

Estudo sobre a areia artificial em substituição à natural para confecção de concreto

The artificial sand x natural sand for concrete production

Maria Teresa Gomes Barbosa
Cláudia Valéria Gávio Coura
Larissa de Oliveira Mendes

Maria Teresa Gomes Barbosa
Departamento de Construção Civil
Universidade Federal de Juiz de
Fora
Campus Universitário
Bairro Martelos
Juiz de Fora - MG - Brasil
CEP 36036-330
Tel.: (32) 3229-3405
E-mail:
teresa.barbosa@engenharia.ufjf.br

Cláudia Valéria Gávio Coura
Departamento de Construção Civil
Universidade Federal de Juiz de
Fora
E-mail: gabiocoura@yahoo.com.br

Larissa de Oliveira Mendes
Departamento de Construção Civil
Universidade Federal de Juiz de
Fora
E-mail:
larissa.mendes@engenharia.ufjf.br

Recebido em 03/07/08
Aceito em 23/12/08

Resumo

A areia natural, por ser um material de grande utilização em obras de engenharia, tem sofrido um esgotamento progressivo de suas jazidas, com o conseqüente aumento de seu custo, levando à busca de soluções alternativas. No presente trabalho efetuou-se um estudo de caracterização e avaliação do emprego de rejeitos de mármore triturado e rocha de gnaisse britada, em substituição ao agregado miúdo natural, para a produção de concretos. Realizaram-se os ensaios de trabalhabilidade, resistência à compressão axial, módulo de deformação e absorção por imersão. Os resultados apontaram que os concretos elaborados com o rejeito de mármore apresentaram características mecânicas e de durabilidade superiores, comprovando a viabilidade da utilização desses rejeitos na confecção de concreto.

Palavras-chave: Rejeito de mármore. Agregado. Desenvolvimento sustentável.

Abstract

This research with the objective of finding aggregate that it comes, totally, they substitute the primary natural material of rivers, it is increasing because that has been causing severe environmental impacts. This research deals with recycling of the left over residue from processing of ornamental stones known as residue from the marble cutting process and gnaisse cutting process. The experimental program consisting in analyzing the physical and the mechanical properties of the residue and of the concrete, respectively, it will be present in that work. The tests indicate the better residue's properties than natural sand for concrete production.

Keywords: Marble powder. Aggregate. Sustainable development.

Introdução

A humanidade sempre dependeu dos recursos minerais para sua sobrevivência. Segundo Buest (2006), as pedras inicialmente eram empregadas mantendo as características naturais, na forma de seixos rolados e de lascas encontradas na natureza, e posteriormente foram modificadas, passando a ser utilizadas como instrumentos de guerra e produzindo fogo mediante atrito.

A construção civil é um dos maiores consumidores de matérias-primas naturais. No Brasil, a demanda de agregados vem aumentando ano a ano. De acordo com John (2000), o consumo estimado de agregados naturais, somente na produção de concretos e de argamassas, era, no ano 2000, de aproximadamente 220 milhões de toneladas. Em 2006, Buest (2006) menciona que o consumo chega a 395 milhões de toneladas.

Atualmente, grande parte dos processos com atividade econômica é fonte geradora de resíduos, causando considerável degradação ambiental e desconsiderando, muitas vezes, o desenvolvimento sustentável do ambiente construído. Sendo assim, o desafio atual centra-se no aproveitamento racional dos resíduos provenientes dos processos industriais. Dentro desse contexto, a construção civil surgiu como o setor tecnológico mais indicado para absorver os resíduos sólidos, devido ao grande volume de recursos consumidos.

A indústria da construção civil busca, de maneira constante e insistente, materiais alternativos oriundos de subprodutos que venham a atender à redução de custos, à agilidade de execução, à durabilidade e à melhoria das propriedades do produto final, visando, principalmente, à redução da extração de materiais naturais mediante o emprego de resíduos recicláveis, solucionando, também, os problemas de estocagem do material.

No que se refere a grande parte do agregado miúdo natural (areia), que é extraída de leitos de rios, é responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente. Órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), vêm coibindo essa extração. Dentro desse contexto, os mineradores são forçados a extrair esses agregados em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que aumenta o preço final do produto.

Constata-se, no meio técnico e científico, um incremento de estudos que visam obter alternativas para a substituição total do agregado miúdo natural (AMN), fazendo frente a essa escassez crescente

de oferta e do decorrente aumento do seu preço no mercado.

Duas alternativas de substituição são objeto de estudo neste trabalho. A primeira delas são retalhos e sobras de mármore, passíveis de serem britados, aqui denominados de rejeitos de mármore triturado (RMT); a segunda, a utilização de rocha de gnaiss triturada (RGT), ambas analisadas experimentalmente em concreto fresco e endurecido, a fim de contribuir com o meio técnico no que se refere ao uso de agregados miúdos britados para a produção de concreto.

A utilização desses rejeitos resulta em benefícios para o meio ambiente e numa maior lucratividade para as empresas produtoras, uma vez que o material retirado das jazidas passa a ser reaproveitado, reduzindo as perdas do processo e fornecendo uma alternativa para o mercado.

Estudo da areia artificial como agregado miúdo

Procedimentos Experimentais

A viabilidade técnica do emprego de areia artificial na produção de concretos foi verificada através do estudo de suas propriedades físicas e mecânicas, tais como trabalhabilidade, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e absorção por imersão.

Neste estudo, além da mistura de referência, utilizado areia natural de rio (AMN), formulou-se duas novas misturas: a primeira substitui a areia natural por RMT, com a mesma distribuição granulométrica do AMN, tal procedimento foi possível devido a grande variabilidade de faixas granulométricas resultantes da britagem da rocha e, a segunda, substitui AMN por RGT.

A dosagem do concreto de referência baseou-se no método desenvolvido pelo IPT/EPUSP, sendo fixado um teor de argamassa seca ideal igual a 50% e um abatimento do tronco de cone de aproximadamente (70 ± 10) mm. Sendo assim, o traço adotado neste estudo é igual a 1:1,83:2,83:0,50 (cimento: agregado miúdo: agregado graúdo: fator água/cimento), estimando-se uma resistência à compressão axial mínima aos 28 dias de idade igual a 20 MPa.

Salienta-se, ainda, que a mistura dos materiais constituintes do concreto foi realizada em uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 30 litros, sendo os corpos-de-prova (empregados no estudo) moldados numa única vez, a fim de

minimizar variações nas características dos materiais e as condições de laboratório.

Na confecção do corpo-de-prova procedeu-se a uma prévia remistura da massa de concreto para garantir a sua uniformidade. A colocação do concreto nas formas, bem como o adensamento, foi realizada manualmente pelo mesmo operador.

Após o adensamento dos corpos-de-prova, nivelou-se a sua superfície com o auxílio de uma colher de pedreiro e, em seguida, cobriu-se a face exposta com sacos de anagem úmidos por um período de 24 horas, quando, então, efetuou-se a desmoldagem (realizada com todo o cuidado para não danificar os corpos-de-prova). Em seguida, foram armazenados em câmara úmida, com procedimento de cura submerso, sendo retirados da água um dia antes do ensaio, para a amostra secar em temperatura ambiente. O objetivo desse procedimento é evitar a fissuração prematura do concreto.

Nos concretos com emprego de RMT e RGT, utilizou-se o mesmo traço, com a simples substituição do agregado miúdo, a fim de avaliar o material no que se refere a trabalhabilidade, resistência à compressão axial, absorção por imersão e módulo de elasticidade.

Cumprido esclarecer que se confeccionaram 8 corpos-de-prova cilíndricos para cada mistura e para cada tipo de ensaio a ser realizado, sendo avaliada a resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias, sendo adotados os procedimentos de moldagem, adensamento e cura prescritos na normalização brasileira.

Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial foi avaliada, de acordo com a normalização brasileira NBR 5739 (ABNT, 1994), em corpos-de-prova cilíndricos de dimensão igual: 100 mm x 200 mm (diâmetro x altura). Após a cura dos corpos-de-prova e estabelecida a idade do rompimento, efetuou-se, em posição perfeitamente perpendicular ao eixo longitudinal do corpo-de-prova cilíndrico, o remate com enxofre. A resistência à compressão axial é dada pela expressão (1):

$$f_c = \frac{F}{A}, \quad (1)$$

onde:

f_c – resistência à compressão axial (MPa);

F – força máxima obtida no ensaio (N); e

A – área da seção transversal do corpo-de-prova (mm^2).

A força de ensaio foi aplicada continuamente e sem choques, com velocidade de carregamento de

0,3 MPa/s a 0,8 MPa/s, sendo a força de ruptura verificada em quilograma-força por centímetro quadrado e transformada em megapascal.

$$f_c = \frac{F}{A}$$

Absorção de água por imersão

Este ensaio foi executado a frio, de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 1987), em corpos-de-prova cilíndricos de dimensão igual (100 mm x 200 mm (diâmetro x altura)), com um tempo de permanência igual a 72 horas, sendo a absorção obtida por meio da expressão (2).

$$A_i = \frac{m_a - m_b}{m_b} \times 100, \quad (2)$$

onde:

A_i – absorção de água por imersão (%);

m_b – massa do corpo-de-prova seco em estufa (g); e

m_a – massa do corpo-de-prova imerso em água por 72 horas (g).

Módulo de elasticidade

Os ensaios foram realizados, em conformidade com a norma brasileira NBR 8522 (ABNT, 2003), em corpos-de-prova cilíndricos de dimensão igual (150 mm de diâmetro x 300 mm de altura), determinando-se o módulo de elasticidade, sob carregamento estático, à compressão axial simples, sendo aplicado um carregamento crescente à velocidade de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s, até alcançar uma tensão (σ_b) de aproximadamente 30% da resistência à compressão do concreto (f_{cm}).

Esse nível de tensão foi mantido por 60 segundos. Em seguida, reduziu-se a carga à mesma velocidade do processo de carregamento até o nível da tensão básica (σ_a), que corresponde a 0,5 MPa. Realizaram-se mais dois ciclos de carga e descarga, alternadamente, durante períodos de 60 segundos cada; depois do último ciclo de pré-carga e após 60 segundos sob a tensão σ_a , registrou-se a deformação específica ε_a . Carregou-se novamente o corpo-de-prova com tensão σ_b e, após uma espera de 60 segundos, foi registrada a deformação ε_b . O módulo de elasticidade foi calculado segundo a expressão (3).

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \times 10^3, \quad (3)$$

onde:

E_{ci} – módulo de elasticidade (GPa);

σ_b – tensão maior, 0,3 f_{cm} (MPa);

σ_a – tensão básica, 0,5 MPa (MPa);

ϵ_b – deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão maior; e

ϵ_a – deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados sob a tensão básica.

Materiais Empregados

No desenvolvimento desta pesquisa empregaram-se três tipos de materiais, a saber: matérias-primas convencionais (areia de rio) (AMN), rochas de gnaiss trituradas (RGT) e rejeitos de mármore triturados (RMT), cujas características passam a ser apresentadas.

Caracterização do Rejeito de Mármore Triturado (RMT)

O RMT foi fornecido pela empresa “M”, localizada na cidade de Mar de Espanha, Estado de Minas Gerais, que utiliza apenas mármore em seu

processo de beneficiamento. Nessa empresa, os cacos de mármore, após a lavagem e secagem, são encaminhados a um britador de mandíbulas, obtendo-se um diâmetro médio de 9,5 mm; posteriormente são encaminhados para um moinho de bolas cilíndrico, horizontal, com esferas de aço, por um período igual a 10 minutos, e, finalmente, são peneirados mecanicamente e ensacados por fração granulométrica, segundo requisitos da normalização brasileira NBR NM 248 (ABNT, 2003). A Figura 1 apresenta os grãos de RMT, onde se verifica que não apresentam forma irregular, angulosa e estrutura cristalina.

O conhecimento das características químicas é de fundamental importância para a avaliação do resíduo, conforme ilustrado na Tabela 1.

Para uma melhor identificação da rocha que compõe o RMT, realizou-se a descrição petrográfica, com a composição mineralógica. A Tabela 2 ilustra a análise petrográfica do RMT.

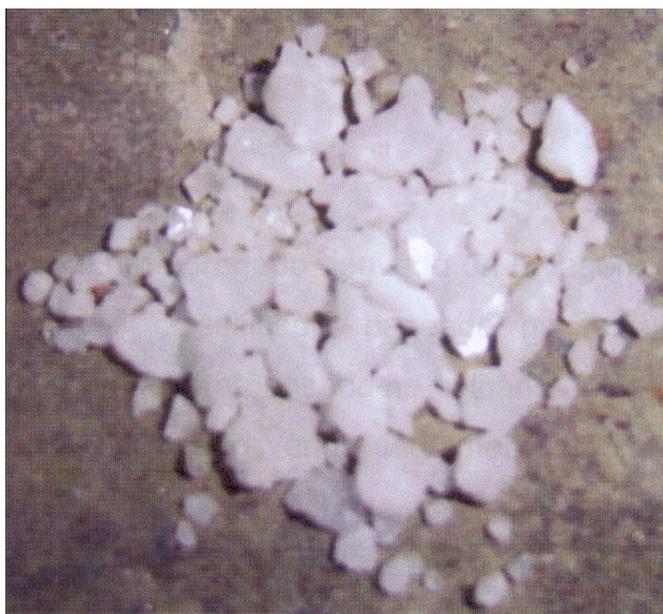


Figura 1 - Grãos do RMT

Composição Química do RMT	
Principais Elementos	Teor (%)
Ca	18,1
Mg	12,9
CaO	25,4
MgO	7,8

Classificação: Magnesiano

Tabela 1 - Análise química do RMT

Descrição Petrográfica do RMT		
Mineral	Formulação Química	Porcentagem
Carbonato	(CaCO ₃) ou (CaMg(CO ₃) ₂)	95%
Olivina – Fosterita	(Mg ₂ SiO ₄)	3%
Clorita – Mg	(Mg ₁₂ [(Si ₂ Al) ₈ O ₂₀](OH) ₁₆)	*
Serpentina	Mg ₃ [Si ₂ O ₅](OH) ₄	*
Anfibólio – Tremolita	[Ca ₂ Mg ₅ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂]	*

* A porcentagem dos três minerais juntos chega a 2% da lâmina.

Tabela 2 - Análise petrográfica do RMT

No que se refere ao carbonato (vide Tabela 2) poderá ser tanto calcita (CaCO₃) quanto dolomita (CaMg(CO₃)₂), não sendo possível distinguir em lâmina delgada, mas somente por outros métodos, como geoquímica ou difração de raios X. Porém, por meio da paragênese mineral, é provável que a lâmina apresente dolomita (MgCaCO₃), pois no sistema apresenta minerais ricos em magnésio, como a olivina (Mg₂SiO₄) e a tremolita [Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂].

A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica do RMT, e a Tabela 3 apresenta a caracterização física do agregado.

Agregado Miúdo Natural (AMN)

Empregou-se uma areia natural quartzosa (Tabela 3), proveniente do leito do rio do Peixe, localizado na cidade de Juiz de Fora (MG). Os AMN apresentam partículas com formas visualmente mais arredondadas e também com textura mais lisa que os RMT. A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica do AMN.

Rocha de Gnaisse Triturada (RGT)

O RGT, de origem gnáissica (Tabela 3), foi fornecido pela empresa “P”, situada na cidade de Matias Barbosa, MG. A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica do RGT.

Agregado Graúdo

O agregado graúdo empregado na confecção do concreto, de origem gnáissica, foi oriundo da

pedreira “P”, situada na cidade de Matias Barbosa, MG (Tabela 3).

Cimento

No programa experimental utilizou-se o cimento Portland composto com escória do tipo CPII – E – 32, em conformidade com a NBR 11578 (ABNT, 1991), fabricado pela Holcim do Brasil.

Água

Empregou-se água potável proveniente da rede de abastecimento de Juiz de Fora, MG.

Apresentação e discussão dos resultados

Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto é a propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto fresco com uma perda mínima de homogeneidade, sendo composta de pelo menos dois componentes principais: a fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade; e a coesão, que representa a resistência à exsudação ou à segregação.

A trabalhabilidade dos concretos foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*), conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998). A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

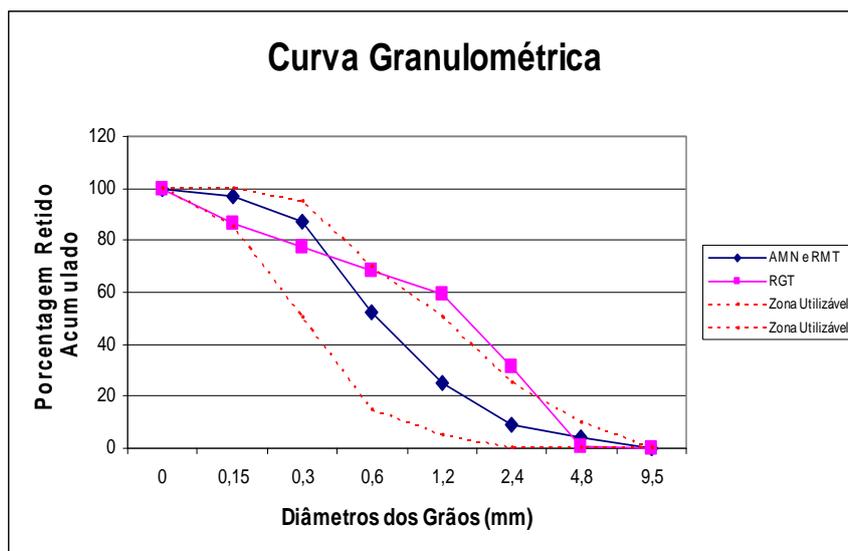


Figura 2 - Grãos do RMT

Propriedades	AMN	RMT	RGT	Agregado Graúdo
Diâmetro característico máximo (mm)	4,80	4,80	4,80	25,0
Classificação granulométrica (segundo a NBR 7211:2005)	Zona utilizável	Zona utilizável	Fora de graduação	Graduação 1
Módulo de finura	2,75	2,75	3,23	6,53
Massa específica real (kg/dm ³)	2,62	2,91	2,70	2,70
Massa específica aparente (kg/dm ³)	1,46	1,74	1,71	1,36
Teor de material pulverulento (%)	0,60	5,0	14,50	0,20
Impureza Orgânica (p.p.m.)	<300	<300	<300	<300
Torrões de argila (%)	Isento	Isento	Isento	Isento
Absorção de água (%)	3,16	1,27	2,37	***

Tabela 3 - Características dos agregados

Tipo de agregado	100% de RGT	100% de AMN	100% de RMT
Slump	50 mm	80 mm	140 mm

Tabela 4 - Consistência dos concretos estudados

Analisando a Tabela 4, constata-se que o emprego do RMT na confecção dos concretos resultou num incremento da trabalhabilidade da mistura, sem desagregação ou exsudação excessiva dela. Tal comportamento é atribuído, principalmente, à baixa porosidade e absorção dos grãos de RMT, ou seja, como se verifica na Tabela 3, a massa específica aparente do RMT é superior à do AMN, que conduz a uma redução da porosidade do RMT. Constatase, também, que o RMT apresenta menor absorção de água que o AMN; em virtude disso, o agregado não absorve parte da água de

amassamento e, conseqüentemente, a consistência tende a ser mais fluida (NEVILLE, 1997).

Ao contrário do exposto acima, o emprego do RGT reduz a trabalhabilidade da mistura, o que é comprovado através da dificuldade de homogeneização da mistura, devido ao efeito das pequenas partículas do agregado miúdo artificial, visto que esse agregado possui maior teor de material pulverulento, cerca de 14,50% (Tabela 3). Esse comportamento é esperado, pois todo material com excesso de finos ocasiona esse efeito.

Ensaio de Densidade de Massa no Estado Endurecido

A Tabela 5 apresenta os resultados médios da densidade de massa no estado endurecido em corpos-de-prova cilíndricos com dimensão igual a 100 mm x 200 mm (diâmetro x altura) aos 120 dias de idade, conforme prescrito na norma NBR 13280 (ABNT, 1995).

Constata-se que, com a adição de RMT, aumenta-se a densidade de massa, devido aos grãos de RMT serem inertes e com baixa absorção de água (Tabela 3), o que resulta numa redução de perda de água adsorvida às partículas no estado fresco, ocasionando, assim, o aumento da densidade de massa no estado endurecido.

As misturas produzidas com RGT (maior teor de material pulverulento) apresentaram maior densidade de massa em relação ao concreto de referência (100% de AMN), demonstrando que, além de os grãos de RGT possuírem maior massa específica do que os da areia natural, possivelmente, o acréscimo no teor de finos aumenta o grau de empacotamento do conjunto agregado e aglomerante, conforme foi constatado por Silva et al. (2005). Salienta-se que o empacotamento está relacionado com a correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e assim sucessivamente.

Resistência à Compressão Axial

Encontra-se na Tabela 6 o valor médio obtido em 8 corpos-de-prova com o respectivo coeficiente de

variação (CV) das amostras empregadas no estudo do efeito da adição de RMT e RGT. Salienta-se que o coeficiente de variação é uma análise estatística preliminar, com o qual se avalia a variabilidade dos resultados de um experimento. Em geral, se seu valor for inferior a 25%, a amostra é aceita.

Analisando a Tabela 6, verifica-se que os traços de concreto que contêm agregados miúdos triturados atingem maiores resistências, destacando-se o concreto com RMT, com maiores resistências em relação aos demais. Tal fato é atribuído à baixa porosidade do RMT (absorção de água baixa), pois, de acordo com Buest (2006), a porosidade do agregado poderá afetar a resistência à compressão do concreto. Neville (1997) salienta que a influência do agregado na resistência do concreto é proveniente da resistência mecânica do agregado e, também, de sua absorção e de sua aderência.

Numa análise mais detalhada verificou-se que a variável idade, analisada isoladamente, apresenta influência significativa, de forma que para as idades avaliadas os concretos apresentaram ganho médio de 57% de 3 para 28 dias. Na idade de 28 dias, constata-se um aumento médio na resistência de 9% para os concretos fabricados com RGT e de 14% para os confeccionados com RMT, quando comparados à mistura de referência (AMN).

Por meio da ANOVA comprovou-se a significância estatística das variáveis relacionadas, a saber: tipo de agregado e idade do ensaio. A Tabela 7 apresenta a análise de influência dos fatores e suas possíveis interações, pela qual se conclui que o tipo de agregado provoca aumentos significativos na resistência à compressão axial ao longo do tempo.

Tipo de agregado	100% de AMN	100% de RGT	100% de RMT
Densidade (g/cm ³)	2,24	2,33	2,37

Tabela 5 - Densidade de massa no estado endurecido

Tipo de agregado	Idade do ensaio					
	3 dias		7 dias		28 dias	
	fcm	CV (%)	fcm	CV (%)	fcm	CV (%)
100% de AMN	15,48	2,40	20,62	6,15	25,83	5,83
100% de RGT	15,05	7,17	23,20	2,70	28,07	1,55
100% de RMT	17,33	2,16	23,26	2,26	29,52	0,34

Tabela 6 - Resistência à compressão axial do concreto (MPa)

Fator	F_{calc}	F_{0,05}	Significância
Tipo de adição	38,29	3,06	Sim
Idade	71,08	4,26	Sim
Tipo de adição x Idade	131,25	6,94	Sim

F_{calc} – Valor de F calculado

F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%

Tabela 7 - Resultados da ANOVA em relação à resistência à compressão axial dos concretos

Absorção por Imersão

A absorção por imersão é um importante parâmetro, devido à sua relação com elementos agressivos que podem causar danos ao concreto. Para efeito prático, é a absorção da parte externa do concreto (que protege a armadura) que apresenta maior interesse. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 8, efetuou-se a ANOVA para verificação da influência do tipo de agregado na absorção por imersão, cujos valores encontram-se na Tabela 9 e comprovam um efeito significativo desse parâmetro.

Constata-se, através dos dados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão, uma tendência ao decréscimo da massa de água absorvida e, como consequência, uma redução da absorção por imersão com o emprego do RMT em até 15%, quando comparado aos concretos que empregaram o agregado miúdo natural (AMN). Todavia, ocorreu o oposto nos concretos com adição de

RGT, que apresentaram aumento de até 24,80% na absorção em relação ao concreto de referência (AMN).

Módulo de Elasticidade

O conhecimento do módulo de elasticidade é fundamental na análise das deformações elásticas ou viscoelásticas das estruturas de concreto. Ele é definido como sendo a relação entre a tensão e a deformação no regime elástico. O projeto estrutural baseia-se no fato de que ele representa a tensão máxima permissível que o material pode suportar sem sofrer deformações permanentes, sendo uma expressão da rigidez do concreto no estado endurecido. A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

Com relação ao módulo de deformação, a partir dos resultados apresentados na Tabela 10, foi realizada a ANOVA para verificar se existe influência significativa do tipo de agregado. A Tabela 11 comprova o efeito significativo desse fator.

Misturas	Absorção por imersão aos 28 dias de idade (%)	Coefficiente de variação (%)
100% de AMN	6,21	8,66
100% de RGT	7,58	6,22
100% de RMT	5,40	2,08

Tabela 8 - Resultados obtidos nos ensaios de absorção por imersão

Fator	F_{calc}	F_{0,05}	Significância
Tipo de adição	20,62	5,14	Sim

Tabela 9 - Resultados da ANOVA em relação à absorção por imersão dos concretos avaliados

Tipo de agregado	Módulo de elasticidade (GPa)	Coefficiente de variação (%)
100% de AMN	27,89	1,11
100% de RGT	26,47	4,44
100% de RMT	47,81	0,90

Tabela 10 - Resultados obtidos nos ensaios de módulo de elasticidade

Fator	F _{calc}	F _{0,05}	Significância
Tipo de adição	770,62	5,14	Sim

Tabela 11 - Resultados da ANOVA em relação ao módulo de deformação dos concretos avaliados

Com base nos resultados, observa-se um aumento significativo do módulo de elasticidade com o emprego do RMT; os concretos apresentam um ganho médio de 71% nas misturas em relação ao concreto de referência. Os AMN apresentam partículas com formas visualmente mais arredondadas e também com textura mais lisa que os RMT. Isso tende a proporcionar maior formação de microfissuras entre agregado e pasta do que os RMT durante a realização do ensaio, reduzindo os valores do módulo de elasticidade.

Verificou-se, também, nos resultados obtidos, que os concretos com o emprego de RGT foram ligeiramente inferiores ao de referência. Os RGT propiciam maior volume de pasta devido à maior presença de material pulverulento que o RMT, favorecendo a porosidade da zona de transição, com maior índice de vazios, e a ocorrência de microfissuras na interface pasta/agregado, reduzindo, portanto, o módulo de elasticidade.

Considerações finais

A partir dos resultados obtidos, conclui-se:

- (a) a utilização de rejeitos de mármore triturado (RMT) e de rochas de gnaiss triturada (RGT) como agregados miúdos em concretos estruturais apresenta indicadores para a busca de alternativas técnicas, necessárias devido às restrições ambientais na exploração dos agregados miúdos naturais (AMN);
- (b) as misturas de concreto com adição do RMT apresentaram um incremento na trabalhabilidade, sem desagregação ou exsudação excessiva dele. Tal comportamento deve-se, principalmente, à baixa porosidade e absorção de água dos grãos do RMT. Em virtude disso, o agregado não absorve parte da água de amassamento e, conseqüentemente, a consistência tende a ser mais fluida;
- (c) o emprego do RGT resulta numa diminuição da trabalhabilidade da mistura. Esse fato é comprovado pela dificuldade de homogeneização da mistura, devido ao efeito das pequenas partículas do agregado miúdo artificial, difundidas nela, visto que esse agregado possui maior teor de material pulverulento do que os demais agregados estudados;
- (d) constatou-se que as misturas com RMT apresentaram maior densidade de massa no estado endurecido que as demais. Como os grãos de RMT

são materiais inertes com baixa absorção de água, ocorre uma diminuição de perda de água, que fica adsorvida às partículas no estado fresco, ocasionando, assim, o aumento da densidade de massa no estado endurecido;

- (e) as misturas produzidas com RGT (maior teor de material pulverulento) apresentaram-se com maior densidade de massa em relação ao concreto de referência (100% de AMN). Esse resultado demonstra que, além de os grãos de RGT possuírem maior massa específica do que a areia natural, possivelmente, o aumento dos teores de finos aumenta o grau de empacotamento do conjunto agregado/aglomerante;
- (f) os traços contendo agregados miúdos triturados atingiram maiores resistências, destacando-se as misturas confeccionadas com o RMT, por possuírem maior densidade de massa no estado endurecido e, conseqüentemente, menor teor de ar aprisionado;
- (g) os valores da resistência à compressão axial tendem a aumentar com o emprego do RGT e do RMT, resultando em valores iguais a 9% e 14% respectivamente, superiores aos do concreto de referência;
- (h) a absorção de água apresenta decréscimo de 15% com a incorporação do RMT em substituição ao AMN, devido à sua baixa absorção de água;
- (i) nos concretos com RGT a absorção de água aumentou 21% em relação ao concreto com AMN;
- (j) analisando os resultados, observa-se que os concretos com RMT apresentam maior módulo de elasticidade que os concretos com AMN e que os concretos confeccionados com RGT não apresentam aumentos significativos em relação ao concreto de referência;
- (k) os agregados miúdos naturais apresentam partículas com formas visualmente mais arredondadas e, também, com textura mais lisa que os RMT. Tal fato tende a proporcionar maior formação de microfissuras entre agregado e pasta, reduzindo os valores do módulo de elasticidade;
- (l) verifica-se que, quanto maior a área específica do agregado, menor o módulo de elasticidade, como nos concretos confeccionados com RGT;
- (m) em virtude do uso do RMT, melhorando-se a trabalhabilidade do concreto, é possível reduzir o fator água/cimento, o que conduzirá a um aumento das resistências; e, finalmente,

(n) face á variedade de intervalos granulométricos disponíveis do RMT (resíduo de mármore triturado), o rejeito poderá substituir com vantagens (superiores) o agregado miúdo natural.

Referências

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** – Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522** – Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778** – Massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578** – Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67** – Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** – Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BUEST NETO, G. T. **Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na Construção Civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

McGEARY, R. K. Mechanical packing of spherical particles. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 44, p. 513-522, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador Giammusso. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

SILVA, N. G. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, N. G.; BUEST, G. T.; CAMPITELI, V. C. A influência do *filler* de areia britada de rocha calcária nas propriedades da argamassa de revestimento. In: SEMINÁRIO: O USO DA FRAÇÃO FINA DA BRITAGEM, 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP. p. 1-12.

Agradecimentos

Nossos sinceros agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pelo apoio financeiro, e à HOLCIM do Brasil, pelo apoio técnico.