

33

RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda •

Prof. Dr. Sérgio Cirelli Angulo

33.1 Contextualização, e-2

33.2 Reciclagem de RCD Classe A, e-7

33.3 Especificações de Agregados Reciclados, e-12

33.4 Aplicações de Agregados Reciclados, e-12

33.5 Conclusões, e-17

33.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Estima-se que 10 bilhões de toneladas (Gt) de resíduos de construção e demolição (RCD) foram gerados mundialmente no ano de 2020 (Chen *et al.*, 2021). Mais da metade dessa geração está relacionada com China, Estados Unidos e Europa, seguidos de diversos países em desenvolvimento como Índia, Rússia, Brasil, entre outros. Essa quantidade corresponde a 9 % das matérias-primas extraídas mundialmente, ou cerca de 18 % de todas as matérias-primas usadas na construção (45 Gt) (Krausmann *et al.*, 2018), essencialmente agregados e materiais cimentícios usados para construir as cidades (obras de infraestrutura e edifícios).

No Brasil, a geração de RCD em 2020 foi estimada em 100 milhões de toneladas (Angulo; Oliveira; Machado, 2022), baseada no indicador *per capita* de 500 kg/hab.ano (indicador mediano obtido a partir de levantamentos feitos em cidades brasileiras) (Pinto, 1999; Pinto; González, 2005). De acordo com o levantamento da Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção (Anepac),¹ o consumo de agregados na construção civil brasileira nesses últimos anos está próximo a 600 milhões de toneladas (Mt) por ano, o que equivale a 16 % de todo o agregado consumido. Assim, os resíduos de construção representam uma pequena parcela da quantidade de agregados e materiais cimentícios no ambiente construído; ou seja, uma fonte de matéria-prima complementar às fontes de recursos naturais ou artificiais (areia de rio, rochas britadas).

O RCD representa de 54 a 70 % da massa dos resíduos sólidos urbanos. Na Tabela 33.1,

¹ Disponível em: <https://www.anepac.org.br/agregados/mercado>. Acesso em: 24 jan. 2024.

TABELA 33.1 Massa de RCD gerada em algumas cidades do estado de São Paulo (SindusCon, 2005)

Municípios – SP	Geração diária (t)	Participação em relação aos resíduos sólidos urbanos (%)
Campinas	1800	64
Diadema	458	57
Guarulhos	1308	50
Jundiaí	712	62
Piracicaba	620	67
Ribeirão Preto	1043	70
Santo André	1013	54
São José do Rio Preto	687	58
São José dos Campos	733	67
São Paulo	17.240	55

apresenta-se a estimativa da massa de RCD gerada em algumas cidades paulistas. Apesar da não periculosidade do resíduo (quando os da classe D são devidamente separados), a disposição em aterros, se não controlada, esgota essas áreas; por isso, a resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) proíbe o destino de RCD nos aterros sanitários que são equipamentos de custo público elevado.

O RCD, quando não gerido adequadamente, pode causar diversos problemas ambientais nas cidades, tais como proliferação de vetores como rato, mosquito (dengue) (Pinto; González, 2005; Sampaio; Kligerman; Ferreira Júnior, 2009; Barcellos; Sabroza, 2001), áreas de preservação como fundos de vale, manguezais (Fig. 33.1). A



FIGURA 33.1 Descarte irregular de RCD em área de preservação, mangue.

obstrução das galerias pluviais nas cidades é frequentemente associada aos resíduos (nos quais quase sempre o RCD está presente), causando alagamentos, enchentes, acidentes geotécnicos (em locais em que as disposições clandestinas são de grande porte, aterros clandestinos em áreas com população vulnerável). Os custos incluindo externalidades são da ordem de milhões de reais nas grandes cidades (Schneider, 2002).

A Resolução Conama nº 307, de 5 de julho de 2002 (Conama, 2002), define como resíduo de construção civil os resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos 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.

Neste capítulo será usado o termo técnico resíduo de construção e demolição (RCD), como sinônimo de resíduos de construção civil, por ser mais semelhante ao termo internacionalmente utilizado (*Construction and Demolition Waste – CDW*).

Esta resolução, aliada à Resolução nº 431, de 24 de maio de 2011 (Conama, 2004a), que altera o art. 3º, itens II e III da Resolução nº 307, e à Resolução nº 348, que altera o art. 3º, item IV, da mesma Resolução (Conama, 2004b), estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCD e os classifica da seguinte forma:

- **Classe A** (Fig. 33.2) – são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: de construção, demolição, reformas e reparos de



Resíduo de concreto estrutural.



Resíduos cimentícios.



Resíduo misto.



Resíduo de cerâmica vermelha.

FIGURA 33.2 Resíduos classe A: exemplos.

edificações, como componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimentos etc.), argamassa e concreto; de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem (usado como material de enchimento em aterro de inertes); de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras, fábricas de materiais de construção.

- **Classe B** (Fig. 33.3) – são os resíduos recicláveis para outras destinações (que não diretamente em obras de construção), como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras, gesso e outros; todos esses tipos devem ser separados entre si.
- **Classe C** – são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/



Resíduos de madeira.



Resíduos de gesso.

recuperação, como compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro, entre outros.

- **Classe D** – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, como tintas com solventes, óleos (solventes) e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

De acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004), o RCD pode ser designado por uma classificação diferente, mas não conflitante, como a proposta pelo Conama, que é a seguinte:

- **Classe I** (equivalente a RCD Classe D-Conama) – são os que apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, considerados resíduos perigosos.



Resíduos de metais (sucatas).



Resíduo perigoso (fibrocimento com fibra de amianto).

FIGURA 33.3 RCD classes B e D.

- **Classe II** – são os resíduos não perigosos, divididos nas subclasses IIA (não inertes) e IIB (inertes). Os resíduos classificados como Classe A e B pela Resolução CONAMA nº 307 seriam classificados como II A ou IIB pela NBR 10004:2004 (Lima; Cabral, 2013).

Alternativas para minimizar os problemas de despejo irregular e desperdício de matéria-prima são a redução da geração de resíduos e a reutilização ou reciclagem de parte do resíduo dentro da própria obra (SindusCon, 2015). Por exemplo, resíduos classe A, se não forem contaminados na obra, podem virar agregado novamente, principalmente para uso não estrutural (Leite, 2007), ou em usinas de reciclagem. Somente o resíduo classe A já corresponde à maior parte da massa do RCD. Os resíduos classe B, se bem triados, podem ser levados para áreas de reciclagem e vendidos. Os resíduos classes C e D devem ser excluídos, se possível, desde a fases de projeto, evitando-se o uso destes materiais.

No Brasil, a composição típica do RCD e do agregado reciclado é mista, havendo, de forma majoritária (~90 % da massa), mistura entre diversos tipos de materiais cimentícios (concretos, argamassas) e cerâmicos (alvenaria de cerâmica vermelha, em maior ou menor concentração, dependendo da região). Tipicamente, o teor de cerâmica vermelha é 20 %, mas pode chegar a quase 100 % em alguns lotes de resíduos (por exemplo, aqueles pontuais vindos da própria fabricação da cerâmica vermelha). O restante seria os materiais classe B, como madeira, embalagens plásticas, metálicas, sobras de aço etc.

Assim, é fundamental focar em aplicações nas quais os agregados reciclados mistos (Fig. 33.4)

possuem bom desempenho técnico, e investir em procedimentos eficientes de triagem, para viabilizar o atendimento às especificações normativas dos agregados reciclados (que exigem menos de 3 % de impurezas na composição do material).

O gesso não é admitido nos agregados reciclados e nas aplicações destes em camadas de pavimentos e em materiais cimentícios. O gesso é solúvel em água e não deve ser aterrado, porque apresenta maior potencial de alterar os padrões de potabilidade da água ou de pureza de solos (Jang; Townsend, 2001). Não deve também ser misturado com resíduos orgânicos em aterros sanitários (Montero *et al.*, 2010). Ou seja, deve se triado e reciclado como adição ao clínquer (cimento Portland), quando requerido, e convertido em gesso novamente (quanto tratado termicamente a 180 graus) (Pinheiro, 2011). Outra opção é fazer a substituição parcial do gesso natural por resíduo de gesso moído ou britado para a execução de revestimentos de paredes.

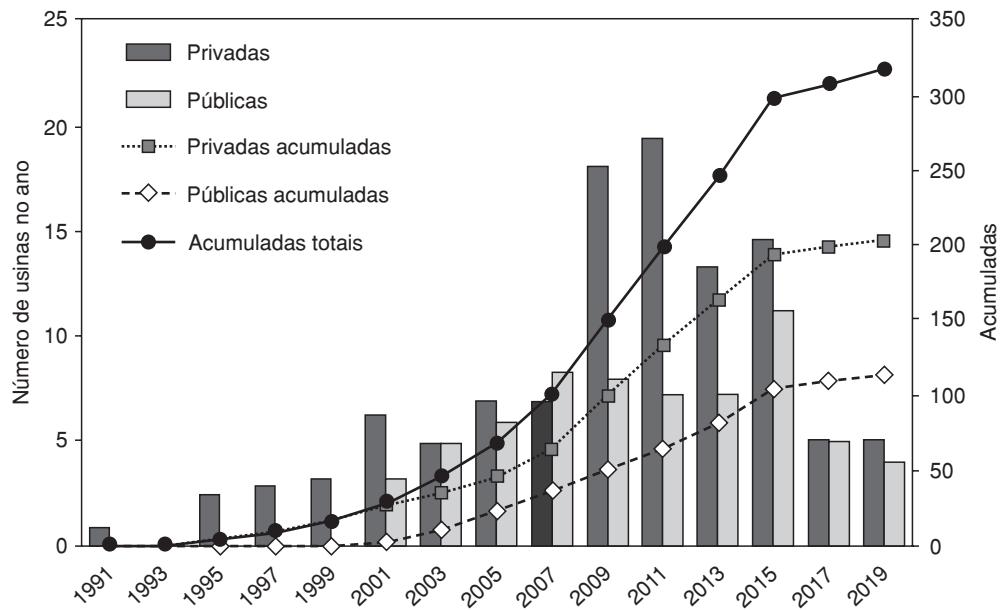
De acordo com as pesquisas setoriais feitas pela Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição (Abrecon), incluindo a mais recente (Angulo; Oliveira; Machado, 2022), mais de 300 usinas de reciclagem já foram instaladas no país (Fig. 33.5), sendo que, atualmente, a maioria é privada e situada nas regiões Sul e Sudeste. Mas, independentemente disso, se fazem presentes em todas as regiões brasileiras (Fig. 33.6). Na época da implantação da Resolução nº 307, a maioria era pública. A pesquisa indica várias características importantes das usinas do país, como quantidade de RCD reciclado e preço praticado, equipamentos normalmente usados para a reciclagem, existência ou não de controle de qualidade sistêmico, principais dificuldades etc.

A reutilização e a reciclagem dos resíduos de construção, além de tornar as obras mais sustentáveis, pode resultar em uma redução dos custos, quando minimiza a distância de transporte no fornecimento dos agregados. Durante a construção da Vila dos Atletas, nas Olimpíadas de 2016, no Rio de Janeiro, foi possível economizar mais de R\$ 500.000,00 reciclando-se apenas o entulho de concreto gerado na obra, utilizando-se um britador móvel alugado.

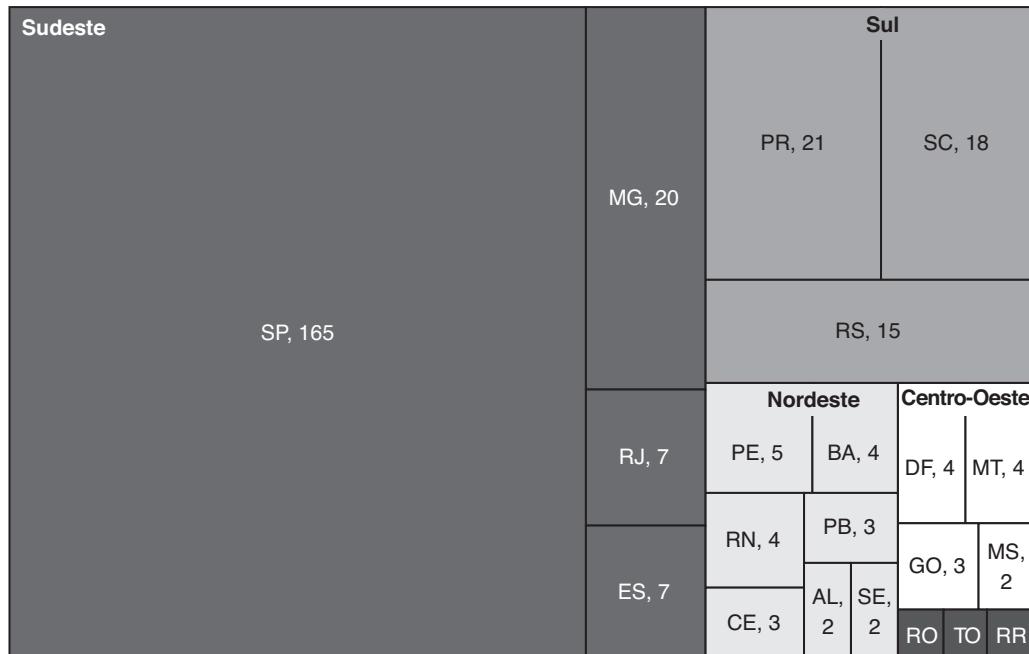
As estimativas mundiais apontaram que 30 % dos resíduos (que inclui os de construção) foram reciclados em 2015 (Haas *et al.*, 2015); mas, quando se considera o que efetivamente se utiliza de recursos naturais, esse potencial de circularidade cai para apenas 6 %, porque parte dos recursos naturais são usados como combustíveis fósseis para queima e acabam gerando gases do efeito estufa e mudança climática.



FIGURA 33.4 Agregado reciclado graúdo misto (contém materiais cimentícios e de cerâmica vermelha).

**FIGURA 33.5** Evolução da quantidade de usinas e perfil (pública ou privada).

Fonte: Pesquisa Setorial ABRECON 2020 (Angulo; Oliveira; Machado, 2022).

**FIGURA 33.6** Quantidade de usinas de reciclagem de RCD em função dos estados.

Fonte: Pesquisa Setorial ABRECON 2020 (Angulo; Oliveira; Machado, 2022).

No Brasil, 15 a 20 % dos resíduos de construção são reciclados de acordo com a mais recente pesquisa setorial da Abrecon (Angulo; Oliveira; Machado, 2022) (Fig. 33.7), um pouco inferior à média mundial encontrada. Os mercados mais consolidados para os agregados reciclados estão nas regiões Sul e Sudeste, focando o uso do material

em camadas de sub-bases e bases de pavimentos, elementos pré-fabricados de concreto, assentamento de tubos, valas, argamassa (Fig. 33.8). Com a capacidade instalada no país e maior desenvolvimento de mercado para os produtos reciclados, os índices de reciclagem podem chegar a 50 % do total de RCD gerado.

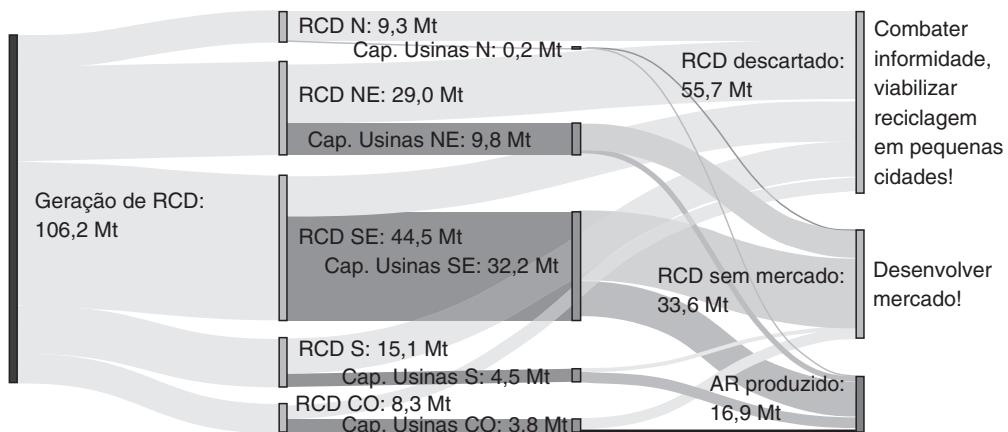


FIGURA 33.7 Geração do RCD e de agregados reciclados no Brasil.

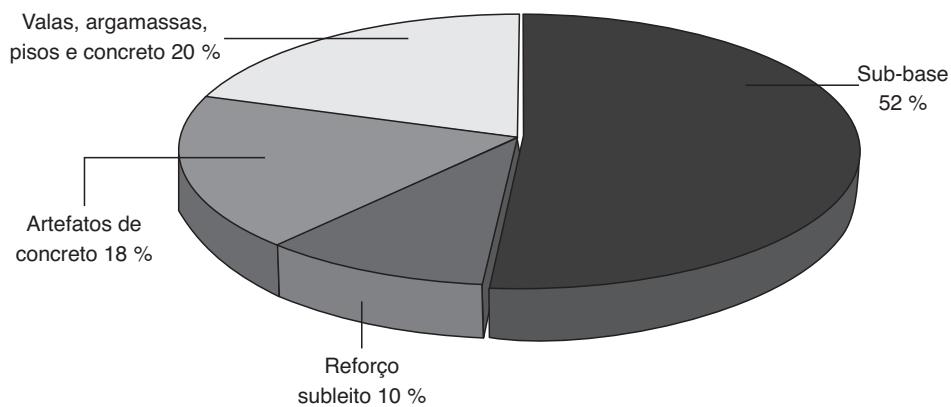


FIGURA 33.8 Mercado dos agregados reciclados no Brasil.

Fonte: pesquisa setorial ABRECON 2020 (Angulo; Oliveira; Machado, 2022).

A reciclagem do resíduo de construção no Brasil passa por dificuldades na comercialização de agregados e desenvolvimento de produtos, além da dificuldade de implementar um sistema de triagem eficiente no canteiro, pois o projeto de gerenciamento de resíduos, quando eficiente, melhora condições de gestão do setor privado, mas a parcela informal da construção é muito representativa, quase 50 % do mercado, em que há menor disseminação ou cobrança de ações voltadas a sustentabilidade.

33.2 RECICLAGEM DE RCD CLASSE A

A reciclagem do RCD evoluiu muito no Brasil a partir de 2002, após a publicação da Resolução Conama nº 307 (Angulo; Oliveira; Machado, 2022). Além de apresentar diretrizes de atuação dos grandes e pequenos geradores, ela serviu como incentivadora para que o setor privado tivesse interesse em investir na instalação de usinas, o que comprova a grande importância do setor público para o crescimento do setor.

A reciclagem do RCD é constituída por diversas classes de materiais (Miranda, 2020). A classe A é a mais importante em massa e o foco principal da reciclagem em canteiros e usinas.

A área necessária, a infraestrutura, a quantidade de equipamentos, produtividade e tipos são bem diferentes quando o objetivo é reciclar o resíduo classe A em uma usina ou no canteiro de obras (SindusCon, 2015). A seguir, são apresentados os equipamentos mais comumente encontrados em uma usina de reciclagem de RCD classe A.

Outros equipamentos a úmido de mineração podem ser empregados para reduzir a variabilidade ou melhorar as características dos agregados reciclados, apesar de não serem comuns nas usinas brasileiras.

33.2.1 Alimentador Vibratório

O alimentador vibratório (Fig. 33.9) é, normalmente, o primeiro equipamento no processo de reciclagem de RCD (Miranda, 2020; Angulo *et al.*,



FIGURA 33.9 Alimentador vibratório (à esquerda) e escalpe (à direita).

2009; Chaves; Peres, 2012). É ele quem recebe o RCD, trazido pela pá carregadeira, retroescavadeira ou escavadeira, e lança dentro do britador em uma vazão controlada pelo operador ou automaticamente, dentro dos limites de dimensionamento da máquina.

O alimentador é composto, principalmente, de uma mesa vibratória apoiada sobre molas, grelha, tremoinha e, sobre tremoinha, motor elétrico e um eixo excêntrico duplo.

A grelha do alimentador separa a fração fina de RCD antes que esta atinja o britador, reduzindo seu desgaste. A dimensão dessa fração pode ser regulada abrindo ou fechando o espaçamento entre as barras da grelha, definida em função do material que se pretende produzir.

A fração fina (Fig. 33.10) é geralmente rica em solos de escavação (Kataguiri, 2017; 2019), podendo apresentar comportamento expansivo e não compatível com aplicações em camadas de pavimentos, ou obras geotécnicas. Solos orgânicos podem ser aproveitados, caso as primeiras camadas do solo sejam extraídas com controle nas obras, e podem ser um mercado de maior valor no reúso de materiais (SindusCon, 2015).

33.2.2 Equipamentos de Transporte

Os sistemas de transporte também são equipamentos sempre presentes nas usinas de reciclagem de RCD. Podem ser encontrados nas usinas, de acordo com a necessidade e o porte, transportadores de correia



FIGURA 33.10 Solos de escavação com RCD (denominados finos “naturais”), obtidos pelo escalpe no processo de reciclagem do RCD.

(Fig. 33.11), elevadores de canecas ou de rosca, sendo o primeiro tipo o mais comum.

Quando se necessita vencer grandes alturas em pequenos espaços, pode-se também optar por transportadores inclinados de rosca ou de canecas, dependendo da granulometria.

33.2.3 Separadores Magnéticos

Os separadores magnéticos (Fig. 33.12) são equipamentos colocados no processo de reciclagem, normalmente acima do transportador de correia, após o



FIGURA 33.11 Transportadores de correia.

RCD passar pelo britador, com o intuito de remover os metais ferrosos presentes (com a exceção de algumas ligas metálicas) (Miranda, 2020; Angulo *et al.*, 2009; Wills; Napier-Munn, 2006).

São de grande importância no processo quando o RCD não passa por uma triagem prévia e, mais ainda, quando são utilizados moinhos de martelo, pois podem danificar as grelhas do moinho e, até mesmo, causar seu travamento, resultando em paradas constantes e indesejáveis no processo.

Os tipos mais utilizados são os separadores magnéticos suspensos, de magnetismo permanente (sem uso de energia elétrica, ímã), de limpeza automática ou manual (Fig. 33.12) dependendo do grau de contaminação do RCD. O magnetismo pode ser proveniente de ímãs permanentes de ferrita de estrôncio anisotrópico ou outro material com propriedades magnéticas.

33.2.4 Britadores

O conjunto de operações com o intuito de reduzir o tamanho das partículas minerais, executado de maneira controlada e de modo a cumprir um objetivo pré-determinado, chama-se cominuição. O processo de cominuição inclui britagem e moagem das partículas (Chaves; Peres, 2012; Metso Minerals, 2015).

A britagem de RCD é, em geral, o processo seguinte à triagem e à alimentação e é realizada normalmente com britadores de impacto ou de mandíbula (Fig. 33.13). Cada um desses equipamentos possui princípios de funcionamento diferentes e produzem materiais com diferentes características.

O modo de operação está descrito a seguir:

- o material é triturado por compressão;
- o material torna-se progressivamente menor, gerando-se pedaços suficientemente pequenos para cair pelo fundo da máquina;
- o tamanho final dos fragmentos dependerá do ajuste do britador e da adequação dos dentes selecionados para as mandíbulas.

O britador de mandíbula apresenta as seguintes vantagens:

- alta eficiência mecânica (95 % da potência do motor é utilizada para trituração e 5 % para movimentação da mandíbula);
- menores custos;
- alta capacidade e confiabilidade operacional;
- longo tempo operacional e durabilidade;
- ampla variedade de aplicações;
- fácil reposição das partes desgastadas;
- poucos requerimentos de manutenção.



FIGURA 33.12 Separadores magnéticos suspensos e permanentes, de limpeza manual (à esquerda) e automática (à direita).



FIGURA 33.13 Britador de mandíbula. Composto por duas mandíbulas: uma fixa e outra móvel (oscilante). A mandíbula possui ranhuras que se desgastam com o uso.

O britador de mandíbulas possui capacidades de produção de até 1000 t/h e é recomendado quando se deseja uma granulometria mais grossa (com menor quantidade de areia reciclada) e pouca quantidade de finos (abaixo de 0,1 mm) (Metso Minerals, 2015). Não possui restrições quanto às características mecânicas das rochas e materiais abrasivos (tem baixo custo operacional para minerais à base de sílica). Materiais úmidos com alto teor de argila aumentam o desgaste (Luz; Sampaio; França, 2010).

As mandíbulas desse britador são feitas com o material de desgaste em aço contendo de 12 a 14 % de Mn, o que torna o aço austenítico (o impacto localizado encrava a estrutura austenítica, tornando-a muito dura).

O britador de mandíbulas tende a fornecer distribuições granulométricas bem definidas, independentemente do material que está sendo britado, para um dado tamanho do britador (que limita a dimensão do material na alimentação) e abertura de descarga. A granulometria de saída e a produtividade sofrem influência da abertura do britador, que por sua vez pode ser regulada.

O britador de mandíbulas pode apresentar os seguintes problemas: empastamento, entupimento

(quando blocos maiores que o tamanho máximo admitido pelo britador entram nele), atolamento/afogamento (as partículas podem se arranjar dentro do britador impedindo a passagem).

Os britadores de impacto também têm sido utilizados para reciclagem de RCD. Podem ser encontrados no mercado com eixo vertical ou horizontal. Nesse equipamento, as partículas são alimentadas ao britador e atingidas pelo impacto do rotor. Então, são lançadas contra o revestimento, em que sofrem fraturamento adicional. Em geral, as partículas recebem de uma a duas pancadas e tendem a atravessar o equipamento rapidamente. O efeito do impacto é desprezível para partículas menores que 0,15 mm. Dentro de certas limitações mecânicas, aumentando a velocidade do rotor, diminui a granulometria de saída (Chaves; Peres, 2012; Metso Minerals, 2015).

Como características desse equipamento, podem ser citadas: elevada produtividade, distribuição granulométrica mais fina que a do britador de mandíbulas, efetivo para materiais com tendência a produzir partículas lamelares (gera formas mais cúbicas) e, para materiais úmidos com alto teor de argila, elevado custo de manutenção e grande desgaste (Luz; Sampaio; França, 2010). Em obras, o uso de britador de impacto pode resultar na obtenção exclusiva de areia reciclada, o que pode ser interessante para aplicação em argamassa e reciclagem dentro da obra (SindusCon, 2015).

Alguns dados de britadores de eixo horizontal: britagem primária, secundária e terciária de materiais brandos e friáveis, redução 40:1, capacidade de até 2500 t/h, produto bem classificado e com um mínimo de materiais pulverulentos, potência de até 450 kW.

Como pode ser observado, tanto o britador de mandíbula quanto o de impacto pode ser utilizado para a reciclagem de RCD, como já ocorre em diversas usinas do país. Cada um tem suas vantagens e desvantagens e, por isso, a definição de qual é o equipamento ideal deve ser feita analisando caso a caso através, principalmente, de um estudo de mercado.

33.2.5 Peneiras Vibratórias

O peneiramento é o processo pelo qual se faz a separação do material reciclado na usina em frações granulométricas controladas. Esse processo em campo é feito normalmente através do uso de peneiras vibratórias (Fig. 33.14). Esse equipamento é composto de chassi robusto apoiado em molas, mecanismo acionador, com 1 a 4 *decks* (suportes de telas) que normalmente são inclinados (15 a 35°) (Chaves; Peres, 2012).



FIGURA 33.14 Peneira vibratória inclinada.

33.2.6 Outros Equipamentos

Existe a alternativa de se utilizar um processo a úmido de reciclagem que pode proporcionar maior qualidade de agregados reciclados de RCD pela remoção do excesso de material pulverulento proveniente da reciclagem (o que, para alguns usos, é indesejável) e dos contaminantes presentes na fração miúda como gesso, sais solúveis e matéria orgânica (Miranda, 2020; Angulo *et al.*, 2009). Para isso, pode ser utilizado um sistema de lavagem sobre uma peneira vibratória ou equipamentos específicos para essa finalidade, como o lavador de rosca, o classificador espiral e o ciclone.

Processos a úmido, apesar de serem já consagrados na área de tratamento de minérios, ainda são pouco abordados em pesquisas como alternativa para a melhoria da qualidade de agregados reciclados.

Uma desvantagem de qualquer processo de lavagem é o aumento do custo da reciclagem, não somente pelo consumo de água, mas também porque esse processo gera um resíduo (fração pulverulenta) que, se não for utilizado e nem tiver valor comercial, envolverá custos para remoção.

Existe ainda a possibilidade de se utilizarem pilhas de homogeneização, semelhantes às utilizadas na produção de cimentos e minérios, em agregados reciclados, para diminuir a variabilidade natural do produto ao longo do processo.

Na área de reciclagem de RCD, a necessidade de se ter processos de redução da variabilidade é ainda maior por conta da heterogeneidade do RCD. Entretanto, os equipamentos atualmente aplicados na área de mineração dificilmente poderiam ser adotados em uma usina de reciclagem em razão dos custos operacionais e de investimento inicial.

O homogeneizador da Figura 33.15, de escala piloto, através de seu movimento radial, espalha o agregado reciclado em camadas horizontais sobrepostas, garantindo-se assim que porções verticais retiradas dessas pilhas tenham composições aproximadamente iguais. Apesar de ele ter sido testado para areia, certamente mostrará bons resultados também para pedrisco e brita. Atualmente já existe transportador de correia com movimento radial, que homogeneiza o agregado reciclado.

Quanto maior a altura de descarga do material pelo homogeneizador, maior será o tamanho da pilha e, assim, melhor o processo de homogeneização.

Outra técnica que pode auxiliar na redução da variabilidade dos agregados é a classificação visual do RCD pela natureza (resíduo cinza, com mais



FIGURA 33.15 Homogeneizador de agregados reciclados (processo piloto) (à esquerda). Transportador de correia telescópico (à direita).

produtos cimentícios, e vermelho, com mais cerâmica vermelha e solo), que, aliás, já é uma prática comum nas usinas brasileiras (Angulo, 2005), mas que sozinha não é suficiente para se ter um agregado reciclado homogêneo.

Para a reciclagem em canteiros de obras residenciais, costumam ser utilizados equipamentos de menor porte, como os moinhos de martelo (Fig. 33.16) (SindusCon, 2015), que podem ser engatados em reboque de um carro simples, capaz de reciclar o resíduo classe A de diversos canteiros.

Existem também equipamentos móveis de grande porte que são usados para reciclar o resíduo classe A, por exemplo o da Figura 33.17. Essas usinas móveis podem ser importadas ou nacionais, montadas sobre rodas ou sobre esteiras, equipadas com britador de impacto ou de mandíbula, com a presença ou não de ventiladores para facilitar a remoção de contaminantes leves de diferentes naturezas e dimensões. Equipamentos móveis podem ser uma boa alternativa para viabilizar a reciclagem do resíduo de construção classe A gerado em pequenos municípios, por exemplo através da formação de consórcios intermunicipais.

33.3 ESPECIFICAÇÕES DE AGREGADOS RECICLADOS

A NBR 15116/21 (ABNT, 2021) define três tipos de agregados reciclados: cerâmico, cimentício e de concreto. Para cada tipo de uso e de agregado reciclado, diferentes especificações físicas e químicas devem ser adotadas para os agregados reciclados, implicando diferentes propriedades com necessidade de controle, cujos limites de aceitação estão definidos nas normas NBR 15115/04 e NBR 15116/21.



FIGURA 33.16 Moinho de martelo usado em uma obra.



FIGURA 33.17 Usina móvel de britagem.

A Tabela 33.2 apresenta as principais propriedades físicas dos agregados reciclados e suas faixas de variação (aproximadas, os resultados de algumas amostras podem extrapolar os limites apresentados), permitindo um comparativo com os agregados naturais (areia de rio e brita granítica).

Pela Tabela 33.2, é possível observar que as propriedades que melhor diferenciam os agregados naturais dos reciclados são a absorção de água e o teor de finos < 0,075 mm.

Como o teor de finos < 0,075 mm varia, e também como o método de britagem e a absorção de água é função dos materiais presentes e da porosidade intrínseca, a absorção de água é uma excelente propriedade para classificar a qualidade do agregado reciclado, como já feito pela norma DIN 4226/2002 (DIN, 2002).

Já os teores de contaminantes máximos aceitáveis, como teor de sulfatos, cloretos e impurezas (< 3 %, para uso em base de pavimento, < 1 %, para uso em materiais cimentícios), são definidos nas normas em função da aplicação.

33.4 APlicações de Agregados Reciclados

33.4.1 Na Pavimentação

O uso de agregado reciclado como subleito ou sub-base de pavimentos (Fig. 33.18) é a aplicação mais comum no mundo, pela facilidade de atendimento aos requisitos técnicos (tendo sempre cuidado com a presença de impurezas) e pelo volume consumido de agregados na execução desses serviços.

TABELA 33.2 Principais propriedades físicas dos agregados

Propriedade	Agregado reciclado cerâmico	Agregado reciclado de concreto	Agregado natural
Absorção de água	De 5 a 10 %	De 1 a 4 %	De 0 a 1 %
Massa específica (kg/m ³)	~2650	~2650	~2650
Massa unitária (kg/m ³)	~1000 a 1200	~1200 a 1300	~1300 a 1450
Índice de forma	Entre 2 e 3	Entre 2 e 3	Entre 2 e 3
Granulometria	Variável	Variável	Variável
Teor de finos < 0,075 mm (%)	>11	5 a 10	<5

Na execução de bases de pavimentação, como o valor mínimo de CBR é mais alto (no caso da norma brasileira, o valor mínimo é de 60 %), recomenda-se que algum cuidado seja tomado para garantir que este valor mínimo seja atendido, como a mistura de uma determinada porcentagem de agregado reciclado de concreto ou natural, ou o controle granulométrico seguindo as curvas especificadas pela NBR. Seguindo-se distribuições granulométricas que resultam em um material com menor índice de vazios, é possível obter maiores resultados de CBR. Essas duas alternativas podem ser facilmente realizadas em usinas de reciclagem, por exemplo, alternando a natureza do resíduo de construção que é lançado no alimentador e, para a segunda alternativa, caso a usina produza agregados reciclados peneirados, alternar a quantidade de cada tamanho de agregado reciclado (areia, pedrisco, brita e

rachão), que é lançada dentro do caminhão ou usar uma usina com silo.

Na Tabela 33.3, apresentam-se as propriedades que os agregados reciclados devem atender para serem usados em camadas de pavimentação.

Entre as propriedades apresentadas na Tabela 33.3, aquela que requer mais cuidado para o correto atendimento, além dos limites de teores de contaminantes, é o CBR das bases (Tab. 33.4). As demais propriedades costumam ser facilmente alcançadas mesmo com o uso de agregados reciclados mistos que, normalmente, existem em maior quantidade. Ressalta-se que, muitas vezes, a curva granulométrica, que pode influenciar diretamente a presença de vazios e, portanto, os resultados de CBR, é mais bem distribuída quando os resíduos mistos são britados em britadores de mandíbula ou quando os resíduos de concreto são britados em britadores de impacto.

TABELA 33.3 Especificação dos agregados reciclados para uso em camadas de pavimentação, conforme a NBR 15115:2004 (ABNT, 2004)

Propriedade	Parâmetros		Normas de ensaios
Composição granulométrica	Não uniforme, curva granulométrica contínua e bem graduada		NBR 7181:2018
	Coeficiente de curvatura (Cc)	1 a 3	
	Coeficiente de “não” uniformidade (Cu)	> 10	
Grãos de forma lamelar	< 30 % (agregado graúdo)		NBR 6954:1989, substituída por NBR 5564:2021
Dimensão máxima característica	≤ 63 mm		
Teor de material passante na peneira de 0,42 mm	10 a 40 %		NBR 7181:2018
Contaminantes (%)	Materiais não minerais de mesmas características	até 2 %	
	Materiais não minerais de características distintas	até 3 %	

TABELA 33.4 Requisitos técnicos do produto: reforço de subleito, sub-bases e bases granulares com agregados de RCD, conforme a NBR 15115:2004 (ABNT, 2004)

Aplicação	Índice de Suporte Califórnia (CBR) NBR 9895 (ABNT, 2017)	Expansibilidade	Energia de Compactação – NBR 7182 (ABNT, 2020)
Reforço de subleito	$\geq 12\%$	$\leq 1,0\%$	Normal
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1,0\%$	Intermediária
Base	$\geq 60\%$	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada



FIGURA 33.18 Execução de sub-base com agregado de RCD misto.

No entanto, para o emprego de agregados reciclados originados de cerâmica vermelha, os ensaios da metodologia tradicional não permitem caracterizar adequadamente o material, por conta da quebra das partículas mediante o processo de compactação. Tal fenômeno foi estudado por Dias (2004), constatando que o agregado apresentava quebra, alterava a distribuição granulométrica, aumentava o teor de finos e mudava o comportamento do material.

Os resíduos da fabricação de telhas cerâmicas foram estudados por Dias (2004), concluindo também que, dentre os ensaios denominados “qualidade”, o

ensaio de desgaste após fervura se revelou de grande importância, pois permite identificar se o material foi suficientemente calcinado, o que lhe confere estabilidade química, não reidratando frente às variações de umidade. Outro ensaio de significativa importância foi a determinação do índice de degradação após o Proctor, por indicar se o material se quebra ao ser compactado.

33.4.2 Em Argamassas

O uso de areia reciclada para a produção de argamassas de assentamento, revestimento de paredes

ou contrapisos tem vantagens como: não ter função estrutural, poder consumir todo o resíduo classe A produzido em obra (considerando que a estimativa de consumo de argamassas em uma obra é de $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construído e que cerca de 50 a 55 % do resíduo gerado é classe A), poder reduzir o custo com o agregado natural (pois a areia reciclada é mais barata) e com o consumo de cal (pois a areia reciclada possui maior teor de finos $< 0,075 \text{ mm}$, o que auxilia na obtenção de plasticidade).

Para essa aplicação da areia reciclada, é importante que seja feita uma dosagem racional das argamassas (Miranda, 2005; 2020), garantindo, pelo menos, o atendimento às propriedades no estado fresco e endurecido, por exemplo consistência, plasticidade, retenção de água, resistência mecânica, aderência ao substrato, fissuração.

É recomendado que as argamassas de assentamento de blocos e de revestimento de alvenarias com areia reciclada sejam dosadas com um teor de cimento igual ou superior a 170 kg/m^3 e tenham um teor total de finos $< 0,075 \text{ mm}$, em torno de 23 % (considerando aqui o total de finos presentes na argamassa, sejam eles provenientes do aglomerante, plastificante ou do agregado). No caso de argamassas para contrapiso, o consumo de cimento por m^3 é normalmente em torno de 330 kg/m^3 e o teor total de finos $< 0,075 \text{ mm}$ pode chegar a 27 %.

Considerando que as argamassas com areia reciclada possuem uma relação água/cimento total em torno de 3,0, bem maior que as argamassas com areia natural (esse aumento da relação a/c pode ser causado pela maior absorção de água dos agregados reciclados, maior área superficial e maior lamelaridade), o controle do teor total de finos $< 0,075 \text{ mm}$ é fundamental para a redução da fissuração.

33.4.3 Em Concretos

Para uso em argamassa e concreto não estrutural, são aceitos os três tipos de agregados reciclados (agregado reciclado de concreto [ARCO], agregado reciclado cimentício [ARCI] e o agregado reciclado misto [ARM]), os quais podem substituir até 100 % de um tipo de agregado natural por tipo equivalente de agregado reciclado (Leite, 2007; Angulo, 2005; ABNT, 2021; Brito; Saikia, 2013). Para uso no concreto estrutural, a absorção de água do ARCO não deve ultrapassar 7 %. Não é admitida a presença de cerâmica vermelha. Impurezas podem existir, mas são bem incomuns, uma vez que o resíduo deve ser de fonte totalmente conhecida (ou seja, concreto puro). Detalhes das especificações podem ser obtidos na NBR 15116: 2021 (ABNT, 2021) (Tab. 33.5).

TABELA 33.5 Recomendações quanto ao teor limite de cerâmica vermelha nos tipos de agregados reciclados (ABNT, 2021), e a adoção das faixas granulométricas de referência da NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

Ensaios^a		Limite %	Método de ensaio
Materiais indesejáveis ^b (G_4)	Teor	< 1	Anexos A e B
Argila em torrões	Teor	< 3	NBR 7218: 2010
Sulfatos	Teor	< 0,1	NBR 9917: 2009
Absorção de água	Classe ARCO	< 7	NBR 16917:2021 (graúdo)
	Classe ARCI ou ARM	< 12	NBR 16916: 2021
Finos ($< 0,075 \text{ mm}$)	Teor para concretos protegidos de desgaste superficial	< 12	NBR NM 46: 2003 (cancelada), substituída pela NBR 16973: 2021
	Teor para concretos submetidos a desgaste superficial	< 10	

^a Por exigência do consumidor, pode ser necessária a verificação da reação álcali-agregado, de acordo com a ABNT NBR 15577-1 (Leite, 2007). A mesma exigência pode ser aplicada a outras propriedades do agregado reciclado, como massa unitária, massa específica, ciclagem etc.

^b São considerados materiais indesejáveis os fragmentos de natureza orgânica, como madeiras, plástico, betume, materiais carbonizados e de natureza inorgânica, como vidros, vidrados cerâmicos e gesso. Os Anexos A e B estabelecem os métodos para determinação desses materiais.

Impurezas – materiais indesejáveis (como: fragmentos de madeira, plásticos, concreto asfáltico etc.) – não podem superar a 1 %, regra alinhada ao limite de diversas recomendações e normas estrangeiras do uso do agregado reciclado no concreto (Gonçalves; Brito, 2010).

Atenção especial deve ser dada à presença de gesso no resíduo. A fração de gesso presente no agregado reciclado se solubiliza, disponibilizando íon sulfato nos poros do material cimentício (Aguiar, 2004). Isso altera o equilíbrio do material, formando etringita, um composto expansivo que contém grande volume de água combinada na composição. Como não há espaço para se expandir, o material cimentício acaba absorvendo tensões de tração, que ocasionam a fissuração generalizada do material cimentício.

A presença de partículas de coloração branca, solúveis em água (que se decompõem por lavagem em água corrente), é indício forte de presença de gesso.

Da mesma forma, a presença de cerâmica branca (de louças sanitárias, com brilho, vidrado na superfície, por exemplo), incluindo azulejos e pisos cerâmicos nesta condição, é fonte de sílica amorfa. Pode desenvolver reação com os álcalis presentes no cimento, especialmente quando exposta a ambientes úmidos. Agregados reciclados podem apresentar reatividade álcali-sílica, gerando problemas sérios quando usados sem o devido controle na obra.

A norma não estabelece requisitos mínimos específicos relacionados à composição, apenas recomendações conforme Tabela 33.6, com relação ao teor de cerâmica vermelha presente no agregado reciclado; 0, 10 e 40 % de cerâmica vermelha na composição para os diferentes tipos de agregados

reciclados, respectivamente. Esse parâmetro é apenas um indicativo, que não impede a comercialização do agregado reciclado caso esteja ligeiramente fora de especificação.

Esse indicativo foi construído considerando que tal mudança da composição do agregado reciclado (aumento do teor de cerâmica vermelha no agregado reciclado) afeta diretamente um dos parâmetros principais da qualidade do agregado reciclado, a absorção de água (relacionada à sua porosidade). Assim, geralmente, quando os teores ultrapassam esses limites fica difícil atender aos limites máximos estabelecidos para a absorção de água – de 7 % para o ARCO e 12 % para o ARCI ou ARM.

De maneira similar, não existe a obrigação de seguir necessariamente as faixas granulométricas estabelecidas para se confeccionar um concreto. Essas são indicativos técnicos, baseados nas práticas usuais de comercialização de agregados, faixas que auxiliam na obtenção de produtos cimentícios convencionais, com baixo consumo de água e de cimento. Uma vez que são indicativos antigos, não foram desenvolvidos considerando a existência de aditivos dispersantes (plastificantes e superplastificantes), que conseguem contornar parte dessas limitações.

Assim, não há necessidade de restrição, deixando-se para fabricantes de agregados e materiais de construção a liberdade de desenvolverem produtos mais competitivos, mesmo que usando agregados fora das especificações tradicionais. Existe o mesmo entendimento hoje nas normas de agregados naturais e artificiais, obtidos por britagem de rochas, como a areia de britagem.

Obviamente, a mudança do tipo do agregado reciclado vai implicar a produção de mais ou menos finos

TABELA 33.6 Requisitos mínimos para uso dos agregados reciclados em concretos. NBR 15116:2021 (ABNT, 2021). Integra valores limites da NBR 7211:2009 (ABNT, 2009)

Ensaios		Limite sugerido	Método de ensaio
Teor de cerâmica vermelha ou branca não polida (G_3)	Classe ARCO	0 %	Anexos A e B
	Classe ARCI	< 10 %	
	Classe ARM	< 40 %	
Granulometria	Agregado graúdo	4,75/12,5 mm	NBR NM 248:2003
		9,5/25 mm	
		19/31,5 mm	
		37,5/75 mm	
		25/50 mm	
	Agregado miúdo	Zona utilizável	NBR NM 248:2003
		Zona ótima	

durante a britagem do resíduo. Esse parâmetro, teor de finos menores que 0,075 mm, afeta a demanda de água, por serem materiais muito finos, com granulometria próxima à do cimento. Aqui talvez esteja a maior diferença entre o ARCO e o ARCI. O ARCI possui teores de finos que podem ultrapassar os teores limites especificados, e deve-se ter cuidado para não se obterem produtos com consumo elevado de cimento, o que é indesejável do ponto de vista econômico e ambiental.

33.4.4 Em Obras Geotécnicas (Terra Armada e Geossintéticos)

Empresas que realizam obras de saneamento também costumam ter especificações de uso interno, como a Sabesp ou Comgás, e até mesmo grandes empresas de infraestrutura, como a Petrobras, ou especificações de prefeituras. O agregado reciclado (como o rachão) pode ser incorporado (Kataguiri, 2017; Vedroni, 2007). Atenção deve ser dada à questão de solubilidade do agregado reciclado e potencial de contaminação de água e solo local, além do fato de que contato com água e intempéries pode levar o agregado a sofrer maior desgaste quando comparado ao agregado natural.

33.5 CONCLUSÕES

A atividade da construção civil é uma grande consumidora de matéria-prima não renovável e uma grande geradora de resíduos. O reuso e a reciclagem dos resíduos de construção são ótimas alternativas para o aumento da sustentabilidade e redução do custo das obras. Deve-se evitar a remoção de resíduos classe A do canteiro e incentivar seu reuso ou reciclagem, por exemplo, a partir de políticas públicas.

É possível usar o resíduo classe A como agregado reciclado, desde que não contaminado, em várias aplicações, em teores de substituição do agregado natural que podem variar, por exemplo, em função da resistência desejada. Normalmente, aplicações que requerem baixa resistência mecânica permitem uma substituição maior do agregado natural por reciclado. Para evitar a contaminação do resíduo classe A com outros tipos de resíduos, por exemplo gesso e solo, é importante que obra tenha implantado um sistema eficaz de triagem e gerenciamento dos resíduos.

Os agregados reciclados costumam atender bem às especificações técnicas de normas para a execução de obras de pavimentação, geotécnicas (terra armada e geossintéticos) e para a produção de

argamassas (assentamento de tijolos, revestimentos e contrapisos). Em obras de pavimentação, o agregado reciclado atende bem às especificações para a execução de subleito e sub-base, principalmente. Para bases, é interessante tomar alguns cuidados com relação à distribuição granulométrica e à natureza do RCD. Em obras geotécnicas (terra armada e geossintéticos), é importante observar a fração solubilizada, para não contaminar água e solo local, bem como acompanhar a degradação ambiental do material, para entender melhor ao comportamento quanto à durabilidade.

Na produção de argamassas, deve-se tomar cuidado com o teor total de finos < 0,075 mm, que deve ficar próximo a 23 %. Teores muito altos podem causar fissuração excessiva e teores muito baixos podem causar pouca trabalhabilidade. Também deve ser respeitado o intervalo de variação ideal de consumo de cimento para cada tipo de argamassa. A vantagem dessa aplicação é que ela pode reduzir o consumo de cal, barateando ainda mais a argamassa; nesta aplicação, não possui função estrutural e, se for substituída, aproximadamente, 40 % do agregado natural por reciclado, apenas em serviços de argamassa, será possível consumir todo o resíduo classe A não contaminado da obra, assim contribuindo para a sustentabilidade na construção civil.

BIBLIOGRAFIA

- AGUIAR, G. de. *Estudo de argamassas com agregados reciclados contaminados por gesso de construção*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2004.tde-13122004-135010>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- ANGULO, S. C. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ANGULO, S. C.; OLIVEIRA, L. S.; MACHADO, L. C. (ed.). *Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil*. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786589190103>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- ANGULO, S. C.; ULSEN, C.; LIMA, F. M. R. S.; CHAVES, A. P.; JOHN, V. M. *Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem europeias*. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), Feira de Santana, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 5564*: Via férrea – Lastro ferroviário – Requisitos e métodos de ensaio. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br>. Acesso em: 29 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7181*: Solo – Análise granulométrica. 2018. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7182*: Solo – Ensaio de compactação. 2020. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>. Acesso em: 2 maio. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7211*: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=40092>. Acesso em: 24 jan. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7218*: Agregados – Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. 2010. Acesso em: 29 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9895*: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. 2017. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 9917*: Agregados para concreto – Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004*: Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 15115*: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *ABNT NBR 15116*: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland: requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16916*: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. 2021. Acesso em: 29 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16917*: agregado graúdo – determinação da densidade e da absorção de água. 2021. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>. Acesso em: 29 abr. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 16973*: Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. 2021. Acesso em: 29 abr. 2022.

BARCELLOS, C.; SABROZA, P. C. The place behind the case: leptospirosis risks and associated

environmental conditions in a flood-related outbreak in Rio de Janeiro. *Cad. Saúde Pública*, v. 17, p. 59–67, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2001000700014>. Acesso em: 24 jan. 2024.

BRITO, J. de; SAIKIA, N. Use of construction and demolition waste as aggregate: properties of concrete. *Recycl. Aggreg. Concr.*, London, Springer, p. 229-337, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0_5. Acesso em: 24 jan. 2024.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. *Teoria e prática do tratamento de minérios: britagem, peneiramento e moagem*. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CHEN, K.; WANG, J.; YU, B.; WU, H.; ZHANG, J. Critical evaluation of construction and demolition waste and associated environmental impacts: a scientometric analysis. *J. Clean. Prod.*, 287, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125071>. Acesso em: 24 jan. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Resolução nº 307*: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, 2002.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Resolução nº 431*: Altera o art. 3º da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, estabelecendo nova classificação para o gesso. Brasília, 2004a.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). *Resolução nº 348*: altera a resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Brasília, 2004b.

DEUTSCHE INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). *DIN 4226-100*: Aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates, 2002.

DIAS, J. F. *Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/T.3.2004.tde-16122004-130717>. Acesso em: 24 jan. 2024.

GONÇALVES, P.; BRITO, J. de. Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications. *Mag. Concr. Res.*, v. 62, p. 339-346, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/macr.2008.62.5.339>. Acesso em: 24 jan. 2024.

HAAS, W.; KRAUSMANN, F.; WIEDENHOFER, D.; HEINZ, M. How circular is the global economy? An assessment of material flows, waste production, and recycling in the European Union and the world in 2005. *J. Ind. Ecol.*, v. 19, p. 765–777, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jiec.12244>. Acesso em: 24 jan. 2024.

JANG, Y.-C.; TOWNSEND, T. Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines. *Adv.*

- Environ. Res.*, v. 5, p. 203–217, 2001. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(00\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00056-3). Acesso em: 24 jan. 2024.
- KATAGUIRI, K. *Proposição de critérios técnicos e ambientais para criação de banco de solos para a região metropolitana de São Paulo*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2017.tde-23062017-161732>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- KATAGUIRI, K.; BOSCOV, M. E. G.; TEIXEIRA, C. E.; ANGULO, S. C. Characterization flowchart for assessing the potential reuse of excavation soils in São Paulo city. *J. Clean. Prod.*, v. 240, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118215>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- KRAUSMANN, F.; LAUK, C.; HAAS, W.; WIEDENHOFER, D. From resource extraction to outflows of wastes and emissions: the socioeconomic metabolism of the global economy, 1900–2015. *Glob. Environ. Change*, v. 52, p. 131–140, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- LEITE, F. da C. *Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.3.2007.tde-09012008-162141>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- LIMA, A. S.; CABRAL, A. E. B. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). *Eng. Sanit. E Ambient.*, v. 18, p. 169–176, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200009>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios, CETEM/MCT. 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/476>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- METSO MINERALS. *Basics in mineral processing*, 2015. Disponível em: <https://www.metsominerals.com/insights/e-books/basics-in-minerals-processing-handbook/>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- MIRANDA, L. F. R. *Contribuição ao desenvolvimento da produção e controle de argamassas de revestimento com areia reciclada lavada de resíduos Classe A da construção civil*. Tese (doutorado), Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <https://bdpi.usp.br/item/001488651>. Acesso em: 28 out. 2024.
- MIRANDA, L. F. R. *Reciclagem de resíduos de construção e demolição: teoria e prática*. Curitiba: Appris Editora, 2020.
- MONTERO, A.; TOJO, Y.; MATSUO, T.; MATSUTO, M.; YAMADA, M.; ASAKURA, H.; ONO, Y. Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs. *J. Hazard. Mater.*, v. 175, p. 747–753, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.072>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- PINHEIRO, S. M. de M. *Gesso reciclado: avaliação de propriedades para uso em componentes*. 2011. Tese (Doutorado) – Unicamp. Campinas, 2011.
- PINTO, T. P. *Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana*. 1999. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. Disponível em: https://ietsp.com.br/static/media/media-files/2015/01/23/Tarcisio_P_Pinto_-_Metodologia_para_gestao_diferenciada_de_RCD.pdf. Acesso em: 24 jan. 2024.
- PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. *Manejo e gestão de resíduos da construção civil: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios*. Brasília: Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente e Caixa Econômica Federal, 2005.
- SAMPAIO, A. M. M.; KLIGERMAN, D. C.; FERREIRA JÚNIOR, S. Dengue, related to rubble and building construction in Brazil. *Waste Manag.*, v. 29, p. 2867–287, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.017>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- SCHNEIDER, D. M. *Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo*. 2002.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON-SP). *Gestão Ambiental de Resíduos da Construção Civil: avanços institucionais e melhorias técnicas*. São Paulo, 2015. Disponível em: <https://www.sindusconsp.com.br/wp-content/uploads/2015/09/MANUAL-DE-RES%3C%8DDUOS-2015.pdf>.
- SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCON-SP). *Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP*. PINTO, T. P. (coord.). São Paulo: Obra Limpa, I&T, Sinduscon-SP, 2005. Disponível em: <https://www.sindusconsp.com.br>.
- VEDRONI, J. W. *Estudo de caso sobre a utilização do RCD (resíduos de construção e demolição) em reaterros de valas nos pavimentos de Piracicaba SP*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.47749/T/UNI_CAMP.2007.403800. Acesso em: 24 jan. 2024.
- WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7. ed. Amsterdam; Boston: Elsevier, 2006.