



Exacta

ISSN: 1678-5428

exacta@uninove.br

Universidade Nove de Julho

Brasil

de Oliveira, Márcio Joaquim Estefano  
Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo  
Exacta, vol. 4, núm. Esp, novembro-special, 2006, pp. 15-24  
Universidade Nove de Julho  
São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81009902>

- ▶ [Como citar este artigo](#)
- ▶ [Número completo](#)
- ▶ [Mais artigos](#)
- ▶ [Home da revista no Redalyc](#)

 redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo<sup>1</sup>

Márcio Joaquim Estefano de Oliveira  
Unesp, Faculdade de Engenharia Civil, São Carlos – SP [Brasil]  
mestefano@feg.unesp.br

O emprego de agregado reciclado de resíduo de concreto e de rejeitos cerâmicos se apresenta como alternativa promissora para a fabricação de componentes e elementos de construção civil, com a finalidade de atender às questões técnicas, econômicas, sociais e ambientais. A matéria-prima empregada na pesquisa foi o resíduo de concreto descartado pelas obras de construção civil que, muitas vezes, contém restos de materiais cerâmicos provenientes de blocos e azulejos, com idade, composição e outros parâmetros originais diferentes. O objetivo do trabalho foi melhorar as propriedades do concreto obtido com agregado reciclado, pelo emprego de aditivo terpolímero acrílico em emulsão aquosa, com incorporador de bolhas de ar para tornar o concreto leve e melhorar a consistência, a trabalhabilidade, a impermeabilidade e a resistência mecânica do concreto. O cimento Portland, os agregados graúdos naturais e os agregados graúdos reciclados foram caracterizados de acordo com as normas brasileiras. O concreto de referência e o concreto com agregado reciclado foram dosados para uma tensão de ruptura média de 30 MPa aos 28 dias de idade e estudados quanto à resistência, à compressão, resistência à tração, absorção de água e massa específica. Fez-se também interpretação da microestrutura dos concretos por meio de análise petrográfica e da microscopia eletrônica de varredura (MEV). A viabilidade técnica deste novo material vai ao encontro do desenvolvimento sustentável, na medida em que minimiza impactos ambientais e cria a possibilidade do emprego de sistemas construtivos mais otimizados, facilitando a construção de edifícios convencionais e de interesse social.

**Palavras-chave:** Agregado reciclado. Meio ambiente. Microestrutura do concreto. Resíduos de concreto. Reciclagem de concreto.



## 1 Introdução

Ultimamente, tem sido estudada a reutilização de resíduos originários da construção civil como os agregados para concretos, em blocos não estruturais ou diretamente em sub-base de vias públicas. Cidades como São Paulo (SP), Santo André (SP) e Belo Horizonte (MG) tiveram iniciativas nesse sentido (HAMASSAKI; SRIGHI NETO; FLORINDO, 1996). A utilização dos resíduos de construção reciclados é limitada ao concreto sem função estrutural, por falta de conhecimento sobre seu comportamento ao longo do tempo, sob a ação das cargas e de agentes agressivos como a chuva ácida que ocorre nos centros urbanos e/ou industrializados.

A reciclagem de resíduos é hoje uma necessidade para a preservação do meio ambiente não apenas pelo risco de contaminação do solo e do lençol freático, mas também pela possibilidade de redução do custo e do consumo de energia na produção de materiais de construção civil (SILVA; SOUZA; SILVA, 1996). A construção civil, pelo extraordinário volume físico de materiais que incorpora, é o maior mercado potencial para a reciclagem. A maioria dos resíduos de construção possui contaminantes ambientais, cujo impacto geralmente envolve uma complexidade de mecanismos, e cuja heterogeneidade, em razão do processo industrial, faz com que as pesquisas de investigação da reciclagem de resíduos incluam a avaliação do risco ambiental do novo produto a ser confeccionado (JOHN, 1996).

Quando se analisa uma massa de material descartado pelas obras de construção civil, observa-se que, apesar de sua heterogeneidade, a quase totalidade dos materiais que a compõem é de alto valor agregado e de boa resistência mecânica, como areia, pedra-britada, concreto e argamassa endurecidos, tijolo, caco cerâmico e madeira. Segundo Brito Filho (1999), os mate-

riais gerados e descartados pelas obras de construção civil são verdadeiras jazidas de matérias-primas passíveis de exploradas. Assim, as formas de reaproveitamento dos materiais descartados reciclados podem ser: emprego em obras de pavimentação, regularização e cascalhamento de ruas de terra, obras de drenagem, execução de contrapisos e produção de concretos. A reciclagem de entulho como material de construção civil, iniciada na Europa após a Segunda Guerra Mundial, encontra-se muito atrasada no Brasil, apesar da escassez de agregados nas regiões metropolitanas, especialmente se comparada com países europeus, nos quais a fração reciclada pode atingir cerca de 60%, como é o caso da Holanda, que já discute a certificação do produto que se converteu em negócio. Embora se observe a movimentação das empresas interessadas em explorar o negócio de reciclagem de entulho e não apenas o negócio de transporte, as experiências brasileiras estão limitadas a ações das municipalidades que buscam reduzir os custos e o impacto ambiental negativo da deposição de enorme massa de entulho no meio urbano (JOHN, 1999).

No Brasil, atualmente existem empresas construtoras que reciclam os rejeitos de construção no próprio canteiro de obras para minimizar custos, por meio da moagem de argamassas, tijolos, concreto, vidro e cal. O resultado dessa moagem dá como produto um agregado miúdo de granulometria muito fina empregada na fabricação de argamassa de revestimento de paredes e de assentamento de componentes de alvenaria (BRITO FILHO, 1999). O produto obtido geralmente não recebe tratamento científico e a consequência é o aparecimento de patologias após pouco tempo do seu emprego na construção. A patologia mais comum é a fissuração por retração, com o surgimento de segregação de constituintes da argamassa pela má hidratação de

aglomerantes. A heterogeneidade da argamassa faz surgir reações entre compostos que comprometem a durabilidade e a resistência do material reciclado.

O resíduo de construção e demolição possui características bastante peculiares, com uma gama muito grande de aspectos que interferem na quantidade, na composição e nas características desse resíduo. Destacam-se, entre esses aspectos, o nível de desenvolvimento da indústria da construção local, a qualidade e o treinamento da mão-de-obra disponível, as técnicas de construção e demolição empregadas, a adoção de programas de qualidade e redução de perdas, a adoção de processos de reciclagem e reutilização no canteiro, os tipos de materiais predominantes na região, o desenvolvimento de obras especiais na região (metrô, esgotamento sanitário, restauração de centros históricos, entre outros), o desenvolvimento econômico da região e a demanda por novas construções. Nesse sentido, as propriedades físico-químicas dos resíduos de construção e demolição (RCD) estão condicionadas a parâmetros específicos da região geradora do resíduo e à ação de agentes agressivos ao longo do tempo (OLIVEIRA; ASSIS, 1999).

O agregado reciclado graúdo gerado pela operação de britagem do resíduo de concreto e de blocos cerâmicos tem coeficiente de forma similar ao de um agregado graúdo obtido na britagem de uma rocha calcária. Em geral, o agregado reciclado apresenta uma forma mais irregular e uma textura superficial mais áspera e porosa do que o agregado natural. A fração grossa possui uma distribuição granulométrica adequada para quase todas as aplicações de agregados em construções.

Para o emprego do agregado reciclado proveniente de resíduo de concreto em estrutura de concreto armado, propriedades como resistência à compressão, resistência à tração, taxa de absorção

de água pelo agregado reciclado e taxa de absorção de água do concreto produzido com agregado reciclado podem fornecer informações importantes a respeito do comportamento mecânico do novo produto e dar indicações sobre a sua durabilidade quando sob influência das condições de trabalho em que é empregado. Muitos estudos já vêm sendo realizados com base nesses parâmetros, mas a variabilidade e as condições geológicas podem mudar algumas características do agregado reciclado, em relação ao tipo de cimento empregado, ao concreto produzido com diferentes resistências, ao fator água-cimento e inclusões, como materiais cerâmicos e argamassas endurecidas em pequenas quantidades.

Estuda-se, nesta pesquisa, a produção de concreto com substituição parcial do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado, aditivado com terpolímero acrílico em emulsão aquosa com incorporador de bolhas de ar para tornar o concreto leve, e observam-se os seguintes parâmetros: absorção de água do agregado graúdo natural e reciclado, resistência à compressão simples e à tração do concreto e a sua microestrutura.

## 1.1 Concreto de cimento Portland

O concreto é um material feito pela mistura de cimento Portland, areia, pedra britada e água. Seu emprego na construção civil é muito grande por ser de fácil moldagem, relativamente barato, e por possuir boa resistência à compressão e boa durabilidade quando corretamente dosado e protegido dos agentes agressivos. O concreto tem um tempo de vida útil, após o que envelhece ou se deteriora, tornando-se resíduo de construção de origem mineral. Portanto, entender a composição do concreto novo, as reações que podem causar danos à sua estrutura química e sua decomposição por ação de agentes agressivos torna-se importante quando se pretende reutilizar ou reciclar o resíduo de concreto.



## 1.2 Cimento Portland comum

A calcinação de mistura convenientemente proporcionada de calcário, argila e, eventualmente, de minério de ferro, finamente moída, homogeneizada e submetida a uma temperatura de 1.450 °C, propicia a combinação de óxidos ácidos com óxidos básicos e, no início da fusão, são formados os silicatos e aluminatos hidráulicos de cálcio. Esse produto, que ao sair do forno sofre um resfriamento brusco, é chamado de clínquer Portland ou simplesmente clínquer. O cimento Portland comum endurece quando misturado com a água. A composição dos cimentos Portland modernos é controlada e guarda propriedades semelhantes em todo o mundo.

A análise química permite determinar a composição do cimento Portland, dosando o teor de seus principais óxidos que são: CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SO<sub>3</sub> e os chamados óxidos secundários, como MgO, TiO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O, que aparecem em pequenas quantidades. Dos óxidos secundários, dois são de interesse: os óxidos de sódio e potássio, conhecidos como álcalis, que reagem com alguns minerais silicosos, como opala, calcedônia, cristobalita e tridimita; zeolita fenlandita; formas criptocristalinas de riolitos, dacitos, andesitos e seus tufo, e certos filitos. Essas reações causam deterioração no concreto como resultado da reação álcali-agregado.

## 1.3 Agregados

Entende-se por agregado o material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia. São agregados as rochas britadas, os fragmentos rolados no leito dos cursos d'água e os materiais encontrados em jazidas, provenientes de alterações de rocha (PETRUCCI, 1998).

## 1.4 Areia e cascalho

Os agregados são formados por materiais detriticos resultantes da decomposição de rochas que sofreram processo de intemperismo e que se acumulam em depósitos sedimentares pela ação de agentes transportadores naturais. Como areia e cascalho constituem materiais detriticos, são muito resistentes às intempéries. Geralmente são constituídos de grânulos de quartzo chamados de areias e fragmentos de quartzo, arenitos silicificados e de quartzitos chamados de cascalhos. Os agregados empregados na confecção de concretos estão divididos em dois grupos: 1) os agregados miúdos que são as areias; 2) os agregados graúdos que são os pedregulhos e as pedras britadas.

## 1.5 Agregados miúdos

Entende-se por agregado miúdo normal, ou corrente a areia natural quartzosa, ou o pedrisco resultante do britamento de rochas estáveis, com tamanho de partículas tais que, no máximo, 15% ficam retidos na peneira de 4,8 milímetros (mm) (PETRUCCI, 1998). Como a areia se constitui de material detritico, tem boa resistência às intempéries e, na construção civil, sua aplicação é feita de acordo com o tamanho dos grãos, a distribuição granulométrica e as impurezas como torrões de argila, impurezas orgânicas e materiais pulverulentos em percentuais limitados pelas normas brasileiras. As areias com teores de argila e com limites previstos pelas normas são empregadas na fabricação de concretos, e as areias finas com teores mais elevados de argila, usadas em argamassas de assentamento de tijolos e revestimento de paredes. As areias empregadas em concreto não podem conter grande quantidade de feldspato, calcedônia e sílica amorfa, pois esses minerais reagem com os álcalis do cimento provocando alteração das propriedades do concreto.

## 1.6 Agregados graúdos

Agregado graúdo é o pedregulho natural, seixo rolado ou pedras provenientes do britamento de rochas estáveis, com um máximo de 15% passando na peneira de 4,8 mm. Admite-se, por motivos econômicos de emprego, britas provenientes de outras rochas, como diorito, gabbro, diabásio, calcário quartzito e arenito. No Brasil, porém, dado o uso preponderante de brita, por questões de resistência mecânica e durabilidade, emprega-se, na maioria das estruturas, concreto produzido com pedra britada obtida do granito, basalto e gnaisse (PETRUCCI, 1998).

## 2 Materiais e métodos

Conforme enumerações a seguir.

### 2.1 Pesquisa experimental

A pesquisa experimental foi dividida em duas etapas. A primeira fase consistiu na caracterização dos agregados graúdos reciclados e naturais. Na segunda etapa, fez-se o estudo de dosagem do concreto, substituindo-se o agregado graúdo natural pelo reciclado nas seguintes porcentagens: 0%, neste caso o concreto se constituiu no de referência; em seguida, os percentuais de substituição foram de 15%, 30%, 45% e 100%.

Na segunda etapa, em que se utilizou o método de dosagem do concreto, empregaram-se os conceitos apresentados pelas equações descritas a seguir, que têm por finalidade determinar o teor de argamassa ideal de acordo com a expressão (1), o teor de agregado segundo a Lei de Lyse representada pela expressão (2), o consumo de cimento conforme a equação (3), o teor de agregado graúdo empregando a expressão (4), a tensão do concreto aos 28 dias de idade, de acordo com a Lei de Abrams, pela equação (5) e o teor de agregado miúdo pela fórmula (6).

$$\alpha = \frac{1 + a}{1 + m} \quad (1)$$

$$H = \frac{x}{1 + m} \times 100 \quad (2)$$

$$C = \frac{1000}{0,32 + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{p}{\gamma_p} + x} \quad (3)$$

$$p = \frac{\frac{m}{\gamma_a} + \frac{1}{\gamma_c} + x}{\frac{1 - z}{\delta_p} - \frac{1}{\gamma_p} + \frac{1}{\gamma_a}} \quad (4)$$

$$f_{cj} = \frac{A}{B^x} \quad (5)$$

$$m = a + p \quad (6)$$

1 = representa o cimento como a unidade;

a = proporção de areia;

p = proporção de brita;

x = fator (a/c) água / cimento;

$f_{cj}$  = Resistência média do concreto à compressão, prevista a idade de j dias, em MPa;

$S_d$  = desvio padrão, em MPa;

A = coeficiente que depende da atividade do cimento;

B = coeficiente que depende da atividade do cimento e da idade do concreto;

H = relação entre água e concreto seco em %;

C = consumo de cimento, em kg/m<sup>3</sup>;

$\gamma_a$  = massa específica absoluta da areia, em kg/m<sup>3</sup>;

$\delta_a$  = massa unitária da areia, em kg/m<sup>3</sup>;

$\gamma_p$  = massa específica absoluta da brita, em km/m<sup>3</sup>;

$\delta_p$  = massa unitária da brita, em kg/m<sup>3</sup>;

$\gamma_c$  = massa específica absoluta do cimento, em km/m<sup>3</sup>;

$\delta_c$  = massa unitária do cimento, em kg/m<sup>3</sup>;

Z = porcentagem de ar incorporado ao concreto, em %;

m = mescla (a + p);

$\alpha$  = relação entre argamassa seca e concreto seco, %.

### 2.1.1 Slump-test e ruptura de corpos-de-prova

As Fotografias 1a e 1b ilustram o *slump-test* e a ruptura de um dos espécimes, realizados para determinação da consistência e da resistência à compressão simples, respectivamente, dos corpos-de-prova de concreto quando se substitui parcela de agregado graúdo natural por percentuais de agregado graúdo reciclado que variaram de 0%, 15%, 30%, 45% e 100%.



**Fotografia 1:** Determinação de propriedades do concreto no estado fresco e endurecido: *slump-test* (a); ensaio de compressão (b)

Fonte: O autor.

## 2.2 Fotomicrografia

O concreto obtido com resíduo de concreto forneceu o material para confeccionar as lâminas com a impregnação de polímero para análise em microscópios ópticos marca Olympus, BX40 F4 e Leica DMRX.

## 2.3 Microscopia eletrônica de varredura

As amostras de resíduo de concreto foram analisadas por MEV através do microscópio Marca LEO, modelo LEO 1450VP, com aumento variando de 100 até 800 vezes.

## 2.4 Produção do concreto

A dosagem do concreto foi feita, empregando-se agregado graúdo natural e agregado graúdo reciclado, para obtenção de concretos com as seguintes características:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa};$$

Slump-test = 60 mm  $\pm$  10 mm

$\Phi_{\text{máx}} = 12,5$  mm para o agregado graúdo reciclado

$\Phi_{\text{máx}} = 19$  mm para o agregado graúdo natural

### Areia média fina de rio

Cimento Portland CP II E 40.

### 3 Resultados

Conforme enumerações a seguir.

### 3.1 Gráfico de dosagem e propriedades de concretos

Os diferentes agregados compostos, isto é, misturas de agregado natural com agregado reciclado em porcentagens que variaram de 0%, 15%, 30%, 45% e 100%, têm suas propriedades indicadas na Tabela 1. Esses agregados foram empregados na produção de concretos e forneceram concretos diferentes, de mesma consistência (Gráfico 1).

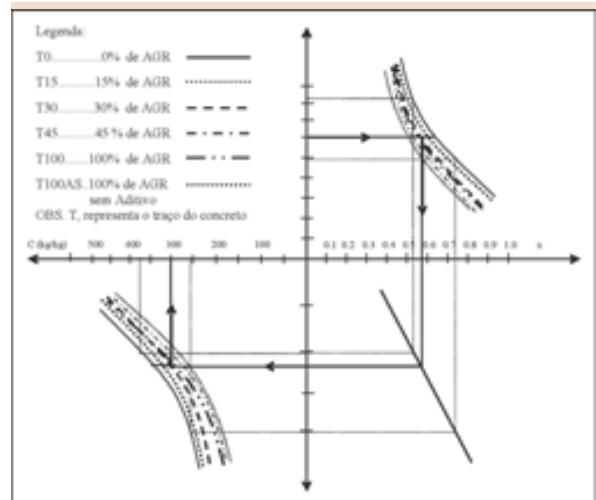


Gráfico 1: Dosagem de agregado

Obs.: Agregado graúdo reciclado (AGR); agregado graúdo natural (AGN); traço de concreto com 0% de AGR e sem aditivo (T0AS); traço de concreto com 15% de AGR com 0,9% de aditivo (T15); traço de concreto com 30% de AGR com 0,9% de aditivo (T30); traço de concreto com 45% de AGR com 0,9% de aditivo (T45); traço de concreto com 100% de AGR com 0,9% de aditivo (T100); traço de concreto com 100% de AGR e sem aditivo (T100AS).

Fonte: O autor

O traço, obtido a partir do gráfico de dosagem (Gráfico 1), é dado por 1:m:x, isto é, cimento, agregados e fator água/cimento. Os traços completos, com porcentagem de argamassa seca de 50%, 1: a:p:x (cimento, areia, brita e fator água/cimento), estão representados no Quadro 1. Os traços indicados na Tabela 1 foram determinados, tomando-se a resistência média dos corpos-

Traço (tipo de composição)	Traço (*)	Traço completo (**)
T0	1:5,0:0,63	1:2,00:3,00:0,63
T15	1:4,8:0,60	1:1,90:2,90:0,60
T30	1:4,3:0,58	1:1,65:2,65:0,58
T45	1:4,3:0,58	1:1,65:2,65:0,58
T100	1:4,0:0,52	1:1,50:2,50:0,52
T100AS	1:3,7:0,50	1:1,35:2,35:0,50

**Quadro 1: Traços de concretos obtidos a partir do gráfico de dosagem**

Obs.: \*Traço 1:m:x (cimento, agregados, fator água/cimento); \*\* traço 1:a:p:x (cimento, areia, brita, fator água/cimento).

Fonte: O autor.

**Tabela 1: Propriedades dos agregados graúdos**

Traço	$\gamma_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\delta_p$ (kg/m <sup>3</sup> )	A (%)
T-0	2.650	1.420	0,9
T-15	2.590	1.390	1,4
T-30	2.520	1.390	1,6
T-45	2.490	1.330	4,5
T-100	2.210	1.220	8,8
T-100AS	2.210	1.220	9,3

Obs: Massa específica do agregado composto ( $\gamma_p$ ); massa unitária do agregado composto ( $\delta_p$ ); Absorção de água pelos agregados (A).

Fonte: O autor.

de-prova aos 28 dias igual a 30 MPa e para cada curva de T0 até T100AS, a partir dos traços completos, obtiveram-se os concretos que têm suas propriedades representadas no Quadro 2.

O Quadro 2 apresenta o resultado das propriedades dos concretos T0, T15, T30, T45, T100 e T100AS, em que se observa que a absorção de água dos concretos apresenta valores compatíveis com o concreto convencional produzido com 100% de agregados naturais. A massa específica média do concreto convencional é de, aproximadamente, 2.400 quilogramas por metro cúbico (kg/m<sup>3</sup>). O valor obtido na pesquisa para esse tipo de concreto foi de 2.380 kg/m<sup>3</sup>, produzido sem aditivo polimérico incorporador de ar e adotado como referência. Quando se introduziu o aditivo em percentual de 0,9% da massa do cimento, os concretos apresentaram uma redução no valor de

Traço	x kg	m kg	A <sub>c</sub> (%)	$f_{c28}^{(*)}$ MPa	$f_{c28}^{(**)}$ MPa	$f_{c128}$ MPa	C kg/m <sup>3</sup>	$\gamma_{con}$ kg/m <sup>3</sup>	Ec GPa
T-0	0,63	6	5,1	30	34	3,6	300	2.380	30
T-15	0,6	5,8	5	30	27	2,9	300	2.166	21
T-30	0,58	4,3	6,2	30	30	3,3	300	2.190	19
T-45	0,58	4,3	6,8	30	27	2,8	300	2.166	17
T-100	0,52	4	7,1	30	28	2,8	325	2.182	15
T-100AS	0,5	3,7	10,2	30	25	2,2	360	2.276	15

**Quadro 2: Propriedades dos concretos**

Obs.: \*Resistência determinada pelo gráfico de dosagem, aqui chamada de tensão teórica; \*\*resistência determinada no ensaio de compressão simples, aqui chamada de tensão real; absorção de água pelo concreto (A); fator água/cimento a/c (x); soma do agregado miúdo com o agregado graúdo (m); resistência média do concreto à compressão aos 28 dias ( $f_{c28}$ ); resistência média do concreto à tração por compressão diametral aos 28 dias ( $f_{c128}$ ); consumo de cimento por m<sup>3</sup> (C); módulo de elasticidade do concreto (Ec).

Fonte: O autor.

sua massa específica sem causar grande mudança na resistência à compressão axial e na resistência à tração do concreto, mas o módulo de elasticidade do concreto apresentou redução em relação ao concreto de referência e diminuiu à medida que se aumentou o percentual de agregado reciclado, como pode ser visto no Quadro 2.

### 3.2 Microestrutura do concreto

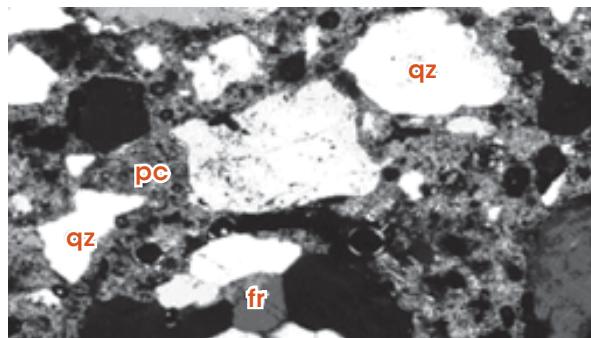
Conforme enumerações a seguir.

#### 3.2.1 Análise petrográfica do concreto

O concreto de referência T0 analisado por microscópio óptico mostra a argamassa (Fotografia 2), em que são encontradas, com certa freqüência, descontinuidades representadas por microfissuras e cavidades. As microfissuras podem ocorrer: 1) entre a brita e a pasta de cimento; 2) dispersas na pasta de cimento; 3) entre cristais da fração areia e na pasta de cimento, quando exibem comprimentos variando de 0,2 a 0,4 mm, preenchidos ou não por finíssimos grãos de minerais opacos com  $\phi < 0,1$  mm até 1 mm. Nas cavidades e em suas



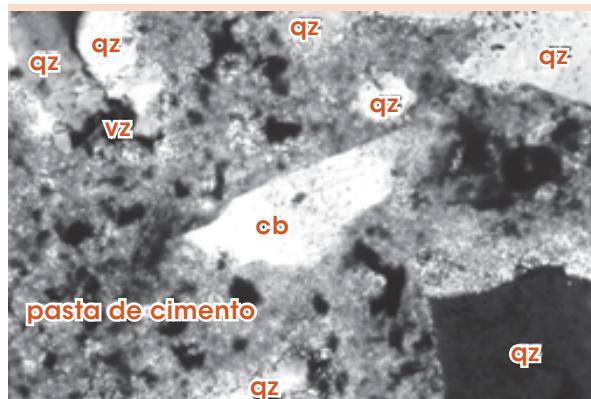
proximidades, há evidências de possível percolação de agentes agressivos, em razão do empobrecimento de finos grãos de alta birrefringência com  $\phi < 10$  micra, provavelmente um carbonato.



**Fotografia 2: Argamassa T0 (ampliada 100 vezes)**

Fonte: O autor.

A amostra de concreto T100AS, de acordo com a Fotografia 3, apresenta um fragmento lítico de biotita hornblenda gnaisse. É um fragmento extremamente pequeno, mas até onde se pode observar é uma rocha moderadamente foliada, e esta foliação é marcada pelo alinhamento de biotitas.



**Fotografia 3: Argamassa T100AS (ampliada 200 vezes)**

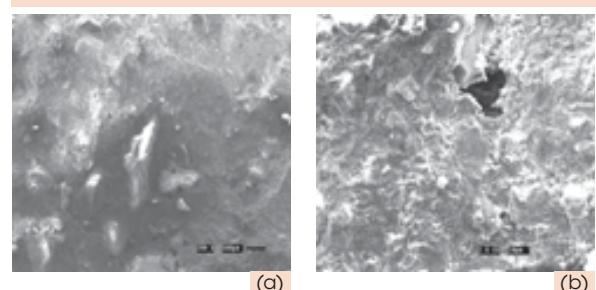
Fonte: O autor.

A textura é granoblástica, eqüigranular fina, variando de micromética até 0,2 mm, com raros minerais até 1 mm, em média o tamanho é micrométrico. A hornblenda, em conjunto com

a titanita, forma os maiores cristais, chegando a atingir 1 mm. Os formatos dos minerais quartzo-feldspáticos são hexagonalizados, enquanto as biotitas são um pouco subtabulares ou irregulares, como a hornblenda e a titanita.

### 3.2.2 MEV

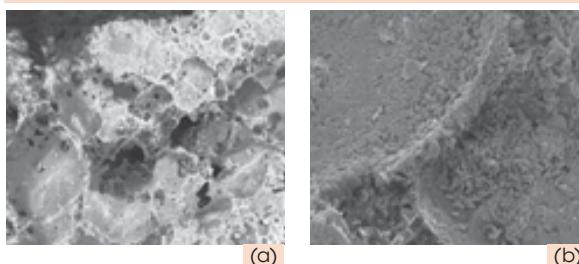
A análise da microestrutura do concreto através do microscópio óptico e da MEV traz importantes informações para a melhor compreensão do comportamento mecânico e da durabilidade de concreto de cimento Portland. As Fotografias 4a e 4b mostram a microscopia de uma amostra do concreto T0 de referência aumentada em 200 e 1,6 mil vezes, respectivamente. A Fotografia 4a, com aumento de 200 vezes, apresenta uma estrutura mais complexa e de fases distintas. O cimento Portland anidro é um pó cinza cujas dimensões variam entre 1 e 50 micrometro ( $\mu\text{m}$ ).



**Fotografia 4: Microscopia eletrônica de amostra de concreto T0: argamassa (a); pasta de cimento (b)**

Fonte: O autor.

A Fotografia 5a apresenta o concreto celular da amostra T15, examinado por MEV com elétrons retroespalhados. Observam-se, nas Fotografias 5a e 5b, muitos poros provocados pelo aditivo incorporador de ar. Na Fotografia 5b, notam-se os produtos da hidratação do cimento Portland como os silicatos de cálcio hidratados e a formação de hidróxido de cálcio. O hidróxido de cálcio, na imagem por elétrons retroespalhados, aparece como superfície lisa de cor cinza escuro.

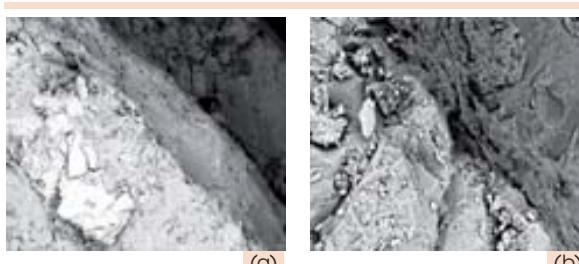


**Fotografia 5: Microscopia eletrônica de amostra de concreto T15: argamassa ampliada 100 vezes (a); argamassa ampliada 800 vezes (b)**

Fonte: O autor.

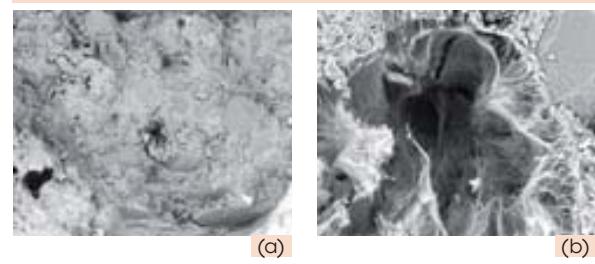
O concreto T30, nas Fotografias 6a e 6b, mostra um fragmento de rocha gnáissica bem aderido à argamassa de cimento Portland, aditivado com terpolímero acrílico em solução aquosa incorporador de ar. O aditivo se mostra eficiente na interface matriz/agregado graúdo, o que explica a boa resistência obtida por esse concreto nos ensaios. Quando se aumenta a imagem para 800 vezes, tem-se também o mesmo resultado, mas com uma definição que não permite dúvidas sobre os resultados obtidos em razão do aditivo. Também é possível observar a existência de poros e produtos da hidratação do cimento.

Nas Fotografias 7a e 7b, é possível observar que o concreto T45 é semelhante em sua composição e comportamento ao T30 (Fotografias 6a e 6b). Entretanto, já se nota, nas imagens, alguns aspectos diferentes dos apresentados na figura anterior, como o surgimento de um vazio com a



**Fotografia 6: Microscopia eletrônica de amostra de concreto T30: concreto ampliado 100 vezes (a); concreto ampliado 800 vezes (b)**

Fonte: O autor

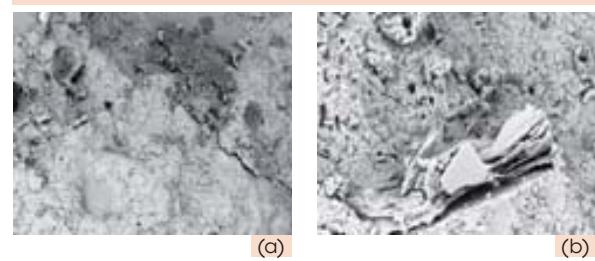


**Fotografia 7: Microscopia eletrônica de amostra de concreto T45: concreto ampliado 100 vezes; concreto ampliado 800 vezes (b)**

Fonte: O autor.

presença de formações aciculares provenientes das reações do cimento com a água.

A Fotografia 8a mostra a superfície do concreto T100 com muitos poros e fraturas causados pela presença do agregado graúdo reciclado e pelo aditivo. Na Fotografia 8b, observa-se a presença de hidróxido de cálcio formado em placas superpostas.



**Fotografia 8: Microscopia eletrônica de amostra de concreto T100: concreto ampliado 100 vezes (a); concreto ampliado 800 vezes (b)**

Fonte: O autor.

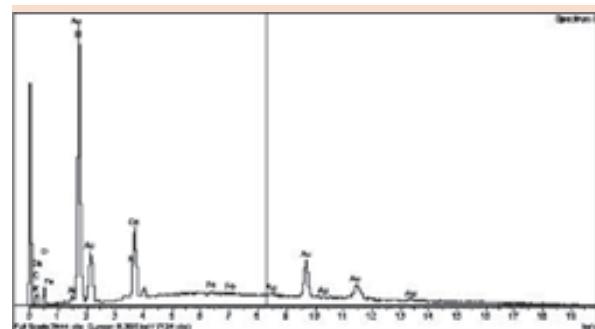


Gráfico 2: EDS\* da amostra T45 de concreto celular

Obs.: \*Do inglês *energy dispersive x-ray spectroscopy*

Fonte: O autor



No Gráfico 2, têm-se os elementos presentes nos produtos de hidratação do cimento Portland. Esta confirmação é importante para que se possa tomar medidas de prevenção contra possíveis ataques ao concreto e também para que haja possibilidade de controlar as propriedades desse concreto mais leve que o convencional.

## 4 Considerações finais

O concreto celular produzido com aditivo incorporador de ar tipo "A" mostrou-se eficiente na melhoria de algumas propriedades, tais como a impermeabilidade, a diminuição da massa específica, a utilização de um fator água/cimento relativamente baixo, resistência à compressão axial compatível com obras em que não são exigidas altas resistências desse concreto. No entanto, o módulo de elasticidade do concreto celular se mostrou abaixo do concreto convencional, pois, à medida que se aumenta o teor de agregado graúdo reciclado, aumenta-se também o consumo de cimento, o que provoca a elevação do custo do produto final. O estudo das imagens, por meio das técnicas de petrografia e MEV, tem significativa importância na comprovação dos mecanismos de formação do compósito ora estudado e a influência da microestrutura no desempenho do concreto e seus constituintes ao longo do tempo.

O concreto celular é um material viável tecnicamente para ser empregado na construção de paredes de edifícios, de maneira geral, utilizando-se agregado reciclado e aditivo terpolímero acrílico em solução aquosa, com incorporador de ar.

## Notas

- 1 Os autores agradecem o suporte financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual Paulista

"Júlio de Mesquita Filho", campus Guaratinguetá, ao Departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Química de Lorena (Faenquil) e aos técnicos de laboratório dos departamentos, José Luiz Ribeiro e Flávio Bernardes.

## Referências

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

HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. Uso de entulho como agregado para argamassa de alvenaria. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Antac, 1996. p. 107-115.

JOHN, V. M. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL, 2., 1999. São Paulo. *Anais...* São Paulo: Ibracon, 1999. p. 44-55.

JOHN, V. M. Reciclagem de resíduos como materiais de construção civil. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Antac, 1996.

OLIVEIRA, M. J. E. de; ASSIS, C. S. de. Estudo para o aproveitamento de concretos provenientes de demolição de obras de construção civil e seu comportamento em relação ao meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO, 41., 1999, Salvador. *Anais...* Salvador: Ibracon, 1999. p. 1-10.

PETRUCCI, E. G. R. *Concreto de cimento Portland*. 12. ed. São Paulo: Globo, 1998.

SILVA, M. G.; SOUZA, F. L. e SILVA, V. G. Reciclagem de cinza de casca de eucalipto e entulho de obra em componentes de construção. In: WORKSHOP RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL, 1., 1996, São Paulo. *Anais...* São Paulo: Antac, 1996. p. 102-108.

### Para referenciar este texto

OLIVEIRA, M. J. E. de. Agregado reciclado empregado na produção de concreto modificado com aditivo. *Exacta*, São Paulo, v. 4, n. especial, p. 15-24, 25 nov. 2006.