

Capítulo 47

CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

Sérgio C. Angulo

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A.
Universidade de São Paulo

Antônio D. de Figueiredo

Universidade de São Paulo

47.1 Introdução

O concreto com agregados reciclados é aquele produzido com resíduos britados, em substituição parcial ou total aos agregados convencionais. Como os agregados convencionais, oriundos de rochas britadas, seixos e areias lavadas de rio são muito pouco porosos, a resistência ou durabilidade do concreto convencional é controlada exclusivamente pela porosidade (vazios) da pasta de cimento (Figura 1a), conforme discutido nos capítulos 11 e 13.

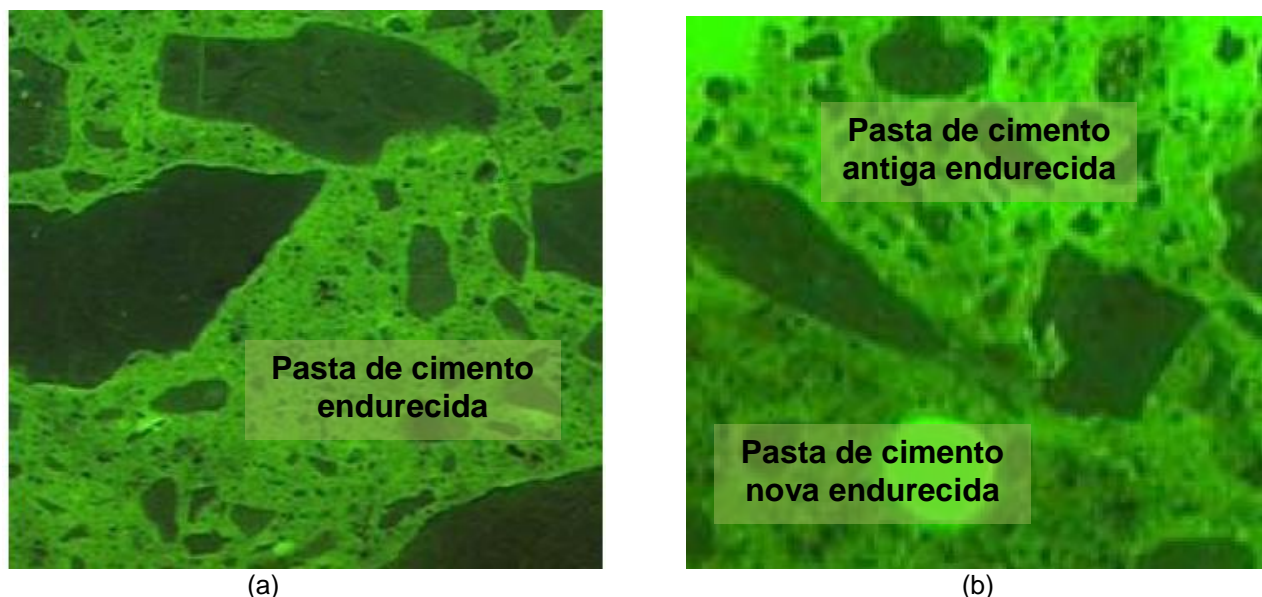


Figura 1 – Microestrutura do concreto com agregado natural (a) e com agregado reciclado (b) (ETXEBERIA, 2004). A parte verde mais escura representa a fluorescência da pasta de cimento porosa. A parte verde mais clara representa os defeitos e poros do agregado reciclado de concreto.

Já os agregados reciclados são mais porosos que os agregados de rochas britadas e areias naturais. Assim, a resistência e durabilidade deste outro tipo de concreto são controladas, não apenas pela porosidade da pasta de cimento, mas também pela porosidade

do agregado (Figura 1b), que facilmente ultrapassa os 10%. Assim, a diferença essencial entre um concreto convencional e um concreto com agregado reciclado é a porosidade.

O agregado reciclado é aquele obtido pela reciclagem dos resíduos de construção e demolição (RCD) ou de algum outro resíduo que tenha condições de ser utilizado no concreto. Atualmente, a principal fonte de resíduos para a produção destes agregados é a própria construção civil.

Os agregados de RCD são constituídos por fragmentos de concretos, argamassas, cerâmicas e outros materiais secundários, obtidos pela britagem e outras operações de descontaminação. Assim, a composição desse agregado é bastante variável, podendo ser constituído quase exclusivamente por concreto, ou misturado com cerâmica vermelha (Figura 2). Na composição, sempre há teores secundários de madeira, aço, vidro (entre 1-2 %), como pode ser observado na Figura 2a.



Figura 2 – Agregado de concreto reciclado (a) e agregado de RCD misto (com cerâmica vermelha) (b).

Utilizar agregado reciclado de RCD é, atualmente, uma necessidade primária para o setor da construção civil; maior consumidor de matérias-primas entre os setores industriais. O concreto é o material industrial mais consumido pelo homem (capítulo 1) e seus constituintes, o cimento e os agregados, são matérias-primas não renováveis, embora extremamente abundantes no planeta. No ano de 2010, foram consumidas 60 milhões de toneladas de cimento no Brasil, segundo dados do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Admitiu-se 70% deste consumo destinado para a produção do concreto (Lima, 2010). Assumindo as mesmas premissas de John (2007) quanto à relação cimento:agregados (1:5) e à relação água/cimento (0,60), estima-se hoje a produção de 280 milhões de toneladas de concreto; sendo que deste total 210 milhões são agregados naturais. Nesta utilização é consumida quase metade da produção nacional de agregados. Ao substituir agregado de rochas britadas por agregado reciclado pode-se evitar que 95 milhões de toneladas de RCD sejam dispostas em aterros e evita-se o consumo de recursos naturais não renováveis.

A cada ano, as obras de construção e de renovação urbana imputam, em média, 500 kg de resíduo por habitante (MC, 2005); um problema grave quando considerada a nossa

população atual de 190 milhões de habitantes. Praticamente todo o RCD é passível de ser reciclado; mas requer, preferencialmente, a separação de materiais indesejáveis ao processo de reciclagem como madeira, plástico, aço e outros, já no canteiro de obra ou durante o processo de demolição (Figura 3). Mais importante ainda é a separação dos contaminantes; ou seja, materiais considerados perigosos ao meio ambiente (sulfato de cálcio, por exemplo) ou ao homem propriamente dito (cimento amianto, madeira tratada com pesticidas, tintas com COV¹ ou metais pesados, lâmpadas contendo metais pesados, dentre outros.



(a)



(b)

Figura 3 - Exemplo de canteiro de obra (a) e demolição (b) que não tria adequadamente o RCD.

A prática mais comum tem sido usar o RCD bruto, sem processamento. Nesse caso, o material não é efetivamente transformado em um material de construção. Seu uso fica restrito ao preenchimento das áreas de mineração, próximas da cidade, que foram exauridas pela própria construção. Geotecnicamente aceitável, por ser um material de composição química semelhante ao solo, a recuperação agrega somente valor imobiliário para essas áreas.

Essa alternativa nunca deve ser a única disponível porque esgota o mercado da reciclagem rapidamente. Deve-se, portanto, ampliar a reciclagem do RCD como agregados e difundir seu uso na pavimentação e no concreto. Essa é a única alternativa para se transformar o resíduo em material de construção e efetivamente poupar as reservas de agregados naturais.

O controle de qualidade dos agregados de RCD para uso no concreto deve ser rigoroso, devendo apresentar teor baixo de contaminantes (< 1%), baixa absorção de água (< 7%) e teores controlados de finos (< 10%) (RILEM RECOMMENDATION, 1994; ABNT NBR 15116:2004; DIN 4226-100:2002). Para o atendimento dessas exigências, enfatizam-se

¹ Composto Orgânico Volátil.

a necessidade de controle de qualidade e emprego de tecnologias de processamento mais avançadas, buscando a obtenção de agregados de RCD de melhor qualidade.

Controlando-se seus teores de substituição ou a porosidade dos agregados de RCD, torna-se possível seu uso até no concreto estrutural (resistências características superiores a 25 MPa) como é o caso da ponte ilustrada na Figura 4a. Além disso, muitas aplicações usuais de engenharia não requerem o concreto estrutural. São exemplos de concretos não estruturais que permitem o uso integral (100%) dos agregados de RCD: concretos magros, blocos pré-moldados de concreto (Figura 4b), contrapisos, calçadas, bancos, etc.



Figura 4 – Concreto estrutural com 20% de agregado reciclado de concreto (VAZQUEZ, 2008) (a) e bloco pré-moldado de concreto com 100% agregado reciclado misto (b).

47.1.1 Histórico

O RCD foi reciclado pela primeira vez na Alemanha por causa da necessidade de se reconstruir as cidades completamente destruídas pela 2ª Guerra Mundial (LEVY, 2001). É por isso que a Europa foi o continente precursor em reciclagem e possui a maior experiência no assunto.

A influência dos agregados de RCD no concreto tem sido investigada desde a década de 1980 (KASAI, 1993). Durante a década de 1990, países como Holanda, Alemanha, Bélgica implementaram políticas duras envolvendo o uso de áreas de aterros, proibindo tal destino para resíduos passíveis de reciclagem (HENDRIKS, 2000). Os custos para aterramento se tornaram proibitivos e viabilizaram economicamente algumas alternativas de reciclagem.

Foi assim que muitas empresas de demolição passaram a investir em desmontagem das edificações, procurando retirar contaminantes perigosos (fibrocimento contendo fibras de amianto, madeira tratada com pesticidas, etc.) e triar o resíduo proveniente de estruturas de concreto, procurando obter o agregado reciclado.

Além disso, essas empresas passaram a adquirir usinas móveis de reciclagem, com o intuito de economizar com o transporte e aumentar a lucratividade do negócio. Na Alemanha, existem, atualmente, cerca de 3.000 unidades móveis e 1.600 usinas fixas de reciclagem. No Brasil, existem apenas 28 usinas atualmente. O tipo de aplicação do agregado reciclado em ambos os países não é diferente. Grande parte do RCD reciclado é empregada como

material para nivelamento de terrenos ou bases de pavimentos, não sendo propriamente utilizado no concreto, onde requer critérios de controle de qualidade mais restritivos, muito embora seja um grande mercado para a reciclagem. No entanto, diversos países já possuem normas para controle do uso de agregados de RCD no concreto (HENDRIKS, 2000; DIN 4226-100:2002; ABNT NBR 15116:2004; VAZQUEZ, 2008). O Japão é o único país que possui normas para produção de agregados de RCD reciclados de alta qualidade. Este fato demonstra que existem diferentes níveis de maturidade dos mercados de modo a propiciar melhores condições para o uso dos agregados de RCD no concreto.

47.2 Reuso do agregado convencional a partir do concreto fresco

A primeira fonte de resíduo que deve ser observada de modo a permitir o uso do material reciclado como agregado é a própria fabricação do concreto. É possível reutilizar o agregado convencional quando o concreto retorna ainda fresco (não endurecido) na central (Figura 5). A pasta de cimento não hidratada é lavada com água e sofre atrição dentro de um tambor. Dessa forma, ao final do processo, obtém-se o agregado convencional e uma água de lavagem (que geralmente contém finos de cimento e aditivos, em suspensão).

1 – Água +
concreto fresco

2 – Água de
lavagem+cimento

3- Lavagem por
atrição

4- Agregado
convencional
recuperado

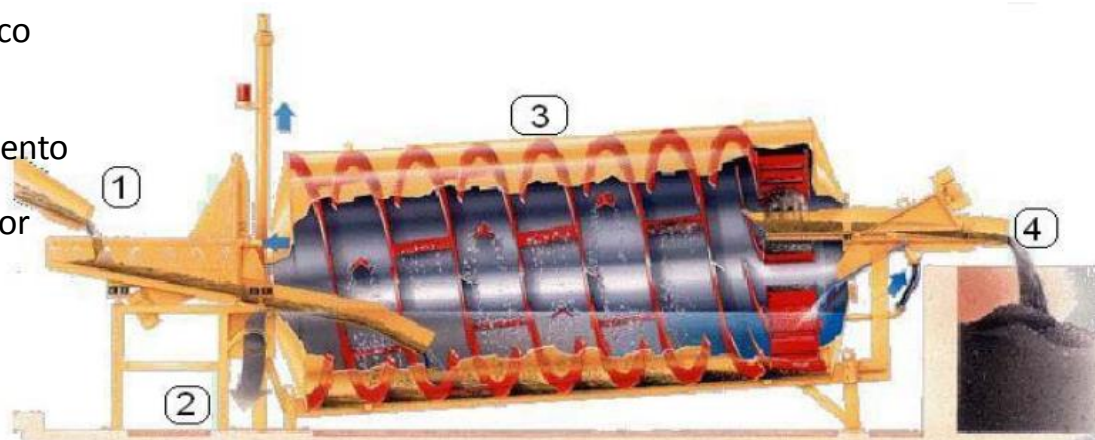


Figura 5 – Equipamento para reuso do agregado convencional, partir do concreto fresco (SWING STETTER, 2000 *apud* BUTTLER, 2003).

A ABNT NBR 12655:2006 permite recuperar os agregados convencionais (quartzo, granito) do concreto fresco, por lavagem, para uso no novo concreto, se for mantida a natureza desses agregados. Conforme essa Norma, agregados recuperados não subdivididos quanto à sua granulometria podem ser adicionados em quantidade menor do que 5% do total de agregados no concreto. Apenas se o agregado recuperado for classificado e separado nas diferentes frações e atender aos requisitos da ABNT NBR 7211:2009 é que poderá ser utilizado em um novo concreto em quantidade maior que 5% do total. Muitas centrais dosadoras de concreto possuem tal equipamento, mas, atualmente, tendem ao desuso. O custo da água tem subido ao longo dos anos e o uso do equipamento implica em custos operacionais mais elevados.

Além disso, o processamento do concreto retornado aumenta a quantidade de água de lavagem do agregado, a qual requer um controle de qualidade rigoroso, para poder ser

utilizada novamente na dosagem do concreto fresco. Somente nos últimos anos surgiu uma norma técnica brasileira que aborda a questão, a ABNT NBR 15900:2009, composta de 11 Partes, que estabelece os requisitos para água de amassamento do concreto, possibilitando o uso de água recuperada do processo de preparação, ou de operações similares, em novos concretos. A presença de diferentes tipos de aditivos e em concentrações distintas certamente é um grande complicador, podendo afetar o tempo de pega do concreto redosado entre outras características.

Por último, a lama de cimento sedimentada tem pH perto de 12, sendo um resíduo com elevada basicidade. É, portanto, um resíduo não inerte (Classe IIb, de acordo com a norma NBR 10004: 2004), sem alternativas de reciclagem disponível até o presente, sendo geralmente destinado a aterros sanitários que possuem custos de deposição elevados nas grandes cidades.

Assim, uma alternativa tem sido deixá-lo endurecer nos pátios das centrais de dosadoras como um resíduo sólido e reciclá-lo. Sem o uso de britadores, pode ser aproveitado como material geotécnico para recuperar as áreas degradadas, conforme mencionado anteriormente. Com uso de britadores, pode ser reciclado como agregados de concreto, conforme será detalhado, a seguir. A disponibilidade de área certamente é um complicador para essa reciclagem de via seca.

47.3 Reciclagem do RCD: descrição e tipos

Na reciclagem do RCD são utilizadas diversas operações unitárias da Engenharia Mineral com a finalidade de (CHAVES et al., 2006):

- Separar e fragmentar preliminarmente as peças de concreto armado de grandes dimensões, antes da alimentação no britador;
- Eliminar fragmentos grandes de materiais indesejáveis (madeira, aço, papel) ou contaminantes (gesso, cimento amianto) por triagem;
- Cominuir (britar ou moer) o fragmento de RCD como agregado, com ou sem tratamento térmico preliminar;
- Remover a fração metálica ferrosa e pequenos fragmentos de materiais indesejáveis leves (papel, madeira, etc.) remanescentes dos agregados de RCD, melhorando a sua pureza; e
- Remover as partículas porosas de cerâmica vermelha, quando se deseja produzir agregado de RCD de alta qualidade.

Um exemplo de organização de uma usina fixa está apresentado na Figura 6. As usinas móveis são utilizadas preferencialmente quando se deseja reduzir a distância de transporte entre o processamento e a aplicação. No Brasil, as usinas de reciclagem de RCD devem ser implementadas com base na norma ABNT NBR 15114: 2004. Destacam-se a necessidade de sistema de drenagem e o controle de ruído e poluentes atmosféricos.

Muita atenção deve ser dada à emissão de material particulado numa usina de reciclagem de RCD (Figura 7), principalmente nas operações de alimentação, britagem e peneiramento (SANTOS; PINTO, 2008). Nesses locais, a concentração de sílica em suspensão pode ficar facilmente acima do admitido pela norma regulamentadora – NR 15: 2011 – do Ministério do Trabalho, sendo necessária a utilização de abatedores de poeira, enclausuramento dos transportadores de peneira, e coletores de pó em britadores e peneiras.

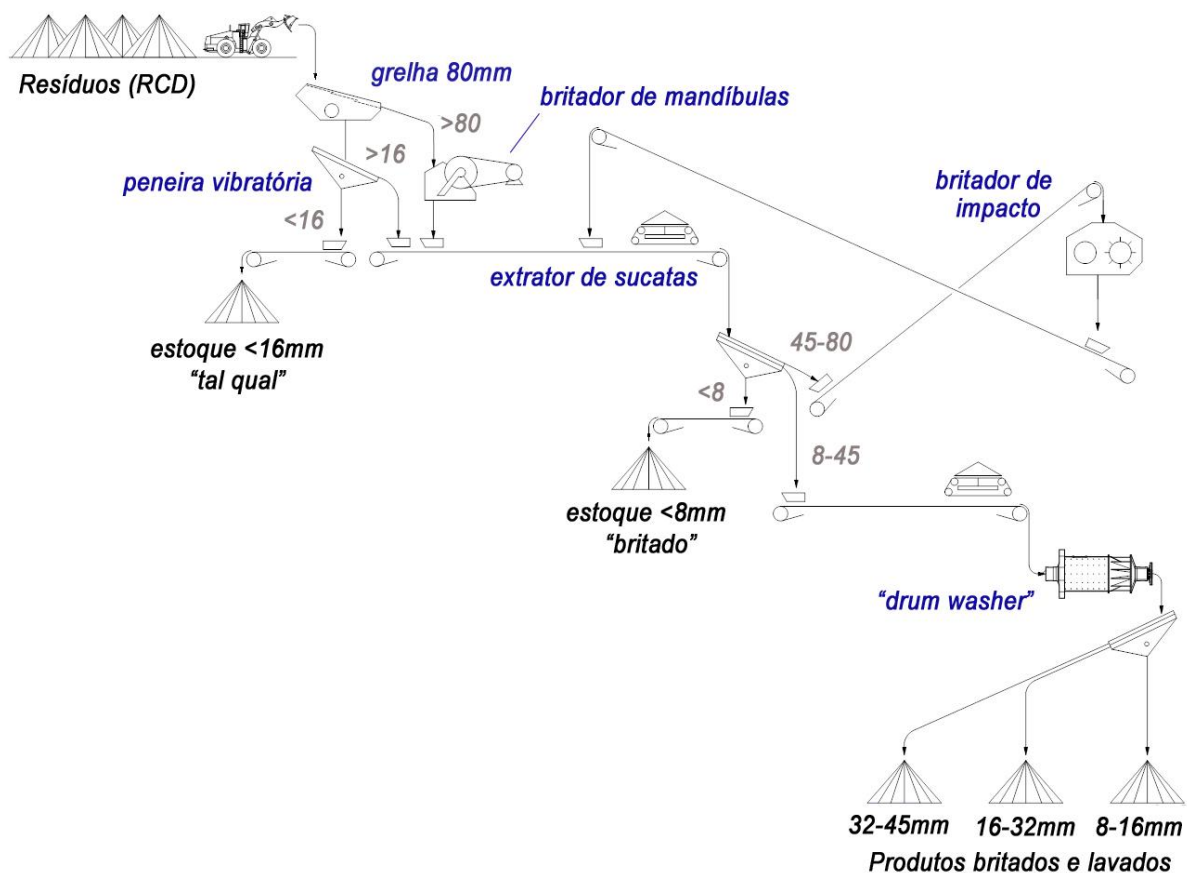


Figura 6 – Usina fixa de reciclagem de RCD com dois estágios de britagem: BBW Recycling Mittelbe/Magdeburg - Alemanha. Autoria: C. Ulsen. Extraído de Angulo et al. (2009).



Figura 7 – Emissão de particulado próximo ao britador numa usina de RCD nacional. Extraído de Santos; Pinto (2008).

47.3.1 Separação e fragmentação do resíduo de concreto

O resíduo de concreto armado é o resíduo menos poroso e mais resistente presente no RCD passível de ser utilizado como agregado. Assim, é interessante segregá-lo na demolição para se produzir agregados reciclados de melhor qualidade. Nesse caso, o aço, apesar de ser mais denso que o concreto, é um material indesejável e deve ser eficientemente removido, manual ou magneticamente, quando ocorre a fragmentação ou corte do concreto armado, antes da britagem propriamente dita.

A fragmentação preliminar é fundamental porque as peças de concreto armado possuem grandes dimensões, o que impossibilita a alimentação direta do britador. Esta operação pode ser feita por meio de tesouras hidráulicas ou rompedores pneumáticos acoplados em escavadeiras (Figura 8), capazes de cortar até peças inteiras de concreto armado.

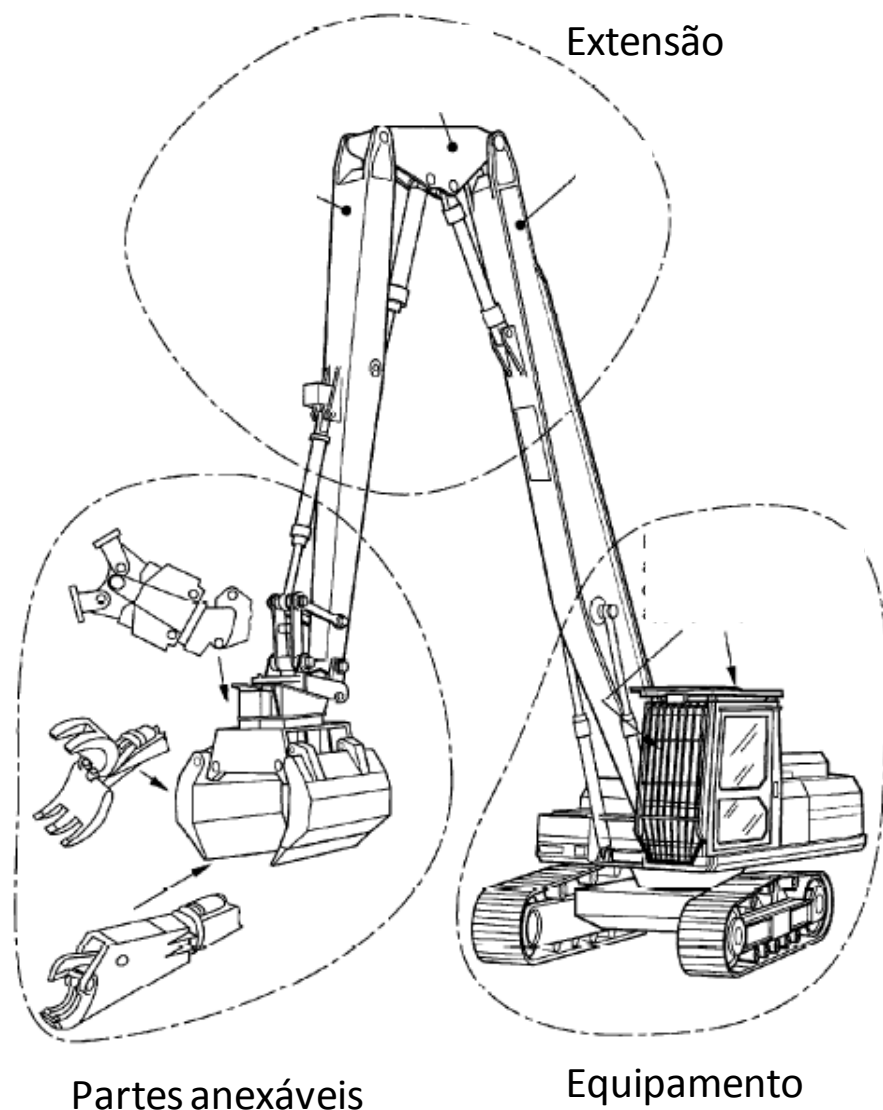


Figura 8 – Peças de encaixe nas escavadeiras para fragmentação e corte de peças de concreto armado.
Extraído de BSI (2000).

47.3.2 Triagem do RCD misto

Muitas vezes, quando não se programa um processo de triagem nos canteiros de obra ou desmontagem de edifícios obsoletos, o RCD misturado acaba sendo recebido nos pátios das usinas de reciclagem. . Nesse caso, para se produzir agregados reciclados, é necessário realizar uma triagem eficiente para segregar os materiais indesejáveis (madeira, vidro cerâmico/vidro, aço, papel, plástico) e contaminantes (gesso e cimento amianto).

A eficiência da triagem depende da facilidade de acesso aos materiais indesejáveis. Essa facilidade é controlada pela forma de armazenamento do material granular, bem como de suas dimensões. Materiais estocados em pilha cônica possuem largura, comprimento e altura consideráveis e equiparáveis. Muitos fragmentos de materiais indesejáveis ficam encobertos ou inacessíveis para catação. Essa eficiência melhora consideravelmente quando o material é disposto em uma dimensão preferencial, como, quando se realiza a catação do material granular sobre um transportador de correia, por exemplo. Além disso, a redução do tamanho das partículas facilita o processo, conforme está discutido no próximo item.

A forma de armazenamento do material granular também é muito importante para a realização de uma amostragem adequada. Informações mais detalhadas podem ser obtidas em Petersen et al. (2005).

47.3.3 Cominuição, com ou sem tratamento térmico

O processo de cominuição (neste caso, britagem) reduz a dimensão máxima do material, formando uma ou mais distribuições de tamanho de partículas (NEVES, 2005). A Figura 9 ilustra como os processos de fratura dos britadores interferem nas distribuições de tamanho de partículas resultantes desses processos.

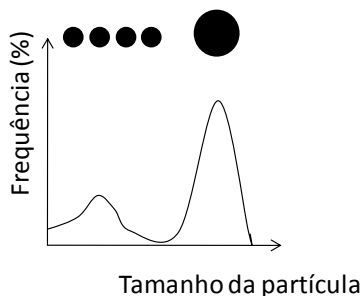
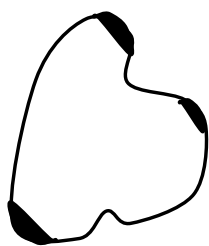
Todo britador possui uma relação de redução que corresponde à relação entre a máxima dimensão do RCD que alimenta o equipamento e a dimensão máxima do agregado obtido no processo. Os britadores mais utilizados para o RCD são o de mandíbula (fratura por clivagem) ou o de impacto (fratura por estilhaçamento) (Figura 10).

Nos britadores de mandíbula, as partículas são quebradas essencialmente por mecanismos de compressão; os fragmentos presos na abertura da mandíbula sofrem sucessivos processos de quebra por cisalhamento no plano principal de tensões, gerando grande quantidade de finos (CHAVES, 2002). As relações de redução médias são de 7:1.

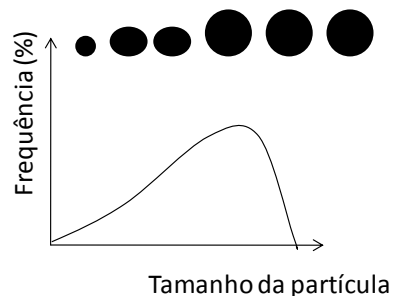
Nos britadores de impacto a redução de tamanho ocorre essencialmente pelo impacto dos martelos ou barras sobre as partículas e pelo impacto destas contra a carcaça ou barras de impacto. Devido ao elevado desgaste dos corpos moedores, o uso deste equipamento é altamente desaconselhável para materiais com alto teor de sílica. As relações de redução são elevadas, até 40:1, quando em circuito fechado, e a distribuição granulométrica é mais fina do que a obtida no britador de mandíbulas (CHAVES, 2002).

Do ponto de vista prático, britadores de impacto apresentam vantagem de britar fragmentos de concreto com maiores dimensões e produz brita graduada para pavimento com um único estágio; porém tem manutenção elevada. Britadores de mandíbula possuem custos de manutenção menores e são indicados quando se pretende produzir britas (< 19 mm). Isto ocorre porque serão necessários dois britadores, devido à menor relação de redução e, com estes, maior quantidade de material será obtida.

Fratura por abrasão



Fratura por impacto



Fratura por compressão

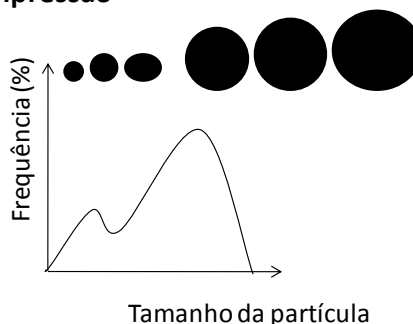
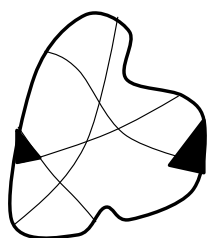
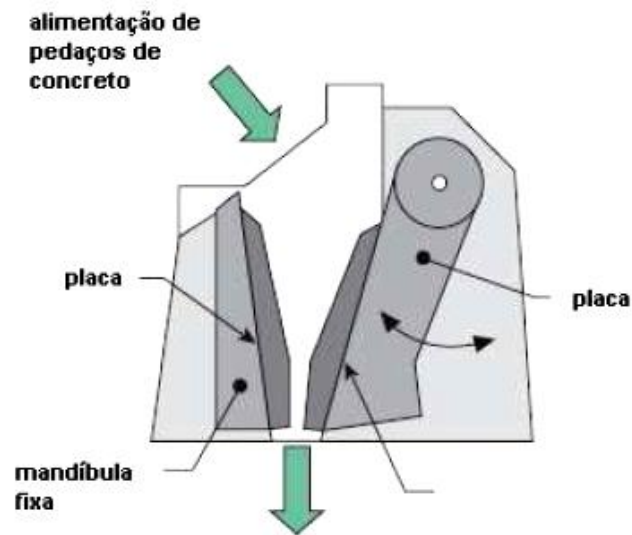


Figura 9 – Distribuições de tamanho de partículas x processo de fratura.
Adaptado de King (2001) apud Neves (2005).

Britador de mandíbula



Britador de impacto de eixo horizontal

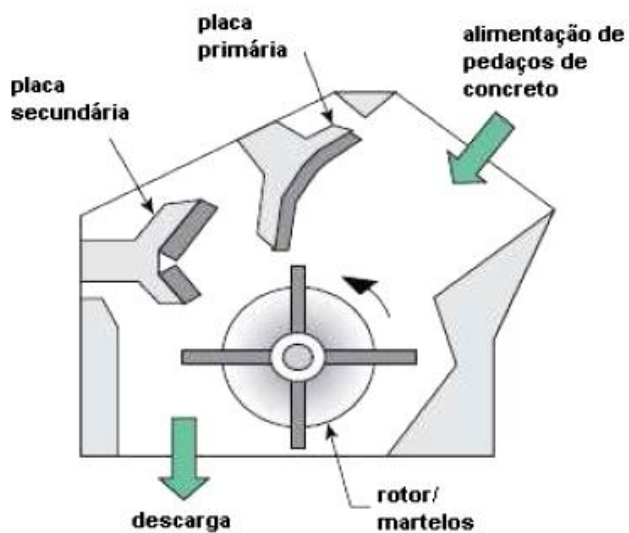


Figura 10 – Desenhos esquemáticos dos britadores de mandíbula e de impacto.
Extraído de Tseng (2010), a partir de APCA (2009) modificado.

Dependendo da dimensão máxima do agregado de RCD que se pretende produzir, a britagem, seja obtida por compressão ou impacto, não é capaz de separar os dois materiais constituintes no concreto: a) os agregados naturais (quartzo, granito) e b) a pasta de cimento endurecida. Isto é conseguido com maior eficiência através do processo de reciclagem por tratamento térmico e moagem (SHIMA et al., 2005; TOMOSAWA et al., 2005; NAWA, 2010).

Nesse processo, o resíduo de concreto menor que 50 mm é aquecido em um forno vertical movido a querosene até aproximadamente 300°C. O concreto sofre dilatações térmicas distintas, causando fissuração na interface desses materiais (pasta de cimento e agregado natural).

Essa fissuração fragiliza a ligação mecânica entre esses materiais (Figura 11), facilitando sua separação pela moagem (cominuição por abrasão). Além disso, nessa temperatura, a pasta de cimento sofre desidratação, tornando-se mais fraca, o que reduz o tempo de moagem necessário.

Dependendo da temperatura de processo, a absorção de água do agregado reciclado de concreto pode ser praticamente igual a dos agregados naturais (0-3 %). O tempo de moagem depende da resistência do concreto (NAWA, 2010), mas geralmente se situa entre 30 e 60 minutos. Por fim, têm-se, em média, 35% de agregado graúdo, 30% de agregado miúdo e 35% de finos, em massa do resíduo original.

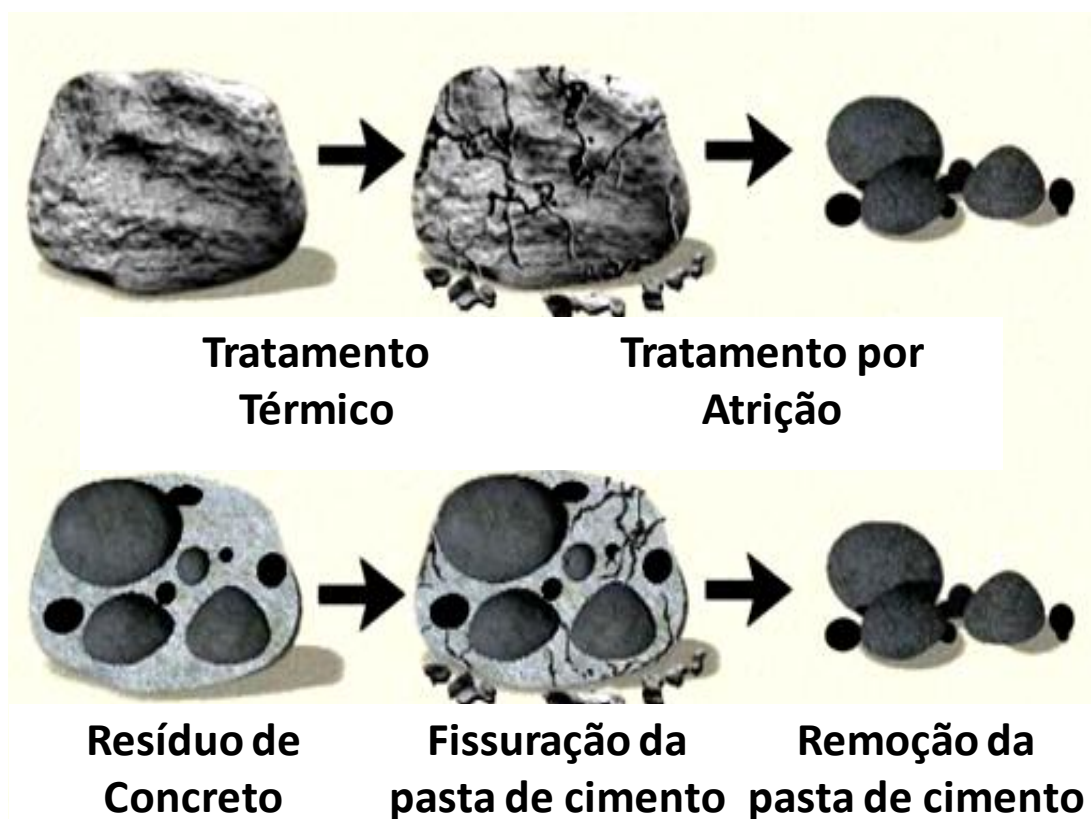


Figura 11 – Mecanismo de liberação do agregado natural presente no resíduo de concreto por tratamento térmico e moagem. *Extraído de Nawa (2010).*

47.3.4 Separação magnética

Parte dos fragmentos de aço que passam pelos britadores podem sofrer redução junto com os agregados de RCD, sendo muito difícil sua identificação e remoção por catação. Nesse caso, sempre é indicado o uso de eletroímã de correias cruzadas (Figura 12), capazes de aprisioná-los em cima dos transportadores de correia e conduzi-los e descarregá-los lateralmente, permitindo uma remoção totalmente eficiente desse material. Os custos do equipamento se justificam porque a sucata metálica é o resíduo indesejável neste processo, mas apresenta o maior valor de revenda para a reciclagem.

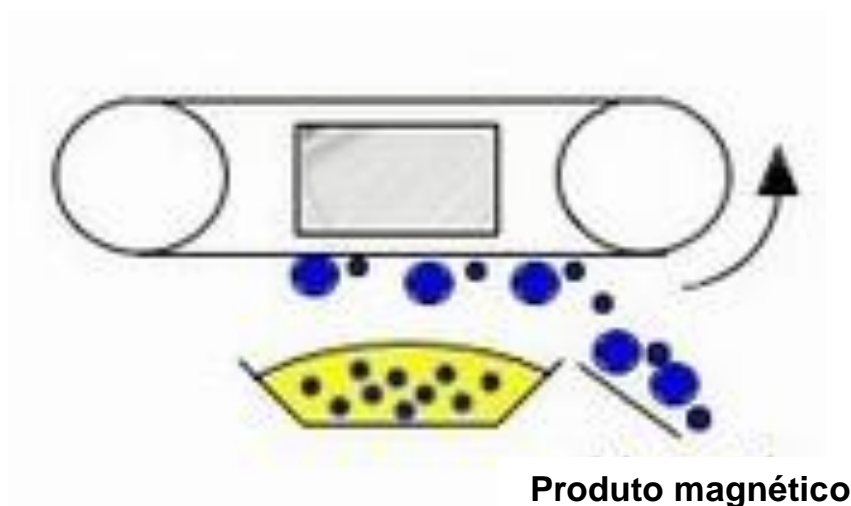


Figura 12 – Funcionamento de um eletroímã de correias cruzadas.
Extraído de <http://www.eriks.co.uk>

47.3.5 Separação pneumática ou gravítica

Não existe processo industrial de descontaminação que permita remover integralmente os materiais indesejáveis de uma única vez (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

Mesmo que grande parte dos materiais indesejáveis possa ser removida por uma catação eficiente (de 80 a 90% do total), alguns equipamentos complementares são utilizados nas usinas de reciclagem européias, tais como os separadores pneumáticos, scrubber e jigues, a seguir explicados.

Os separadores pneumáticos (Figura 13) geram uma corrente de ar ascendente e separam partículas leves de papel, plásticos, e madeiras leves dos agregados de RCD reciclados (HANISCH, 1998; HENDRIKS, 2000). O equipamento é colocado nos pontos de transferência entre transportadores de correia.

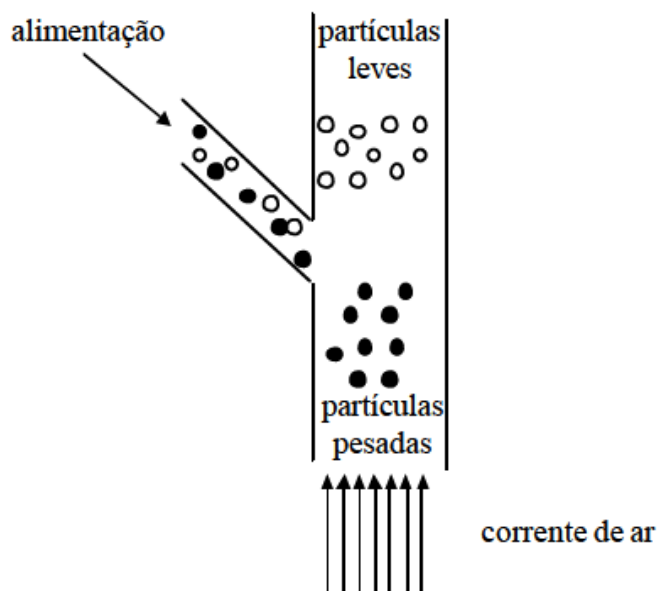


Figura 13 – Funcionamento do equipamento de separação pneumática. *Extraído de Hendriks (2000).*

O scrubber (Figura 14) é um equipamento capaz de remover pequenos fragmentos de papel, plástico e madeira leve, etc. e finos presentes no agregado de RCD. O material sofre intensa abrasão nas barras elevatórias. A água é alimentada em contracorrente e conduz as partículas leves e os finos, na direção da alimentação, sendo desaguados numa peneira. A água é recuperada e torna a circular. O agregado lavado é conduzido até a outra extremidade, onde é desaguado e descarregado.

- 1 Alimentação
- 2 Guias em forma de espiral
- 3 Descarga do produto lavado
- 10 Descarga da fração orgânica leve

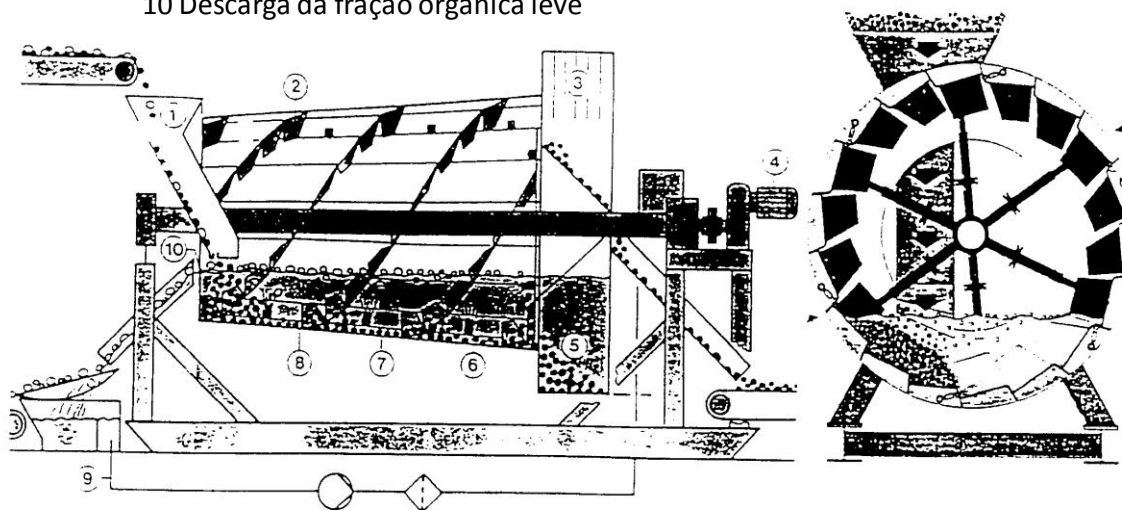


Figura 14 – Funcionamento do scrubber. *Extraído de Butenbach (1997).*

O jigge é um equipamento bipartido (Figura 15), em formato de um tanque ou arca, que estratifica as partículas em camadas de diferentes densidades, através da pulsação intermitente da água no plano vertical, com movimentos de dilatação e contração (SAMPAIO; TAVARES, 2005).

No jigge pneumático tipo BAUM, o pulso é obtido pela injeção periódica de ar comprimido em uma das duas câmaras de formato “U”. A fração orgânica e outros minerais leves são transbordados e desaguados numa peneira. O agregado graúdo denso é descarregado por uma válvula rotativa.

No caso dos agregados de RCD, o jigge tem as seguintes vantagens (JUNGMANN et al., 1997):

- o teor de materiais indesejáveis é reduzido para 0,05%, incluindo parte da cerâmica vermelha, permitindo atender requisitos de qualidade para uso em concretos,
- redução da emissão de particulados no processamento;
- redução do teor de finos, evitando o aumento na demanda de água na produção do concreto²; e
- equipamento de baixo custo operacional com elevada capacidade de produção (> 100 t/h).

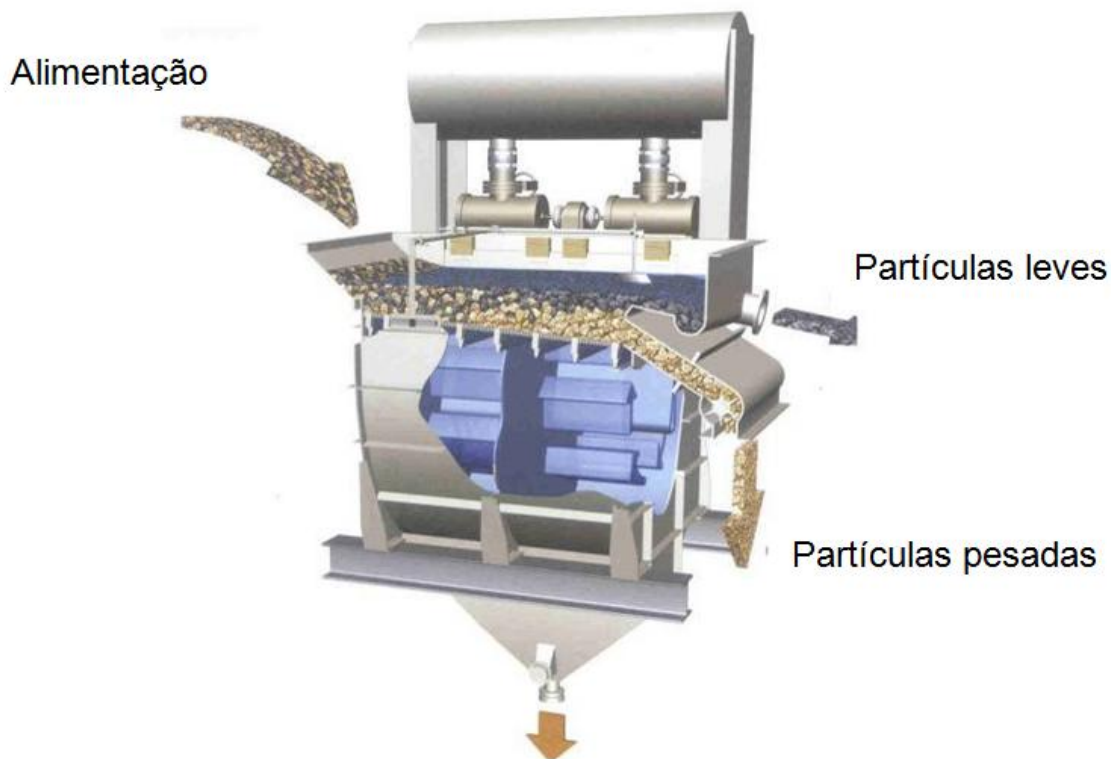


Figura 15 – Funcionamento do jigge pneumático. *Extraído de <http://allmineral.com>.*

² Isso pode ser contornado pelo uso de aditivos, apesar de encarecer a produção do concreto.

47.3.6 Separação óptica

O equipamento de separação óptica (Figura 16) é composto por um alimentador vibratório para individualizar as partículas na superfície dos transportadores de correia. As partículas são conduzidas aos sensores, onde imagens são registradas e transmitidas para identificação e reconhecimento dos parâmetros empregados na separação por cor.

Em seguida, uma rotina estabelecida por análise de imagem pode selecionar as partículas de cerâmica vermelha porosa, com elevada eficiência (90% do total), quando compressores de ar interceptam o percurso natural das partículas e as lançam num primeiro recipiente. As partículas de concreto seguem esse percurso natural e são lançadas num segundo recipiente.

Apesar desse equipamento ainda ser caro, os preços vêm reduzindo ao longo dos anos graças ao aumento da capacidade de processamento dos computadores e, conseqüentemente, de produção (DEHLER, 2003). Tem a vantagem de ser uma tecnologia pouco impactante ambientalmente. Além de não utilizar água, usa pouca energia elétrica no processamento (ANGULO et al., 2008).

- 1 Alimentação
- 2 Aceleração
- 3 Sensor de metais
- 4 CCD camera
- 5 Processamentos de dados
- 6 Válvulas de ar comprimido
- 7 Concentrado
- 8 Rejeito
- 9 Cabine de comando

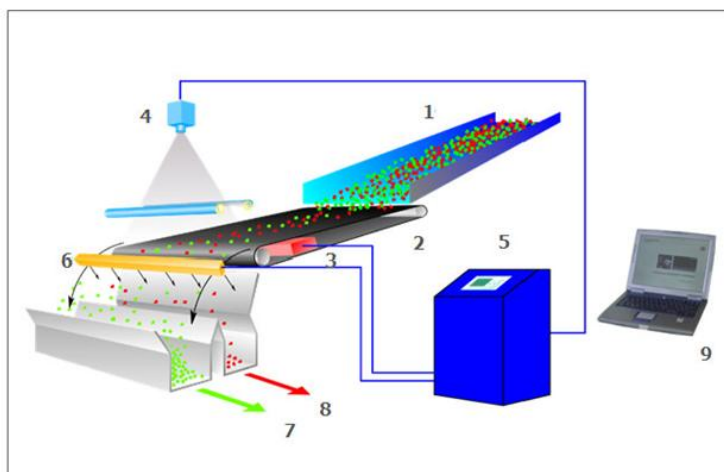


Figura 16 – Descrição do funcionamento do equipamento de separação óptica (por cor).
Extraído de <http://www.titech.com>

47.4 Agregados de RCD: propriedades fundamentais

A composição do agregado de RCD varia a cada caçamba e a cada cidade (Figura 17). Os teores de materiais indesejáveis ou contaminantes podem chegar a teores superiores a 50%. Além disso, o RCD de uma caçamba pode ser composto quase integralmente por cerâmica vermelha, que é o material mais poroso presente. Com isto, as propriedades dos agregados de RCD podem apresentar grande variabilidade.

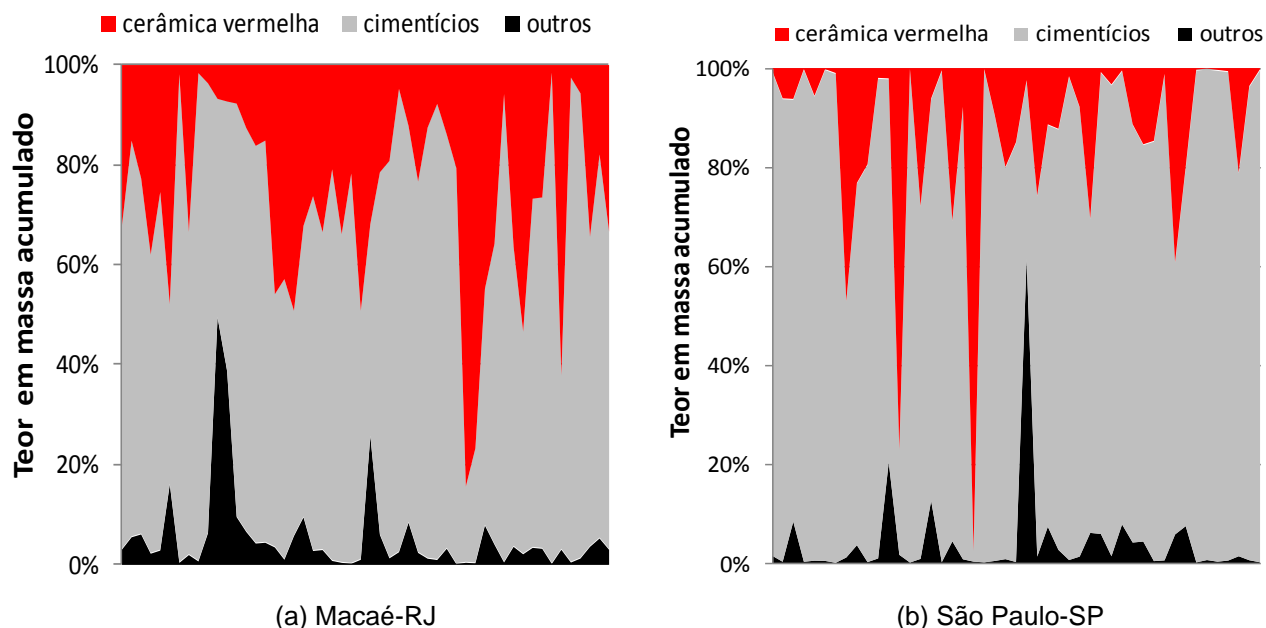


Figura 17 – Composição dos agregados de RCD obtidos em diferentes caçambas e cidades brasileiras.

A porosidade também varia para cada tipo de material presente nos agregados de RCD. A absorção de água da cerâmica vermelha varia bastante, podendo chegar a 24% (Figura 18). A absorção de água das partículas cimentícias também varia (ora puro concreto, ora pura argamassa), podendo alcançar 15%. Conseqüentemente, a porosidade do agregado de RCD é mais fortemente influenciada pela quantidade de cerâmica vermelha presente no material (Figura 19).

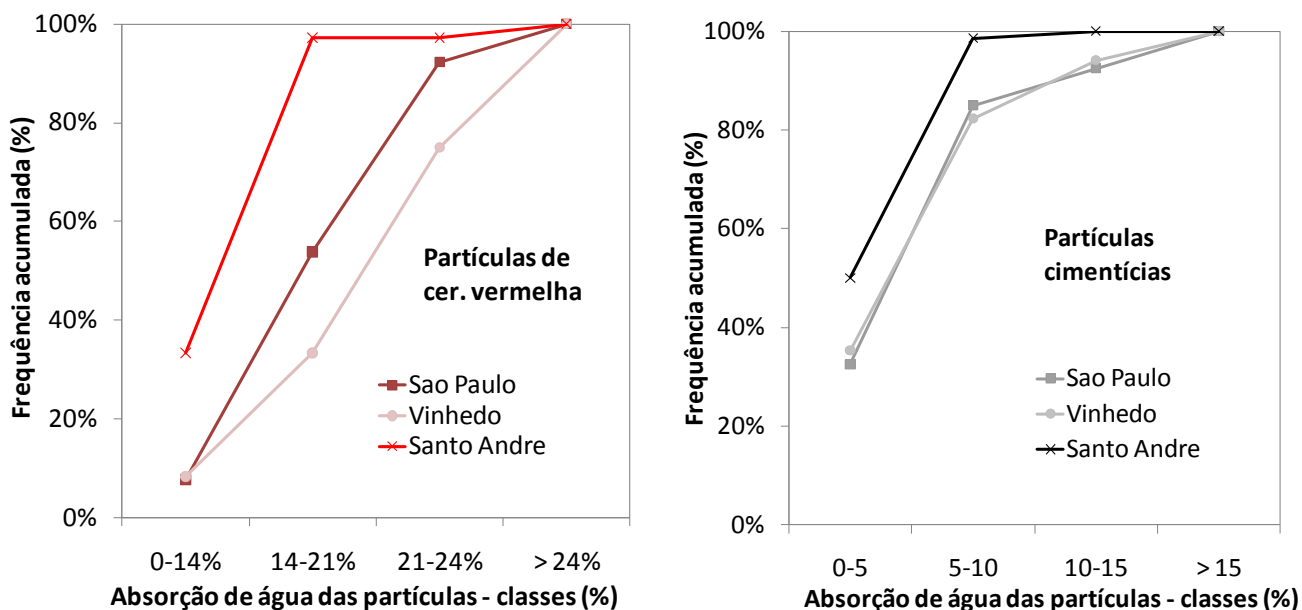


Figura 18 – Absorção de água de partículas de cerâmica vermelha e de cimento nos agregados de RCD.

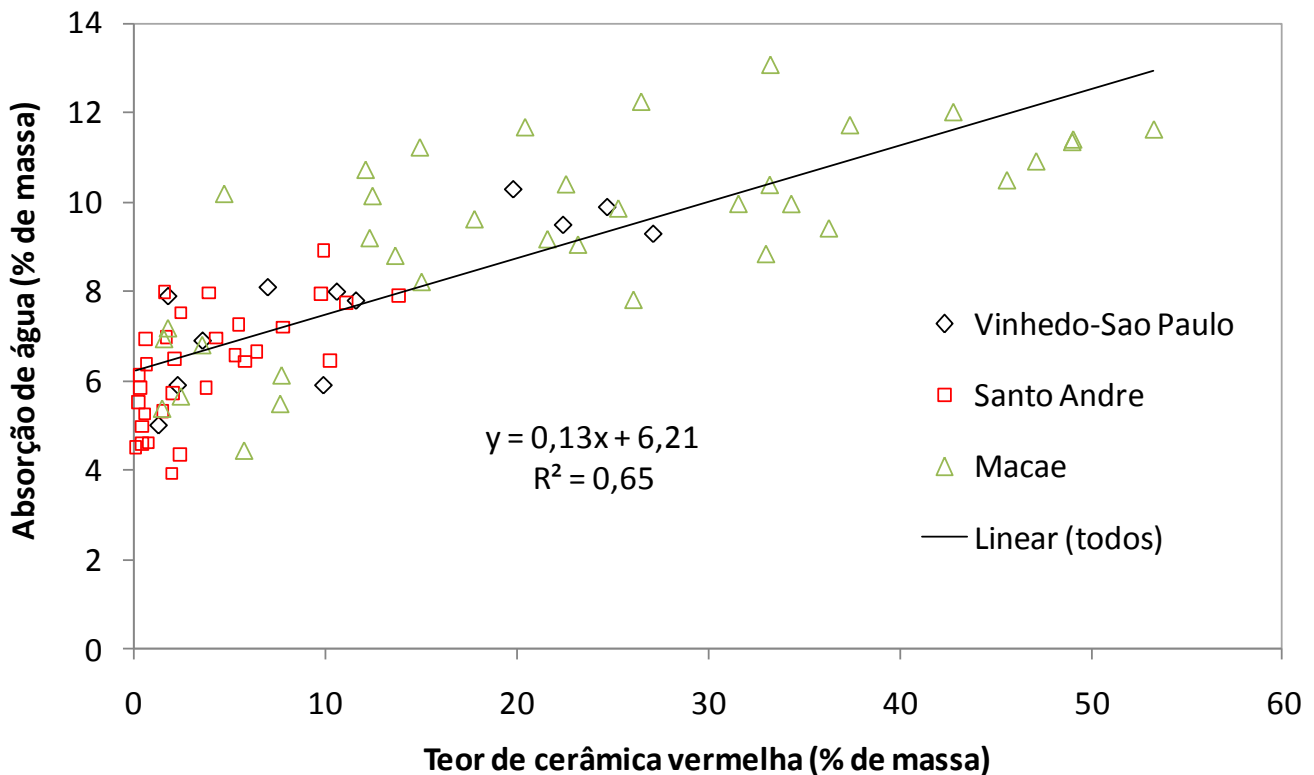


Figura 19 – Influência do teor de cerâmica vermelha na absorção de água do agregado de RCD misto.

Quanto menor for a porosidade do RCD, mais resistente a esforços mecânicos ou de abrasão será o agregado reciclado, cada vez mais se assemelhando ao agregado natural. Além disso, agregados porosos são mais friáveis e geralmente possuem teores mais elevados de finos.

Assim, para garantir a qualidade dos agregados de RCD é necessário atender aos requisitos especificados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (Quadro 1) e observar os seguintes princípios básicos:

- implementar segregação na origem e triagem nas usinas de forma que os agregados de RCD contêmam o mínimo possível de materiais indesejáveis ou contaminantes;
- utilizá-los em substituição ao agregado convencional, de modo a não elevar demasiadamente a porosidade média e a evitar um incremento exagerado no consumo de cimento, conforme será abordado no item seguinte; ou
- produzir agregados de RCD com menor porosidade para a produção de concretos estruturais³, conforme será abordado no item seguinte.

³ atualmente não há norma brasileira que estabeleça o uso do RCD em concreto estrutural, de forma que os agregados, para esse tipo de aplicação, devem satisfazer as exigências da ABNT NBR 7211, que é referenciada pela ABNT NBR 12655 para os requisitos relativos aos agregados para concreto.

Quadro 1 - Requisitos da ABNT NBR 15116:2004 para agregado reciclado destinado ao preparo do concreto sem função estrutural.

Propriedades		Agregado reciclado classe A				Normas de ensaios	
		ARC		ARM		Agregado graúdo	Agregado miúdo
		Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo		
Teor de fragmentos a base de cimento e rochas (%)		≥90	-	<90	-	Anexo A	-
Absorção (%)		≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17	ABNT NBR NM 53	ABNT NBR NM 30
Contaminantes - teores máximos em relação à massa do agregado reciclado. (%)	Cloretos	1				ABNT NBR 9917	
	Sulfatos	1				ABNT NBR 9917	
	Materiais não minerais ^(*)	2				Anexo A	Anexo B
	Torrões de argila	2				ABNT NBR 7218	
	Teor total máximo de contaminantes	3				-	
Teor de material passante na malha 75 µm (%)		≤10	≤ 15%	≤ 10%	≤ 20%	ABNT NBR NM 46	

^(*)Para efeito dessa norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Algumas normas internacionais são ainda mais restritivas que a nacional em termos de teores de contaminantes (< 1%) e teores de sulfatos (DIN, 2002). Cita-se também a existência de norma japonesa que define critérios de controle para agregados de RCD de alta qualidade (Tomosawa et al., 2005). Neste caso, a absorção de água do agregado reciclado de concreto não ultrapassa 3%.

A seguir, são apresentados os procedimentos que devem ser considerados na preparação das amostras de ensaios, bem como os principais ensaios de caracterização dos agregados de RCD, de acordo com a ABNT.

47.4.1 Preparação da amostra

Para a adequada caracterização do agregado de RCD, deve-se garantir a coleta de uma amostra representativa, a partir de um lote de produção. Pela norma brasileira ABNT NBR 15116:2004, a amostra deve ser constituída por, no mínimo, 10 alíquotas de 10 kg, representando um lote de produção de até 1500 m³ de agregados de RCD. Como os agregados de RCD possuem constituintes secundários com teores inferiores a 1,0%, a quantidade de massa mínima dessa amostra deve ser muito superior a 100 kg (PETERSEN et al., 2005; ANGULO; MUELLER, 2009). Para agregados com dimensão máxima entre 16 e 32 mm, a massa mínima deve ser em torno de 1.100 kg (Figura 20).

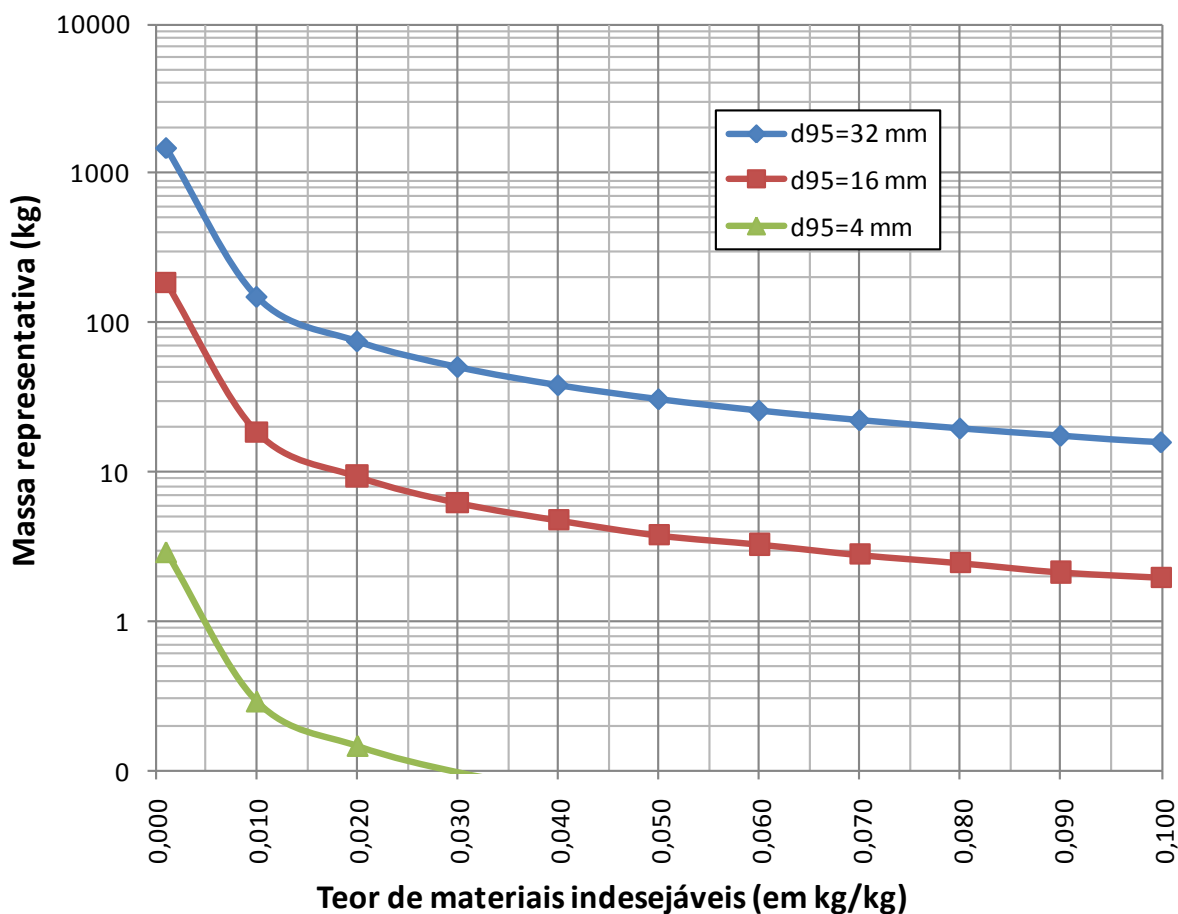


Figura 20 – Massa mínima da amostra x teor de materiais indesejáveis (ANGULO; MUELLER, 2009).

Como os agregados de RCD são heterogêneos, as amostras representativas devem ser homogêneas, antes de qualquer redução de massa para a preparação de subamostras destinadas aos ensaios de caracterização.

Uma das técnicas mais empregadas na Engenharia Mineral é a formação de uma pilha alongada (PETERSEN, 2004; ANGULO, 2005). O material deve ser distribuído, de maneira uniforme e ininterrupta, em camadas sucessivas e em sentidos alternados, conforme apresentado na Figura 21. Ao final, as extremidades devem ser recortadas e redistribuídas porque a distribuição de massa nesses locais é heterogênea. As amostras de ensaio deverão ser então retiradas a partir de recortes transversais a esta pilha de homogeneização.

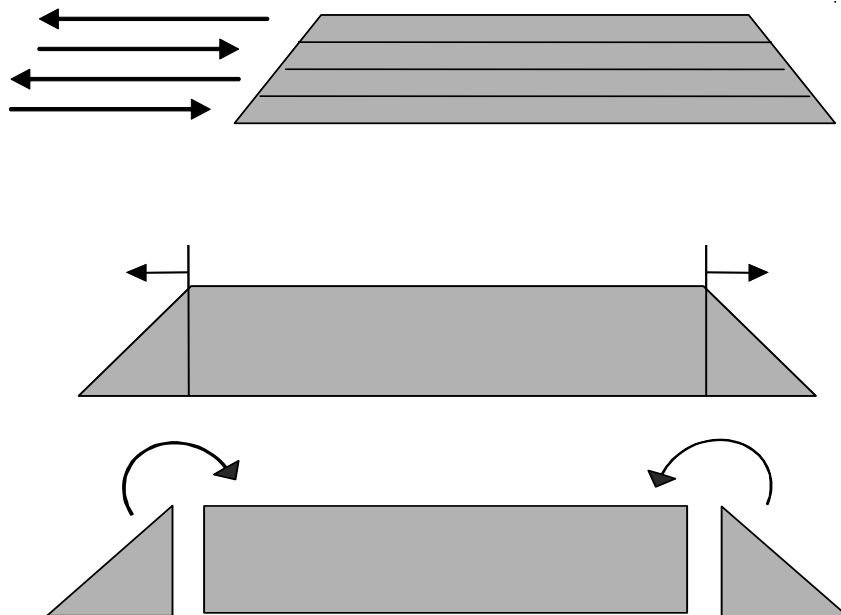


Figura 21 – Execução de uma pilha alongada (ANGULO, 2005).

47.4.2 Composição

A verificação da composição dos agregados de RCD é feita através da determinação das proporções dos materiais constituintes (madeira, cerâmica vermelha, concreto, etc.). As normas nacionais e internacionais recomendam o procedimento da catação (HENDRIKS, 2000; DIN, 2002; ABNT, 2004b). Nesse ensaio, os materiais são identificados visualmente (Figura 22), segregados e determinam-se as massas respectivas.

Embora demorado (cerca de 4 horas de ensaio para se caracterizar uma única amostra) e com reprodutibilidade desconhecida até o momento, é o único método aceitável consensualmente para se quantificar cerâmica vermelha e materiais indesejáveis (orgânicos - madeira, plástico, papel, concreto asfáltico; inorgânicos – metal, vidro cerâmico) e contaminantes - gesso e telhas de cimento amianto, geralmente). É muito difícil por esse método diferenciar concreto e argamassa (ANGULO, 2005) e, por isso, deve-se quantificá-los como um único material; os cimentícios.

O único critério objetivo para distinguir os materiais cimentícios seria através da determinação da sua porosidade e, nesse caso, quase toda a porosidade, seja do concreto ou da argamassa, advém da pasta de cimento endurecida. Assim, no material composto por cimento e rochas não carbonáticas do RCD, deve-se quantificar a pasta de cimento, por ataque com HCl.

O teor de pasta de cimento nessas partículas cimentícias pode ser determinado, com precisão, na amostra pulverizada, pela diferença entre a massa inicial da amostra e essa massa atacada com ácido clorídrico 33% (QUARCIONI, 1998; ANGULO, 2005) (Figura 23).



Cimentícios

Fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do volume



Rochas

Fragmentos constituídos por rocha em mais de 50% do volume



Cerâmica vermelha

Fragmentos de cerâmica vermelha, com superfície não polida, em mais de 50% do volume



Materiais indesejáveis

*Orgânicos
(Madeira, papel, concreto asfáltico etc.)*

*Inorgânicos
(Vidrados cerâmicos, metal etc.)*

Figura 22 – Materiais identificados no ensaio de catação de acordo com ABNT NBR 15116:2004

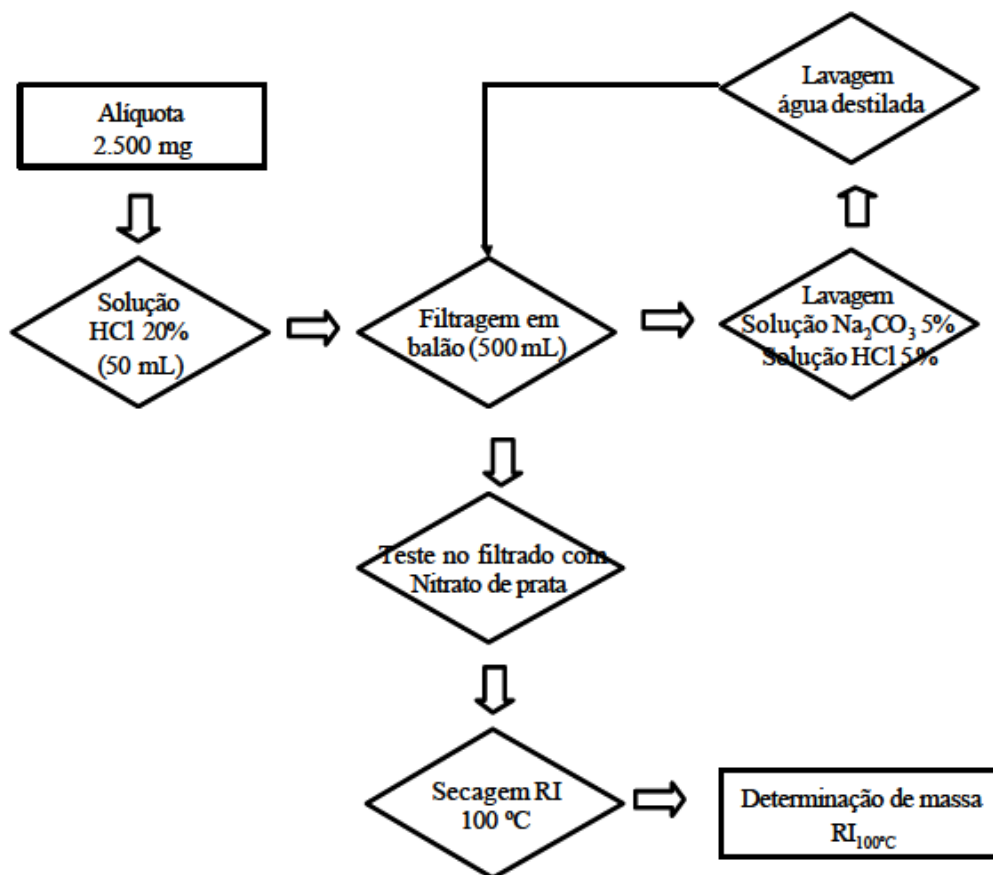


Figura 23 – Procedimento para se determinar o teor de pasta de cimento em partículas cimentícias.

Os vidrados cerâmicos são considerados materiais indesejáveis pelo simples fato de possuírem uma camada vítrea na sua superfície. A sílica (SiO_2) amorfa pode reagir com álcalis (Na, K) do cimento; fenômeno conhecido como reatividade álcali-sílica (capítulo 27), produzindo compostos hidratados expansivos no concreto. Uma avaliação pormenorizada dessa influência pode ser feita testando o agregado reciclado quanto à reatividade álcali-agregado, segundo os métodos previstos na ABNT NBR 15577:2008 (Agregados – Reatividade álcali-agregado, composta de seis Partes, que estabelece como deve ser feita a avaliação e a prevenção da reação álcali-agregado em concreto).

47.4.3 Porosidade e densidade

A porosidade de um agregado é expressa pela relação percentual entre o volume de vazios e o volume de sólidos (Equação 2).

$$Porosidade(\%) = \frac{Vol.poros(cm^3)}{Vol.sólidos(cm^3)} \quad (\text{Equação 2})$$

A absorção de água é expressa percentualmente pela relação entre a massa de água absorvida pelo agregado, após 24 h, e a massa do agregado seco (Equação 3). A massa de água absorvida é determinada pela diferença entre a massa do agregado, na condição saturada com superfície seca (SSS), e massa do agregado seco a 105°C. São ensaios de agregados convencionais (capítulo 7), que devem ser realizados de acordo com a ABNT NBR NM 53 (para agregados graúdos) e de acordo com a ABNT NBR NM 30 (para agregados miúdos).

$$Absorção(\%) = \left(\frac{Massa_{SSS} - Massa_{seca}}{Massa_{seca}} \right) \times 100 \quad \text{(Equação 3)}$$

No agregado graúdo, a secagem até a condição SSS é realizada por tecido até que não se identifique mais brilho na sua superfície. No agregado miúdo, determina-se através do desmorrimento, a partir de um tronco de cone, indicando que não há mais água superficial na partícula.

Partículas porosas dos agregados de RCD sofrem abrasão com o tecido (CARRIJO, 2005; DAMINELI, 2008), assim como o excesso de finos pode prejudicar o desmorrimento do tronco de cone. Apesar dos erros experimentais dos métodos tradicionais (Figura 24); os mesmos são, em vários casos, a única alternativa possível.

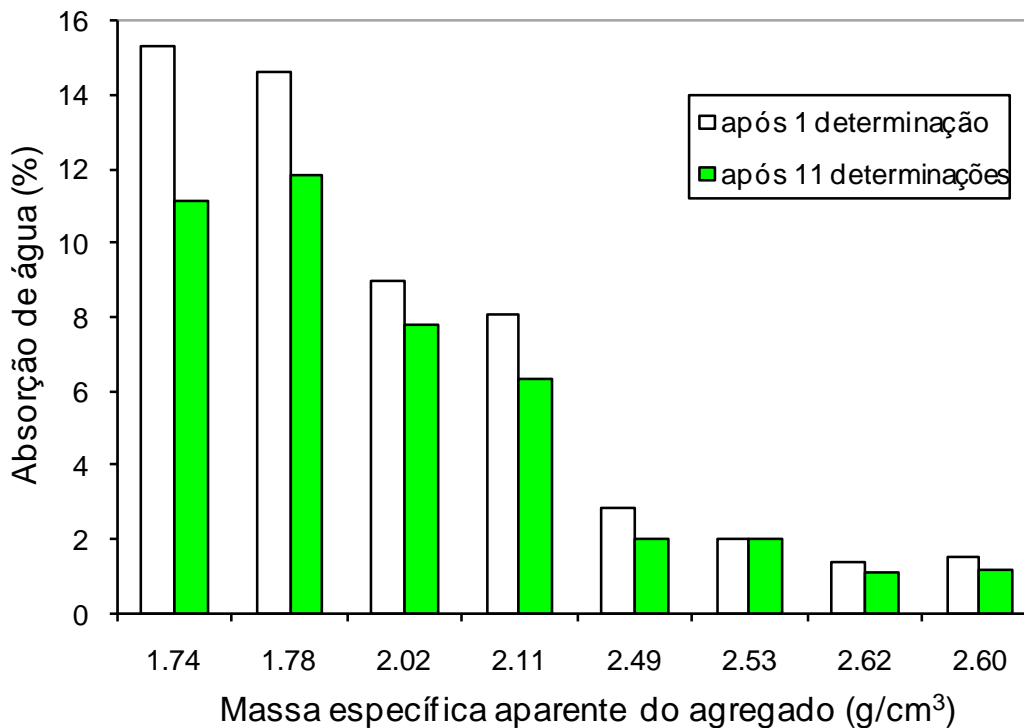


Figura 24 – Absorção de água x determinações nos agregados de RCD (CARRIJO, 2005).

No caso dos agregados de RCD, costuma-se analisar a absorção de água ao longo do tempo (BAZUCO, 1998; LEITE, 2001; CARRIJO, 2005), para se calcular a relação água/cimento efetiva⁴ do concreto.

Leite (2001) propôs um método simples para a realização do ensaio de absorção de água ao longo do tempo, através do monitoramento da massa submersa em diferentes intervalos de tempo. A presença de ar incorporado pode gerar erros experimentais porque aumenta o volume do agregado. Nesse caso, o aumento da força empuxo reduz a massa submersa (DAMINELI, 2008). Por isso, recomenda-se que a determinação não seja feita de forma contínua, requerendo agitação nos diferentes intervalos de tempo.

Independente da porosidade do agregado de RCD, a absorção de água nos primeiros 10 min equivale de 70 a 90% da absorção de água após 24 h (Figura 25). Nesse intervalo de tempo, a taxa de absorção é elevada. Vale lembrar que a sucção da água livre da pasta de cimento, por parte do agregado não saturado, causa a perda de abatimento no concreto.

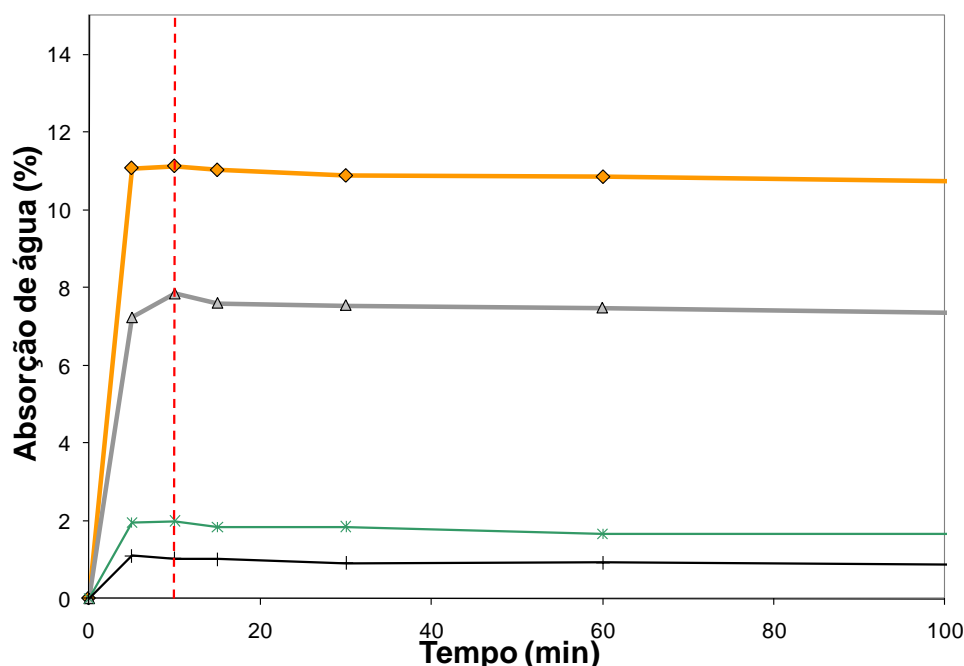


Figura 25 – Absorção de água x tempo para agregados de RCD com diferentes porosidades (CARRIJO, 2005).

Na determinação da densidade (ou massa específica) dos agregados de RCD (Equação 4), é sempre importante distinguir que tipo de volume é considerado na determinação: o volume aparente ou o volume de sólidos. A Figura 30 ilustra os dois tipos de determinação do volume das partículas. O volume aparente inclui, além do volume de sólidos, o volume de poros permeáveis. Geralmente não se determina o volume de poros fechados (ou inacessíveis).

⁴ Água efetiva no concreto = Água total adicionada – Água absorvida pelo agregado poroso.

$$Densidade(kg/dm^3) = \frac{Massa(kg)}{Volume(dm^3)} \quad (\text{Equação 4})$$



Figura 26 – Volume aparente (a) e volume de sólidos (b) (WEBB, 2001).

A densidade aparente (ou massa específica aparente), por ser uma relação entre a massa e o volume aparente, é uma propriedade dependente da absorção de água, que mede indiretamente o volume dos poros permeáveis (Figura 27).

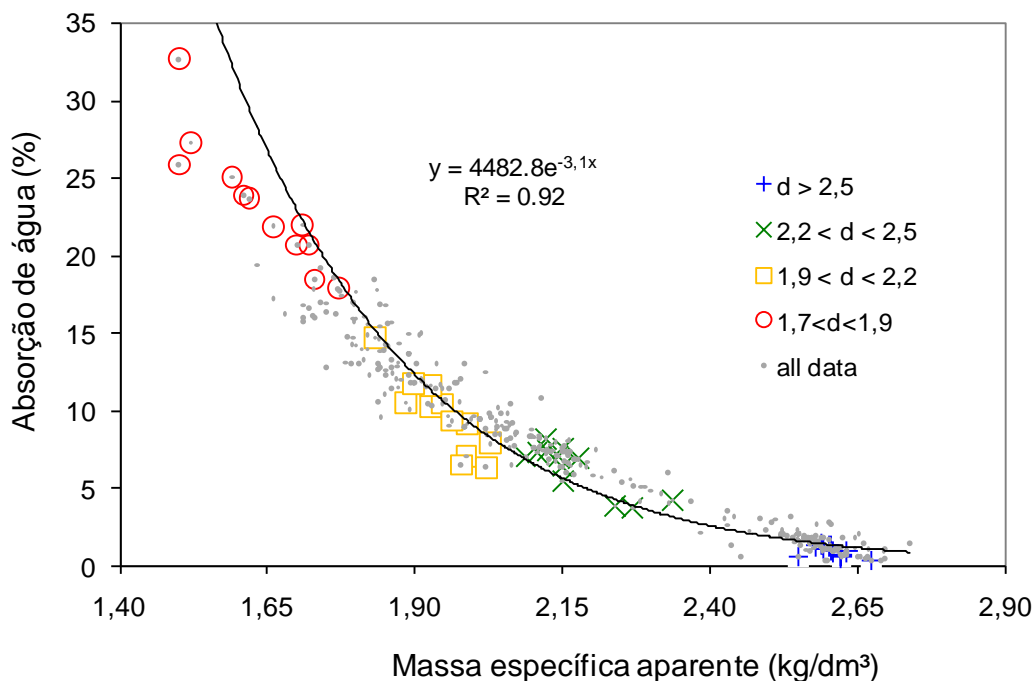


Figura 27 – Massa específica aparente x absorção de água dos agregados de RCD.

A massa específica real do agregado de RCD é praticamente igual à do agregado convencional (ANGULO, 2005); 2,65-2,67 kg/dm³. Isto porque o agregado de RCD é constituído majoritariamente por agregado convencional; cerca de 70% da massa. Essa

propriedade depende exclusivamente da composição química, e não da porosidade. A composição do agregado de RCD muda apenas nos finos ($< 0,15$ mm), por causa da alteração da composição química do material. Ocorre um enriquecimento de pasta de cimento hidratada e argilominerais, em detrimento do agregado convencional.

47.4.4 Teor de finos ($< 0,150$ mm)

Muito embora finos para os agregados convencionais sejam considerados abaixo da peneira de 0,075 mm, a composição dos finos de RCD geralmente muda para abaixo da peneira de 0,150 mm (ANGULO, 2005). Abaixo dessa fração granulométrica, os teores de pasta de cimento porosa e de argilominerais, advindos da mistura do RCD com solo, são elevados.

Esses finos podem ter resultados benéficos ou maléficos ao concreto, dependendo da sua reatividade e do procedimento de dosagem. Se os finos apresentarem certa reatividade por causa da parcela de cimento não hidratado (KATZ, 2003) ou natureza pozolânica (Li et al., 2008), os mesmos podem auxiliar no ganho de resistência do concreto. Por outro lado, finos aumentam a demanda de água no concreto (WEIDMANN, 2008), reduzindo sua resistência. Isto não impede obviamente que se possa corrigir a influência dos finos na demanda de água do concreto por meio de aditivos dispersantes e tornar viável seu uso no concreto (TAM et al., 2008; Li et al., 2008). Dada a característica hidrófila dos argilominerais, a sua presença também aumenta a demanda de água e, por isso, o seu teor é controlado em agregados (SMITH; COLLINS, 1993).

47.5 Concretos com agregados de RCD

47.5.1 Influência no estado fresco

A utilização dos agregados de RCD irá impactar nas condições de mistura e na própria trabalhabilidade do concreto. Por isso, deve-se ter em mente como os agregados de RCD influenciam as características do concreto no estado fresco. Inicialmente, é abordada neste item a própria dificuldade que se tem para determinar a relação água/cimento efetiva do concreto e os efeitos esperados na sua consistência.

47.5.1.1 Perda de consistência

A perda de consistência ao longo do tempo é um problema inerente ao concreto, independente do tipo de agregado presente (NEVILLE, 1997). A consistência do concreto no instante inicial é essencialmente afetada pela quantidade de água adicionada (Figura 28) (POON et al., 2004). Com o passar do tempo, haverá uma perda de água por evaporação e também por incorporação nos primeiros cristais formados pela hidratação do cimento, o que provocará o fenômeno de perda de consistência. Dependendo das condições ambientais na qual o concreto é exposto (MEHTA; MONTEIRO, 2008), a perda de água para o ambiente pode ser significativa, podendo acarretar problemas de adensamento, fissuras e até cura inadequada do concreto.

O agregado de RCD, por ser poroso, utiliza a água livre da pasta de cimento quando não devidamente pré-saturado, gerando uma perda de consistência mais rápida, já nos primeiros 20 minutos (LATTERZA, 1998; POON et al., 2004) (Figura 29a). É justamente nos

primeiros 120 minutos que a sucção gerada pelo agregado, na condição seca, é mais intensa.

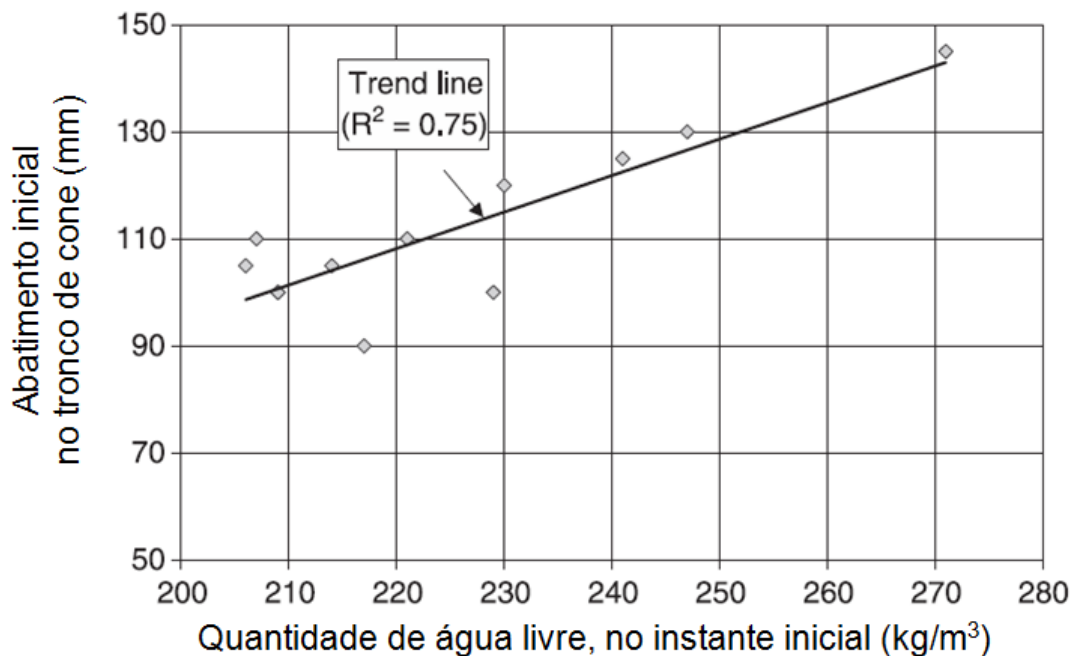


Figura 28 – Influência da água no abatimento inicial do concreto (POON et al., 2004).

No instante inicial, o abatimento do concreto com agregado natural pode ser maior do que o concreto com agregados de RCD. Os agregados apresentam massas específicas distintas e os mais densos afetam esse tipo de medida, que é essencialmente baseada na força gravitacional sobre a massa do concreto (Carrijo, 2005). Leite (2001) e Carrijo (2005) demonstram que o método de abatimento está longe de ser o ideal para se avaliar a consistência do concreto, especialmente quando se tenta comparar o agregado reciclado com o natural. Medidas reológicas poderiam indicar com muito mais precisão os efeitos causados pelo tipo e granulometria desses agregados.

Quando o agregado reciclado é adicionado na condição totalmente saturada, o ligeiro incremento de água livre na pasta reduz a perda de abatimento esperada (Figura 29b).

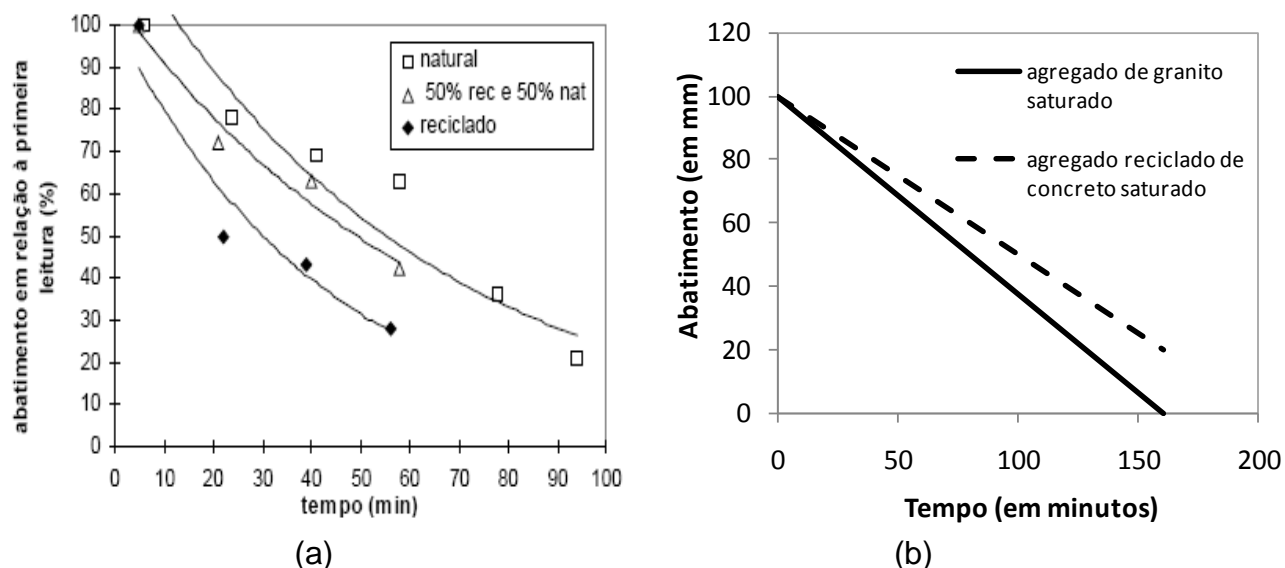


Figura 29 – Perda de abatimento do concreto com agregado natural e agregado reciclado, sem saturação (LATTERZA, 1998) (a) e saturado (POON et al., 2004) (b).

47.5.1.2 Pré-saturação e parâmetros de dosagem

Conforme visto no item anterior, os agregados de RCD, quando porosos e adicionados secos no concreto, absorvem uma parte da água adicionada na pasta de cimento. Nesse caso, ocorre uma ligeira redução da relação água efetiva/cimento da pasta, implicando numa perda de consistência e aumento discreto da resistência mecânica dos concretos (OLIVEIRA; VAZQUEZ, 1996) (Figura 30).

Quando os agregados encontram-se totalmente saturados, ocorre decréscimo dessa resistência indicando a ocorrência de migração da água disponível no agregado para a pasta de cimento, aumentando essa relação água efetiva/cimento, assim como a consistência do concreto. Poon e colaboradores (2004) também comprovaram que a condição de saturação plena do agregado não fornece os melhores resultados de resistência mecânica dos concretos.

Em ambos os casos, não se pode afirmar, com certeza, a quantidade de água que fica efetivamente disponível para a hidratação do cimento. Certamente, a pré-saturação dos agregados de RCD, numa condição intermediária (entre 80 e 90% da absorção de água após 24 horas), evita a migração mais intensa da água da pasta de cimento para o agregado ou vice-versa.

A pré-saturação (entre 80 e 90% da absorção de água) tem sido recomendada por diversos pesquisadores e normas técnicas, tanto para agregados leves quanto para agregados de RCD. É uma abordagem clássica utilizada para se contornar a perda de consistência do concreto, evitando-se o uso de aditivos, e melhorar o seu comportamento mecânico.

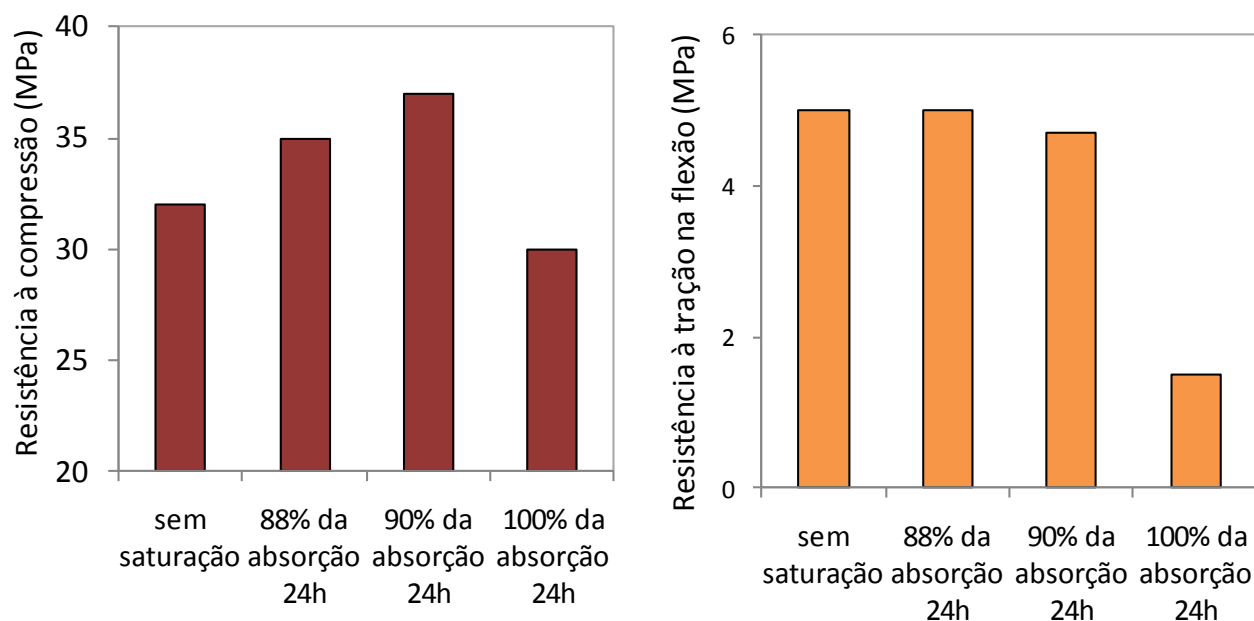


Figura 30 – Influência da condição de saturação do agregado reciclado na resistência mecânica do concreto. Dados de Oliveira; Vazquez (1996)

A água utilizada para realizar a saturação prévia desses agregados nunca deve ser considerada no cálculo da relação água/cimento desse tipo de concreto, quando se deseja comparar a resistência mecânica do mesmo com um concreto de referência (com agregados convencionais que não absorvem água da pasta). Isto porque a relação água/cimento ficaria muito maior do que é realmente, dando a falsa impressão de que o concreto com agregado poroso pode ser mais resistente do que o concreto com agregado natural (sem poros) para uma dada relação água/cimento. Na verdade, deve-se abandonar a idéia de se comparar a relação água/cimento, até porque sua determinação precisa não é possível nem mesmo para o concreto convencional.

Considerando-se a natureza porosa dos agregados de RCD, deve-se dosar o concreto com a menor quantidade de poros possível na pasta de cimento, melhorando suas propriedades mecânicas e durabilidade. Hoje, um consumo de cimento baixo também é mandatório sob o ponto de vista de impacto ambiental (DAMINELI, 2010).

47.5.2 Influência no estado endurecido

47.5.2.1 Retração

Concretos com agregados de RCD retraem mais que os concretos com agregados naturais (Figura 31). A presença de água ocorre tanto nos poros da pasta de cimento quanto nos poros do agregado. A exposição a condições de maior ventilação e temperatura sempre implicará num volume maior de água evaporada. Além disso, o módulo de elasticidade do agregado também é menor e, conseqüentemente, menor é a restrição para a movimentação da pasta que se retrai. Como conseqüência, a retração volumétrica do material é sempre maior em relação ao concreto com agregados convencionais.

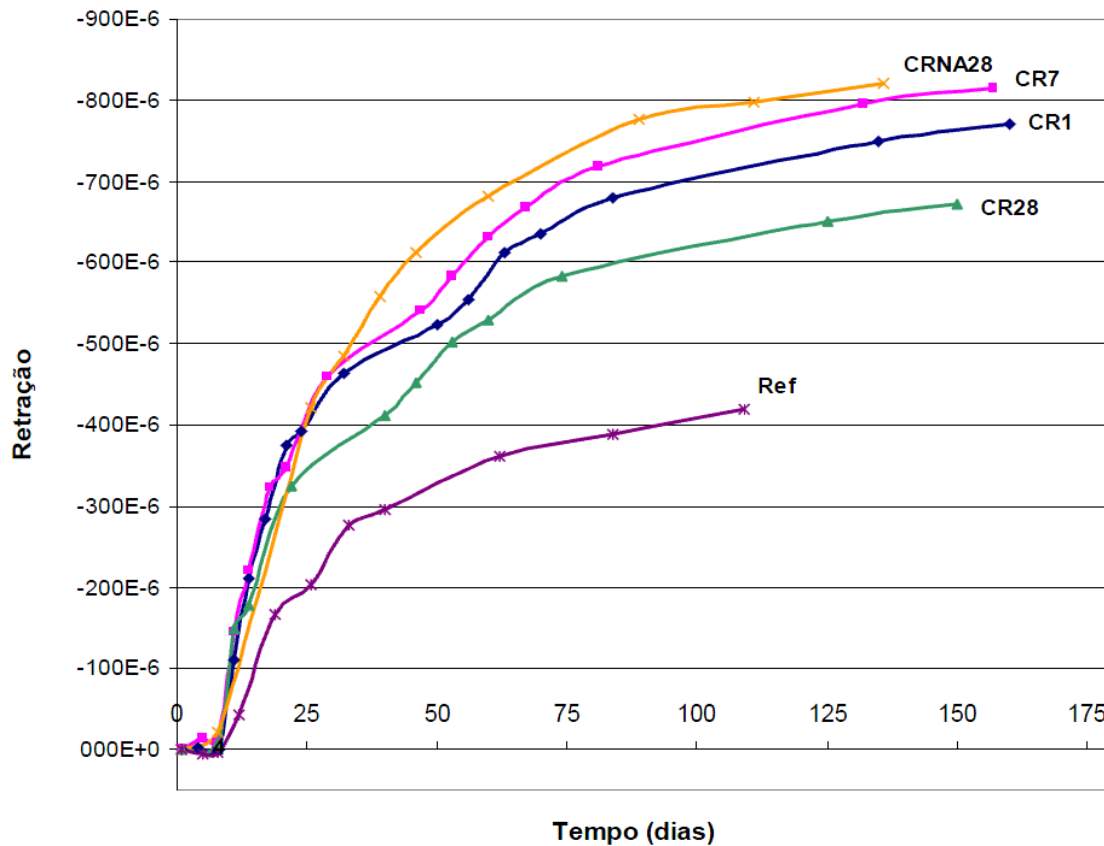


Figura 31 – Retração dos concretos com ARC e agregado natural (BUTTLER, 2003).

47.5.2.2 Porosidade (absorção de água)

Conforme discutido inicialmente, os agregados de RCD serão geralmente mais porosos que os agregados naturais. Desta forma, para uma mesma relação água/cimento efetiva, ou seja, não contando com a água de saturação dos agregados, a porosidade total do concreto com agregados de RCD sempre será maior que a do concreto com agregado natural. Gómez-Soberón (2001) comprovou que os teores crescentes de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto implicavam num aumento da porosidade do concreto (Figura 32), especialmente os poros capilares.

Os agentes agressivos do concreto ingressam através da sua porosidade e respectivas interconexões (permeabilidade). Esse quesito é o que apresenta pior desempenho para os concretos com agregados de RCD (WIRQUIN et al., 2000). Como o volume de agregados chega a representar 70% do volume do concreto, dependendo da qualidade dos agregados de RCD, a absorção água do concreto pode praticamente dobrar, saindo dos usuais 6-8% para 12-14% (Angulo, 2005). Por outro lado, uma diminuição da relação água/cimento de 0,6 para 0,4 tem um menor efeito na redução do valor de absorção de água do concreto; em geral, 2%.

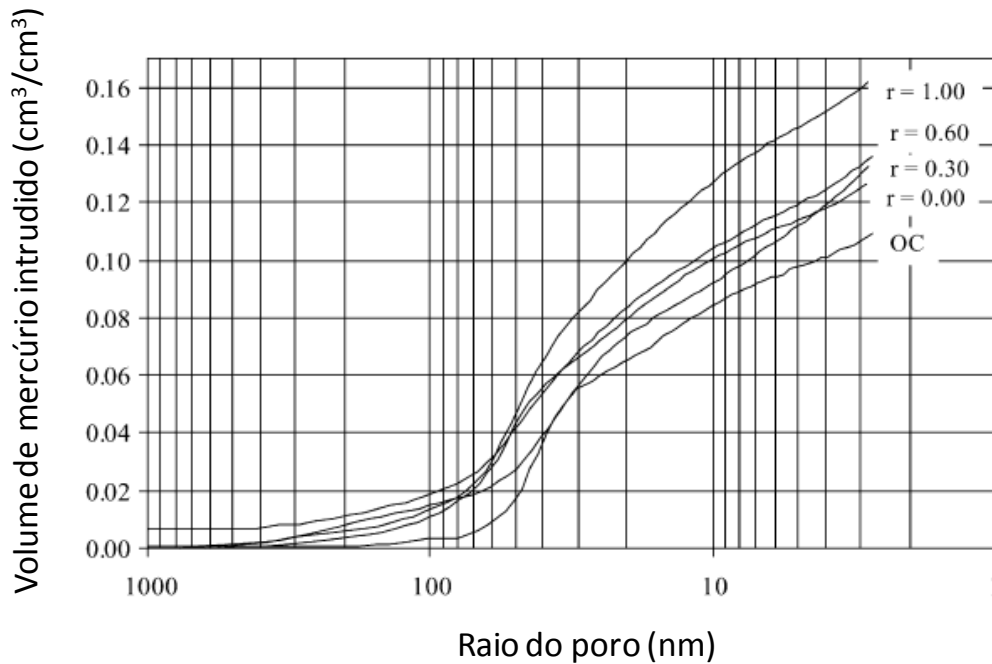


Figura 32 – Volume de mercúrio x tamanho de poros do concreto, em função de teores crescentes de substituição de agregado natural por agregado reciclado (r) (GOMÉZ-SOBERÓN, 2002).

Não é recomendado uso em estruturas de concreto armado aparente em atmosferas urbanas poluídas (ricas em CO₂). O agregado reciclado contém pasta de cimento hidratada que sofrerá processo de carbonatação. Assim, o processo de carbonatação no concreto com agregado de RCD é mais acelerado do que no concreto com agregado natural (LEVY, 2001) (Figura 33).

Isso, no entanto, não significa que uma areia reciclada de cerâmica, que não sofre processo de carbonatação (LEVY, 2001) e apresente baixa porosidade, não possa apresentar uma durabilidade satisfatória. Esse material certamente não contribuiria para aumento na frente de carbonatação do concreto com agregado de RCD. Além disso, não se descarta a possibilidade de uso de pinturas que atuem como barreira a este processo de degradação e, conseqüentemente, ao processo de corrosão da armadura do concreto.

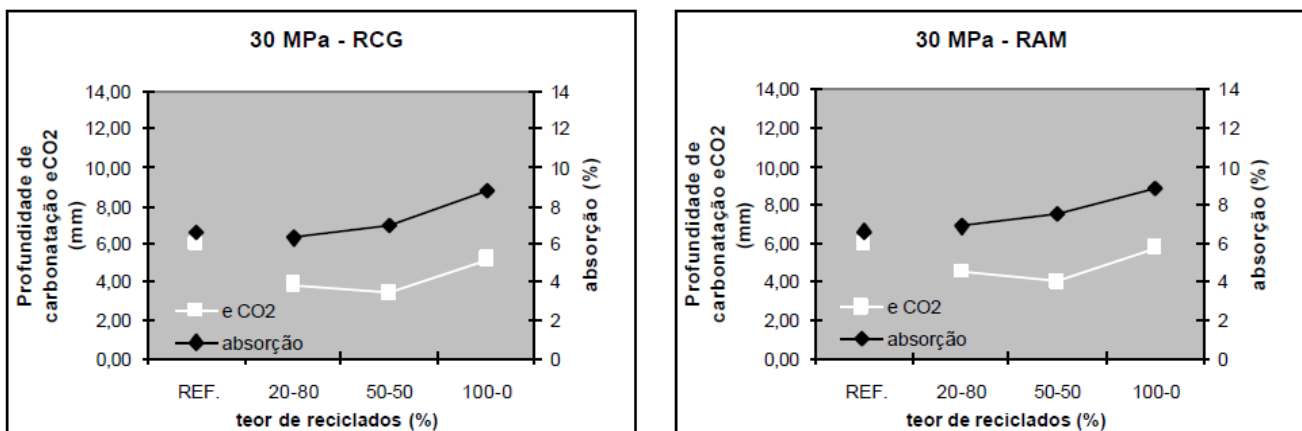


Figura 33 – Inter-relação entre absorção de água e profundidade de carbonatação dos concretos com agregados de RCD (LEVY, 2001).

47.5.2.3 Resistência à compressão

A resistência mecânica do concreto com agregados de RCD (porosos) sempre será menor que a do concreto com agregado natural (sem poros). Essa resistência pode ser aumentada pela redução da relação água/cimento, reduzindo a porosidade da pasta de cimento. Isso acarreta um aumento do consumo de cimento e, por conseqüência, um maior impacto ambiental do concreto no tocante a emissões de CO₂, que precisa ser ponderado de acordo com uma análise de ciclo de vida.

O concreto obedece à lei clássica de Ciência dos Materiais, que estabelece uma relação inversamente proporcional entre resistência e porosidade (CALLISTER, 2010). Assim, a porosidade global do concreto com agregados reciclados deve ser controlada por:

- Teores controlados de substituição do agregado natural por agregado de RCD, compatibilizando-se a sua porosidade com a porosidade da pasta de cimento (controlada pela relação água efetiva/cimento); e
- Redução da porosidade do agregado de RCD por processamento, tornando sua qualidade compatível ao agregado natural, independente da porosidade da pasta de cimento (relação água efetiva/cimento).

A influência dos teores crescentes de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto na resistência à compressão dos novos concretos estruturais (30 MPa) está ilustrada na

Figura 34. Quando se utilizam agregados reciclados de concreto cuja absorção de água é inferior a 7,0% pode-se substituir cerca de 20% do agregado natural pelo mesmo, reduzindo-se apenas 10% da resistência à compressão do concreto. Um aumento no consumo de cimento da mesma ordem de grandeza seria suficiente para produzir um concreto com propriedades mecânicas semelhantes ao concreto com agregado natural.

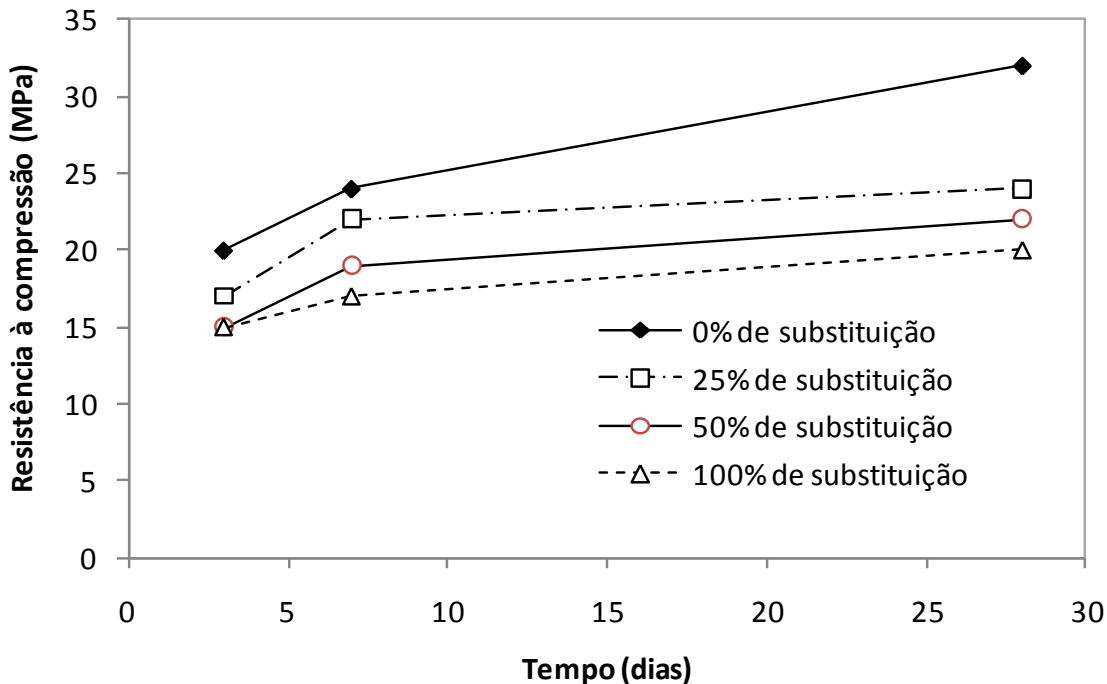


Figura 34 – Influência do teor de substituição do agregado natural por ARC na resistência à compressão do concreto de mesma relação água/cimento (BAZUCO, 1999).

Esse resultado é confirmado por diversos autores estrangeiros e foi recomendado pela RILEM (Rilem Recommendation, 1994). A substituição de até 20% de agregados naturais por agregados de concreto reciclados virou norma em países como a Holanda (Hendriks, 2000) e na Espanha (Vazquez, 2008). Essa abordagem tem um enfoque bastante conservador e, de certa forma, incorpora uma alternativa que pouco explora o potencial do resíduo e praticamente dilui o resíduo no material em questão.

A abordagem de substituição não foi amplamente disseminada como uma prática na preparação de concreto. Acredita-se que a economia pelo uso do agregado de concreto reciclado em até 20% não justifica o investimento necessário para se adaptar uma central de concreto (LEVY, 2004); muito embora seja extremamente importante do ponto de vista ambiental. Esse entrave no Brasil é ainda mais sério dado pouca disponibilidade de resíduo de concreto que não esteja misturado com cerâmica.

Leite (2001) avançou no sentido de empregar modelagem estatística para obter uma melhor compreensão da influência de teores crescentes de substituição dos agregados naturais por agregados mistos de RCD e da relação água/cimento efetiva na resistência à compressão do concreto (Figura 35). Nessa modelagem foi incluída a fração miúda desse agregado reciclado.

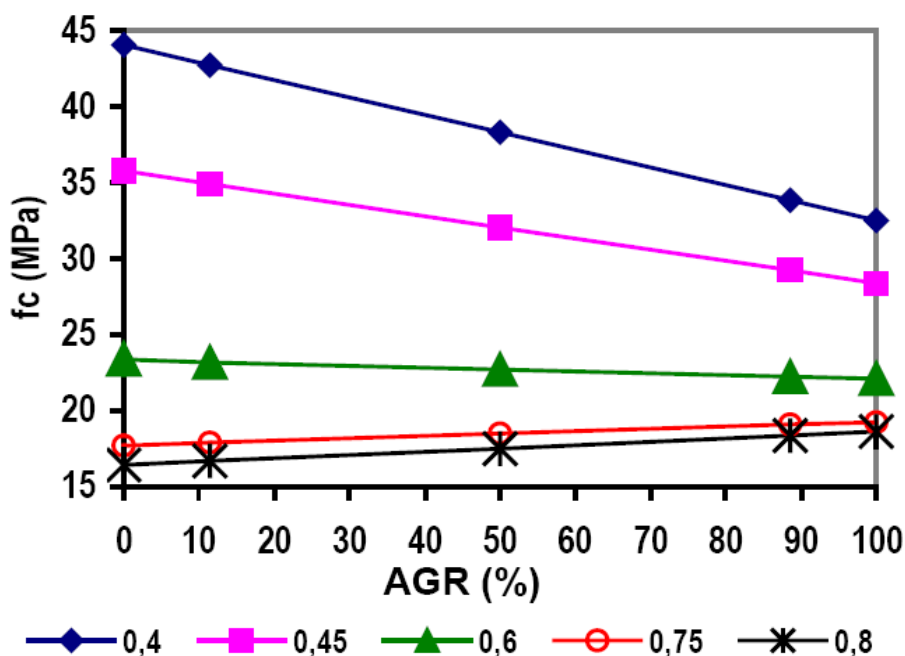


Figura 35 – Influência do teor de substituição do agregado de RCD e da relação água/cimento efetiva na resistência à compressão do concreto. Extraído de Leite (2001).

Tal modelo confirma que, para relações água/cimento efetivas acima de 0,60, a substituição integral de agregados naturais por agregados graúdos de RCD são viáveis tecnicamente, porque a resistência à compressão do concreto reduz muito discretamente (<

2MPa). Há necessidade de aumento discreto de consumo de cimento quando comparado com um concreto produzido com agregado natural.

Substituições parciais entre 10 e 20% de agregados naturais por agregados graúdos de RCD são também viáveis para concretos estruturais. Quanto maior o teor de cerâmica vermelha do agregado reciclado, o mesmo se torna mais poroso. Nesse caso mais extremo, os teores de substituição geralmente não ultrapassam 10%.

O efeito combinado do agregado graúdo e do agregado miúdo de RCD reduz ainda mais a resistência à compressão do concreto, porque ambos os produtos são mais porosos do que os agregados naturais.

Trabalhar com a natureza heterogênea dos agregados de RCD foi sempre a maior dificuldade. Do ponto de vista tecnológico, é interessante modelar a influência da absorção de água do agregado de RCD na resistência à compressão do concreto, para uma relação água/cimento efetiva similar, seja o mesmo composto por uma mistura com agregado natural ou exclusivamente de RCD (Figura 36).

Neste caso, foram utilizados os dados experimentais obtidos por Bazuco (1999), Leite (2001) e Passos (2009), que trabalharam com agregados reciclados de concreto (ARC) e agregados reciclados mistos (ARM) em teores de substituição crescentes (de 0 até 100%), e relações água/cimento efetivas entre 0,4 e 0,5 e consumos de cimento entre 400 e 500 kg/m³.

Os valores de consumo de cimento já são elevados para se confeccionar um concreto estrutural (40-50 MPa). São viáveis no concreto estrutural quando a absorção de água do agregado composto está próxima de 3,0%.

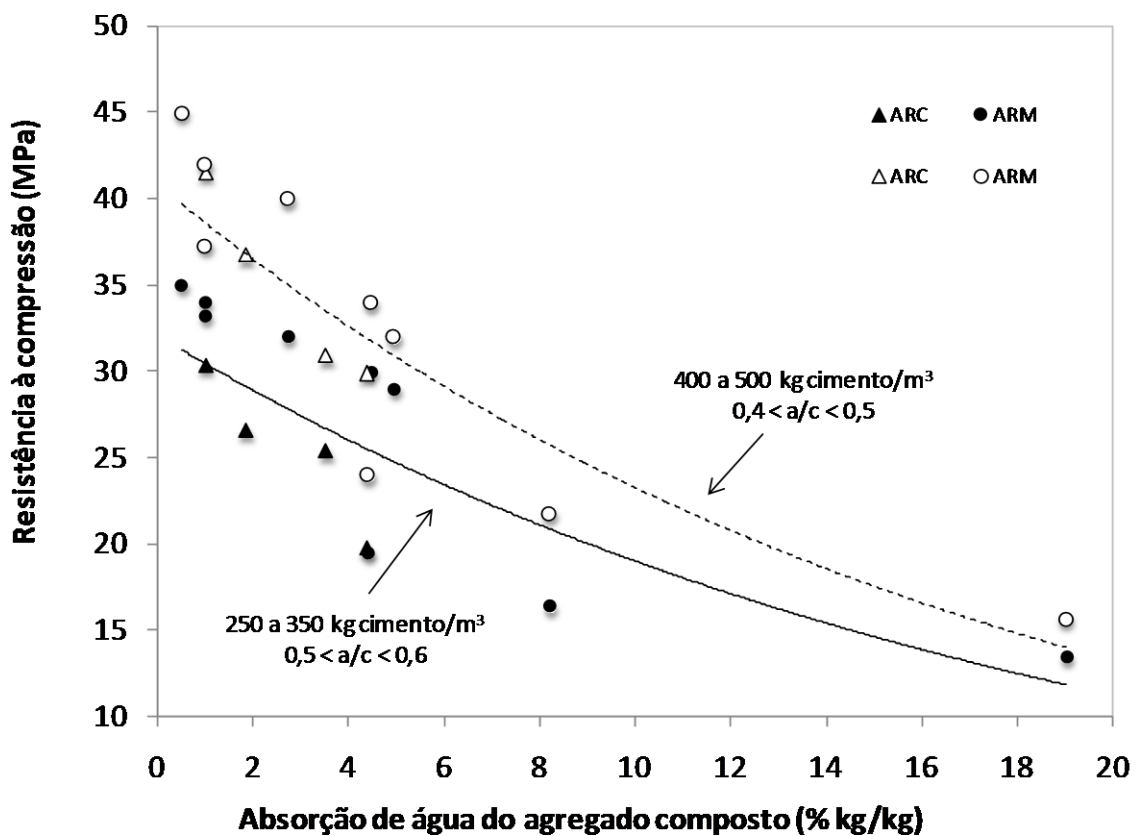


Figura 36 – Resistência à compressão do concreto x absorção de água do agregado composto.

Para concretos estruturais (25-35 MPa) com consumos de cimento mais moderados (250-350 kg/m³), o ARC já pode ser utilizado quase que integralmente com vantagens técnicas competitivas quando a absorção de água do agregado composto é 7%. Torna-se viável tecnicamente os usos em elementos estruturais pré-moldados e pavimentos de concreto. Pode-se também admitir aproximadamente até 50% de ARM.

É possível também separar esses agregados de acordo com os valores de massa específica aparente, que incluem o seu volume de poros. Assim, através da separação industrial por densidade, é possível classificá-los de acordo com sua porosidade, quando os colocamos secos num líquido com densidade conhecida (ANGULO, 2005), ou ainda num jigue, composto por um leito com água contendo forças gravitacionais capazes de promover uma sedimentação controlada das partículas.

Esse processo, numa densidade de corte de 2,2 kg/dm³, reduz tanto os valores médios de absorção de água dos agregados de RCD quanto a dispersão dos resultados medido partícula a partícula (ANGULO, 2005), conferindo maior homogeneidade e melhor qualidade ao agregado reciclado.

A separação por densidade do agregado de RCD convencional permite recuperar 50% de agregado reciclado de alta qualidade, com massas específicas aparentes superiores a 2,3 kg/dm³ e absorção de água inferior a 3,0%.

A Figura 37 mostra os benefícios ao se produzir um agregado de RCD menos poroso, obtido por separação por densidade. Para qualquer faixa de resistência de concreto, os agregados de RCD separados por densidade podem ser utilizados integralmente, com desempenho semelhante ao natural, sem implicar aumento do consumo de cimento.

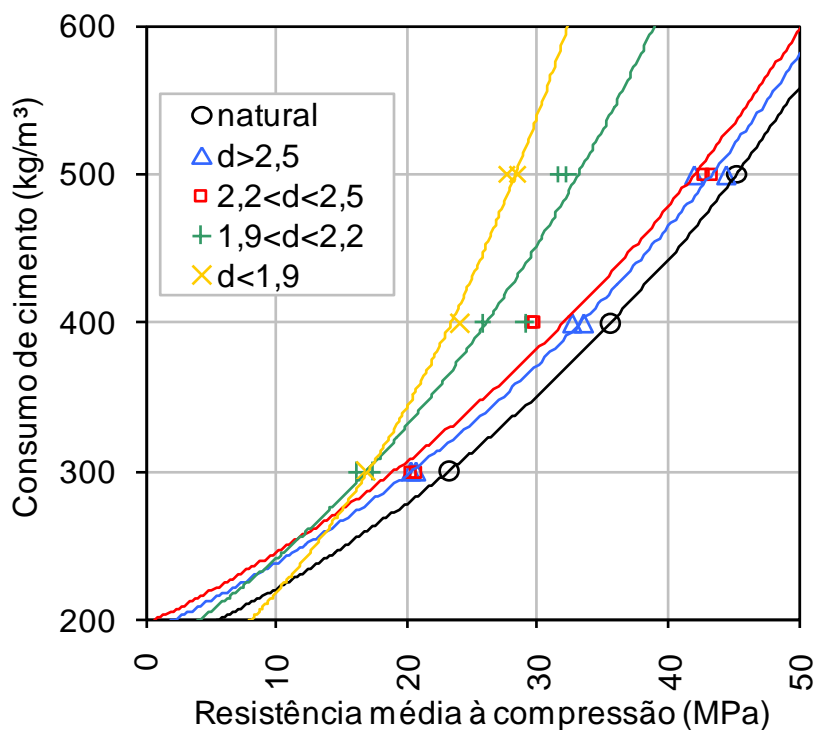


Figura 37 – Resistência média à compressão x consumos de cimentos dos concretos com agregados de RCD separados por densidade (ANGULO, 2005).

Resultados similares ou até superiores podem ser obtidos através do tratamento térmico e moagem do agregado reciclado de concreto ou empregando separadores industriais automáticos, que separam a cerâmica vermelha por cor, ou pelo uso de novos procedimentos de dosagem.

47.5.2.4 Módulo de deformação e fluência

Como o comportamento do concreto com agregado de RCD se distancia do regime elástico linear perfeito, é mais correto adotar a terminologia de módulo de deformação. O módulo de deformação do concreto com agregados de RCD é fortemente afetado pela sua porosidade (Figura 38).

Como os agregados de RCD contêm poros e estão microfissurados pela britagem, o módulo de deformação diminui à medida que aumenta o teor de substituição do agregado natural (porosidade quase desprezível) por esses agregados (Figura 39a). Quando adicionados integralmente no concreto, a porosidade dos agregados reduz significativamente o módulo de deformação (Figura 39b), porque o volume desse material no concreto é muito superior ao volume de pasta de cimento. Quando se fixa a porosidade do agregado, o módulo é governado pela relação água efetiva/cimento da pasta de cimento. Por isso, não existe uma correlação única para o agregado de RCD.

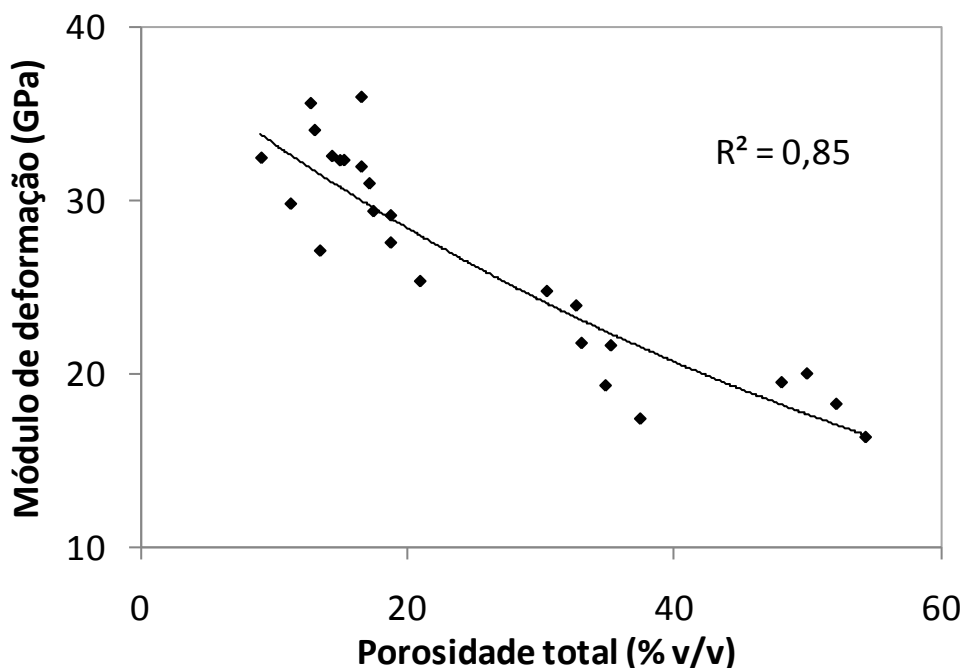


Figura 38 – Módulo de deformação do concreto x porosidade (ANGULO, 2005).

A redução do módulo de deformação do concreto com agregado de RCD tem implicações importantes no projeto de estruturas de concreto armado. Esse parâmetro afeta diretamente a rigidez das peças submetidas a esforços de flexão. A recomendação da RILEM define um parâmetro para correção da geometria da peça (Rilem Recommendation,

1994). A correção implica aumento de seção resistente da peça, reduzindo a deformabilidade da mesma.

Essa redução de rigidez também afeta o módulo ao cisalhamento; variável importante no cálculo das tensões de força cortante (Etxeberria et al., 2007). Uma redução no espaçamento dos estribos pode ser necessária.

Toda estrutura de concreto sofre deformação lenta. Com a adição do agregado de RCD, aumenta-se a presença de poros e água na microestrutura desse material. Assim, deve-se esperar um aumento considerável da fluência. Ou seja, haverá um aumento de deformação ao longo do tempo. Assim, o impacto do uso de agregados de RCD no módulo de deformação e fluência do material deve ser considerado atentamente no projeto das estruturas de concreto armado.

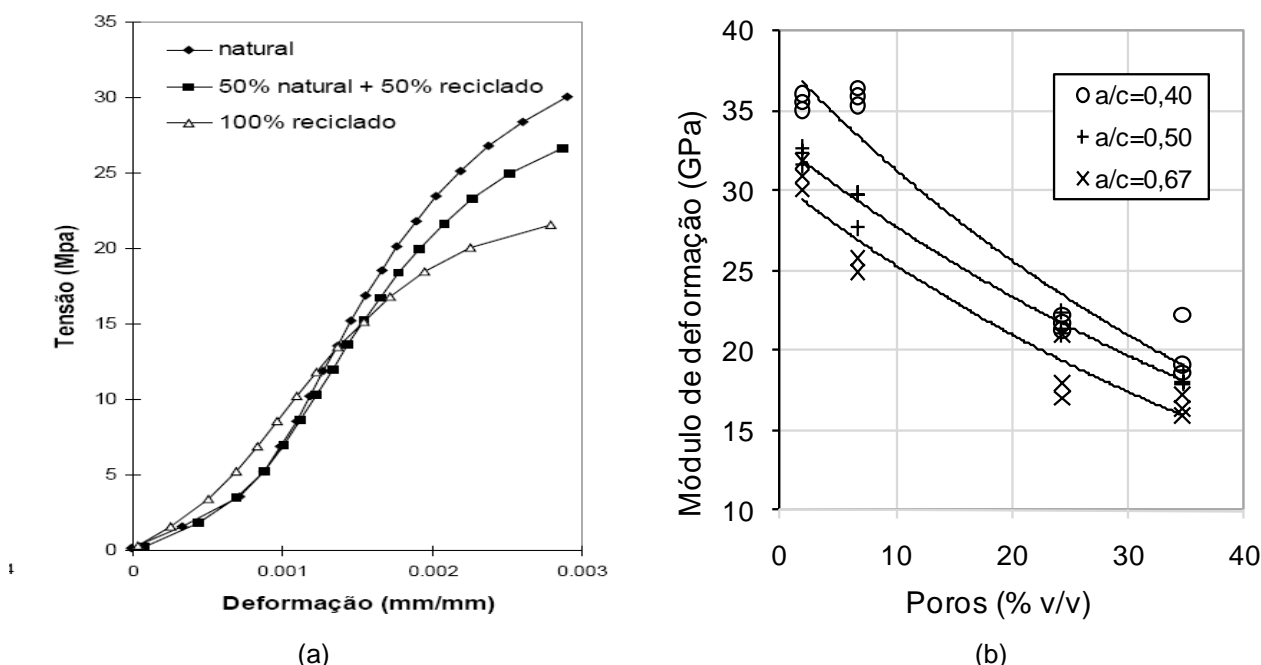


Figura 39 Diagramas tensão-deformação dos concretos com teores crescentes de substituição de ARC (LATTERZA, 1998) (a) e influência da porosidade do agregado de RCD no módulo de deformação do concreto (ANGULO, 2005) (b).

47.6 Comentários finais

É possível produzir qualquer tipo de concreto com agregados reciclados, desde que se controle a sua porosidade. No caso do RCD, o material deve ser devidamente segregado na origem ou triado eficientemente na usina de reciclagem, eliminando-se, o máximo possível, a presença de gesso, de vidro cerâmico e de madeira.

Via de regra, o concreto é o material menos poroso e produz os agregados reciclados de melhor qualidade. Pode-se remover a pasta de cimento durante o processamento, produzindo agregados com absorção de água inferior a 3,0%. Os agregados produzidos a partir de resíduos mistos, devido à presença de cerâmica vermelha, acabam sendo mais porosos. Pode-se também remover a cerâmica vermelha industrialmente, seja por densidade ou pela cor, produzindo agregados com valores similares de absorção de água. Concretos

estruturais até 45 MPa podem ser produzidos empregando-se integralmente esses agregados de alta qualidade, desde que não expostos a condições ambientais muito críticas (atmosfera marinha ou urbana com elevada concentração de CO₂).

Quando não se melhora a qualidade dos agregados reciclados pelo processamento, deve-se controlar a porosidade do agregado composto, promovendo uma mistura dos mesmos com agregados naturais. Dependendo do teor de cerâmica vermelha no agregado, o teor de substituição varia; por isso, recomenda-se manter a absorção do material composto entre 3,0 e 7,0%. No primeiro caso, o agregado é apropriado para concretos de 35-45 MPa e os teores de substituição dos agregados naturais estão entre 10 e 20% (agregado reciclado misto e de concreto, respectivamente). No segundo caso, o agregado é apropriado para concretos de 25-35 MPa e os teores de substituição estão entre 50 e 100% (agregado reciclado misto e de concreto, respectivamente). Concretos não estruturais (< 25 MPa), o uso integral do agregado reciclado de concreto e misto é viável, devendo-se atentar para a questão da maior permeabilidade do concreto.

Como a perda de desempenho do concreto é inevitável, deve-se compatibilizar a porosidade do agregado com a relação água/cimento do concreto. Deve-se considerar não apenas o custo/benefício imediato, mas também ao longo do tempo, e os aspectos ambientais, sem o que não há sentido na busca de uso do RCD, pois fica prejudicado todo o benefício ambiental proposto pelo uso do resíduo.

47.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ANGULO, S. C. et al. Upgrade of mixed C&DW recycled aggregates quality by automatic sorting. **In: Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology. Proceedings...** Cancun. 2008.
- ANGULO, S.C.; MUELLER, A. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. **Materials and Structures**. n. 42. 2009. P. 739-748.
- ANGULO, S. C. et al. Processamento de resíduos de construção e demolição em usinas de reciclagem européias. **In: Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos na Construção, Feira de Santana. Anais...** Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15114: resíduos sólidos da construção civil: áreas de reciclagem: diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004. 7p.
- _____. NBR 15116: agregados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004. 12 p.
- _____. NBR 10004: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, ABNT. 2004. 71p.
- _____. NBR 12655: concreto: preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, ABNT. 2006. 18p.
- _____. NBR 15577: agregados: reatividade álcali-agregado. Rio de Janeiro, ABNT. 2008. 11p.
- _____. NBR 15900-1: água para amassamento do concreto: parte 1: requisitos. Rio de Janeiro, ABNT, 2009. 11p.
- _____. NBR 7211: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, ABNT. 2009. 9p.
- BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para produção de novos concretos**. 1999. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- BUTTLER, A. M. **Concretos com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- BUNTENBACH, S. et al. Wet processing of Demolition Rubble. **Aufbereitungs-technik**, v. 38 n.3. 1997. p.130-138.
- BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS6187: Code of practice for demolition. Inglaterra. 2000. 125p.

- CALLISTER, W. D. **Materials science and engineering: an introduction**. New York: John Wiley & Sons, 2010. 871 p
- CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- CHAVES, A.P. **Teoria e prática do Tratamento de Minérios**. Editora Signus: São Paulo, v. 1 (segunda edição). 2002. p.
- CHAVES, A. P. et al. Tecnologia Mineral e suas aplicações na reciclagem de resíduos de construção e demolição. In: 61 Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. **Anais**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.
- DAMINELLI, B. L. **Estudo de métodos para caracterização de propriedades físicas de agregados graúdos de resíduo de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2007. 125p.
- DAMINELLI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement and Concrete Composites**. n. 32, 2010. p. 555-562.
- DEHLER, M. 2003. Optical sorting of mineral raw materials. **Aufbereitungstechnik**, v. 44, n.10. 2003. p. 38-42.
- DEUTSCHE INSTITUT FUR NORMUNG (DIN). DIN 4226-100: aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates. Germany, 2002.
- ETXEBERRIA, M. L. **Experimental study on microstructure and structural behavior of recycled aggregate concrete**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Politècnica de Catalunya. 2004. 242 p.
- GÓMEZ-SOBERÓN, J. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - an experimental study. **Cement and Concrete Research**, v.32, p.1301-1311, 2002.
- HANISCH, J. Current developments in the sorting of building waste. **Aufbereitungs-technik**. v. 39, n. 10, 1998.
- HENDRIKS, C.F. **The building cycle**. Holanda: Aeneas, 2000. 231 p.
- JOHN, V. M. Construção Civil e Meio Ambiente. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed: ISAIA, G. et al. São Paulo: IBRACON, 2007
- JUNGMANN, A. et al. Building Rubble Treatment using alljig in Europe and USA. **Aufbereitungs-technik** . vol. 38, n. 3. 1997. p.130-138.
- KASAI, Y. t al. **International Rilem Symposium on demolition and reuse of concrete and masonry**. London: E&FN Spon, 1994.
- KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33. 2003. p. 703– 711.
- KROPP, J. Bestimmung der Kernfeuchte wassergesättigter: Bauschuttzyklate anhand des Trocknungsverhaltens. Amtliche Materialprüfungsanstalt Bremen. 2005. 12 p.
- LATTERZA, L.M. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. 1998. 130f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- LIMA, J.A.R. **Avaliação das consequências da produção do concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 151 p.
- MEHTA, P.; MONTEIRO, P. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES (MC). **Manejo e gestão de resíduos da construção civil: procedimentos para solicitação de financiamentos**. Editores: PINTO, T. P. et al. Volume 1. Brasília: CAIXA, 2005. 96 p.
- MINISTÉRIO DO TRABALHO (MT). NR 15: atividades e operações insalubres. Brasília. 2010. 85 p. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br>
- NAWA, T. **Recycling of Concrete**. 2010. Disponível em <http://www.eng.hokudai.ac.jp/COE-area/workshop/pdf/05feb4_nawa.pdf>.
- NEVES, P. B. Características de fragmentação e microestruturais de rochas e seu comportamento na britagem para a produção de agregado. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 129p.
- NEVILLE, A. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997. 828p.

- OLIVEIRA, M.B.; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**. v.16, n.1-3, 1996, p. 113-117.
- PETERSEN, I. F. Blending in circular and longitudinal mixing piles. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**. n. 74, p. 135-141, 2004.
- PETERSEN, L. et al. Representative sampling for reliable data analysis: Theory of Sampling. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, n. 77. 2005. P. 261– 277.
- POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**. n. 34, p. 31-36, 2004.
- QUARCIONI, V. A. **Reconstituição de traço de argamassa: atualização do método IPT**. 1998. 188p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- RILEM RECOMMENDATION. Specification for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures**, v. 27, p. 557-59, 1994.
- SAMPAIO, C.H.; TAVARES, L.M. **Beneficiamento gravimétrico: uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade**. Porto Alegre: Editora UFRGS, 2005. 603 p.
- SANTOS, A.; PINTO, T. C. N. **Contaminação do ar em usinas de reciclagem brasileiras e aspectos de saúde**. In: RCD como material de construção. Apresentação: USP, IPT. São Paulo. 2008.
- SHIMA, H et al. An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment by the Input-Output Analysis. **Journal of Advanced Concrete Technology**, n.3, v. 1. 2005. p. 53-67.
- SMITH, M.R.; COLLIS, L. Aggregates – sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes. 2 ed. London: The Geological Society, 1993. 339 p.
- TOMOSAWA, Fuminori et al. The Way Concrete Recycling Should Be. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 3, n. 1. 2005. p. 3-16.
- VAZQUEZ, E. R. Progress and consolidation of recycling in the built environment. In: CDW as building materials. Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
- WEBB, P.A.. **Volume and Density Determinations for Particle Technologists**. Micromeritics Instrument Corp. Norcross. 2001. 16 p.
- WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento portland**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2008. 295p.
- WIRQUIN, E. et al. Utilisation de l'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité – Application aux bétons de granulats recycles. **Materials and structures**, v. 33, p. 403-08, 2000.
- ZORDAN, S. E. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas. 1997. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1997.