

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO CONTROLE GRANULOMÉTRICO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MECÂNICAS DE AGREGADOS RECICLADOS PARA PAVIMENTAÇÃO.

Phillipe Caetano G. da Silva (1); Leonardo F. R. Miranda (2)

(1) Departamento de Engenharia Civil – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Brasil – e-mail: phllcaetano@yahoo.com.br

(2) Departamento de Engenharia Civil – Centro de Tecnologia e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco, Brasil – e-mail: lfrmiranda@ig.com.br

RESUMO

Proposta: A brita corrida reciclada tem sido produzida em usinas apenas passando o resíduo de construção civil (RCC) pelo britador, sem qualquer etapa posterior de peneiramento. Isso faz com que diversas propriedades deste produto, como a granulometria, teor de finos, CBR e expansibilidade apresentem grande variabilidade em cada lote produzido. O objetivo deste trabalho é propor um processo diferenciado de produção de brita corrida reciclada para bases e sub-bases de pavimentos, através do controle granulométrico do produto, que reduza a variabilidade de suas propriedades físicas e melhore seu desempenho mecânico. **Método de pesquisa/Abordagens:** foram coletadas 5 amostras de brita corrida reciclada na usina pública de João Pessoa/PB, cujo RCC era de origem cerâmica e/ou mista. Estas amostras foram secas em estufa, divididas em 3 partes para composição de duas curvas granulométricas conforme definidas pelo DNER e então caracterizadas quanto às seguintes propriedades: massa unitária, distribuição granulométrica, teor de finos < 0,42 mm, índice de forma, CBR e expansibilidade. **Resultados:** o controle granulométrico da brita corrida reciclada mostrou ser útil no aumento dos valores obtidos para as propriedades de massa unitária e CBR, além de reduzir o teor de finos < 0,42 mm que, em algumas amostras, se mostrava excessivo, sem indicar com isto um aumento do custo de produção. **Contribuições/Originalidade:** proposição de um processo diferenciado de produção de brita corrida reciclada, com melhoria de qualidade do produto e redução do custo inicial de instalação da usina.

Palavras-chave: entulho; agregado reciclado; controle de qualidade, pavimentação, granulometria.

Keywords: waste, recycled aggregate; quality control, pavement, grain size distribution.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, cresce a preocupação em promover a sustentabilidade no setor da construção civil e alguns dos principais entraves são os impactos ambientais causados pela produção do agregado natural e o grande volume de entulho gerado pelo setor. No tocante, estima-se que até 70 % do lixo sólido urbano seja proveniente da construção civil (PINTO, 1999), problema este que vem se agravando em cidades de médio e grande porte. Por estes motivos se torna cada vez mais indispensável reduzir, reutilizar e por fim reciclar os resíduos da construção civil (RCC).

No Brasil, tem-se conhecimento de trabalhos de pesquisa com RCC desde a década de 80, por exemplo, o de PINTO (1987). Quanto à aplicação de agregados reciclados em obras, MOTTA (2005) cita a pavimentação da primeira via de São Paulo empregando agregados reciclados com acompanhamento tecnológico em 1984. As pesquisas estão aumentando paulatinamente ao longo dos anos e diversos são os fatos que comprovam que a atividade de reciclagem de RCC está crescendo no país, como o surgimento de decretos em diversas cidades exigindo o uso preferencial de agregados reciclados em obras públicas, o surgimento da Resolução CONAMA 307 em 2002, a instalação de várias usinas de reciclagem pelo setor privado, o uso crescente de agregados reciclados por construtoras e empreiteiras de obras pesadas e a publicação de normas ABNT específicas para o uso de agregados reciclados (Tabela 1).

Tabela 1: Especificação da NBR 15116 (ABNT, 2004) para o uso de brita corrida reciclada em obras

Propriedades	Agregado reciclado de RCC classe A		Normas de ensaios	
	Graúdo	Miúdo	Agregado graúdo	Agregado miúdo
Composição granulométrica	Não uniformidade e bem graduado com coeficiente de uniformidade $C_u > 10$		NBR 7181/84	
Dimensão máxima característica	$\leq 63 \text{ mm}$		NBR NM 248/01	
Índice de forma	≤ 3	-	NBR 7809/83	-
Teor de material $< 0,42 \text{ mm}$	Entre 10% e 40%		NBR 7181/84	
Contaminantes – teores máximos em relação à massa do agregado reciclado (%)	Materiais não minerais de mesmas características	2	Anexo A da Norma	Anexo B da Norma
	Materiais não minerais de características distintas	3		
	Sulfatos	2	NBR 9917/87	

¹⁾ Para os efeitos desta norma, são exemplos de materiais não minerais: madeira, plástico, betume, materiais carbonizados, vidros e vidrados cerâmicos.

Tabela 2: Requisitos específicos para agregado reciclado destinado à pavimentação, conforme à NBR 15116/04.

Aplicação	ISC ² (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de compactação
Material para execução de reforço de subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

¹⁾ Permitido o uso como material de base somente para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições do eixo padrão de 8,2 tf (80 kN), no período de projeto.

²⁾ ISC = Índice de Califórnia.

Um dos principais mercados da brita corrida reciclada no Brasil é na execução de camadas de pavimentação. A pavimentação no Brasil ainda é deficiente e precária. Segundo dados de GEIPOT (2000) apud MOTTA (2005), apenas 9,5% da malha rodoviária do país é pavimentada, o que equivale a, aproximadamente, 165.000 km dos mais de 1.700.000 km existentes. Esse fato é extremamente grave levando em consideração que 61,5% do movimento de cargas e 95% do movimento de passageiros amparam-se no transporte rodoviário (ANTT, 2002 apud MOTTA, 2005).

MOTTA (2005) concluiu ser este um uso promissor do agregado reciclado, principalmente em vias de baixo volume de tráfego, devido à grande quantidade de produto empregado na construção de pavimento e, neste caso, o agregado reciclado não ter restrições comuns a outros destinos, além do preço ser competitivo em relação ao agregado natural.

Também SIMONS; HENDERIECKX (1994) consideram a construção de rodovias o primeiro mercado para os produtos reciclados, devido ao elevado consumo de agregados desta atividade e pelo menor custo da brita corrida reciclada em relação a natural.

De fato, diversas são as obras que já utilizaram a brita corrida reciclada em obras de pavimentação. As prefeituras de Belo Horizonte/MG, São Bernardo do Campo/SP e Mauá/SP são exemplos. Também na execução do campus da zona leste da Universidade de São Paulo foram utilizados mais de 10.000 m³ deste produto na execução das vias.

Por outro lado, o processo de reciclagem do RCC para produção de brita corrida no Brasil não é considerado satisfatório para se obter um produto realmente de qualidade. Atualmente, a brita corrida reciclada tem sido produzida em usinas de reciclagem apenas passando o RCC pelo britador, sem qualquer etapa posterior de peneiramento (Figura 1 e Figura 2). Isso faz com que diversas propriedades da brita corrida, como a granulometria, teor de finos, CBR e expansibilidade apresentem grande variabilidade em cada lote produzido, dificultando sua aceitação no mercado.

Este problema foi verificado, por exemplo, durante a execução da obra do campus Zona Leste da USP, onde toda a base e sub-base das pistas de rolamento foram realizadas com material reciclado. Devido à uma falta de controle de produção mais eficaz por parte dos fornecedores, os lotes apresentaram uma variabilidade muito grande de resultados, sendo que alguns sequer alcançaram resistência suficiente para serem aplicados como base de pavimento. Isto é considerado um entrave no crescimento do mercado de agregados reciclados e que deve ser solucionado.

Essa variabilidade também foi observada por MOTTA (2005) quando em seu trabalho afirma: “provavelmente em função da heterogeneidade de natureza do agregado reciclado, alguns resultados obtidos nos experimentos de laboratório apresentaram dispersões”.



Figura 1: Exemplo de produção de brita corrida reciclada na usina de Campinas/SP, sem controle granulométrico.

Sendo assim, este trabalho mostra-se de grande importância, pois, através do estudo de controle granulométrico da brita corrida reciclada, pretende apresentar como resultado uma proposta para solução deste problema, de forma a se obter agregados reciclados para pavimentação com menor custo, menor variabilidade e maior desempenho mecânico.

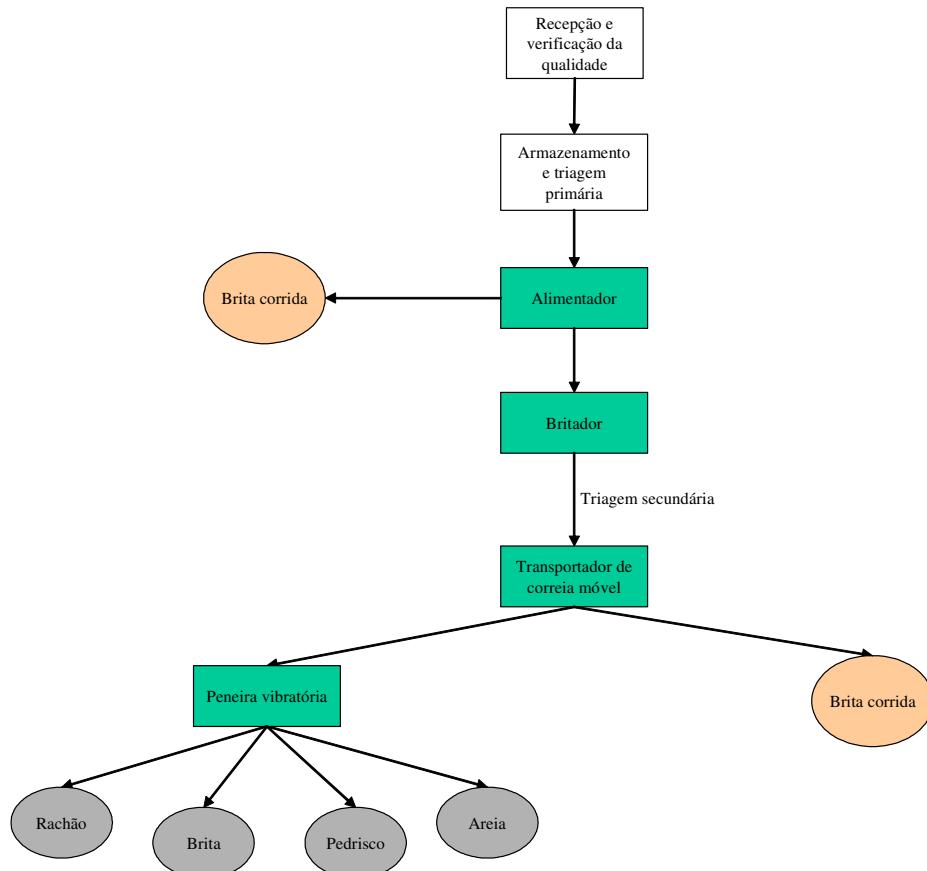


Figura 2: Esquema de produção de agregado reciclado normalmente utilizado em usinas brasileiras.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do controle granulométrico nas características físicas e mecânicas da brita corrida reciclada para pavimentação, em especial a diminuição da variabilidade e um possível aumento da resistência mecânica destes agregados para emprego em base e sub-base.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Coleta e preparação das amostras

Foram coletadas 5 amostras de brita corrida reciclada na usina pública de João Pessoa/PB entre os meses de novembro de 2007 a janeiro de 2008. Estas amostras foram produzidas a partir da reciclagem de RCC de obras de João Pessoa/PB de natureza cerâmica ou mista em britador de impacto com capacidade nominal de 20 m³/h.

Todas as amostras foram obtidas de lotes diferentes da produção da usina e coletadas de diferentes pilhas de estoque: pilha formada pelo transportador de correia 1 (TC1, formado pelo escalpe do RCC no alimentador vibratório, antes do processo de britagem) e pilha formada pelo transportador de correia móvel (TCM, após britagem do RCC), conforme apresentado na Tabela 3.

As amostras foram coletadas conforme o especificado na NBR 7216 – Amostragem de agregados e NBR 10007 – Amostragem de resíduos, cujo procedimento pode ser resumido nos seguintes passos: retirada dos agregados com pá, em mais de 7 pontos para cada lata de 18 litros, alternados de um lado para outro diagonalmente, de forma aleatória, desde a crista até a base, em seqüência não repetitiva.

Para cada amostra foram coletados ao menos 120 kg de material, sendo esta uma quantidade suficiente para garantir a representatividade da amostra e para garantir uma presença de fração graúda suficiente para a composição das curvas, devido à quantidade excessiva de fração areia encontrada nas amostras.

Tabela 3: Características das 5 amostras coletadas.

Amostra	Mês de coleta	Transportador de correia	Característica visual
I	Nov/07	TCM	Marrom claro, material graúdo com cerâmica e concreto.
II	Nov/07	TC1	Cor marrom, presença de plástico.
III	Dez/07	TCM	Cor marrom, material misto.
IV	Dez/07	TC1	Cor marrom escuro, presença de raiz e terra, material graúdo de concreto.
V	Dez/07	TC1	Cor marrom, material cerâmico misto.

Inicialmente, todas as amostras foram levadas para o Laboratório de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da UFPE, onde permaneceram 24 horas em estufa na temperatura de 105° C.

Após a secagem, cada amostra foi reduzida por processo de quarteamento para se obter, ao menos, 25 kg de amostra no estado “in natura” (ou seja, com características idênticas da coletada em campo), formando-se assim a amostra parcial A.

O restante de material de cada amostra foi utilizado para a composição de 2 curvas granulométricas, semelhantes às curvas definidas pelo DNER que apresentam um bom grau de continuidade.

Uma vez que em uma usina de reciclagem não é possível compor uma curva granulométrica exatamente igual às definidas pelo DNER, as curvas chamadas de B e C foram compostas considerando as dimensões de materiais que estão normalmente disponíveis na usina: areia (< 4,8 mm), pedrisco (entre 4,8 mm e 9,5 mm), brita (entre 9,5 mm e 38,1 mm) e rachão (maior que 38,1 mm) (Tabela 4). Sendo assim, a curva B foi definida utilizando as porcentagens passante acumuladas da Faixa IIIB do DNER e a curva C foi definida utilizando os valores médios das porcentagens passante acumuladas da Faixa I do DNER.

Tabela 4: Curvas granulométricas utilizadas para composição das amostras B e C.

Abertura da malha (mm)	Porcentagem passante acumulada	
	Curva B (equivalente a Faixa IIIB do DNER)	Curva C (equivalente a média da Faixa I do DNER)
50,5	100	100
38,1	100	95
9,5	71	50
4,8	56	35

3.2 Ensaios em laboratório

Os ensaios em laboratórios estão divididos nos ensaios de caracterização física do agregado reciclado e ensaios específicos para aplicação de camada de base e sub-base em obras de pavimentação, descritos a seguir:

- Massa unitária: conforme a NBR 7251;
- Teor de materiais pulverulentos: conforme a NBR 7219;
- Índice de Forma: de acordo com a NBR 7809 que determina o índice de forma do agregado graúdo, (material retido na peneira 9,5 mm);

- Composição granulométrica: foram analisados os resultados do teor de passante na peneira de abertura de malha 0,42 mm (ABNT NBR 7181), dimensão máxima característica e módulo de finura;
- CBR e expansibilidade: de acordo com a metodologia de ensaios prevista na ABNT NBR 9895.

Não foi possível realizar ensaios com a amostra IIIB uma vez que a amostra original se apresentou muito fina, não dispondo de material graúdo suficiente para compor esta curva.

Com exceção das amostras I e II que utilizaram um teor de umidade abaixo do ponto de saturação, durante o ensaio de CBR as demais amostras foram compactadas com umidade no ponto de saturação, conforme recomendado por MOTTA (2005). Todas as amostras foram compactadas utilizando a energia de Proctor intermediário.

4 ANALISE DOS RESULTADOS

A Tabela 5 abaixo apresenta um resumo dos resultados obtidos na caracterização das 5 amostras selecionadas.

Tabela 5: Resumo dos resultados de caracterização das amostras.

Amostra	Massa unitária (kg/m ³)	Teor de finos < 75 µm (%)	Teor de finos < 0,42 mm (%)	Módulo de finura	Dim. máx. caract. (mm)	CBR (%)	Expansib.
IA	1355	3,7	42,9	3,39	38,1	38,3	0,09
IB	1493	4,3	42,8	3,70	38,1	-	-
IC	1476	3,9	26,1	5,23	50,8	48,3	0,09
IIA	1355	2,2	38,4	3,88	50,8	25,7	0,19
IIB	1484	2,1	32,2	4,26	38,1	-	-
IIC	1428	2,4	17,7	5,63	38,1	42,5	0,15
IIIA	1523	2,6	43,8	3,53	38,1	37,9	0,20
IIIB	-	-	-	-	-	-	-
IIIC	1538	2,8	24,7	5,11	38,1	96,6	0,12
IVA	1487	3,2	41,7	3,50	38,1	50,2	0,20
IVB	1542	3,2	34,5	4,02	38,1	64,1	0,23
IVC	1559	3,6	22,0	5,30	50,8	100,9	0,12
VA	1442	3,0	35,0	4,10	50,8	32,5	0,11
VB	1491	2,9	33,4	4,09	38,1	65,1	0,30
VC	1496	3,0	21,3	5,29	38,1	95,8	0,10

Para o teor de finos < 0,42 mm, observa-se que 3 das 5 amostras selecionadas (IA, IIIA e IVA) estão com um teor levemente superior ao estipulado pela NBR 15116. Este elevado teor de finos < 0,42 mm é causado pela natureza do RCC, predominantemente cerâmica/mista e com presença de solo, acentuada pelo uso de britador de impacto que possui um elevado poder de redução de tamanho de partículas.

Neste caso, observa-se que o uso da curva B do DNER foi pouco útil na redução do teor de finos < 0,42 mm. Ou seja, nesta usina de reciclagem que utiliza um britador de impacto para produzir brita corrida reciclada de natureza cerâmica ou mista, o uso da curva granulométrica C seria mais indicado para reduzir o teor de finos < 0,42 mm do agregado do que a curva B.

A Figura 3 apresenta as distribuições granulométricas das amostras do grupo C. Pode-se afirmar que foi possível obter distribuições granulométricas das amostras I a V dentro da faixa I de referência do DNER, usando a curva média entre IA e IB como referência, uma vez que apenas duas amostras fugiram das faixas limites para os tamanho de partículas de 0,42 mm, 0,6 e 1,2 mm.

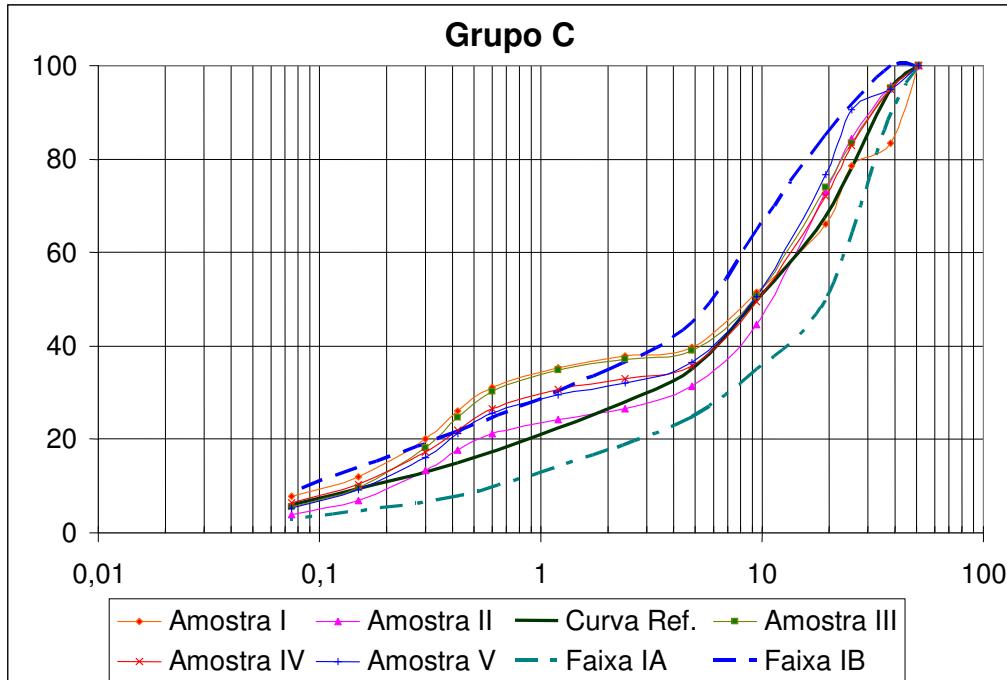


Figura 3: Distribuição granulométrica das amostras do grupo C em comparação com as curvas do DNER.

A Figura 4 facilita visualizar que, para todas as amostras, o controle granulométrico foi útil no aumento dos resultados de CBR, principalmente para a curva C que utilizou uma curva granulométrica mais grossa. Também para a curva C foram obtidos os melhores resultados de expansibilidade. Os resultados de CBR sem utilização da técnica de controle granulométrico (série A de resultados) foram os menores encontrados.

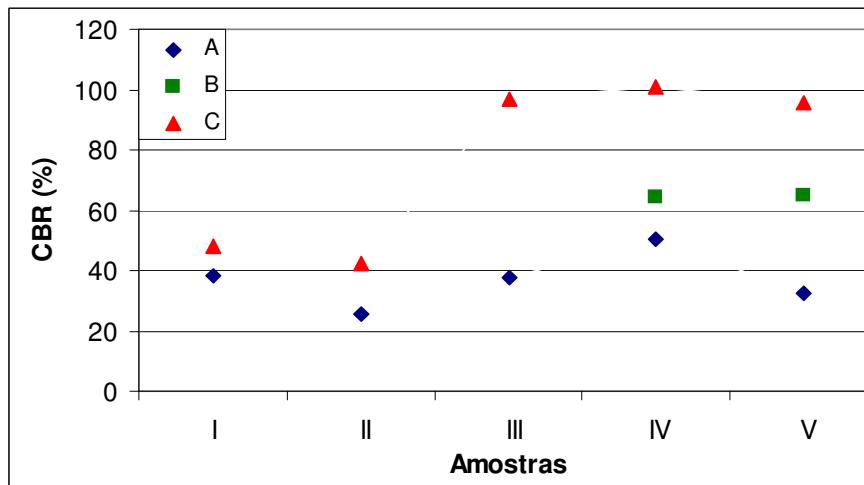


Figura 4: Resultados de CBR das 5 amostras de brita corrida reciclada, com e sem controle granulométrico.

A Figura 5 indica uma possível correlação entre a massa unitária e o CBR das amostras. Esta correlação era esperada, uma vez que para uma mesma densidade de massa real, um maior valor de densidade de massa unitária significa maior empacotamento dos grãos (menor índice de vazios) ou menor porosidade do agregado (por maior densidade de massa aparente), que geralmente resulta em maior resistência mecânica deste.

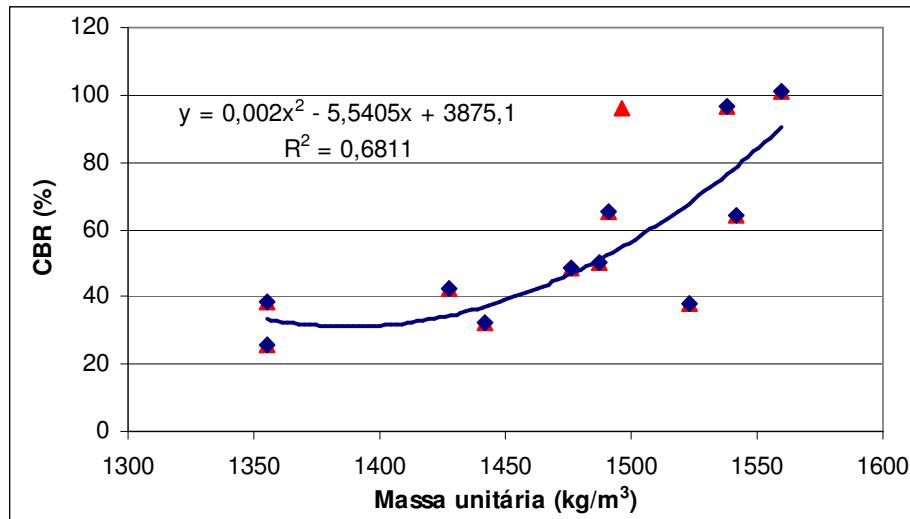


Figura 5: Relação entre a massa unitária e o CBR das amostras ensaiadas.

Também foi possível encontrar uma boa correlação entre o teor de finos < 0,42 mm e a expansibilidade. Na Figura 6, a expansibilidade obtida para as amostras IA, IIC, IVB e VB foram excluídas do cálculo de correlação por se apresentarem duvidosos em relação aos resultados das amostras de seus respectivos grupos, devendo ser realizada nova determinação da expansibilidade.

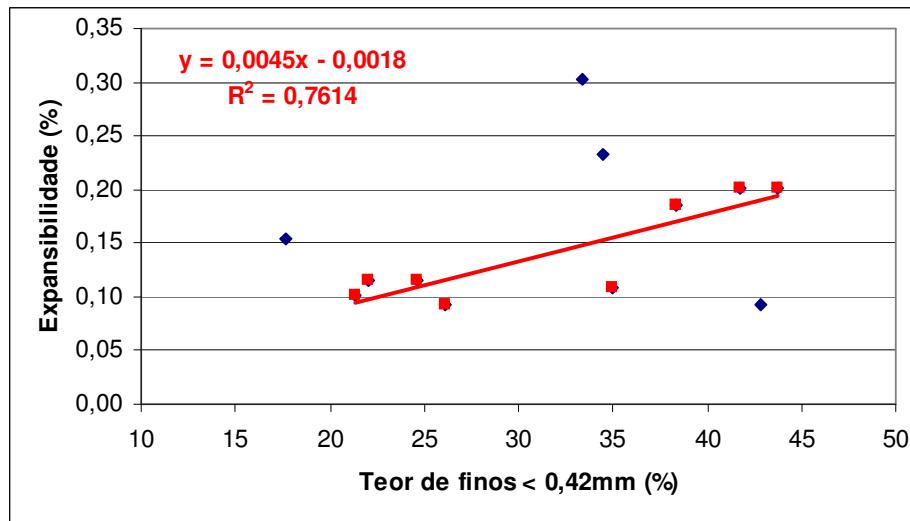


Figura 6: Correlação entre o teor de finos < 0,42 mm e a expansibilidade das amostras.

Com relação à variabilidade dos resultados (Tabela 6), o controle granulométrico foi útil para reduzir a variabilidade (amplitude, desvio-padrão e coeficiente de variação) das propriedades de massa unitária, módulo de finura e expansibilidade.

Tabela 6: Variabilidade das propriedades da brita corrida reciclada com e sem o controle granulométrico.

	Massa unitária (kg/m ³)		Módulo de finura		CBR (%)*)		Expansibili- de (%)		Teor de finos < 0,42 mm (%)		
	A	C	A	C	A	C	A	C	A	C	
Amplitude	168	131	0,71	0,52	17,7	5,2	0,11	0,06	8,7	8,4	
Desvio- padrão	76	52	0,30	0,19	9,1	2,8	0,05	0,02	3,6	3,3	
Coef. var. (%)	5,3	3,5	8,1	3,6	22,6	2,9	33,5	20,5	9,0	14,6	

* Calculado para apenas 3 amostras (III, IV e V).

Para o CBR, em função das amostras I e II terem sido ensaiadas com o teor de umidade fora do ponto de saturação, o cálculo de variabilidade deveria ser feito apenas com as 3 últimas amostras. Dessa forma, observa-se que a variabilidade reduziu significativamente para o grupo C em relação ao grupo A. Entretanto, como neste caso estão sendo consideradas apenas 3 amostras, torna-se necessário caracterizar um maior número de amostras para confirmar tal afirmação.

Para as propriedades relacionadas ao teor de finos, o controle granulométrico não influenciou significativamente na variabilidade.

Concluindo, os resultados indicam que o controle granulométrico foi útil na redução da variabilidade dos resultados de caracterização da brita corrida reciclada, bem como no aumento dos resultados de CBR. Os resultados foram melhores para a curva granulométrica C que apresentava uma distribuição mais grossa em relação à curva B. Em diversas amostras, caso não fosse feito o controle granulométrico pela curva C, o lote de brita corrida reciclada não seria aprovado para uso em base de pavimentos para o teor de finos < 0,42 mm.

Quanto à adoção desta prática em usinas, pode-se afirmar que ela apresenta, além de vantagens técnicas, também vantagens econômicas. A produção de brita corrida reciclada apenas pelo processo de controle granulométrico remove a necessidade de instalação de um transportador de correia móvel, reduzindo assim os gastos com instalação, energia e manutenção, além de possíveis paradas de produção. A composição da curva granulométrica na usina deve ser realizada de forma aproximada em função do número de conchas que a pá carregadeira irá usar para carregar o caminhão para cada um dos materiais disponíveis na usina (areia, pedrisco, brita e rachão). O carregamento de forma alternada de cada um destes materiais deverá ser feito para garantir que o material fique homogeneizado dentro do caminhão. O tempo gasto para isto é normalmente menor que o tempo gasto pela pá carregadeira para misturar, por exemplo, brita 1 e 2 na brita corrida quando esta se mostra excessivamente fina. Ou seja, esta operação normalmente não ocasiona perda de tempo de produção.

5 BIBLIOGRAFIAS

MOTTA, R. dos S. **Estudo Laboratorial de Agregado Reciclado de Resíduo Sólido da Construção Civil para Aplicação em Pavimentação de Baixo Volume de Tráfego.** São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

PINTO, T.P.P. **Utilização de resíduos de construção. Estudo do uso em argamassas.** São Carlos, 1986. 137p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PINTO, T.P.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** São Paulo, 1999. 189p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SIMONS, B.P.; HENDERIECKX, F. Guidelines for demolition with respect to the reuse of building materials: guidelines and experiences in Belgium. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON DEMOLITION AND REUSE OF CONCRETE AND MASONRY, 3., Odense, 1993. **Proceedings**. London, E & FN Spon, 1994. p.25-34. (RILEM Proceedings, 23).

6 AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Emlur, em nome do Sr. Lira e do Sr. Francisco, no auxílio para obtenção das amostras de agregados reciclados, ao CNPq pelo apoio financeiro e aos técnicos laboratorista Severino, Ezequiel e Cazuza da UFPE.