



---

## CAPÍTULO V

# CARACTERÍSTICAS DO ENTULHO E DO AGREGADO RECICLADO



Alex Pires Carneiro  
Barbara Elizabete Correia Quadros  
Ana Maria Vieira de Oliveira  
Irineu Antônio Schadach de Brum

Táís Santos Sampaio  
Elaine Pinto Varela Alberte  
Dayana Bastos Costa

Os resíduos provenientes das atividades de construção e demolição, usualmente chamados de entulho, são geralmente considerados como material inerte, constituindo, quase sempre, a maior parcela dos resíduos sólidos gerados no ambiente urbano. Nos países da Europa Ocidental, a geração de entulho equivale a uma quantidade entre 0,7 e 1,0 tonelada por habitante/ano, correspondendo, assim, ao dobro dos demais resíduos sólidos urbanos gerados pela sociedade (Pera, 1996). Segundo Pinto (1999), para 6 municípios brasileiros pesquisados, o entulho corresponde a uma quantidade entre 54% e 70% dos resíduos sólidos urbanos, representando uma geração per capita entre 0,4 e 0,76 tonelada por habitante/ano.

Com a intensificação do processo de urbanização, a quantidade de resíduos gerados pelas obras de construção é cada vez mais elevada, quer pelas demolições decorrentes do processo de renovação urbana, quer por novas edificações. Estimativas apontam para uma produção mundial entre 2 e 3 bilhões de toneladas/ano. (Lauritzen, 1994). Considerando a geração de 0,4 tonelada por habitante/dia, são produzidos, no Brasil, cerca de 68 milhões de toneladas/ano de entulho. O crescimento populacional constitui um fator importante nessa geração, visto que contribui para o aumento da produção desses resíduos. Além disso, o déficit habitacional pressiona a sociedade a expandir o número de habitações nos próximos anos, o que contribui, também, para o aumento da geração de entulho.

O alto índice de perdas na construção também colabora nesse aumento. Programas de redução de perdas e gestão da qualidade, que algumas empresas do setor da construção civil no Brasil vem recentemente implantando, contribuem para reduzir a geração do entulho e permitem o seu gerenciamento adequado no canteiro. Contudo, a implantação de tecnologias visando à reutilização e à reciclagem desse material é fundamental num processo de gestão

adequada, pois a quantidade de entulho gerado pelas obras de construção, demolição ou reformas continuará a ser significativa, mesmo com a implantação de programas de redução de perdas.

As experiências européia, japonesa e americana demonstram que o conhecimento existente apresenta base tecnológica suficiente para o desenvolvimento da reciclagem, de forma contínua, nas áreas urbanizadas onde existam geração de entulho e demanda por materiais de construção.

No Brasil, algumas Prefeituras, têm implantado usinas de reciclagem de entulho, buscando alternativas para gestão desses resíduos. Existem exemplos de sucesso, como o da cidade de Belo Horizonte — MG, que desenvolve um programa de reciclagem de entulho, incluindo a instalação de quatro usinas de reciclagem. Além disso, Ribeirão Preto, São José dos Campos, Londrina, São Paulo, entre outras cidades, também implantaram usinas de reciclagem de entulho.

Devidamente reciclado o entulho apresenta propriedades físicas e químicas apropriadas para o seu emprego como material de construção. No entanto, é importante ressaltar que o entulho apresenta características bastante peculiares. Existe uma grande diversidade de matérias-primas, técnicas e metodologias, empregadas na construção civil, que afetam, de modo significativo, as características dos resíduos gerados, principalmente quanto à composição e à quantidade. Portanto, o nível de desenvolvimento da construção local reflete-se nas características dos materiais constituintes do entulho, ou seja, a caracterização desse resíduo está condicionada a parâmetros da região de origem (Carneiro, 2000a).

A caracterização do entulho, tanto na sua forma bruta quanto na reciclada, constitui uma etapa imprescindível para estudos de alternativas que visem à gestão e à reciclagem desse resíduo. Nesse

sentido, o projeto Entulho Bom e a LIMPURB (Empresa de Limpeza Urbana do Salvador) realizaram a caracterização do entulho e do agregado reciclado de Salvador (agregado produzido pela reciclagem de entulho).

Essa caracterização (a primeira disponível no Nordeste) buscou conhecer as propriedades do entulho e dos agregados reciclados produzidos em Salvador, possibilitando a definição de padrões mais eficientes para coleta, transporte, disposição e reciclagem desse resíduo, além de identificar formas de utilização segura do material, visando suprir a falta de normalização e regulamentação. A caracterização também contribuiu para combater o descrédito de alguns setores sobre a viabilidade da reciclagem do entulho e da utilização de agregados reciclados, em substituição à matéria-prima convencional, na construção civil.



## **CARACTERÍSTICAS DO ENTULHO**

A maior parte do entulho é proveniente de obras e demolições, além de desastres naturais e tecnológicos, como incêndios, falhas estruturais, terremotos, furacões, guerras, entre outros. Contudo, os resíduos gerados na produção dos materiais de construção, como, por exemplo, cacos de blocos cerâmicos nas olarias, pó de pedra da britagem de agregados, entre outros, não são considerados como entulho e sim como resíduos industriais de setores específicos.

Os resíduos gerados nas atividades de construção e demolição, etapas claramente distintas do ciclo de vida de uma edificação, são geralmente constituídos de materiais similares e, portanto, igualmente chamados de entulho.

Nas atividades de construção, ou mesmo em reformas, o alto índice de perdas e a ausência de procedimentos de reutilização e



reciclagem são as principais causas da geração do entulho. Entretanto, nem toda a perda se transforma, efetivamente, em resíduo — uma parte fica incorporada na própria obra. A quantidade de entulho gerado corresponde, em média, a 50% do material desperdiçado (Pinto, 1995 citado por Zordan, 1997). A **Tabela 1** apresenta índices médios de perdas de materiais de construção.

**TABELA 1 - ÍNDICE DE PERDAS DE ALGUNS MATERIAIS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO**

MATERIAIS (%)	PESQUISADORES		
	SOUZA <sup>1</sup>	PINTO <sup>2</sup>	SOILBELMAN <sup>3</sup>
Areia	44	39	44
Cimento	56	33	83
Cal	36	102	–
Concreto	9	1	13
Aço	11	26	19
Blocos e Tijolos	13	13	52

<sup>1</sup> SOUZA, 1998, citado por PINTO, 1999 (mediana de diversas obras – Brasil)

<sup>2</sup> PINTO, 1989 (valores de uma obra – São Carlos)

<sup>3</sup> SOILBELMAN, 1993 citado por PINTO, 1999 (média de 5 obras – Porto Alegre)

As demolições, na maioria dos casos, também se apresentam como uma grande fonte geradora desse resíduo, uma vez que, de um modo geral, vêm sendo realizadas com processos rudimentares. Num contexto em que a demolição rápida e a retirada dos escombros são os principais objetivos, gera-se uma grande quantidade de entulho, com os diversos tipos de materiais misturados, já que fatores como o tempo e as técnicas utilizadas não permitem a separação desses materiais.

Para reduzir a geração de resíduos de demolição, é necessária a modificação dos métodos tradicionais e a adoção da demolição seletiva. Essa técnica consiste em separar, *in situ*, as diversas categorias de materiais à medida que o processo de demolição (ou “desconstrução”) vai avançando, de forma a evitar a mistura de concretos, argamassas e outros materiais recicláveis com contaminantes como madeiras, papéis, plásticos e gesso, entre outros. Deve ser desenvolvido um planejamento detalhado do processo de demolição, uma vez que a demolição seletiva necessita de mais tempo que a tradicional. Nesse sentido, recomenda-se que os projetos de demolição sejam planejados e controlados em detalhes, como deveriam ser os projetos de construção (Grupo Español del Hormigon, GEHO, 1997).

Os resíduos de construção e demolição são gerados por diversos agentes, como empresas de construção, médios e pequenos prestadores de serviços, órgãos públicos, autoconstrutores, entre outros. Ou seja, esses resíduos são produzidos tanto pelo pequeno gerador quanto pelas indústrias da construção civil.

O entulho é um resíduo heterogêneo, basicamente composto por:

- concretos, argamassas e rochas que, em princípio, apresentam, na sua totalidade, bom potencial para reciclagem;
- blocos, tijolos e cerâmicas, que apresentam também alto potencial de utilização, sem necessitar de processo sofisticado de tratamento;
- solos, areia e argila, que podem ser facilmente separados dos outros materiais por peneiramento;
- asfalto, material com alto potencial de reciclagem em obras viárias;
- metais ferrosos, recicláveis pelo setor de metalurgia;
- madeiras, material apenas parcialmente reciclável, sendo que madeiras com proteção impermeabilizante ou pinturas devem

ser consideradas como material poluente e tratadas como resíduos químicos perigosos, devido ao risco de contaminação (Lauritzen, 1994);

- outros materiais (plástico, borracha, papel, papelão, etc.) passíveis de reciclagem, embora esse processo nem sempre apresente vantagens que possam ser suportadas pelo atual estágio de desenvolvimento tecnológico; quando for o caso, esses materiais devem ser tratados como resíduos e dispostos de forma adequada.

O entulho, portanto, é apresentado sob forma sólida. Apesar da diversidade de dimensões e formas dos materiais que o constituem, aproximadamente 90% apresentam potencial de reciclagem (Lauritzen, 1994).

Embora, de forma geral, esses materiais sejam considerados pela NBR 10004 como resíduos inertes, a sua composição química e o risco de contaminação ambiental estão relacionados diretamente com os materiais utilizados na obra que os originou. Portanto, apesar de a maioria das obras produzirem resíduos inertes, pode haver casos em que a matéria-prima utilizada altere a classificação do entulho. A reciclagem de concretos produzidos com escórias com alto teor de metais pesados, que antes estavam encapsuladas na matriz de cimento, por exemplo, pode gerar agregados prejudiciais ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores e usuários (Cassa; Valois; Carneiro, 1998).

O resíduo de construção e demolição, ou simplesmente entulho, possui características bastante peculiares. Há uma gama muito grande de aspectos que interferem na quantidade, composição e características desse resíduo. Entre esses aspectos, destacam-se:

- o nível de desenvolvimento da indústria da construção local:
  - qualidade e treinamento da mão de obra disponível;

- técnicas de construção e demolição empregadas;
- adoção de programas de qualidade e redução de perdas;
- adoção de processos de reciclagem e reutilização no canteiro;
- os tipos de materiais predominantes e/ou disponíveis na região;
- o desenvolvimento de obras especiais na região (metrô, esgotamento sanitário, restauração de centros históricos, entre outros);
- o desenvolvimento econômico da região;
- a demanda por novas construções.

Nesse sentido, as características do entulho estão condicionadas a parâmetros específicos da região geradora do resíduo e à variação ao longo do tempo. Na construção de edifícios, nos países desenvolvidos, por exemplo, geram-se altos percentuais de papel e plástico, provenientes das embalagens dos materiais. No mesmo tipo de obra, nos países em desenvolvimento, gera-se grande quantidade de resíduos de concreto, argamassa, blocos, entre outros, devido às altas perdas do processo.

Na **Tabela 2**, é possível perceber a variabilidade da composição dos entulhos gerados em algumas regiões / países.

**TABELA 2 - COMPOSIÇÃO, EM PORCENTAGEM, DO ENTULHO DE DIVERSAS REGIÕES / PAÍSES**

MATERIAL	ORIGEM						
	Reino Unido <sup>1</sup>	Hong Kong <sup>2</sup>	São Carlos <sup>3</sup>	São Paulo <sup>4</sup>	São Paulo <sup>5</sup>	Ribeirão Preto <sup>6</sup>	Salvador <sup>7</sup>
Concreto e argamassa	9	17	69	12	33	59	53
Solo e areia	75 *	19	-	82 *	32	-	22
Cerâmica	5	12	29	3	30	23	14
Rochas	-	23	1	-	-	18	5
Outros	11	28	1	3	5	-	6

\* Solo, areia e rochas

<sup>1</sup> Construction..., 1996.

<sup>2</sup> Hong Kong Polytechnic, 1993, citado por Levy, 1997.

<sup>3</sup> Pinto, 1989.

<sup>4</sup> Castro, 1998 (amostragem no aterro de Itatinga).

<sup>5</sup> Brito Filho, 1999 citado por John, 2000.

<sup>6</sup> Zordan, 1997.

<sup>6</sup> Carneiro, 2000b.

Além dos fatores regionais, as diferenças observadas na composição do entulho podem ser atribuídas ao período de amostragem, à técnica de amostragem utilizada e ao local de coleta da amostra (canteiro / aterro). Por fim, os tipos de obras predominantes também podem influenciar na composição do entulho, conforme é demonstrado na tabela a seguir.

**TABELA 3 - COMPONENTES DO ENTULHO EM RELAÇÃO AO TIPO DE OBRA EM QUE FOI GERADO**

COMPONENTES PRESENTES	Trabalhos Rodoviários (%)	Escavações (%)	Sobras de Demolição (%)	Obras Diversas (%)	Sobras de Limpeza (%)
Concreto	48,0	6,1	54,3	17,5	18,4
Tijolos	-	0,3	6,3	12,0	5,0
Areia	4,6	9,6	1,4	3,3	1,7
Solo, poeira e lama	16,8	48,9	11,9	16,1	30,5
Rocha	7,0	32,5	11,4	23,1	23,9
Asfalto	23,5	-	1,6	-	0,1
Metais	-	0,5	3,4	6,1	4,4
Madeira de Construção	0,1	1,1	7,2	18,3	10,5
Papel e matéria orgânica	-	1,0	1,6	2,7	3,5
Outros	-	-	0,9	0,9	2,0

Fonte: Hong Kong Polytechnic, 1993, citado por Levy, 1997.

## CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO RECICLADO

Materiais nobres podem ser facilmente reciclados, como as parcelas de concreto, argamassa, solo, areia, cerâmicas e rochas, que representam a maioria dos componentes do entulho.

Os materiais resultantes do processo de reciclagem dos resíduos de construção e de demolição são denominados por diversos autores e pela RILEM (Réunion Internationale des Laboratories d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions) de **agregados reciclados** (RILEM, 1994; Barra, 1996; Collins, 1996; GEHO, 1997; Hendrix, 1998; Pera, 1996). Tal denominação é adequada para o novo material produzido, uma vez que esse não é mais considerado um subproduto (entulho), e sim um agregado reciclado, a ser utilizado no mesmo processo em que foi gerado, a construção civil.

De uma forma geral, os agregados obtidos na reciclagem do entulho são mais porosos que os naturais, o que implica uma absorção de água mais elevada. Por outro lado, os resíduos de construção reciclados apresentam componentes com algumas propriedades relevantes para o desempenho de materiais de construção. Segundo Pinto (1998), entre esses componentes, destacam-se as partículas de cimento não-inertizadas, que ainda irão reagir, partículas de cal, que estarão disponíveis para novas reações, partículas já cristalizadas, que funcionarão como iniciador da cristalização (acelerando a formação da nova rede cristalina), e partículas finas de material cerâmico, com significativo potencial pozolânico, que irão reagir com a cal hidratada.

O agregado reciclado é uma mistura de agregado gráudo e miúdo, gerado pela operação de britagem, em geral com britador de mandíbulas. A porcentagem de cada agregado depende basicamente da granulometria e da composição do entulho, bem como

do diâmetro máximo do agregado gráudo reciclado, produzido pelo equipamento de cominuição. A granulometria desejada pode ser obtida mediante pequenos ajustes na abertura do britador.

O coeficiente de forma do agregado reciclado gráudo é similar ao de um agregado gráudo obtido na britagem de uma rocha calcária. Em geral, o agregado reciclado apresenta uma forma mais irregular e uma textura superficial mais áspera e porosa. Segundo GEHO (1997), a fração grossa possui uma distribuição granulométrica adequada para quase todas as aplicações de agregados em construções. Contudo, devem-se tomar algumas precauções com relação à utilização da fração  $< 2$  mm do agregado reciclado, buscando evitar problemas relacionados com absorção de água, forma e textura superficial. A utilização desse material pode influenciar em algumas propriedades como o consumo de água e a resistência mecânica.

Além disso, a presença, no entulho, de algumas substâncias consideradas impurezas ou contaminantes pode prejudicar o desempenho dos materiais produzidos com o agregado reciclado. Por exemplo: as argilas e solos em geral, o betume e os polímeros procedentes das selagens impermeabilizantes das juntas, os fillers expansivos, também procedentes de juntas, o gesso, a cerâmica refratária, os cloretos, matéria orgânica, metais, vidros, agregados leves, partículas de concretos danificadas em incêndios, diversas substâncias reativas e concreto de cimento aluminoso são contaminantes que, em determinadas quantidades, podem comprometer o desempenho de um concreto estrutural produzido com agregado reciclado (GEHO, 1997).

Vale ressaltar que uma determinada substância pode ser considerada como impureza ou contaminante para uma dada aplicação do agregado reciclado e como material inerte para outra

aplicação. Por exemplo: agregados reciclados que contenham partículas de gesso podem ser utilizados para execução de camadas de pavimentos; contudo teores de cerca de 6% desse material podem provocar redução de aproximadamente 15% na resistência do concreto. A presença de gesso em materiais produzidos com Cimento Portland pode provocar fenômenos expansivos (GEHO, 1997).

Dessa forma, a aplicação do agregado reciclado está condicionada à sua composição, sendo necessária a caracterização sistemática dos agregados produzidos, buscando evitar a sua utilização em aplicações que possam comprometer o desempenho do material e prejudicar a aceitação da sociedade ou do meio técnico do uso do agregado reciclado.



## **PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO AGREGADO RECICLADO**

As características do agregado reciclado estão diretamente relacionadas com o seu processo de produção. De modo geral, o processo de reciclagem dos resíduos de construção é constituído das etapas de limpeza e seleção prévia, homogeneização, trituração, extração de materiais metálicos, eliminação de contaminantes e estocagem para expedição (Pinto, 1998; GEHO, 1997).

Ainda segundo essas publicações, na reciclagem de entulho, são utilizados equipamentos diversos como pá carregadeira, alimentador vibratório, britador, eletroímã para separação das ferragens, peneiras, mecanismos transportadores e, eventualmente, sistemas para eliminação de contaminantes. Esses equipamentos devem permitir que o processamento ocorra com minimização da geração de ruídos e material particulado. Além disso, deve-se dispor de uma área suficientemente grande para

armazenar os diversos tipos de entulho recebido e os vários tipos de agregados produzidos.

Existe bibliografia detalhada sobre a adequação dos equipamentos e projetos para cada tipo de processo. De forma genérica pode-se considerar que os processos de reciclagem têm equipamentos similares aos utilizados na produção de agregados naturais. Contudo, os sistemas de reciclagem de entulho podem ser classificados em função dos critérios e do rigor usados na eliminação dos contaminantes, conforme apresentado a seguir (GEHO, 1997):

- Plantas de Primeira Geração – necessitam de elementos que possam eliminar metais.
- Plantas de Segunda Geração – similares às de primeira geração, mas contendo sistemas preliminares (mecânicos ou manuais) de eliminação de contaminantes, como a limpeza e classificação do material, por via seca ou úmida.
- Plantas de Terceira Geração – visam a remoção praticamente integral de todos materiais secundários, considerados como contaminantes dos agregados reciclados.

A seleção dos equipamentos e a operação do sistema de reciclagem dependem das características iniciais do entulho e do seu grau de processamento, determinado pela aplicação específica do agregado reciclado. Por exemplo, se o material reciclado for utilizado na fabricação de concreto estrutural, o processo de reciclagem deverá ser mais rigoroso, para permitir a produção de um agregado com menor quantidade de contaminantes que o material produzido para ser utilizado em camadas de pavimentos (para as quais podem ser aceitos maiores teores de materiais cerâmicos polidos, solos, entre outros materiais, inadequados para concreto estrutural).

Um dos principais condicionantes do processo de reciclagem é a necessidade de gerar produtos homogêneos e de características

adequadas, a partir de resíduos heterogêneos e de origem bastante diversificada.

A maioria das plantas de reciclagem utilizadas no Brasil é de 1ª geração. O processo utilizado nesse tipo de planta é o mais simples de todos. A eliminação de contaminantes em plantas de 2ª e 3ª geração, por sua vez, encarece o processo e pode tornar inviável a reciclagem. Uma alternativa para as aplicações que necessitem agregados reciclados com desempenho superior é buscar processos de gestão do resíduo pelo gerador que permitam a separação preliminar dos contaminantes no canteiro, durante o processo construtivo. A reciclagem de entulho é bastante favorecida quando não há mistura significativa dos materiais. A separação prévia de elementos como vidro, madeira, metais, plásticos, papelão é recomendável, uma vez que existem processos específicos relativamente simples, alguns inclusive já consolidados para reciclagem desses materiais.

Quando o entulho é composto de diversos materiais misturados, deve-se adotar alguns procedimentos para recebimento e reciclagem do material:

- não receber entulho que apresente quantidade visivelmente significativa de contaminantes (podas, papel, papelão, madeira, matéria orgânica, plásticos, solos, metais, entre outros);
- buscar a homogeneização do entulho;
- identificar aplicações que aceitem a presença dos contaminantes e variações nas características do agregado reciclado;
- analisar periodicamente as características do agregado reciclado.

Além da classificação por geração, as unidades de reciclagem podem ser divididas em instalações fixas e plantas móveis (GEHO, 1997). As instalações fixas permitem um maior controle de seu impacto ambiental e são preferíveis em relação às pequenas e

móveis. A geração de ruídos e a distância dos centros urbanos são fatores que deverão se levar em conta na seleção da localização das plantas. As plantas móveis, por sua vez, são utilizadas, preferencialmente, em zonas onde a quantidade de material a reciclar, ainda que constante, não alcance grandes montantes. A emissão de pó e a geração de ruído também devem ser controladas.

As usinas de reciclagem, tanto fixas quanto móveis, constituem o espaço mais adequado à destinação do entulho e à produção de agregados reciclados para confecção de materiais de construção. A primeira usina de reciclagem a ser implantada em Salvador pela LIMPURB será uma planta fixa de primeira geração, com capacidade de processar 200 toneladas a cada 8 horas de operação.



## **RECICLAGEM DE ENTULHO E ECONOMIA**

Na economia de mercado, a reciclagem de entulho será atrativa quando o produto reciclado apresentar qualidade e preço competitivo em relação aos materiais naturais. Essa situação ocorre em regiões próximas aos centros urbanos, onde as reservas de matérias-primas estão se esgotando, ou os custos de disposição em aterros são elevados.

Com a reciclagem do entulho, pode-se fazer economia dos custos de transporte de matérias-primas para longas distâncias, além dos custos de deposição final em aterros e transporte do entulho. Nesse sentido, destacam-se projetos com grande geração de resíduos, como renovação de centros urbanos, recuperação de vias e rodovias, reconstrução após desastres naturais ou tecnológicos, etc. Os custos relativos ao transporte do entulho ao aterro e ao fornecimento de matérias-primas podem tornar a reciclagem economicamente viável. Além disso, os eventuais custos com

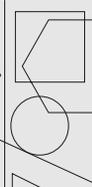
remediação de impactos ambientais e disposição no aterro podem aumentar ainda mais as vantagens econômicas da reciclagem.

Para utilizar resíduos como matéria-prima, em substituição aos materiais tradicionais, é necessário que esse insumo alternativo apresente padrões de desempenho compatíveis com a sua utilização. O material reciclado (uma vez que atenda aos critérios de desempenho) será mais consumido caso o seu preço seja menor que o do agregado natural. Nos casos em que o material reciclado e o natural têm o mesmo custo, o diferencial será a qualidade ou a confiabilidade do produto e a utilização de instrumentos de *marketing*, como selos verdes, de forma a garantir que o produto é ambientalmente correto.

A reciclagem também pode ser incentivada através de instrumentos legais que promovam o interesse econômico do uso do material reciclado. O governo da Dinamarca, por exemplo, elevou a taxa de deposição de material potencialmente reciclável em aterros controlados, tornando a reciclagem economicamente viável (Lauritzen, 1994).

É fundamental difundir usos adequados para os produtos reciclados, além de identificar e fomentar obras públicas e privadas nas quais eles possam ser introduzidos como alternativa viável, em substituição aos materiais convencionais.

Diversos estudos indicam que a reciclagem de entulho pode gerar agregados com custo inferior ao custo médio dos agregados convencionais. Além disso, a utilização de agregado reciclado permite produzir componentes de construção que, dependendo da sofisticação tecnológica, terão custos significativamente inferiores ao preço de componentes disponíveis no mercado. Em Belo Horizonte, por exemplo, verificou-se uma economia de 22% na execução da pavimentação asfáltica, e é estimada uma economia de 50% na produção de blocos de vedação (Pinto, 1997).



## **EXPERIÊNCIA REALIZADA**

### **CARACTERIZAÇÃO DO ENTULHO E DO AGREGADO RECICLADO DE SALVADOR**

Em Salvador, são coletadas 2746 t/dia de entulho, o que representa cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos. Conforme apresentado no capítulo anterior, a LIMPURB, visando à gestão adequada desse resíduo, está implantando o Projeto de Gestão Diferenciada de Entulho de Salvador. Esse plano tem como objetivo transformar o descarte clandestino de entulho da cidade em deposição correta, através da adoção de uma política ordenadora, com a remediação da degradação ambiental gerada e a integração dos agentes envolvidos com a questão. Esse programa inclui, inicialmente, a instalação de uma usina de reciclagem, que irá processar cerca de 200 t/dia do entulho gerado em Salvador, transformando esse resíduo em agregado reciclado, a ser utilizado para a produção de materiais de construção.

Os estudos que possibilitaram a caracterização do entulho e do agregado reciclado de Salvador foram realizados através da análise de suas características físicas, químicas, mecânicas e ambientais. Segundo Lima (1999) a possibilidade de utilização de um resíduo se avalia não somente do ponto de vista das características técnicas necessárias a aplicação que se deseja, mas também da perspectiva do possível impacto ambiental que possa causar.

Na caracterização do entulho, alguns aspectos importantes foram considerados para o desenvolvimento da metodologia, como: a amostragem, os processos de recebimento, homogeneização e quarteramento da amostra, a análise de suas características físicas e a seleção do entulho a ser britado.

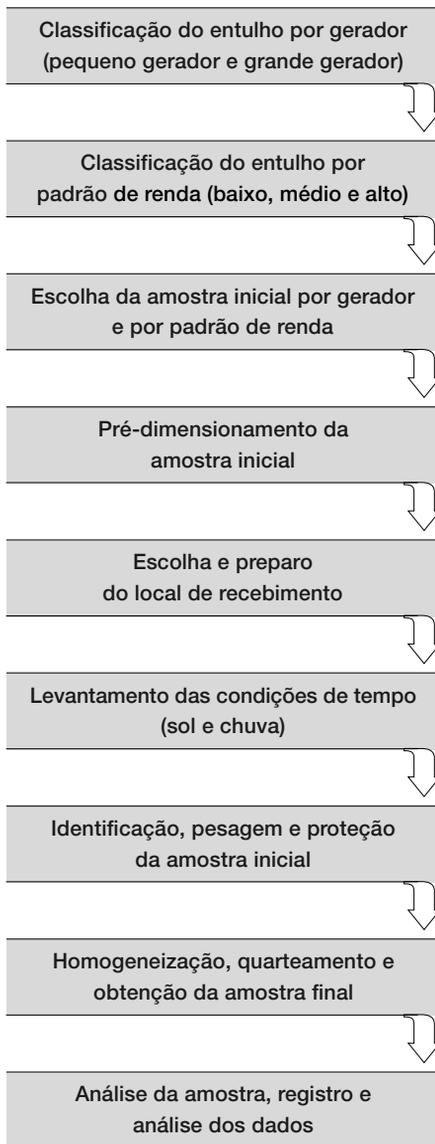
A determinação das características do agregado reciclado (miúdo e gráudo), por sua vez, consistiu na execução de ensaios de laboratório, visando a um melhor aproveitamento em sua utilização na construção civil.

A identificação de aplicações para o agregado reciclado e a avaliação preliminar dos aspectos econômicos da sua utilização foram atividades que complementaram o estudo das características dos agregados reciclados de Salvador.

## CARACTERIZAÇÃO DO ENTULHO

A grande quantidade de entulho gerado, a sua composição heterogênea e a diversidade de fatores que influenciam nas suas características (tipo de obra, período de amostragem, etc.) tornam a caracterização do entulho uma atividade fundamental para gestão e reciclagem desse resíduo.

Como indicado anteriormente, a caracterização do entulho de Salvador foi desenvolvida pela LIMPURB, em parceria com o Projeto Entulho Bom, conforme previsto no Plano de Gestão Diferenciada de Salvador e nas atividades do referido projeto. A metodologia empregada consistiu na amostragem, recebimento, homogeneização, quarteramento da amostra e realização de ensaios para caracterização qualitativa e quantitativa desse resíduo. A **Figura 1** apresenta o fluxograma da metodologia utilizada.



**FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DA CARACTERIZAÇÃO DO ENTULHO DE SALVADOR**

A caracterização do entulho foi realizada no período de setembro / outubro de 1999, no aterro de Canabrava (local de descarga do entulho de Salvador). Foram coletadas e analisadas 16 amostras de aproximadamente 10 toneladas, o que correspondeu a cerca de 155.000t de entulho, provenientes de diferentes áreas de coleta. Cada uma das amostras foi reduzida a cerca de 500 kg. A quantidade de entulho analisada correspondia, na época, a cerca de 10% do entulho gerado por dia na cidade de Salvador, apresentando nível de confiabilidade estatística de 95%, adequado para este estudo (Cochran, 1978, citado por Castro, 1998).

Foram analisadas amostras de entulho similar ao que será aceito na usina de reciclagem. Ou seja, amostras em que predominam contaminantes como, por exemplo, matéria orgânica, podas e misturas com outros resíduos não foram consideradas para este estudo, uma vez que remessas com predomínio desses materiais não serão aceitas na usina de reciclagem.

Diversos métodos para obtenção da amostra final foram analisados (Gomes, 1989; Andrade, 1992; Grossi, 1993; Castro, 1996; Castro et al., 1998). Os vários métodos utilizados para se obter a amostra final possuem alguns pontos em comum. O quarteamento sucessivo da amostra inicial, como forma de redução do volume inicial de resíduos, é um desses pontos. Contudo esses métodos divergem quanto ao dimensionamento da amostra inicial, à forma de recebimento, à homogeneização e ao tamanho da amostra final.

O processo de homogeneização e quarteamento para caracterização do entulho de Salvador consistiu, inicialmente, em descarregar, dos caminhões basculantes, cerca de 10 toneladas de entulho (amostra inicial), numa área pré-determinada do aterro de Canabrava. Uma retroescavadeira, por sua vez, realizava a operação de homogeneização, seguida de quarteamentos sucessivos, até a



estabelecidos na norma são adequados para resíduos granulares. O entulho, no entanto, é composto por elementos de dimensões bastante distintas (alguns maiores que 50mm, outros menores que 5mm).

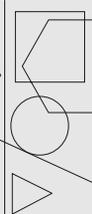
Além disso, o método da ABNT para amostragem de resíduos heterogêneos estabelece que elementos maiores que 28 mm devem ser quebrados, o que descaracterizaria o material em estudo. Por fim, a norma estabelece que a amostra a ser analisada deve ter o volume de aproximadamente 5 litros, quantidade insignificante para caracterizar adequadamente o entulho.

A análise da amostra final consistiu em determinar a massa unitária no estado solto, a composição granulométrica e a composição do entulho, no intuito de avaliar as suas principais características.

A determinação da **massa unitária no estado solto** consistiu em determinar a massa de entulho que ocupa o volume de um tonel (cerca de 70 litros) previamente pesado. Para a realização desse ensaio, um tonel foi preenchido de forma aleatória, sem vibração e compactação, segundo as recomendações da NBR 7251 — “Agregado em estado solto. Determinação da massa unitária”.

Na determinação da **granulometria** a amostra final foi peneirada manualmente, em peneiras de 50mm, 25mm e 4,8mm, visando à separação do entulho em diversas frações granulométricas. Cada fração retida foi pesada e, ao final, foi obtida a distribuição granulométrica do entulho bruto. Esse procedimento foi baseado nas recomendações NBR 7217 — “Agregado - Determinação da composição granulométrica”.

A determinação da **composição** do entulho foi realizada através de seleção manual do material de cada uma das frações obtidas no peneiramento. Os elementos compostos com mais de um tipo de material foram classificados conforme o material predominante.



A separação dos materiais para a determinação da composição foi realizada conforme os seguintes grupos:

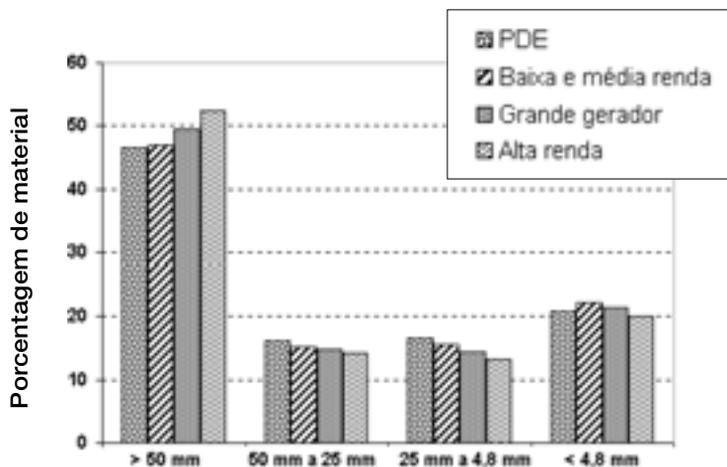
- |                          |                             |                            |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| 1. solo e areia;         | 6. rocha;                   | 11. plástico e borracha;   |
| 2. cerâmica branca;      | 7. concreto armado;         | 12. papel e papelão;       |
| 3. cerâmica vermelha;    | 8. metais ferrosos;         | 13. madeira de construção; |
| 4. asfalto;              | 9. gesso;                   | 14. outros materiais.      |
| 5. concreto e argamassa; | 10. espuma, couro e tecido; |                            |

### APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A média da **massa unitária** das 16 amostras de entulho de Salvador é de 1.345 kg/m<sup>3</sup>. Isso significa que Salvador necessita de um espaço de cerca de 2044 m<sup>3</sup> por dia para depositar todo o volume de entulho gerado diariamente (volume maior do que uma piscina olímpica). Ou seja, necessita-se de um espaço significativo para armazenar um material inerte e, em boa parte, passível de reutilização e reciclagem. Por sua vez, depositar o entulho em locais considerados adequados, como aterros, gera custos elevados. Além disso, são cada vez mais escassas as áreas para disposição, pois, com o crescimento populacional, essas áreas estão desaparecendo ou se tornando distantes, o que aumenta os custos operacionais de transporte do resíduo.

O entulho de Salvador apresentou **distribuição granulométrica** com predominância de elementos maiores que 50mm (**Figura 3**). Por outro lado, as demais partículas desse resíduo encontram-se bem distribuídas nas faixas granulométricas restantes.

A análise granulométrica enfocou tanto os aspectos relacionados ao local de recebimento do entulho (Postos de Descarga de Entulho - PDEs e Grande Gerador — depositado no aterro de Canabrava) quanto o nível de renda do local de geração do entulho (baixo, médio e alto), conforme classificação adotada pela LIMPURB.



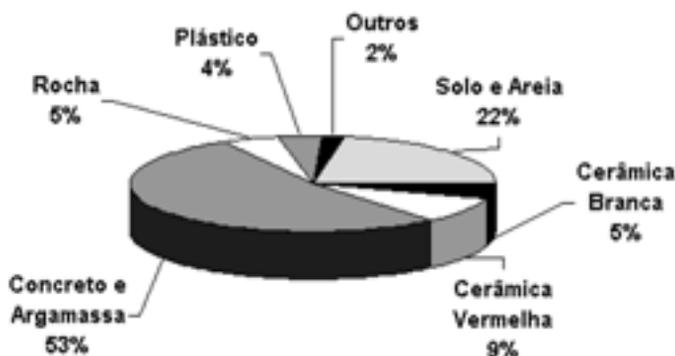
**FIGURA 3 - VALORES MÉDIOS DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO ENTULHO DE SALVADOR, EM FUNÇÃO DA ORIGEM**

De uma forma geral, os valores médios das distribuições granulométricas apresentam resultados similares em função da origem. Entretanto, a granulometria do entulho gerado em locais de baixa e de média renda apresenta distribuição mais similar ao material recebido pelos PDEs, confirmando a estratégia de atuação desses postos em captar os resíduos de pequenas reformas e ampliações (atividades típicas de baixa e média renda). Devido ao alto custo de transporte ao aterro, esse entulho era antes lançado em terrenos baldios e cursos d'água. Com a criação dos PDEs e a aplicação de medidas educativas, punitivas e corretivas, houve uma redução significativa da disposição clandestina na região de Salvador (Empresa de Limpeza Urbana do Salvador, LIMPURB, 1999).

Por outro lado, a granulometria do entulho gerado em local de alta renda apresenta características mais similares às do entulho do grande gerador. Essa semelhança é compreensível, uma vez que a maior parte do entulho enviado pelo grande gerador ao

aterro corresponde aos resíduos do setor formal da construção civil, representado, principalmente, por obras em áreas de alta renda.

O entulho de Salvador, apesar da sua heterogeneidade, apresenta, na sua composição, 94% de materiais com alto potencial para reciclagem na construção civil (**Figura 4**), constituindo, assim, uma jazida de matérias-primas passível de ser explorada.



**FIGURA 4 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DO ENTULHO DE SALVADOR**

A maior parte do entulho de Salvador é composta por restos de concreto e argamassa (53%). A quantidade de material cerâmico produzido na região também é significativa (14%). Esses elementos, juntamente com as rochas (5%), correspondem a 72% do entulho estudado. Esses materiais, após passarem por um processo de britagem, podem produzir agregados gráudos com alto potencial de utilização na construção civil.

Outra parte significativa desse entulho é composta por solo e areia (22%). Após a britagem, essa quantidade será ainda maior. Nesse sentido, devem ser desenvolvidos estudos visando a promover a utilização dessa fração do entulho. Os outros grupos de materiais, juntos, correspondem a apenas 2% do entulho.

## CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO

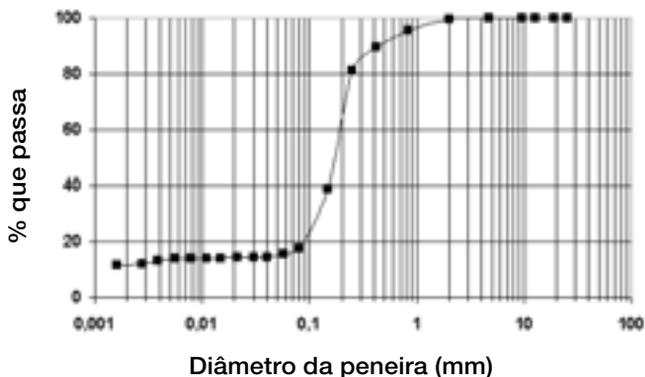
A caracterização do agregado reciclado de Salvador, realizada pelo projeto Entulho Bom, buscou definir parâmetros adequados ao seu emprego na produção de materiais de construção e identificar aplicações que maximizassem sua utilização na construção civil.

A produção do agregado reciclado utilizado neste estudo foi realizada em condições similares às do processo de uma usina de reciclagem. O entulho foi fragmentado por um britador de mandíbula e separado granulometricamente numa peneira vibratória. Foram produzidos dois tipos de materiais com granulometrias distintas, o **agregado reciclado miúdo** — material passante na peneira 4,8 mm — e o **agregado reciclado gráudo** — material passante na peneira 19 mm. A amostragem dos agregados seguiu os procedimentos da NBR 7216.

Os ensaios de caracterização foram realizados nos Laboratórios de Materiais de Construção, Geotecnia e Restauração do Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais da Escola Politécnica da UFBA e no CEPED — Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do Estado da Bahia. Consistiram na realização dos seguintes ensaios: análise granulométrica (NBR 7181), limites de liquidez e plasticidade (NBR 6459; NBR 7180), teor de materiais pulverulentos (NBR 7219), massa específica (NBR 9776; NBR 6508; NBR 9937; Neville, 1997), massa unitária (NBR 7251), inchamento (NBR 6467), absorção de água (NBR 9937; NBR 9777; Leite, 2001), índice de forma (NBR 7809), abrasão Los Angeles (NBR 6465), impurezas orgânicas (NBR 7220), teores de cloreto, nitratos e sulfatos (Teutonico, 1988) e lixiviação e solubilização (NBR 10005; NBR 10006; NBR 10004).

## APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

A **distribuição granulométrica** do agregado reciclado miúdo (**Figura 5**) e sua classificação — de acordo com a ABNT (NBR 6502), ASTM - American Society for Testing Material (1980) e DNER (Caputo, 1998) (**Tabela 3**) — indicam tratar-se de um material predominantemente constituído de areia (grossa, média e fina), com baixo percentual de argila e silte (18% ABNT e 20% DNER). Esse resultado constata que o agregado reciclado miúdo apresenta uma classificação granulométrica arenosa.



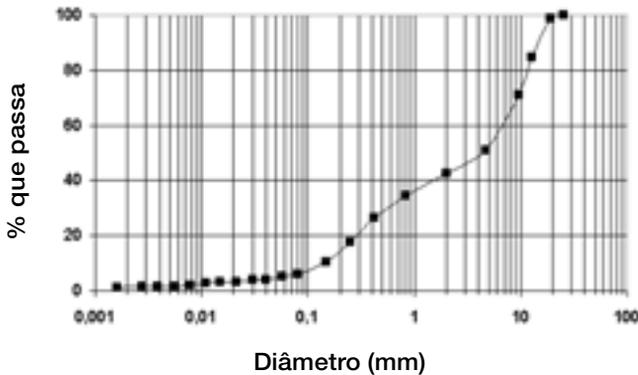
**FIGURA 5 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO**

**TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO**

	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA		
	ABNT	ASTM	DNER
Pedregulho	0%	0%	0%
Areia Grossa	0%	6%	10%
Areia Média	10%	31%	–
Areia Fina	72%	2%	70%
Silte	2%	47%	4%
Argila	16%	14%	16%

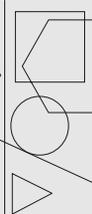
Pela classificação da AASHTO — American Association of State Highway and Transportation Officials (1978), o agregado reciclado miúdo é classificado como A-2-4, ou seja, material grosso, com menos de 35% de partículas passando pela peneira de 0,075mm, Pela USCS — Unified Soil Classification System (Casagrande, 1998), esse material é classificado como SM, ou seja, material grosso, com quantidade apreciável de partículas finas, no entanto não plástico.

A distribuição granulométrica do **agregado reciclado graúdo** indicou uma predominância de pedregulho para todas as classificações (ABNT, ASTM e DNER), notando-se, ainda, uma fração significativa de areia grossa, média e fina (**Figura 6 e Tabela 4**). Além disso, o percentual de silte e argila é bastante baixo, indicando que esse agregado tem pouca quantidade de material fino.



**FIGURA 6 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO RECICLADO GRAÚDO DE SALVADOR**

Pela AASHTO (1978), o agregado reciclado graúdo é classificado como A-2-4, ou seja, material grosso, com menos de 35% passante pela peneira de 0,075mm. Pela USCS, esse material é classificado como GP-GM, ou seja, como pedregulho mal graduado a pedregulho siltoso, significando que possui partículas finas (mais



de 7% passante na peneira 0,075mm). Essa quantidade de finos não é suficiente para afetar as propriedades de resistência, deformabilidade e permeabilidade, na medida que essas características são influenciadas a partir de teores acima de 12% (Casagrande, 1998).

**TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO REICLADO GRAÚDO**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA			
	ABNT	ASTM	DNER
Pedregulho	50%	59%	59%
Areia Grossa	9%	8%	13%
Areia Média	13%	18%	–
Areia Fina	22%	2%	21%
Silte	3%	11%	4%
Argila	3%	2%	3%

O agregado reciclado miúdo não apresentou **limites de liquidez e plasticidade**, ou seja, esse material não apresenta características de plasticidade, mesmo possuindo cerca de 18% de silte e argila, segundo a classificação da ABNT.

A determinação do **teor de materiais pulverulentos** para agregados foi realizada segundo as recomendações da NBR 7219. O agregado reciclado miúdo apresentou 13,5% de material pulverulento, enquanto que o agregado reciclado graúdo apresentou 3,3%.

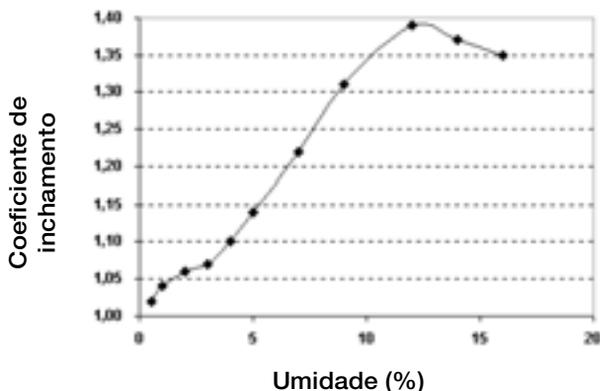
A determinação da **massa específica** do agregado reciclado miúdo pelo método do frasco de Chapman (NBR 9776) não se apresentou adequado. Apesar de o agregado reciclado miúdo ter permanecido imerso durante 24h, uma parte do material ficou fluando na superfície da água, formando uma camada de espuma com cerca de 5ml. O que provocou alteração do resultado do ensaio. Já o método do picnômetro (NBR 6508) não apresentou

dificuldade, e o resultado da massa específica obtida para o agregado reciclado miúdo foi de  $2,59\text{g/cm}^3$ , valor similar, segundo Neville (1997), à massa específica para agregados naturais ( $2,6\text{g/cm}^3$  a  $2,7\text{g/cm}^3$ ).

A determinação da massa específica do agregado reciclado gráudo, realizada segundo a especificação NBR 9937, apresentou algumas dificuldades, sendo necessária a repetição do ensaio até a obtenção de resultados confiáveis. Uma das dificuldades encontradas nesse ensaio foi ocasionada pelas características do material, que apresenta alta porosidade. Esses problemas foram também detectados em ensaios laboratoriais realizados pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Leite, 2001). Dessa maneira, buscou-se a adequada execução, através do método de ensaio do picnômetro proposto por Neville (1997). Esse ensaio apresentou resultados mais confiáveis que o método recomendado pela ABNT.

O ensaio de determinação da **massa unitária no estado solto** (NBR 7251), por sua vez, tem grande importância, na medida que esse parâmetro é utilizado quando os materiais são quantificados em volume, procedimento rotineiro na maioria das obras realizadas no Brasil. A massa unitária do agregado reciclado miúdo e do agregado reciclado gráudo foram de  $1,30\text{g/cm}^3$  e  $1,07\text{g/cm}^3$ , respectivamente.

O **inchamento** é o fenômeno dado pela variação, em função da umidade, do volume aparente que incide sobre a massa unitária. Através da representação gráfica do inchamento do agregado reciclado miúdo de Salvador, pode-se perceber que, à medida que foram acrescentados maiores teores de água, os espaços entre as partículas aumentaram, de modo que o volume total do agregado reciclado cresceu, até que, quando saturado, seu volume tendeu a decrescer (**Figura 7**).



**FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO INCHAMENTO DO AGREGADO RECICLADO MIÚDO**

A **absorção de água** é uma das diferenças mais marcantes entre agregado natural e agregado reciclado. Essa propriedade depende da composição do entulho que gera o agregado reciclado. Assim sendo, é necessário o ajuste na produção de materiais de construção, em função desse fator, de modo a não alterar, de maneira significativa, as propriedades físicas e mecânicas dos novos materiais.

A norma NBR 9937 prescreve o método de determinação da absorção de água para agregados graúdos, e a norma NBR 9777 prescreve o método para determinação da absorção de água para agregados miúdos. Entretanto, para agregados reciclados, não é adequado utilizá-las, pois o material é composto por significativa parcela de material passante na peneira 0,15 mm, o que prejudica a utilização da norma para determinar sua absorção. Quando o material é submerso em água, uma parte dos materiais finos se dissolve, tornando a água turva e alterando a amostra. Além disso, quando é seco com pano absorvente, parte da amostra é absorvida (Leite, 2001).

Portanto, deve-se buscar um método que permita avaliar, de forma adequada, a absorção de água do agregado reciclado. Nesse sentido, optou-se pelo método desenvolvido por Leite (2001), que adota procedimentos similares aos da NBR 9937, utilizando-se um recipiente com as partes superior e inferior revestidas por uma tela de malha 0,075.

Esse método permitiu obter resultados confiáveis, os quais comprovam que os agregados reciclados de Salvador apresentam altos valores de absorção de água (10,4% para o agregado reciclado gráudo e 8,2% para o miúdo), quando comparados com a faixa de absorção de água de agregados naturais (entre 0,2 e 3,4%, segundo Neville, 1997).

O **índice de forma** do agregado gráudo reciclado com dimensão máxima característica superior a 9,5mm foi de 2,6. Além disso, o agregado reciclado gráudo apresenta-se não lamelar, com irregularidades e com textura superficial áspera e porosa.

O ensaio de **abrasão Los Angeles**, por sua vez, que tem o objetivo de avaliar o desgaste do material, indicou um coeficiente de 45% para o agregado reciclado gráudo.

No ensaio de determinação de **impurezas orgânicas**, cujo objetivo é a determinação colorimétrica de impurezas orgânicas húmicas do material, não foi detectada a presença significativa de impurezas orgânicas. Além disso, os teores de impurezas orgânicas encontrados para o agregado reciclado (tanto miúdo quanto gráudo) se apresentaram em quantidade inferior à apresentada pelos materiais convencionais da região de Salvador.

Os agregados reciclados não apresentaram **nitratos** em sua composição mineral, o que indica a ausência de rejeitos sanitários no material.



Tampouco foi detectada a presença de **sulfatos** nos agregados reciclados, o que indica a ausência de partículas de gesso, as quais, se presentes, poderiam provocar fenômenos expansivos em materiais à base de Cimento Portland. A concentração desse componente em partícula finas é mais prejudicial do que em partículas grossas, devido à maior reatividade do material fino.

Os agregados reciclados apresentam teor de **cloretos** similar ao apresentado por agregados naturais utilizados na região de Salvador. A presença de cloretos indica a exposição do material analisado à ação salina.

O risco de contaminação ambiental do agregado reciclado miúdo e graúdo pode ser avaliado através de análises químicas em que é verificada a presença de metais pesados, em extratos obtidos de uma amostra submetida a condições de **lixiviação** e de **solubilização**.

O ensaio de lixiviação, tem como objetivo identificar a concentração de substâncias que se separam do material por meio de lavagem e percolação. O ensaio de solubilização, por sua vez, identifica a concentração de substâncias solúveis em água presentes no material.

A determinação da concentração de metais foi realizada por espectrometria de emissão atômica, espectrofotometria de absorção atômica em chama, geração de hidretos e vapor a frio. De uma forma geral, os resultados se apresentaram de acordo com os respectivos limites máximos, permitidos para resíduos sólidos pela NBR 10004 (**Tabelas 6 e 7**), indicando portanto, que o agregado reciclado (miúdo e graúdo) não apresenta riscos à saúde pública, no que se refere à possível liberação desses metais pesados para o meio ambiente.

**TABELA 6 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS OBTIDA NO ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO**

METAL	LIXIVIAÇÃO (mg/l) NBR 10005		
	AGREGADO RECICLADO GRAÚDO	AGREGADO RECICLADO MIÚDO	LIMITE MÁXIMO NBR 10004
Arsênio	< 0,005	< 0,005	5,0
Bário	< 1,0	< 1,0	100,0
Cádmio	< 0,02	< 0,02	0,5
Chumbo	< 0,2	< 0,2	5,0
Cromo	0,2	0,2	5,0
Mercúrio	< 0,001	< 0,001	0,1
Prata	< 0,1	< 0,1	5,0
Selênio	< 0,002	< 0,002	1,0

**TABELA 7 - CONCENTRAÇÃO DE METAIS OBTIDA NO EXTRATO DO TESTE DE SOLUBILIDADE**

METAL	LIXIVIAÇÃO (mg/l) NBR 10006		
	AGREGADO RECICLADO GRAÚDO	AGREGADO RECICLADO MIÚDO	LIMITE MÁXIMO NBR 10004
Arsênio	< 0,005	< 0,005	0,05
Bário	0,5	0,5	1,0
Cádmio	< 0,002	< 0,002	0,005
Chumbo	< 0,02	< 0,02	0,05
Mercúrio	< 0,001	< 0,001	0,001
Prata	< 0,05	< 0,01	0,05
Selênio	< 0,002	< 0,002	0,01
Cobre	< 0,02	< 0,026	1,0
Ferro	< 0,2	< 0,2	0,3
Manganês	< 0,02	< 0,02	0,1
Sódio	75,7	94,1	200,0
Zinco	< 0,1	< 0,1	5,0



A síntese dos resultados obtidos na caracterização do agregado reciclado se encontra na **Tabela 8**.

**TABELA 8 - RESUMO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO RECICLADO**

ENSAIOS	MÉTODO UTILIZADO	MATERIAL	
		AGREGADO RECICLADO MIÚDO	AGREGADO RECICLADO GRAÚDO
Materiais pulverulentos (%)	NBR 7219	13,5	3,3
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 6508 / Neville, 1997	2,59	2,19
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 7251	1,30	1,07
Absorção de água (%)	Leite, 2001	10,4	8,2
Índice de forma	NBR 7809	-	2,6
Abrasão (%)	NBR 6465	-	45
Impurezas orgânicas	NBR 7220	Mais clara	Mais clara
Teor de cloreto	Teutonico, 1988	Pequena quantidade	Pequena quantidade
Teor de nitrato	Teutonico, 1988	Ausência	Ausência
Teor de sulfato	Teutonico, 1988	Ausência	Ausência
Lixiviação	NBR 10005 / NBR 10004	Inerte	Inerte
Solubilidade	NBR 10006 / NBR 10004	Inerte	Inerte

## APLICAÇÕES DO AGREGADO RECICLADO

As características apresentadas tanto pelo entulho quanto pelo agregado reciclado de Salvador confirmaram o grande potencial de utilização desse material reciclado para a produção de materiais de construção. Sua fração gráuda apresentou potencialidade de uso na produção de camadas de pavimentos e concreto não-estrutural, enquanto sua fração fina apresentou potencialidade para o uso em camadas de pavimentos, argamassas, tijolos e blocos. Esses agregados podem ser utilizados, também, no nivelamento de terrenos, em cascalhamento de vias, estacionamentos

e pátios, em projetos de drenagem, entre outras aplicações na construção.

No Brasil, a utilização de agregados reciclados, obtidos através de operação de britagem, por sua vez, vem demonstrando, na prática, a viabilidade técnica desse tipo de atividade. Estudos recentes desenvolvidos em várias universidades (Poli — USP, Escola de Engenharia de São Carlos, Unicamp) confirmam a potencialidade de uso do agregado reciclado na produção de materiais de construção (Pinto, 1997).

A utilização em base e sub-base ou revestimento primário para pavimentação é a forma mais simples de aproveitamento do entulho como agregado, por exigir processos de reciclagem menos sofisticados. O entulho processado pode também ser utilizado como agregado para concreto não estrutural, a partir da substituição dos agregados convencionais (areia e brita). A aplicação do agregado reciclado na produção de concreto apresenta algumas vantagens semelhantes às da pavimentação, além de apresentar a possibilidade de melhorias no desempenho do concreto em relação aos agregados convencionais, quando se utiliza baixo consumo de cimento. Após o peneiramento, os finos gerados na britagem, por sua vez, podem ser encaminhados para a fabricação de blocos ou argamassas. Sua disponibilidade e viabilidade econômica sugerem utilização em programas de construções populares, assentamento ou mutirão.

É importante ressaltar que as tecnologias empregadas na produção desses materiais devem apresentar compatibilidade entre as características das matérias-primas, os componentes gerados e os usos a serem estipulados. Essas preocupações devem estar presentes na fabricação de qualquer tipo de material de construção.



## AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Além da viabilidade tecnológica e das vantagens sociais e ambientais apresentadas neste capítulo, os aspectos econômicos são de fundamental importância para possibilitar o uso de agregados reciclados em substituição aos agregados convencionais. Nesse sentido, o Projeto Entulho Bom realizou uma análise preliminar dos custos da reciclagem do entulho, buscando estimar o valor do agregado reciclado a ser produzido na usina de reciclagem de Salvador.

Estudos anteriores vêm demonstrando que o agregado reciclado apresenta viabilidade econômica, quando comparado aos agregados naturais. De acordo com informações da Prefeitura de São Paulo, na Usina de Itatinga, o custo do primeiro ano de operação foi de R\$ 5,10 por tonelada. Considerando os descontos e a amortização do capital investido, o preço do agregado reciclado para venda chegou a valores de cerca de R\$ 6,70 por tonelada (Coelho; Chaves; Djanikian, 1998).

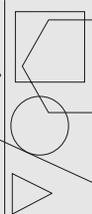
Por sua vez, Brito Filho (1999) indica que o custo de reciclagem do entulho em **São Paulo** varia entre R\$ 4,00 a R\$ 6,00 por tonelada, ou, aproximadamente, R\$ 5,20 a R\$ 7,80 por metro cúbico. Comparando-se esses valores com o preço dos agregados naturais na região de São Paulo (R\$ 20,00/m<sup>3</sup> segundo Brito Filho, 1999), o agregado reciclado apresenta uma economia de até 67%.

Segundo Pinto (1999), o custo de reciclagem do entulho é de R\$ 5,00 por tonelada, valor que inclui os gastos com manutenção e depreciação de equipamentos, provisão de água, energia, mão-de-obra, serviços de remoção, amortização dos investimentos, despesas administrativas, entre outros gastos. Vale ressaltar que o valor indicado é uma referência geral, baseada em valores praticados em cidades do interior paulista, podendo, portanto, ser alterado conforme peculiaridades locais.

Com base nessa referência, o Projeto Entulho Bom realizou uma estimativa preliminar do custo do agregado reciclado a ser produzido pela usina de reciclagem, na qual foram inclusos os gastos com a reciclagem, o transporte do material e os impostos. Essa estimativa indicou um valor de cerca de R\$ 10,00 por tonelada. Ao se comparar esse valor ao preço médio dos agregados naturais comercializados na região de **Salvador** (R\$ 20,00 por tonelada, segundo Pinto, 1999), nota-se uma economia de cerca de 50% com o uso de agregado reciclado, em relação ao agregado convencional.

O menor preço do agregado reciclado em relação ao agregado natural possibilita a redução dos custos e, conseqüentemente, a ampliação da oferta pública de infra-estrutura urbana e habitação popular, promovendo, portanto, benefícios sociais.

Assim, diante desses dados, a reciclagem de entulho no Brasil e, em especial, em Salvador, pode ser considerada uma atividade bastante atrativa. As condições do mercado da região tornam viável a reciclagem desse material, restando aos gestores urbanos induzir processos e incentivar os agentes ligados a esse tipo de atividade, para que o meio técnico adote o uso desse material alternativo, incorporando-o ao mercado da construção civil local. Neste sentido, torna-se fundamental uma análise econômica do mercado local sobre a viabilidade financeira da produção de agregados e materiais de construção a partir do entulho, incluindo a quantificação das vantagens para os diversos agentes envolvidos no processo (gerador do resíduo, responsável pela reciclagem, produtor de materiais de construção, usuário do produto, poder público), a identificação de oportunidades ou dificuldades de comercialização, entre outras análises que busquem fomentar a reciclagem do entulho.



## CONCLUSÃO

A caracterização do entulho e do agregado reciclado de Salvador constituiu uma etapa fundamental nos estudos para redução, reutilização e reciclagem, possibilitando identificar meios de maximizar a sua utilização para a produção de materiais de construção.

Entretanto, características como composição e quantidade produzida do entulho variam ao longo do tempo e estão condicionadas a parâmetros específicos da região geradora do resíduo. Sugere-se, portanto, a caracterização sistemática do entulho e do agregado reciclado, para avaliar a variação das propriedades e, assim, garantir a otimização do processo de reciclagem e a qualidade do agregado reciclado.

Através da caracterização do entulho de Salvador, foi possível verificar que a maior parte desse material é composta por restos de concreto, argamassa, cerâmicas e rochas (72%). Esses materiais, após passarem por um processo de britagem, produzem agregados com alto potencial de utilização em pavimentos e concretos. Além disso, parte significativa desse entulho é composta por solo e areia (22%), elementos cuja quantidade será ainda maior após a britagem. Algumas aplicações que podem valorizar a utilização desse material são: a produção de camadas de pavimentos, tijolos, blocos, argamassas e concreto não estrutural.

A caracterização do agregado reciclado, por sua vez, indicou que o agregado reciclado miúdo é um material predominantemente arenoso, com partículas finas não plásticas, enquanto que o agregado reciclado graúdo é constituído, principalmente, de pedregulhos não lamelares, com formas irregulares e textura mais áspera e porosa que o agregado graúdo convencional.

Além disso, uma das diferenças mais marcantes entre o agregado reciclado e o agregado convencional é a absorção de água. Tanto o agregado reciclado miúdo quanto o graúdo apresentaram

altos percentuais de absorção de água, quando comparados à faixa de absorção dos agregados convencionais. Assim, é recomendado o ajuste do teor de água na produção dos materiais, de modo a não alterar, de maneira significativa, as propriedades dos novos materiais de construção.

Os resultados de lixiviação e de solubilidade do agregado reciclado miúdo e gráudo se apresentaram dentro dos limites especificados por norma, o que indica a inexistência de riscos ambientais no uso do agregado reciclado. No entanto, apesar de o agregado reciclado ser classificado como inerte, deverão ser realizados ensaios complementares e sistemáticos, de modo a garantir o seu uso seguro em relação ao potencial de riscos à saúde e ao meio ambiente.

Com base nos resultados obtidos, o Projeto Entulho Bom desenvolveu linhas de pesquisas relativas ao uso do agregado reciclado em camadas de bases e sub-bases de pavimentos, em tijolos de solo estabilizado com cimento e em argamassas de revestimento, apresentadas, respectivamente, nos capítulos VI, VII e VIII deste livro.

## 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.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Annual book of ASTM Standards*: natural building stones, soil and rock. Philadelphia, 1980. part 19.

ANDRADE, J. B. L. *Determinação da composição gravimétrica, peso específico e teor de umidade dos resíduos sólidos produzidos na cidade de Manaus*. Manaus: Prefeitura Municipal, 1992.

BARRA, Marilda. *Estudio de la durabilidad del hormigón de arido reciclado en su aplicación como hormigón armado*. 1996. Tese (Doutorado) - Escola

Técnica Superior de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1996.

BRITO FILHO, Jerson A. Cidade versus entulho. In: SEMINÁRIO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo, 1999. p. 56.

CAPUTO, Homero P. *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1998. v.1.

CARNEIRO, Alex P. et al. Caracterização do entulho de Salvador visando a produção de agregado reciclado. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENTAC 2000 — Modernidade e Sustentabilidade, 7., 2000, Salvador. *Anais...* Salvador, 2000a.

CARNEIRO, Alex P. et al. Characterization of C&D waste and processed debris aiming the production of construction materials. In: CIB SYMPOSIUM ON CONSTRUCTION & ENVIRONMENT - theory into practice, 2000, São Paulo. *Anais...* São Paulo, 2000b.

CASAGRANDE, A. Classification and identification of soils. *Transactions ASCE*, v.1B, p. 901-930, 1998.

CASSA, José C.; VALOIS, João C.; CARNEIRO, Alex P. Aplicação de uma escória de ferro-cromo como agregado gráudo de concreto de alto desempenho. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 53., 1998, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, 1998.

CASTRO, M. C. A. A. *Avaliação da eficiência das operações unitárias de uma usina de reciclagem e compostagem na recuperação dos materiais recicláveis e na transformação da matéria orgânica em composto*. 1996. 113f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1996.

CASTRO, M. C. A. A. et al. Caracterização física e granulométrica dos entulhos gerados na construção civil na cidade de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., 1998, Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu, 1998. p.1667-1673.

COCHRAN, W. G. *Sampling techniques*. New York: J. Wiley, 1978.

COELHO, Paulino E., CHAVES, Arthur Pinto, DJANIKIAN, João Gaspar. Reciclagem de entulho de demolição para a preparação de concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGICA EXTRATIVA, 17., 1998, Águas de São Pedro. *Anais...* São Paulo, 1998.

COLLINS, R. J. *Increasing the use of recycled aggregates in construction, concrete for environment enhancement and protection*. London: [s. n.], 1996.

CONSTRUCTION and the environment: fact and figures. *Industry and Environment*, Paris, v.29, n.2, abr./jun. 1996. p.2-8.

EMPRESA DE LIMPEZA URBANA DO SALVADOR (LIMPURB). *Caracterização dos resíduos sólidos domiciliares da cidade de Salvador*: relatório final. Salvador, 1999.

GOMES, L.P. *Estudo da caracterização física e biodegradabilidade dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários*. 1989. 179f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

GROSSI, G. *Composição característica do lixo da Usina do Cajú — RJ*. Niterói: COMLURB, Centro de Informações sobre Resíduos Sólidos, UFF/ISER, 1993.

GRUPO ESPAÑOL DEL HORMIGON (GEHO). *Recomendaciones y manuales técnicos: demolición y reutilización de estructuras de hormigón*. Madri, 1997. 159p.

HENDRIKS, C. F. Application of aggregates out of construction: and demolition waste in road constructions and concrete. In: CIB WORLD BUILDING CONGRESS CONSTRUCTION AND ENVIRONMENT, 1998, Gäule Sweden. *Anais...* Gäule Sweden, 1998.

HONG KONG POLYTECHNIC. The Hong Kong Construction Association. *Reduction of construction waste: final report*. Hong Kong, 1993. 93p.

JOHN, V. M. *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*. 2000. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

LAURITZEN, E. K. Economic and environmental benefits of recycling waste from the construction and demolition of buildings. *Industry and Environment*, Paris, v. 17, n.2, abr./jun. 1994. p. 26-31.



- LEITE, Mônica Batista. *Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. 2001. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande Sul, Porto Alegre, 2001.
- LEVY, Salomon. *Reciclagem do entulho de construção civil para utilização como agregado de argamassas e concretos*. 1997. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- LIMA, Luciana Amaral de. *Hormigones com escórias de aceria de forno eléctrico como áridos: propriedades, durabilidad y comportamiento ambiental*. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 1999.
- NEVILLE, Adam M. *Propriedades do concreto*. 2.ed. rev. atual. São Paulo: Pini, 1997. 828p.
- PERA, Jean. Use of waste materials in construction in Western Europe. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Departamento de Engenharia Civil, PUC / USP, 1996.
- PINTO, T. P. De volta à questão do desperdício. *Construção*, São Paulo, n. 2491, p. 18-19, nov. 1995.
- PINTO, T. P. Entulho de construção: problema urbano que pode gerar soluções. *Construção*, São Paulo, n. 2325, p. 11-12, ago. 1992.
- 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*. São Paulo, 1999. 189 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.
- PINTO, T. P. *Perda de materiais em processos construtivos tradicionais*. São Carlos: USP, 1989.
- PINTO, T. P. Resultados da gestão diferenciada. *Techne*, São Paulo, n. 31. p. 31-34, nov./dez., 1997.

RÉUNION INTERNATIONALE DES LABORATORIES D'ESSAIS ET DE RECHERCHES SUR LES MATÉRIAUX ET LES CONSTRUCTIONS (RILEM). Technical Committee 121 — DRG. *Recommendation for concrete with recycled aggregates*. [s. l.]: [s. n.], 1994.

SOILBELMAN, L. *As perdas de materiais na construção de edificações: sua incidência e seu controle*. 1993. 127f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

SOUZA, U. B. L. et al. Perdas de materiais nos canteiros de obras: a quebra do mito. *Qualidade na Construção*, v.2, n.13, p. 10-15, 1998.

TEUTONICO, Jeanne Marie. *A laboratory manual for architectural conservators*. Roma: International Center for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property, 1988. 168p.

ZORDAN, Sérgio Eduardo. *A utilização do entulho como agregado na confecção do concreto*. 1997. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.



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

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

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

NBR 6467 - *Agregados*: determinação do inchamento de agregado miúdo: método de ensaio. 1987.

NBR 6502 - *Rochas e solos*: terminologia. 1995.

NBR 6508 - *Grãos de solo que passam na peneira 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 7216 - *Amostragem de agregados*: método de ensaio. 1987

NBR 7217 - *Agregado*: determinação da composição granulométrica: método de ensaio. 1987.



NBR 7219 - *Agregado*: determinação do teor de materiais pulverulentos: método de ensaio. 1987.

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

NBR 7220 - *Agregados*: determinação de impurezas orgânicas de naturezas húmicas em agregado miúdo: método de ensaio. 1987.

NBR 7809 - *Agregado gráúdo*: Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro: método de ensaio. 1983

NBR 9776 - *Agregados*: determinação da massa específica em agregado miúdo por meio do frasco de Chapman: método de ensaio. 1987.

NBR 9777 - *Agregados*: Determinação da absorção de água em agregados miúdos: método de ensaio. 1987.

NBR 9937 - *Agregados*: Determinação da absorção e da massa específica de agregado gráúdo: método de ensaio. 1987.

NBR 10004 - *Resíduos sólidos*: classificação. 1987.

NBR 10005 - *Lixiviação de resíduos*: procedimento. 1987.

NBR 10006 - *Solubilização de resíduos*: procedimento. 1987.

NBR 10007 - *Amostragem de resíduos*: procedimento. 1987.

<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*

Barbara Elizabete Correia Quadros - *Arquiteta, Técnica da ASPLA / LIMPURB*

Ana Maria Vieira de Oliveira - *Arquiteta, Técnica da ASPLA / LIMPURB*

Irineu Antônio Schadach de Brum - *Engenheiro de Minas, Msc, Doutorando em Metalurgia Extrativa - UFRGS, Professor DCTM/UFBA*

Tais Santos Sampaio - *Engenheira Civil, Pesquisadora do Projeto Entulho Bom*

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

Dayana Bastos Costa - *Estudante de Engenharia Civil - UFBA, Pesquisadora do Projeto Entulho Bom*