

V.1

Resíduos de Construção e Demolição:

fundamentos sobre gestão e reciclagem

Sérgio Cirelli Angulo, Professor do Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Carina Ulsen, Professora do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

2023

eBook



Catálogo-na-publicação

Angulo, Sérgio Cirelli

Resíduos de construção e demolição: fundamentos sobre gestão e reciclagem / S. C. Ângulo, C. Ulsen. -- São Paulo : Epusp, 2023.
13680 kb.

ISBN 978-65-89190-20-2

DOI: 10.11606/9786589190202

1.Resíduos de construção 2.Entulho 3.Reciclagem de resíduos I.Ulsen, Carina II.t.

CDU 628.4.036

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Reitor: Carlos Gilberto Carlotti Junior

Vice-Reitora: Maria Arminda do Nascimento Arruda

ESCOLA POLITÉCNICA

Diretor: Reinaldo Giudici

Vice-diretor: Silvio Ikuyo Nabeta

“Esta obra é de acesso aberto. É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte e autoria e respeitando a Licença Creative Commons indicada.”



PREFÁCIO

É com grande satisfação que finalizo a primeira versão deste livro digital, o primeiro *e-book* gratuito sobre o tema, para disseminação de conhecimentos sobre gestão e reciclagem de resíduos de construção para estudantes de graduação brasileiros.

O livro é estruturado com base no conteúdo da disciplina de graduação PCC 3556, ofertada principalmente para os estudantes de Engenharia Civil, Engenharia Ambiental da Escola Politécnica, e o curso de Arquitetura, da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU), Campus da Universidade de São Paulo (USP), em São Paulo.

Sua estrutura em três capítulos traz os fundamentos para entender: i. a estruturação legal da gestão dos resíduos de construção e demolição (RCD), formas de classificação, rotas de reciclagem para os diferentes tipos de resíduos, indicadores de geração do RCD, ii. as tipologias das usinas de reciclagem, principais operações de processamento, finalidades e iii. as especificações normativas brasileiras do agregado reciclado (AR), o principal produto da reciclagem do RCD, bem como os aspectos mais importantes das principais aplicações na construção, camadas de base de pavimentação, e uso como materiais cimentícios (argamassas e concretos).

Neste livro reúno as bibliografias que considero mais relevantes para o tema, e trago resultados de pesquisas que realizei ao longo dos anos, feitas na própria USP, mas também as que realizei no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT).

A Profa Carina Ulsen, com quem divido a coautoria deste material me auxiliou no processo de revisão geral deste livro, e contribui mais especificamente no capítulo de operações das usinas de reciclagem, onde é especialista no tema, pois é formada em Engenharia de Minas e professora na Poli USP. Meus agradecimentos pela colaboração.



Environment & Material Handling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resíduos perigosos que podem estar presentes nos resíduos de construção	11
Figura 2 – Resíduo de concreto da demolição de um piso industrial (à esquerda), e resíduos diversos (não apenas concreto) misturado com solo (à direita).....	14
Figura 3 – Resíduos de madeira serrada (à esquerda) e resíduos de compensados (fôrmas) com madeiras serradas (à direita).....	14
Figura 4 – Forma de Estruturação do sistema de gestão municipal do RCD.....	16
Figura 5 – Fluxograma simplificado de como funciona uma ATT.....	19
Figura 6 – Catação no chão ou em pilhas de RCD feita por operários numa ATT.....	20
Figura 7 – ATT específica para recebimento e triagem de resíduos de gesso (foto acima).....	21
Figura 8 – Usina de Reciclagem de resíduo de construção Classe A, que produz agregados reciclados para aplicação em obras de pavimentação ou produção de materiais cimentícios.....	21
Figura 9 – Operação de um aterro de resíduos “inertes” da construção civil, na região metropolitana de São Paulo.....	23
Figura 10 – Correlação entre a geração de RCD per capita e o índice de desenvolvimento humano dos municípios brasileiros (maioria desses situados no estado de São Paulo)	28
Figura 11 – Usina fixa com configuração bem simplificada (grelha, britador, combinado ou não com peneira).....	29
Figura 12 – Britagem de resíduo de concreto obtido em demolição seletiva, combinado com obra de construção próxima ao local	30
Figura 13 – Diferença entre resíduos de concreto estrutural (à esquerda) do resíduo cimentício (que contém blocos de vedação – alvenaria cimentícia, argamassas, etc) (à esquerda).....	32
Figura 14 – Diferença entre resíduos de alvenaria contendo cerâmica vermelha (acima) do resíduo misto contaminado com solo (abaixo)	32
Figura 15 – Modelo de um Controle de Transporte de Resíduos (CTR) a ser recebido e controlado na usina de reciclagem	33
Figura 16 – Catação de contaminantes em pilhas cônicas	34
Figura 17 – Escalpe por grelha vibratória, antes da alimentação no britador de uma usina fixa de reciclagem.....	35
Figura 18 – Sistema móvel de peneiramento e triagem, protótipo USP, IPT.....	35
Figura 19 – Bolas de demolição, caçambas dentadas puxam o aço, rompedores são usados para fragmentar o concreto armado, podem ser manuais ou acoplados em escavadeiras.....	36
Figura 20 – Exemplos de cabines (e/ou mesas) de triagem em usinas de reciclagem com pessoal sem todos os EPI recomendados.....	37
Figura 21 – Exemplos de separadores magnéticos operando em usinas de reciclagem.....	38
Figura 22 – Ao fragmentar a parede, os diferentes materiais vão separando a medida que se reduz o tamanho dos fragmentos	38
Figura 23 – Ilustração do funcionamento do britado de mandíbula e o de impacto	39
Figura 24 – Granulometria do material, antes de depois da britagem	39
Figura 25 – Vertical Shaft Impactor, britador muito usado em pedreiras, mas também apto ao processamento do RCD.	40
Figura 26 – Princípio da concentração	41
Figura 27 – Materiais leves removidos pela força do ar, em aeroclassificadores (classificadores pneumáticos gravitacionais).....	42
Figura 28 – Ilustração do jige à água e o processo de separação por estratificação, que classifica o agregado reciclado em camadas, com composições diferentes.....	44
Figura 29 – Descrição do funcionamento do equipamento de separação óptica (ou por outros tipos de sensores).....	45
Figura 30 – Resultado da separação dos agregados graúdos mistos por equipamento de separação óptica.....	46
Figura 31 – Como funciona o peneiramento	47
Figura 32 – Captação de material particulado em usina de reciclagem em Berlim.....	49
Figura 33 – Típico lay-out das usinas de reciclagem brasileiras.	50
Figura 34 – Escalpe de solo de escavação, bica corrida mista	51
Figura 35 – Brita cimentícia (ou de concreto) 10-20 mm; pedrisco cimentício (<5mm).....	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 36 - Solo escalpado na usina de Berlim, Alemanha.....	52
Figura 37 - Lay-out da planta de reciclagem Alemanha, que opera com cabine de triagem (com transportador de correia), dosador de agregados, escalpe para solos.....	53
Figura 39 - Ilustração de uma das maiores usinas de reciclagem na América Latina.....	53
Figura 40 - Locais de retirada de amostras parciais de agregados reciclados em pilhas.....	55
Figura 41 - Amostrador para coleta de agregados reciclados e resíduos sólidos granulares.	55
Figura 42 - Procedimento de coleta na descarga dos transportadores de correia.....	57
Figura 43 - Composição típica de um agregado reciclado misto	58
Figura 44 - Classificação dos materiais presentes nos agregados reciclados pelo ensaio de catação.....	59
Figura 45 - Agregado reciclado de concreto contém poucos materiais secundários (como cerâmica vermelha, ou contaminantes).	60
Figura 46 - Bica corrida reciclada (50-0mm), a partir de resíduo de construção misto (contendo cerâmica vermelha).	62
Figura 47 - Sequência de execução de uma subbase de pavimento flexível com bica corrida reciclada.....	63
Figura 48 - Efeito do tipo de agregado reciclado no teor de umidade e densidade ótima durante a compactação.	64
Figura 49 - Efeito que a energia de compactação pode causar na granulometria do agregado reciclado.....	64
Figura 50 - Areia reciclada cimentícia usada para produzir argamassa de assentamento e revestimento em obra.....	65
Figura 51 - Ensaio de arrancamento que medem a resistência de aderência e testes de fissuração são realizados normalmente em obras, antes de se adotar ou padronizar um procedimento de execução da argamassa de revestimento numa construtora.....	66
Figura 52 - Especificação sugerida para a areia reciclada.	67
Figura 53 - Testes particulares como o da reação álcali-silica (RAS) da areia reciclada podem ser necessário para garantir um desempenho da argamassa reciclada.....	68
Figura 54 - Britador portátil usado para viabilizar reciclagem na obra	69
Figura 55 - Pedrisco (6,3-0mm) reciclado cimentício, usado na confecção de componentes pré-fabricados de cimento.	71
Figura 56 - Limites granulométricos sugeridos para blocos e pavers	72
Figura 57 - Limites granulométricos para Blocos proposto por Pfeiffenberger em 1985.....	72
Figura 58 - Bloco de vedação cimentício pré-fabricado.	73
Figura 59 - Alteração na consistência do concreto, em função da substituição do agregado natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, e do tempo.	74

LISTA DE TABELAS

Quadro 1 - Proposta de classificação de resíduos pela resolução CONAMA 307/ 2002.....	13
Tabela 1 - Critérios para projetar, implantar e operar uma ATT ou PEV.....	19
Tabela 2 - Critérios para projetar, implantar e operar uma usina de reciclagem	21
Tabela 3 - Critérios para projetar, implantar e operar um aterro de resíduos "inertes" da construção civil.....	23
Tabela 4 - Variação dos indicadores de geração de resíduos da construção, excluindo-se o solo de escavação.....	26
Tabela 5 - Quantidade mínima de massa da amostra de ensaio	57
Tabela 6 - Especificação de uso de agregados reciclados em pavimentação	61
Tabela 7 - Requisitos específicos dos agregados reciclados em argamassas e concretos	70
Tabela 8 - Obras que usam o agregado reciclado em concreto estrutural.	74

SUMÁRIO

1 .	Gestão do Resíduos de Construção e Demolição (RCD)	9
1.1.	Como classificar o RCD?.....	9
1.2.	A gestão do RCD.....	15
1.3.	Estimando a geração do RCD.....	25
2 .	Usinas de Reciclagem: Processos e Formas de Operação	28
2.1.	Conceitos gerais.....	28
2.2.	Operações de processo.....	30
2.3	Lay-outs de usinas e tipos de agregados reciclados.....	50
3 .	Agregados reciclados: especificações e usos	54
3.1	Tipos dos agregados de RCD.....	58
3.2	Especificações de agregados reciclados: uso na pavimentação.....	61
3.3	Especificações de agregados reciclados: uso em argamassas.....	65
3.4	Especificações de agregados reciclados: uso em concretos.....	69
3.4.1	Não estruturais.....	71
3.4.2	Estruturais.....	73
4 .	Referências Bibliográficas	77

Construindo
relações
sustentáveis



abrecon.org.br

ASSOCIE-SE

Dê um passo adiante para
o sucesso da sua usina



Venda mais
agregado



Suporte para a
obtenção de licenças



Acesso VIP a
eventos exclusivos

abrecon
Associação Brasileira para Reciclagem de
Resíduos da Construção Civil e Demolição

1. Gestão do Resíduos de Construção e Demolição (RCD)

1.1. Como classificar o RCD?

A NBR 10.004 é a norma que classifica o grau de periculosidade dos resíduos sólidos [1], e isso também deve ser verificado nos resíduos de construção e demolição (RCD). Por essa norma, os resíduos sólidos são classificados em:

- **Resíduos classe I: Perigosos;**
- **Resíduos classe II: Não perigosos**
 - **Resíduos classe II A - Não inertes**
 - **Resíduos classe II B - Inertes**

Os resíduos de construção e demolição (RCD), também conhecidos como entulho, quando não devidamente triados ou manejados são constituídos por uma ampla gama de materiais. Podem ser originados em obras de construção, reformas e manutenções de edifícios e obras de infraestrutura das cidades, e demolições de edifícios antigos [2].

Apesar dos RCDs serem classificados comumente como classe II-B, eventualmente, podem conter determinados tipos de resíduos perigosos. Esses materiais devem ser identificados já na sua origem, e devidamente separados dos demais materiais aproveitáveis.

Resíduos perigosos devem estar sujeitos a licenças específicas para transportar e destinar esses materiais. No estado de São Paulo, deve-se requerer o CADRI - Certificado de Movimentação de Resíduos de Interesse Ambiental, junto a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

A norma NBR 10.004 explica os critérios utilizados e testes de laboratório utilizados para classificar o resíduo como perigoso. Os critérios são:

- a) toxicidade:** substância que, em pequenas concentrações (como determinados tipos de solventes), oferece alto risco à saúde, ou causa câncer em humanos, identificadas nos anexos da norma. Esse risco é também avaliado em teste de laboratório em meio ácido, pois alguns metais altamente tóxicos ao homem (como cromo, arsênio, chumbo, mercúrio) podem lixiviar do material e contaminar o meio ambiente. Há valores limites para esses metais na norma.

b) inflamabilidade: substância (como os diversos solventes) pode gerar fogo quando exposto a temperatura ambiente ($<60^{\circ}\text{C}$). Faz-se ensaio e mede-se o ponto de fulgor.

c) corrosível: material semi-sólido, alcalino ($\text{pH} >12,5$) ou ácido ($\text{pH} <2$), capaz de corroer ou atacar outros materiais usados no transporte dos resíduos (metais, por exemplo), e contaminar rios, destruir biomas vivos.

d) reativo: produz vapores tóxicos em condição ambiente, o que inclui, contato com a água (chuva).

Nos resíduos de construção, alguns poucos materiais são tóxicos e, portanto, resíduos perigosos. A questão é como saber identificá-los. Sobras de solventes (a base de benzeno, tolueno), usados em alguns serviços de pintura, são resíduos tóxicos e perigosos [3-5], pois constam nestes anexos da norma. Pinturas antigas podem conter também teores elevados de chumbo e mercúrio [3-5], identificados geralmente no ensaio de lixiviação em ácido, devendo ser removida e tratada separadamente.

Algumas madeiras industriais tratadas, se conterem pentaclorofenol, creosoto, também são [5,6]. Outros tipos de madeiras industrializadas são tratadas com arseniato de cobre cromatado (CCA), CCB, que, no ensaio de lixiviação, podem ultrapassar limites de arsênio, cromo [7,8].

Na manutenção ou desocupação de edifícios, lâmpadas contendo mercúrio [9] também são, e devem ser segregados logo dos demais materiais nas reformas e demolições. Telhados, revestimentos e pisos contendo fibras de amianto também são [1,2,5,10], e requerem triagem e gestão específica.

Alguns resíduos de construção podem ser semi-sólidos (lamas de lavagem de caminhão betoneira, pastas úmidas de cal, cimento). Se destinados ou transportados à úmido, possuem pH muito alcalino e podem ser enquadrados como resíduos perigosos [11]. Há casos de multas ambientais sérias envolvendo empresas que fornecem concreto e usam muitas atividades de lavagem.



Figura 1 - Resíduos perigosos que podem estar presentes nos resíduos de construção. Lâmpadas contendo mercúrio (superior, à esquerda), amianto (superior, à direita), tintas líquidas contendo solventes (inferior, à esquerda) e tubulações de chumbo (inferior, à direita). Fontes das imagens: <https://www.pensamentoverde.com.br/reciclagem/como-funciona-reciclagem-de-lampadas-fluorescentes/> | <https://merryhill.co.uk/asbestos-removal-services/asbestos-encapsulation/> | <https://www.mtu.edu/ehs/documents/flammable-storage/> | <https://www.brothersplumbing.ca/blog/lead-pipe-replacement/often-get-lead-pipe-replaced/>

Casos bem menos frequentes podem também ocorrer, por exemplo, na demolição de uma usina nuclear. A operação contínua pode conter substâncias radioativas, que podem ficar acumuladas no material de construção, e apresentar radioatividade, sendo também um material perigoso [5]. Não é uma regra, portanto, precisa avaliar caso a caso.

No RCD, os resíduos perigosos representam uma parcela muito pequena dos resíduos de construção (menos de 1% da massa), e estão sujeitas a situações pontuais e bem específicas relacionadas a gestão do RCD. Os demais resíduos (concretos, argamassas, cerâmicas, gesso, solos de escavação, vidro, aço, alumínio, plásticos, madeiras – compensados, serrada) representam a maior parcela do RCD e são “não-perigosos”, classe II.

A subdivisão entre resíduo não-inerte (classe II-A) e inerte (classe II-B) é feita, considerando a solubilização de certas substâncias (como alumínio, ferro, íons sulfato) na água deionizada.

Alguns materiais de construção são mais solúveis, e podem ser classificados como “não-inertes”. É o caso do cimento em pó, concretos, argamassas, e o gesso de construção [12].

O gesso de construção é solúvel em água; dentre os materiais mencionados, é o que apresenta maior potencial de alterar os padrões de potabilidade da água ou de pureza de solos para agricultura [13]. Requer cuidados a disposição desse material, quando próximos a curso de água, áreas de preservação, ou próximos a locais que possuem atividade de agricultura. Não devem ser misturados com resíduo orgânicos em aterros sanitários [14].

Exceto nesses locais, o resíduo “não-inerte” não oferece risco significativo e é reciclável. Diariamente, são utilizadas quantidades enormes de materiais cimentícios, que certamente lixiviam cálcio, alumínio, alterando as condições de solo natural nas cidades, pois é inevitável que a construção no meio urbano altere o meio ambiente.

Até mesmo, os solos das regiões tropicais, muito presentes no Brasil, sofrem processos de lixiviação de alguns elementos presentes, como ferro e alumínio, o que já é suficiente para superar os limites de potabilidade e de qualidade do solo, e são naturais em certas regiões [15]. Muitos solos escavados, naturais na região de São Paulo, acabam sendo destinados em aterros industriais para resíduos classe II-A por cauda da norma de classificação dos resíduos NBR 10.004, embora passíveis de aproveitamento. Para melhorar o aproveitamento, foram criados valores “referenciadores” das características dos solos de cada região (publicados na resolução CONAMA 420/2009), e o solo pode ser aproveitável, desde que não altere essas condições (teores limites de determinados íons solúveis) de cada região [16].

Na Resolução 307 do CONAMA do ano de 2002 é proposta a classificação dos resíduos da construção, tendo em vista o melhor aproveitamento deste material, em quatro classes [2]. A resolução 348, de 16 de Agosto de 2004, e a Resolução 431, de 24 de maio de 2011, modificaram a classificação da Resolução 307, inserindo o amianto como material perigoso (classe D) e mudando a classificação do gesso, de Classe C (resíduo sem tecnologia de reciclagem economicamente viável) para a Classe B (reciclável em outros setores, que não aquele relacionado ao uso do agregado reciclado) [10,17], respectivamente. Em 2015, as embalagens vazias de tintas imobiliárias foram incluídas na categoria dos resíduos classe B, recicláveis como sucata em indústria siderúrgica (que produz aço). A pequena película de tinta endurecida (se presente) não é um resíduo perigoso, pois não irá conter solventes.

O Quadro 1 apresenta uma descrição de como classificar os resíduos conforme a resolução CONAMA 307. Para acessar conteúdo na íntegra essa resolução, acesse as matérias aprovadas em <http://conama.mma.gov.br/>.

A	B	C	D
Reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como concreto (incluindo blocos e peças pré-moldadas), argamassas, componentes cerâmicos e solos provenientes de terraplanagem.	Recicláveis para outras destinações, como: madeira, papel / papelão, plásticos, metais, vidros etc. Inclui o gesso, e também as embalagens vazias de tintas.	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias de reciclagem ou aplicações economicamente viáveis. Ex: compostos (materiais contendo fibras).	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas líquidas, contendo solventes, metais pesados (mercúrio, cromo), óleos, fibras de amianto, instalações ou clínicas radiológicas (se contaminado).

Quadro 1 – Proposta de classificação de resíduos pela resolução CONAMA 307/ 2002. Imagem cedida pela ABRECON.

Com os progressos ocorridos nos últimos anos, tem-se disseminado sistemas que propõem o gerenciamento on-line dos resíduos de construção. Um exemplo é o Sistema de Gerenciamento On-Line de resíduos sólidos (SIGOR), proposto pela Companhia Ambiental do estado de São Paulo (CETESB), que busca unificar as codificações dos resíduos usadas por órgãos ambientais (que tomam por base a norma NBR 10.004) e o IBAMA [18].

Da mesma forma, subcategorizar tipos de resíduos classe A e B são fundamentais para viabilizar a reciclagem e melhorar o aproveitamento desses materiais e gerar valor. Separar os solos de escavação dos resíduos de obras ou de demolições (contendo concretos, argamassas, blocos cerâmicos, etc) são fundamentais para melhorar a qualidade do resíduo e do agregado reciclado obtido pelo processamento, assim como manter segregado resíduos de peças estruturais de concreto (lajes, pavimentos, pilares, vigas) permite obter o agregado reciclado de melhor qualidade. A mistura com os materiais cerâmicos pode reduzir a qualidade do produto após a britagem como agregado reciclado, inclusive o seu valor de venda.

O mesmo ocorre com os resíduos classe B. Há vários tipos de plásticos recicláveis, mas, se a forma de aproveitamento definida para os plásticos for a queima/incineração (para gerar energia), o PVC precisa ser segregado e subcategorizado [5]. Não se deve queimar o PVC, pois sua decomposição pode gerar dioxinas, substância de alta toxicidade. Isso não é aceito em processos industriais de queima que usam resíduos.

A segregação dos plásticos nas suas diversas subcategorias (PP, PE, PS, etc) também é melhor para se obter um produto reciclado de melhor qualidade. Da mesma forma, é recomendado separar a madeira usada em estruturas de coberturas, pontaletes e estruturas provisórias de segurança em obras (ou seja, aquela madeira natural serrada, praticamente isenta de tintas, resinas) da madeira industrializada (compensados usados como fôrmas, móveis planejados, OSB, piso de madeira) porque estes podem conter substâncias tóxicas (resina fenólica) ou cuja queima não é totalmente segura a depender da temperatura do processo industrial, requerendo processos de incineração acima de 800 graus. Associações do setor de madeira (ABIPA, ABPM, ABIMCI, ANPM) produziram um manual orientando como o resíduo de madeira deve ser gerenciado [19].



Figura 2 - Resíduo de concreto da demolição de um piso industrial (à esquerda), e resíduos diversos (não apenas concreto) misturado com solo (à direita). Esses dois materiais se processados geram agregados reciclados com qualidade bem distintas. Fontes das imagens: <https://blogreciclos.wordpress.com/2016/05/09/concretos-reciclad0/> | <https://www.franke sustentabilidade.com.br/>



Figura 3 - Resíduos de madeira serrada (à esquerda) e resíduos de compensados (fôrmas) com madeiras serradas (à direita). Fonte das imagens: <https://meumovelrestaurado.wordpress.com/2013/11/08/madeira-de-demolicao/>

1.2. A gestão do RCD

1.2.1. Resolução CONAMA 307 e suas alterações

A primeira proposta de gerenciamento de resíduos de construção civil no Brasil foi apresentada na tese de doutorado do Dr. Tarcísio de Paula Pinto em 1999 [20]. Usada como experiência base, foi proposta a resolução CONAMA 307, com o objetivo de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão adequada dos RCD [2].

A prática da gestão procura desestimular a informalidade no transporte de resíduos da construção e as práticas de descarte ilegal, que resultam em custos elevados de limpeza pública, pois o resíduo de construção é um material pesado e volumoso, que requer máquinas e grandes equipes de pessoas, para realizar a limpeza dos locais. Preferencialmente dispostas em ruas, fundos de vales, áreas de preservação (encostas, borda de rios), podendo causar enchentes (pois obstruem sistemas de drenagens), problemas ambientais (assoreamento, atrair outros tipos de resíduos como os domésticos, perigosos, etc, esgotar aterros domiciliares, frente ao grande volume gerado) e diversos problemas de saúde pública (pode proliferar dengue, com água parada, e proliferar outros vetores como aranhas, escorpiões). Foi comprovado que a melhor forma de gerir o RCD, do ponto de vista municipal, é desestimular o descarte ilegal, e promover a reciclagem.

O que propõe a resolução CONAMA 307?

Cada cidade deve elaborar um plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil [21]. Para que o sistema de gerenciamento funcione, é fundamental separar os geradores em duas categorias:

Grandes Geradores, são empresas pertencentes ao setor formal (possui CNPJ, situação fiscal regular), envolvidas no setor da construção (construtoras, empreiteiras, etc) e também no setor de demolição (demolidoras), incluindo empresas de maior porte que realizam reformas, adequações. Entende-se que essas empresas são responsáveis diretamente e possuem capacidade de gerir seus resíduos, por si só. Estes devem elaborar o plano de gerenciamento de resíduos da construção civil, conhecido como o PGRCC. A atuação não condizente com legislações e decretos caem no princípio de poluidor-pagador, devendo indenizar por danos ambientais que afetem a sociedade como um todo. Cabe a prefeitura propor, e os demais órgãos licenciarem uma rede de locais legalizados e organizar a gestão, que deve ocorrer, por meio do setor privado, envolvendo áreas de transbordo e triagem (ATT), usinas de reciclagem, operadores de aterros de resíduos “inertes” da construção civil (usados como áreas de reservação).

Pequenos Geradores, são pessoas físicas que praticam pequenas reformas, autoconstrução, geralmente de forma informal. Do ponto de vista legal, entende-se que esse tipo de gerador não tem a capacidade de gerir seus próprios resíduos, devendo o serviço público municipal prover meios para que o cidadão consiga gerir seus resíduos, e cobrar, através das taxas municipais (como a taxa do lixo inserida no IPTU). A prefeitura deve dispor uma rede pública de coleta de pequenos volumes.

Visando disseminar a implantação dos planos municipais de gerenciamento de resíduos da construção civil, o Ministério das Cidades produziu um manual orientativo de como implementar esse plano, seguindo as diretrizes da resolução CONAMA 307 [21] (Figura 4). Este manual esclarece a necessidade de se realizar uma série de atividades, antes de ter o plano propriamente: a) diagnosticar a geração dos resíduos no município por diferentes tipos de geradores (setor formal e informal), b) identificar as áreas e volumes de descarte irregulares para monitorar a melhoria do processo de gestão ao longo do tempo, e definir as melhores posições da rede de coleta, c) criar um decreto, reconhecendo os agentes envolvidos e as responsabilidades, multas, etc, e d) alocar e dimensionar a rede de coleta, de forma a tornar a disposição irregular pouco atrativa, diminuindo a distância de transporte entre o gerador do resíduo e o local de destino (reciclador).

Plano Integrado de Gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil
(Resolução CONAMA nº 307)

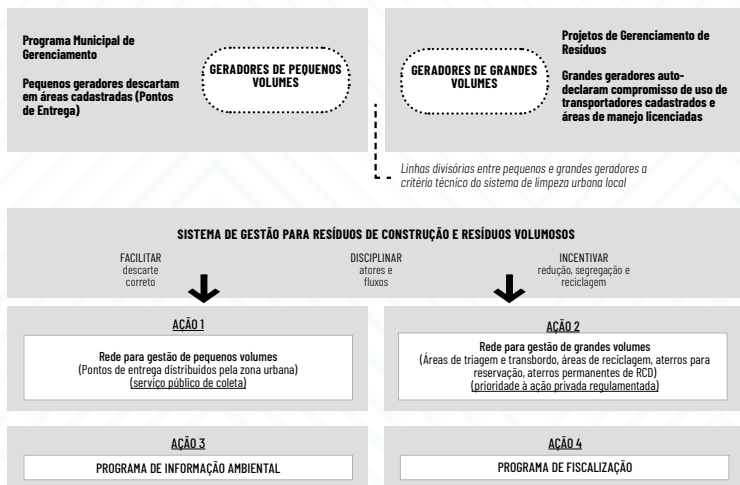


Figura 4 – Forma de Estruturação do sistema de gestão municipal do RCD. Fonte: [21]

1.2.2. Política Nacional de Resíduos Sólidos

Após duas décadas de discussões, em 02 de agosto de 2010, foi sancionada a Lei Federal Nº 12.305, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) [22]. A Lei dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada de resíduos sólidos (incluindo os resíduos da construção civil), às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis.

Durante muitos anos, órgãos ambientais lutam para a implementação de aterros sanitários em todo território nacional, procurando eliminar a disposição de resíduos sólidos (de uma forma geral, o que inclui o RCD) em lixões (descartes de resíduos a céu aberto, sem qualquer controle). Levantamentos realizados pelo plano nacional de saneamento básico constatou que um dos maiores entraves o descarte controlado de resíduos estava na dificuldade em viabilizar tais instalações em municípios pequenos (com menos de 50.000 habitantes) [23], sendo este a grande maioria no território nacional que carece de recursos públicos insuficientes na municipalidade para implantar aterros caros (custos de implantação do aterro acima de R\$ 800/ t de resíduo) [24], bem como de especialistas e técnicos voltados para isso. Um dos maiores avanços foi reconhecer e estimular a existência de consórcios públicos, unindo diversas municipalidades e estimulando-as a integrar a gestão dos resíduos sólidos.

Assim, a PNRS propôs a estruturação de planos de gerenciamentos integrados de resíduos sólidos (PGIRS) em diferentes escalas (todos concatenados): plano federal, plano estadual e o(s) planos das municipalidades, que agora podem ser consorciadas. Neste sentido, em 2010, foi publicado um novo manual do ministério do meio ambiente (MMA) visando estimular a implantação de sistemas de gestão de resíduos de construção civil em consórcios públicos [25]. Os planos apresentam critérios para dimensionar as redes de coleta, em função do porte dos municípios, dentre outros.

Frente aos prazos impostos, muitos PGIRS têm sido elaborados e estão disponíveis na internet, tais como o da cidade de São Paulo¹, dentre outros. Nestes, são impostas metas evolutivas de melhoria da gestão de resíduos sólidos e o compromisso de tentar alcançá-la em um cenário futuro. Resíduo pode ser aproveitado e deve ser reciclado. Para os aterros sanitários ou industriais, devem ser destinados apenas os rejeitos, resíduos sólidos que não apresentam outra possibilidade de aproveitamento ou tratamento (por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis). A única possibilidade seria a disposição final ambientalmente adequada nesses aterros.

Especificamente quanto aos resíduos da construção civil, a PNRS deixa claro que as empresas de construção civil estão sujeitas à elaboração do plano de gerenciamento de resíduos sólidos, nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional de Meio Ambiente – SISNAMA.

1

<http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>

Este plano de gerenciamento deve atender ao disposto no plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do respectivo Município; ou seja, atender o estabelecido pela resolução CONAMA 307.

Uma outra evolução é reconhecer que fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e até os consumidores e titulares dos serviços de limpeza urbana ou manejo possuem responsabilidade compartilhada ao longo do ciclo de vida dos produtos [22].

Formaliza, e reconhece sistemas de logística reversa pois o setor privado não precisa necessariamente aguardar a ação do estado para ter solucionada suas questões ambientais, podendo fomentar parcerias para implementar conjunto de ações (como coleta seletiva, etc), procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial. Um exemplo na construção civil seria como ocorre no caso dos resíduos do gesso - são poucos os fabricantes de componentes e estes atuam em obra em momentos bem específicos. Mais fácil é viabilizar a rede de logística reversa, como propõe os fabricantes de placas de gesso acartonado[26], e deveriam fazer também outros grandes fabricantes de materiais e componentes bem específicos e construção; p.ex., setor de tintas [4], do fibrocimento, dos forros acústicos, dos pisos vinílicos e de madeira laminada, o próprio concreto usinado, argamassa industrializada, blocos pré-fabricados de concreto, etc.

A gestão municipal pode então ser composta por diferentes redes (locais estruturados) para receber, triar, reciclar e/ou aterrar o RCD.

Os ECOPONTOS, também conhecidos como pontos de entrega voluntária (PEV) recebem os resíduos dos pequenos geradores informais. As áreas de triagem e transbordo (ATTs) (Figura 5) recebem resíduos de grandes geradores que não triam os resíduos na fonte geradora; esses devem usar critérios definidos na NBR 15.112 [27]. Geralmente, essas instalações requerem obras que permitam a isolamento/identificação do local, equipamentos mínimos de segurança, sistemas de proteção ambiental, cuidados com relação ao projeto, no tocante a drenagem, acessos, dimensionamento mínimos dos locais de triagem e para operação dos equipamentos, locais de estoque e armazenamento (Tabela 1). Devem operar minimamente com controle de recebimento do RCD, e certas diretrizes de operação (p. ex. não receber resíduo perigoso).

Fluxograma simplificado

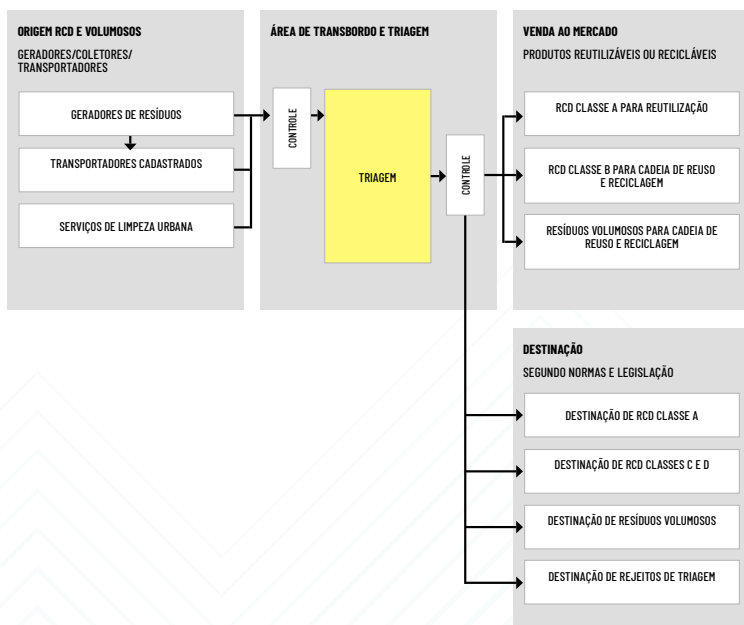


Figura 5 – Fluxograma simplificado de como funciona uma ATT. Fonte: [28]

Tabela 1 – Critérios para projetar, implantar e operar uma ATT ou PEV. Fonte: ABNT NBR 15112: 2004 [27]

Condicionantes	Elementos/Critérios
De implantação	<p>1. Isolamento/Identificação: a) portão, b) sinalização e identificação do empreendimento, e c) cercamento no perímetro da área de operação, incluindo cerca viva arbustiva para o isolamento da área.</p> <p>2. Equipamentos de segurança: a) proteção individual, b) proteção contra descarga atmosférica (*), c) combate a incêndio e d) pontos de iluminação e de energia</p> <p>3. Sistemas de proteção ambiental: a) controle de poeira nas descargas, manejo e estoque de materiais, b) contenção de ruídos em equipamentos e veículos, c) drenagem superficial para evitar carreamento dos materiais (*) e d) revestimento primário do piso das áreas de acesso, operação e estocagem</p>

Condicionantes	Elementos/Critérios
De projeto	<p>1. Informações cadastrais: proprietário do imóvel, e responsável técnico.</p> <p>2. Memorial descritivo: a) informações do local (topografia, acesso, entorno), b) descrição da implantação e operação, c) equipamentos e d) equipamentos de segurança.</p> <p>3. Projeto: a) drenagem superficial (*), b) acessos, c) edificações, d) local de recebimento e de triagem, e) local de armazenamento temporário das classes de RCD, e f) equipamentos utilizados. Relatório fotográfico. Plano de controle do recebimento de resíduos, com base nos critérios definidos para a operação (*).</p>
De operação	<p>1. Controle de recebimento do RCD: a) procedência, quantidade e qualidade, através do Controle de Transporte de Resíduo (CTR) (*).</p> <p>2. Controle quantitativo das classes de RCD: quantidade mensal e acumulada de cada classe, quantidade/destinação comprovada das classes triadas.</p> <p>3. Diretrizes de operação: a) proibido o recebimento do RCD predominantemente composto pela classe D que, quando presente e misturado, a disposição deve ser feita em local específico e coberto para armazenamento temporário; b) triagem do RCD nas classes A, B, C e D e acondicionamento em locais diferenciados.</p>

(* Estes elementos são dispensados na implantação de um PEV.

ATTs geralmente possuem instalações muito simples, e podem operar de forma pouco eficiente (Figura 6). Algumas podem ser específicas, trabalhando apenas com recebimento e separação de cargas com resíduos de gesso, ou recebimento e catação de forma de rudimentar no chão (que operam classificando madeiras e transformando o material em cavaco, pellet (fornecendo essencialmente biomassa) com máquinas picotadoras (Figura 7).



Figura 6 - Catação no chão ou em pilhas de RCD feita por operários numa ATT. Geralmente é menos eficiente que a triagem em transportadores de correia.



Figura 7 - ATT específica para recebimento e triagem de resíduos de gesso (foto acima). Geralmente o resíduo é usado como gesso agrícola, usado como adição para produção de cimento, etc. Unidade que recebe e processa madeira serrada como cavacos, briquetes, geralmente reciclado como biomassa. Fontes: <http://www.brechoarte.com.br> ; <http://www.lippel.com.br> .

Usinas de reciclagem (Figura 8) devem atender critérios mínimo estabelecidos pela NBR15.114, onde são estabelecidas diretrizes para implementação, projeto e operação Tabela 2 [29].



Figura 8 - Usina de Reciclagem de resíduo de construção Classe A, que produz agregados reciclados para aplicação em obras de pavimentação ou produção de materiais cimentícios. SBR Ambiental. Fonte: <https://sbrreciclagem.com.br/> .

Tabela 2 - Critérios para projetar, implantar e operar uma usina de reciclagem. Fonte: ABNT NBR 15114: 2004 [29]

Condicionantes	Elementos/Critérios
De implantação	<ol style="list-style-type: none"> Localização: a) consonância com a legislação de uso do solo e ambiental vigente e b) local que minimize o impacto ambiental, com base em critérios hidrológicos e vias de acesso. Isolamento: a) portão, b) sinalização e identificação do empreendimento, e c) cercamento no perímetro da área de operação, incluindo cerca viva arbustiva para o isolamento da área. Acessos internos e externos que permitam seu uso sob quaisquer condições climáticas.

Condicionantes	Elementos/Critérios
De implantação	<p>4. Pontos de iluminação e de energia.</p> <p>5. Sistema de drenagem das águas de escoamento superficial, capaz de suportar chuvas com período de recorrência de cinco anos, compatibilizando-o com a macrodrenagem local, de forma a evitar o acesso da água precipitada do entorno ou carrear sólidos da usina para o entorno.</p>
De projeto	<p>1. Informações cadastrais: proprietário do imóvel e responsável técnico (CREA).</p> <p>2. Memorial descritivo: a) informações do local (topografia, acesso, entorno), b) descrição da implantação e operação, c) equipamentos, d) equipamentos de segurança e e) plano de operação, de inspeção e manutenção.</p> <p>3. Projeto: a) drenagem superficial, b) acessos, c) edificações, d) local de recebimento e de triagem, e) local de armazenamento temporário das classes de RCD, f) local de processamento do resíduo Classe A e respectivos equipamentos e g) local de armazenamento dos produtos gerados.</p>
De operação	<p>1. Controle de recebimento, triagem e processamento dos resíduos: a) aceitação apenas da Classe A e controle da procedência, através do Controle de Transporte de Resíduo (CTR); b) triagem do RCD nas classes B, C, e D e acondicionamento em locais diferenciados; e c) controle de poluição ambiental durante o processamento: sistema de controle de vibrações, ruídos e poluentes atmosféricos.</p> <p>2. Treinamento aos funcionários e equipamentos de segurança: a) forma de operação, b) procedimentos em caso de emergência e c) equipamentos de proteção individual, contra descarga atmosférica e combate a incêndio.</p> <p>3. Plano de inspeção e manutenção: a) controle da integridade do sistema de drenagem, e b) emissão de poluentes atmosféricos, ruído e vibração.</p> <p>4. Plano de operação: a) controle da entrada de resíduos, b) discriminação dos procedimentos de triagem, reciclagem, armazenamento e outras atividades realizadas na área; c) descrição e destinação dos resíduos reciclados e rejeitados, e d) controle de qualidade dos produtos gerados.</p>

Por fim, há também aterros de resíduos “inertes” da construção, cuja única finalidade da obra é o preenchimento geotécnico da área, para posterior uso comercial do terreno (Figura 9).



Figura 9 - Operação de um aterro de resíduos "inertes" da construção civil, na região metropolitana de São Paulo. Fonte: Sérgio C. Angulo [2007].

O aterro de inertes deve seguir os critérios da NBR 15.113 (Tabela 3). O projeto de implantação, neste caso, é bem mais complexo, além como os requisitos de operação (que exigem cuidados no processo de compactação das camadas, composição do resíduo recebido). A norma é clara em estipular que não se deve aterrar resíduos classe B (madeira, gesso, etc), e que o monitoramento das substâncias lixiviadas do aterro deve ser feito. Madeira se decompõe, levando a deformação não controlada do aterro. Gesso é solúvel em água e pode contaminar o solo e o lençol freático da região.

Tabela 3 - Critérios para projetar, implantar e operar um aterro de resíduos "inertes" da construção civil. Fonte: ABNT NBR 15.113: 2004 [30].

Condicionantes	Elementos/Critérios
De implantação	<ol style="list-style-type: none"> 1. Localização: a) consonância com a legislação de uso do solo e ambiental vigente e b) local que minimize o impacto ambiental, com base em critérios geológicos, hidrológicos, vegetação, vias de acesso, vida útil (área e volume disponíveis). 2. Acessos, isolamento e sinalização, conforme o apresentado na Tabela 3, evitando-se o acesso de pessoas externas ou animais. 3. Pontos de iluminação, de energia e de telefonia. 4. Aterros (área < 10.000 m²/volume de disposição < 10.000 m³) estão dispensados do sistema de monitoramento de águas. 5. Sistema de drenagem das águas de escoamento superficial, conforme o apresentado na Tabela 3. 6. Treinamento aos funcionários: a) forma de operação, e b) procedimentos em caso de emergência.

ACESSE O MAPA E ENCONTRE A USINA MAIS PRÓXIMA DA SUA OBRA.

mapa.abrecon.org.br



abrecon

Associação Brasileira para Reciclagem de
Resíduos da Construção Civil e Demolição

Condicionantes	Elementos/Critérios
De projeto	<p>1. Memorial Descritivo: a) Informações cadastrais (responsável técnico pelo projeto e empresa responsável pela operação); b) Informações dos resíduos (quantidade mensal disposta, horários de recebimento etc.); c) Informações do local: levantamento planialtimétrico do aterro e entorno (indicação de ruas, estradas, linhas de transmissão de energia, rios e mananciais na escala 1:5000); levantamento planialtimétrico da área de aterro e investigação geológica-geotécnica (escala 1:1000), para avaliação dos riscos de poluição das águas e estabilidade de maciços; caracterização do uso do solo, corpos de água e vegetação existentes na área e no entorno; e descrição do projeto (sequência de preenchimento do aterro; construção sob base capaz de suportá-lo; sistema de drenagem com vazões de dimensionamento, canais, locais de descarga, poços de monitoramento, na escala 1:1000); d) Plano de controle e monitoramento (controle periódico do RCD Classe A (NBR 10.007:2004); monitoramento das águas subterrâneas e superficiais, quando aplicável; inspeção e manutenção dos sistemas de drenagens e da estabilidade do aterro).</p> <p>2. Memorial Técnico: a) cálculo de taludes, bermas etc.; b) capacidade volumétrica da área, quantidade de RCD Classe A a ser disposta e prazo de operação.</p> <p>3. Projeto: a) etapas e sequência construtiva do aterro; b) configuração final, c) cortes transversais e longitudinais do aterro, d) áreas administrativas e de apoio, e) sistemas de proteção ambiental (poços de monitoramento, componentes do sistema de drenagem e do monitoramento da estabilidade do aterro).</p>
De operação	<p>1. Controle de recebimento e triagem do RCD, conforme o apresentado na Tabela 3.</p> <p>2. O RCD Classe A e solos devem ser dispostos em camadas sobrepostas, nunca pela linha de topo.</p> <p>3. Plano de operação, inspeção e monitoramento: a) controle da entrada de resíduos, b) descrição e destinação dos resíduos reciclados e rejeitados, c) registro das análises efetuadas, d) registros das inspeções, e e) dados de monitoramento.</p>

1.3. Estimando a geração do RCD

Para dimensionar uma ou unidades de coleta de RCD, é preciso conhecer os indicadores de geração, tanto na escala do município, ou vários municípios (como em regiões metropolitanas das grandes cidades), quanto na escala de novas obras, residenciais, comerciais, ou demolições de edificações antigas diversas.

Não é simples prever a geração de resíduos em obras de construção [31] pois os indicadores de geração (litros ou kg /m² de piso construído) dependem do projeto de engenharia a ser executado; ou seja, quantos subsolos terá a obra, a quantidade de ambientes (que impacta diretamente a quantidade de paredes de alvenaria, acabamento, etc), se o prédio será de uso comercial ou residencial (o que pode mudar muito a quantidade de componentes pré-fabricados presentes, que estão menos sujeitos a perdas).

Tipicamente, a mediana da geração de resíduos de construção em obras estudadas está em torno de 100 l/m², algo em torno de 100-120 kg/m². Muitas construtoras trabalham com indicadores de geração de resíduos em torno de 50-75 l/m². Edifícios residenciais de alto padrão geram maior quantidade de resíduos que edifícios residenciais de mercado mais popular. Uma discussão detalhada sobre isso e formas de prever esses indicadores de geração de resíduos de obras de construção é feita no manual de gestão ambiental publicado pelo Sinduscon-SP em 2015 [31] (Tabela 4), e outras publicações.

O volume e tipos de resíduos gerados também muda em função do avanço da obra. Nas fases iniciais, grandes quantidades de solos de escavação podem ser geradas. Depois, com a execução da estrutura de concreto armado e paredes de alvenaria, o volume de resíduos de concreto e de alvenaria, aço (em menor quantidade) são predominantes. Ao final da obra, grande diversidade de resíduos, produzidos em pequena quantidade, favorece a mistura dos resíduos e encaminhamento dos mesmos para ATTs, para serem mais bem triados e aproveitados.

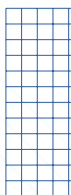
Tabela 4 – Variação dos indicadores de geração de resíduos da construção, excluindo-se o solo de escavação. Fonte: [3]. Nesta referência [3] você pode encontrar as referências citadas dentro desta tabela.

Resíduos (l/m ²)	País	Características das obras	Fonte
25-120	Brasil	Edifícios com vários pavimentos (uso residencial). Estrutura de concreto armado, alvenaria de blocos e revestimentos diversos (argamassa, gesso e cerâmica). Alguns edifícios tem modulação de projeto, divisórias leves de gesso acartonado, paredes de concreto pré-fabricadas.	Este estudo
79-121	Brasil	Edifícios com vários pavimentos (uso residencial).	Couto Neto (2007)(*)
50-370	Brasil	Edifícios com vários pavimentos (uso desconhecido). Estrutura de concreto armado, alvenaria de blocos ou tijolos (com ou sem modulação de projeto, estrutural ou não), podendo conter alguns componentes ou sistemas industrializados (escadas pré-fabricadas, divisórias leves de gesso acartonado).	Dias (2013)(*)
173-295	Brasil	Edifícios com vários pavimentos (uso comercial). Estrutura de concreto armado, alvenaria de blocos (vedação interna) e revestimentos (cerâmica e rocha), podendo conter fachada industrializada não aderida em alumínio e vidro e demolições de edificações antigas.	Silvério (2014)(*)
122-222	Brasil	Edifícios com poucos pavimentos (condomínios horizontais, escolas, agências bancárias), podendo conter demolições de edificações antigas no local.	Carelli (2008)(*)
64-180	Diversos países	Edifícios de concreto armado, com alvenaria de blocos.	Malia (2013)(*)
100-210	China	Edifícios com vários pavimentos, com alvenaria de blocos.	Li et al. (2013)(*)
25-92	Malásia	Edifícios com vários pavimentos, contendo diferentes sistemas construtivos industrializados (vedações pré-moldadas, escadas, módulos de banheiros)	Lachimpadi et al. (2012)(*)

Por outro lado, obras de demolição geram quantidades maiores de resíduos por m^2 de área construída dos edifícios, cerca de $800 \text{ l} / m^2$. Demolições feitas rapidamente costumam não separar determinados componentes e materiais para o reuso, além de gerar misturas de resíduos que vão requerer triagem em ATTs e/ou aterros de inertes e riscos de contaminação (caso haja resíduo perigoso). Em obras de demolição seletiva, é necessário mais tempo mas pode-se focar no aproveitamento de materiais e reciclagem, de modo que os resíduos costumam ser encaminhados mais limpos.

Uma das maiores dificuldades para uma usina de reciclagem é ter a capacidade de receber grandes volumes de resíduos de composições distintas em curto espaço de tempo. As obras de demolição geram quantidades significativas de resíduos de concreto. O volume de resíduo de concreto tende a aumentar com o tempo, porque as cidades e as obras de infraestrutura envelhecem, requerendo obras de demolição com maior frequência. Esta é a realidade da Europa.

Seja para determinadas obras, ou para operar em cidades, recicladores geralmente precisam estimar a quantidade de resíduo gerado. O uso de indicadores de geração de resíduos é o melhor procedimento para fazer essas estimativas. Uma forma simples de estimar a geração de RCD total (incluindo obras de construção, reformas e demolições) no Brasil é usar o indicador per capita (mediana de cerca de 500 kg de RCD/hab.ano). Para uma estimativa mais precisa, pode-se estimar o indicador de resíduo per capita com indicadores socioeconômicos, como o IDH [32].



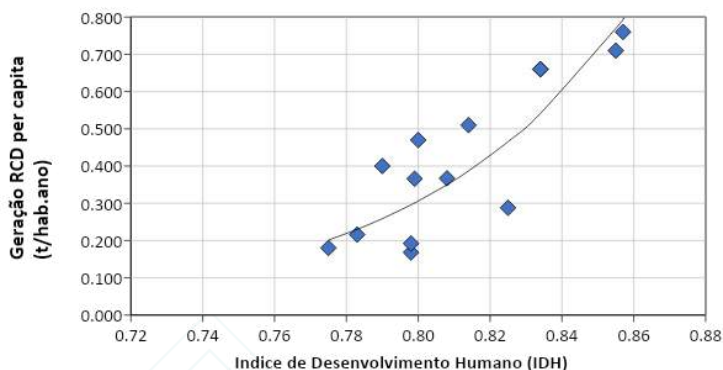


Figura 10 - Correlação entre a geração de RCD per capita e o índice de desenvolvimento humano dos municípios brasileiros (maioria desses situados no estado de São Paulo). Fonte: [32]

2. Usinas de Reciclagem: Processos e Formas de Operação

2.1. Conceitos gerais

Os processos de reciclagem do RCD têm como objetivo a produção de agregado reciclado com distribuição granulométrica definida e categorizar o tipo de agregado reciclado (de resíduo concreto, de resíduo cimentício ou de resíduo misto). De modo simplificado, as usinas de reciclagem são compostas pelas seguintes operações unitárias:

Triagem: processo de separação manual ou mecanizada dos contaminantes presentes no RCD Classe A, tais como madeira, plástico, papel, gesso, aço, etc (tipicamente os resíduos Classe B remanescentes), eventualmente classes C e D (telhas de cimento amianto, etc);

Escalpe: operação de remoção da fração fina presente no RCD, que pode estar em grande proporção devido à mistura de solo de escavação. Quando presente em excesso, o solo pode inviabilizar a especificação dos agregados reciclados e suas aplicações em pavimentação e produtos cimentícios.

Britagem: processo mecânico de fragmentação de partículas por mecanismos de compressão ou impacto, podendo ser realizado em um ou mais estágios de britagem, sendo mais comum no processamento de RCD a britagem primária e secundária

Separação: processos majoritariamente físicos de separação entre as fases presentes; podem ser direcionados para remoção de materiais contaminantes como materiais magnéticos, removidos por eletroímãs, ou outras substâncias indesejáveis, tal como gesso, fragmentos de madeira ou de asfalto, sendo realizadas por separação por densidade em meio fluido com o uso de água ou ar. Os processos de separação tendem a substituir processos de triagem manual que apresentem menor eficiência e maior custo unitário.

Peneiramento e classificação: processo de separação dos agregados em populações com diferentes tamanhos característicos. Para materiais mais grossos, a separação ocorre por peneiramento em faixas granulométricas específicas mediante a passagem do material em um gabarito (peneira). Para os finos (pulverulentos, abaixo de 0,075 mm, algumas vezes indesejáveis para a produção de materiais cimentícios), a separação é realizada por classificação em equipamentos tais como lavadores de roscas (processo à úmido) ou aeroclassificadores (separação de partículas por fluxo de ar).

Os critérios de projeto de uma usina de reciclagem podem variar bastante em função das especificidades de cada resíduo e objetivos do processo. Podem ser de construção mais simples ou mais complexas com diferentes linhas de produção ou automação máxima, sendo identificados os fatores que interferem diretamente na caracterização e qualidade dos produtos obtidos.

As usinas de reciclagem são instalações fixas, ou instalações móveis, localizadas na própria obra geradora do resíduo. As unidades fixas (Figura 11) possuem mais operações de processo, permitem obter maior diversidade de produtos, pode resultar em maior qualidade e tipos de agregados reciclados produzidos.



Figura 11 - Usina fixa com configuração bem simplificada (greiha, britador, combinado ou não com peneira). Pode-se obter tipos diferentes de agregados reciclados; bica corrida mista (para pavimentação) ou agregado cimentício classificado (pedrisco, rachão), solo escalpado (não classificado por tamanho). Fonte da imagem: <https://www.sustentaresaneamento.com.br/reciclagem-de-entulhos/>

As unidades móveis (Figura 12) tem como principal vantagem evitar os custos de transporte, tanto dos resíduos para a usina de reciclagem quanto à aterros autorizados. Tal configuração também possibilita fornecimento de possível suprimento de agregados reciclados para pontos de consumo próximos da obra, o que reduz o preço CIF (custo, seguro e frete) do produto (agregado reciclado).

No entanto, a mobilidade das instalações pode ser um fator limitante frente às possibilidades de configurações de equipamentos e qualidade final do produto, mas não necessariamente.

As usinas móveis usualmente processam um resíduo limpo e homogêneo, resultante de demolições seletivas ou trabalhos específicos que mantenham os processos de gerenciamento de resíduos. Tem uma aplicação bastante difundida quando operam na demolição de obras de pavimento de concreto, dada a homogeneidade do material e possibilidade de venda da sucata de aço removida do pavimento, que apresenta elevado valor comercial e contribui com a lucratividade da reciclagem (Figura 12).



Figura 12 – Britagem de resíduo de concreto obtido em demolição seletiva, combinado com obra de construção próxima ao local. Fonte: Recinert Ambientale

2.2. Operações de processo

2.2.1. Recepção, inspeção visual

O controle de admissão do resíduo na recepção da usina é decisivo quando se trata de alcançar um processo adequado e produtos com qualidade. Nesta etapa deve-se definir o valor apropriado para que o transportador possa dispor o RCD na usina, com base em sua composição. No ano de 2019, o valor variava de 10 a 20 R\$/m³ (50 a 100 R\$/ caçamba de 5 m³) na cidade de São Paulo. Se o resíduo não contiver contaminantes e for homogêneo como o resíduo de concreto, esse valor pode ser inferior pois possibilita a obtenção de um agregado reciclado de melhor qualidade e mais fácil comercialização.

Segundo a NBR 15114/04, somente resíduos classe A podem ser aceitos em área de reciclagem, ou seja, majoritariamente compostos por solo, tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, argamassa, concreto e pré-moldados em concreto (materiais inorgânicos e inertes), para posterior transformação em agregado reciclado.

A pesagem usando balança rodoviária pode ser uma forma de controlar a composição do RCD. A densidade volumétrica esperada para o RCD composto apenas por concreto, cerâmica e cimento deve ser entre 1,2 e 1,4 t/m³. Valores abaixo podem indicar excesso de contaminantes orgânicos (principalmente madeira devido ao elevado volume e densidade reduzida).

Conforme norma, nenhum resíduo pode ser aceito em área de reciclagem sem o conhecimento de sua procedência e composição e a usina deve arquivar os documentos de controle de recebimento do resíduo (controle, manifesto ou nota de transporte de resíduos), referentes às cargas recebidas, mantendo os registros para eventual apresentação de relatório. Deve-se receber e assinar os controles de transporte de resíduos (CTRs, inclusive estando, eventualmente, sujeito a fiscalização (Figura 15).

Deve-se direcionar a pilhas específicas de RCD, a partir da entrada. Em área de reciclagem, deve ser previsto o controle de recebimento e operação, por meio de um plano que contemple: controle de entrada dos resíduos recebidos, discriminação dos procedimentos de triagem, reciclagem, armazenamento e outras operações realizadas na área, descrição e destinação dos resíduos a serem rejeitados, reutilizados e reciclados, controle de qualidade dos produtos gerados (NBR 15114/04). Este plano, contudo, pode variar em função da qualidade/composição do material de entrada. Sendo assim, o funcionário responsável pelo controle pode direcionar o material a diferentes tipos de pilha de armazenamento de entrada, para futuramente destiná-lo a processos mais simples ou complexos na usina, conforme a qualidade/composição do material aceito (ex. separar resíduo de concreto do resíduo cimentício - Figura 13, ou resíduo misto - alvenaria de blocos cerâmicos, argamassas - ou resíduo contaminado com solo - Figura 14).





Figura 13 - Diferença entre resíduos de concreto estrutural (à esquerda) do resíduo cimentício (que contém blocos de vedação - alvenaria cimentícia, argamassas, etc) (à esquerda). Imagens obtidas através do Google Images.



Figura 14 - Diferença entre resíduos de alvenaria contendo cerâmica vermelha (acima) do resíduo misto contaminado com solo (abaixo).
Fonte das imagens: <https://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/outras-pneu-e-entulho/attachment/lixo-entulhos-construcao/> / <https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/bh-em-pauta-entulho-de-construcao-civil-e-reaproveitavel>

CTR - CONTROLE DE TRANSPORTE DE RESÍDUOS (NBR 15.112/2004)

(3 vias : gerador, transportador e destinatário)

(informações mínimas essenciais – podem estar incluídas nos formulários próprios dos transportadores)

1. IDENTIFICAÇÃO DO TRANSPORTADOR			
Nome ou Razão Social:		tel:	
Endereço:		Cadastro Municipal:	
Nome do condutor:		Placa do veículo:	
2. IDENTIFICAÇÃO DO GERADOR			
Nome ou Razão Social:		tel:	
Endereço:		CPF ou CNPJ:	
2.1 ENDEREÇO DA RETIRADA			
Rua/Av.:		Bairro:	Município:
3. IDENTIFICAÇÃO DA ÁREA RECEPTORA DE GRANDES VOLUMES			
Nome ou Razão Social:		Nº da Licença Funcionamento:	
Endereço:		tel:	
4. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO			
Volume transportado	<input type="text"/>	m ³	
	Concreto / Argamassa / Alvenaria	<input type="text"/>	Solo <input type="text"/>
	Volumosos (móveis e outros)	<input type="text"/>	Madeira <input type="text"/>
	Volumosos (podas)	<input type="text"/>	Outros (especificar) <input type="text"/>
5. RESPONSABILIDADES			
Visto do condutor do veículo: _____ Visto do gerador ou responsável pelo serviço: _____			
Visto e carimbo da Área Receptora de Grandes Volumes: _____			
Data: ___/___/___ Horário: ___:___ h			
6. ORIENTAÇÃO AO USUÁRIO (de acordo com a Lei Municipal nº ___ de ___ de ___ e as sanções nela previstas)			
a) o gerador só pode dispor no equipamento de coleta resíduos da construção civil e resíduos volumosos (penalidade Ref. II);			
b) o transportador é proibido de coletar e transportar equipamentos com resíduos domiciliares, industriais e outros (penalidade Ref. VI);			
c) o gerador só pode dispor resíduos até o limite superior original do equipamento (penalidade Ref. III);			
d) o transportador é proibido de deslocar equipamentos com excesso de volume (penalidade Ref. VII);			
e) o transportador é obrigado a usar dispositivo de cobertura de carga dos resíduos (penalidade Ref. XII);			
f) as caçambas devem ser estacionadas prioritariamente no interior do imóvel;			
g) o posicionamento das caçambas em via pública é responsabilidade do transportador – sua posição não pode ser alterada pelo gerador (penalidade Ref. XI);			
h) as caçambas estacionárias podem ser utilizadas pelo prazo máximo de 5 (cinco) dias , ou 48 (quarenta e oito) horas , em vias especiais;			
i) ao gerador é proibido contratar transportador não cadastrado pela administração municipal (penalidade Ref. IV);			
j) o gerador tem o direito de receber do transportador documento de comprovação da correta destinação dos resíduos coletados (penalidade Ref. XIII, ao transportador)			

Figura 15 - Modelo de um Controle de Transporte de Resíduos (CTR) a ser recebido e controlado na usina de reciclagem. Atualmente há sistemas de controle eletrônicos que garantem maior autenticidade e rastreabilidade do processo. Fonte: extraída de [2]

Não é permitido o recebimento de resíduos perigosos, sejam nas usinas de reciclagem, ou nas áreas de triagem e transbordo.

2.2.2. Tratamento Prévio, Limpeza

A operação de seleção manual em pilhas de resíduos tem o objetivo de remover os contaminantes maiores do resíduo antes da alimentação na usina (Figura 16); sua eficiência é baixa porque não permite remover contaminantes que ficam retidos no interior das pilhas e que não são visíveis em um primeiro momento. A eficiência de remoção pode ser inferior a 50%.



Figura 16 – Catação de contaminantes em pilhas cônicas. É o processo mais usado em usinas, porém ineficiente. Fonte: imagem obtida por Carina Ulсен.

2.2.3. Escalpe, remoção dos solos de escavação

Numa usina de reciclagem, antes da alimentação do britador, pode haver um sistema de uma ou mais grelhas (com ou sem sistema de vibração) que tem por finalidade:

a) remover materiais de dimensões acima do limite de entrada no britador de modo a evitar danos no equipamento ou obstruções, o que resultaria em paradas e redução da produtividade.

b) separar os materiais finos que não precisam ser britador por terem dimensão abaixo do tamanho final do material britado e reduzem a capacidade de produção efetiva da usina, além de geralmente conter grande quantidade de solos de escavação, cuja quantidade deve ser controlada por ser considerado um contaminante no agregado reciclado.

Normalmente, o material escalpado (denominados finos naturais, solos de escavação) gerados a partir deste processo são considerados de qualidade inferior ao material da mesma granulometria produzida pela britagem devido ao alto teor de solo (Figura 17). O material pré-selecionado nesta etapa deve ser estocado separadamente do material equivalente britado para ser comercializado em aplicações mais simples.

A eficiência do processo de escalpe é dada em condições particulares: a) poucas partículas finas na fração graúda e b) poucas partículas graúdas na fração fina. Isso ocorre com certa frequência nas usinas de RCD. Além disso, as partículas finas podem aglomerar na presença de umidade e ficar aderida nas partículas graúdas e nas peneiras. Há sistema móveis (Figura 18).



(a) Solo contido no RCD misto

(b) grela para remoção dos finos antes da britagem

Figura 17 - Escalpe por grelha vibratória, antes da alimentação no britador de uma usina fixa de reciclagem. O solo separado geralmente não tem qualidade compatível para ser usado como sub-base de pavimentação, sendo usado para obras geotécnicas (preenchimento do material, sem responsabilidade estrutural, ou de estabilidade). A expansibilidade do material pode ocasionar problema técnico. Fonte da imagem: Sérgio C. Ângulo (a); <https://www.youtube.com/watch?v=kM2mvdCOADM> (b)



Figura 18 - Sistema móvel de peneiramento e triagem, protótipo USP, IPT. Dois produtos peneirados são gerados - rachão reciclado, fino escalpado - solo, pequenos fragmentos de RCD, areia) - material tem qualidade inferior e nem sempre pode ser adequado para uso em pavimentação, eventualmente, usado em manutenção de estrada de terra. Fotos: S. C. Ângulo.

2.2.4. Pré-fragmentação do resíduo de concreto

Especialmente quando se trabalha com resíduos do concreto estrutural, peças de grandes dimensões precisam ser pré-fragmentadas para serem alimentadas no britador primário (Figura 19) [33]. Não é incomum a necessidade de se ter ou alguns rompedores acoplados a escavadeiras. Esses equipamentos são comuns em demolidoras, ou podem ser alugados para compor o parque de equipamentos da usina. O objetivo é separar a armadura de aço do concreto. Esse processo pode ser bastante difícil pois peças com muitas armaduras (vergalhões de aço) enroscam e podem dificultar a remoção do aço. A separação desses dois materiais é fundamental para os processos subsequentes.



Figura 19 – Bolsas de demolição, caçambas dentadas puxam o aço, rompedores são usados para fragmentar o concreto armado, podem ser manuais ou acoplados em escavadeiras. Fonte: acima fotos de Sérgio C. ngulo [33], abaixo fotos de Carina Ulsen.

2.2.5. Cabines (ou mesas) de triagem

A cabine (ou apenas mesas) de triagem corresponde a uma estrutura de apoio, instalada em paralelo a um transportador de correia em posição horizontal, que permite que indivíduos se posicionem lateralmente e, por meio de inspeção visual, realizem a separação manual (seleção manual ou catação) de resíduos não minerais que estejam presentes no RCD (Figura 20). É comum remover o solo, através do escalpe, antes da triagem, porque os finos dificultam a identificação dos materiais classe B (madeira, plástico etc). Além disso, diferenças na dimensão do resíduo bruto também dificultam e afetam a eficiência do processo; por isso, muitas vezes são usados um sistema by-pass, onde a grelha (peneira robusta) separa fragmentos muito grandes, que inclusive podem obstruir, entupir os britadores.

A cabine deve ser projetada para garantir conforto e segurança aos trabalhadores (“triadores”) e, assim, possibilitar que sejam atingidos níveis de produtividade e de eficiência adequados ao esperado na separação manual. Devem ser ambientes cobertos e ventilados, com tamanho adequado à quantidade de postos de trabalho dimensionada. Os indivíduos responsáveis pela triagem devem portar EPI adequado para realização da atividade, o que inclui máscara para poeiras, luva e óculos de proteção. A ventilação é importante para a saúde ocupacional, pois há material particulado no ar. Locais impróprios podem ser caracterizados como trabalho em local confinado.

2.2.6. Extrator magnético

O extrator magnético é basicamente usado para separar o aço presente no RCD.



Figura 20 - Exemplos de cabines (e/ou mesas) de triagem em usinas de reciclagem com pessoal sem todos os EPI recomendados. A vazão de material na alimentação da esteira parece excessivo e fora das condições ideais (mais eficiente) de operação. Foto: S. C. Angulo

É usada tanto antes da britagem, para remoção do aço já separado do concreto, quanto após a britagem, quando os materiais magnéticos tendem a estar mais bem separados do concreto.

Na maioria dos casos, é realizada logo após a britagem, tanto na britagem primária quanto secundária, para evitar que o aço solto danifique os transportadores de correia, usando equipamentos suspensos contendo eletroímã (sem uso de energia elétrica). Separadores magnéticos que usam corrente elétrica separam no sentido contrário, e são mais eficientes.



Figura 21 - Exemplos de separadores magnéticos operando em usinas de reciclagem.

2.2.7. Britagem (primária e secundária)

No caso do RCD, a britagem não serve unicamente para reduzir o tamanho do resíduo para adequá-lo à granulometria definida para os agregados reciclados, mas também para promover melhor separação do concreto (ou argamassa) em si; ou seja, separar a pasta de cimento porosa endurecida do agregado natural (virgem) presente no resíduo (Figura 22). Quando mais agregado natural e menos pasta de cimento porosa contiver no agregado reciclado, melhor será sua qualidade.

Um sistema de reciclagem pode compreender uma ou várias etapas de britagem, onde diferentes tipos de equipamentos podem ser usados. Os mais usados são os de britadores de mandíbulas e de impacto (Figura 23).

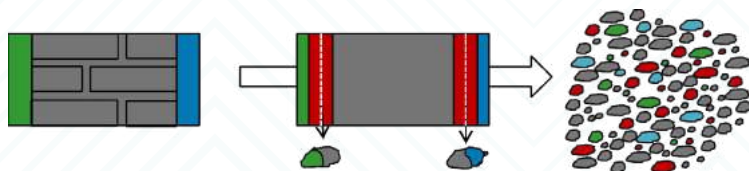


Figura 22 - Ao fragmentar a parede, os diferentes materiais vão separando a medida que se reduz o tamanho dos fragmentos. Quando os materiais estão separados (individualizados), definimos a liberação (condição ideal para operar). Fonte: Anette Mueller, Carina Ulsen.

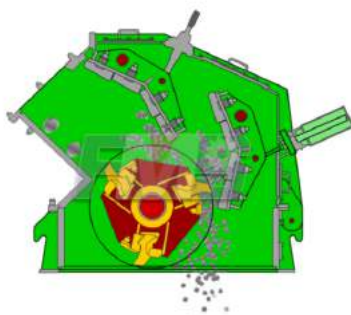
A diferença fundamental entre eles está nos mecanismos de cominuição, (compressão e impacto), que, por consequência, resultam em diferentes relações (fator) de redução (RR). A RR é calculada pela relação de divisão entre a dimensão máxima do material na entrada e a dimensão máxima do material britado na saída.

O britador de impacto reduz, em média, a distribuição granulométrica num fator médio de 13 vezes (200mm/15mm), enquanto o de mandíbula, um fator médio em torno de 7 vezes (300mm/40mm) (Figura 24). Porém, britadores de impacto são mais caros, tanto na aquisição quanto na operação. Problemas operacionais mais sérios como entupimento podem ocorrer, sendo o tempo de parada de produção muito maior.

Britador de mandíbulas



Britador de impacto



<http://tritadoras-de-roca.com>

Figura 23 - Ilustração do funcionamento do britador de mandíbula e o de impacto. Fonte: <http://tritadoras-de-roca.com>

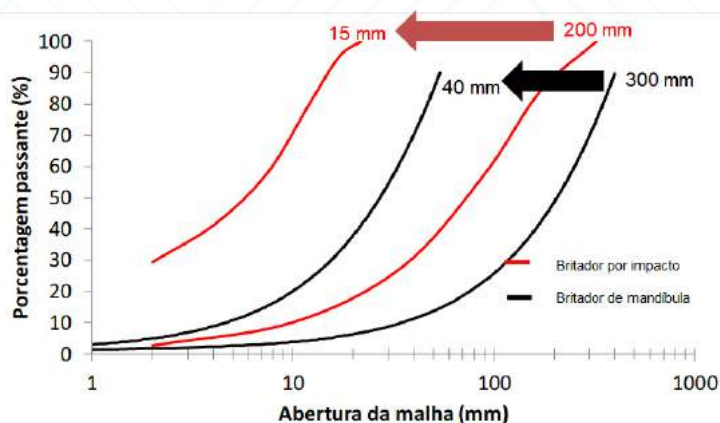


Figura 24 - Granulometria do material, antes e depois da britagem. Em preto, o britador de mandíbula. Em vermelho, o britador de impacto. Observar que cada tipo de britador pode resultar numa granulometria diferentes de produto (agregado reciclado). Figuras semelhantes podem ser obtidas no manual da Metso Minerals [34] e que inclui dados do manual da FAÇO.

Os estágios de britagem impactam na qualidade do agregado reciclado cimentício. Por meio de sucessivos processos de britagem, por exemplo, a quantidade de pasta de cimento aderida pode ser reduzida consideravelmente [35], resultando um agregado reciclado com características mais próximas a do agregado natural, pois a britagem acaba por liberar grande quantidade dos agregados naturais (virgens) antigos que estavam presente no resíduo cimentício.

Algumas empresas de agregados naturais operam com plantas mistas, processamento rocha natural e RCD, o que pode ser vantajoso. O VSI é um tipo de britador de impacto vertical usado como terceiro estágio de britagem (Figura 25) e pode ser adequado para produzir areia reciclada com qualidade similar a areia de brita (tese de Carina Ulzen na USP) ([36]).

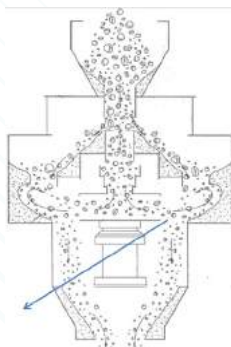


Figura 25 – Vertical Shaft Impactor, britador muito usado em pedreiras, mas também apto ao processamento do RCD. Figura extraída no manual de britagem FAÇO (1994).

2.2.8. Outros equipamentos de separação, beneficiamento

O beneficiamento constitui uma etapa subsequente à cominuição e é utilizada para melhorar a qualidade dos produtos; é realizada por meio de operações unitárias de separações de fases sólidas, e demanda maior aporte de tecnologia. O beneficiamento serve para remover contaminantes (como o gesso, asfalto, pequenos fragmentos de madeira, e outros materiais leves), ou materiais que reduzem a qualidade do agregado reciclado cimentício (como a fração de cerâmica vermelha).

A separação dentre as fases constituintes são realizadas a partir de propriedades que as diferenciem (Figura 26), tais como:

- densidade do material para separação de materiais orgânicos (madeiras, plásticos etc.) menos densos que fases minerais (concretos, cerâmicas);
- tamanho de partículas – partículas finas ou leves suficientemente para serem separadas por sistema de pneumáticos (classificadores ou sopradores);
- cor na separação óptica de fases, seja de modo manual ou por sistemas automatizados (“sorting” óptico), ou por outros tipos de sensores (no espectro do infravermelho etc)

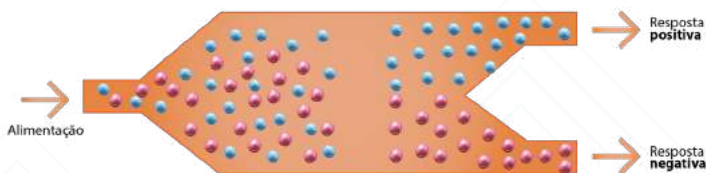


Figura 26 – Princípio da concentração. Uso de propriedades diferenciadoras, tais como a densidade, diferença de cor, etc. Fonte: Carina Ulsen.

2.2.8.1 Sopradores ou ventiladores centrífugos

Os sistemas de separação a base de sopro de ar são sistemas simples e de boa eficiência, que utilizam ventiladores para retirada de impurezas leves (até pedaços de madeira) dos agregados reciclados (pedrisco, rachão). Podem compreender desde simples sopradores a ciclones contendo filtros de manga. Podem ser uma opção interessante a ser instalada em usinas, devido ao baixo custo e por não exigir tecnologia especializada.

Esses sistemas visam remover os contaminantes de menor densidade (normalmente resíduos orgânicos) presentes nos agregados reciclados.

Podem ser instalado diretamente nos transportadores de correia de cada um dos produtos gerados após peneiramento (pedrisco, brita, rachão) para garantir que a vazão de ar seja adequada para cada fração granulométrica. Além disso, deve-se garantir que a camada de material sobre a correia não seja muito espessa, para evitar que material de baixa densidade estejam encobertos por material com maior densidade. Para tal, a largura e da velocidade da correia transportadora devem ser controladas.

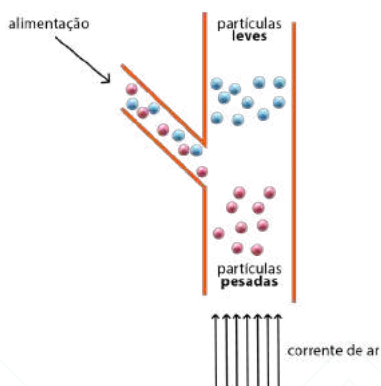


Figura 27 - Materiais leves removidos pela força do ar, em aeroclassificadores (classificadores pneumáticos gravitacionais). Fontes: Sérgio C. Angulo [33], Hendriks et. al. adaptado [37].

Uma dificuldade é encontrar mercado para o aproveitamento deste rejeito misturado de madeira, plásticos e outros elementos leves. Biomassa, para ser incinerada, é uma forma possível de destinação onde aproveita a energia embutida na queima do material, mas tem restrições ambientais, pois requer temperaturas de queima mais altas (acima de 800 graus), não deve conter PVC, dentre outras restrições.

2.2.8.2 Jigues (separação densitária)

Gesso e outros materiais leves que podem vir a contaminar o agregado reciclado podem ser separados por densidade [38]. Esse tipo de processo pode ser a úmido (jigue à água) (Figura 28) ou a seco (jigue pneumático). Para que a separação ocorra é necessário que exista uma certa diferença entre o material que se deseja separar dos outros [39]. Fragmento de madeiras ($d \sim 1,0 \text{ g/cm}^3$), gesso ($d \sim 1,8 \text{ g/cm}^3$) pode ser separado da fração agregado reciclado ($d \sim 2,2 \text{ g/cm}^3$), composta por cerâmica vermelha e concreto. Da mesma forma, cerâmica vermelha ($d \sim 2,0 \text{ g/cm}^3$) pode vir a ser separada do agregado reciclado de concreto de alta qualidade ($d \sim 2,4 \text{ g/cm}^3$) se estas fases estiverem suficientemente liberadas (não agregadas umas às outras).

O processo pode ter uma boa eficiência de separação e melhorar a qualidade do agregado reciclado, mas requer uma usina cuja produção mínima e comercialização de agregados reciclados seja elevada (acima de 100 t/h), para justificar o investimento no equipamento. O equipamento foi implantado apenas em algumas usinas no mundo [33], em países como a Áustria, Alemanha, Holanda, onde havia problemas de contaminação da fração leve (pequenos fragmentos de madeira, plásticos) no agregado reciclado e reduzia a qualidade do agregado reciclado e sua aceitação (teores de contaminantes abaixo de 1%), quando incorporado no concreto. Uma das usinas operava de modo integrado com uma usina de concreto. A operação é utilizada para separar as fases menos densas, e portanto, aumentar a densidade dos produtos obtidos (agregado reciclado) [40,41].

A cerâmica vermelha utilizada no Brasil é normalmente mais porosa que a cerâmica usada na Europa. O agregado reciclado obtido a partir da reciclagem da cerâmica vermelha brasileira tem absorção de água superior a 7%, chegando a 13%, enquanto na Europa, raramente passa de 9%. Dessa forma, as diferenças observadas na qualidade (porosidade) do agregado reciclado são bem maiores.

No jigge pneumático, o meio usado para separar esses materiais presentes nos agregados reciclados é o ar, o que torna a separação menos eficiente entre materiais com densidade mais próxima (concreto, cerâmica). Assim, com esse tipo de equipamento, só se consegue remover os leves (madeira, papel), incluindo gesso [42]. Entretanto, gesso contendo areia é muito pesado para separar de forma eficiente.

A desvantagem do jigge à água é o uso da água, que pode ser recirculada, mas requer instalações mais caras para isso, além de produzir lamas argilosas, que requerem atenção e uma gestão específica para esse tipo de resíduo.



Jigue a água



Figura 28 - Ilustração do jigue à água e o processo de separação por estratificação, que classifica o agregado reciclado em camadas, com composições diferentes. Nas camadas de cima, estão os materiais mais leves (gesso, madeira, asfalto), cerâmica vermelha, depois a fração mais densa, composta por agregado natural e pasta de cimento endurecida do concreto ($d-2,3-2,4 \text{ g/cm}^3$). Fonte: notas de aula Sérgio C. Angulo [41], Khoury et al. [40] catálogo de equipamento da empresa All Mineral, da Alemanha.

2.2.8.3 Separação por sensores

Uma alternativa para beneficiamento de resíduos grossos via seca é a separação por sensores (por cor, por sensores de infravermelho); trata-se de uma tecnologia amplamente empregada em reciclagem de lixo doméstico para separação de papel e diferentes tipos de plástico. O sistema de classificação por cor permite a separação do gesso, madeira, inclusive a cerâmica vermelha [43,44]. O sensor infravermelho próximo (NIR) é um sistema que permite identificar embalagens plásticas, papel, resíduos orgânicos (em geral) em relação aos materiais inorgânicos (como concreto, cerâmica) [45].

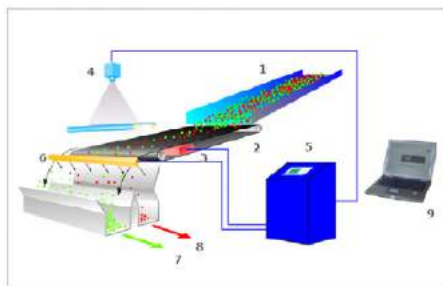
O processo consiste em transportar o material de entrada em uma rampa (por deslizamento) ou por um transportador de correia até a área do sensor. Os sensores identificam e processam eletronicamente as informações sobre os materiais referente aos critérios de ajuste e seleção definidos. Os materiais detectados a partir desta seleção são então ejetados do fluxo de material por jatos de ar pressurizado de alta precisão posicionados no final da rampa ou do transportador.

Alguns modelos possuem sistema de varrimento duplo, o que produz um aumento na confiabilidade do equipamento. Existem processos de varrimento duplo compostos por um primeiro sensor NIR, que identifica os materiais conforme suas propriedades espectrais específicas e únicas de luz refletida, e um segundo sensor NIR, que analisa informações espectrais adicionais. Outros sistemas são compostos por uma combinação de sensor NIR com sensor de espectrometria de luz visível (VIS). Nesses casos, o sistema identifica informações sobre tipos e cor, podendo reconhecer suportes impressos e todas as cores no espectro visível para transparente, incluindo as cores opacas².

A separação tem eficiência de remoção em torno de 85-90% de contaminantes [44] quando as fases estão suficientemente liberadas. Novamente, o investimento se justifica se for operar uma planta de reciclagem de grande capacidade de produção de agregados reciclados (principalmente graúdos dada redução de eficiência nas frações mais finas), pois, do contrário, não se viabiliza o investimento.

2 <https://www.tomra.com/pt-br/sorting/recycling/your-application/waste-sorting/construction-and-demolition-waste>

- 1 Material feed
- 2 Acceleration
- 3 Metal sensor or X-ray sensor
- 4 Line scan camera or X-ray tube
- 5 Data processing
- 6 Air pressure valves
- 7 Accept stream
- 8 Reject stream
- 9 LAN interface to central control room



Tipo de Sensores	Unidades	Diferentes A
Infravermelho (NIR) e Visual (VIS)		TITECH autosort Classificação de Polímeros (papel/ Madeira) e pap
Sensor de Metais		TITECH finder Classificação de Metais ferrosos e Aço inoxidável metais não ferrosos.

Figura 29 - Descrição do funcionamento do equipamento de separação óptica (ou por outros tipos de sensores). Fonte: Mulder et al. [43], catálogos técnicos da empresa Tomra, Titech.



Figura 30 – Resultado da separação dos agregados graúdos mistos por equipamento de separação óptica. É possível separar com eficiência elevada (mais de 90% da massa) a cerâmica vermelha. Fonte: Sérgio C. Ângulo [44]

2.2.9 Peneiramento

A unidade de peneiramento precisa ser dimensionada adequadamente, pela determinação de uma área mínima de tela de peneira; para garantir que o material fique adequadamente separado, o peneiramento deve ocorrer num tempo suficiente, até que ocorra a estratificação das partículas. As frações finas precisam passar pelas grossas e chegar até a tela, de onde, após algumas tentativas, passe efetivamente pela tela da peneira. Telas de 10 até 4 mm, o manual FAÇO exemplifica formas de dimensionar a área de peneiramento necessária. Abaixo disso, o peneiramento se torna mais complexo, requerendo peneiras de alta frequência, inclusive maior área para peneirar, para obter um resultado satisfatório, sendo incomum tais operações para areia reciclada (fina, média, grossa) nas usinas de reciclagem de RCD.

O peneiramento é mais eficiente quando realizado totalmente a seco (umidade abaixo de 3%) ou totalmente à úmido (umidade acima de 100%). No processo a seco, dias de chuva prejudicam a eficiência do processo, pois a umidade aglomera o material fino, impedindo a separação adequada.

Considerar que o agregado reciclado é poroso e já mantém certa umidade no seu interior (3-7%). Em dias chuvosos, aglomera. Preferencialmente operar em dias quentes e secos, pois não são encontradas (ou raramente) usinas cujo estoque de material ou de produto esteja coberto.

Normalmente realizado com o uso de peneiras vibratórias, o peneiramento final é a etapa na qual se realiza a separação do material particulado em frações granulométricas definidas, que caracterizam os produtos comercializados na usina.

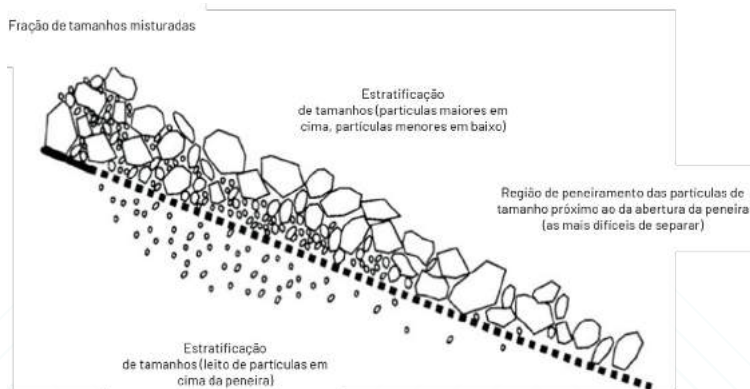


Figura 31 - Como funciona o peneiramento. É preciso haver tempo e área de peneiramento suficiente para que o processo de separação por tamanho seja eficiente. Fonte: Metso Minerals; Chaves e Peres [34,46]

O sistema de peneiramento normalmente é composto por chassi robusto apoiado em molas, mecanismo acionador, com 1 a 4 "decks" (suportes de telas), dispostos horizontalmente ou com uma inclinação de 15º a 35, de acordo com CHAVES e PERES [46]. Geralmente as peneiras vibratórias industriais possuem eficiência entre 90% e 96%. Outros fatores que interferem na eficiência das peneiras são a inclinação, a frequência e amplitude, o comprimento da peneira e a abertura da peneira.

2.2.10 Classificação

Além da questão de contaminantes (madeira, papel, plástico, metal, gesso) que podem impedir o seu aproveitamento do agregado reciclado, é comum também que este produto contenha excesso de finos (abaixo de 0.075 mm). Um dos problemas mencionados acima foi a contaminação do RCD com solo na alimentação, e falta de operação do escalpe, ou adequada classificação no recebimento do material.

Quando o solo é separado do RCD, os finos não prejudicam geralmente as aplicações do agregado reciclado em bases de pavimentação; porém, os seus teores podem ser elevados para o aproveitamento do agregado reciclado para argamassas e concretos plásticos. Os concretos pré-fabricados por prensagem costumam ter uma tolerância maior ao teor dos finos dos agregados reciclados, mas, no caso desses materiais cimentícios que são moldados plasticamente, o excesso de finos aumenta a demanda de água, que acaba por demanda mais cimento, ou precisa ser corrigida com aditivos.

Neste caso, algumas usinas de reciclagem podem optar pelo uso de equipamentos à úmido (operado com água) comumente utilizados na mineração de areia, como um classificador em espiral ou de roscas [47]. A diferença entre estes é que o classificador de roscas promover certa atrição, desaglomerando a argila ainda presente. Considerar que um agregado reciclado contendo um alto teor de cerâmica vermelha pode conter argila, pois a cerâmica vermelha pode não ter sido queimada integralmente; no seu interior, contém argilas. Areia reciclada com alto teor de cerâmica pode requer separação adicional de argilas. O classificador espiral não tem esse processo de atrição.

Ambos os equipamentos promovem a separação dos finos, através de um fluxo de água contracorrente – fluxo de água contrário ao movimento da rosca, de modo que os agregados lavados são conduzidos e desaguados no final do processo. Pode-se, com isso, comercializar uma areia reciclada de melhor qualidade, com menor teor de finos. Porém, deve-se lembrar que as formulações dos materiais cimentícios podem ser ajustadas, de forma a contornar determinadas imperfeições da areia reciclada. O custo da argamassa deve ser avaliado em função do seu desempenho, para verificar a viabilidade de se usar a areia reciclada.

Algumas aplicações são mais simples e nem requerem esse cuidado no processo, como o uso de pedrisco reciclado (fração mista de brita e areia reciclada) absorvida diretamente na fabricação de blocos pré-fabricados, de vedação, intertravados (usados na pavimentação).

Minerações de agregados que comercializam areia de britagem (areia artificial), utilizam aeroclassificadores que separam, por corrente de ar ascendente (a seco), a fração fíler resultante do processo de britagem [36]. São equipamentos utilizadas com boa eficiência também em areias recicladas, separando com eficiência acima de 80%, e quando necessário, essa fração fina. Como desvantagem tem-se a redução da eficiência da separação quando o material contém umidade acima de 2 a 3%, sendo comumente necessário realizar uma etapa anterior de secagem das areias.

2.2.11 Operações auxiliares

Como operações auxiliares em usinas de reciclagem de RCD pode-se citar os sistemas de transporte de material, que estão sempre presentes entre uma e outra etapa de processamento. A depender da necessidade e do porte da usina, o transporte do resíduo em beneficiamento pode ser realizado por transportadores de correias (nome técnico para correias transportadoras).

Chaves e Peres [46] destacam que tratam-se de sistemas de transporte contínuos movidos por energia elétrica mais baratos que os veículos a diesel; são compostas pela esteira, feita com lona, rolo de tração e rolo de carga. A largura da esteira varia em função da capacidade de processamento da usina (de 100 mm a 2.000 mm para usinas de processamento mineral).

Para dimensionamento dos transportadores de correia, deve-se estimar uma largura mínima de pelo menos três vezes a dimensão máxima do material a ser transportado [46].

O controle de material particulado é necessário em usinas de reciclagem de RCD. Medidas de proteção, sanfonada ou transição entre as correias, são necessárias para reduzir a emissão do pó. Britadores e peneiradores são áreas que também geram muito pó; existem equipamentos deste tipo que contam com sistema de captação de pó.



Figura 32 - Captação de material particulado em usina de reciclagem em Berlim, na Alemanha. Fonte: Angulo et al. [33]

2.3 Lay-outs de usinas e tipos de agregados reciclados

No Brasil, as usinas geralmente apresentam configurações simples do ponto de vista de processamento. A maioria das usinas opera com um único estágio de britagem, em britador de impacto ou mandíbulas, que fornecem bica corrida reciclada (< 60 mm), operando com resíduo misto (contendo cerâmica vermelha, junto com material cimentício) (Figura 33).

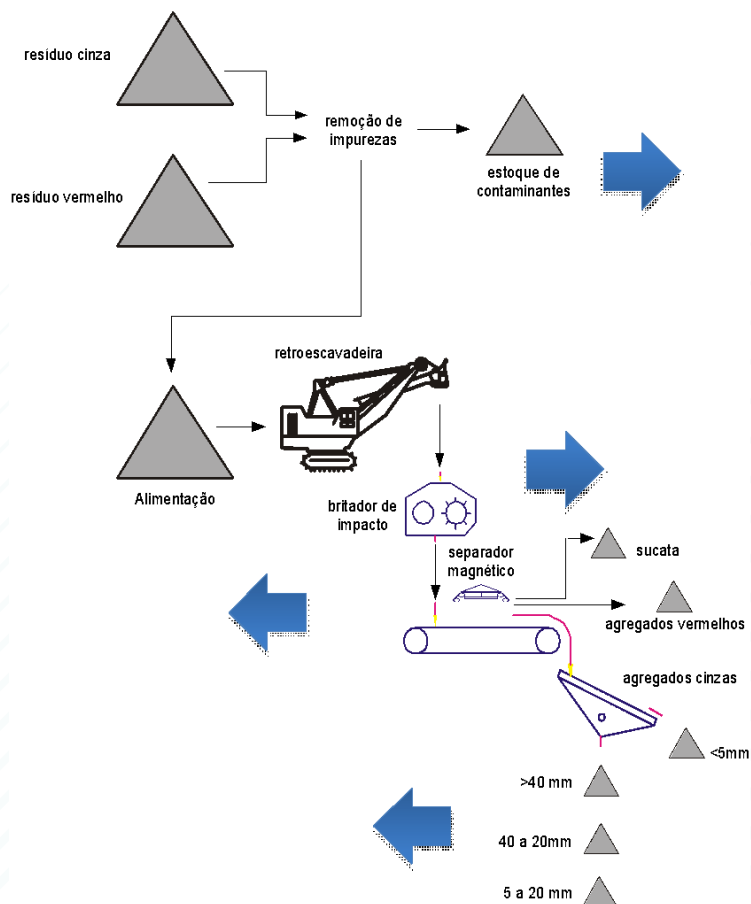


Figura 33 – Típico lay-out das usinas de reciclagem brasileiras. Fonte: S. C. Angulo [48].

Antes do britador, deve haver um processo de remoção dos finos (escalpe) (Figura 34) para separação do solo de escavação (RCD in natura) da bica corrida (obtida pela britagem de concretos e cerâmicas).

Dependendo da fonte de resíduo recebido (reformas, construções), o volume de resíduo de concreto é pequeno. Quando há resíduo cimentício (contendo apenas uma parcela de estruturas de concreto), uma etapa adicional de peneiramento pode ser utilizada para separar até 4 frações de agregados reciclados (rachão cimentício reciclado, as duas frações de brita e areia reciclada (Figura 35) podem ser compostas em brita graduada, material que pode atender requisitos de bases para pavimentação, ou bica corrida, ou pedrisco reciclado, com as duas frações granulométricas menores), direcionado para uso em componentes cimentícios pré-fabricados (blocos, bancos de praças, aparelhos urbanos, etc).



Figura 34 - Escalpe de solo de escavação, bica corrida mista. Imagem extraída a partir do Google images.



Figura 35 - Brita cimentícia (ou de concreto) 10-20 mm; pedrisco cimentício (< 5mm)

Um outro exemplo de usinas de simples configuração operada em Berlim, na Alemanha. O material abaixo de 8 mm é escalpado, contendo basicamente solo (Figura 36). A fração entre 50-8mm passa por uma cabine de catação para descontaminar o material (Figura 37), onde são triados madeiras, plásticos, metais (fios de cobre), vidros, gesso, etc. Três frações são produzidas, tipicamente

operando com resíduo de concreto, rachão de concreto (+ 32mm), brita de concreto (32-8mm), e pedrisco de concreto (< 8 mm). A planta usa um dosador (Figura 38) para acertar a composição granulométrica dos agregados reciclados para uso em pavimentação composta as duas frações granulométricas menores, ou fornece pedrisco de concreto para uso em novos concretos. O dosador tem capacidade de misturar composições das frações de agregados de concreto com frações de agregados mistos. Assim, melhora as condições de venda dos seus produtos reciclados, evitando estoques.



Figura 36 - Solo escarpado na usina de Berlim, Alemanha. Fonte: Sérgio C. Ângulo.

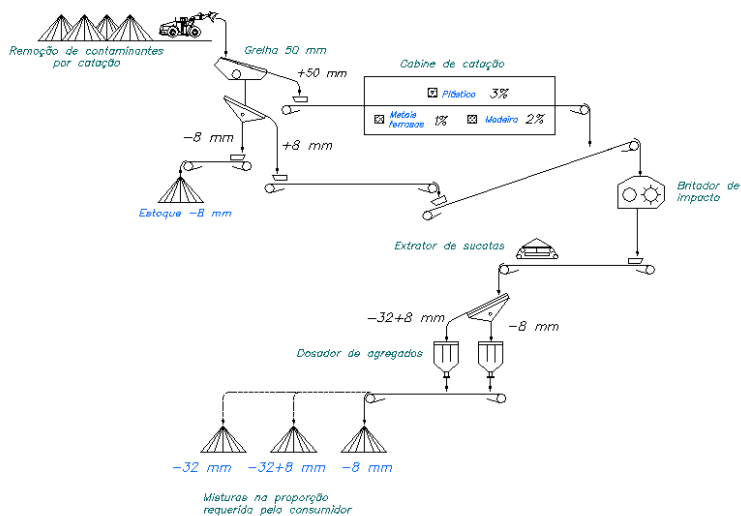


Figura 37 - Lay-out da planta de reciclagem Alemã, que opera com cabine de triagem (com transportador de correia), dosador de agregados, escalpe para salas. Fonte: Ângulo et al. [33].



Figura 38 - Dosador de tipos de agregados reciclados

Uma planta de reciclagem mais completa (considerada estado da arte em reciclagem de RCD na Espanha) foi adquirida pela (antiga) Odebrecht Ambiental na cidade de São Paulo em meados de 2015 (Figura 39). A operação foi difícil de ser viabilizada, devido a elevada quantidade de solos de escavação misturado no RCD, o que resulta menor quantidade prevista de agregado reciclado. Dependendo das condições de recebimento, a falta de controle no aceite do material resultava em agregados com contaminantes acima do permitido por norma, ou, mesmo, quando dentro da especificação, não aceite por clientes. A sujeira visível no agregado reciclado leva a muito engenheiros desistir da compra do agregado reciclado.

A planta, para reduzir os problemas com contaminação e necessidade de triagem, instalou uma unidade de peneiramento e triagem, antes da entrada na usina. Isso otimizou a operação e melhorou a qualidade do agregado reciclado. Verifica-se que não foi possível viabilizar a triagem só com os classificadores pneumático e peneira rotativa, sendo que a triagem manual foi indispensável.



Figura 39 - Ilustração de uma das maiores usinas de reciclagem que operaram na América Latina. Foi propriedade da empresa Odebrecht Ambiental e operou na cidade de São Paulo.

3. Agregados reciclados: especificações e usos

As normas de agregados naturais recomendam que os lotes (unidades de produção comercializáveis, contendo laudos de caracterização da qualidade) não ultrapassem 300 m³ de agregados (de mesma origem), o que normalmente equivale a um dia de produção (usina de pequeno a médio porte). Para fornecimento em obras, são geralmente definidos lotes de 80 a 100 m³ de produção.

O importante é a definição pela usina de reciclagem de quantos tipos de agregados reciclados quer produzir e fornecer, e manter certa regularidade no monitoramento da qualidade deste material. Em geral, adquirido uma balança, um conjunto de peneiras, a maioria dos ensaios pode ser realizada na própria usina, sem a necessidade de realização de muitos ensaios em laboratório terceirizados. Eventualmente, um ensaio de terceira parte pode ser requerido para se atender condições para o fornecimento do material entre construtora e recicladora. Pode ser que essa produção em uma usina de reciclagem seja equivalente a uma semana de produção, ou, até mesmo, um mês; dessa forma, o ideal é realizar ensaios em intervalos semanais, quinzenas ou mensais, dependendo das possibilidades técnicas e financeiras das usinas.

Geralmente é coletada uma amostra representativa do lote de agregado reciclado, que deve ser encaminhada para a realização dos ensaios de controle de qualidade, dependendo da especificação do agregado (brita graduada, bica corrida, areia, pedrisco, brita,) e uso pretendido (para pavimentação, argamassa, concreto).

O procedimento de amostragem descrito na norma ABNT NBR 10.007 [52] pode ser aplicado à amostragem em pilhas ou estoques de produção de agregados reciclados, independente das dimensões dos mesmos. A coleta de material para ensaios deve ser efetuada na pilha de agregados reciclados, em vários pontos distintos, devendo-se evitar que seja efetuada na base e na superfície da pilha, conforme a Figura 40.

Retirar amostra de, pelo menos, 3 seções situadas na base, meio e topo da pilha, sendo que em cada seção devem ser retiradas, no mínimo, 4 alíquotas equidistantes. Para a coleta, o amostrador deve penetrar obliquamente nas pilhas (Figura 1).

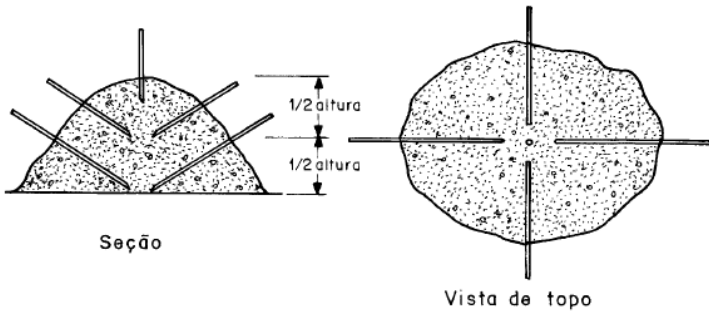


Figura 40 – Locais de retirada de amostras parciais de agregados reciclados em pilhas cônicas. Fonte: ABNT NBR 10.007: 2004 [52].

Emprega-se para a coleta um amostrador Trier, constituído por um tubo alongado com dimensões de 120 cm de comprimento por 10 cm de diâmetro, sendo a ponta de cravação chanfrada e a porção posterior reforçada com chapa de aço para resistir a choques da marreta que normalmente é empregada para cravação do amostrador na pilha de agregado (Figura 41).

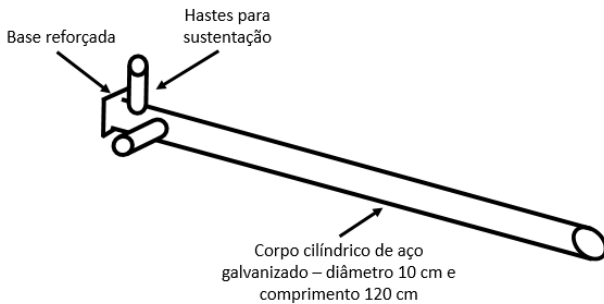


Figura 41 – Amostrador para coleta de agregados reciclados e outros resíduos sólidos granulares.



**VOCÊ É
RESPONSÁVEL**



**PELO ENTULHO
QUE GERA.**

Descarte corretamente.
Preserve o
meio ambiente.

Faça sua parte.



Acesse e entenda:
www.abrecon.org.br

abrecon
Associação Brasileira para Reciclagem de
Resíduos da Construção Civil e Demolição

Mais fácil e mais representativo seria coletar amostras parciais, ao longo da produção dos agregados, nos fluxos de descarga dos transportadores de correias ou silos de armazenagem [53]. A coleta de material para ensaios deve ser efetuada durante a produção (em regime contínuo), evitando-se a coleta logo no início ou final da produção. As amostras parciais devem ser coletadas, tomando-se a seção transversal completa do fluxo de descarga do material, conforme a Figura 42, em diversos intervalos de tempo ou vários pontos de descarga, durante o período ideal da produção. Deve-se coletar, no mínimo, 10 amostras parciais. Esse procedimento atende o estabelecido pela ABNT NBR NM26 [54].

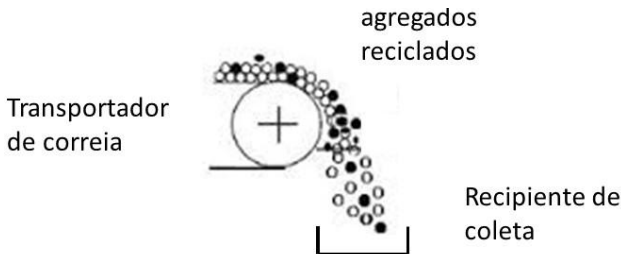


Figura 42 - Procedimento de coleta na descarga dos transportadores de correia. Fonte: Image do google adaptada.

A amostra de campo deve ser formada pela reunião de amostras parciais, conforme estabelecido pela ABNT NBR NM 26 [54]. A amostra de ensaio deve ser obtida pela redução da amostra de campo, através de quarteamento ou uso de separador mecânico, de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR NM 27. As amostras de campo e de ensaio devem respeitar as massas mínimas indicadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade mínima de massa da amostra de ensaio. Adaptado a partir da ABNT NBR NM 26 e ngulo; Mueller [55]

Tamanho nominal do agregado	Amostra de campo - massa mínima kg	Amostra de ensaio - massa mínima kg
< 4,8 mm	40	1
> 4,8 mm <9,5 mm	40	5
>9,5 mm <19 mm	40	10
>19 mm <37,5 mm	75	25
>37,5 mm <75 mm	150	50
>75 mm <125 mm	225	70

NOTAS

- 1 Para agregados de dimensões superiores a 75 mm, a coleta do material em pilha poderá ser realizada com pá.
- 2 Em função da maior variabilidade do agregado reciclado, a massa a ser amostrada é superior ao estabelecido na ABNT NBR 7211 e pelas normas de ensaios correlatas para agregados naturais e britados.

3.1 Tipos dos agregados de RCD

3.1.1 Agregado Reciclado misto (ARM)

O agregado reciclado misto (ARM) (Figura 43) é um tipo de agregado reciclado que contém mais de 10% de fragmentos de cerâmica vermelha em massa, além dos fragmentos de concreto, argamassa (material cimentício), de acordo com a norma ABNT NBR 15.116: 2004 [56]. Geralmente é um tipo de agregado reciclado mais contaminado, pois é originado de fontes de RCD mais heterogêneas com resíduos de obras, onde há escavações de solos, misturas com outros materiais, reformas. Admite-se entre 2 e 3% de contaminantes totais (madeira, plástico, papel, metais, asfalto, vidros, azulejos, fragmentos de louças sanitárias (cerâmicas brancas vidradas) etc.

Os fragmentos de cerâmica vermelha tornam o agregado reciclado de RCD mais poroso, com menor resistência e mais sujeito a quebra devido ao formato mais lamelar. Pela norma brasileira (anexo A, NBR 15116), só se determina a composição da fração graúda do agregado reciclado devido a possibilidade de realização do ensaio de catação (Figura 44) para classificação dos materiais presentes, sendo: a) cimentícios, b) cerâmica vermelha, c) contaminantes, orgânicos e inorgânicos. No caso da fração miúda, o ensaio é feito por contagem de partículas, usando uma lupa estereoscópica, similar a como é feito o ensaio de petrografia de agregados naturais. Detalhes do método podem ser encontrados na norma NBR 15116 e sua recente revisão de 2021.



Figura 43 - Composição típica de um agregado reciclado misto. Essencialmente uma mistura de diferentes materiais cimentícios (concreto, argamassa), e também cerâmica vermelha, fragmentos de rochas, e contaminantes (madeira, asfalto, etc).



Figura 44 - Classificação dos materiais presentes nos agregados reciclados pelo ensaio de catação. O método só é aplicado na fração gráuda (acima de 4,8 mm).

Como esse tipo de agregado reciclado, pode-se desenvolver especificações de certos produtos, agregados com faixa granulometria estabelecida e características/propriedades compatíveis com usos em pavimentação, ou para materiais cimentícios (argamassas e concretos).

3.1.2 Agregado Reciclado de Concreto (ARCO) ou Agregado Reciclado Cimentício (ARCI)

O agregado reciclado de concreto (ARC - internacionalmente, ARCO - nacionalmente) é obtido das etapas de triagem, britagem, peneiramento do resíduo puro de concreto (sem contaminação). Existem muitos tipos de concretos, mas os estruturais (aqueles que compõem elementos estruturais como vigas, pilares, pisos, lajes) são os que geram os melhores agregados reciclados. Possuem apenas aço, que, no processo de britagem é facilmente separado pelo eletroímã, dispensando etapas de catação manual e se trata de um resíduo valioso, que gera parte importante da receita na usina.

O agregado reciclado de concreto é constituído de pasta de cimento endurecida (cerca de 20-30% da massa) e o restante de agregados naturais - brita e areia natural (70-80% da massa). Devido a essa parcela de cimento endurecida na superfície das partículas, o agregado reciclado sofre geralmente mais desgaste em processos de abrasão que o agregado natural e por isso não é utilizado em camadas superficiais de pavimento. No entanto, pode ser usado nas camadas de base, sub base, reforço de subleito, ou outros usos como materiais cimentícios (não sujeitos a abrasão, exposto a ambientes agressivos, como ácidos, etc).

O Agregado reciclado cimentício é obtido por uma mistura de concretos, incluindo os não estruturais (como blocos, pisos) e argamassas. Admite-se até 10% da presença de cerâmica vermelha no agregado reciclado cimentício [57], e geralmente 1% de contaminantes [56]. O agregado reciclado é mais poroso que o agregado natural dada a pasta de cimento endurecida e porosa e geralmente apresenta absorção de água inferior a 7%.



Figura 45 - Agregado reciclado de concreto contém poucos materiais secundários (como cerâmica vermelha, ou contaminantes). A partícula contém uma parcela menor de cimento endurecida, sendo constituído em grande parte por agregados (rochas) naturais.

Devido aos outros tipos de materiais cimentícios, como blocos de concreto usados apenas para vedação (de qualidade inferior), argamassas, etc, o agregado reciclado cimentício torna-se mais poroso que o agregado de concreto. É um erro admitir que um agregado reciclado de concreto estrutural tem a mesma qualidade que um agregado reciclado cimentício (ARCI; composto por misturas de materiais cimentícios) [58].

3.2 Especificações de agregados reciclados: uso na pavimentação

Para se obter um produto que atenda especificações para uso em pavimentação, o agregado reciclado deve estar compreendido em um intervalo granulométrico (faixa de tamanho) definida, dentre outras características (Tabela 6).

Tabela 6 – Especificação de uso de agregados reciclados em pavimentação (NBR 15.115: 2004) [59].

Propriedades	Agregado reciclado, obtido por RCD classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Distribuição granulométrica	Não uniforme e bem graduado com coeficiente de uniforme $C_u > 10$		ABNT NBR 7181	
Dimensão máxima característica	$\leq 63\text{mm}$		ABNT NBR NM 248	
Índice de forma	≤ 3	-	ABNT NBR 7809	-
Teor de material passante na peneira de 0,42mm	Entre 10% e 40%		ABNT NBR 7181	
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características		Anexo A	Anexo B
	Materiais não minerais de características distintas		Anexo A	Anexo B

Para os efeitos desta Norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para a execução de base de pavimento	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada.

Permitindo o uso com material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 104$ repetições do eixo de 8,2 tf (80kN) no período de projeto.

A NBR 15.115: 2004 estabelece as especificações para uso do agregado reciclado em camadas de pavimentos flexíveis. Os usos previstos dos agregados reciclados são como reforço de subleito, revestimento primário, subbase (Figura 47) e base do pavimento, geralmente flexível. A diferença básica será no valor de compactação que esse material consegue alcançar, avaliada pelo ensaio de CBR (compaction bearing ratio) e na expansibilidade. Diferentes energias de compactação são previstas, pois possuem relação com a prática de execução que emprega equipamentos diferentes e com maior energia de compactação, a medida que se executa as camadas de pavimento.

A granulometria do agregado para subbase deve ser abaixo de 63 mm (o ideal é abaixo de 50 mm), e não conter fração fina em falta ou em excesso (10-40% no máximo de fração passante em 0,42 mm). O agregado reciclado mais usado é o misto (ARM), conhecido como bica corrida mista.



Figura 46 - Bica corrida reciclada (50-0mm), a partir de resíduo de construção misto (contendo cerâmica vermelha).

A especificação usada na pavimentação urbana na cidade de São Paulo (PMSP/SP ETS 001/2003) considera especificações bastante similares a NBR 15.115, estabelecendo apenas um critério adicional: coeficiente de curvatura (Cc) entre 1 e 3. Ambas as especificações permitem o uso do material como sub-bases e bases em vias de tráfego não muito intenso ($N \leq 106$ repetições do eixo padrão de 80kN), como grandes avenidas.



Figura 47 - Sequência de execução de uma subbase de pavimento flexível com bica corrida reciclada.

O teor de cerâmica vermelha no agregado reciclado misto afeta o teor de umidade ótimo (Figura 48); ou seja, aquele resulta a melhor condição de compactação do material para uso como sub-bases e bases de pavimento. Para uma aplicação adequada, é importante fazer ensaios de compactação e determinar/controlar a umidade ótima e densidade máxima de compactação.

Como pode ocorrer a quebra dos agregados devido a energia de compactação usada, estudos indicam que a energia deve ser, no mínimo, intermediária (Figura 49), favorecendo o processo de quebra já na execução, antes da liberação de uso, o que poderia acarretar problemas futuros.

A mistura com o solo é que leva a falta de conformidade do agregado, alternando o coeficiente de uniformidade, e correndo o risco de tornar o agregado misturado com solo expansivo, um parâmetro crítico de controle de qualidade para uso na pavimentação. Deve ser uma curva granulométrica contínua; ou seja, ter diferentes tamanhos e crescer continuamente, sem faltar frações de determinados tamanhos dentro do intervalo. Tipicamente uma bica corrida reciclada contaminada com solo tem o aspecto abaixo. Dependendo da expansibilidade, são possíveis alguns usos geotécnicos, como preenchimento de valas, certos tipos de aterramentos simples [60].

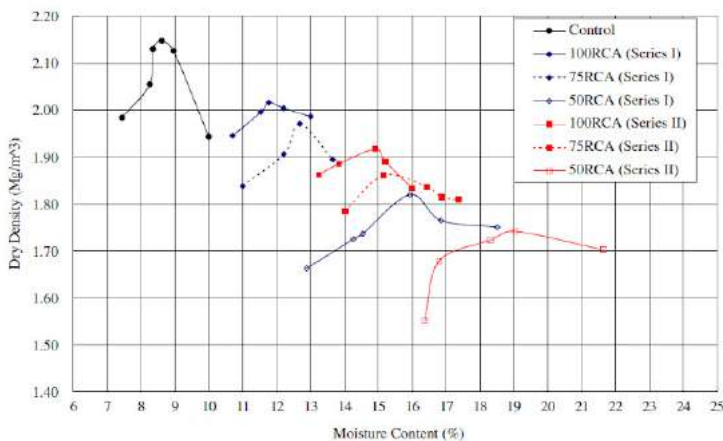


Figura 48 - Efeito do tipo de agregado reciclado no teor de umidade e densidade ótima durante a compactação. As curvas mais à esquerda são obtidas com agregados reciclados mistos, contendo maior teor de cerâmica vermelha. Por consequência, a umidade aumenta, porque o agregado se torna mais poroso, e a densidade ótima no estado compactado cai. Fonte: Poon, Chan [61].

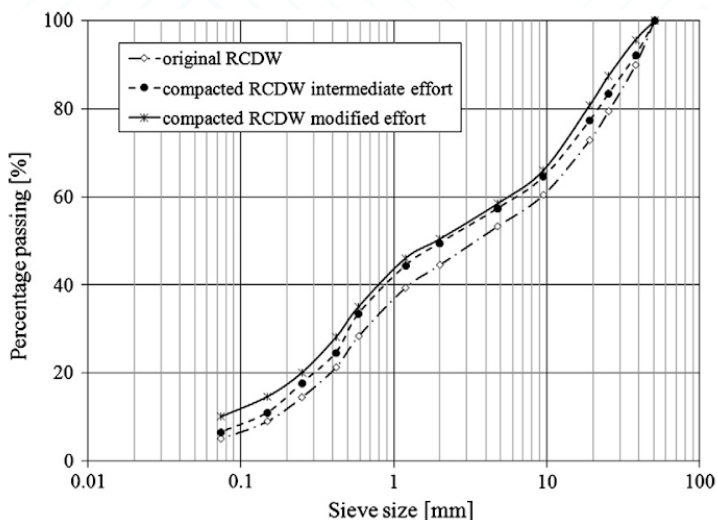


Figura 49 - Efeito que a energia de compactação pode causar na granulometria do agregado reciclado. Durante a compactação, o agregado reciclado pode quebrar, podendo afetar condições operacionais na execução (alteração do teor de umidade ótima, etc.) e de qualidade do pavimento (com maior deformação permanente). Fonte: Leite et al. [62].

Os contaminantes de uma única natureza (p. ex. madeira apenas, ou qualquer outro tipo de contaminante exclusivo) não pode ultrapassar 2% da massa do agregado. A soma dos diferentes tipos de contaminantes não deve ultrapassar 3% [59].

Pode-se também produzir brita graduada simples (20-0 mm), produzida a partir de agregados reciclado de concreto (ARCO), que tem a qualidade compatível com base granular de pavimento flexível, até de rodovias (semi-rígidos, ou rígidos) [63]. Pode-se produzir esse tipo de material usando dosadores de agregados (empregado geralmente em usinas de asfaltos ou pedreiras). Usa-se os intervalos granulométricos especificados na NBR 11803 ou similares especificados pelo DNER, podendo realizar estabilização adicional com cimento, formando o material conhecido como BGTC (brita graduada tratada com cimento).

3.3 Especificações de agregados reciclados: uso em argamassas

Areias recicladas, principalmente as cimentícias, podem ser utilizadas em argamassas não estruturais [64], tal como as usadas no assentamento de blocos em paredes de alvenaria, ou revestimentos internos (protegidas do meio externo). O uso das areias recicladas podem ser uma alternativa viável e comercialmente interessante, especialmente em cidades onde o custo da areia natural é muito elevado, devido as longas distâncias das jazidas.

Grautes, microconcretos ou determinados tipos de argamassas estruturais possuem controle rígido de resistência e retração, podendo ser incompatível com determinadas características do agregado reciclado.



Figura 50 - Areia reciclada cimentícia usada para produzir argamassa de assentamento e revestimento em obra.

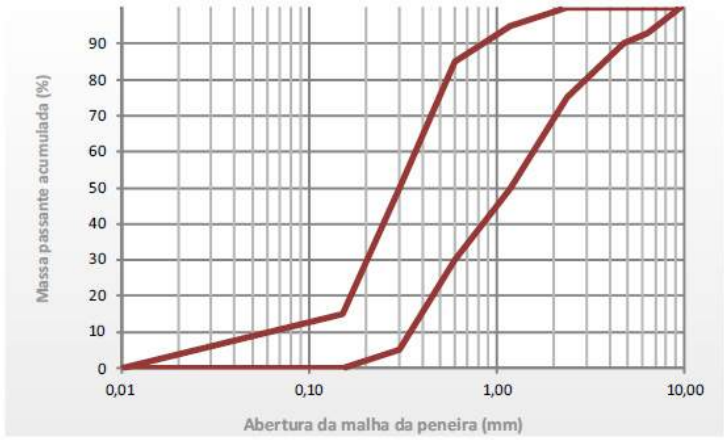
O uso de agregado reciclado na argamassa pode alterar propriedades importantes deste material, implicando, por exemplo, em redução de resistência de aderência e aumento da fissuração do revestimento, aumento da permeabilidade, etc [64]. Cuidados devem ser tomados, para desenvolver produtos compatíveis com o desempenho esperado na edificação.



Figura 51 – Ensaios de arrancamento que medem a resistência de aderência e testes de fissuração são realizados normalmente em obras, antes de se adotar ou padronizar um procedimento de execução da argamassa de revestimento numa construtora. Esse tipo de tecnologia é afetado pelo treinamento da mão-de-obra. Recomenda-se uso apenas como revestimento interno. Fonte: Alexandre Brites.

Assim, a areia reciclada tende a ser direcionada a serviços menos exigentes como argamassas de assentamento, enchimento de tubulações, cortinas ou outros usos secundários. Nessas aplicações, a areia se destaca pelo menor custo e por não necessitar adição de cimento ou cal, a depender da aplicação desejada, visto que seu teor de finos elevado pode conferir à massa trabalhabilidade e coesão mecânica suficientes para baixas resistências.

A areia reciclada é geralmente especificada para atender uma zona granulométrica utilizável, estabelecida dentro da NBR 7211: 2009 [65]. Bons resultados de qualidade de revestimento de argamassas foram obtidos usando areias recicladas com teores de materiais finos (pulverulentos) abaixo de 10% e absorção de água do agregado reciclado inferior a 6%, o que corresponde geralmente a uma areia cimentícia; ou seja, com teores de cerâmica vermelha até 10%. Essas recomendações foram obtidas na conclusão da tese de Leonardo Miranda na USP [47].



Valores Limites

Teos de contaminantes
(NBR 15116: 2004)

< 2% da massa (para cada tipo)
< 3% (todos os tipos)

Absorção de água
(NM 30: 2001)

< 6% da massa

Granulometria
(NBR 7211: 2005)

Dentro da zona utilizável

Teor de material fino
(NM 46: 2003)

<23% na argamassa seca
< 10% na areia reciclada

Figura 52 - Especificação sugerida para a areia reciclada. Manual de resíduos (2015) - sinduscon-sp [3]; Dissertação-tese (Leonardo Miranda - Poli USP); ABNT NBR 7211: 2009 [47,64,65]

Deve-se evitar contaminação com solo, pois aglomeram e são mais difíceis de dispersar, sem uso de aditivos. Formulações com teores mais elevados de finos são possíveis, mas requerem uso de aditivos nas formulações, podendo encarecer a argamassa, tornando o produto menos competitivo comercialmente.

Deve-se também ficar atento com contaminantes como vidros, louças sanitárias (cerâmicas brancas vidradas), pois estes contaminantes podem tornar o agregado reciclado reativo (Figura 53), causando patologias e problemas de durabilidade dos materiais cimentícios, tipicamente conhecida como reação álcali-silica. Uma avaliação deve ser feita de acordo com normas brasileiras e, se reativo, ações de mitigação podem ser adotadas usando cimentos pozolânicos, restringindo-se as condições de uso e exposição do produto a ambientes secos.

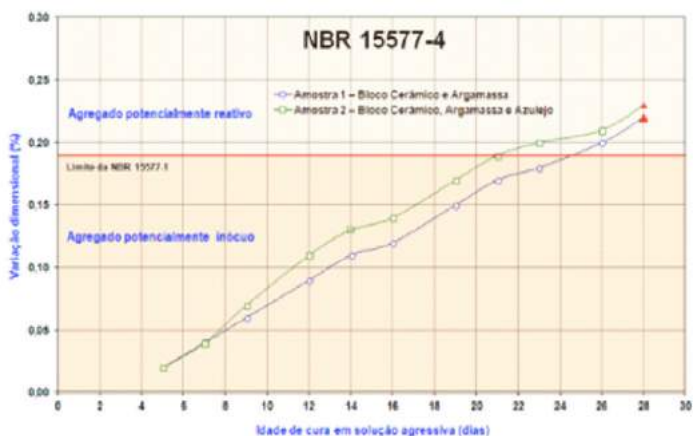


Figura 53 - Testes particulares como o da reação álcali-silica (RAS) da areia reciclada podem ser necessária para garantir um desempenho da argamassa reciclada.

Demonstrações práticas da operação de reciclagem e uso de areia reciclada em argamassas foi feito com sucesso em construtoras de São Paulo, usando resíduos triados dentro da própria obra e dosando a argamassa dentro dessas obras, com teores de até 20% de substituição da areia natural pela reciclada [31]. No caso dessa construtora, a dosagem da areia era feita em sacos de agregado (em volume), e sacos de cimento e cal, em massa, e produzida dentro da própria obra. Nem todas as construtoras optam por produzir argamassas dentro do canteiro, sendo uma particularidade (não uma regra para o setor).

O interessante foi reduzir em mais de 50% o volume de resíduo transportado e destinado a outros locais, para o aproveitamento. Pequenos recicladores entravam na obra, realizando serviços terceirizados de reciclagem (com britadores portáteis, de pequena dimensão) e fornecendo a areia reciclada já ensacada, no local de dosagem de argamassa da obra. A dosagem em massa e uso de argamassas de caráter mais industrializado (contendo vários aditivos) pode ser preferível em parte dos casos práticos.



REVESTIMENTO INTERNO – EXTERNO



Figura 54 – Britador portátil usado para viabilizar reciclagem na obra. Por ser um britador de impacto com tela na saída, areia reciclada cimentícia e mista era produzida. O uso do material era para argamassas de assentamento, e/ou revestimento. Fonte: SINDUSCON-SP [31]. A ilustração abaixo é do traço usado na argamassa reciclada em obra. Fonte: Alexandre Brites (palestra dado no curso de Eng Civil da Poli USP)

3.4 Especificações de agregados reciclados: uso em concretos

Para uso de agregados reciclados em concretos, deve-se seguir a NBR 7211: 2009 [65], que foi feita para especificar agregados naturais, mas serve perfeitamente para classificar a fração granulométrica dos agregados. Agregados graúdos devem ser fornecidos em zonas granulométricas pré-estabelecidas; as mais comuns são 4,75/12,5 mm (pedrisco); 9,5/25 mm (britas).

Em argamassas e concretos não estruturais, são permitidos o uso de agregados reciclados cimentícios (ARCI) e de concreto (ARCO), em até 100% de substituição dos agregados naturais pelos reciclados, que atendam os requisitos da Tabela 7

(revisão da ABNT NBR 15116 [56]). Em geral, os requisitos são muito semelhantes aos especificados para os agregados naturais. Além do controle de composição e da zona granulométrica, a absorção de água e o teor de finos (pulverulentos) é estipulado, procurando evitar misturas pouco econômicas e/ou eficientes, além de cuidados adicionais com determinados tipos e contaminantes (argilas, gesso, medido não só pela catação, mas também pelo teor de sulfatos, cloretos). Regiões perto do mar pode vir a ter contaminação de cloro no agregado reciclado, ou contaminações com outras fontes de resíduos.

Tabela 7 - Requisitos específicos dos agregados reciclados para uso em argamassas e concretos.

		Ensaio	Limite sugerido	Referência normativa	Método de ensaio
Qualificação	Composição	Classe ARCO - teor de cerâmica vermelha	0 %		Anexo A
		Classe ARCI - teor de cerâmica vermelha	< 10 %		
		Teor de contaminantes - madeira, plástico, papel, metais, asfalto, vidros, azulejos, louças e similares	< 1 %		
	Argila	Teor	< 3 %	ABNT NBR 7211	
	Sulfatos	Teor	< 0,1 %	ABNT NBR 7211	
	Cloretos	Teor para concreto simples	< 0,2 %	ABNT NBR 7211	
Teor para concreto armado		< 0,1 %	ABNT NBR 7211		
Teor para concreto protendido		< 0,01 %	ABNT NBR 7211		
Controle	Absorção de água	Classe ARCO	< 7 %		
		Classe ARCI ou ARMI	< 12 %		
	Finos (< 0,075 mm)	Teor para concretos protegidos de desgaste superficial	< 12 %	ABNT NBR 7211 Item 5.2.2	ABNT NBR NM 46
		Teor para concretos submetidos a desgaste superficial	< 10 %		

3.4.1 Não estruturais

Pedriscos reciclados de materiais cimentícios (ou de resíduos de concreto) ou pós de pedra (6,3/0mm) (Figura 55) têm sido produzidos em usinas de reciclagem e fornecidos para empresas que fabricam e comercializam blocos de concreto para alvenarias de vedação [31]. Geralmente são produzidos componentes de concreto não estrutural, sem responsabilidade estrutural.

Na cidade de São Paulo, há exemplo de implantação de processo de logística reversa entre construtora e fabricante de bloco. As quebras de blocos retornavam como resíduo a fábrica de bloco, que o reciclava. A construtora, por outro lado, concordava em receber blocos de concreto que continham teores incorporados de pedrisco reciclado de até 5% da massa do produto, pois nesta faixa de trabalho, nenhuma influência foi observada na qualidade do bloco fornecido.



Figura 55 - Pedrisco (6,3-0mm) reciclado cimentício, usado na confecção de componentes pré-fabricados de concreto (como blocos de vedação e pavers - blocos de pavimentos intertravados).

As empresas fabricantes de blocos de concreto para alvenaria de vedação geralmente controlam a granulometria da composição (mistura de agregados) usada na formulação do concreto, mantendo dentro das faixas sugeridas por fabricantes das máquinas de prensagem dos blocos (vibropressas) (Figura 56 e Figura 57). Estudos experimentais feitos indicam que a granulometria dos agregados contida nesta faixa resulta em produtos com bom acabamento e dentro da faixa de consumo de cimento aceitável. Neste tipo de produto, o custo é bastante impactado pelo custo de cimento, e do agregado (pois é usado em grande quantidade na formulação - traço - do concreto).

O problema é que geralmente muitas destas empresas são proprietárias ou estão instaladas perto de pedreiras, o que torna o agregado reciclado pouco competitivo, quando se inclui o preço do frete. Mas, blocos são fornecidos diariamente em grandes quantidades, e os fretes de retorno (caminhões que voltam vazios) podem fornecer boas oportunidades de negócio entre usinas de reciclagem e fornecedores de materiais cimentícios, como já ocorrido no exemplo da parceria de logística reversa entre construtora-fabricante de bloco, ou, em casos, aonde a fábrica de blocos é instalada dentro da usina de reciclagem, eliminando o custo de frete para fornecimento de agregados reciclados.

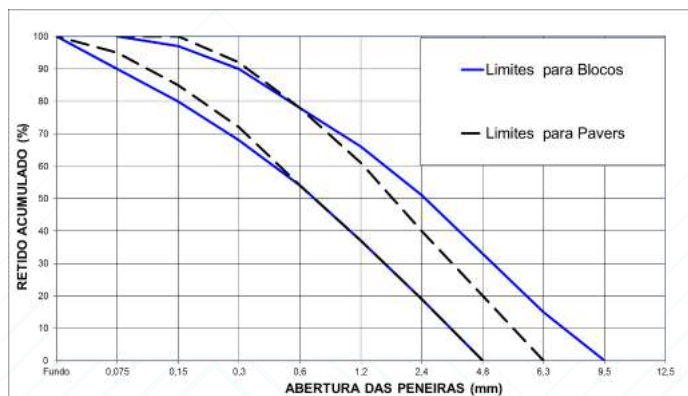


Figura 56 - Limites granulométricos sugeridos para blocos e pavers. Fonte: [66,67]

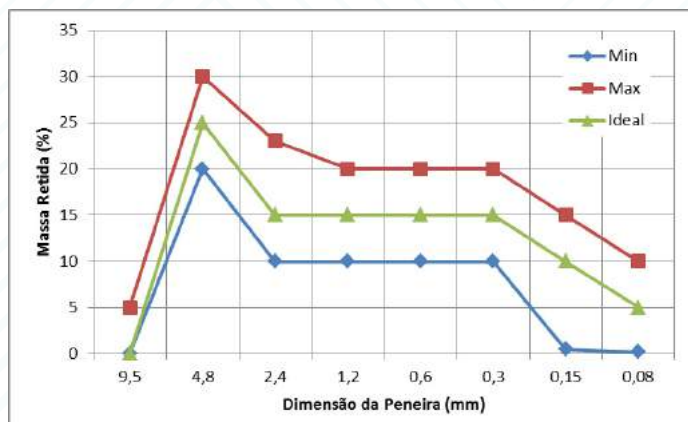


Figura 57 - Limites granulométricos para Blocos proposto por Pfeiffenberger em 1985 Fonte: [66-68]



Figura 58 - Bloco de vedação cimentício pré-fabricado. Esse material é produzido com um tipo de concreto vibroprensado e compactado em condição úmida, mas seca.

3.4.2 Estruturais

Há exemplos de obras que incorporam o agregado reciclado de concreto em elementos estruturais de concreto em edifícios, mas o uso é ainda pouco disseminado, seja no Brasil ou no mundo. A maioria dos exemplos de uso ocorrem em países como Alemanha e Suíça (Tabela 8).

O uso de agregado reciclado para a produção de concreto estrutural já é normatizado em países como Alemanha, Inglaterra, e Espanha. Como exemplo, citam-se as normativas espanhola (EHE, 2008) e alemã (DIN 4226-part 100). Para não ter preocupações com relação a durabilidade do concreto, as normas limitam 20% o teor de substituição de agregado naturais por agregados graúdos reciclados de concreto. Nesta condição, pouca influência é observada na resistência e na deformabilidade do concreto [58], podendo ser adotados os mesmos procedimentos padrão para o projeto e dimensionamento estrutural do concreto armado. Recentemente, o uso do agregado reciclado de concreto no concreto estrutural foi normatizado pela NBR 15116, revisão de 2021, e autoriza até 20% de teor de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto, e limitada a ambientes de menor classe de agressividade (ambientes internos, totalmente úmidos ou secos, sem poluição).

Não se usa geralmente a areia reciclada de concreto ou de outra natureza, pois estas influenciam mais a trabalhabilidade do concreto. Usa-se geralmente a fração graúda do agregado reciclado de concreto.

O agregado reciclado pode alterar a trabalhabilidade do concreto, geralmente medida através do ensaio de abatimento do tronco de cone [58] (Figura 59). Para se minimizar este efeito, se recomenda pré-saturar o agregado reciclado, com ~70-90% do valor obtido no ensaio de absorção de água.

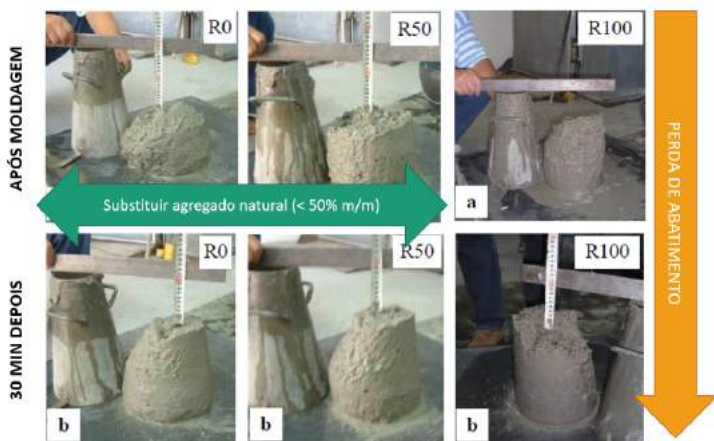



Figura 59 - Alteração na consistência do concreto, em função da substituição do agregado natural pelo agregado graúdo reciclado de concreto, e do tempo. Fonte: [69] adaptada.

Tabela 8 - Obras que usam o agregado reciclado em concreto estrutural.

Obras	Características Principais
<p>Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 1995 Osnabrueck - Alemanha</p> 	<p>Parede de concreto armado (uso interno)</p> <p>Volume utilizado: 200 m³.</p> <p>Características do concreto $f_{ck}=30$ MPa; $f_{c28}=41$ MPa Ligante (cimento, cinza volante) = 360 kg/m³ ARC (4-32 mm)=893 kg/m³ Areia natural (0-2mm)= 669 kg/m³ Água=200 kg/m³ (a/c=0,55)</p> <p>100% de substituição da fração graúda do agregado natural por ARC</p>

Obras

Características Principais

Building Research Establishment, 1996
Londres, Inglaterra



Piso de concreto (uso interno)

Volume utilizado: 500 m³.

Características do concreto

fck=30 MPa

ARM – até 50% de cerâmica vermelha.

Contaminantes como asfalto, plástico, vidro (<5 % da massa)

20% da fração graúda do agregado natural pelo ARM

Gewerbe- und Parkhaus, Völbeler Weg, 1998
Darmstadt – Alemanha



Pilares, paredes e lajes de concreto (uso interno)

Volume utilizado: 461 m³.

Características do concreto

fck=35 MPa; fc28=45 MPa

Ligante (cimento, cinza volante) = 350 kg/m³

ARC (2-16mm) = 1.113 kg/m³

Água=170 kg/m³ (a/c=0,55)

100% de substituição da fração graúda do agregado natural por ARC e

30% de substituição da fração miúda do agregado natural por ARC

Projekt Stuttgart-Ost, 2010
Stuttgart – Alemanha



Pisos, paredes e lajes de concreto

Volume utilizado: 1.500 m³

Características do concreto

1. Classes de exposição Xo (sem ataque)

fck=8/10 MPa e fck= 12/15 MPa

2. Classes de exposição XC3 e XC4 (local úmido)

fck=20/25 MPa e fck= 25/30 MPa

3. Classes de exposição XC1 e XC3 (seco ou moderadamente úmido, interno)

Obras		Características Principais			
Krisenbe- zugs- kategorie	Einwirkung und Beanspruchung	Expositionsklassen (Umweltwirkungen, „Angriffe“) Exposure classes (environmental effects, „attacks“)	Belastungstechnische Maßnahmen („Widerstände“) Concrete technology measures („resistances“)		
			Max. zulz. max. zulz.	Min. z min. z	
				f_{ct} , cube f_{ct} , cube	
XD	kein Angriff no attack	kein Betonangriff no concrete attack	keine Anforderung no requirement	keine Anforderung no requirement	C8/10 C8/10
XC	1	HO broken dry	0,75	240	C16/20
	2	HO mod-fig. Nass moderately moist	0,75	240	C16/20
	3	HO mäßige Feuchtigkeit moderately moist	0,65	200	C16/20
	4	HO Carbonatisierung carbonation	0,50	180	C15/20
XDU XS	1	HO mäßige Feuchtigkeit moderately moist	0,75	300	C19/27
	2	HO ständig Nass constantly wet	0,50	320	C19/27
	3	HO Chlorid- angriff chloride	0,45	320	C19/27
XF	1	HO mäßige Wässern, n. T. moderate water saturation (n. T.)	0,60	280	C15/20
	2	HO mäßige Wässern, m. T. moderate water saturation (m. T.)	0,35 + LP	300	C19/27
	3	HO hohe Wässern, o. T. high water saturation (o. T.)	0,50	320	C19/27
	4	HO hohe Wässern, m. T. high water saturation (m. T.)	0,30 + LP	320	C19/27
XA	1	HO Schwach angegriffen weakly corrosive	0,50	280	C15/20
	2	HO mäßig angegriffen moderately corrosive	0,50	320	C19/27
	3	HO Chlorid-angriff chloride attack	0,45	320	C19/27
XMH	1	HO mäßiger Verschleiß moderate wear	0,75	300	C19/27
	2	HO starker Verschleiß severe wear	0,45	320	C19/27
	3	HO sehr starker Verschleiß very severe wear	0,45	320	C19/27

Loteamentos residenciais, escolas
Zurich - Suíça



Paredes estruturais de concreto

Agregado reciclado misto
teor de cerâmica - 5-20% da massa

Formulação
Cimento=330 kg/m³
Densidade> 2.050 kg/m³
C 30/37 MPa, XC1 (seco)
Aditivo policarboxilato

Substituição total (100%) do agregado gráudo natural
por agregado gráudo misto

Projeto
Levou em consideração maior fluência e maior
retração (2 x maior)

4. Referências Bibliográficas

- [1] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Resíduos sólidos - Classificação, ABNT, Rio de Janeiro, 2004.
- [2] Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução no 307: estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, Brasília, 2002.
- [3] NATIONAL PAINT AND COATINGS ASSOCIATION (NPCA), Guidance Manual for Paint Reuse Programs., NPCA, Washington, D.C., 2008a. <http://www.paint.org>.
- [4] NATIONAL PAINT AND COATINGS ASSOCIATION (NPCA)., Protocol for Management of Post-Consumer Paint, Washington, D.C., 2008b. <http://www.paint.org>.
- [5] F.P. Torgal, S. Jalali, A. Fucic, eds., Toxicity of building materials, Woodhead Publ, Oxford, 2012.
- [6] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), Managing your environmental responsibilities: a planning guide for construction and development, EPA, Estados Unidos, 2004. <http://www.epa.gov/osw>.
- [7] G. Jacobi, H. Solo-Gabriele, B. Dubey, T. Townsend, T. Shibata, Evaluation of commercial landscaping mulch for possible contamination from CCA, Waste Manag. 27 (2007) 1765–1773. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.09.013>.
- [8] T. Shibata, H. Sologabriele, L. Fleming, Y. Cai, T. Townsend, A mass balance approach for evaluating leachable arsenic and chromium from an in-service CCA-treated wood structure, Sci. Total Environ. 372 (2007) 624–635. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.10.037>.
- [9] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), RCRA in focus: construction, demolition and renovation., EPA, Estados Unidos, 2005.
- [10] Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução no 348: altera a resolução CONAMA n. 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos, MMA, Brasília, 2004.
- [11] S. Tsimas, M. Zervaki, Reuse of waste water from ready-mixed concrete plants, Manag. Environ. Qual. Int. J. 22 (2011) 7–17. <https://doi.org/10.1108/14777831111098444>.
- [12] A.S. Lima, A.E.B. Cabral, Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE), Eng. Sanit. E Ambient. 18 (2013) 169–176. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200009>.
- [13] Jang, T. Townsend, Sulfate leaching from recovered construction and demolition debris fines, Adv. Environ. Res. 5 (2001) 203–217. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(00\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(00)00056-3).
- [14] A. Montero, Y. Tojo, T. Matsuo, T. Matsuto, M. Yamada, H. Asakura, Y. Ono, Gypsum and organic matter distribution in a mixed construction and demolition waste sorting process and their possible removal from outputs, J. Hazard. Mater. 175 (2010) 747–753. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.072>.
- [15] C.M. Biondi, Teores naturais de metais pesados nos solos de referência do Estado de Pernambuco, Tese (doutorado), Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010. <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/4965>.

[16] Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Resolução CONAMA No 420/2009 “Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.” MMA, Brasília, 2009.

[17] 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, 2004.

[18] Secretaria do Meio Ambiente (SMA-GESP), Gerenciamento on line de resíduos da construção civil, São Paulo, 2014. <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cea/2014/11/19-gerenciamento-online-de-residuos-da-construcao-civil/>.

[19] Associação Brasileira da Indústria de Painéis de Madeira (ABIPA) ABIPA, ABIMCI, ABPM, ANPM, SINDIMASP, Gerenciamento de resíduos de madeira industrializada na construção civil, São Paulo, 2014. <https://cetesp.sp.gov.br/sigor/2014/12/12/gerenciamento-de-residuos-de-madeira-industrializada-na-construcao-civil-2/>.

[20] T.P. Pinto, Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana, Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, 1999. <http://www.ietsp.com.br/Documentos/textos-t%C3%A9cnicos/disserta%C3%A7%C3%B5es-e-teses/>.

[21] T.P. Pinto, J.L.R. Gonzáles, Manejo e gestão de resíduos da construção civil: como implantar um sistema de manejo e gestão nos municípios, Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente e Caixa Econômica Federal, CAIXA, Brasília, 2005.

[22] BRASIL, Lei 12.305: Lei de Resíduos Sólidos, Brasília, 2010.

[23] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, ed., Pesquisa nacional de saneamento básico: 2008, IBGE, Rio de Janeiro, 2010.

[24] Ministério do Meio Ambiente (MMA), Planos de Gestão de Resíduos Sólidos: Manual de Orientação, MMA, Brasília, 2012. http://www.mma.gov.br/estruturas/182/_arquivos/manual_de_residuos_solidos3003_182.pdf.

[25] Ministério do Meio Ambiente (MMA), Manual para implantação de sistema de gestão de resíduos da construção civil em consórcios públicos, Brasília, 2010. http://www.mma.gov.br/estruturas/srhu_urbano/_arquivos/5_manual_implantao_sistema_informao_gesto_rs_cp_125.pdf.

[26] Associação Brasileira dos Fabricantes de Chapas para Drywall, Resíduos de Gesso na Construção Civil: coleta, armazenagem e destinação para a reciclagem, 2012. <http://www.sinduscondf.org.br/portal/arquivos/ResiduosdeGessonaConstrucaoCivil.pdf>.

[27] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 15112: 2004 Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação, ABNT, Rio de Janeiro, 2004.

[28] Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura de São Paulo (CREA-SP), Guia Profissional para uma gestão correta dos resíduos da construção, CREA-SP, São Paulo, 2005. <http://www.ietsp.com.br/Documentos/textos-t%C3%A9cnicos/manuais/>.

- [29] ABNT NBR 15114: 2004 Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação, ABNT, Rio de Janeiro, 2004. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=349>.
- [30] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 15113:2004: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação, ABNT, 2004. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=347>.
- [31] 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. <https://www.sindusconsp.com.br/wp-content/uploads/2015/09/MANUAL-DE-RES%C3%8DDUOS-2015.pdf>.
- [32] S.C. Angulo, C.E. Teixeira, A.L. de Castro, T.P. Nogueira, Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação, Eng. Sanit. E Ambient. 16 (2011) 299–306. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300013>.
- [33] S.C. Angulo, C. Ulzen, F.M.R.S. Lima, A.P. Chaves, V.M. John, Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem européias. I, in: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), Feira de Santana, Bahia, 2009.
- [34] METSO MINERALS, Basics in mineral processing, 2015. <https://www.metso.com/contentassets/0efc5d1a7c5a4357baecc5e990dc1fe7/basics-in-mineral-processing-handbook-18-lr.pdf>.
- [35] M. Quattrone, S.C. Angulo, V.M. John, Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production, Resour. Conserv. Recycl. 90 (2014) 21–33. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.06.003>.
- [36] C. Ulzen, Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição, Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo (Escola Politécnica), 2011.
- [37] C.F. Hendriks, A.A. Nijkerk, A.E. Van Koppen, The building cycle, Aeneas, Technical Publ, Bostel, 2000.
- [38] A. Mueller, L. Wienke, Measurements and Models for the Gravity Concentration of C&D Waste Through Jigging, in: Int. RILEM Conf. USE Recycl. Mater. Build. Struct., Barcelona, Espanha, 2004. https://www.rilem.net/publication/publication/45?id_papier=4294.
- [39] C.H. Sampaio, L.M.M. Tavares, Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade, Editora da UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- [40] E. Khoury, W. Ambrós, B. Cazacliu, C.H. Sampaio, S. Remond, Heterogeneity of recycled concrete aggregates, an intrinsic variability, Constr. Build. Mater. 175 (2018) 705–713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.163>.
- [41] S.C. Angulo, P.M. Carrijo, A.D. Figueiredo, A.P. Chaves, V.M. John, On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete, Mater. Struct. 43 (2009) 519–528. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9508-9>.
- [42] B. Cazacliu, C.H. Sampaio, G. Miltzarek, C. Petter, L. Le Guen, R. Paranhos, F. Huchet, A.P. Kirchheim, The potential of using air jigging to sort recycled aggregates, J. Clean. Prod. 66 (2014) 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.057>.

- [43] E. Mulder, T.P.R. de Jong, L. Feenstra, Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste, *Waste Manag.* 27 (2007) 1408–1415. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.013>.
- [44] S.C. Angulo, V.M. John, C. Ulsen, H. Kahn, A. Mueller, Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição, *Ambiente Construído*. 13 (2013) 61–73. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000200006>.
- [45] I. Vegas, K. Broos, P. Nielsen, O. Lambertz, A. Lisbona, Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology, *Constr. Build. Mater.* 75 (2015) 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.109>.
- [46] A.P. Chaves, A.E.C. Peres, Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Britagem, Peneiramento e Moagem, 5a ed., Oficina dos textos, 2012.
- [47] L.F.R. Miranda, 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. <https://bdpi.usp.br/item/001488651>.
- [48] S.C. Angulo, Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos, Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo (Escola Politécnica), 2005.
- [49] E.V. Alberte, Evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones con áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012. <https://www.tdx.cat/handle/10803/125064>.
- [50] Associação Espanhola de Gestores de Resíduos de Construção y Demolición (GERD), GUIA ESPAÑOLA DE ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICION (RCD) - GEAR Project, Editora Fuego, Barcelona, Espanha, 2012. <http://www.caminoispaisvasco.com/Profesion/documentostecnicos/guia>.
- [51] Miranda, L.F.R., Operação de Usina de reciclagem de Entulho. Curso sobre Gestão de Resíduos da Construção Civil e Operação de Usina de Reciclagem de Entulho, 2017.
- [52] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 10007:2004 : : Amostragem de resíduos sólidos, ABNT, Rio de Janeiro, 2004. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=1102>.
- [53] L. Petersen, P. Minkkinen, K.H. Esbensen, Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling, *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 77 (2005) 261–277. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.09.013>.
- [54] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR NM 26:2009 : Agregados - Amostragem, ABNT, Rio de Janeiro, n.d. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=55815>.
- [55] S.C. Angulo, A. Mueller, Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity, *Mater. Struct.* 42 (2009) 739–748. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9417-3>.
- [56] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 15116: 2004: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios, ABNT, Rio de Janeiro, 2021. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?Q=Q2h3 NGN qWUwv UXV4bFJkb mttWIZ4 WW1xbU dHK2g4Rf dhVmhbN DVnd2w zUTO =>.

- [57] P. Gonçalves, J. de Brito, Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications, *Mag. Concr. Res.* 62 (2010) 339–346. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.62.5.339>.
- [58] S.C. Angulo, A.D. Figueiredo, Concreto com agregados reciclados, in: *Concreto Ciênc. E Tecnol., Arte Interativa*, Instituto Brasileiro do Concreto, São Paulo, 2011: pp. 1731–1768.
- [59] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 15115:2004 : Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos, ABNT, Rio de Janeiro, 2004. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=337>.
- [60] K. Kataquiri, Proposição de critérios técnicos e ambientais para criação de banco de solos para a região metropolitana de São Paulo., Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana, Universidade de São Paulo, 2017. <https://doi.org/10.11606/D.3.2017.tde-23062017-161732>.
- [61] C.S. Poon, D. Chan, Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.045>.
- [62] F. da C. Leite, R. dos S. Motta, K.L. Vasconcelos, L. Bernucci, Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2972–2979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>.
- [63] P.B. da Silva, Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos viários., Doutorado em Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, 2013. <https://doi.org/10.11606/T.3.2013.tde-03112014-113759>.
- [64] L.F.R. Miranda, Estudo de fatores que influem na fissuração de revestimentos de argamassa com entulho reciclado, Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, 2000. <https://bdpi.usp.br/item/001122877>.
- [65] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ABNT NBR 7211:2009 : Agregados para concreto – Especificação, ABNT, Rio de Janeiro, 2009. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=40092>.
- [66] J.S. Medeiros, Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto, Dissertação (M. Sc.), University of Sao Paulo, 1993.
- [67] I. Fernandes, Blocos e Pavers: produção e controle de qualidade, Editora Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, Jaraguá do Sul, 2012.
- [68] N. Jablonski, Mix designs for concrete block: Proportioning using the fineness modulus method, (1996). www.theconcreteproducer.com.
- [69] M. Malešev, V. Radonjanin, S. Marinković, Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production, *Sustainability.* 2 (2010) 1204–1225. <https://doi.org/10.3390/su2051204>.







Environment & Material Handling

V.1

Resíduos de Construção e Demolição:

fundamentos sobre
gestão e reciclagem

eBook

