



AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE POZOLÂNICA DO MATERIAL CERÂMICO E A RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO RECICLADO

Mônica Batista Leite (1); Denise Dal Molin (2)

- (1) Eng.^a Civil; Dr.^a, Professora Visitante DTEC/UEFS – BR 116, km03 – Campus Universitário. Feira de Santana/Ba, CEP 44031 460 – E-mail: mleite@genesis.cpgec.ufrgs.br – (75) 224 – 8117
(2) Eng.^a Civil; Dr.^a, Professora Adjunta NORIE/PPGEC/UFRGS - Rua Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Porto Alegre/RS – E-mail: dmolin@vortex.ufrgs.br – (51) 3316 – 3321

RESUMO

A utilização de resíduos de construção e demolição tem crescido notadamente nos últimos 20 anos, assim como, mais avanços vem surgindo no estudo do comportamento deste material sobre as propriedades dos concretos produzidos. Em estudos desenvolvidos com concretos reciclados substituindo-se a areia natural por agregado miúdo reciclado em diferentes proporções, observou-se um efeito significativo da interação entre o teor de agregado miúdo reciclado (%AMR) e a idade de cura dos concretos sobre a resistência à compressão o que poderia estar relacionado com a possível existência de algum tipo de reatividade pozolânica advinda de um dos componentes da fração miúda do material reciclado. Desta forma, este trabalho vem apresentar os resultados de um estudo sobre a influência de uma possível reação pozolânica do material cerâmico, que compõe o agregado miúdo reciclado. Foram realizados ensaios de determinação do índice de atividade pozolânica do material cerâmico, finamente moído, com a cal e com o cimento, de acordo com a prescrição das normas brasileiras. Os resultados apontaram que, em termos de índice de atividade pozolânica tanto com o cimento, quanto com a cal, o material cerâmico apresenta um certo índice de reatividade.

Palavras-chave: Resíduo de construção e demolição; Agregado reciclado de material cerâmico; Concreto reciclado; Atividade pozolânica

1. INTRODUÇÃO

A utilização de recursos naturais e a grande quantidade de resíduos gerada e disposta em aterros em todo mundo, faz com que a construção civil seja vista como um grande agente impactante do meio ambiente. Entretanto, este setor é ao mesmo tempo um consumidor potencial de produtos reciclados, podendo, inclusive, reutilizar o seu próprio resíduo.

Várias pesquisas para utilização de resíduos de construção e demolição (C&D) já foram realizadas, em várias partes do mundo, e muitas outras estão em andamento para que se possa conhecer o

comportamento deste material quando inserido na produção de outros componentes da construção como, por exemplo, para a produção de concreto.

O concreto reciclado, talvez represente a forma de reutilização mais nobre para o resíduo de C&D, e quem sabe o maior desafio para a comunidade técnica e científica. Uma vez que este resíduo já é amplamente utilizado, e com sucesso, em pavimentação, por exemplo, ou para contenções, ou produção de artefatos pré-moldados, entre outros.

O estudo e utilização de agregados reciclados de resíduos de C&D para produção de concretos têm avançado muito. Porém, a grande heterogeneidade deste material pode representar a principal dificuldade encontrada para sua utilização no concreto. Visto que, cada partida deste resíduo pode influenciar diferentemente nas propriedades do concreto, uma vez que sua composição pode variar muito de um lote para outro de material. Contudo, é necessário contornar essa limitação até que sejam implantadas políticas mais rigorosas e restritivas para a gestão de resíduos de C&D dentro e fora dos canteiros de obra.

No Brasil, a composição do resíduo de construção e demolição apresenta uma grande quantidade de materiais de base cimentícia e materiais cerâmicos, como pode ser observado nos trabalhos de Zordan (1997), Latterza (1998), Pinto (1986), Carneiro et al. (2000), entre outros. Estes materiais, principalmente os materiais cerâmicos, podem apresentar características que contribuem para a melhoria das propriedades mecânicas de concretos e argamassas produzidos com o agregado miúdo reciclado. Neste sentido, e com base nos resultados apresentados no trabalho desenvolvido por Leite (2001), observou-se que o material cerâmico finamente moído poderia contribuir com alguma reatividade pozolânica, melhorando o desempenho mecânico dos concretos em idades mais avançadas. Deste modo, foi desenvolvido um estudo piloto para avaliar a atividade pozolânica do material cerâmico finamente moído em argamassas com cal e com cimento.

2. CONCRETOS RECICLADOS

2.1 Resistência à compressão axial

A maioria dos estudos em concretos com agregados reciclados de C&D apontam uma redução da resistência à compressão. As pesquisas mostram que quanto maior o teor de agregados reciclados utilizados nas misturas de concreto maior é a redução da resistência (Levy e Helene, 2000; Zordan, 1997; Lima, 1999; Bazuco, 1999; Barra, 1996; Latterza, 1998; Topçu e Gunçan, 1995; Delwar et al., 1997; Devenny e Khalaf, 1999; Salen e Burdette, 1998; Hansen, 1992; entre outros). Os resultados encontrados na bibliografia apontam reduções na resistência à compressão que variam de 5 a 80 %, quando somente o agregado graúdo reciclado é utilizado nas misturas de concreto. Quando o agregado miúdo reciclado é combinado ao agregado graúdo para produção de concreto esta redução é cerca de 20 % maior. Os autores apontam a maior fragilidade, baixa densidade, grande heterogeneidade, alta absorção, o tipo de agregado como os principais fatores que influenciam na redução da resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados. Na realidade ao analisar-se os trabalhos citados anteriormente, observa-se uma grande heterogeneidade nos procedimentos para realização das pesquisas. Ou seja, não foram encontrados procedimentos uniformes de avaliação do comportamento do material, o que torna difícil dizer se estes resultados representam um bom parâmetro de comparação para viabilizar, ou não, a utilização do material em misturas de concreto no tocante a resistência à compressão.

2.2 Atividade pozolânica

As pozolanas são por definição substâncias constituídas de sílica e alumina que em presença de água se combinam com o hidróxido de cálcio e com os diferentes componentes do cimento formando compostos estáveis à água e com propriedades aglomerantes. As pozolanas estão classificadas em **naturais**: rochas vulcânicas submetidas a meteorização; **artificiais**: argilas de qualquer tipo submetidas a altas temperaturas para desidratação, porém a temperaturas abaixo do início da fusão; e por fim **subprodutos industriais**: cinzas volantes, cinza de casaca de arroz, sílica ativa, entre outros (Coutinho, 1997; Mehta e Monteiro, 1994; Neville, 1995).

As pozolanas artificiais são obtidas com a criação da instabilidade da estrutura interna dos minerais argilosos pela ação de temperaturas que variam entre 500 e 900 °C. Este procedimento ajuda a

aumentar a porosidade das partículas e assim sua superfície ativa. Entretanto, a temperatura de queima das argilas deve ser inferior a de fusão.

De acordo com Winkler e Müeller (1998), existem duas teorias sobre a reatividade dos materiais cerâmicos em forma de tijolos. Uma relaciona as propriedades pozolânicas dos tijolos com uma fase vítreia solúvel que reage com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ formando C-S-H. Esta fase vítreia só pode ser encontrada em tijolos cerâmicos queimados à temperaturas acima de 950 °C. A segunda diz que apenas os tijolos queimados a baixas temperaturas é que podem apresentar esta reatividade. Esses materiais possuiriam metacaulin altamente reativo ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) numa forma instável.

Em face da possibilidade de reatividade pozolânica dos materiais cerâmicos acredita-se que agregados reciclados com altos teores deste material na sua composição possam contribuir para a resistência à compressão de concretos ou argamassas em idades mais avançadas (Lima, 1999). Levy (1997) afirma que as argilas calcinadas em temperaturas não muito elevadas, os tijolos e blocos cerâmicos de 2º linha representam os materiais cerâmicos com maior grau de pozolanicidade.

Como foi observado no item 2.1 não há uma uniformidade dos resultados de resistência à compressão dos concretos reciclados, muito menos um único fator que evidencie a causa de tamanha heterogeneidade. Analisando a bibliografia encontrada, pouco se sabe sobre uma possível reação pozolânica advinda dos materiais cerâmicos presentes na composição dos resíduos de C&D, quando finamente moídos, sobre a resistência à compressão do concreto reciclado. Alguns estudos foram encontrados em argamassas utilizando agregados miúdos reciclados de resíduos de material cerâmico para produção de argamassa que estão descritos a seguir:

Hamasaki et al., (1996) estudaram 8 traços diferentes de argamassa incorporando resíduos de blocos cerâmicos, tijolos e blocos de concreto separadamente e avaliaram além de propriedades mecânicas das argamassas produzidas, o índice de atividade pozolânica dos materiais. Os autores realizaram o ensaio de Chapelle modificado, proposto por Raverdi et al., no qual os resultados são expressos em termos de quantidade de CaO consumidos pela amostra. O material é considerado pozolânico quando apresenta um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g da amostra. Os resultados encontrados pelos autores para os materiais utilizados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chapelle modificado de agregados reciclados de resíduos de C&D

Material	Consumo de CaO (mg de CaO/g da amostra)
Bloco cerâmico	137,1
Tijolo	255,8
Bloco de concreto	53,6

Fonte: Hamasaki et al. (1996)

Observa-se pelos resultados que nenhum dos materiais utilizados neste estudo apresentaram índice de consumo de CaO pelo menos igual a 330 mg CaO/g. Isto significa que nenhum dos materiais pode ser classificado como uma pozolana. Entretanto, fica claro através dos resultados que os materiais cerâmicos consomem mais CaO que o bloco de concreto como era de se esperar. Os autores sugerem que, ainda que pequena, pode haver uma influência pozolânica dos materiais cerâmicos sobre o desempenho mecânico das argamassas produzidas.

Levy (1997) também realizou estudo da atividade pozolânica dos materiais utilizados em seu trabalho de dissertação através do mesmo método usado por Hamasaki et al. (1996). Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Diferente dos resultados encontrados por Hamasaki et al. (1996), Levy (1997) encontrou reatividade pozolânica no material utilizado em sua pesquisa.

Winkler e Müeller (1998) realizaram estudos com pó de tijolos adicionados ao cimento tendo sua influência analisada também em argamassas. Os autores analisaram a influência de tijolos queimados a baixas e a altas temperaturas. Todos os materiais foram reduzidos a partículas com a mesma finura do cimento utilizado e adicionados às misturas em teores que variaram de 0 a 60 %. A atividade pozolânica foi analisada em função do consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ através de difração de raio X, em amostras retiradas aos 28, 91 e 180 dias. Os resultados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de pozolanicidade pelo método de Chapelle modificado de agregados reciclados de resíduos de material cerâmico

Material	Consumo de CaO (mg de CaO/g da amostra)
Blocos cerâmicos de 1ª linha	242
Blocos cerâmicos de 1ª linha (passante em # 50)	224
Blocos cerâmicos de 2ª linha (passante em # 50) ¹	454
Tijolos maciços (passante em # 50)	565
1 Material utilizado na pesquisa	Fonte: Levy (1997)

Tabela 3 - Teor de Ca(OH)₂ nas argamassas (avaliação semi-quantitativa)

Tipo de material	Teor de material (%)	Teor de Ca(OH) ₂		
		Idade (dias)		
		28	90	180
LB I	10	+++	++++	+++
	20	+++	+++	+++
	30	+++	+++	++
	40	+++	++	+
	60	++	+	+
HB I	20	++++	+++	+++
	40	+++	++	++
	60	+	+	+
Referência	-	++++	++++	+++

+ = Teor mais baixo

++++ = Teor mais alto

LB I = Tijolos queimados a baixas temperaturas

HB I = Tijolos queimados a altas temperaturas

Fonte: Winkler e Müller (1998)

Observa-se pelos resultados que o teor de Ca(OH)₂ diminui com o aumento do teor de pó de tijolos cerâmicos. Todavia, não se observou diferenças nas misturas realizadas com o mesmo teor de adição de pó. Os autores consideraram que o pó obtido com os tijolos queimados a altas temperaturas apresentam a maior reatividade pozolânica, pois para este material se conseguiu, também, os maiores resultados de resistência à compressão. Porém, se apenas os resultados de consumo de Ca(OH)₂ fossem avaliados dir-se-ia que não há diferença em utilizar tijolos cerâmicos queimados a baixas ou altas temperaturas.

Os resultados encontrados na bibliografia não podem ser considerados conclusivos a respeito da influência pozolânica de materiais cerâmicos existentes na composição dos resíduos de C&D. É possível dizer apenas que o efeito pozolânico existe a depender do tipo de material e quantidade de material que está sendo utilizado, sendo necessário um estudo criterioso em cada caso. Além disso, esta influência no concreto ainda não foi estudada em nenhum caso.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com base nos resultados de uma pesquisa mais ampla sobre a influência da utilização de agregados reciclados de C&D sobre as propriedades mecânicas de concretos, desenvolvida por LEITE (2001) no Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, observou-se que seria interessante realizar um estudo da atividade pozolânica da parte do material cerâmico presente na composição do resíduo utilizado. Desta forma este programa experimental foi desenvolvido com o objetivo de iniciar este estudo. Para tanto o material cerâmico presente na amostra de resíduo foi separado, finamente moído e peneirado na malha # 0,075 mm. A sua atividade pozolânica foi avaliada tanto com a cal, quanto com o cimento como prescreve a NBR 5751 (1992) e NBR 5752 (1992), respectivamente.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Cimento

Para realização deste trabalho foi utilizado cimento Portland comum CPI S – Classe 32, cujas características físicas e químicas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades químicas, físicas e mecânicas do Cimento Portland CP I S

Composição química do cimento	Resultados	Propriedades		Resultados
Al ₂ O ₃ (%)	4,26	Tempo de Pega (min)	Início Final	165 240
SiO ₂ (%)	18,49			
Fe ₂ O ₃ (%)	3,06	Consistência normal (%)		27,5
CaO (%)	61,20	Blaine (cm ² /g)		3255
MgO (%)	4,96	# 200 (%)		1,30
SO ₃ (%)	2,61	# 325 (%)		8,30
Perda ao Fogo (%)	3,25	Massa específica (kg/dm ³)		3,11
CaO livre (%)	2,02	Resistência à Compressão (MPa)	1 dia	14,1
Resíduos Insolúveis (%)	0,67		3 dias	27,5
Equivalentes alcalinos (%)	0,48		7 dias	33,4
Expansibilidade a quente (mm)	0,50		28 dias	43,3

Fonte: Companhia de Cimento Itambé – Relatório de Ensaio, período Junho/99

A opção pelo uso deste cimento se deu pelo seu baixo teor de adição. Desta forma, poder-se-ia detectar qualquer influência que o resíduo pudesse ter sobre as propriedades mecânicas do concreto produzido.

3.1.2 Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados foram areia proveniente do Rio Jacuí/RS e brita de origem basáltica.

Foram realizados alguns ensaios para determinação de propriedades físicas dos agregados cujos resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de propriedades físicas dos agregados naturais utilizados

Agregado miúdo natural				Agregado graúdo natural			
Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Método de ensaio (NBR)	Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Método de ensaio (NBR)
4,8	0,1	0	7217 (1987)	19	2,3	2	7217 (1987)
2,4	8,6	9		12,5	50,3	53	
1,2	12,6	21		9,5	33,9	87	
0,6	27,5	49		6,3	12,7	99	
0,3	33,9	83		4,8	0,7	100	
0,15	16,8	100		<4,8	0,1	100	
<0,15	0,5	100		Total	100	-	
Total	100	-		-	-	-	
Módulo de finura	2,64	7217 (1987)	Módulo de finura	6,89	7217 (1987)		
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	7217 (1987)	Dimensão máxima característica (mm)	19	7217 (1987)		
Graduação	Zona 3, areia média	7211 (1983)	Graduação	Brita 1	7211 (1983)		
Massa específica (kg/dm³)	2,63	9776 (1987)	Massa específica (kg/dm³)	3,09	9937 (1987)		
Massa unitária (kg/dm³)	1,54	7251 (1982)	Massa unitária (kg/dm³)	1,61	7251 (1982)		

3.1.3 Agregados reciclados

Os agregados reciclados utilizados foram obtidos a partir da britagem e peneiramento de uma amostra de resíduos coletada em um dos aterros de inertes da cidade de Porto Alegre. A amostra de resíduos foi totalmente separada e britada em britadores de rolos e de mandíbulas. O peneiramento consistiu na separação da fração miúda (agregados com dimensão menor que 4,8 mm) da fração graúda (agregados com dimensão entre 19 e 4,8 mm). Também para os agregados reciclados foram realizados ensaios para determinação de algumas de suas propriedades físicas, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de propriedades físicas dos agregados naturais utilizados

Aggregado miúdo reciclado				Aggregado graúdo reciclado			
Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Método de ensaio (NBR)	Peneiras (mm)	% Retido	% Retido acumulado	Método de ensaio (NBR)
4,8	0,1	0	7217 (1987)	19	0,2	0	7217 (1987)
2,4	15,8	16		12,5	45,6	46	
1,2	18,9	35		9,5	27,3	73	
0,6	18,3	53		6,3	15,6	89	
0,3	19,9	73		4,8	6,6	95	
0,15	15,5	88		<4,8	4,7	100	
<0,15	11,5	100		Total	100	-	
Total	100,0	-		-	-	-	
Módulo de finura	2,65	7217 (1987)	Módulo de finura	6,69	7217 (1987)		
Dimensão máxima característica (mm)	4,8	7217 (1987)	Dimensão máxima característica (mm)	19	7217 (1987)		
Graduação	Zona 3, areia média	7211 (1983)	Graduação	-	7211 (1983)		
Massa específica (kg/dm³)	2,53	9776 (1987)	Massa específica (kg/dm³)	2,51	-		
Massa unitária (kg/dm³)	1,21	7251 (1982)	Massa unitária (kg/dm³)	1,12	7251 (1982)		

Comparando-se os resultados das propriedades dos agregados naturais com os resultados dos agregados reciclados apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6, respectivamente, observa-se que:

- O módulo de finura dos agregados reciclados são muito próximos dos módulos de finura dos agregados naturais utilizados;
- As massas específica e unitária dos agregados reciclados são bem menores que a dos agregados naturais. Este resultados eram esperados, visto que, os materiais reciclados de resíduos de C&D apresentam maior porosidade que os agregados naturais e isso tem influência direta sobre as massas específica e unitárias dos materiais. Além disso, é preciso chamar a atenção para a necessidade de compensar a quantidade materiais reciclados quando um traço de concreto convencional é utilizado para produzir o concreto reciclado;
- A taxa de absorção dos agregados reciclados é bem maior que a dos agregados naturais, e ela cresce com a diminuição da dimensão do agregado utilizado. Neste caso, é importante lembrar que é necessário realizar a compensação da taxa de absorção dos agregados reciclados nas misturas de concreto. A adoção deste procedimento permitirá que as misturas de concreto reciclado não fiquem demasiadamente secas. Todavia, deve-se tomar cuidado com a adição de água nas misturas para não afetar o desempenho mecânico do concreto;
- Além disso, observou-se para o agregado miúdo reciclado um alto percentual de partículas finas menores que 0,15 mm.

3.2 Resistência à compressão axial

Como foi mencionado no início do item 3, os resultados da pesquisa desenvolvida por Leite (2001) deram origem ao desenvolvimento deste estudo, uma vez que foi observado o efeito significativo da interação entre o teor de agregado miúdo reciclado e a idade de cura nos resultados de resistência à compressão dos concretos. Os resultados de resistência à compressão para os cinco níveis de %AMR e 4 idade avaliados por Leite (2001) estão apresentados na Tabela 7.

Através dos resultados apresentados na Tabela 7 observa-se que quanto menor o %AMR utilizado maior é a taxa de crescimento da resistência nas primeiras idades, o inverso ocorre para os teores mais altos. No entanto, quando se analisa o crescimento da resistência dos 28 para os 91 dias o comportamento é inverso. Ou seja, os traços com altos teores de AMR apresentam maiores taxas de crescimento da resistência o que pode estar relacionado com uma possível reação pozolânica de um

dos componentes do material reciclado como, por exemplo, o material cerâmico. Como foi dito no item 2.2, argilas pobramente calcinadas podem adquirir estrutura tal que quando finamente moída e em presença de umidade se combinam com o hidróxido de cálcio formando compostos resistentes. Estes compostos são formados após um determinado período de hidratação do cimento, por isso as reações pozolânicas são conhecidamente lentas. Assim, é possível que em idades mais avançadas os resultados de resistência à compressão dos concretos com agregados miúdos reciclados sofram influência de atividade pozolânica advinda do material cerâmico. Como o aumento na taxa de crescimento pode ser considerado pequeno há a possibilidade também de que nem haja tal efeito, mas não é possível afirmar com certeza.

Tabela 7 - Resultados de resistência à compressão dos concretos com diferentes teores de AMR e taxas de crescimento das resistências em relação aos resultados de resistência dos 28 dias de idade

% AMR	Resistência à compressão (MPa)				Relação $fc_{n\text{-dias}} / fc_{28}$			
	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias	3 dias	7 dias	28 dias	91 dias
0	16,6	17,1	19,4	26,4	85,7	88,0	100,0	135,9
11,5	16,8	17,3	19,6	26,8	85,5	87,8	100,0	136,3
50	17,3	17,8	20,4	28,1	85,0	87,3	100,0	137,7
88,5	17,8	18,4	21,1	29,4	84,5	86,9	100,0	139,0
100	18,0	18,5	21,3	29,8	84,3	86,8	100,0	139,4

3.3 Avaliação da reatividade pozolânica do material cerâmico

Como foi dito no item 3 a atividade pozolânica do material cerâmico finamente moído foi avaliada com a cal e com o cimento de acordo com a prescrição das Norma Brasileiras.

Antes de avaliar o índice de atividade pozolânica do material é interessante que se faça algumas considerações sobre a composição do resíduo utilizado. A amostra de resíduo de C&D utilizada no desenvolvimento da pesquisa foi coletada junto a um dos aterros de inertes de Porto Alegre, e assim estava completamente misturada com todo tipo de material presente em canteiros de obras. Da amostra coletada, foram retiradas todas as impurezas como madeira, papel, papelão, vidros, plásticos, metais, terra, entre outros, e o material restante, ou seja, apenas o material inerte, foi britado e peneirado. Após o beneficiamento, o material reciclado foi novamente separado por componente existente na amostra, sendo sua composição apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição da amostra beneficiada de resíduo de C&D

Componente	% em massa
Argamassa	28,26
Material cerâmico	26,33
Concreto	15,18
Rocha natural	29,84
Outros	0,39

Os resultados apontam maior incidência na amostra de argamassas e materiais cerâmicos, como pode ser visto no gráfico da Tabela 8. Este resultado pode estar relacionado à tipologia construtiva mais utilizada no Brasil que é de alvenaria com revestimento argamassado.

É importante salientar que a composição do resíduo de C&D foi determinada após o beneficiamento da amostra, desta forma foi realizada apenas na fração do agregado graúdo, ou seja, nas partículas com dimensão maior que 4,8 mm, em partículas menores que esta dimensão efetuar a classificação do material a “olho nu” seria muito difícil. Com base nisto seria interessante levantar algumas suposições. Por exemplo, o percentual que cada material apresenta na composição do agregado miúdo reciclado pode ser um pouco diferente do apresentado para o agregado graúdo. Deste modo, pode ser que os materiais como as rochas naturais ou os concretos, que têm maior resistência se fragmentem menos em partículas menores, diferente do que ocorre com as argamassas e os materiais cerâmicos porosos, que possuem maior tendência a se fragmentar mais. Isto posto, o agregado miúdo reciclado teria maior probabilidade de possuir ainda mais partículas com potencial pozolânico. Se for avaliada, ainda, a composição granulométrica do agregado miúdo reciclado apresentada na Tabela 6 perceber-se-á que mais de 10 % do material tem dimensão menor que 0,15 mm, o que aumenta as chances deste material em contribuir com algum efeito pozolânico.

Com base nos resultados de resistência à compressão dos concretos e nos resultados e suposições levantados anteriormente é que foi realizada a avaliação da reatividade pozolânica do material cerâmico apresentada a seguir. O material utilizado para a realização do ensaio foi obtido a partir da britagem do material cerâmico separado na amostra do resíduo de C&D, que foi, posteriormente, peneirado na peneira de abertura # 0,075 mm.

3.3.1 Atividade pozolânica com a cal

O ensaio de determinação da atividade pozolânica do material cerâmico com a cal (hidróxido de cálcio) foi realizado conforme a prescrição da NBR 5751 (1992).

Este ensaio consiste em preparar uma argamassa com 9 partes em massa de areia normal do IPT, uma parte em massa de hidróxido de cálcio puro - Ca(OH)₂ – e mais uma quantidade de material pozolânico que corresponde ao dobro do volume de hidróxido de cálcio. Para tanto devem ser determinadas as massas específicas da cal e do material pozolânico a ser testado. Os resultados de massa específica bem como as quantidades de material utilizadas estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Massa específica e quantidade de materiais utilizados na determinação da atividade pozolânica com a cal

Materiais			
Hidróxido de cálcio	Material cerâmico	Areia normal	
Massa específica (kg/dm ³)	2,19	2,58	-
Quantidade de materiais (g)	104,00	245,04	936,00

A quantidade de água da mistura foi determinada para que fosse obtida uma argamassa com índice de consistência de (225 ± 5) mm de acordo com a prescrição da NBR 7215 (1996). Após a determinação da quantidade ideal de água para a mistura, foram moldados 6 corpos-de-prova para determinação da resistência à compressão curados como prescreve a NBR 5751 (1992). Aos 7 dias de idade, os corpos-de-prova foram rompidos à compressão e os resultados estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de atividade pozolânica do material cerâmico com a cal

Consistência (mm)				Relação a/agl final			
Resultados individuais				Média	DP	CV (%)	
230	226	225	227	227	2,16	0,95	0,60
Resistência à compressão axial (MPa)							
fc individual (MPa)				Média	DP	CV (%)	
7,6	7,7	7,4	6,8*	7,8	7,8	7,7	0,15
							1,97

* Resultado não considerado para o cálculo da média e do desvio padrão

a/agl = água/aglomerante

DP = Desvio Padrão

CV (%) = Coeficiente de variação percentual

A NBR 12653 (1992), que especifica as exigências químicas e físicas para que um material seja considerado como uma pozolana, estabelece que o índice de atividade pozolânica com a cal aos 7 dias deve ser igual ou superior a 6 MPa. Observa-se, assim, que o resultado de resistência média à compressão da argamassa com adição de material cerâmico foi de 7,7 MPa, ou seja, 28 % superior ao mínimo exigido pela referida norma.

3.3.2 Atividade pozolânica com o cimento

Foi realizada, também, a avaliação da atividade pozolânica do material cerâmico com o cimento Portland de acordo com o método prescrito pela NBR 5752 (1992).

Neste ensaio são realizadas duas misturas de argamassa, uma mistura de referência e outra mistura que substitui 35 % do volume absoluto do cimento Portland pelo material a ser avaliado. A atividade pozolânica é dada pela relação entre a resistência à compressão da argamassa com o material em estudo e a resistência à compressão da argamassa de referência.

Também para este ensaio é necessário a determinação da massa específica dos materiais, para realização do cálculo da quantidade material necessária a cada mistura. Os resultados de massa específica bem como a quantidade de materiais estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Massa específica e quantidade de materiais utilizados na determinação da atividade pozolânica com o cimento Portland

		Quantidade (g)	
Materiais	Massa específica	Argamassa A	Argamassa B
Cimento	3,11 kg/dm ³	312,0	202,8
Material cerâmico	2,58 kg/dm ³	-	90,6
Areia normal	-	936,0	936,0

Argamassa A = Argamassa de referência

Argamassa B = Argamassa com substituição do cimento por material cerâmico

Foi determinada a quantidade de água necessária para que cada uma das misturas alcançassem o índice de consistência de (225 ± 5) mm, determinado de acordo com a NBR 7215 (1996). Neste ensaio também foram moldados 6 corpos-de-prova por traço, com os quais foi determinada a resistência à compressão das argamassas após 28 dias de cura. Os resultados do ensaio de determinação do índice de consistência, bem como da resistência à compressão estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de atividade pozolânica do material cerâmico com cimento Portland

Argamassa	Consistência (mm)						Relação a/agl final		
	Resultados individuais				Média	DP	CV (%)		
A	223	232	231	228	228,5	4,04	1,77	0,50	
B	222	219	222	224	221,8	2,06	0,93	0,55	
Resistência à compressão axial (MPa)									
Argamassa	fc individual (MPa)						Média	DP	CV (%)
A	24,8*	24,7*	26,1	28,3*	25,7	25,8	25,9	0,20	0,77
B	20,8*	23,0	21,1*	22,1	22,6	19,9*	22,6	0,45	1,99
							Água requerida		
							-		
							103 %		

* Resultado não considerado para o cálculo da média e do desvio padrão

a/agl = água/aglomerante

DP = Desvio Padrão

CV (%) = Coeficiente de variação percentual

Água requerida = quantidade de água necessária para obtenção do índice de consistência de (225 ± 5) mm da argamassa B dividido pela quantidade de água da argamassa A multiplicado por 100.

O índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação a argamassa de referência é de 87,2 %. De acordo com a NBR 12653 (1992) este índice deve ser no mínimo de 75 %, ou seja, o material avaliado atende a esta exigência da norma para que um material seja considerado pozolânico.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados de atividade pozolânica apresentados no item anterior observa-se que o material cerâmico presente na amostra de resíduo utilizado para a produção dos concretos apresentam índices de atividade pozolânica. Entretanto, somente com estes ensaios não é possível afirmar que se trata de uma pozolana pois para isso seria necessário realizar outros ensaios de caráter tanto físico quanto químico que cumprimem as exigências da NBR 12653 (1992).

Com os resultados obtidos pode-se afirmar que o material cerâmico possui sim uma certa atividade pozolânica, e, ainda, que há uma probabilidade de que isso tenha contribuído com o pequeno incremento de resistência apresentado pelos traços de concreto com altos teores de agregado miúdo reciclado. Todavia, não é possível garantir que tenha sido esta a maior ou a única razão para este incremento de resistência. Seria necessário um estudo mais aprofundado das características físicas e químicas do material cerâmico, bem como, seria interessante realizar misturas de concreto com adição somente deste material para avaliar o incremento de resistência, principalmente em idades mais avançadas. E ainda realizar uma avaliação do consumo de hidróxido de cálcio das misturas ao longo do tempo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARRA, M. *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado*. Barcelona, 1996. 223 p. Tese (doutorado). Escola técnica Superior d'Enginyers de Camin, Canal i Ports. Universitat Politécnica de la Catalunya.

- BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos.** Florianópolis, 1999. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão.** 3.ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997. 3v. v.1. 400p.
- DELWAR, M.; FAHMY, M.; TAHA, R. Use of reclaimed asphalt pavement as na aggregate in Portland Cement concrete. **ACI Materials Journal**, v. 94, n. 3, p. 251-256, 1997.
- DEVENNY, A.; KHALAF, F.M. The use of crushed brick as coarse aggregate in concrete. **Masonry International**, v. 12, n. 3, p.81-84, 1999.
- HAMASSAKI, L. T.; SBRIGHI NETO, C.; FLORINDO, M. C. Uso de entulho como agregado para argamassas de alvenaria. In: WORKSHOP SOBRE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: EPUSP/ANTAC, 1997. 170 p. p.107-115.
- HANSEN, T.C. **Recycled of demolished concrete and masonry.** London: Chapman & Hall, 1992. 316p. Part One: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete, p. 1-160. (RILEM TC Report 6).
- 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.** São Carlos, 1998. 116p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** Porto Alegre, 2001. 270p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- LEVY, Salomon Mony. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos.** São Paulo, 1997. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo.
- LEVY, S.; HELENE, P. Durabilidade de concretos produzidos com resíduos minerais de construção civil: práticas recomendadas. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL: PRÁTICAS RECOMENDADAS, 3., 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CT206 Meio Ambiente, 2000. p.3-14.
- LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos.** São Carlos, 1999. 246p. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo:PINI, 1994. 573p.
- NEVILLE, A. M. **Properties of concrete.** 4.ed. London: Longman, 1995. 844p.
- SALEM, R. M.; BURDETTE, E. G. Role of chemical and mineral admixtures on phisical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 5, p.558-563, 1998.
- TOPÇU, I. B.; GÜNCAN, N. F. Using waste concrete as aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1385-1390, 1995.
- WINKLER, A.; H. A. Recycling of fine processed building rubble materials. In: DHIR, R. K.; HENDERSON, N. A.; LIMBACHIYA, M. C. (Ed.). **Sustainable Construction: use of recycled concrete aggregate.** London: Thomas Telford Pub., 1998. p.157-168.
- ZORDAN, Sérgio Eduardo. **A utilização do entulho como agregado, na confecção do concreto.** Campinas, 1997. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil - FEC, Universidade Estadual de Campinas.