastos adicionais para a remoção do resíduo (TRICHÊS e KRYCKYJ, 1999).

Segundo Carneiro *et al.* (2001), o uso de agregado reciclado em camadas de pavimentos urbanos tem sido uma das maneiras mais difundidas para o seu fim. O aproveitamento deste material em pavimentação apresenta muitas vantagens como utilização de quantidade significativa de material reciclado, tanto na fração miúda quanto na graúda; simplicidade dos processos de execução do pavimento e de produção do agregado reciclado (separação e britagem primária). Todos estes aspectos contribuem para a redução dos custos, a difusão dessa forma de reciclagem e a possibilidade de uso dos diversos materiais componentes do resíduo (concretos, argamassas, materiais cerâmicos, areia, pedras, etc.).

Desde a década de 80, o Brasil vem realizando experiências de aplicação do resíduo sólido de construção civil como material de pavimentação, porém sem estudos sistemáticos e monitoramentos periódicos. No início da década de 90, foi instalada a primeira recicladora no país pela PMSP (Prefeitura do Município de São Paulo). No final de 2004, iniciou-se a pavimentação do sistema viário do novo *campus* da USP na zona Leste (USP-Leste), seguindo um projeto inovador de Pavimento Ecológico, com o emprego de materiais reciclados em toda sua estrutura. As camadas de base e a sub-base do Pavimento Ecológico da USP-Leste foram feitas com agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil, e seu revestimento foi executado com asfalto modificado com borracha moída de pneu, o chamado asfalto-borracha.

### 1.3. Avanços Normativos

A Resolução CONAMA nº 307 (2002) especifica que resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados de resíduos sólidos da construção civil, chamados popularmente de entulho de obra, são os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos ou demolições que contém tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, rocha, argamassas, telhas, pavimentos asfálticos, entre outros, que são classificados como classe “A”. Deve ser evitada a presença de solos, madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas e papéis ou quaisquer materiais orgânicos ou não inertes, classificados como classe “B”, “C” e “D” e denominados como “contaminantes” ou “indesejáveis”. No Brasil, a separação destes contaminantes é feita de forma manual, o que implica em uma remoção não completa, resultando em pequenas frações ainda presentes no agregado reciclado.

Em 2003, a PMSP concebeu sua própria especificação relacionada ao uso de agregados reciclados em camadas de pavimentos, a PMSP/SP ETS – 001/2003. Esta foi a primeira norma brasileira desenvolvida para essa finalidade. No ano de 2004, foi publicada a norma da ABNT NBR 15115 (2004), que especifica a utilização de agregado reciclado de resíduo sólido de construção civil em camadas de base, sub-base e reforço do subleito de pavimentos. A norma especifica os critérios para execução das camadas citadas com os fundamentos da resolução CONAMA nº 307 (2002) no que diz respeito à proveniência e classificações “A”, “B”, “C” e “D”.

O objetivo do presente estudo é a verificação da aplicabilidade do agregado reciclado estudado nas camadas de base e sub-base do sistema viário do *campus* da USP na zona leste de São Paulo (USP-Leste).

## **2. Materiais e Métodos**

Este trabalho foi executado em duas etapas. Na primeira etapa, que ocorreu entre agosto de 2004 e julho de 2005, estudou-se o agregado reciclado proveniente da Usina Recicladora da PMSP cujas instalações hoje encontram-se, infelizmente, inativas. Nesta etapa foram feitas caracterizações físicas e avaliações mecânicas com o fim de verificar a aplicabilidade daquele material em camadas de pavimentos. A segunda etapa, iniciada em agosto de 2005 e ainda não concluída, consiste no estudo do agregado reciclado utilizado na construção do sistema viário da USP-Leste, que além de englobar as caracterizações físicas e mecânicas, objetiva a avaliação da estrutura do “Pavimento Ecológico” executado na USP-Leste.

O agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil é um subproduto obtido a partir da reciclagem do RCD. Este processo de reciclagem é executado através de uma usina recicladora, que se assemelha a uma usina de britagem convencional

O processo de reciclagem do RCD tem início com a catação, em que os materiais indesejáveis, ou seja, de classificação “B”, “C” ou “D”, são removidos manualmente em geral. Também são instalados sistemas de separação magnética para remoção de outros materiais. Assim, obtém-se o agregado reciclado, que é constituído, fundamentalmente por concreto, argamassa, britas, cerâmicos, telhas cerâmicas, entre outros materiais cerâmicos e cimentícios. A NBR 15115 (2004) especifica limites máximos para materiais indesejáveis.

## 2.1. Caracterização física

Como pode ser observado nas Figuras 1 e 2, a usina recicladora da PMSP, tem seu aspecto bem semelhante a uma usina de britagem convencional. A Figura 3 traz algumas frações de britagem do material.



Figura 1: Vista do peneirador mecânico da usina recicladora da PMSP



Figura 2: Montante de agregado reciclado produzido na usina recicladora da PMSP



Figura 3: Agregados reciclados selecionados em diversas frações

O agregado reciclado utilizado em grande parte nas vias da USP-Leste é proveniente de uma usina recicladora da cidade de Santo André (grande São Paulo). As Figuras 4 a 6 ilustram o material utilizado nas camadas de base e sub-base do sistema viário da USP-Leste coletados em campo.



Figura 4: Agregado reciclado utilizado na base do pavimento da USP-Leste



Figura 5: Agregado reciclado utilizado na sub-base do pavimento da USP-Leste



Figura 6: Agregado reciclado compactado na camada de base

Nota-se nas Figuras 3 a 6, que a heterogeneidade é uma característica particular do agregado reciclado, o que gera, portanto, diferentes resultados para determinados ensaios.

Conforme a natureza dos materiais encontrados na amostra estudada da usina recicladora da PMSP, os componentes do agregado foram sub-divididos em grupos, que

foram classificados como: concreto ou argamassa (material cimentício); brita (agregado pétreo); telha/tijolo (materiais cerâmicos vermelhos); piso/azulejo; telha de amianto; e agregados miúdos e finos (que correspondem à fração passada na peneira de abertura 4,76mm). A natureza do material coletado na USP-Leste foi classificada como: cimentícios; telhas e tijolos; pisos e azulejos; britas; e telhas de amianto e outros. Como a caracterização da natureza foi feita a olho nu, somente foi possível classificar os grãos de diâmetro superior a 4,76mm em ambas as amostras (agregados graúdos).

Foi traçada uma curva granulométrica por meio do peneiramento a seco, realizado de acordo com os critérios da NBR 7181 (1984). A curva deve garantir que a distribuição seja contínua, para que haja um melhor embricamento entre os grãos menores e maiores.

A NBR 15115 (2004) determina que a curva tenha um Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ), que é a razão entre os diâmetros que correspondem a 60% e a 10% passantes na curva granulométrica, maior ou igual a 10. A norma também define que a granulometria passante na peneira 0,42mm (nº 40) deve ficar entre 10% e 40%.

Foi estudada a forma do agregado, podendo ser alongada, esférica, cúbica ou lamelar, sendo que a norma determina que a porcentagem de lamelares deve ser menor do que 30. Devido ao fato dos agregados lamelares quebrarem facilmente quando sofrem a aplicação de uma carga, procura-se não utilizá-los em pavimentação ou limitar sua participação. A determinação da forma da fração graúda (>4,76mm) foi feita como especificado na NBR 6954 (1989). Medindo-se a espessura, a largura e o comprimento dos grãos classifica-se o material como sendo cúbico, alongado, lamelar ou alongado-lamelar. Para este ensaio foram empregados frações do material retidas nas peneiras 38,1mm (e passante na 50,8mm), 25,4mm, 19,1mm e 9,52mm (Figura 7).



Figura 7: Medição com paquímetro digital e exemplos de frações do agregado reciclado

## 2.2. Caracterização do comportamento mecânico

Para a verificação da quebra de materiais da amostra da USP-Leste durante a compactação, foi traçada uma curva granulométrica através do mesmo processo de peneiramento efetuado nos ensaios de caracterização que seguiu as especificações da NBR 7181 (1984). Adotou-se um cilindro tripartido de 15 cm de diâmetro e 30 cm de altura (Figura 8), sendo a energia intermediária de compactação para os corpos-de-prova de 6 camadas de 57 golpes. O soquete utilizado foi o mesmo do ensaio de determinação do ISC.



Figura 8: Cinlindro tripartido

Utilizou-se o Índice de Suporte Califórnia (ISC), também conhecido como CBR (*California Bearing Ratio*), para determinar a resistência do agregado reciclado a ser empregado em pavimentação. O ensaio de ISC é especificado na DNER-ME 049/94 (1994).

Fundamentalmente, o experimento que determina o ISC é realizado em três etapas: moldagem do corpo-de-prova; imersão do corpo-de-prova em água destilada por quatro dias; e penetração de um pistão no corpo-de-prova.

Para a moldagem dos corpos-de-prova, adotou-se a energia Intermediária de compactação Proctor em 6 camadas com 26 golpes por camada realizada com o soquete padronizado de 4.536g. Foram ensaiados seis corpos-de-prova, que foram moldados em cilindros de 152mm de diâmetro por 178mm de altura, com altura final, após a compactação, de 125mm (Figura 9). Adotou-se 11% como umidade ótima.



Figura 9: Compactação do corpo-de-prova para o ensaio de ISC

Os corpos-de-prova compactados foram submetidos a determinados tempos de cura para verificar em possível aumento do ISC com o tempo.

Durante o tempo de cura do material os corpos-de-prova foram mantidos em uma caixa preenchida com serragem úmida para que durante esse processo a umidade fosse mantida (Figura 10).



Figura 10: Corpos-de-prova armazenados

Cabe ressaltar que os tempos de cura incluíram 4 dias de imersão em água, conforme consta no ensaio de ISC, para determinação da expansão axial do material. Assim que imerso posiciona-se um extensômetro no topo do corpo-de-prova, com o fim de verificar sua expansão ao fim dos quatro dias (Figura 11).



Figura 11: Corpos-de-prova de ISC imersos em água destilada

A NBR 15115 (2004) especifica valores mínimos de ISC e expansão (Tabela 1) para as diferentes aplicações em camadas de pavimentos:

Tabela 1. Limites de ISC e expansão

Tipo de Camada	ISC (%)	Expansão (%)
Reforço do sub-leito	$\geq 12\%$	$\leq 1,0\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1,0\%$
Base	$\geq 60\%$	$\leq 0,5\%$

Na Figura 12 tem-se a seção de pavimento projetada para as vias da USP-Leste.

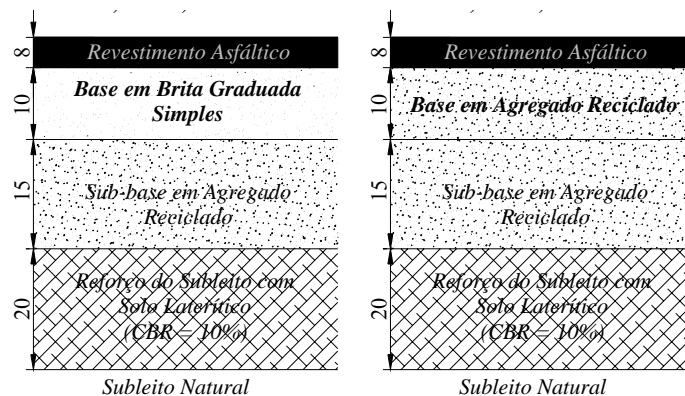


Figura 12: Seções projetadas do sistema viário da USP-Leste

Em campo foi realizado o controle deflectométrico por meio da determinação das bacias de deflexão com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD), um deflectômetro de impacto que avalia a condição estrutural do pavimento de forma não-destrutiva gentilmente cedido pela empresa Dynatest Engenharia Ltda. (Figuras 13 e 14). Este controle é descrito no procedimento DNER PRO 273/96.



Figura 13: Equipamento do tipo FWD



Figura 14: Detalhe da aplicação da carga e sensores

Este controle forneceu por meio da bacia de deflexão e do raio de curvatura obtidos, o comportamento das camadas de base e sub-base com o agregado reciclado. A bacia é registrada por uma série de sete sensores. A título de comparação, foi realizado um trecho com brita graduada simples (BGS) na base.

Para execução desse ensaio, o equipamento é posicionado sobre o local de análise em que seus sensores são encostados no pavimento espaçados do ponto de aplicação de carga em 0, 20, 30, 45, 65, 90 e 120 cm (Figura 14). Neste caso, a carga aplicada foi de 42 kN, podendo ser variada dependendo do tipo de aplicação e via. Além de ser um ensaio não destrutivo, seus procedimentos são rápidos de forma a não impedir o tráfego local.

Com os resultados do FWD, foram feitas retroanálises das estruturas com agregado reciclado e com a BGS, empregando o programa ELSYM5, um software específico para cálculos mecânicos e avaliações estruturais, com o fim de verificar o módulo de resiliência dos materiais em campo e compará-los no que tange à deformação resiliente.



### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Caracterização física

As porcentagens, em massa, de cada um dos tipos de material contidos na amostra estudada podem ser observadas na Figura 15 do material da usina da PMSP.

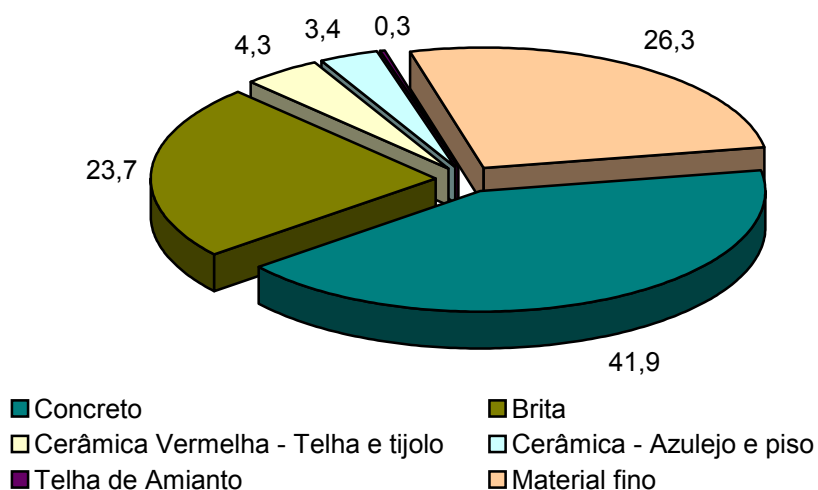


Figura 15: Composição do agregado reciclado proveniente da usina da PMSP em porcentagem

Verifica-se na Figura 15 que aproximadamente 42% é composto de concreto e argamassa, 24% de brita, 8% de materiais cerâmicos de um modo geral, menos de 0,5% de amianto, e 26% de material fino (passante na peneira 4,76mm). Nota-se que é encontrado quase um quarto de brita no montante. Além disso, mais de um quarto do agregado reciclado é constituído de material fino, o que proporciona um melhor travamento entre os agregados graúdos (diâmetros acima de 4,76mm), diminuindo o volume de vazios e tornando a mistura mais coesa.

Da Figura 16(a) à Figura 16(f) ilustram-se os materiais encontrados na amostra da usina recicladora da PMSP.

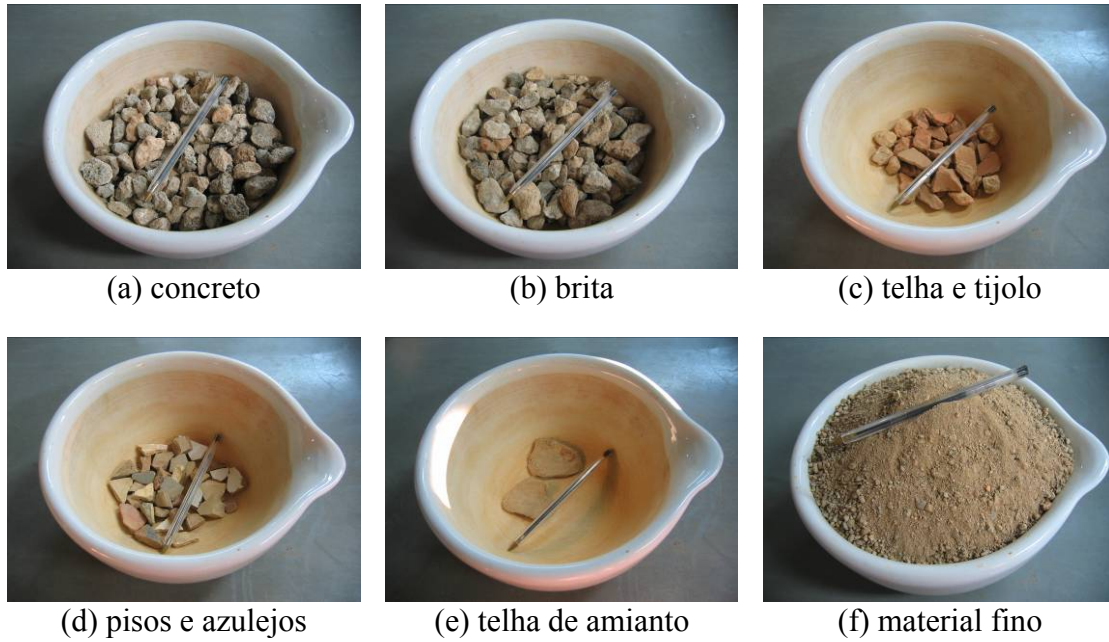


Figura 16: Materiais constituintes do agregado reciclado da usina recicladora da PMSP

Por meio de uma separação por catação, pôde-se determinar o índice de materiais “indesejáveis” ou “contaminantes” (Figura 17).



Figura 17: Materiais indesejáveis ou contaminantes

Estimou-se uma quantidade de 0,4% em massa de materiais indesejáveis. Valor de acordo com a NBR 15115 (2004), que determina uma porcentagem máxima de 3%, em massa, para grupos de materiais distintos, e 2% para materiais de mesma característica.

Em razão de não ser possível classificar os materiais finos, optou-se por não incluí-los no gráfico da composição do agregado reciclado proveniente da USP-Leste (Figura 18).

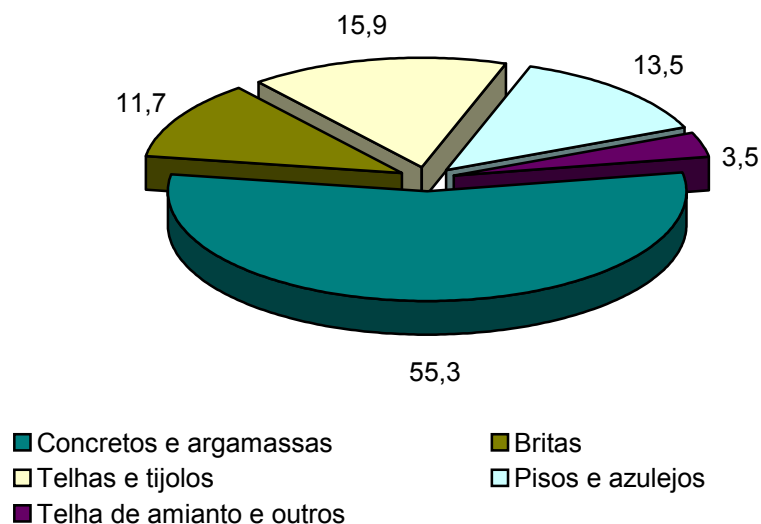


Figura 18: Composição do agregado reciclado proveniente do canteiro de obras da USP-Leste em porcentagem

Nota-se por meio da Figura 18, que aproximadamente 55% do material é de natureza de concreto ou argamassa, 16% de telhas e tijolos, 13% de pisos e azulejos, 12% de britas, e 3% de materiais de amianto e outros. Vale observar que a predominância de materiais cimentícios somadas às britas resultam em aproximadamente 67%. Pode-se observar nas Figuras 19(a) à 19(f) os diferentes tipos de materiais encontrados na amostra da USP-Leste.

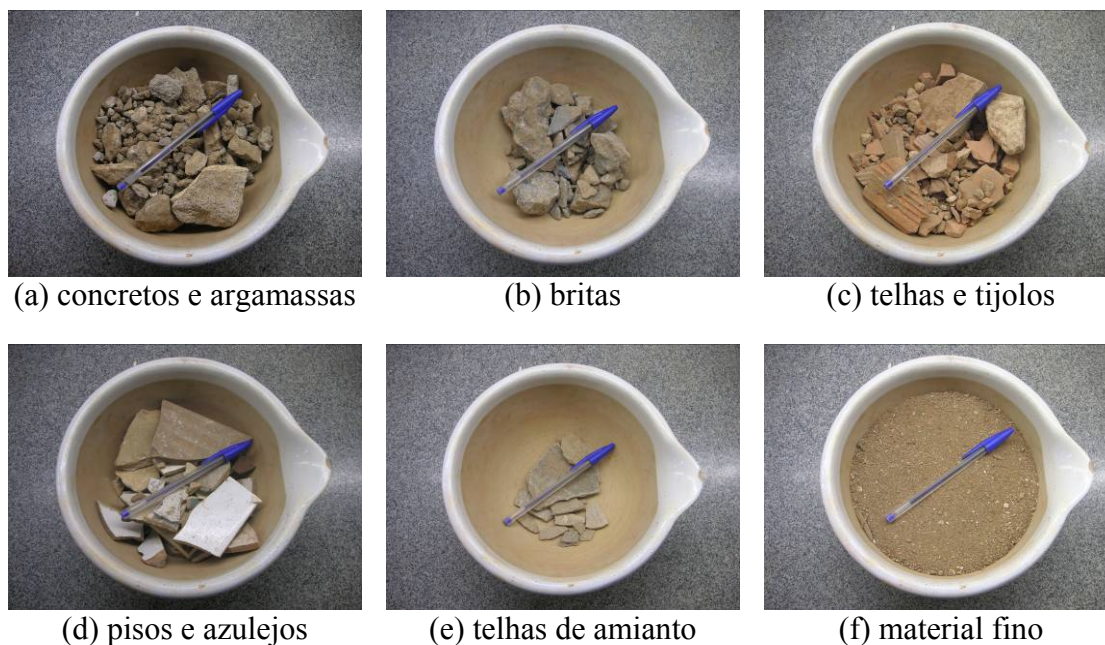


Figura 19: Materiais constituintes do agregado reciclado da USP-Leste

Semelhantemente ao que foi feito com a amostra da usina da PMSP, tentou-se ao máximo retirar todo material indesejável, de forma que se encontrou o valor de aproximadamente 0,6% em massa de materiais contaminantes de diferentes origens.

Por meio do peneiramento a seco (Figura 20), foi traçada a curva granulométrica de uma amostra significativa do agregado reciclado de ambas amostras, como mostra a Figuras 21.



Figura 20: Peneiramento a seco do agregado reciclado

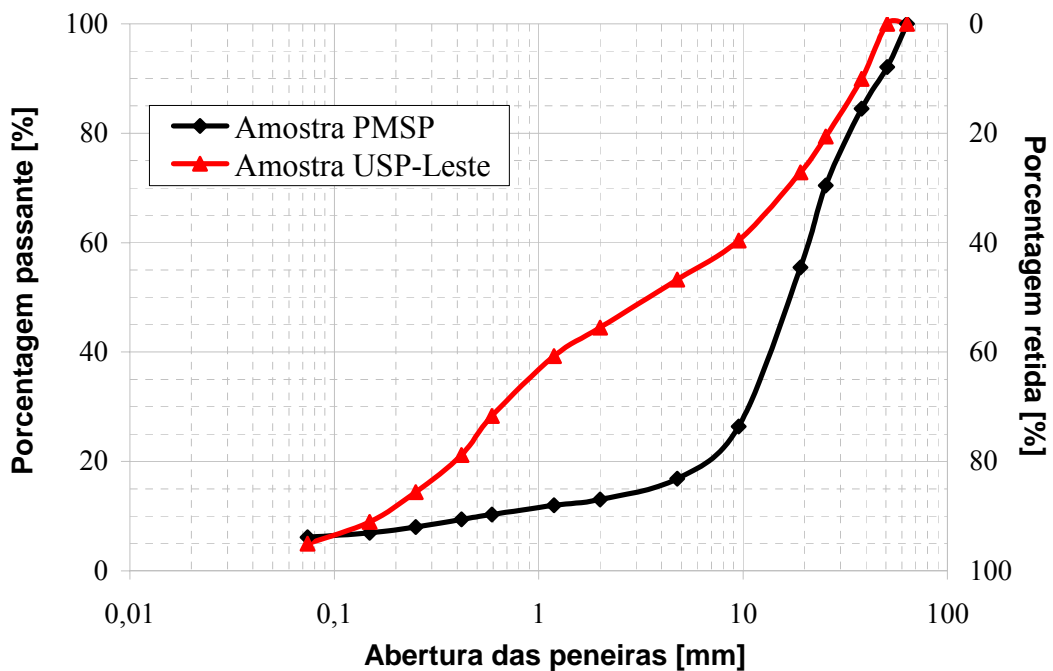


Figura 21: Granulometria do agregado reciclado da PMSP

Ambas as curvas granulométricas das amostras de agregado reciclado em estudo pode ser considerada não-uniforme. Nas curvas da Figura 21 verifica-se que a porcentagem que passa pela peneira 0,42mm (nº 40) satisfaz a norma NBR 15115 (2004), cujo valor deve estar entre 10% e 40%.

Vale notar que o próprio movimento de agitação das peneiras provocava um fracionamento dos grãos, devido à abrasividade do material, o que pode diversificar a granulometria.

Por meio do gráfico da Figura 21, pode-se obter os valores do Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) resulta em 42 na amostra da PMSP e 56 na amostra da USP-Leste, sendo ambos maiores que 10, especificados pela NBR 15115 (2004).

Os dados obtidos das dimensões do material da PMSP apontaram que as quatro frações granulométricas analisadas indicaram forma cúbica. Por outro lado, o material da USP-Leste apresentou a forma cúbica em 64% dos grãos, e a forma lamelar em 34%. A NBR 15115 (2004) recomenda que o agregado reciclado deve ter até 30% de grãos lamelares.

### 3.2. Caracterização do Comportamento Mecânico

Foi observado que o agregado reciclado é suscetível à quebra pelo processo de compactação. Isto faz com que aumente a fração fina, como pôde ser visto em distinção nas Figuras 4 e 6.

A Figura 22 expressa as curvas granulométricas dos materiais após a compactação do agregado reciclado da USP-Leste, mostrando a alteração significativa do tamanho de grão após o processo de compactação, que causou diversas quebras.

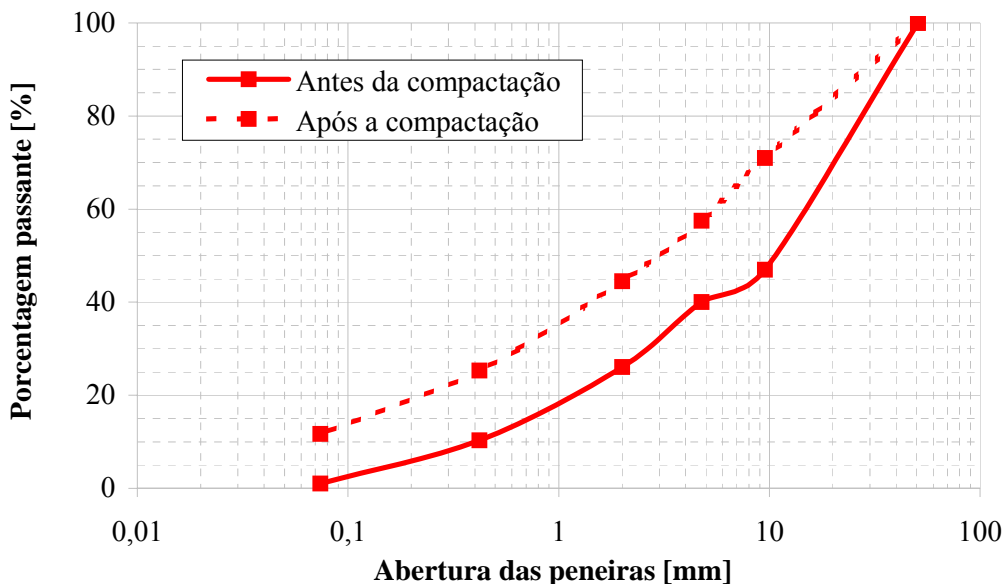


Figura 22: Comparativo granulométrico antes e após a compactação do material da USP-Leste

Os resultados do ensaio de ISC encontram-se no gráfico das Figuras 23 e 24 e na Tabela 2. As curvas dos gráficos das Figuras 23 e 24 foram traçadas tomando-se como base os valores médios obtidos em cada par de corpos-de-prova.

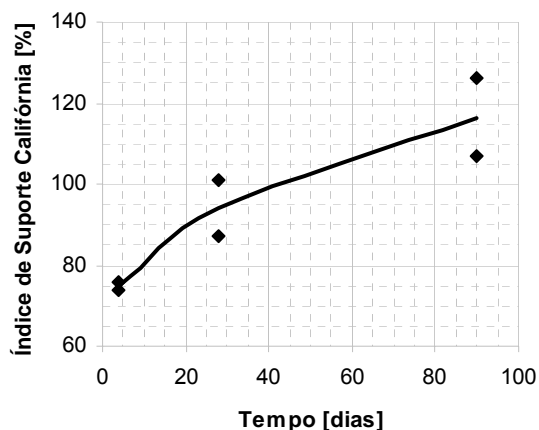


Figura 23: Resultados do ensaio do Índice de Suporte Califórnia da usina da PMSP

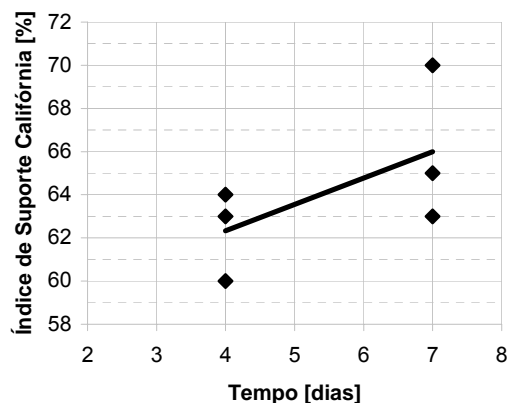


Figura 24: Resultados do ensaio do Índice de Suporte Califórnia da USP-Leste

Tabela 2. Resultados do ensaio do Índice de Suporte Califórnia

Procedência	Tempo de Cura [dias]	Índice de Suporte Califórnia [%]	Média do ISC [%]
Usina da PMSP	0	76	75
	0	74	
	28	87	94
	28	101	
	90	126	116,5
	90	107	
USP-Leste	0	63	62
	0	60	
	0	64	
	7	65	66
	7	70	
	7	63	

Nota-se nos resultados da Tabela 2 que o ISC de 28 e 90 dias apresentaram maior desvio padrão. Provavelmente este fato é decorrente da heterogeneidade do material, o que implica em resultados ligeiramente dispersos, mesmo com o uso de material proveniente de uma mesma fonte.

Verifica-se também que, com o aumento dos dias de cura o índice demonstra crescimento elevado, chegando a crescer cerca de 42% após 90 dias de cura no caso do material da usina da PMSP.

Todos os resultados obtidos nos ensaios de ISC estão de acordo com a NBR 15115 (2004), cujos limites são demonstrados na Tabela 1. No que diz respeito à expansão, foi verificado valor nulo após imersão em água destilada por 4 dias, para todos os corpos-de-prova dos diferentes tempos de cura.

Os resultados de levantamentos deflectométricos com o FWD são apresentados no gráfico da Figura 25.

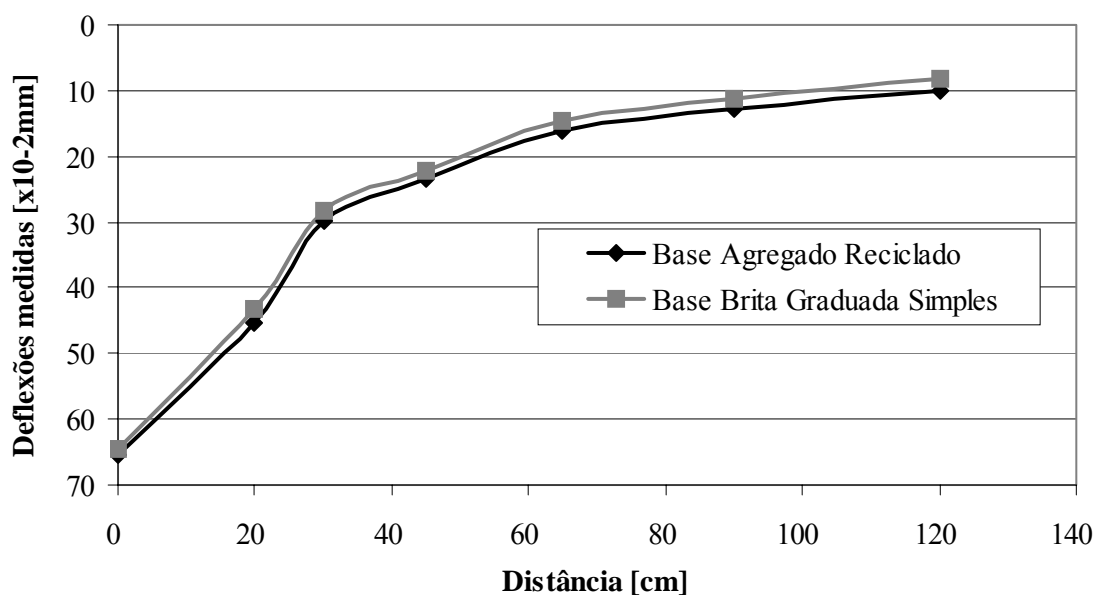


Figura 25: Bacias de deflexão

Como pode ser observado no gráfico da Figura 25, os valores médios de deflexão obtidos por meio do FWD da base com BGS e da base com agregado reciclado, foram muito similares. Os valores do deslocamento máximo e do raio de curvatura das seções em questão são expressas na Tabela 3.

Tabela 3: Valores dos deslocamentos máximos e raio de curvatura

Seção	Máximo deslocamento [x10 <sup>-2</sup> mm]	Raio de curvatura [m]
Base com BGS	63	118
Base com agregado reciclado	66	114

Novamente verifica-se a similaridade nos resultados do comportamento da BGS e do agregado reciclado.

Conhecendo-se previamente as espessuras das camadas e a bacia de deflexão, determinou-se o módulo de resiliência das bases com a BGS e com o agregado reciclado, cujo valor resultou em 200MPa em ambas as seções.

#### 4. Conclusões

Os ensaios de caracterização física demonstraram que o agregado reciclado estudado é não-uniforme e que o percentual de contaminantes (0,4% e 0,6%) é bem inferior ao permitido pela NBR 15115 (2004), atendendo às especificações.

No que diz respeito à forma do agregado, o material da USP-Leste não satisfaz a NBR 15115 (2004), enquanto que o material da usina recicladora da PMSP satisfaz. Em ambas as amostras aqui estudadas, o seu respectivo Coeficiente de Uniformidade atende a NBR 15115 (2004).

Embora o material foi fracionado na compactação, este apresentou valor mínimo médio de Índice de Suporte Califórnia de 62%, com expansão nula, atendendo aos limites preconizados pela norma para utilização em vias de baixo volume de tráfego, com  $N \leq 10^6$  de repetições do eixo-padrão de 80 kN no período de projeto.

Sendo assim, de acordo com esta pesquisa, o agregado reciclado estudado apresentou resultados e características satisfatórias, de acordo com as especificações da NBR 15115 (2004), demonstrando potencial para utilização em camadas de pavimentos.

A Resolução CONAMA nº307 (2002) que obriga os geradores de resíduos a darem uma destinação adequada ao material produzido, somada ao novo programa de gestão de resíduos da cidade de São Paulo, a reciclagem destes materiais tende a crescer. Sendo o Brasil um país onde aproximadamente 90% de todo o sistema viário ainda não é pavimentado, a alternativa de utilização do agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em pavimentação se torna muito interessante. Além disso, o uso do agregado reciclado em pavimentação deve ser incentivado, pois seu preço é inferior ao de materiais convencionais (em São Paulo é cerca de 30% mais barato que a brita graduada simples), além de dar uma destinação adequada para o grande volume de resíduo de construção e demolição gerado, reduzindo problemas ambientais presentes e futuros.

### **Agradecimentos**

Ao CNPq pela concessão da Bolsa de Iniciação Científica. À PMSP e à Coordenadoria do Espaço Físico da USP (COESF-Reitoria da USP) pelo material fornecido para este trabalho. À Mestre Eng. Rosângela Motta e à mestranda Eng. Fabiana Leite por toda ajuda e colaboração nesse trabalho.

### **Referências Bibliográficas**

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 6954**: Lastro Padrão: determinação da forma do material. Rio de Janeiro, 1989.

BERNUCCI, L. L. B., LEITE, F. C., MOTTA, R. S. **Aplicação de agregado reciclado de RCD em pavimentação: sistema viário da USP-Leste**. In: SEMINÁRIO GESTÃO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO AVANÇOS E DESAFIOS, São Paulo, 2005. Apresentação. CD. São Paulo, 2005.

BODI, J.; BRITO FILHO, J. A; ALMEIDA, S Utilização de Entulho de Construção Civil Reciclado na Pavimentação Urbana. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., Cuiabá, 1995. **Anais**. Rio de Janeiro: ABPv, 1995. p.409-436.



BRITO FILHO, J. A. Cidades versus entulhos. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., São Paulo, 1999. **Anais**. São Paulo, 1999. p.56-67.

CARNEIRO, A. P., BURGOS, P. C., ALBERTE, E. P. V. **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA / Caixa Econômica Federal, 2001. p.190-227.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Brasília. 2002. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>>. Acesso em: 28 de nov. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ME 049/94**: Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER PRO 273/96**: Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”. Rio de Janeiro, 1996b.

HENDRICKS, F., JANSSEN, G. M. T. **Reuse of construction and demolition waste in the Netherlands for road constructions**. Heron, v.46, n.2, p.109-117, 2001.

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

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. São Paulo. 2003. **PMSP/SP ETS – 001/2003** – Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil. Disponível em: <[http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/infraestruturaurbana/normas\\_tecnicas\\_de\\_pavimentacao/pmspets0012003.pdf](http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/infraestruturaurbana/normas_tecnicas_de_pavimentacao/pmspets0012003.pdf)>. Acesso em 21 de nov. 2005.

SCHNEIDER, D. M. **Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo**. 2003. 130p. Teses (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

TRICHÊS, G., KRYCKYJ, P. R. Aproveitamento de entulho da construção civil na pavimentação urbana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL, 4., São José dos Campos, 1999. **Anais**. São Paulo: ABMS, 1999. p.259-265.

## ANEXO 1

### RESOLUÇÃO CONAMA Nº 307, DE 5 DE JULHO DE 2002

Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, no uso das competências que lhe foram conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de julho de 1990, e tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, Anexo à Portaria nº 326, de 15 de dezembro de 1994, e

Considerando a política urbana de pleno desenvolvimento da função social da cidade e da propriedade urbana, conforme disposto na Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001;

Considerando a necessidade de implementação de diretrizes para a efetiva redução dos impactos ambientais gerados pelos resíduos oriundos da construção civil;

Considerando que a disposição de resíduos da construção civil em locais inadequados contribui para a degradação da qualidade ambiental;

Considerando que os resíduos da construção civil representam um significativo percentual dos resíduos sólidos produzidos nas áreas urbanas;

Considerando que os geradores de resíduos da construção civil devem ser responsáveis pelos resíduos das atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas, bem como por aqueles resultantes da remoção de vegetação e escavação de solos;

Considerando a viabilidade técnica e econômica de produção e uso de materiais provenientes da reciclagem de resíduos da construção civil; e

Considerando que a gestão integrada de resíduos da construção civil deverá proporcionar benefícios de ordem social, econômica e ambiental, resolve:

Art. 1º Estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais.

Art. 2º Para efeito desta Resolução, são adotadas as seguintes definições:

I - Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha;

II - Geradores: são pessoas, físicas ou jurídicas, públicas ou privadas, responsáveis por atividades ou empreendimentos que gerem os resíduos definidos nesta Resolução;

III - Transportadores: são as pessoas, físicas ou jurídicas, encarregadas da coleta e do transporte dos resíduos entre as fontes geradoras e as áreas de destinação;

IV - Agregado reciclado: é o material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia;

V - Gerenciamento de resíduos: é o sistema de gestão que visa reduzir, reutilizar ou reciclar resíduos, incluindo planejamento, responsabilidades, práticas, procedimentos e recursos para desenvolver e implementar as ações necessárias ao cumprimento das etapas previstas em programas e planos;

VI - Reutilização: é o processo de reaplicação de um resíduo, sem transformação do mesmo;

VII - Reciclagem: é o processo de reaproveitamento de um resíduo, após ter sido submetido à transformação;

VIII - Beneficiamento: é o ato de submeter um resíduo às operações e/ou processos que tenham por objetivo dotá-los de condições que permitam que sejam utilizados como matéria-prima ou produto;

IX - Aterro de resíduos da construção civil: é a área onde serão empregadas técnicas de disposição de resíduos da construção civil Classe "A" no solo, visando a reservação de materiais segregados de forma a possibilitar seu uso futuro e/ou futura utilização da área, utilizando princípios de engenharia para confiná-los ao menor volume possível, sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente;

X - Áreas de destinação de resíduos: são áreas destinadas ao beneficiamento ou à disposição final de resíduos.

Art. 3º Os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

IV - Classe D - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Art. 4º Os geradores deverão ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, secundariamente, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final.

§ 1º Os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de "bota fora", em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei, obedecidos os prazos definidos no art. 13 desta Resolução.

§ 2º Os resíduos deverão ser destinados de acordo com o disposto no art. 10 desta Resolução.

Art. 5º É instrumento para a implementação da gestão dos resíduos da construção civil o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, a ser elaborado pelos Municípios e pelo Distrito Federal, o qual deverá incorporar:

I - Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil; e

II - Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.

Art 6º Deverão constar do Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil:

I - as diretrizes técnicas e procedimentos para o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e para os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil a serem elaborados pelos grandes geradores, possibilitando o exercício das responsabilidades de todos os geradores.

II - o cadastramento de áreas, públicas ou privadas, aptas para recebimento, triagem e armazenamento temporário de pequenos volumes, em conformidade com o porte da área urbana municipal, possibilitando a destinação posterior dos resíduos oriundos de pequenos geradores às áreas de beneficiamento;

III - o estabelecimento de processos de licenciamento para as áreas de beneficiamento e de disposição final de resíduos;

IV - a proibição da disposição dos resíduos de construção em áreas não licenciadas;

V - o incentivo à reinserção dos resíduos reutilizáveis ou reciclados no ciclo produtivo;

VI - a definição de critérios para o cadastramento de transportadores;

VII - as ações de orientação, de fiscalização e de controle dos agentes envolvidos;

VIII - as ações educativas visando reduzir a geração de resíduos e possibilitar a sua segregação.

Art 7º O Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil será elaborado, implementado e coordenado pelos municípios e pelo Distrito Federal, e deverá estabelecer diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, em conformidade com os critérios técnicos do sistema de limpeza urbana local.

Art. 8º Os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil serão elaborados e implementados pelos geradores não enquadrados no artigo anterior e terão como objetivo estabelecer os procedimentos necessários para o manejo e destinação ambientalmente adequados dos resíduos.

§ 1º O Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, de empreendimentos e atividades não enquadrados na legislação como objeto de licenciamento ambiental, deverá ser apresentado juntamente com o projeto do empreendimento para análise pelo órgão competente do poder público municipal, em conformidade com o Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil.

§ 2º O Projeto de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil de atividades e empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental, deverá ser analisado dentro do processo de licenciamento, junto ao órgão ambiental competente.

Art. 9º Os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil deverão contemplar as seguintes etapas:

I - caracterização: nesta etapa o gerador deverá identificar e quantificar os resíduos;

II - triagem: deverá ser realizada, preferencialmente, pelo gerador na origem, ou ser realizada nas áreas de destinação licenciadas para essa finalidade, respeitadas as classes de resíduos estabelecidas no art. 3º desta Resolução;

III - acondicionamento: o gerador deve garantir o confinamento dos resíduos após a geração até a etapa de transporte, assegurando em todos os casos em que seja possível, as condições de reutilização e de reciclagem;

IV - transporte: deverá ser realizado em conformidade com as etapas anteriores e de acordo com as normas técnicas vigentes para o transporte de resíduos;

V - destinação: deverá ser prevista de acordo com o estabelecido nesta Resolução.

Art. 10. Os resíduos da construção civil deverão ser destinados das seguintes formas:

I - Classe A: deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

II - Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;

III - Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

IV - Classe D: deverão ser armazenados, transportados, reutilizados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Art. 11. Fica estabelecido o prazo máximo de doze meses para que os municípios e o Distrito Federal elaborem seus Planos Integrados de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil, contemplando os Programas Municipais de Gerenciamento de Resíduos de Construção Civil oriundos de geradores de pequenos volumes, e o prazo máximo de dezoito meses para sua implementação.

Art. 12. Fica estabelecido o prazo máximo de vinte e quatro meses para que os geradores, não enquadrados no art. 7º, incluam os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil nos projetos de obras a serem submetidos à aprovação ou ao licenciamento dos órgãos competentes, conforme §§ 1º e 2º do art. 8º.

Art. 13. No prazo máximo de dezoito meses os Municípios e o Distrito Federal deverão cessar a disposição de resíduos de construção civil em aterros de resíduos domiciliares e em áreas de "bota fora".

Art. 14. Esta Resolução entra em vigor em 2 de janeiro de 2003.

JOSÉ CARLOS CARVALHO

Presidente do Conselho

Publicada DOU 17/07/2002

deformação