



ESTUDO DE CONCRETOS CONFECCIONADOS COM AGREGADOS DE RCD RECICLADO VISANDO USO EM APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Karlisson A. N. da Silva (1); Jonathas J. L. Tenório (2); Paulo C. C. Gomes (3);

Rodrigues, Christiano Cantarelli (4); Aline da S. R. Barboza (5)

(1) Mestrando, Universidade Federal de Alagoas, karlisson_andre@hotmail.com

(2) Mestre, Universidade Federal de Alagoas, jjlt@uol.com.br

(3) Professor Doutor, Universidade Federal de Alagoas, pgomes@ctec.ufal.br

(4) Professor Doutor, Universidade Federal de Alagoas, ccr@ctec.ufal.br

(5) Professora Doutora, Universidade Federal de Alagoas, alramos@ctec.ufal.br

Resumo

O trabalho teve como objetivo analisar algumas das propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto produzido com agregados miúdos e graúdos de RCD reciclado no intuito de avaliar a possibilidade de uso do compósito em estruturas. Uma atenção especial foi dada ao nível de porosidade/resistência do agregado graúdo reciclado. Os resíduos de construção e demolição foram coletados em áreas de deposição ilegal dentro da cidade de Maceió e foram cominuídos em laboratório, sendo o material granular obtido separado em duas frações: agregado miúdo e agregado graúdo. Uma parte do agregado graúdo foi misturada com agregado graúdo de resíduo de concreto de forma a produzir um novo agregado reciclado menos poroso/mais resistente. A massa específica dos agregados graúdos reciclados foi usada como parâmetro para medir seu nível de porosidade. Traços foram produzidos em laboratório com três níveis de relação a/c combinando-se cada agregado graúdo reciclado com o agregado miúdo reciclado e com uma areia natural. Concretos de referência também foram produzidos utilizando-se agregados naturais. Observou-se que os agregados reciclados têm potencial para aplicação em concretos estruturais. Em termos gerais, o uso combinado de agregado graúdo reciclado com agregado miúdo reciclado não foi vantajoso, mas as propriedades dos concretos eram tanto melhores quanto menor era a porosidade (ou, maior a massa específica) dos agregados graúdos reciclados. Alguns concretos reciclados chegaram a apresentar resistências mecânicas maiores que as de seus respectivos concretos de referência.

Palavra-chave: resíduo de construção e demolição, reciclagem, concreto, porosidade

ABSTRACT

The aim of this work was to analyze some mechanical and durability properties of the concrete produced with fine and coarse aggregates obtained from the recycling of construction and demolition wastes (CDW) in order to evaluate the possibility of use this composite in structures. A special attention was given to the degree of porosity/strength of the coarse recycled aggregate. Construction and demolition wastes were gathered from illegal deposition areas inside Maceió and were comminuted in laboratory; the grains obtained were divided into fine aggregate and coarse aggregate. A part of the coarse aggregate was mixed in with recycled concrete aggregate in order to produce a new aggregate which was less porous/stronger than the first one. The specific gravity of the coarse recycled aggregates was used as a parameter to measure its degree of porosity. Concretos were produced in laboratory combining three water-cement ratio with each coarse recycled aggregate and fine recycled aggregate or river sand; reference concretes were produced with natural aggregates too. It was observed that recycled aggregates can be used in structural concrete. In general, the use of coarse recycled aggregate in combination with fine coarse aggregate was not good, but the less porous (or the higher the specific gravity) the coarse recycled aggregate, the better the concrete properties were. Some recycled aggregate concretes reached strength values bigger than the reference concrete.

Keywords: construction and demolition waste, recycling, concrete, porosity

1 INTRODUÇÃO

Particularidades dos agregados de RCD reciclado como a heterogeneidade da composição (diversidade de fases constituintes), a menor resistência mecânica e a variabilidade representam dificuldades não só à sua utilização como também à confiabilidade dos mesmos em aplicações de maior valor econômico, como é o caso de concretos e argamassas, e aplicações de maior responsabilidade, como é o caso de concretos estruturais.

As conseqüências dessas particularidades são manifestas nos próprios agregados reciclados e nos concretos confeccionados com eles. Aqueles normalmente não atendem às especificações das normas (comumente destinadas aos agregados naturais) (QUEBAUD et al. [1]). Já estes, além de estarem propensos a apresentar variabilidade em suas propriedades, tendem, dentre outras coisas, a ser menos trabalháveis, menos resistentes, mais deformáveis (menor módulo de elasticidade), mais porosos e mais permeáveis.

Estudos, normas ou recomendações têm proposto ou estabelecido formas de classificar os agregados reciclados ou o RCD de origem segundo a presença percentual de cada fase (concreto, argamassas, cerâmica etc.). Essa classificação é normalmente feita de forma visual e a definição das melhores categorias parte do princípio de que agregados contendo materiais tidos como mais resistentes, como o concreto, por exemplo, são também mais resistentes e assim podem ser usados em aplicações de maior importância. Uma das razões pelas quais os concretos são vistos como fase mais resistente é que em sua composição estão presentes rochas.

A classificação baseada em critérios visuais é falha em razão de cada fase do RCD ter sua própria variabilidade. É possível encontrar, por exemplo, concretos de diferentes resistências, produzidos com diferentes relações a/c, diferentes teores de agregado graúdo, o qual, por sua vez, é oriundo de rochas de diferentes resistências. No intuito de assegurar uma menor variação das categorias no que se refere à resistência, normas e recomendações têm definido critérios adicionais a serem cumpridos pelos agregados (valores de absorção de água, por exemplo).

Por trás dos critérios adicionais relacionados comumente à absorção de água, massa específica ou valores de abrasão *Los Angeles* está um importante princípio dado pela Ciência dos Materiais que é a relação inversamente proporcional existente entre a porosidade e a resistência mecânica de um material, válida para vários materiais, inclusive o concreto e cerâmicas (MEHTA e MONTEIRO [2]).

Nos agregados, a porosidade afeta outras de suas propriedades (MEHTA e MONTEIRO [2]) e duas delas refletem bem seu nível de porosidade e são de determinação relativamente fácil: a absorção de água e a massa específica. No concreto, sua resistência, durabilidade, retração e permeabilidade sofrem influência direta do número, tipo, tamanho e distribuição dos poros presentes nos agregados, na pasta de cimento e na zona de rótulo de “agregado cinza” ou “agregado vermelho”, demonstrando, assim, a falibilidade do sistema de classificação visual. Os concretos apresentaram melhoria de suas propriedades (maior resistência à compressão, maior módulo de elasticidade etc.) à medida que a massa específica dos agregados reciclados cresceu.

Neste trabalho foram estudados concretos produzidos com dois agregados graúdos reciclados de diferentes massas específicas combinados com agregado miúdo reciclado ou areia natural no intuito de avaliar a possibilidade de se obter concretos reciclados apropriados ao uso estrutural.

2 MÉTODOS E MATERIAIS

2.1 Metodologia empregada

No intuito de analisar a possibilidade de se produzir concretos estruturais com agregados de RCD reciclados, foram escolhidas para estudo as seguintes propriedades do compósito: resistência à compressão, módulo de elasticidade tangente inicial, absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar (método de Figg). Também foi medida a consistência dos concretos pelo abatimento do tronco de cone. Entretanto, seus resultados não são mostrados aqui em virtude do foco do estudo ter sido as propriedades do estado endurecido.

Amostras da fração mineral de resíduos de construção e demolição foram coletadas dos oito maiores pontos de deposição ilegal dentro da malha urbana de Maceió para que fossem produzidos os agregados aqui utilizados. A massa específica desses agregados foi usada como parâmetro para manipulação de sua resistência em virtude da mesma refletir bem o nível de porosidade do material, conforme discutido na seção anterior. Cabe ressaltar que a separação gravítica realizada por CARRIJO [4] baseou-se na verdadeira massa específica dos grãos dos agregados, ou seja, cada agregado dentro de uma determinada faixa de massa específica possuía grãos com massa específica dentro dessa faixa de forma que seus agregados mais densos, por exemplo, possuíam majoritariamente grãos de rocha. Já aqui, trabalhou-se com a massa específica média de todos os grãos do agregado, isto é, cada agregado graúdo reciclado era formado por uma mistura de grãos de diferentes materiais (argamassa, rocha, cerâmica etc.), cada um com uma massa específica diferente.

Os parâmetros da composição dos concretos tomados como variáveis independentes do estudo foram:

- **Relação água/cimento:** adotados os valores 0,67, 0,50 e 0,40 com o intuito de contemplar a faixa de relações a/c e de resistências abordadas na NBR 6118 [6] para concretos estruturais;
- **Massa específica do agregado graúdo reciclado:** adotados 2 valores. O menor valor foi a própria massa específica do RCD coletado (2,08 kg/dm³). O maior valor foi 2,25 kg/dm³. Esta maior densidade foi obtida misturando-se agregado de concreto reciclado ao agregado obtido do RCD. O primeiro agregado foi chamado de G1, o segundo foi chamado de G2;
- **Tipo do agregado miúdo:** adotados 2 tipos: agregado 100% natural (areia natural de rio) e agregado 100% reciclado (agregado miúdo de RCD reciclado) no intuito de verificar a viabilidade da reciclagem massiva das frações do agregado reciclado obtido de RCDs.

2.2 Materiais componentes

2.2.1 Agregados miúdos

O agregado miúdo natural usado foi uma areia natural de rio, enquanto que o agregado miúdo reciclado foi a fração passante na peneira # 4,75 mm, oriunda da cominuição da fração mineral do RCD em um moinho de martelos. As propriedades dos dois agregados constam da tabela 1.

TABELA 1 – Propriedades dos agregados miúdos.

Propriedade	Areia natural de rio	Agregado reciclado miúdo	Norma
Absorção de água (%)	1,22	9,34	NBR NM 30 [7]
Massa específica (kg/dm ³)	2,68	2,50	NBR 9776 [8]
% matéria orgânica (ppm)	< 300	< 300	NBR NM 49 [9]
% material com D<0,075 mm	1,00	8,61	NBR NM 46 [10]
D _{máx} (mm)	4,75	4,75	NBR 248 [11]
Módulo de finura	2,82	2,78	
Zona granulométrica	utilizável	utilizável	

2.2.2 Agregados graúdos

O agregado graúdo natural usado foi uma brita de origem granítica comercialmente conhecida como brita 1 (D_{máx} = 19 mm), típica da região. Os agregados graúdos reciclados foram dois: um obtido da fração passante na peneira # 25,4 mm e retido na peneira # 4,75 mm, oriunda da cominuição do RCD (chamado de G1), e outro obtido da mistura de G1 com a fração graúda oriunda da cominuição de resíduos de concreto (chamado de G2). Ambos os resíduos foram cominuídos em um moinho de martelos.

Como se pretendia obter o agregado reciclado G2 com uma massa específica pré-definida, baseada nos resultados de Carrijo [4] e Angulo [5], os teores de agregado de RCD e agregado de resíduo de concreto a serem misturados foram calculados através de um sistema de equações formado pela

equação 1, uma regra de mistura para a massa específica, e a equação 2, uma relação óbvia para uma mistura de dois materiais.

$$\%M_{G1} \cdot \gamma_{G1} + \%M_{ARC} \cdot \gamma_{ARC} = \gamma_{G2} \quad (1)$$

$$\%M_{G1} + \%M_{ARC} = 1 \quad (2)$$

Nas equações 1 e 2, $\%M_{G1}$ é a porcentagem de agregado gráudo G1, em massa; γ_{G1} é a massa específica do agregado gráudo G1; $\%M_{ARC}$ é a porcentagem de agregado gráudo de concreto reciclado, em massa; γ_{ARC} é a massa específica do agregado gráudo de concreto reciclado e γ_{G2} é a massa específica da mistura, ou seja, do agregado gráudo G2.

A resolução do sistema de equações acima com os devidos valores de massa específica resultou em $\%M_{G1} = 22,74$ e $\%M_{ARC} = 77,26$. As propriedades dos agregados gráudos são listadas na tabela 2.

TABELA 2 – Propriedades dos agregados gráudos.

Propriedade	Brita 1	G1	G2	Norma
Absorção de água (%)	0,49	8,41	5,37	NBR NM 53 [12]
Massa específica (kg/dm ³)	2,62	2,08	2,27 ¹	
Índice de forma	2,6	2,3	2,2	NBR 7809 [13]
% material com D<0,075 mm	0,33 ²	0,75	0,45	NBR NM 46 [10]
D _{máx} (mm)	19,0	19,0	19,0	NBR 248 [11]
Módulo de finura	6,86	5,76	5,85	
Zona granulométrica	9,5/25	nenhuma	nenhuma	

Notas: ¹ O valor pretendido foi 2,25 kg/m³ (e usado na Equação 1). O valor medido experimentalmente foi 2,27 kg/m³; ² segundo a NBR 7219 [14].

2.2.3 Outros

O aglomerante utilizado foi um cimento Portland composto com filer (CPII-F-32),

A água usada na confecção dos traços de concreto foi a água disponível na rede de abastecimento da Ufal.

Um superplastificante de 3ª geração com base em cadeia de éter carboxílico modificado foi usado para conferir adequada consistência ao concreto.

2.3 Concreto

Da combinação dos parâmetros relativos à composição do concreto resultaram os traços da tabela 3. Primeiro, foram dosados os concretos de referência, em volume, e só então foram calculados os traços dos concretos reciclados. Isto foi feito para que a diferença de massa específica entre os agregados naturais e reciclados não levassem à produção de diferentes volumes de concreto.

Foram moldados 9 corpos-de-prova cilíndricos de 10x20 cm, sendo 3 para a resistência à compressão (NBR 5739 [15]), 3 para o módulo de elasticidade tangente inicial (NBR 8522 [16]) e 3 para a absorção de água e índice de vazios (NBR 9778 [17]). Um corpo-de-prova prismático de 15x15x30 cm foi moldado para a medição do tempo de permeabilidade ao ar (E 413 [18]), onde foram feitos 5 furos com 6 mm de diâmetro e 4 cm de profundidade. A idade de referência para a realização dos ensaios foi 28 dias.

Os agregados reciclados (miúdo e gráudo) passaram por uma pré-molhagem antes do preparo do concreto no intuito de evitar que os mesmos absorvessem parte da água da mistura. O teor de água da pré-molhagem foi igual a 70% da absorção de água total de cada agregado. O superplastificante foi adicionado gradualmente às misturas até que se atingisse uma consistência visualmente plástica.

O método de cura adotado para todos os concretos foi a imersão total dos corpos-de-prova em água.

TABELA 3 – Composição dos concretos reciclados e concretos de referência.

Traço	fator a/c	Materiais em volume (dm ³)				Materiais em massa (kg)			
		água	cimento	agreg. miúdo	agreg. graúdo	água	cimento	agreg. miúdo	agreg. graúdo
67MRG1	0,67	200	99	301	400	200	300	752,5	832
67MRG2	0,67	200	99	301	400	200	300	752,5	900
67MNG1	0,67	200	99	301	400	200	300	806,7	832
67MNG2	0,67	200	99	301	400	200	300	806,7	900
50MRG1	0,50	200	132	268	400	200	400	670,0	832
50MRG2	0,50	200	132	268	400	200	400	670,0	900
50MNG1	0,50	200	132	268	400	200	400	718,2	832
50MNG2	0,50	200	132	268	400	200	400	718,2	900
40MRG1	0,40	200	165	235	400	200	500	587,5	832
40MRG2	0,40	200	165	235	400	200	500	587,5	900
40MNG1	0,40	200	165	235	400	200	500	629,8	832
40MNG2	0,40	200	165	235	400	200	500	629,8	900
Concretos de referência									
Ref67	0,67	200	99	301	400	200	300	806,7	1048
Ref50	0,50	200	132	268	400	200	400	718,2	1048
Ref40	0,40	200	165	235	400	200	500	629,8	1048

Nota: 67, 50 e 40 referem-se à relação a/c; MR = ag. miúdo reciclado; MN = ag. miúdo natural; G1 e G2 = ag. graúdos reciclados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resistência à compressão

A figura 1 mostra os resultados da resistência à compressão.

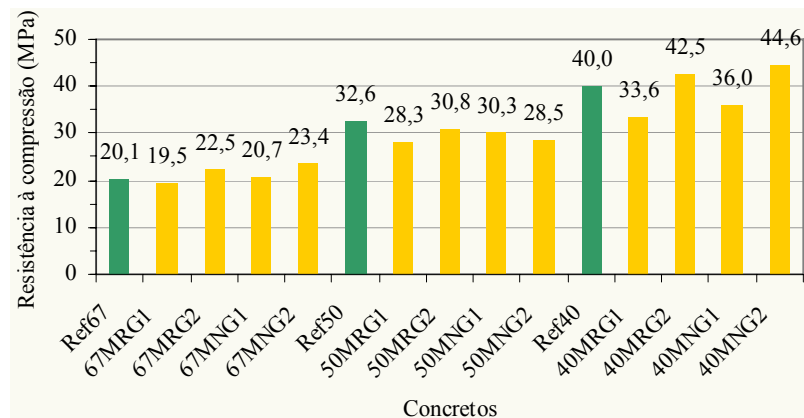


Figura 1 – Resistência à compressão dos concretos.

Na figura 1 nota-se que os concretos reciclados, em geral, apresentaram resistência à compressão próximas das dos seus respectivos concretos de referência. Os casos onde aconteceram reduções acentuadas evidenciam a influência negativa da porosidade dos agregados de RCD graúdos sobre sua própria resistência e sobre a resistência do concreto. O caso onde as resistências praticamente se igualaram ou superaram as do concreto de referência foi o dos concretos reciclados com relação a/c igual a 0,67. LEITE [19] e VIEIRA [20] também observaram esse comportamento a altas relações a/c enquanto que nenhum dos concretos reciclados estudados por CARRIJO [4] superou as resistências dos concretos de referência. Uma das possíveis explicações para isso é que os agregados reciclados podem ter absorvido parte da água de mistura, diminuindo a relação a/c efetiva. Outra explicação é que, conforme NEVILLE [21], com o aumento da relação a/c, a pasta torna-se cada vez mais o fator limitante da resistência, fato também constatado por CARRIJO [4].

Por G2 ser mais fino que a brita 1, isso por si só é capaz de proporcionar uma zona de transição mais forte (MEHTA e MONTEIRO [2]), mas, além disso, a maior rugosidade superficial e maior porosidade de G2 em relação à brita certamente permitiram uma maior aderência sua com a pasta, o que contribuiu para que o concreto 40MNG2 superasse o concreto de referência. A tabela 4 mostra o aspecto da ruptura dos corpos-de-prova dos concretos reciclados.

TABELA 4 – Aspecto da ruptura dos corpos-de-prova dos concretos reciclados.

Concreto	Agregados reciclados rompidos nos corpos-de-prova
67MRG1	Não rochosos + descolamento dos rochosos e não rochosos
67MRG2	Não rochosos + descolamento dos rochosos
67MNG1	Não rochosos
67MNG2	Não rochosos e alguns rochosos
50MRG1	Não rochosos
50MRG2	Não rochosos e alguns rochosos
50MNG1	Não rochosos
50MNG2	Rochosos e não rochosos
40MRG1	Rochosos e não rochosos
40MRG2	Rochosos e não rochosos + descolamento de alguns poucos rochosos
40MNG1	Não rochosos + descolamento de alguns rochosos
40MNG2	Rochosos e não rochosos

As observações da tabela 4 vêm também confirmar NEVILLE [21] quanto à relação existente entre a pasta e a resistência do concreto à medida que a relação a/c é alterada. Para a relação a/c 0,67, a ruptura aconteceu predominantemente nos agregados não rochosos (cerâmicas e argamassas) os quais têm resistência baixa e, provavelmente, mais próxima da resistência da pasta. Os agregados rochosos apenas se descolaram, comprovando a fraqueza da zona de transição. Já para a relação a/c 0,4, houve ruptura também dos agregados rochosos, o que mostra que agora a pasta é mais resistente. Os concretos de relação a/c 0,5 apresentaram um comportamento intermediário.

3.2 Módulo de elasticidade

A figura 2 mostra os resultados do módulo de elasticidade.

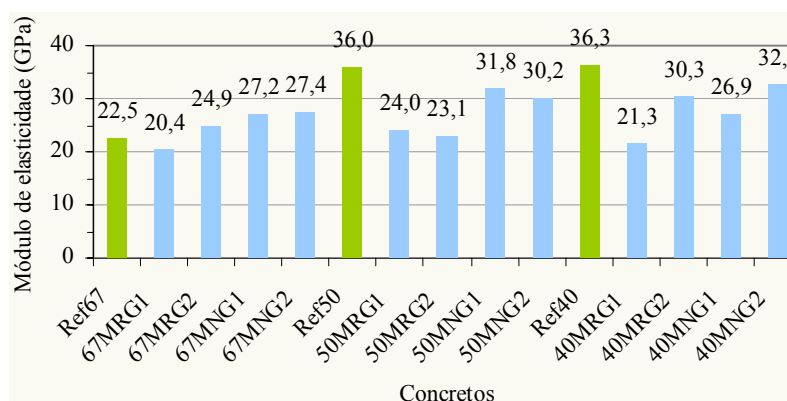


Figura 2 – Módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) dos concretos.

Assim como aconteceu com a resistência à compressão, para as relações a/c 0,5 e 0,4, os agregados reciclados não tiveram efeito benéfico sobre os módulos de elasticidade dos concretos reciclados, pois os módulos foram menores que os dos respectivos concretos de referência, confirmando que os agregados reciclados afetam também essa propriedade do concreto. Menores módulos implicam que os concretos reciclados são mais deformáveis que o concreto convencional.

Já para a relação a/c 0,67, da mesma forma que para a resistência à compressão, os agregados reciclados tiveram, em geral, efeito benéfico sobre o módulo de elasticidade, pois, à exceção do

concreto 67MRG1, os demais apresentaram módulos maiores que o concreto de referência. Este comportamento do módulo é coerente com o apresentado pelas resistências à compressão dos concretos reciclados dessa mesma relação a/c visto que as mesmas excederam a do concreto de referência, sem falar que é sabido existir uma relação entre essas duas propriedades mecânicas em virtude de ambas manterem relação com a porosidade das fases do concreto (MEHTA e MONTEIRO [2]). A figura 3 compara graficamente os valores dos módulos medidos experimentalmente com os valores previstos pela fórmula da NBR 6118 [6].

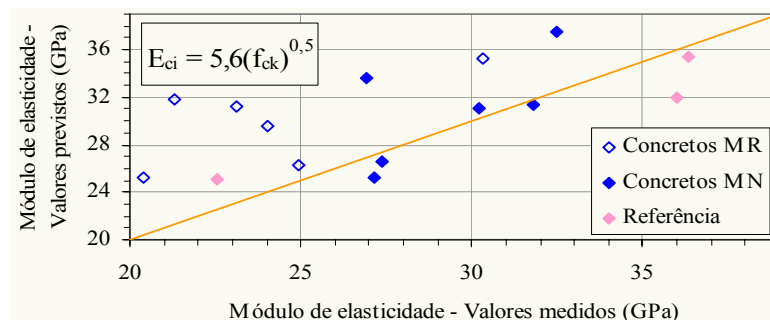


Figura 3 – Módulo de elasticidade tangente inicial - valores medidos em função dos valores previstos.

Pode-se ver na figura 3 que, para a maioria dos concretos, os valores previstos pela fórmula da norma superam o valor medido experimentalmente. Os módulos previstos foram, em média, 20,8% maiores que os módulos medidos. Também é bem perceptível que a fórmula parece ter servido melhor aos concretos cujo agregado miúdo era areia (alguns concretos MN e um dos concretos de referência). É possível que para uso com concretos reciclados a fórmula necessite de adaptações que levem em conta as particularidades dos agregados reciclados, a exemplo do que faz a fórmula do CEB/FIP de 1990 (NEVILLE [21]).

3.3 Absorção de água, índice de vazios e tempo de permeabilidade ao ar

Os resultados de absorção de água e do índice de vazios são apresentados na figura 4, e os resultados do tempo de permeabilidade ao ar são apresentados na figura 5.

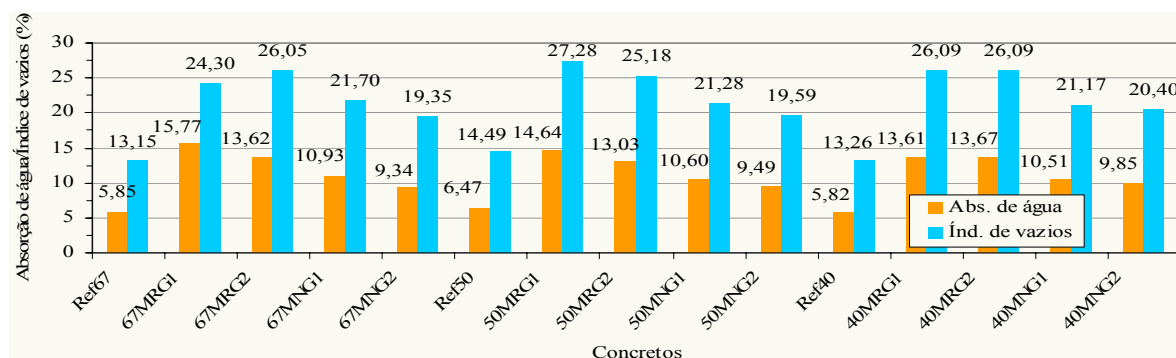


Figura 4 – Absorção de água e índice de vazios dos concretos.

Pode-se notar na figura 4 que os concretos reciclados apresentaram, em geral, maior absorção e maior índice de vazios que os concretos de referência, demonstrando que os agregados reciclados influíram negativamente na porosidade do compósito. Também é perceptível uma tendência geral de diminuição da absorção de água e do índice de vazios ao se mudar do agregado miúdo reciclado para a areia e do agregado graúdo G1 para o G2, isto é, ao se usar agregados menos porosos no concreto. Por outro lado, tanto para os concretos reciclados como para os de referência, as duas propriedades pareceram não ser sensíveis à alteração da relação a/c. Note-se que qualquer concreto de composição semelhante (xxMNG1, por exemplo) teve valor de absorção ou de índice de vazios bem semelhantes nas três relações a/c estudadas.

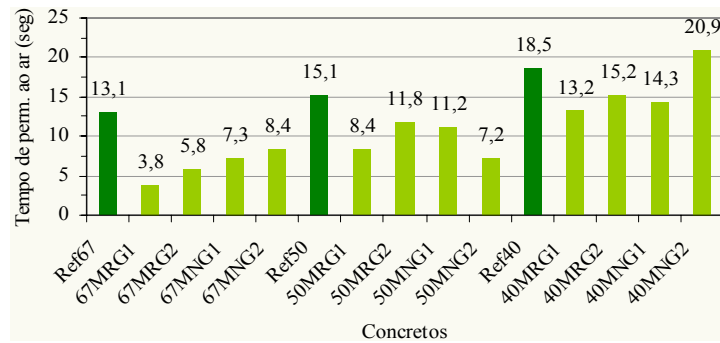


Figura 5 – Tempo de permeabilidade ao ar (Figg) dos concretos.

A propriedade tempo de permeabilidade ao ar dos concretos reciclados (figura 5) foi sensível à diminuição da porosidade do agregado miúdo e do agregado graúdo assim como ocorreu com a absorção de água e com o índice de vazios. Entretanto, sua tendência foi de crescimento já que o normal é que quanto menos permeável/penetrável for um concreto maior será o tempo necessário para o ar percorrer sua estrutura e voltar a preencher a cavidade onde foi gerado o vácuo. Ainda na mesma figura nota-se que, ao contrário da absorção e do índice de vazios, o tempo de permeabilidade ao ar foi sensível à alteração da relação a/c, diminuindo à medida que esta aumentou.

A seguir, pode-se visualizar graficamente (figuras 6 e 7) a relação entre a porosidade dos concretos e sua resistência à compressão para as três propriedades analisadas nesta seção. Nesses gráficos, para cada concreto, cada ponto corresponde a uma relação a/c.

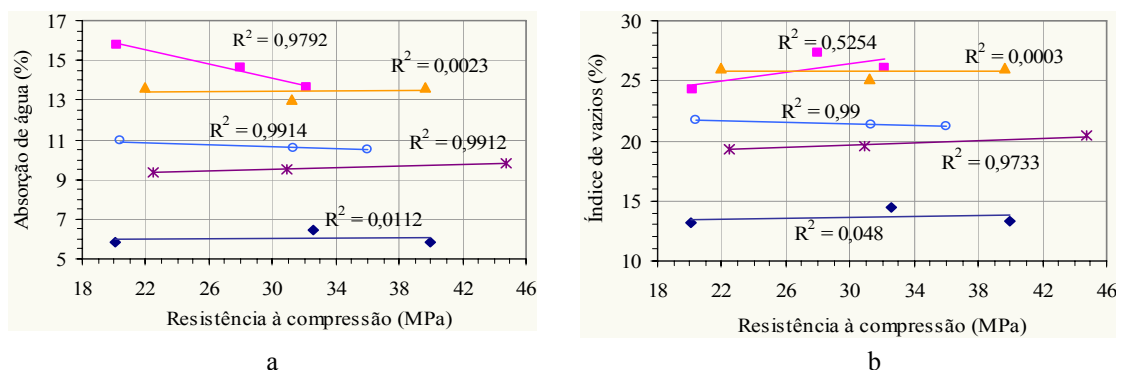


Figura 6 – Absorção de água e Índice de vazios em função da resistência à compressão dos concretos.

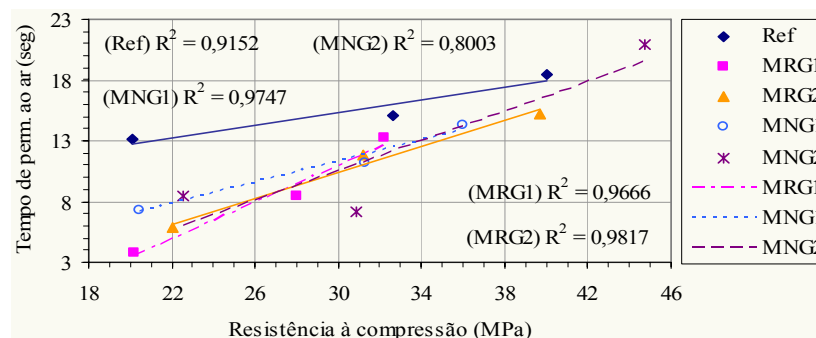


Figura 7 – Tempo de permeabilidade ao ar em função da resistência à compressão dos concretos.

Na figura 6a e na figura 6b nota-se que as retas ajustadas aos valores de absorção de água e do índice de vazios não demonstram haver, para todos os concretos, uma clara relação inversamente proporcional entre a porosidade da pasta e a resistência à compressão. Porém, deve-se atentar para o fato de que a absorção e o índice de vazios já deram indício (figura 4) de que não são sensíveis, ou são pouco sensíveis, às alterações da relação a/c. Com o tempo de permeabilidade (figura 7) a situação foi diferente, pois os ajustes do mesmo à resistência à compressão foram satisfatórios para todos os concretos. Esta propriedade demonstrou, então, de forma clara, que os concretos tenderam a ser tanto

mais resistentes quanto menores foram a porosidade e permeabilidade da pasta, confirmando que para este compósito, quer contenha agregados naturais ou reciclados, é válida a relação entre porosidade e resistência apontada pela Ciência dos Materiais.

Vale ainda ressaltar que parte da porosidade dos concretos reciclados pode ter como causa a migração de parte da água de molhagem dos agregados reciclados para a pasta.

4 CONCLUSÕES

A resistência à compressão dos concretos reciclados ficou em torno de 20 MPa para a maior relação a/c (0,67), em torno de 30 MPa para a relação a/c mediana (0,50) e em torno de 40 MPa para a menor relação a/c (0,40). Esse comportamento ocorreu independentemente do tipo de agregado utilizado e, portanto, mostra que todos concretos obedeceram à Lei de Abrams, isto é, à medida que se aumentou a relação a/c, a resistência à compressão diminuiu. As resistências obtidas ficaram dentro dos valores de resistência considerados para o concreto estrutural e especificados na norma brasileira para o cálculo de estruturas de concreto armado.

Os módulos de elasticidade dos concretos reciclados foram inferiores aos dos concretos convencionais, sendo os de relação a/c igual a 0,67 uma exceção. Menores módulos de elasticidade implicam em concretos mais deformáveis e más consequências para a deformabilidade das estruturas e para a fluência e retração do material.

Os concretos reciclados mostraram-se mais porosos e permeáveis que os concretos convencionais, sendo somente o concreto 40MNG2 a exceção no que se refere à permeabilidade. Concretos mais porosos e permeáveis tendem a ser menos duráveis por proporcionar, no caso das aplicações estruturais, menor proteção à armadura contra agentes agressivos externos que podem adentrar o compósito. Entretanto, isso só virá a ser um fator extremamente limitante do uso desses concretos no caso daquelas estruturas em que os mesmos estiverem aparentes. A própria norma brasileira de cálculo de estruturas de concreto armado menciona que revestimentos podem ser aplicados sobre o concreto no intuito de proteger o material das condições ambientais nocivas.

As propriedades dos concretos revelaram-se sensíveis à diminuição da porosidade dos agregados graúdos reciclados, de forma que os valores destas tenderam, em alguns casos, a ser bem próximos ou até superar os valores das propriedades dos concretos convencionais. Tendo em vista os resultados encontrados neste estudo para as propriedades dos concretos reciclados, pode-se afirmar que é possível o uso deste material em aplicações estruturais desde que observadas suas particularidades, as quais podem vir a ser fatores limitantes em alguns casos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] QUEBAUD, M. R.; ZAHARIEVA, R.; WIRQUIN, E.; BUYLE-BODIN, F. Influência do teor em agregados provenientes da reciclagem de materiais de demolição (agregados reciclados) na permeabilidade do concreto. 41º Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador, Brasil. 1999. 1 CD-ROM.
- [2] MEHTA, P. M.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, propriedades e materiais. São Paulo: PINI, 1994.
- [3] BASHEER, L.; KROPP, J.; CLELAND, D. J. Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: a review. *Construction and Building Materials*, n. 15, 2001, pp 93-103.
- [4] CARRIJO, P. M. Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto. Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.
- [5] ANGULO, S. C. Características de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos. Tese de doutorado. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005.

- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento”. NBR 6118, Rio de Janeiro, 2003.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregado miúdo - Determinação da absorção de água”. NBR NM 30, Rio de Janeiro, 2000.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman”. NBR 9776, Rio de Janeiro, 1987.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregado fino - Determinação de impurezas orgânicas”. NBR NM 49, Rio de Janeiro, 2001.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem”. NBR NM 46, Rio de Janeiro, 2003.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregados - Determinação da composição granulométrica”. NBR 248, Rio de Janeiro, 2003.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. NBR NM 53, Rio de Janeiro, 2003.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio”. NBR 7809, Rio de Janeiro, 1983.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Agregados - Determinação do teor de materiais pulverulentos”. NBR 7219, Rio de Janeiro, 1987.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio”. NBR 5739, Rio de Janeiro, 1994.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão-deformação - Método de ensaio”. NBR 8522, Rio de Janeiro, 2003.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. “Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”. NBR 9778, Rio de Janeiro, 2004.
- [18] LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL. “Betões - Determinação da permeabilidade ao ar e à água - Método de Figg”. E 413, Portugal, 1993.
- [19] LEITE, M. B. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Tese de doutorado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- [20] VIEIRA, G. L. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- [21] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2 ed. São Paulo: PINI, 1997.