



Caracterização física e mecânica de concretos produzidos com substituição do agregado miúdo natural por resíduos de britagem

C. C. Guimarães^{a†}, M. C. Bastos^a

^a *Universidade do Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Bahia - Brasil*

[†] *Autor para correspondência: cleidsonguimaraes@ufrb.edu.br*

RESUMO

A pesquisa avaliou as propriedades de concretos produzidos pela substituição parcial e total dos agregados miúdos por resíduo de britagem da região do Recôncavo Baiano. O procedimento experimental consistiu na produção de concretos, dosado segundo o método da ABCP, visando resistência característica à compressão de 45 MPa e abatimento com tronco cônico em 90 ± 10 mm. Foram moldados 42 corpos de prova distribuídos em três traços distintos. Um deles contendo apenas agregado miúdo natural, denominado referência (REF), outro contendo uma composição de agregado 56,5% miúdo natural e 43,5% resíduo de britagem (COMP). O último traço foi produzido com 100% de substituição do agregado miúdo natural por resíduo de britagem. Foi empregado aditivo redutor de água, fixado em 0,4%, apenas nos concretos produzidos com resíduo britagem (COMP e RBT). De forma geral, pode-se afirmar que os resíduos de britagem podem ser empregados na substituição total ou parcial do agregado miúdo na produção de concreto de cimento Portland, desde que sejam adotados cuidados durante o estudo de dosagem.

1. Introdução

O concreto de cimento Portland é o material de construção mais utilizado na construção civil, sendo a areia natural a principal fonte de agregados miúdos para a sua produção (Mehta & Monteiro, 2014). Entretanto, os impactos ambientais provocados pela crescente demanda desse tipo de agregado têm chamado a atenção da comunidade científica. Segundo Kuck (2004), a retirada de areia de um rio agride sua calha natural, podendo favorecer a esterilidade do solo através da remoção da sua cobertura vegetal, além de trazer grandes prejuízos à flora e fauna local. Tais fatores restringem a exploração de areias naturais e limitam o consumo desse material como agregado miúdo no concreto.

Além das condicionantes ambientais, o Brasil já apresenta localidades onde não é possível encontrar areia natural em condições favoráveis para o emprego na construção civil ou cujas jazidas estão localizadas a grandes distâncias dos centros consumidores, como é o caso das regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro. Em Cruz das Almas, interior da Bahia, também é possível observar problemas similares. Apesar de a última ser uma cidade de pequeno porte e possuir diversas jazidas, de agregado miúdo natural, próximas ao centro urbano. Entretanto, essas fontes não possuem licença ambiental que regularizam a extração da areia, o que obriga às empresas a buscarem agregado miúdo em outros municípios, elevando assim o custo da produção de concreto. O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM (2004) afirma que os custos com transporte correspondem a cerca de 70% do custo final da areia.

É neste cenário que surge a necessidade da busca por matérias-primas alternativas que atendam aos princípios que regem a sustentabilidade ambiental. A incorporação de rejeitos

industriais compatibiliza a produção de concreto com o desenvolvimento sustentável, uma vez que além de reduzir a quantidade de resíduos lançados na natureza, também consegue agregar valor a esses materiais através do emprego no aprimoramento de algumas propriedades do concreto. Materiais como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, fibras de borracha, resíduos da construção civil, dentre muitos outros vêm sendo estudados como substitutos dos materiais convencionais no concreto e ganham popularidade na construção civil.

Nessa conjuntura, os resíduos de britagem surgem como uma alternativa sustentável para substituição total ou parcial da areia natural na produção do concreto. Segundo Menossi (2004), os resíduos de britagem, comercialmente chamados por pó de pedra ou areia artificial, ainda não possuem uma destinação final bem definida no Brasil, sendo um inconveniente do ponto de vista ambiental, pois além de alterar a paisagem natural, geram grandes volumes de poeira, podendo obstruir canais de drenagem e até mesmo provocar assoreamento de rios, quando carregados pela chuva. Sendo assim, Neville (1997) defende que o reaproveitamento desse material na construção civil é uma solução que promove a redução dos problemas associados à extração da areia natural e à disposição dos resíduos nas pedreiras.

Vale ressaltar, entretanto, que os resíduos de britagem vêm sendo empregados no ramo construtivo desde a década de 1980; Nugent (1979) fala sobre o reconhecimento pleno do uso da areia de britagem como agregado miúdo na América do Norte, existindo, nos Estados Unidos, uma entidade que trata dos aspectos técnicos relacionados ao uso da areia de britagem, a National Crushed Stone Association. No Canadá, como também em Israel, obras de grande vulto, como barragens, utilizam areia artificial e têm excelentes resultados (MENOSSI et al, 2010).

Rana et al (2016), através de uma revisão bibliográfica acerca do uso de resíduo de rocha em concreto de cimento Portland, confirmam que estudos anteriores, em diversos países, comprovaram a viabilidade técnica do uso desses resíduos como sendo uma prática que beneficia tanto a empresa de mineração responsável pela geração do produto, quanto as indústrias da construção civil, uma vez que esta última adquire um agregado sustentável com características próximas do agregado convencional, mas com propriedades físicas e químicas mais constantes, além de custo final reduzido, uma vez que dispensa qualquer procedimento adicional além do de britagem de rochas.

No que diz respeito à durabilidade do concreto, Gameiro, Brito e Silva (2014) e Singh et al (2016) defendem que a substituição parcial da areia natural por resíduos de britagem é mais viável do que a substituição completa; os autores justificam seus resultados através do pressuposto que a substituição parcial promove melhor empacotamento dos grãos e melhor aderência entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo, o que diminui os poros e, conseqüentemente, os valores de absorção de água no concreto. Os mesmos autores ainda complementam que a substituição total do agregado miúdo pode aumentar a porosidade do concreto, uma vez que o resíduo de britagem possui uma granulometria com alta porcentagem de finos, o que aumenta a demanda de água e a quantidade de poros no concreto endurecido.

No Brasil, várias pesquisas vêm se desenvolvendo a fim de caracterizar os resíduos de britagem e avaliar seu potencial de empregabilidade na construção civil. Autores como Bastos (2002), Lodi e Prudêncio Junior (2006), Drago et al (2009) e Menossi et al (2010) desenvolveram estudos visando avaliar o uso desse material em concretos e argamassas em substituição da areia natural, além de identificar possíveis inconvenientes que esses novos agregados podem provocar às propriedades mecânicas e à durabilidade do concreto.

Para Bastos (2002), os inconvenientes gerados pela substituição da areia natural pelos resíduos de britagem estão diretamente relacionados à sua grande quantidade de material fino (passante na peneira #200 – de abertura 0,075mm). A quantidade de material pulverulento presente nesse agregado supera os limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009) - 3% para

concreto submetido a desgaste superficial e 5% para concreto protegido do desgaste superficial; estas peculiaridades do novo agregado favorecem a queda na trabalhabilidade do concreto, exigindo maior demanda de água. Por outro lado, estudos mostram que pós de pedras que apresentam porcentagem de material pulverulento variando de 7% a 20%, dependendo da litologia, podem ser utilizados, pois colaboram na melhoria da aglomeração das partículas maiores do concreto (Menossi, 2004). Nesse aspecto, Bastos (2002) salienta em seu trabalho que os problemas supracitados podem ser amenizados consideravelmente com o simples controle da porcentagem dos elementos finos da areia artificial britada.

Lodi e Prudêncio Junior (2006) investigaram o uso de areias de britagem de rocha basáltica de grãos arredondados e de grãos lamelares em concretos de cimento Portland. Ao final da pesquisa, os autores relataram a influência do formato do agregado nas propriedades do concreto nos estados fresco; os autores obtiveram melhores resultados com o uso de grãos arredondados, uma vez que para formato lamelar, o concreto apresentou maior custo devido ao elevado consumo de cimento e maior aspereza no estado fresco, além da maior dificuldade de ser trabalhado na obra ou ao ser bombeado. No que tange à queda na trabalhabilidade, os mesmos autores defendem que esse óbice pode ser corrigido com o uso de aditivos plastificantes ou ainda através do uso de rebitadores autógenos (tipo Barmac), equipamento utilizado com a finalidade de arredondar as partículas dos resíduos de britagem e melhorar sua distribuição granulométrica. Drago et al (2009) analisaram a viabilidade técnica do uso da areia basáltica em substituição à areia convencional de rio nas proporções de 30%, 60% e total (100%) na produção de concretos utilizados na construção civil. Tal feito só foi possível mediante uma caracterização física e química dos resíduos de britagem e da determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Neste estudo, notou-se que a areia de britagem estudada, apesar da forma mais áspera dos grãos e maior teor de finos, quando misturada à areia natural proporcionou um melhor empacotamento dos grãos de agregado miúdo, aumentando a resistência à compressão do concreto, quando fixada a relação água/cimento.

Menossi et al (2010) constataram aumento relativo da resistência mecânica do concreto com substituição da areia natural por resíduos de britagem, principalmente em traços com o menor consumo de cimento, além da resistência mecânica, a adição do pó de pedra também alterou a trabalhabilidade do concreto; devido ao maior teor de finos, houve uma queda na consistência, o que, segundo os autores, pode ser compensada com o uso de aditivos plastificantes.

Melo, Martins e Repette (2009) consideram que um dos maiores avanços em tecnologia do concreto tem sido o uso de aditivos. Mas será que é possível empregar aditivo superplastificante e produzir concretos, empregando resíduo de britagem, com propriedades similares ou superiores aos concretos que empregam agregados miúdos naturais? Será que é possível utilizar resíduos de britagem para produzir concretos com resistências superiores a 40 MPa e, ao mesmo tempo, reduzir a relação a/c e reduzir o consumo de cimento Portland?

Neste contexto, ressalta-se a importância do estudo mais aprofundado acerca dos resíduos de britagem como substituto total ou parcial do agregado miúdo natural (areia lavada) para a produção de concreto de cimento Portland na cidade de Cruz das Almas-Bahia. Localizada a 150 quilômetros da capital baiana, a cidade de Cruz das Almas está na microrregião do recôncavo baiano e passa por um processo de desenvolvimento crescente da construção civil, atrelado ao aumento da demanda de agregado miúdo de qualidade para produção de concreto. Entretanto, atualmente, assim como em tantas outras regiões do país, a cidade carece de agregados miúdos que atendam não apenas às especificações físico-químicas exigidas, mas que também estejam em conformidade com as leis ambientais em vigência. Além disso, vale salientar que a Mineração Pedra do Cavalo, fonte dos resíduos de britagem em estudo, é responsável pela produção de cerca de 200 toneladas/dia desse material, e dista aproximadamente 20 quilômetros do centro

consumidor, distância consideravelmente menor quando comparada às dos atuais areais fornecedores de areia natural para as concreteiras da cidade, cerca de 150 km. Sendo assim, este artigo objetiva avaliar as propriedades de concretos produzidos pela substituição parcial e total dos agregados miúdos por resíduo de britagem.

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

2.1.1. Cimento

O aglomerante empregado foi o cimento Portland CII-Z-32 RS. Optou-se por esse cimento porque é o mais comumente empregado na região. Sua caracterização segue listada na Figura 1.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA			
ENSAIO	Unidade	Resultados	Especificação
Area Específica (Blaine)	cm ² /g	4130	≥ 2400
Massa específica	g/cm ³	2,99	≤ 6,5
Finura - Retido na peneira #325	%	10,89	≤ 16,0
Finura - Retido na peneira de #200	%	1,40	≤ 12,0
Expansibilidade (quente)	mm	1,60	≤ 5,0
Início de Pega	h	2,18	≥ 1
Fim de Pega	h	2,97	≤ 10 h
CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA			
ENSAIO	Unidade	Resultados	Especificação
Perda ao Fogo - PF	%	5,66	≤ 6,50
Resíduo insolúvel (RI)	%	11,26	≤ 16,0
Trióxido de Enxofre (SO ₃)	%	2,81	≤ 4,00
CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA			
ENSAIO	Unidade	Resultados	Especificação
Resistência à compressão 3 dias	MPa	20,02	≥ 10
Resistência à compressão 7 dias	MPa	27,94	≥ 20
Resistência à compressão 28 dias	MPa	35,57	≥ 32

Figura 1 - Caracterização do cimento Cimento CP II Z 32; Fonte: Cimento Itambé (2017).

2.1.2. Agregados

2.1.2.1. Areia natural

Foi utilizada areia lavada comercializada em Cruz das Almas-Ba, cujo módulo de finura é de 2,40 e massa específica é de 2620 g/cm³. A Figura 2 a seguir apresenta a curva granulométrica deste agregado segundo os parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

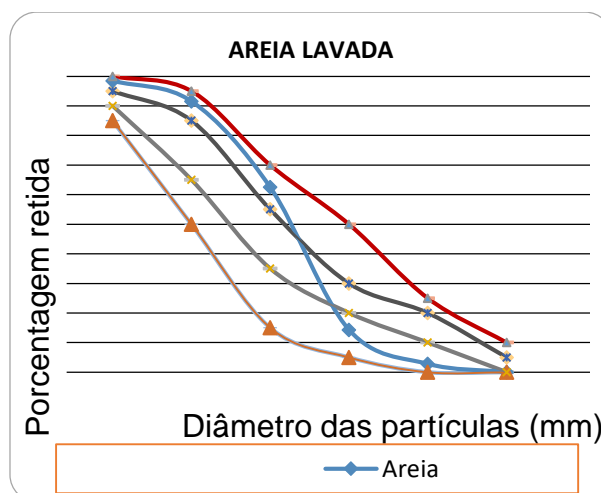


Figura 2 - Curva granulométrica da areia lavada.

2.1.2.2. Resíduos de britagem

Os resíduos de britagem (RB) empregados nesta pesquisa foram provenientes de rocha granítica e gerados no processo de britagem da Mineração Pedra do Cavalo, localizada na cidade de Muritiba-Ba. Não foi realizado nenhum tipo de beneficiamento do material, uma vez que a pretensão da presente pesquisa foi avaliar a utilização desses resíduos exatamente no estado em que são dispostos no pátio da pedreira. A Figura 3a apresenta a curva granulométrica dos resíduos de britagem segundo os parâmetros estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), ao passo que a Figura 3b destaca a predominância da forma lamelar do RB.

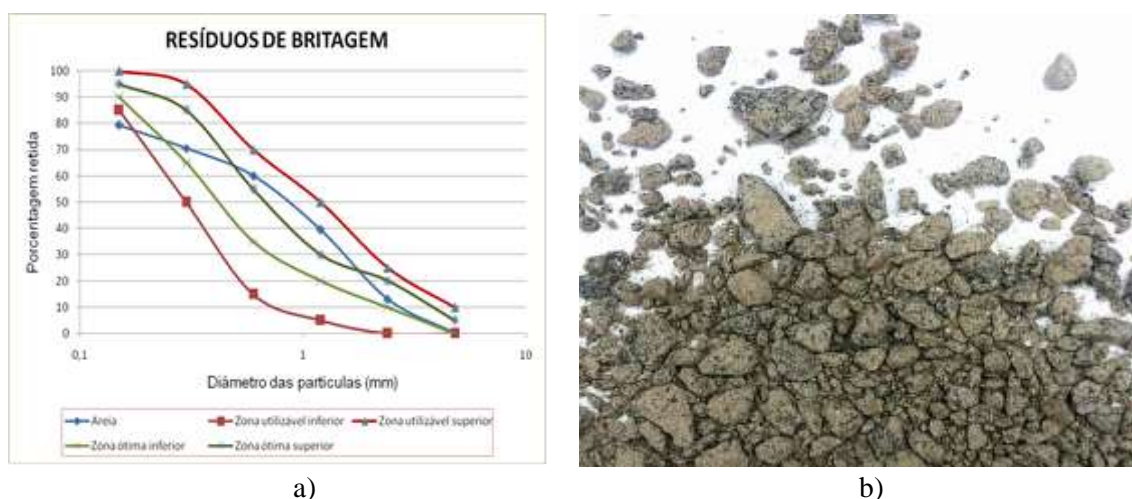


Figura 3 - Curva granulométrica dos resíduos de britagem e forma dos grãos.

2.1.2.3. Brita, água e aditivo superplastificante

O agregado graúdo utilizado foi à brita comercializada nas casas de materiais de construção de Cruz das Almas-Ba, com dimensão máxima característica de 19 mm e de origem granítica. Para a produção dos concretos foi utilizada água potável proveniente da rede de abastecimento local – Cruz das Almas-Ba.

O aditivo empregado possui massa específica de $1,17 \text{ g/cm}^3$ e composição básica de policarboxilatos.

2.2. Métodos

O procedimento experimental foi construído objetivando analisar a viabilidade de concretos produzidos com substituição parcial e total da areia lavada por resíduos de britagem através da comparação das suas propriedades nos estados fresco e endurecido com o concreto de referência, cujo agregado miúdo é exclusivamente areia natural.

Preliminarmente, foi feita a caracterização dos agregados (brita, areia lavada e resíduos de britagem) através dos ensaios de granulometria NBR 7211 (ABNT, 2009) e massa específica NM 52 (ABNT, 2009). Em seguida foi feita o estudo de dosagem do concreto segundo o método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) (Ribeiro, Pinto & Stalarling 2003) visando uma resistência de 45 MPa e fixado o abatimento, pelo tronco de cone, em 90 ± 10 mm (ABNT NM 67, 1996). O Estudo de dosagem foi conduzido respeitando os preceitos e etapas preconizados pela NBR 12655 (ABNT, 2015). Cabe destacar que foi empregado o método de dosagem da ABCP para a obtenção dos traços dos concretos com e sem o resíduo de britagem. Isso porque a pergunta de pesquisa conduz a averiguar a possibilidade de produzir concretos de 45 MPa empregando o RB. Em função disso, optou-se por conduzir os estudos de dosagem

independentemente, na perspectiva prática de que o estudo de dosagem deve levar em consideração as características dos agregados. Adotar um traço de estudo conduzido com agregado convencional e, simplesmente, substituir o agregado natural por RB não leva em consideração as características físicas do RB. Não sendo recomendado, a qualquer central de dosagem, mudar o agregado e manter o traço. Nesse contexto, optou-se por conduzir um estudo que se aproxime da realidade prática, fixando a resistência à compressão e abatimento para a obtenção dos traços com diferentes agregados.

Foi então realizada a moldagem de 42 corpos de prova distribuídos em três traços distintos (ver Tabela 1) seguindo os procedimentos propostos pela NBR 5738 (ABNT, 2015). O teor de aditivo foi fixado em 0,4% e foi empregado apenas nas dosagens onde os resíduos de britagem participaram da composição da matriz cimentícia (COMP e RBT – Tabela 1). Essa decisão foi tomada a fim de corrigir o aumento da demanda de água ocasionada pela inserção de agregado com maior teor de finos, como atestado pelos autores Lodi e Prudêncio Junior (2006) e Menossi et al (2010).

Tabela 1 - Características dos traços dos concretos desenvolvidos.

Traço	Características	Abatimento	Aditivo	Relação
	(agregado miúdo)	(mm)	(%)	água cimento
Referência (REF)	100% AL*	90	-	0,45
Composição (COMP)	56,5% AL*+43,5% RB**	90	0,4	0,36
Subst. total (RBT)	100% RB**	90	0,4	0,37

* AL – Areia lavada, **RB- Resíduos de britagem.

O traço de referência (REF) foi produzido apenas com a areia lavada comumente empregada na cidade de Cruz das Almas a fim de se estabelecer um parâmetro de comparação para avaliar a variação das propriedades nos estados fresco e endurecido dos concretos produzidos com resíduos de britagem.

O traço composição (COMP) foi obtido a partir da ponderação dos agregados miúdos (areia lavada e resíduos de britagem) de modo que a curva granulométrica da mistura se aproximasse ao máximo da zona ótima estabelecida pela NBR 7211 (ABNT, 2009). A partir da combinação da areia lavada com os resíduos de britagem, foi possível obter uma melhor distribuição dos grãos, como ilustrado na Figura 4. A perspectiva foi melhorar o arranjo dos grãos por meio da combinação de dois agregados e, posteriormente, verificar se essa correção melhora as propriedades do concreto.

Observando a Figura 4, nota-se que foi possível fazer um bom ajuste na distribuição granulométrica do agregado miúdo empregado no traço COMP, e que apenas as frações retidas nas peneiras de 2,40 mm e 0,60 mm (600 µm) ficaram ligeiramente fora da zona ótima. O melhor ajuste da curva foi obtido com o emprego de 56,5% de areia lavada e 43,5% de resíduos de britagem.

Destaca-se que essa composição foi alcançada por meio da criação de uma planilha alimentada pela caracterização granulométrica de cada um dos materiais que constituem o agregado miúdo e então, foram feitas alterações nos percentuais de cada um deles até que a curva resultante dessa composição estivesse com o maior número de pontos o mais próximo possível da zona ótima proposta pela NBR 7211 (ABNT, 2009). Observa-se que com a simples mistura da

areia lavada com os resíduos de britagem (sem correção do teor de finos ou da lamelaridade) não foi possível ajuste total do agregado miúdo na zona ótima.

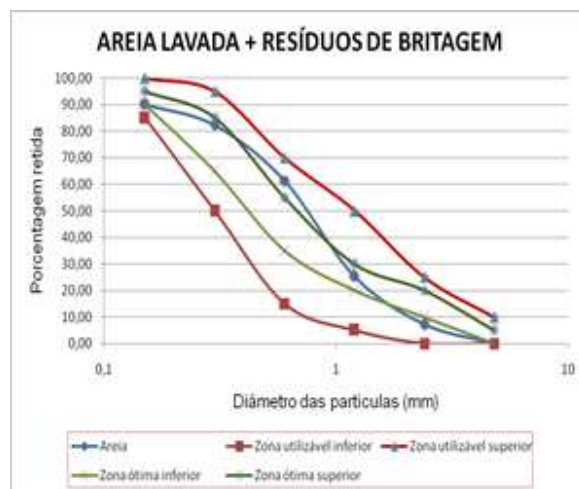


Figura 4 - Curva granulométrica da mistura de areia lavada e resíduos de britagem.

No que diz respeito ao concreto do traço RBT, este foi produzido com a substituição total do agregado miúdo natural por resíduos de britagem (RB).

Uma vez estabelecidos os traços e misturados, os corpos de prova foram submetidos à cura ao ar por 24 horas e à cura imersa em água saturada de cal durante 27 dias, para então serem submetidos aos ensaios de determinação da resistência à compressão conforme o previsto pela NBR 5739 (ABNT, 2007) e determinação de absorção de água por imersão, conforme a NBR 9778 (ABNT, 2005).

A avaliação dos resultados foi feita mediante a comparação entre as propriedades nos estados fresco e endurecido dos concretos de referência e aqueles produzidos com o resíduo de britagem (COMP e RBT).

3. Resultados e discussões

3.1. Consumo de cimento

No que diz respeito ao consumo de cimento, verificou-se um decréscimo no consumo de cimento à medida em que foi aumentado o percentual dos resíduos de britagem sobre a massa total de agregados miúdos, como ilustrado na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Detalhamento dos traços desenvolvidos.

	Traço (cimento: agregado miúdo: brita: água)	Consumo de cimento (kg / m³)
REF	1 : 0,9 : 1,61 : 0,45	639,68
COMP	1 : 0,92 : 1,61 : 0,36	631,15
RBT	1 : 0,92 : 1,54 : 0,37	615,32

Sendo assim, comparado ao consumo de cimento obtido no traço de referência, foi constatado um decréscimo de 1,33% correspondente ao traço COMP e de 3,81% referente ao traço RBT. Vale ressaltar que os resultados encontrados na presente pesquisa contradizem com aqueles obtidos anteriormente por Menossi (2010), o qual constatou aumento da demanda de

cimento diretamente proporcional ao acréscimo da porcentagem de resíduos de britagem como substitutos da areia natural. Entretanto, os dados que constam na Tabela 2 provavelmente estão relacionados ao fato de que os finos de britagem (passante por todas as peneiras da série ABNT) possuem fração granulométrica próxima à do cimento Portland e possivelmente estão preenchendo os vazios que seriam preenchidos por este último material. Essa característica foi percebida no processo de correção do traço pela inserção de argamassa. Observou-se que as frações finas do RB ajudam a envolver melhor o agregado graúdo exigindo menor teor de argamassa.

Além disso, observou-se que durante o processo de mistura, os concretos que levaram resíduos de britagem em sua composição (traço COMP e traço RBT) apresentaram características peculiares: elevada adesão à betoneira e às ferramentas utilizadas e elevada coesão. No diz respeito aos efeitos proporcionados pela substituição do agregado miúdo natural nas propriedades do concreto no estado fresco, pode-se associá-los à intervenção ocasionada pelos finos nas interações do tipo de Van Der Waals. Essas interações intermoleculares tendem a tornar a mistura mais coesa e, por essa perspectiva, os resíduos de britagem podem está exercendo influência na mistura, sob o ponto de vista físico, similar àquela ocasionada pela adição de cimento Portland. Vale ressaltar ainda que, conforme esboçado na Tabela 2, o emprego de aditivo superplastificante nos traços COMP e RBT conseguiu reduzir a relação água/cimento em relação ao traço REF mesmo com o acréscimo do teor de finos oriundos da substituição da areia. Verificou-se um pequeno aumento da demanda de água do traço RBT em relação ao traço COMP, confirmando o que já foi constatado por Gameiro, Brito e Silva (2014) e Singh et al (2016) sobre o aumento da demanda de água quão maior for o teor de finos presentes na mistura.

3.2. Resistência à compressão

A Tabela 3, a seguir, apresenta os resultados de resistência à compressão axial, aos 28 dias, para os concretos REF, COMP e RBT, respectivamente.

Tabela 3 - Resultados da resistência à compressão (Mpa).

	REF	COMP	RBT
Média (MPa)	56,1	54,8	51,2
Desvio padrão	1,87	2,19	1,94
Coeficiente de variação (%)	3,33	4,00	3,78

A análise dos resultados foi feita de acordo com os preceitos normativos da NBR 5739 (ABNT, 2007), a qual estabelece que um coeficiente de variação para a resistência à compressão de concretos menor ou igual a 4%, então os resultados são classificados como muito bom; verifica-se que em todos os traços, o coeficiente de variação das amostras respeitou essa faixa de valores.

Notou-se que a variação da resistência média do traço COMP em relação ao traço REF foi de apenas 2,29%, sendo considerada uma variação pouco significativa segundo o tratamento estatístico feito pela NBR 5739 (ABNT, 2007), a qual especifica variações inferiores a 3% como “excelentes”, podendo, inclusive, ser uma discrepância inerente ao próprio material. Sob o ponto de vista da resistência à compressão, o emprego de resíduo de britagem combinado com o agregado natural não alterou a resistência à compressão e diminuiu o consumo do agregado natural em 43,5%.

No que diz respeito ao traço RBT, com substituição total da areia natural por resíduos de

britagem, observou-se diminuição na resistência média à compressão de 8,83% em relação ao concreto de referência. Mesmo com substituição total do agregado miúdo por resíduo de britagem, o concreto produzido atenderia a resistência característica à compressão (45 MPa) e apresenta resistência da classe do C50, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015).

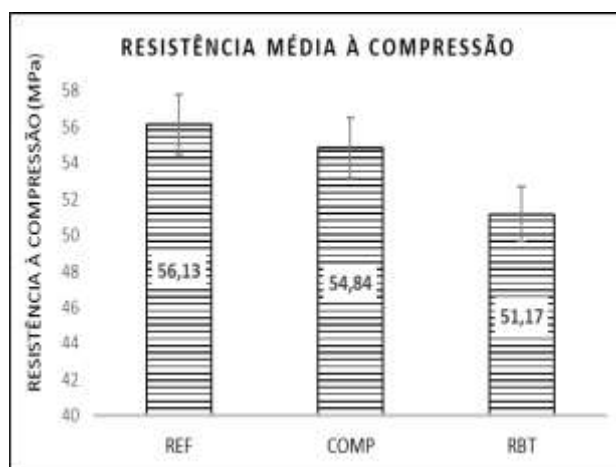


Figura 5 - Representação gráfica dos resultados de resistência média à compressão com desvio de 3%.

Observa-se, na Figura 5, que há uma tendência de redução da resistência à compressão à medida que aumenta o teor de RB. Vários fatores podem estar interferindo, tais como diminuição do consumo de cimento Portland /m³ de concreto, predominância de partículas lamelares no RB (Figura 3). Esses dois fatores tendem a diminuir a resistência à compressão, enquanto a diminuição da relação a/c, tende a compensar a redução na resistência à compressão minimizando os efeitos destacados por Drago et al (2009), ao apontar a diminuição gradativa da resistência à compressão à medida em que é aumentada a porcentagem dos resíduos de britagem, quando fixada a relação a/c.

Sob o ponto de vista prático, essa redução de 8,83% poderia ser corrigida na fase de correção do traço, simplesmente alterando o consumo de cimento. Em consonância com Melo, Martins e Repette (2009), a produção dos concretos atuais precisam incorporar um dos maiores avanços na tecnologia do concreto, os aditivos. Ou seja, é possível produzir concretos com RB com resistências características à compressão similares aos concretos produzidos com agregado miúdo natural. Mas os melhores resultados são obtidos quando combinados RB e agregado natural, em proporções que melhores a distribuição granulométrica (Figura 5).

3.3. Absorção de água por imersão

Os resultados dos ensaios de absorção por imersão foram coletados segundo a NBR 9778 (ABNT, 2009) e seguem expressos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados de absorção de água por imersão.

	Traço ref	Traço comp	Traço rbt
Média (%)	6,50	5,34	5,81
Desvio padrão	0,46	0,18	0,21
Coefficiente de variação (%)	7,11	3,40	3,67

Analisando os coeficientes de variação entre as amostras de cada traço, verifica-se que a variabilidade nos resultados de absorção para o traço de referência é superior àqueles encontrados para os traços COMP e RBT. Tal discrepância entre traços pode ser atribuída às características inerentes ao próprio material, neste caso, a areia lavada comercializada na cidade de Cruz das Almas. Como já declarado por Rana et al (2016), os resíduos de britagem são mais estáveis química e fisicamente em relação ao agregado miúdo natural. Sendo assim, espera-se que os corpos de prova moldados com material de características mais estáveis (RB) ocasionem variações menores entre suas amostras.

Nota-se também que o concreto COMP apresenta o menor teor de absorção de água, decréscimo de 17,8% em relação à referência. Apesar da diminuição do consumo de cimento Portland, que leva a diminuição do efeito de colmatação dos poros pelo C-S-H produzido na hidratação do cimento Portland, Mehta e Monteiro (2014), esse decréscimo era esperado uma vez que a composição proposta no procedimento experimental promoveu ajuste da curva granulométrica (vide Figura 3) e, provavelmente, gerou um melhor empacotamento da matriz cimentícia. Além disso, o emprego de aditivo diminuiu a relação a/c, ocasionando a redução da porosidade aberta e conseqüentemente promoveu a redução da absorção por imersão, conforme previsto por Mehta e Monteiro (2014).

Em contrapartida, os concretos produzidos com 100% de resíduos de britagem apresentaram uma redução de 12% na absorção, em relação ao traço REF. Para explicar esse fenômeno é necessário considerar que o traço RBT possui maior relação agregado miúdo:gráudo (0,60) do que o traço REF (0,57) e os agregados miúdos podem está contribuindo com a redução de porosidade originada pelo agregado gráudo. Além disso, a relação a/c do RBT (0,37) é menor do que a do REF (0,45), portanto o maior teor de água contribui para o aumento da porosidade do concreto REF. Comparando a distribuição granulométrica do RB (Figura 2) e a da areia natural (Figura 1), observa-se que duas frações dos RB encontram-se na zona ótima, enquanto da areia natural, todas as frações estão distribuídas na zona utilizável, fato que pode contribuir com uma provável melhoria do empacotamento. De forma sintética, pode-se apontar a possibilidade de aumento da compacidade da matriz com RB em função da distribuição granulométrica e redução da relação a/c, em relação a matriz do concreto de referência. Esses fatores associados podem estar compensando o menor consumo de cimento do concreto RBT. Já que é sabido que tanto menor o teor de cimento Portland, menor a produção de agentes cimentantes e maior é a porosidade da matriz, como destacam Mehta e Monteiro (2014).

A Figura 6, a seguir, traz a os teores médios de absorção de água por imersão para cada traço estudado.

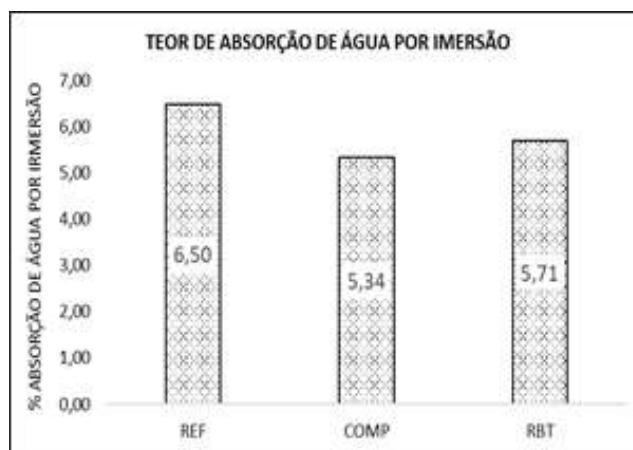


Figura 6 - Representação gráfica dos resultados de absorção por imersão.

Observa-se, Figura 6, uma tendência à redução de porosidade nos concretos produzidos com resíduo de britagem. Esses resultados apontam a viabilidade do emprego de RB na produção de concreto, sob o ponto de vista da durabilidade do concreto. Ou seja, é possível produzir concretos menos porosos usando resíduo de britagem, desde que se empregue aditivos redutores de água, em proporções definidas pelo estudo de dosagem. Destaca-se ainda que os melhores resultados são obtidos quando combinados os efeitos de correção granulométrica (por meio da combinação de agregado natural e RB) e aditivos redutores de água.

4. Conclusões

De forma geral, pode-se afirmar que os resíduos de britagem podem ser empregados na produção de concreto de cimento Portland como substituição parcial ou total da areia natural, desde que haja cautela no controle da relação a/c. De maneira mais específica, pode-se afirmar que:

- Os resíduos de britagem combinados com areia natural, produzem concretos com resistência à compressão equivalentes àqueles de referência;
- Concretos produzidos com a combinação de agregados naturais e RB (COMP) apresentam melhores resultados quanto à resistência à compressão e durabilidade, desde que empregue aditivos redutores de água;
- Os concretos COMP podem apresentar maior contribuição com a sustentabilidade, porque reduz o impacto nas jazidas de areia e produz concretos com melhores características mecânicas e de durabilidade;
- Recomenda-se o emprego de aditivo superplastificante na produção de concretos com RB a fim de atenuar os efeitos adversos ocasionados pelo alto teor de finos presentes nesse resíduo;

Finalmente, pode-se afirmar que é possível e viável produzir concretos com resistência a compressão de 50 MPa, substituindo total ou parcialmente os agregados miúdos naturais por resíduo de britagem. Desde que sejam empregados os avanços da tecnologia do concreto para minimizar os efeitos deletérios do elevado teor de finos (no RB) e a predominância de partículas lamelares.

Referências

- Almeida, S. L. M.; Pereira, A. F. R. Obtenção de areia artificial da pedra Vigné. *Comunicação Técnica do XII JIC - Jornada de Iniciação Científica - CETEM*, 07 e 08 de julho de 2004. Rio de Janeiro: CETEM. 2004.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro. 1996.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro. 2009.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5738: Concreto - moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro. 2015.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 2007.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro. 2005.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro. 2009.

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro. 2015.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro. 2015.
- Bastos, S. R. B. Estudo da substituição de agregados miúdos naturais por agregados miúdos britados em concretos de cimento Portland. *Dissertação de Mestrado*. Curitiba: Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná. 2002.
- Buest, G. T. Uso da areia artificial basáltica em substituição parcial à areia fina para a produção de concretos convencionais. *Dissertação de Mestrado*. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.
- Busanello, G., Garlet, G. Uso da areia artificial oriunda de britagem de rochas na região de Caxias do Sul em substituição a areia natural para produção de concretos. *Encontro De Jovens Pesquisadores Da Universidade De Caxias Do Sul*, 15. Setembro de 2007.
- Centro De Tecnologia Mineral - CETEM. *Areia artificial pode ser a opção mais barata*. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br>> Acesso em: 20 jul. 2017.
- Cimento Itambé. *Especificações Técnicas Cimento Portland Composto com Pozolana: CP II-Z-32*. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/produtos/cp-ii-z-32/>> Acesso em: 19 jul. 2017.
- Drago, C.; Verney, J. C. K.; Pereira, F. M. Efeito da utilização de areia de britagem em concretos de cimento Portland. *Rev. Esc. Minas, Ouro Preto*, v. 62(3), p.399-408. 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672009000300021>> Acesso em 12 jul. 2017.
- Gameiro, F.; Brito, J. De; Silva, D. Correia da. Durability performance of structural concrete containing fine aggregates from waste generated by marble quarrying industry. *Engineering Structures*, [s.l.], v. 59, p. 654-662, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.11.026>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613005804>>. Acesso em: 17 jul. 2017.
- Kuck, D. W. Areia artificial reduz impacto ambiental de construção civil. *Ciência hoje on-line*. Instituto Ciência Hoje. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.cienciahoje.org.br/noticia/v/ler/id/62/n/areia_artificial_reduz_impacto_ambiental_de_construcao_civil> Acesso em 26 de jul. 2017.
- 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. *Workshop Desempenho de Sistemas Construtivos*, Unochapecó, Chapecó, SC. 2006.
- Mehta, P. K., Monteiro, P.J.M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON. 2014.
- Melo, Karoline Alves De; Martins, Vanessa Da Costa; Repette, Wellington Longuini. Estudo de compatibilidade entre cimento e aditivo redutor de água. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 9(1), p. 45-56, mar. 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Karoline_Melo3/publication/277074066_Estudo_de_compatibilidade_cimento-aditivo_redutor_de_agua/links/5890aeaaca272f9a556bc5a/Estudo-de-compatibilidade-cimento-aditivo-redutor-de-agua.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2018.
- Menossi, R. T. Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto. *Dissertação de Mestrado*. Ilha Solteira: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade estadual Paulista. 2004.

- Menossi, R.T., Melges, J.L.P., Akasaki, J.L., Camacho, J.S., Fazzan, M.M.T., Salles, F.M. Pó de pedra: Uma alternativa ou um complemento ao uso de areia na elaboração de misturas de concreto? *HOLOS Environment*, v. 10(2). 2010.
- Neville, A. M. *Propriedades do concreto*. (2.ed.). São Paulo: Pini. 1997.
- Nugent, F. R. Ensaio com areia artificial - como melhorar seu concreto. *Colóquio Sobre Agregados Para Concreto*. Anais... São Paulo: IBRACON, p. 1-29. 1979.
- Pereira, G. L. Avaliação do uso de areia de britagem em argamassas e concretos de cimento Portland. *Trabalho de Conclusão de Curso*. Canoas: Curso de Engenharia Civil, Universidade Luterana do Brasil. 2008.
- Rana, A.; Kalla, P.; Verma, H.K.; Mohnot, J.K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. *Journal Of Cleaner Production*, [s.l.], v. 135, p. 312-331, nov. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616308034#bib16>>. Acesso em: 15 jul. 2017.
- Ribeiro, C.C.; Pinto. J.D.S.; Starling, T. *Materiais de construção civil*. (2.ed.). Minas Gerais: UFMG. 2006.
- Singh, R. S; Nagar, A. V.; Rana, A. T. A. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete *J. Clean. Prod.*, 116 (2016), p. 223-235. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616000032>> Acesso em 15 jul. 2017.