Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

EFEITOS DO USO DE AGREGADO MIÚDO ARTIFICIAL COM MATERIAL PULVERULENTO NO CONCRETO FRENTE A SUA IMPORTÂNCIA NA SUSTENTABILIDADE DA CONSTRUÇÃO E DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

C. CADILHE DE OLIVEIRA
Engenheiro Civil
Universidade Federal do Paraná
PR; Brasil
caio.cadilhe@gmail.com

H. FUGANTI CAMPOS
Engenheira civil
Universidade Federal do Paraná
PR; Brasil
helo_camposs@hotmail.com

J. L. MARQUES
Engenheiro Civil
Universidade Federal do Paraná
PR; Brasil
zejlsm@gmail.com

J. MARQUES FILHO
Engenheiro Civil
Universidade Federal do Paraná
PR; Brasil
jmarquesfilho@gmail.com

RESUMO

A extração de areia natural é responsável pela retirada de cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente, o que dificulta também a obtenção de licenças ambientais para o aproveitamento de novas jazidas. Nesse contexto, a substituição da areia natural pela areia artificial aparece como alternativa atraente. A lavagem desse material, a fim de diminuir a quantidade de finos presentes nos agregados, gera pó de pedra, material passante na peneira #200 (0,075 mm), que é estocado ao ar livre. O assoreamento destes corpos d'água é um agravante antieconômico ao processo produtivo. Aproveitar o pó retirado das jazidas, além de trazer maior lucratividade às empresas, traz benefícios ao meio ambiente. Diversas pesquisas buscam analisar os pontos positivos e negativos do uso destes finos de britagem em concretos, nesse cenário, o objetivo principal do presente trabalho é contribuir com informações sobre os efeitos do uso do agregado miúdo artificial com material pulverulento no concreto, frente a sua importância na sustentabilidade da construção e durabilidade das estruturas. A utilização da areia artificial com elevado teor de material pulverulento mostrou-se viável economicamente, tecnicamente e ambientalmente, já que pode reduzir o consumo de cimento, aumentar a durabilidade e resistência, além de contribuir com a preservação de mananciais e a utilização de rejeitos. A sua utilização apresenta ganhos nas características tanto no estado fresco quanto no estado endurecido do concreto. No que se refere à durabilidade das estruturas de concreto, nos casos em que foram utilizados aditivos plastificantes para combater o aumento da demanda d'água, houve redução da porosidade diminuindo, por consequência, tanto a permeabilidade quanto a carbonatação.

Palavras-chave: agregado pulverulento, sustentabilidade, manifestações patológicas, propriedades mecânicas, durabilidade.

ABSTRACT

The extraction of natural sand is responsible for the removal of vegetation, degradation of waterways and considerable damage to the environment, which also makes it difficult to obtain environmental permits for exploitation of new deposits. In this context the replacement of natural sand by artificial sand appears as an attractive alternative. The washing of this material in order to decrease the amount of fines present in the aggregates, generates rock dust, characterized by passing the material in # 200 sieve (0.075 mm), which is stored outdoors. Siltation of these water bodies is an uneconomical aggravating to production. The use of the powder removed from the deposits may be associated with greater profitability for companies, and benefits to the environment. Several studies seek to analyze the pros and cons of using these crushing fines in concrete, due to the increased aging of existing buildings detected in recent years. The main objective of this study is to contribute with information about the effects of using this fine aggregate artificial with powdery material in the concrete considering its importance in sustainable construction and durability of concrete structures. The use of artificial sands with high pulverulent material content in this study proved

to be economically viable, both technically and environmentally, since it can reduce the consumption of cement, increase durability and resistance and contribute to reduced use of natural sands and of the crushing process waste. Its use presents earnings on the characteristics in both fresh and hardened state of the concrete. As regards to the durability of concrete structures, where plasticizing additives have been used to combat the increasing demand of water, there was a decrease in porosity, thus reducing, consequently, both the permeability and the carbonation.

Keywords: stone powder, sustainability, pathological, mechanical properties, durability.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material imprescindível para o progresso da civilização e hoje é um dos materiais mais utilizados na construção civil [1]. Segundo avaliação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) é o segundo material mais consumido pela humanidade, em média 3400 kg/habitante por ano, com base na produção mundial de cimento divulgada pelo Cembureau.

Apesar da sua facilidade de moldagem, execução relativamente barata e grandes resistências, se não houver controle adequado nas suas etapas de produção, transporte e execução, o concreto poderá deteriorar-se rapidamente. Existem diversas maneiras de degradação do concreto e, para viabilizar sua durabilidade preconizada por normas, deve-se atentar às possibilidades e técnicas existestes para evitá-la. Ainda é necessário o desenvolvimento de novas pesquisas a fim de avaliar outras possibilidades de aumentar a vida útil da estrutura e facilitar eventuais intervenções.

Tendo em vista que no mínimo três quartos do volume do concreto são compostos por agregados, torna-se explícito que o seu consumo e que a sua qualidade seja de considerável importância [2]. Particularmente quanto à areia natural, a destruição descontrolada de áreas protegidas e o desperdício de matérias primas levam à necessidade de licenciamento ambiental de fornecedores e o controle direto da origem das cargas, a fim de caminhar a favor da produção sustentável do concreto. Como alternativa, a substituição da areia natural pela artificial leva à redução dos impactos ambientais e à redução do custo da matéria prima. A produção de areia artificial é realizada no canteiro das pedreiras, próximas aos grandes centros consumidores, o que reduz o valor do frete e a utilização de combustíveis para transporte.

Desde a década de 80, com o despertar da consciência ecológica, experiências têm sido realizadas em vários países para descobrir alternativas técnicas de aproveitamento e utilização de resíduos. Dentre os resíduos da construção civil, na produção dos agregados graúdos e miúdos, encontra-se o pó de pedra, material que, em grande parte, é retirado por processo de lavagem seca ou úmida para reduzir a quantidade de finos presentes nos agregados e respeitar os limites das normas técnicas. São estimados mais de 4 bilhões de toneladas deste material, estocados anualmente nos EUA [3].

Nos últimos anos tem crescido o número de estruturas de concreto armado apresentando diversas manifestações patológicas, como resultado do envelhecimento precoce das construções existentes [4]. A NBR 6118:2014 [5] cita critérios que permitem aos responsáveis individualizar modelos duráveis para as suas construções, a partir da definição de classes de exposição das estruturas e de seus componentes, em função da deterioração a que estarão submetidas.

Este trabalho tem como objetivo principal contribuir com informações sobre os efeitos do uso do agregado miúdo artificial com material pulverulento no concreto, frente a sua importância na sustentabilidade da construção e durabilidade das estruturas de concreto armado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sustentabilidade na cadeia produtiva do concreto

O setor da construção civil contribui de forma significativa para a poluição ambiental global devido ao consumo de recursos naturais, tanto primários e de energia, bem como a emissão de dióxido de carbono em seu ciclo de vida. A produção mundial anual da indústria do concreto foi cerca de 33 bilhões de toneladas em 2010, sendo quase 3,7 bilhões de toneladas de clínquer de cimento Portland, 27 bilhões de toneladas de agregados, 2,7 bilhões de toneladas de água euma pequena quantidade de aditivos químicos [6]. As emissões de dióxido de carbono (CO_2) associadas a todos os outros materiais utilizados na produção do concreto, geralmente, podem ser negligenciado em relação às do cimento. Considerando a associação bem estabelecida entre as emissões de CO_2 antropogênicas globais e as mudanças ambientais, há uma necessidade social contínua para a redução das mesmas, e a indústria do cimento não vai, certamente, ser dispensada desta obrigação.

A emissão de CO_2 durante a produção do cimento deve-se ao consumo de combustíveis fósseis e à decomposição do calcário, já que este é constituído de 44% de CO_2 [7]. Entre 88,6% e 92,2% das emissões de CO_2 ligadas à cadeia de produção do concreto originam-se na produção do cimento [8]. Na indústria nacional, de acordo com o último Relatório

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Anual do Sindicado Nacional de Indústria do Cimento publicado, a emissão de CO_2 do cimento em 2013 foi em torno de 600 $kgCO_2/t$, admitindo que as emissões referentes às adições minerais residuais são nulas. Segundo dados do referido sindicato para 2015, as vendas do cimento acumuladas de janeiro a junho alcançaram 32,3 milhões de toneladas. A produção de cimento Portland envolve geração considerável de CO_2 e representa cerca de 5 e 7% das emissões antropogénicas de CO_2 em todo o mundo [9]. Nesse contexto, a redução das emissões de CO_2 é escopo de diversas pesquisas no meio científico.

No que se refere aos agregados, a energia elétrica envolvida na britagem varia de acordo com detalhes do processo da rocha e das dimensões requeridas, dessa forma não existe uma estimativa nacional consolidada que mostre a faixa de variação das emissões de CO_2. Todavia o CO_2 originado de britagem operada por equipamentos ligados à rede elétrica brasileira é baixo, menos de $100gCO_2/t$, assim, geralmente, os principais impactos associados ao uso de agregados naturais são decorrentes da atividade extrativa, descritos anteriormente [7].

Existem diversas maneiras de amenizar esses impactos. A utilização de materiais que antes eram considerados rejeitos, como é o caso da escória de alto forno, que hoje é utilizada como adição no cimento é uma possibilidade. Outras são, por exemplo, a tomada de devidas providências na qualidade da execução das estruturas de concreto armado para torná-lo mais resistentes às intempéries e, consequentemente, mais duráveis, além disso, é necessário realizar pesquisas para melhorar a efetividade desses dois casos ou mudar a tecnologia de construção utilizada, dentre outras.

Completando o raciocínio anterior, a fim de se reduzir os danos ao meio ambiente e aumentar a durabilidade das estruturas, pode-se: reduzir o consumo de aglomerantes, reduzindo a quantidade de pasta com a otimização do tamanho e graduação dos agregados; utilizar aditivos plastificantes para diminuir o consumo de água e diminuição dos poros da estrutura; diminuir o consumo de clínquer com a substituição por materiais cimentícios ou pozolânicos [10].

Em termos de emissões e diminuição do uso de materiais não renováveis, pode-se focar no uso de concretos de alto desempenho (CAD), onde os materiais constituintes são utilizados de forma mais eficiente. O CAD apresente, em geral, menor permeabilidade, o que o protegerá de infiltrações de agentes nocivos, e altas resistências, diminuindo a seção de pilares, por exemplo, e reduzindo o consumo de concreto [11].

2.2 Durabilidade

Entre as exigências mais comuns e frequentes nas especificações técnicas de concreto estrutural está o requisito de o mesmo atue como barreira física para proteger armaduras de aço contra a corrosão, pois a corrosão de armaduras é considerada por muitos pesquisadores como o mais grave e frequente problema em estruturas de concreto armado. Esse tipo de manisfestação patológica é um problema técnico-econômico, e sua incidência ocasiona um grande desperdício de recursos naturais e um problema de caráter local e mundial [2].

A durabilidade é um conceito que vem se aprimorando ao longo dos anos. Hoje o parâmetro de durabilidade é diferente daquele utilizado a 40 anos atrás. Por exemplo, até o final da década de 80, o principal parâmetro adotado na avaliação da qualidade de um concreto, na maior parte dos casos, foi a resistência à compressão axial. Em função disto, uma degradação mais acelerada está ocorrendo nas estruturas de concreto armado até a época executadas, obrigando, assim, quem trabalha com este material a definir novos parâmetros para garantir a sua qualidade [12].

A seguir estão listadas as principais causas da baixa durabilidade dos concretos existentes, de acordo com os requisitos atuais [13].

- A falta de conhecimento, por parte dos projetistas e construtores, em relação aos processos de degradação, sua origem, mecanismos e evolução;
- O rápido avanço tecnológico no âmbito dos materiais utilizados nas construções, principalmente no que tange aos aglomerantes, adições, agregados e aditivos, na medida em que, sem estarem suficientemente esgotadas as pesquisas sobre a sua influência no comportamento dos concretos e os seus efeitos colaterais;
- A utilização cada vez maior de cimentos especiais, finamente moídos e que por vezes incorporam no seu processo de fabricação diferentes técnicas de queima e diferentes matérias primas;
- A falta de conhecimento por parte daqueles que são os responsáveis pela manutenção e conservação das estruturas.

Uma diretriz geral, encontrada na literatura técnica, ressalta que a durabilidade da estrutura de concreto é função da regra dos quatros C's (4C) [14]:

- Composição ou traço do concreto;
- Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- Cura efetiva do concreto na estrutura;
- Cobrimento das armaduras.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Inicialmente o desenvolvimento tecnologico na indústria do concreto se voltou para a obtenção de resistências à compressão cada vez maiores, na crença de que um concreto resistente é também durável. Porém, resistência e durabildade são conceitos diferentes, embora possam estar entrelaçados em alguns casos, e, portante, devem ser tratados de maneira distinta. É um erro dar mais importância a uma ou à outra [3].
O conceito de durabilidade consiste na vida útil de um material sob as condições ambientais no qual este se apresenta [1]. As condições ambientais são chamadas de agentes de deterioração e a durabilidade é a relação entre esses agentes, com a resposta do material, definindo assim a sua vida útil. A NBR 6118:2014 define durabilidade como a capacidade da estrutura manter-se em condições plenas de utilização durante sua vida útil, não podendo apresentar danos que comprometam em parte ou totalmente o uso para o qual foi projetada. A mesma norma apresenta exigências, determinando que as estruturas devam ser construídas de modo que, sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil. Como vida útil, a norma supracitada, define para estruturas de concreto o período de tempo o qual se mantêm as características das estruturas, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais [6].
Hoje é conhecido que o concreto se deteriora ao longo do tempo, como qualquer material, mas com uma velocidade antes não conhecida e subestimada. A velocidade de deterioração é função das características do material empregado na confecção deste e o meio que o cerca, sendo assim, devem-se obter parâmetros e maneiras de quantifica-la para poder, com segurança, determinar a viabilidade ou não da estrutura a ser construída.
Para melhor entender como o meio pode vir a diminuir a vida útil de uma estrutura, deve-se estudar quais são os mecanismos de deterioração, como eles funcionam e sua consequências para, em seguida, buscar soluções para a mitigação ou desaceleração das manifestações patológicas em busca de estruturas mais duráveis.

2.3 Agregados

Os agregados, pelo seu baixo custo e por não reagirem com a água e, em grande parte, com os aglomerantes, têm sido tratados como materiais inertes de baixo custo, utilizados para o preenchimento na produção do concreto, dispersos por entre a pasta [1]. Além de interferir na resistência do concreto, a escolha errada dos agregados ainda pode comprometer a durabilidade e o desempenho do concreto. Como a relação entre custo dos agregados versus os aglomerantes é diretamente proporcional, quanto mais agregado e menos aglomerantes, melhor. Vale ressaltar que a economia não é a única razão por trás do uso deste: ele confere vantagens técnicas ao concreto providenciando maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade que a pasta de cimento pura [3].

2.3.1 Areia artificial

Em função das grandes distâncias para obtenção de areia natural, seu custo está sendo impactado pelo aumento do valor do transporte. Além disso, o apelo ambiental pela proteção das jazidas naturais e escassez das mesmas, ajudou a criar uma grande demanda pela areia artificial. A areia artificial é considerada um produto alternativo com melhor custo/benefício, em termos de redução de matéria-prima e custo total da obra, justamente porque sua produção pode ser realizada nos canteiros das pedreiras localizadas próximas aos centros urbanos.
Um exemplo cotidiano dessa nova conjuntura é a região sudeste do estado do Paraná, junto ao Rio Paraná, onde devido à escassez de areia natural se torna necessária a produção de areia artificial pela britagem de rochas, normalmente basálticas [15].
A areia artificial ou areia industrial é um produto derivado da rocha que passa por um processamento de britagem até atingir a granulometria desejada. Na maioria dos processos industriais, este produto é conduzido até os equipamentos de lavagem que retiram do produto final os finos excedentes (pó de pedra). Dependendo da sua granulometria a areia artificial possui diversos usos, quais sejam:

- Areia média fina (0,075 – 1,20) mm: Argamassa para levantamento de alvenarias e reboco e serviços em que são utilizadas as argamassas em geral;
- Areia média grossa (0,075 – 4,80) mm: Concretos estruturais confeccionados em obras e pré-fabricados e serviços em que são utilizados os concretos em geral;
- Granilha de 4,80mm com pequena porcentagem de finos (<0,075): Salpique para reboco de alvenarias, asfaltos em geral, blocos pré-fabricados em geral e concretos compactados a rolo.

A areia artificial tende a apresentar menor porcentagem de material de tamanho entre 600 mm e 300 mm, ao mesmo tempo, maior porcentagem de material maior do que 1,18 mm e grandes quantidades de material menor que 150 μm ou 75 μm. Além disso, normalmente a forma é mais angular e lamelar, com textura mais rugosa. Este fato levou nos anos

90 à necessidade de composição com uma areia natural em teor que pode variar de acordo com aplicação do concreto. A granulometria do agregado artificial é determinada principalmente pelo equipamento de britagem utilizado [3].
Uma das dificuldades encontradas na utilização de areia artificial está no resíduo conhecido como pó de pedra, gerado no processo de beneficiamento de rochas para a produção de agregados graúdos. Estes finos (pó de pedra) representam, em massa, cerca de 20% do material processado nas pedreiras. Como o seu aproveitamento é, ainda, limitado, acabam por serem estocados em pilhas nos pátios das pedreiras, poluindo a paisagem, gerando impactos ambientais, obstrução de canais de drenagem, geração de poeira nas operações de britagem e formação de pilhas [16].
Damo (2011) relacionou as dife'renças entre o teor de material pulverulento original da britagem e este material lavado, para diversos tipos de britadores e rochas. Esta comparação está apresentado no Quadro 1 [17].

Quadro 1 - Teores de material pulverulento: areia lavada e não lavada com diferentes tipos de britadores

Areia	Teor de material pulverulento (%) NBR NM 46:2003	
	Original	Lavada
Calcário CONE	21,00	9,81
Calcário VSI	23,60	9,75
Basalto CONE	18,44	9,08
Basalto VSI	14,15	9,32
Gnaisse CONE	14,31	9,75
Gnaisse VSI	15,32	8,79
Granito CONE	13,38	8,67
Granito VSI	10,84	8,58

Fonte: Damo (2011)

Bastos (2003) estudou a substituição da areia natural por artificial de origem basáltica com baixos teores de material pulverulento (em torno de 3%) em concretos. O autor utilizou dois traços, sendo suas composições com 15%, 30%, 50% e 70% em substituição da areia natural. O estudo demonstrou que para 70% de substituição, a relação água/cimento (A/C) foi reduzida em 13% para o primeiro traço e em 23% para o segundo. Isso foi possível pela utilização de aditivos plastificantes para manter o abatimento. O autor concluiu que quanto maior o teor de substituição, maiores as resistências à compressão axial. Nos teores de 70% em substituição, houve aumento de 56% no primeiro traço e 13% no segundo, para 28 dias. Quanto à durabilidade, a substituição gerou uma diminuição na absorção de água, reduzindo a permeabilidade e a carbonatação [18]. Os consumos de cimento aumentaram na medida em que a substituição aumentou, o que, segundo o autor, se deve à necessidade de compensar a falta de finos das misturas. Os resultados de compressão e carbonatação dos traços estudados estão nos Quadros 2 e 3, sendo AN agregado natural, AA agregado artificial, B1 agregado graúdo e Ad aditivo plastificante:

Quadro 2 - Resultados das resistências à compressão dos traços de concreto

1 – Traço unitário em massa – 1 : 2,034 : 3,022				
Mistura N°	Composição	Água/cimento	Tensão com 7 dias (MPa)	Tensão com 28 dias (MPa)
01	AN+B_1	0,52	22,28	27,89
02	AN+ B_1+Ad	0,50	25,66	34,12
03	85%AN+15%AA+ B_1+ Ad	0,49	32,85	38,71
04	70%AN+30%AA+ B_1+ Ad	0,47	33,55	46,47
05	50%AN+50%AA+ B_1+ Ad	0,46	34,34	43,29
06	30%AN+70%AA+ B_1+ Ad	0,46	34,38	53,09
2 – Traço unitário em massa – 1 : 3,220 : 4,220				
Mistura N°	Composição	Água/cimento	Tensão com 7 dias (MPa)	Tensão com 28 dias (MPa)
07	AN+B_1	0,74	15,79	22,79
08	AN+ B_1+Ad	0,68	20,44	25,90
09	85%AN+15%AA+ B_1+ Ad	0,64	19,87	26,63
10	70%AN+30%AA+ B_1+ Ad	0,63	18,14	24,13
11	50%AN+50%AA+ B_1+ Ad	0,62	19,31	28,57
12	30%AN+70%AA+ B_1+ Ad	0,602	20,44	29,16

AN = areia natural, B_1 = brita 1, AA = areia artificial, Ad = aditivo.

Fonte: Bastos (2002)

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Quadro 3 - Medidas da profundidade de carbonatação

1 – Traço unitário em massa - 1: 2,034: 3,022			
Mistura N°	Componentes do traço	Médias das medidas em (mm)	
		03 meses	10 meses
01	AN+B_1	2,5	5,3
02	AN+ B_1+Ad	2,0	4,7
03	85%AN+15%AA+ B_1+Ad	1,7	3,7
04	70%AN+30%AA+ B_1+Ad	1,0	-
05	50%AN+50%AA+ B_1+Ad	1,0	2,9
06	30%AN+70%AA+ B_1+Ad	1,0	2,9
2 – Traço unitário em massa - 1: 3,220: 4,220			
Mistura N°	Componentes do traço	Médias das medidas em (mm)	
		03 meses	10 meses
07	AN+B_1	3,1	8,0
08	AN+ B_1+Ad	1,8	7,2
09	85%AN+15%AA+ B_1+Ad	2,5	6,7
10	70%AN+30%AA+ B_1+Ad	1,0	6,9
11	50%AN+50%AA+ B_1+Ad	1,8	6,7
12	30%AN+70%AA+ B_1+Ad	1,0	5,3

Fonte: Bastos (2002)

Em estudo semelhante, Buest Neto (2006) demonstrou que concretos com agregados miúdos artificiais apresentaram maior teor de ar incorporado, maior massa específica e menor exsudação. Os ensaios mecânicos demonstraram que os concretos com agregados britados possuem maior resistência à tração por compressão diametral e a tração na flexão, além de menor módulo de elasticidade do que os convencionais. Quanto à análise do pó de pedra, o estudo experimental constatou que os teores elevados de material possuem influência na consistência dos concretos, quanto maior o teor, maior o consumo de cimento e maior a quantidade de água na mistura, como era o esperado [19].

Viacelli (2012) estudou a viabilidade da utilização de agregados miúdo proveniente da britagem de rocha basáltica, do sudoeste do Paraná. Foi feita a substituição total pelo agregado miúdo natural com três amostras de agregado miúdo britado (com 17,6%, 16,7% e 12,5% de material pulverulento) para abatimento preestabelecido de 10±2 mm e relação a/c de 0,55. O autor verificou a viabilidade técnica e econômica na utilização destes. Como resulados o autor obteve resistências à compressão semelhantes, mas nos concretos feitos com teores de material pulverulento de 17,6% e 16,7% houve aumento significativo do consumo de cimento versus o de 12,5% [20].

Lodi e Prudêncio Junior (2006) identificaram que a substituição parcial de areias de britagem pela areia natural, como agregado miúdo na confecção de concretos e argamassas, reduz a demanda de areia natural e, em decorrência diminui a degradação das áreas de exploração. Os autores também identificaram que a utilização de areias de britagem de origem basáltica, em substituição parcial à areia natural, permite a elaboração de concretos convencionais mais resistentes e mais econômicos [21].

2.3.2 Pó de pedra

O pó de pedra é definido como o material pulverulento gerado na britagem de rochas, passante na peneira nº 200. São parcialmente retirados por lavagem na produção da areia artificial, para se reduzir a quantidade de finos a fim de se respeitar os limites de norma. A extração desse material gera uma lama, que é enviada para lagoas de decantação ou bacias. Assim, as vantagens obtidas pela utilização da areia artificial se esvairiam pela criação deste novo passivo ambiental [20]. Caso o teor do material pulverulento seja mantido em determinados limites, sua utilização pode contribuir para um melhor desempenho do concreto [18].

No Brasil, o uso do pó de pedra se estabeleceu no início da década de 80, com base em estudos realizados em Itaipu, que evidenciaram vantagens tanto técnicas quanto econômicas. Com uma produção de 1.800 t/h de cada uma das linhas de britagem, a produção de rejeitos na lavagem era de 10 a 15 t/h [16]. Nesses estudos foram feitas comparações de resultados entre duas misturas, ambas utilizando agregado lavado e não lavado, abaixo segue o Quadro 4 com a descrição das quantidades em kg/m³ de cada material.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Quadro 4 - Materiais e propriedades com mistura seca

MATERIAIS E PROPRIEDADES COM MISTURA FRESCA		QUANTIDADES (Kg/m³)					
		MISTURA 152 - D04			MISTURA 152 - G02		
		NOMINAL	C/ AREIA LAVADA	C/ AREIA SEM LAVAR	NOMINAL	C/ AREIA LAVADA	C/ AREIA SEM LAVAR
CIMENTO		137	137	137	102	102	102
FLY-ASH		14	14	14	12	12	12
ÁGUA		84	84	84	84	84	84
ADITIVO	INCORPORADOR DE ÁGUA	VAR	0,393	0,997	VAR	0,194	0,274
	PLASTIFICANTE	-	-	0,906	-	-	0,684
AREIA	NATURAL	162	162	162	204	204	204
	ARTIFICIAL	378	378	378	379	379	379
B1 - ϕ_{max} = 19 mm		400	400	400	400	400	400
B2 - ϕ_{max} = 38 mm		329	329	329	329	329	329
B3 - ϕ_{max} = 76 mm		465	465	465	465	465	465
B4 - ϕ_{max} = 152 mm		643	643	643	643	643	645
A/CEQ		0,53	0,53	0,53	0,70	0,70	0,70
SLUMP (cm)		3,5 ±0,5	4,0	3,6	3,5 ±0,5	4,0	4,1
AR INCORPORADO (%)		7,5 ±0,5	8,0	7,2	7,5±0,5	7,7	7,9
DENSIDADE (MIST. PENEIRADA) (Kg/m³)		-	2373	2423	-	2403	2380

Fonte: Andriolo (2005)

Menossi (2004), substituindo em 100% a areia natural por artificial, obteve resultados satisfatórios com percentuais de material pulverulento de 13%. O autor obteve ganhos na resistência à compressão com a relação a/c constante e também, porém menos significativas, com o abatimento constante. O autor constatou que os concretos com 13% de material pulverulento obtiveram ganhos de resistência com tempo superior aos confeccionados com areia natural, ocasionado por um provável efeito pozolânico. Para os concretos com relação a/c constante, houve grande perda de abatimento na medida em que se aumentou o teor de substituição de areia natural por artificial. Nos concretos feitos com 100% areia natural o abatimento foi de aproximadamente 70 mm enquanto que para a substituição total por pó de pedra obteve abatimento de aproximadamente 25 mm. Já nos concretos feitos com abatimento fixado em 60 mm ±5, o acréscimo da relação a/c foi de 16,7% na total substituição [22].

Lodi e Prudêncio Júnior (2006) confeccionaram concretos com substituição da areia natural por artificiais de origem basáltica, com teor de material pulverulento de 16,7% na areia britada com grãos arredondados e 11,1% com grãos lamelares em comparação com um concreto feito com areia natural e também obtiveram resultados satisfatórios. Na primeira houve menor consumo de cimento e na segunda maior. Em ambas o consumo de água foi maior devido aos finos. Na comparação de custos por m³ os valores foram semelhantes, conferindo ao estudo a viabilidade do uso das areias britadas da região [21].

Em estudo semelhante, Buest Neto (2006) confeccionou concretos com agregados naturais e britados, de rochas basálticas e calcárias, com 27,65% e 35,20% de teor de material pulverulento, respectivamente. Segundo ele, elevados teores de material pulverulento elevam a área específica aumentando assim, o consumo de cimento e a demanda de água, além de provocar maior retração por secagem. Porém, para concretos de mesma resistência à compressão axial, a utilização de material pulverulento diminui a exsudação, ocasionada pela maior adsorção d'água às partículas, o que colabora para maior homogeneidade do concreto no estado fresco e menor percolação d'água na massa gerando, assim, menor índice de vazios e absorção d'água no estado endurecido. O autor obteve também, melhor resistência à tração por compressão diametral e à flexão, devido ao formato menos arredondado dos grãos, porém obteve maior consumo de cimento [19].

Devem ser tomados os devidos cuidados com o uso do pó de pedra em relação ao teor de material pulverulento, o qual, segundo a NBR 7211:2009 [23] não deve ultrapassar 12% para os agregados oriundos de britagem, quando empregados em concretos sem desgaste superficial.

É comum, na confecção de concretos, a substituição parcial do agregado natural pelo artificial. As diferentes proporções geram diferentes comportamentos. Grigoli *et al.* (2012), realizaram ensaios para identificar as diferenças entre concretos executados com diferentes proporções de areia natural e artificial, além da utilização de diferentes britadores na confecção dos agregados artificiais. Os autores verificaram que a substituição parcial de areia natural por areia artificial em concretos com baixa resistência (em torno de 20 MPa), para relações de a/c fixas (0,55; 0,60; 0,65) com teores de (0, 30, 60 e 100% de substituição) apresentaram aumento na resistência a compressão nos traços com a/c 0,55 e 0,60 e com

até 60% de substituição e, para a/c de 0,65 até 100%. Também foi observada maior absorção de água devido ao material pulverulento (15%) presente na areia artificial [24].

Gonçalves (2005), em estudo realizado com a adição de finos oriundos do corte de rocha de granitos em concretos, nas frações de 10 e 20% em relação à massa de cimento, constatou que houve um incremento na coesão e na consistência, diminuindo, assim, a exsudação. Esse comportamento é justificado devido ao efeito das pequenas partículas de pó difundidas pela mistura, que atuam como uma barreira física para o movimento ascendente da água. O que segundo o autor, pode ser comprovado pela dificuldade apresentada na homogeneização da mistura. O autor também obteve pequenas melhorias na resistência à compressão axial junto ao menor consumo de cimento [25].

Porém, mesmo obtendo menor exsudação e aumento da coesão, concretos feitos com pó de pedra - material com alta superfície específica - terão sua trabalhabilidade prejudicada o que levará a cuidados específicos com o abatimento deste.

Bonavetti e Irassar (1994) estudaram os efeitos da adição de pó de pedra em argamassas, afim de estudar sua influência na demanda de água. A adição de pó variou de 0% a 20%. Para argamassas com 5% de agregado miúdo de britagem, o acréscimo de demanda de água foi insignificante, sendo menor que 2%. No entanto, esta demanda cresceu rapidamente a partir de 10% de adição do pó. Para 20% de adição de pó de pedra o acréscimo de água chegou a 17%. Buest Neto (2006) também verificou um aumento dessa demanda [26; 19].

Em termos de finura, quanto maior for a superfície específica, em contato com a água, mais rapidamente ocorrerá a hidratação do cimento, ocasionando um aumento da resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. Por outro lado, quanto mais fino o cimento, maior a quantidade de superplastificante necessária para alcançar a mesma trabalhabilidade, uma vez que o desempenho do aditivo é influenciado diretamente pela finura do cimento.

Com teores de material pulverulento de 13,22% para a areia não lavada e 5,73% para a areia lavada, ambas de origem basáltica, Lang (2006), chegou a resultados melhores na resistência a compressão axial na confecção de concretos de até 50 MPa com a utilização da areia não lavada [27]. A pesquisa obteve percentuais de absorção e vazios inferiores com a utilização de altos teores de material pulverulento, diminuindo a permeabilidade do concreto, ou seja, aumentando um dos requisitos para a durabilidade.

Hasparyk *et al*. (2002), estudaram os efeitos da substituição de cimento e areia natural, separadamente, com a utilização de agregado pulverizado nos teores de 10%, 20% e 30%, na resistência a compressão axial e permeabilidade, tendo os concretos confeccionados abatimento constante [28]. Na substituição ao cimento, a permeabilidade aumentou e a resistência à compressão axial diminuiu. Em contrapartida, na substituição à areia, com teor de 30% em substituição, os autores obteveram diminuição da permeabilidade em torno de 20%, e a resistência à compressão se manteve.

Campos (2015) estudou a substituição parcial do cimento Portland por pó de pedra na confecção de Concretos de Alta Resistência (CAR) com agregado miúdo artificial calcário. O teor de substituição foi de 0%, 6%, 12% e 18%. Observou-se que, em 75% dos resultados, a maior resistência obtida foi com substituição de 12%, comprovando que o efeito dos finos do pó de pedra reduz a quantidade necessária de aglomerante, tornando o concreto mais econômico. Já com 18% foi constatado o efeito parede dos agregados, que prejuidicaram a densificação do materal e reduziram a resistência. Para combater o problema da reduação da trabalhabilidade e fluidez, ocasionada pelo uso do pó de pedra, o qual, segundo a autora, reduz significativamente a trabalhabilidade, Campos (2015) buscou definir o teor ótimo de superplastificante em ensaios na pasta. Com o ensaio de Cone de Kantro, o teor ótimo encontrado pela autora foi de 0,9%, do total de finos, para todos os traços. Campos (2015) também obteve melhoras na resistência à tração por compressão diametral e no módulo de elasticidade [29].

Analisando a durabilidade dos concretos feitos por Campos (2015), mencionados acima, Oliveira (2015) executou os ensaios de migração de íons cloreto, de carbonatação acelerada, de resistividade elétrica e de permeabilidade ao ar. Houve significativa melhora nos resultados de migração de íons cloreto nos concretos com 50 MPa. Nos ensaios de carbonatação acelerada notou-se melhora nos concretos com 50 MPa e 80 MPa. Para os ensaios de resistividade elétrica os valores se mantiveram aproximados, o que também ocorreu com os resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar. Os concretos dosados para resistência à compressão de 30 MPa obtiveram resultados semelhantes em todos ensaios [30].

3. CONCLUSÕES

A utilização de areias artificiais com elevado teor de material pulverulento mostrou-se viável economicamente, tecnicamente e ambientalmente, já que pode reduzir o consumo de cimento, aumentar a durabilidade e as resistências, além de contribuir com a diminuição da utilização de areias naturais e propiciar a utilização de rejeitos do processo de britagem.

Em relação ao estado endurecido, pode-se generalizar, tendo em vista os estudos analisados, que a utilização de areia artificial com altos teores de material pulverulento apresentou melhorias na resistência à compressão, tração e módulo

de elasticidade. Isto pode ser explicado pelo efeito fíler causado pela presença de finos. Alguns dos estudos afirmaram haver ganhos de resistência ao longo do tempo maiores do que concretos com areia natural, efeito ocasionado possivelmente por alguma ação pozolânica ou pela nucleação heterogênea.

Observa-se que, em relação ao estado fresco do concreto, o material pulverulento possui influência na consistência, por conta da presença maior de finos. A consistência foi prejudicada havendo a necessidade de maiores relações água/cimento ou o uso de aditivos plastificantes, o que leva a uma necessidade de parametrização mais cuidadosa no estudo de dosagem. Porém a exsudação e a segregação se mostraram inferiores, já que há maior coesão pela presença dos finos.

Nos estudos em que foi analisada a retração, quando incorporado 13% de material pulverulento houve diminuição. A hidratação do cimento foi antecipada contribuindo para a menor retração. Já no estudo com teores de 27% e 35%, a retração se mostrou elevada.

Quanto à durabilidade, nos casos em que foram utilizados aditivos plastificantes para combater o aumento da demanda de água, houve a diminuição da porosidade diminuindo, por conseqüência, tanto a permeabilidade quanto a carbonatação.

Nos estudos de substituição do cimento, para concretos de alta resistência, pelo material pulverulento proveniente dos finos de britagem, notaram-se ganhos na resistência à migração de cloretos, na resistência à compressão axial e na tração por compressão diametral, além da diminuição da profundidade de carbonatação.

Os estudos analisados foram feitos com diferentes composições granulométricas, tendo em vista que as propriedades dos agregados artificiais utilizados são dependentes da região e do processo de fabricação, dificultando a comparação objetiva entre tais estudos. Isto impede, também, a formulação de um traço único e explicita a necessidade de estudos de dosagem e durabilidade para os materiais disponíveis na região em que se deseja utilizar areia artificial com agregado pulverizado.

4. REFERÊNCIAS

[1] METHA, P. K., MONTEIRO, P.J.M., CONCRETO – Estrutura, Propriedades e materiais. 3ª. ed. São Paulo, Ed. Pini, 2014.

[2] NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. São Paulo: PINI, 1997.

[3] AHN, N. *An Experimental Study on the Guidelines for Using Higher Contents of Aggregate Microfines in Portland Cement Concrete. Ph.D. Dissertation. University of Texas at Austin.* 2001.

[4] HELENE, P. Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto NB/2001. WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. Novembro. São José dos Campos 2001.

[5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.

[6] TURNER, L. K.; COLLINS, F. G. Carbon dioxide equivalent (CO 2 -e) emissions : A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. Construction and Building Materials, v. 43, p. 125–130, 2013.

[7] JONH, V. M. Concreto Sustentável In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: Ibracon, 2011. v. 2.

[8] LIMA, J. A. R. DE; JOHN, V. M. Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas. Boletim Técnico - EPUSP, 2010.

[9] BERNDT, M. L. *Influence of concrete mix design on CO_2 emissions for large wind turbine foundations. Renewable Energy*, v. 83, p. 608–614, 2015.

[10] MEHTA, P. K. *Society, sustainability, and the global concrete industry.* In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51, Ibracon, Curitiba, 2009.

[11] BIANCHINI, M. Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

[12] FERREIRA, R. M. Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

[13] AGUIAR, J. E. de, Avaliação dos ensaios de durabilidade do concreto armado a partir de estruturas duráveis. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

[14] HELENE, P. Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto. Revista Ambiente Construído, São Paulo, Julho, 1997.

[15] ANDRIOLO, F. R. Usos e abusos do pó de pedra em diversos tipo de concreto. In: Seminário: O uso da fração fina da britagem. II SUFFIB, São Paulo, 2005.

[16] MENDES, S. Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2002.

[17] DAMO, G. F., Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de cimento Portland. Dissertação apresentada Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011

[18] BASTOS, S. R. B., Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002.

[19] BUEST NETO, G. T. Estudo da substituição dos agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2006.

[20] VIACELLI, L., Estudo da viabilidade da utilização do agregado miúdo britado em concreto convencional. Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao fim do curso de engenharia civil, UTFPR. 2012.

[21] LODI, V. H., PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. Viabilidade técnica e econômica do uso de areia de britagem em concretos de cimento Portland na região de Chapecó - SC. In: WORKSHOP DESEMPENHO DE SISTEMAS CONSTRUTIVOS, Unochapecó, Chapecó, SC, novembro de 2006.

[22] MENOSSI, R. T., Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, São Paulo, Ilha Solteira, 2004.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

[24] GRIGOLI, H. B., FABRO, F., GAVA, G. P., MANEGHETTI, L. C. Emprego do pó de pedra proveniente de diferentes britadores na produção de concretos. Revista Concreto & Construções, ed. 65, 2012.

[25] GONÇALVES, J. P. Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial. Tese apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

[26] BONAVETTI, V.L.; IRASSAR, E.F. The effect of stone dust content in sand. Cement and Concrete Research, v. 24, n. 3, p. 580-590, Jan. 1994.

[27] LANG, C. L., Avaliação do uso de areia britada de origem basáltica lavada e não lavada para utilização em concreto à base de cimento Portland. Dissertação apresentada Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.

[28] HASPARYK, N. P., ANDRADE, M. A. S., MUNIZ, F. C., LIDUÁRIO, A. S., BITTENCOURT, R. M., ANDRADE, W. P. Estudo da influência de adições na durabilidade e microestrutura do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2002.

[29] CAMPOS, H. F., Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental. Dissertação apresentada à Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

[30] OLIVEIRA, D. R. B. Avaliação da influência da utilização do pó de pedra como substituição parcial do cimento portland em relação à durabilidade: estudo experimental. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. Em fase de elaboração, 2015.