



BLOCOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO – CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS

Alexandre M. Buttler (1); Danilo M. Prado (2); Márcio R. S. Corrêa (3); Márcio A. Ramalho (4)

- (1) Departamento de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: buttler@sc.usp.br
- (2) Departamento de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: daniolomp@sc.usp.br
- (3) Departamento de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: mcorrea@sc.usp.br
- (3) Departamento de Estruturas – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: ramalho@sc.usp.br

Proposta: Grande parte dos resíduos processados em instalações de reciclagem é empregada em atividades de baixo valor agregado, tais como, em bases e sub-bases de pavimentos. A fração representada pelos resíduos de concreto apresenta um grande potencial de reciclagem; em fábricas de pré-moldados, o processo de reciclagem desses resíduos resume-se, basicamente, ao processamento

em britadores e separação do material em diferentes granulometrias, uma vez que a presença de contaminantes pode ser considerada insignificante. O objetivo deste artigo visa contribuir para a valorização do emprego de materiais reciclados, através da avaliação das propriedades de blocos estruturais de concreto com a incorporação de agregados reciclados de concreto. **Método de Pesquisa/Abordagens:** Os materiais reciclados foram originários de resíduos de média resistência (vigotas pré-moldadas) e baixa resistência (blocos de concreto). No total, foram produzidos quinze traços contando com a incorporação da fração graúda ou miúda reciclada, em três níveis de substituição, para três classes de resistência de bloco: 4,5MPa; 8,0MPa e 12,0MPa. As propriedades avaliadas para os blocos de concreto foram: massa específica, absorção de água por imersão, índice de vazios e taxa de absorção inicial. **Resultados:** De maneira geral, as unidades com agregados reciclados apresentaram menores valores de massa específica e maiores taxas de absorção e índice de vazios comparativamente aos valores obtidos para as unidades de referência. Com relação à taxa de absorção inicial todas as unidades satisfizeram os requisitos e os limites recomendados pela literatura.

Os resultados obtidos para as unidades com agregados reciclados foram comparados aos obtidos para as unidades de referência mediante o teste ANOVA. **Contribuições/Originalidade:** Produção de blocos estruturais com agregados reciclados atendendo aos requisitos prescritos pelas normas técnicas vigentes.

Palavras-chave: blocos estruturais; agregados reciclados de concreto; propriedades físicas

ABSTRACT

Proposal: A large amount of waste is used in low aggregate value activities such as bases and sub-bases of pavements. The fraction derived from concrete debris has a large recycling potential. In precast concrete plants, the concrete waste can be processed by crushers and separated into different sizes, since the presence of contaminants can be considered insignificant. The purpose of this paper is to evaluate the properties of structural concrete blocks made with recycled aggregates and also contribute to the use of recycled materials. **Methods:** The recycled materials were obtained from medium strength (precast elements) and low strength wastes (concrete blocks). In this study fifteen different mixtures were produced, varying the aggregate type (natural, recycled coarse aggregates and recycled fine aggregates), the substitution level and the strength of the blocks (4,5MPa; 8,0MPa and

12,0MPa). The properties evaluated were: specific weight, water absorption, porosity and initial absorption rate (IRA). **Findings:** The analysis of the results indicated that the recycled concrete blocks exhibited smaller specific weight and larger water absorption when compared to concrete blocks made with natural aggregates. All units exhibited IRA values in accordance with requirements and limits recommended by the literature. Results obtained for the recycled concrete blocks were compared to those obtained for the reference blocks with the use of ANOVA test. **Originality/contributions:** Production of recycled concrete structural blocks satisfying the requirements prescribed by the standards.

Keywords: Structural blocks; recycled concrete aggregate; physical properties

1 INTRODUÇÃO

1.1 Reciclagem de Resíduos de Concreto

Uma das grandes dificuldades encontradas para a reciclagem de resíduos originários de demolições de edificações e perdas durante a fase de construção refere-se à separação eficiente da fase concreto das demais fases presentes nos resíduos, de maneira a atender às normas e especificações de agregados existentes. Para os resíduos de demolições, o procedimento de separação visual é considerado extremamente trabalhoso e pode apresentar problemas quanto à reprodução (ÂNGULO et al., 2004). A técnica de demolição controlada, apesar de permitir um maior reaproveitamento dos componentes da edificação, possui inúmeras dificuldades para a sua execução, tais como: as edificações não foram projetadas para uma demolição controlada, os custos de disposição dos resíduos são relativamente baixos e os códigos de edificações não tratam da questão de reutilização dos componentes. Na Holanda, país considerado exemplar com relação à questão de reciclagem (92% do total de resíduos são reciclados), apenas 1% das empresas de demolição utiliza a demolição seletiva para separar a fração de concreto estrutural das demais fases (ÂNGULO et al., 2004).

No Brasil, as empresas de artefatos pré-moldados de concreto (blocos, vigotas, painéis, telhas e pisos de pavimentação) apresentam um volume de geração de resíduos que pode variar de 0,2m³/dia (pequeno porte) a 7,0m³/dia (grande porte). Grande parte dos resíduos gerados é proveniente de elementos rejeitados pelo controle de qualidade, final de linhas de produção e sobras de concreto fresco ao final do processo de fabricação. Tais resíduos são constituídos basicamente de rejeitos de concreto com porcentagem de contaminantes desprezível. Devido a essas particularidades, tais resíduos podem ser reciclados/processados de maneira simplificada.

As plantas de reciclagem para o processamento desses resíduos são constituídas essencialmente de um alimentador vibratório, britador primário/secundário e peneirador vibratório. Tais instalações são classificadas como plantas de reciclagem de primeira geração. No país, existem apenas 18 instalações de reciclagem públicas e privadas com escala de produção pequena (cerca de 100t/dia de resíduos processados). Algumas estimativas indicam um montante de 68,5 x 10⁶ ton de resíduos de construção e demolição/ano, sendo que com as instalações em operação no país apenas 1% desse montante poderá ser reciclado. Com esses dados pode-se aferir que o Brasil apresenta um déficit de pelo menos 2600 usinas de reciclagem que seriam necessárias para processar o volume de resíduos gerados diariamente.

Devido ao déficit de instalações de reciclagem e ao elevado custo de transporte, algumas empresas privadas e fábricas de pré-moldados estão investindo na compra/permute de equipamentos de reciclagem com o intuito de reciclar os resíduos de concreto na própria fonte de geração. A construtora Setin, por exemplo, alugou um sistema de reciclagem para processar, no canteiro de obras, 16000m³ de um piso de concreto de uma antiga fábrica de equipamentos rodoviários. Esse material foi utilizado na obra de um condomínio de alto padrão com 346 casas, em Guarulhos, Região Metropolitana de São Paulo. Os agregados reciclados de concreto foram utilizados na produção de painéis pré-moldados, lajes pré-moldadas, blocos não-estruturais de concreto e base de pavimentação. Segundo alguns laudos técnicos da empresa, os blocos produzidos apresentaram valores de resistência à compressão e absorção de água que se mantiveram dentro dos limites especificados pelas normas técnicas em vigor.

Uma fábrica de pré-moldados do interior paulista, Tatu Pré-Moldados, situada na cidade de Limeira, investiu na compra de equipamentos de reciclagem com o intuito de reutilizar os agregados reciclados, que antes eram estocados no pátio da fábrica, na cadeia produtiva.

Apesar da maior qualidade e homogeneidade do agregado reciclado de concreto quando comparado com os demais resíduos, diversos cuidados devem ser tomados quanto da incorporação desse material na mistura. Vários pesquisadores não recomendam a utilização da fração miúda reciclada devido à sua elevada absorção e variabilidade (SAGOE-CRENSIL & BROWN, 1998; PARK, 1999). Outros estudos mostram que há necessidade da pré-saturação do agregado antes da mistura para evitar a absorção excessiva do agregado que conduziria a uma perda considerável de trabalhabilidade da mistura (POON et al., 2004). A ordem de colocação dos materiais na mistura pode influir nas propriedades mecânicas do concreto reciclado. Segundo TAM et al. (2005) e RYU (2002) pode ocorrer um aumento de até 15% na resistência à compressão e 25% na resistência à tração com a colocação da água em duas frações distintas durante o processo de mistura.

1.2 Recomendações Normativas e Legislações

A adoção de critérios e diretrizes normativas visa disciplinar o emprego dos materiais reciclados, garantindo sua correta aplicação e, consequentemente, um desempenho satisfatório. De acordo com BUTTLER et al. (2005), o Brasil, felizmente, encontra-se em posição de vanguarda quando comparado a outros países da América Latina devido à publicação da Resolução 307 do Conama e a entrada em vigor das normas técnicas tratando do gerenciamento e da utilização de resíduos de construção e demolição.

No estudo de TAM et al. (2005) é proposta uma classificação para os agregados reciclados de concreto, bem como possíveis aplicações para esses materiais. Essa classificação baseia-se na absorção dos agregados reciclados; geralmente, valores elevados de absorção indicam grande quantidade de argamassa aderida que conduzem a uma diminuição da resistência e da durabilidade, aumento das deformações e retração do concreto. Na tabela 1, são enumerados alguns pontos fundamentais dessa classificação.

Tabela 1 – Classe de agregados reciclados de concreto e possíveis campos de aplicação (TAM et al., 2005)

Classe dos agregados reciclados	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo	Resistência recomendada (MPa)	Campos de aplicação
C1	Reciclado – Absorção ≤ 3,0%	Miúdo natural	18 a 24	Concreto simples ou armado, paredes de contenção, infra-estrutura de pontes, etc
C2	Reciclado – Absorção ≤ 5,0%	Natural ou reciclado - Absorção ≤ 5,0%	16 a 18	Concreto simples, unidades de alvenaria, bases de rodovias e dispositivos de drenagem
C3	Reciclado – Absorção ≤ 7,0%	Miúdo reciclado - Absorção ≤ 10,0%	≤16	Radiers, enchimentos, nivelamentos, etc

Na revisão do código normativo espanhol deverão ser incluídas algumas limitações para a utilização de agregados reciclados em concretos estruturais (ALAEJOS et al., 2004). Os principais pontos dessa revisão são transcritos a seguir: a) a utilização de agregados reciclados será permitida apenas para os concretos massa e armado; b) apenas será permitida a utilização de agregados reciclados oriundos de resíduos de concreto; c) apenas a fração graúda reciclada poderá ser utilizada para a produção de

concretos estruturais, para níveis de substituição, em massa, de até 20%; d) o concreto com agregados reciclados poderá ser produzido somente em usinas de concreto pré-misturado.

No Brasil, a NBR 15116 (2004) permite a aplicação de agregados reciclados em pavimentos e concretos sem função estrutural nas classes de resistência C10 e C15. Para a aplicação de agregados reciclados de concreto, na produção de concretos estruturais, está em fase de elaboração o texto-base normativo (OLIVEIRA et al., 2004). Na tabela 2, encontram-se as principais exigências para os agregados reciclados de concreto em aplicações estruturais conforme esse texto-base.

Tabela 2 – Exigências para os agregados reciclados em aplicações estruturais (OLIVEIRA et al., 2004)

% Máxima de agregados reciclados	20%
Resistência à compressão média limite aos 28 dias	40MPa
Absorção máxima do agregado reciclado	
Agregado graúdo	7%
Agregado miúdo	12%
Massa específica mínima do agregado reciclado	2300kg/m ³

De acordo com as proposições apresentadas, nota-se que tais recomendações permitem apenas a utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de concretos estruturais, impõem limites quanto aos valores de absorção do agregado reciclado e recomendam taxas de substituição máximas quando do emprego de agregados reciclados. Todas essas limitações objetivam a produção de concretos com agregados reciclados com propriedades similares aos concretos produzidos com agregados naturais.

Dentre os possíveis campos de utilização para os agregados reciclados, a produção de blocos estruturais de concreto surge como uma opção viável pelas seguintes razões: a) os blocos de resistência mais elevadas (12MPa), utilizados em edifícios de até 12 andares, correspondem a um concreto de baixa resistência (25MPa em CPs cilíndricos); portanto, abaixo do limite de resistência especificado pelo texto-base normativo para os concretos reciclados (OLIVEIRA et al., 2004); b) o processo de adensamento e vibração empregado na fabricação dos blocos permite o emprego de dosagens com baixo consumo de cimento, reduzindo os problemas de retração; c) a possibilidade de emprego de resíduos de concreto de baixa resistência, como, por exemplo, os resíduos do próprio bloco, uma vez que as exigências de resistência do artefato não são elevadas; d) a utilização do resíduo em uma atividade de alto valor agregado (produção de artefatos de concreto), permitindo, dessa maneira, uma valorização do material e seu emprego na produção de outros elementos.

2 OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar as propriedades físicas de blocos estruturais de concreto produzidos com diferentes tipos de agregados reciclados de concreto para três classes de resistência de bloco (4,5MPa; 8,0MPa e 12,0MPa).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais empregados para a fabricação dos blocos de concreto foram caracterizados seguindo as recomendações das Normas Brasileiras.

O aglomerante utilizado na pesquisa foi o cimento CP-V-ARI-PLUS, usualmente empregado para a produção de elementos pré-moldados que exigem elevada resistência mecânica em baixas idades. As propriedades físicas e químicas do aglomerante encontram-se na tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físicas e químicas do aglomerante empregado

pen. 325 (%) NBR 9202	Blaine (cm ² /g) NBR 7224	Propriedades físicas						Propriedades químicas					
		Tempo de pega (min) NBR 11581		Resistência à compressão (MPa) NBR 7215			CO ₂ (%)	Perda ao fogo 500°C (%)	Perda ao fogo 1000°C (%)	Res. Inso- lúvel (%)	SO ₃ (%)		
		Ínicio	Final	1 dia	3 dias	7 dias							
Média	1,2	4716	149	202	28,0	43,0	46,9	55,1	1,15	0,65	3,11	0,29	2,68
Min	0,8	4563	120	185	26,0	40,7	44,6	53,2	0,67	0,39	2,54	0,20	2,57
Máx	1,6	4936	176	225	29,2	45,6	51,6	67,8	1,66	0,89	3,78	0,39	2,80
D.Pad	0,2	60	11	12	0,84	1,22	1,62	1,54	0,36	0,19	0,30	0,05	0,07
C.V. (%)	17	2	8	6	3	3	3	31,2	28,9	12,2	20,4	2,7	

O aditivo empregado para a produção dos blocos de concreto foi um aditivo plastificante – Rheomix 610 da MBT (Master Builder Technologies). Os agregados reciclados de concreto foram provenientes de dois tipos de resíduos com as seguintes características: a) resíduos de vigotas de concreto: resíduos oriundos de concretos de média resistência ($f_c = 35\text{ MPa}$), elevado consumo de cimento, boa qualidade e porcentagem de contaminantes inferior a 1%; b) resíduos de blocos de concreto: resíduos oriundos de concretos de baixa resistência (10-25MPa), baixo consumo de cimento, elevado consumo de pó-de-pedra, baixa qualidade e porcentagem de contaminantes desprezível. Os resíduos foram processados em um britador de mandíbulas e separados em duas frações distintas: graúdo ($2,4 < x < 9,5\text{ mm}$) e miúdo ($x < 2,4\text{ mm}$). As propriedades dos agregados naturais e reciclados encontram-se na tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físicas dos agregados naturais e reciclados

Propriedade	Agregados							Norma/ Recomendação
	Areia natural quartzoza	Pó-de- pedra – origem basáltica	Pedrisco – origem basáltica	GRv ¹	MRv ²	GRb ³	MRb ⁴	
Dim. Máx. Característica	2,40	4,80	9,50	9,5	4,80	9,5	4,80	NBR 7217
Módulo de Finura	2,08	2,68	5,56	5,81	2,73	5,69	2,89	NBR 7217
Absorção de água (%)	-	2,32**	0,73*	4,00*	9,15**	4,45*	6,05**	NBR 9937* DIAS & AGOPYAN (2004)**
Massa específica (kg/dm ³)	2,63***	2,87***	2,76*	2,37*	2,48***	2,39*	2,65***	NBR 9937* NBR 9776***
Massa unitária estado solto (kg/dm ³)	1,57	1,65	1,39	1,25	1,27	1,18	1,32	NBR 7251
Abrasão Los Angeles (%)	-	-	17,8	24,0	-	43,6	-	NBR 6465
Quantidade de Argamassa Aderida (%)	-	-	-	52,9	-	49,1	-	-

¹ agregado graúdo reciclado de vigota; ² agregado miúdo reciclado de vigota; ³ agregado graúdo reciclado de bloco; ⁴ agregado miúdo reciclado de bloco

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os blocos foram produzidos em uma vibro-prensa da marca Piorotti, com controle dos tempos de produção (alimentação, vibração e compactação da máquina). A cura aplicada foi a térmica com duração de quatro a cinco horas e regime isotérmico (60°C – 67°C). As unidades produzidas apresentavam dimensões nominais de 140mm x 190mm x 290mm (largura x altura x comprimento), com espessura de parede variável ao longo da altura.

Para a definição dos traços a serem produzidos, foram moldados corpos-de-prova cilíndricos utilizando concretos de consistência seca com ou sem a adição de agregados reciclados. De posse desses resultados, foram definidos dezoito traços para a fabricação dos blocos estruturais (4,5MPa; 8,0MPa e 12,0MPa), com a incorporação de agregados miúdos e graúdos reciclados. As terminologias e características de cada uma das dosagens encontram-se na tabela 5. Para as dosagens com agregados reciclados procurou-se manter o mesmo consumo de cimento das dosagens de referência.

Tabela 5 – Terminologias e características dos traços produzidos

Grupo	Designação	Traço (Cimento: Agregados)	Consumo aproximado de cimento (kg/m ³)	Consumo da fração graúda (kg/m ³)	% da fração graúda/miúda reciclada em relação ao total de agregados	Umidade estimada (%)
4,5	B4,5-REF ¹	1:19,46	122	721	-	*
	B4,5-RGV-100% ²	1:18,75	119	619	27,8	5,40
	B4,5-RGV-50% ³	1:19,09	119	331-327**	14,5	5,40
	B4,5-RGB-50% ⁴	1:19,18	118	332-331**	14,6	5,40
8,0	B8,0-REF ¹	1:14,73	154	692	-	5,40
	B8,0-RGV-100% ²	1:14,43	152	600	27,3	5,40
	B8,0-RGV-50% ³	1:14,68	152	321-317**	14,2	5,40
	B8,0-RMV-33% ⁵	1:14,79	149	668	13,7	6,00
	B8,0-RGB-50% ⁴	1:14,46	155	326-325**	14,6	5,50
	B8,0-RMB-33% ⁶	1:14,77	150	672	13,5	6,20
12,0	B8,0-REF ¹	1:9,98	221	645	-	5,40
	B8,0-RGV-100% ²	1:9,79	218	594	27,8	5,40
	B8,0-RGV-50% ³	1:9,96	218	318-314**	14,5	5,40
	B8,0-RMV-33% ⁵	1:10,04	214	661	13,9	6,00
	B8,0-RGB-50% ⁴	1:9,97	218	317-316**	14,6	5,60
	B8,0-RMB-33% ⁶	1:10,19	210	651	13,5	6,40

* problema ocorrido no sensor de umidade; ** fração graúda reciclada (kg/m³); ¹ dosagem produzida apenas com agregados naturais; ² Dosagem com 100% de graúdos reciclados de vigota em substituição ao agregado graúdo; ³ Dosagem com 50% de graúdos reciclados de vigota em substituição ao agregado graúdo; ⁴ Dosagem com 50% de graúdos reciclados de bloco em substituição ao agregado graúdo; ⁵ Dosagem com 33% de agregados miúdos reciclados de vigota em substituição ao pó-de-pedra; ⁶ Dosagem com 33% de agregados miúdos reciclados de bloco em substituição ao pó-de-pedra

Na produção dos traços com agregados reciclados de bloco foram aumentados os tempos de alimentação e compressão da vibro-prensa com a finalidade de se elevar a coesão do concreto fresco do bloco e evitar possíveis quebras e fissuras.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

O cumprimento aos limites impostos pelos códigos normativos, quanto às propriedades físicas, é condição essencial para um correto desempenho das unidades de alvenaria sem o surgimento de futuras patologias, especialmente, quando se trata de unidades produzidas com agregados reciclados. Os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca foram realizados

conforme as prescrições das NBR 12118 e NBR 9778, respectivamente. A norma NBR 6136 estabelece que a absorção de água, para blocos estruturais de concreto, deve ser menor ou igual a 10%; já de acordo com LEVY (2001), os concretos podem ser considerados de qualidade normal quando seus valores de porosidade situarem-se entre 10% e 15%. Foram utilizadas seis unidades para avaliação dessas propriedades. Os resultados de absorção de água, índice de vazios e massa específica da amostra seca são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – Absorção de água e índice de vazios para as unidades avaliadas

Traços	Absorção de Água			Índice de Vazios			Massa específica da amostra seca (d_s)		
	Média (%)	D.Padrão (%)	C.V (%)	Média (%)	D.Padrão (%)	C.V (%)	Média (kg/dm ³)	D.Padrão (kg/dm ³)	C.V (%)
B4,5-REF	5,92	0,25	4,31	13,47	0,48	3,59	2,275	0,017	0,75
B4,5-RGV-100%	7,31	0,19	2,54	15,37	0,32	2,09	2,104	0,014	0,68
B4,5-RGV-50%	6,86	0,29	4,29	14,72	0,49	3,36	2,147	0,020	0,95
B4,5-RGB-50% ¹	6,50	0,23	3,48	14,28	0,42	2,92	2,197	0,015	0,68
B8,0-REF	6,10	0,35	5,69	13,51	0,63	4,70	2,216	0,022	1,02
B8,0-RGV-100%	7,04	0,22	3,11	14,87	0,39	2,59	2,113	0,014	0,64
B8,0-RGV-50%	6,89	0,17	2,44	14,87	0,31	2,09	2,159	0,009	0,40
B8,0-RMV-33%	6,30	0,21	3,32	13,64	0,30	2,22	2,165	0,025	1,17
B8,0-RGB-50% ¹	5,89	0,34	5,76	13,04	0,62	4,75	2,216	0,023	1,05
B8,0-RMB-33% ¹	6,08	0,23	3,77	13,23	0,40	2,99	2,176	0,023	1,08
B12,0-REF	6,35	0,42	6,60	13,84	0,80	5,78	2,182	0,019	0,87
B12,0-RGV-100%	7,34	0,22	3,01	15,51	0,38	2,46	2,115	0,015	0,69
B12,0-RGV-50%	6,65	0,48	7,27	14,23	0,89	6,28	2,143	0,022	1,04
B12,0-RMV-33%	6,18	0,34	5,55	13,53	0,57	4,24	2,192	0,030	1,38
B12,0-RGB-50% ¹	5,85	0,19	3,17	12,88	0,36	2,79	2,204	0,014	0,62
B12,0-RMB-33% ¹	5,19	0,13	2,51	11,62	0,28	2,41	2,240	0,015	0,66

¹ adição de maiores tempos de vibro-prensagem na produção desses blocos comparativamente às demais unidades produzidas

Analizando-se os resultados da tabela 6, nota-se que todas as unidades cumpriram os requisitos da NBR 6136, com relação à absorção máxima de água. Os traços do Grupo 12,0 com a inclusão da fração reciclada de bloco, apresentaram menores valores de absorção e índice de vazios devido basicamente aos maiores tempos de produção adotados para essas unidades com a finalidade de se elevar a coesão do bloco no estado fresco. Para misturas mais ricas em cimento, há necessidade de se aumentarem os tempos de alimentação e vibração da máquina, comparativamente aos traços mais pobres, uma vez que misturas ricas em finos apresentam grande dificuldade de alimentar as formas dos moldes. As unidades dos Grupos 4,5 e 12,0 com 100% de agregados graúdos reciclados de vigota apresentaram valores de índice de vazios ligeiramente superiores aos recomendados para a inclusão na classificação de concretos normais, conforme LEVY (2001). Os maiores valores de absorção e índice de vazios para as unidades com agregados graúdos reciclados de vigota, quando comparadas com as unidades de referência, deve-se à maior absorção do agregado reciclado (cerca de seis vezes a absorção do agregado natural). De maneira geral, as unidades com agregados reciclados de vigota (100% de substituição), que foram produzidas mediante os mesmos tempos de vibro-prensagem daqueles adotados para as unidades de referência, apresentaram uma redução de aproximadamente 5% na massa específica em comparação com as unidades de referência. Para facilitar o entendimento dos resultados e verificar as possíveis diferenças significativas entre os resultados obtidos para as unidades de referência e as unidades com agregados reciclados foi utilizado o teste estatístico de Análise de Variância. Na tabela 7 são apresentados os resultados que foram significativamente diferentes comparativamente às unidades de referência, para uma significância de 95%.

Tabela 7 – Teste ANOVA para verificar possíveis diferenças significativas entre os valores de absorção e índice de vazios das unidades com reciclados comparativamente às unidades de referência

Grupo	Resultados do Teste ANOVA
4,5	Todas as unidades apresentaram valores de absorção e índice de vazios significativamente diferentes em relação às unidades de referência ($F_0 > F_{crit}$)
8,0	Apenas as unidades com agregados graúdos reciclados de vigota apresentaram valores de absorção e índice de vazios significativamente diferentes em relação às unidades de referência
12,0	Todas as unidades, com exceção dos exemplares B12,0-RGV-50% e B12,0-RMV-33%, apresentaram valores significativamente diferentes em relação às unidades de referência

Analizando-se os resultados da tabela 7, nota-se que todas as unidades com agregados reciclados do Grupo 4,5 apresentaram valores significativamente diferentes e maiores quando comparados com os valores de absorção e índice de vazios das unidades de referência; já para as unidades do Grupo 8,0 apenas aquelas produzidas com agregados graúdos reciclados de vigota obtiveram valores significativamente maiores comparativamente às unidades de referência. De maneira geral, todas as unidades com agregados reciclados de vigota apresentaram valores significativamente maiores comparativamente às unidades de referência; por outro lado, as unidades dos Grupos 4,5 e 8,0 com agregados reciclados de blocos apresentaram valores para essas propriedades que não foram significativamente diferentes quando comparadas com as unidades de referência; possivelmente, os maiores tempos de vibro-prensagem empregados para a fabricação dessas unidades, visando o aumento de coesão, foram responsáveis por esse comportamento. Na etapa preliminar do trabalho, durante a produção dos corpos-de-prova, notou-se uma diminuição considerável da coesão da mistura quando da adição da fração graúda de bloco, substituição de 100%, motivada pela baixa resistência desse agregado (perda de massa por abrasão superior a 40%); por esse motivo, não foram produzidas unidades com substituição total de agregados naturais por reciclados de bloco. Certamente, caso essas unidades fossem produzidas, haveria a necessidade do aumento da quantidade de finos ou consumo de cimento para elevar a coesão da mistura.

A determinação da sucção da unidade de alvenaria é de fundamental importância para a definição da relação entre unidade e argamassa na interface de contato e, portanto, na avaliação da resistência à tração e cisalhamento da alvenaria. Apesar de não existir uma faixa de referência para os valores do IRA, em blocos de concreto, GALLEGO (1989) cita que para tais unidades os valores de sucção devem situar-se entre 10 e 30g/min/193,55cm². Caso a sucção da unidade seja maior que 40g/min/193,55cm², recomenda-se o umedecimento das unidades seguindo técnicas adequadas. Para a determinação da taxa de absorção inicial, foi empregada a norma americana ASTM C-67 (1997). O ensaio foi realizado com uma amostra mínima de seis blocos secos em estufa e mantendo-se a lâmina d'água normalizada ($3,18 \pm 0,25\text{mm}$). Os resultados dessa propriedade encontram-se na tabela 8.

Tabela 8 – Taxa de absorção inicial (IRA) para as unidades avaliadas

Traços	Taxa de Absorção Inicial (IRA)		
	IRA (g/min/193,55cm ²)	IRA (kg/min/m ²)	Elevação média do menisco (cm)*
B4,5-REF	57,8	2,99	2,7
B4,5-RGV-100%	29,3	1,51	1,8
B4,5-RGV-50%	21,1	1,09	1,7
B4,5-RGB-50%	20,7	1,07	1,3
B8,0-REF	30,7	1,59	1,6
B8,0-RGV-100%	22,7	1,17	1,3
B8,0-RGV-50%	31,3	1,62	1,7
B8,0-RMV-33%	10,4	0,54	1,1
B8,0-RGB-50%	18,4	0,95	1,2
B8,0-RMB-33%	17,8	0,92	1,2

Traços	Taxa de Absorção Inicial (IRA)		
	IRA (g/min/193,55cm ²)	IRA (kg/min/m ²)	Elevação média do menisco (cm)*
B12,0-REF	54,7	2,82	2,5
B12,0-RGV-100%	60,0	3,10	2,9
B12,0-RGV-50%	42,0	2,17	2,3
B12,0-RMV-33%	10,7	0,55	1,3
B12,0-RGB-50%	30,9	1,60	2,0
B12,0-RMB-33%	6,1	0,31	1,0

* elevação do menisco: altura que a água se eleva na parede do bloco

Com relação aos resultados do Grupo 4,5, nota-se que todas as unidades, com exceção dos blocos de referência, apresentaram valores de IRA dentro do intervalo prescrito por GALLEGOS (1989). Provavelmente, na produção das unidades de referência, a umidade adotada ficou abaixo da umidade ótima; gerando, consequentemente, unidades de menor compacidade e vazios capilares interligados. De acordo com GROOT (1995), o total de água absorvida por um sistema de capilares é função da dimensão, distribuição e volume dos poros. Além disso, segundo GROOT (1995), a massa de água absorvida pelos capilares é diretamente proporcional à elevação do menisco, fato esse claramente observado nas unidades de referência que apresentaram a maior elevação de menisco. As unidades do Grupo 8,0 apresentaram valores da taxa de absorção inicial dentro dos limites recomendados por GALLEGOS (1989). Com relação aos resultados do Grupo 12,0, nota-se que as unidades de referência e as unidades com agregados graúdos reciclados de vigota apresentaram valores de IRA superiores aos valores recomendados; possivelmente, a umidade adotada ficou abaixo da umidade ótima ou os tempos de vibro-prensagem deveriam ter sido aumentados para a produção de unidades de maior compacidade.

6 CONCLUSÕES

De maneira geral, as unidades com agregados reciclados apresentaram desempenho satisfatório. As principais conclusões são enumeradas abaixo:

- Todas as unidades atenderam às prescrições da NBR 6136 com relação à absorção máxima de água. As unidades com substituição total de pedrisco por agregado reciclado de vigota apresentaram os maiores valores de absorção e índice de vazios, comparativamente às unidades de referência, devido à elevada quantidade de material reciclado utilizada na fabricação das unidades (28%) e a porosidade da argamassa que se encontra aderida ao agregado reciclado.
- As unidades dos Grupos 4,5 e 12,0, produzidas com 100% de agregados reciclados de vigota, apresentaram valores de índice de vazios ligeiramente superiores ao limite citado por LEVY (2001) para concretos normais. Acima desse limite, o concreto deve ser classificado como sendo deficiente, podendo ser empregado desde que haja uma correta proteção da sua superfície para inibir o ingresso de agentes agressivos e evitando o emprego em ambientes considerados agressivos.
- A presença de um material reciclado classificado como sendo de baixa resistência e com elevada perda de massa por abrasão (resíduos de blocos) não afetou negativamente as propriedades físicas das unidades comparativamente às unidades de referência. Todos os resultados, inclusive os valores da taxa de absorção inicial, situaram-se dentro dos limites recomendados pela literatura e pela NBR 6136.
- As unidades com agregados reciclados de bloco dos Grupos 8,0 e 12,0 apresentaram valores de absorção e índice de vazios inferiores aos obtidos para as unidades de referência, devido basicamente ao aumento dos tempos de vibro-prensagem relativamente ao tempo empregado nas unidades de referência.
- Algumas unidades de referência e com agregados reciclados de vigota apresentaram valores

de IRA acima dos limites recomendados pela literatura. Possivelmente, na produção dessas unidades, a umidade utilizada ficou abaixo da umidade ótima. Apesar da existência de um sensor de umidade no misturador, o ajuste fino da umidade era realizado visualmente por um funcionário da fábrica.

7 REFERÊNCIAS

- ALAEJOS, P.; VAZQUEZ, E.; MARTINEZ, F.; POLANCO, A.; ALEZA, F.; PARRA, J.; BURÓN, M. Draft of spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete. In: Fourth International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, 9-11 November, 2004.
- ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição Reciclados separados por líquidos densos. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável – X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído [CD-ROM]. Julho, São Paulo, 2004.
- BUTTLER, A. M.; CORREA, M. R.; RAMALHO, M. A. Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto. **Revista Concreto**. Ano XXXIII, Dez. Jan. Fev.; no37, p.24-27, 2005.
- DIAS, J. F.; AGOPYAN, V. Determinação da absorção de agregados minerais reciclados porosos. In: I Conferência Latino-Americana de Construção Sustentável – X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído [CD-ROM]. São Paulo, julho, 2004.
- GALLEGOS, H. **Albañileria Estructural**. Pontificia Universidad Católica Del Peru, Primera Edición, 372p, 1989.
- GROOT, C. Initial rate of absorption and porosity. In: Joint International Workshop. **Proceedings...** Proposed by Rilem TC127-MS and CTB W23. Edited by L. Binda and C. Modena, June, p.117-125, 1995.
- LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 199p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC, USP, 2001.
- OLIVEIRA, M. J.; ASSIS, C. S.; DE MATTOS, J. T. Recycled aggregate standardization in Brazil. In: Fourth International Rilem Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures. **Proceedings...** Barcelona, 9-11 November, 2004.
- PARK, S. G. Recycled concrete construction rubble as aggregate for new concrete. **Branz Study Report**, SR 86, 1999.
- POON, C. S.; SHUI, Z. H.; LAM, L.; FOK, H.; KOU, S. C. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, n.18, p.461-468, 2004.
- RYU, J. S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**. v.54, n.1, p.7-12, February, 2002.
- TAHA, M. M. R.; EL-DIEB, A. S.; SHRIVE, N. G. Sorptivity: A surface absorption criterion for brick units: A proposal for the Canadian Masonry Standard. In: 9th CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, Canada. **Proceedings...** Fredericton, NB, Canada, 2001.
- TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**. n.35, p.1195-1203, 2005.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pelo auxílio financeiro que propiciou as condições necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa.