

AVALIAÇÃO DA GRANULOMETRIA NA INCORPORAÇÃO DE PNEUS PÓS-CONSUMO EM COMPÓSITOS DE CONCRETO

D.S. Rosa^{1*}; A.L. Moreno Jr²; T.C. Martins¹

¹ USF, Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Laboratório de Polímeros Biodegradáveis e Soluções Ambientais, 13251-900, Itatiba, SP

² UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, 13.083-970, Campinas, SP

Recebido: 9 de Dezembro, 2006; Revisado: 30 de Junho, 2007

Palavras-chave: meio ambiente, reciclagem de pneus, destinação de resíduos, concreto e materiais de baixo custo.

RESUMO

Um dos principais problemas que se apresenta atualmente e que diz respeito a qualquer política pública junto à tecnologia refere-se à destinação final de pneus inservíveis. No Brasil, este número é oficialmente, cerca de 6,5 milhões ao ano. A questão da destinação final deste tipo de produto apresenta deficiências não apenas no que toca às políticas das indústrias, mas também em relação à qualidade questionável e custos altos dessas possíveis alternativas. Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um material alternativo de baixo custo para aplicação na construção civil, procurando utilizar pneus inservíveis. No presente trabalho avalia-se algumas propriedades de concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de borracha de pneus inservíveis, triturados em duas granulometrias. Para todas as misturas foi utilizado o cimento Portland comum, areia e brita basáltica. As substituições foram de 5 e 10% em volume do agregado miúdo. As misturas foram avaliadas em relação à resistência à compressão, densidade, trabalhabilidade, absorção de água e, ao final, avaliadas em microscópio ótico. A adição destes resíduos de pneu provocou uma redução na resistência à compressão, enquanto que houve um aumento na absorção de água.

ABSTRACT

Over 6.5 million scrap tires are generated every year in Brazil. The proper disposal of the tires creates an increasing problem that needs to be addressed. Current disposal methods are wasteful and costly as they require either consumption of landfill space or continuous costly maintenance. Several studies have been carried out to reuse scrap tires in a variety of rubber and plastic products, incineration for production of electricity, or as fuel for cement kilns, as well as in asphalt concrete. Many researchers have investigated the use of recycled tire products in several traditional Civil Engineering materials. A solution to the problem of scrap-tire disposal is the potential use of tire chips and crumb rubber as mineral aggregate substitutes in Portland cement concrete mixes. The aim of the present work was the recycling of rubber from automobile tire treads, as

a partial substitute of fine aggregates in concrete. Composites obtained were characterized by destructive and non-destructive testing, in order to find a liable application. The fresh and hardened properties of such materials are compared with those of a typical reference formulation of concrete. Rubberized concrete was found to possess good esthetics, acceptable workability, and a smaller unit weight than normal concrete. However, rubberized concrete exhibited lower compressive strength than that of normal concrete. According to results obtained, it was found that when weight proportion increased and particle size of scrap rubber decreased, flow and density of composite in the fresh state decreased, as well as compressive strength.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com a qualidade do meio ambiente, aceleradamente deteriorado, voltou-se para os pneus descartados na natureza e que constituem, nos países mais desenvolvidos e em muitos dos em via de desenvolvimento, um já enorme passivo ambiental [1].

Considerando a dificuldade para a disposição das carcaças de pneus pós-consumo em aterros sanitários e a falta de uma legislação para controle da sua destinação adequada, tem havido uma tendência da população em abandonar estes resíduos sólidos em cursos de água, terrenos baldios e beiras de estradas, que agravam ainda mais o problema [2]. Todo pneu, em algum momento, se transformará em um resíduo potencialmente danoso à saúde pública e ao meio ambiente, já que quando abandonados em terrenos baldios ou armazenados à espera de destinação final tendem a acumular água no seu interior e representam um criadouro potencial do mosquito *Aedes Aegypti*, cujas larvas proliferam na água parada.

Para efeito de disposição final, os pneus são classificados como resíduos inertes, não havendo impedimento à sua destinação em aterros sanitários, desde que observadas as técnicas adequadas de manejo. A exigência de retalhamento ou tritramento fixada na resolução estadual foi uma forma de reduzir seu volume e a possibilidade de fazer os pneus voltarem à superfície, devido à dificuldade de compactação. A composição dos pneus pode ser verificada na Tabela 1, onde

* derval.rosa@saofrancisco.edu.br

o enxofre é responsável pela reticulação do elastômero, o que torna o pneu um material termofixo que duraria muitos anos para se degradar.

A possibilidade de incorporação de resíduos de pneus em misturas à base de cimento é uma contribuição da indústria da construção civil para reciclagem de resíduos prejudiciais ao meio ambiente, podendo também melhorar o desempenho dos materiais com sua adição. Isso é verdade quando são analisadas as propriedades elásticas da borracha, sua resistência ao impacto e sua baixa massa específica; características estas muitas vezes desejadas em concretos que podem ser melhoradas através da inserção do resíduo de borracha em sua composição.

Tabela 1 – Composição média dos elementos químicos encontrados em um pneu

Componente	% (em massa)
Borracha	36
Recheio SiO ₂	37
ZnO	12
Estabilizadores	3
S	1,3
Aço	18
Restante	3,5

ELDIN e SENOUCI (1993) realizaram um dos primeiros estudos com a incorporação de borracha de pneu em concreto. Estes autores fizeram substituições no agregado miúdo por borracha de 1mm, assim como a substituição no agregado graúdo por borracha com dimensões de 38, 25, 19 e 6mm. Além da menor trabalhabilidade após a incorporação da borracha, foi observada menor queda na resistência à compressão e resistência à tração de misturas com substituição no agregado miúdo e granulometrias mais finas. A queda nas propriedades mecânicas foi atribuída à falta de aderência entre a superfície da borracha e a matriz de cimento [3].

ROSTAMI et al. (1993) estudaram a resistência à compressão de concretos com substituição de 0 a 100% de agregado graúdo por borracha. O tratamento superficial do resíduo feito pelos autores, com o intuito de incremento de aderência da borracha com a matriz de cimento, inclui lavagem com água, solução de tetracloreto de carbono (CCl₄) e uma mistura de limpador látex. O resultados mostraram que a borracha apresenta grande quantidade de impurezas provenientes do processo de trituração e a simples lavagem com água melhorou a resistência à compressão em 16% em relação ao resíduo não tratado. O melhor resultado foi apresentado pelo tratamento com a solução de CCl₄, com um aumento da resistência de 57% em relação à borracha não tratada [4].

Além das propriedades de resistência mecânica, outros autores também estudaram as propriedades referentes à durabilidade do concreto adicionado de resíduos de borracha.

Procurando avaliar a durabilidade de borrachas submetidas a meios altamente alcalinos, HUYNH e RAGHAVAN (1997), fizeram estudos em dois tipos de granulometrias: menores que 4,75mm e menores que 2,36mm. O Resíduo foi exposto a várias soluções químicas: hidróxido de sódio

(NaOH) de pH 10, hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) de pH 12,5, cimento de pH 13 e água de pH 7. Foram mantidas em temperatura ambiente por até 4 meses. Foram feitos ensaios de perda de massa, resistência à tração, análise da microestrutura e determinação da variação de pH. Foi constatado que as alterações provocadas nas dimensões do resíduo e do pH não foram significativas e não houve perda na resistência mecânica da borracha. Embora o meio alcalino não provoque alterações consideráveis na borracha, sua adição provoca alterações no comportamento de concreto, argamassa e pasta de cimento. Essas alterações podem ser influenciadas pela forma, tamanho e quantidade de resíduo substituído [5]. Em estudo com argamassas de cimento contendo borracha de pneu, RAGHAVAN et al. (1998), mostraram que a trabalhabilidade das argamassas contendo borracha é próxima ou melhor que a das argamassas sem partículas de borracha, quando submetidas ao teste VeBe. Isso mostra que a propriedade estudada pode apresentar resultados diferentes dependendo do método adotado [6]. A influência da forma do resíduo e de como o ensaio é feito pode ser mostrada por KHATIB e BAYOMY (1999) [7]. Estes observaram que em concreto, pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, a mistura contendo borracha apresenta pior trabalhabilidade que a composição controle. Também foi observado que quanto maior a quantidade de borracha adicionada, menor é o abatimento, sendo que para 40% de substituição tem-se um abatimento próximo a zero.

Buscando resolver a questão do descarte dos pneus, estes podem ser cortados e triturados em várias operações de separação e em diversas granulometrias, podendo ser estas utilizadas em diversas aplicações, como em misturas asfálticas, em revestimentos de quadras e pistas de esportes, na fabricação de tapetes automotivos, adesivos e etc.

Neste trabalho propõe-se desenvolver um material alternativo de baixo custo para aplicação na construção civil, procurando utilizar pneus inservíveis e buscando atender a preocupação com a qualidade desse concreto e com o meio ambiente, uma vez que o uso do material incorporado ao concreto (pneu pós-consumo), reduzirá os impactos ambientais. Avaliaram-se diferentes granulometrias dos resíduos buscando verificar o efeito nas propriedades do concreto devido à substituição de parcela de areia e pedra por este material.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS UTILIZADOS

Pneu: Pneu convencional de caminhão, tipo G8, fabricado pela Goodyear, novo com defeitos de fabricação, moído e fornecido por Mattiuzzo Indústria e Comércio de Artefatos de Borracha Ltda, (Itatiba – SP). Foram avaliadas quatro granulometrias dos resíduos de pneu, denominados de Pneu 1, Pneu 2, Pneu 3 e Pneu 4. Para a preparação dos compósitos foram utilizados apenas os tipos com granulometrias similares às da areia e pedra.

Areia: A areia lavada, oriunda da região do Vale do Parnaíba e, fornecida pela Center Costa Itatiba Ltda (Itatiba – SP).

Brita: A brita, oriunda da região do município de Itatiba, extraída pela Contil, Indústria e Comércio Ltda (Itatiba – SP) e fornecida pela Center Costa Itatiba Ltda.

Cimento: Cimento Portland – CAUÊ CPII-E-32, fabricado por Camargo Correa Cimentos S.A. – Sítio Andrezza – Ijaci – MG.

Água: A água limpa de torneira – sem barro, óleo, galhos, folhas e raízes.

A Figura 1 ilustra os tamanhos dos resíduos de pneus utilizados neste trabalho.

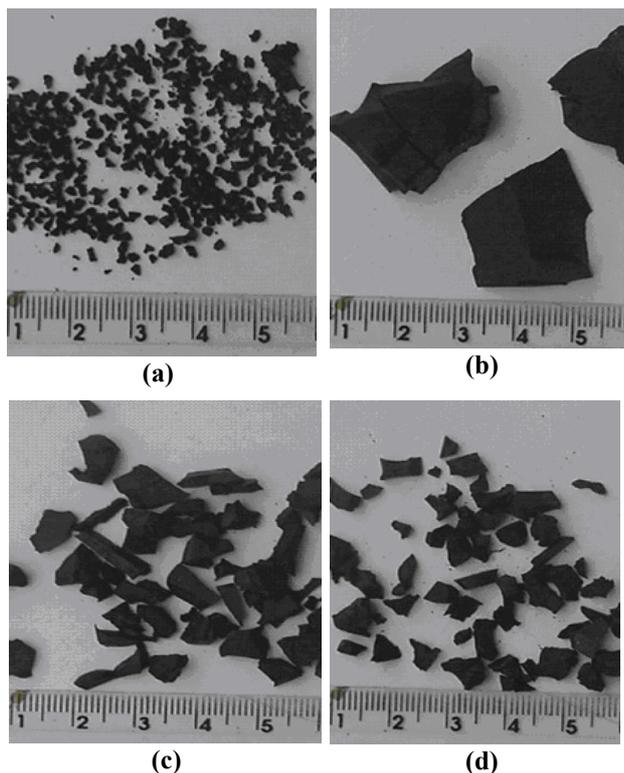


Figura 1 – Resíduos de pneus utilizados: (a) pneu 1, (b) pneu 2, (c) pneu 3 e (d) pneu 4.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados (resíduos de pneu, areia, brita e cimento) foram caracterizadas em relação à granulometria, massa específica, massa unitária aparente, módulo de finura e dimensão máxima.

Granulometria: Os grãos foram colocados na estufa a 110° C durante 4 horas e resfriados por 2 horas, colocados no agitador mecânico e, assim, observadas suas granulometrias. Foram realizados quatro testes em um agitador mecânico, com peneiras que variavam entre 0 (fundo) e até 12,5mm. A massa retida nas peneiras foi determinada utilizando uma balança convencional, fabricada por BBM Bragança Paulista SP. (Bragança Balanças e Máquinas Ltda), com capacidade para 10 kg [8].

Massa específica: A massa específica em relação aos grãos foi realizada segundo a norma ASTM C 792 [9]. Cerca de 500 g de amostra, ou seja, os diversos tamanhos de pneus

foram colocados na estufa a 110° C por 4 horas e, depois de resfriado, por 2 horas. Um frasco de Chapman foi utilizado, com 200ml de água e, adicionado 500g de um grão seco para se obter o resultado médio.

Massa unitária aparente: A massa unitária aparente foi determinada utilizando a norma ASTM C 138 [9]. Aproximadamente 6 kg de amostras foram colocadas na estufa a 110° C com um tempo de 4 horas. Depois de resfriadas, por duas horas, as amostras foram colocadas em um recipiente de faces retangulares de massa (M_r) igual a 9,823 kg com volume respectivo a 20 L e encontrado em relação às amostras uma massa média, (em relação aos quatro ensaios). Assim, dividindo a massa da amostra pelo volume do recipiente foi encontrada a massa unitária aparente, referente à média geral.

Módulo de finura: Cerca de 500 g de amostra foram colocados na estufa a 110° C por 4 horas e, após este resfriado por 2 horas. A amostra foi colocada no agitador mecânico, que é constituído por peneiras com as seguintes aberturas: 0 mm (fundo) 0,15 mm; 0,3 mm; 0,6 mm; 1,2 mm; 2,4 mm; 4,8 mm; 6,3 mm (peneira intermediária) e 9,5 mm. O módulo de finura é a quantidade em massa retida em todas as peneiras, excluindo a intermediária, e dividindo esse valor total por 100. A massa foi determinada utilizando uma balança convencional, fabricada por BBM Bragança Paulista SP. (Bragança Balanças e Máquinas Ltda), com capacidade para 10 kg.

Dimensão máxima: Uma massa de 500g de cada composição foi colocada na estufa para secagem a 110° C, por 4 horas e, resfriada por 2 horas. A amostra foi colocada numa série de peneiras de um agitador mecânico, sendo que a abertura em milímetros variava de 0 (fundo) até 9,5 mm, ou seja, este teste mostra que as granulometrias utilizadas tem um máximo em milímetros retido nas peneiras. A massa retida nas peneiras foi determinada utilizando uma balança convencional, fabricada por BBM Bragança Paulista SP. (Bragança Balanças e Máquinas Ltda), com capacidade para 10 kg.

2.3. PREPARAÇÃO DOS COMPÓSITOS: (PNEU + CONCRETO)

Em uma betoneira (Metalúrgica Lider Br.100-Curitiba-PR), foram colocadas a brita e metade da água que seria utilizada na formulação, deixando bater por 30 s. Em seguida adicionada a areia, (intervalo de 30 s.), o cimento (intervalo 30 s), o pneu e, por último a outra metade da água. Deixado bater por 2 minutos. Após isso, a mistura foi colocada nos moldes cilíndricos com 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura. (Figura 2), devidamente untados com óleo queimado para facilitar a retirada após secagem (duração 12 horas).

O traço adotado foi 1: 2: 3: 0,6, em massa. Para a preparação de 07 corpos-de-prova foram utilizadas as quantidades de 13 kg de cimento, 26 kg de areia, 39 kg de brita e 7,8 litros de água. Este traço utilizado na preparação dos compósitos foi determinado levando em consideração um estudo preliminar comparativo utilizando quatro tipos de granulo-

metria de pneu. Os grãos, denominados neste trabalho de tipo 1 (pó) e tipo 2, apresentaram a granulometria similar a da areia e a da brita, respectivamente. Nos compósitos preparados foram utilizados os dois tipos de grãos (tipo 1 e tipo 2). Para o tipo 1 foram preparadas composições contendo 5%, 10% e 20%, enquanto para o tipo 2 apenas 5% e 10%, em massa. O teor de 20% para o tipo 2 foi realizado, no entanto, não se observou a cura completa do compósito.



Figura 2 - Molde utilizado na preparação dos corpos-de-prova.

2.4. CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO

Teste de Slump:

Após a elaboração do concreto, em consonância com as especificações da norma ASTM C 143 [10], foi avaliada indiretamente a trabalhabilidade da mistura através do ensaio de abatimento do tronco de cone, o “slump-test”, conforme ilustra a Figura 3.

A máquina utilizada para o adensamento dos corpos-de-prova foi o agitador mecânico de 1 cm de diâmetro por 30 cm de comprimento.



Figura 3 – Ilustração do Cone utilizado no teste de Slump.

Processo de cura do compósito:

A cura do compósito escolhida foi a de via úmida (Figura 4), ou seja, os corpos-de-prova foram colocados submersos em água potável em um recipiente durante 28 dias. Após este tempo os corpos-de-prova foram retirados e secos a temperatura ambiente.



Figura 4 – Ilustração do processo de cura dos compósitos em água.

Resistência à compressão:

Os corpos-de-prova foram capeados com enxofre e os ensaios de compressão axial foram realizados na máquina de ensaio de compressão Forney; capacidade para 220 toneladas; Modelo DFM/I utilizando os corpos-de-prova capeados [11].

Absorção de água:

Foi realizado com todos os compósitos obtidos (5% do grão 1 e 2, 10% do grão 1 e 20% do grão 1) e constituiu na pesagem de amostras de concreto seco e após colocados submersos em água limpa por 12 horas. O teor de absorção de água consistiu no percentual de massa acrescida proporcionalmente a massa inicial.

Microscopia ótica:

O ensaio de microscopia ótica foi realizado com todas as amostras de compósitos. Inicialmente, os corpos-de-prova fraturados foram imersos em tinta vermelha para melhorar o contraste entre a borracha e os demais componentes do compósito. As fotomicrografias foram feitas a partir dos corpos-de-prova, realizadas em um microscópio óptico modelo BH2-UMA (Olympus Ltda. – São Paulo, SP, Brasil) com câmera fotográfica de CCD acoplada modelo CCS-212 (Samsung Ltda. – São Paulo, SP, Brasil). Foi adotado como padrão para todas as fotomicrografias; o aumento de 100X, para todas as amostras empregadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Granulometrias:

As Tabelas 3 e 4 apresentam os resultados médios da granulometria das quatro amostras de pneus ensaiadas. Os resultados demonstram que há uma maior quantidade, em massa, ou seja, de massa retida de grãos de pneu nas peneiras foi de 0,6 mm (Pneu 1), 4,8 mm (Pneu 2), 2,4mm (Pneu 3) e 1,2mm (Pneu 4).

Tabela 3 - Média aritmética da granulometria dos agregados de pneu 1 e 2.

Peneira ABNT (mm)	Pneu 1		Pneu 2	
	Massa retida (g)	(%) retida	Massa retida (g)	(%) retida
9,5	0	0,0	0	0,0
6,3	0	0,0	137,4	29,9
4,8	0	0,0	170,8	37,2
2,4	0	0,0	138,5	30,2
1,2	5,2	1,5	12	2,6
0,6	143,5	41,4	0,4	0,1
0,3	136	39,3	0,02	0,0
0,15	61,7	17,8	0,01	0,0
0	0,03	0,0	0	0,0
Total	346,4	100	459,1	100

Tabela 4 - Média aritmética da granulometria dos agregados de pneu 3 e 4.

Peneira ABNT (mm)	Pneu 3		Pneu 4	
	Massa retida (g)	(%) retida	Massa retida (g)	(%) retida
9,5	0	0,0	0	0,0
6,3	11,3	1,5	0	0,0
4,8	145,9	19,7	0	0,0
2,4	508,9	68,6	1,5	0,3
1,2	63,7	8,6	497,3	85,3
0,6	8,8	1,2	68,7	11,8
0,3	1,9	0,3	9,3	1,6
0,15	1,09	0,1	6,5	1,1
0	0,01	0,0	0,04	0,0
TOTAL	741,6	100	583,4	100

A Tabela 5 apresenta os resultados médios da granulometria das amostras de areia, brita. Os resultados médios apresentados demonstram que o maior percentual de quantidade de massa retida nas peneiras foi de 0,15 mm (Areia), 6,3 mm (Brita).

Tabela 5 - Média aritmética da granulometria dos agregados: Areia, Brita.

Peneira ABNT (mm)	Areia		Brita	
	Massa retida (g)	(%) retida	Massa retida (g)	(%) retida
12,7	0	0,0	9,3	0,1
9,5	0	0,0	440,5	4,6
6,3	11,3	0,6	4930,8	51,9
4,8	11,2	0,6	2781	29,2
2,4	41,7	2,4	1191	12,5
1,2	130	7,5	105	1,1
0,6	341,4	19,6	51	0,5
0,3	550,7	31,6	0	0,0
0,15	578,2	33,2	0	0,0
0,075	0	0,0	0	0,0
0	79,1	4,5	0	0,0
Total	1744	100,0	9509	100,0

A Tabela 6 resume os resultados médios das dimensões dos pneus 1, 2, 3 e 4, da areia e brita para serem utilizados nos compósitos, visando relacionar os tamanhos dos resíduos de pneu com os componentes do compósito, areia e pedra.

Tabela 6 - Caracterização das dimensões médias da areia e brita em relação aos pneus.

Areia	Brita	Pneu 1	Pneu 2	Pneu 3	Pneu 4
0,5 mm	5,5 mm	0,4 mm	4,4 mm	2,8 mm	1,1 mm

Observando a granulometria da amostra de areia em relação aos pneus caracterizados (1-4), Tabela 6, pode-se observar que o pneu 1 apresenta uma distribuição granulométrica similar ao da areia. Em relação ao tamanho da brita, o grão do tipo 2 foi o escolhido por apresentar resultado equivalente, em relação a brita.

A Figura 6 ilustra os comportamentos médios dos quatro ensaios de caracterização granulométrica das amostras de pneu 1, 2, 3 e 4 e, também, da areia, brita e cimento.

Os resultados dos ensaios da massa unitária aparente e massa específica das amostras estão apresentados na Tabela 7. Em relação à caracterização da massa unitária aparente observa-se na Tabela 7 que, a amostra de pneu 1 é a amostra que apresenta o menor valor da propriedade, enquanto que os pneus 2 e 3 obtiveram os maiores resultados. Para os valores de massas específicas ocorreu uma similaridade para todas as amostras de pneu, o que é característico de um material com uma certa homogeneidade. Os resultados das propriedades avaliadas da areia, brita e cimento escolhidos, demonstram que estes se enquadram nas especificações utilizadas usualmente na construção civil; ou seja, um cimento de uso comum, o Portland CII E32, uma areia média e brita 1 (diâmetro máximo entre 9,5 e 19 mm). Areia média e

brita 1 tem emprego corrente na grande maioria dos concretos usuais em nosso País.

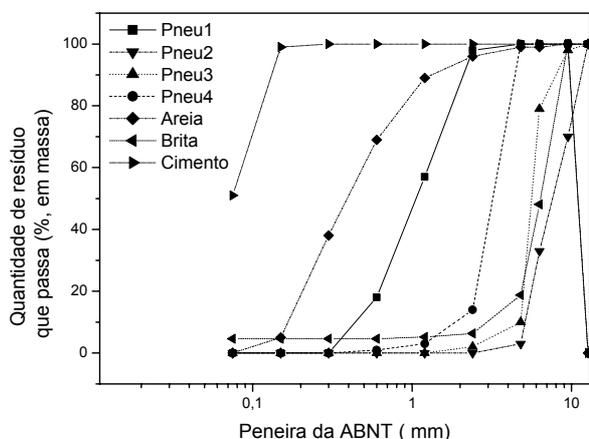


Figura 6 – Ilustração do comportamento da granulometria dos materiais utilizados.

Tabela 7 - Média aritmética da massa unitária aparente e massa específica das amostras de pneu, areia, britam e cimento.

	Massa unitária aparente (kg/L)	Massa específica (g/mL)
Pneu 1	0,31 ± 0,01	0,003
Pneu 2	0,47 ± 0,01	0,003
Pneu 3	0,47 ± 0,01	0,003
Pneu 4	0,39 ± 0,01	0,003
Areia	1,37 ± 0,01	2,56
Brita	1,38 ± 0,01	2,89
Cimento	1,50 ± 0,01	3,16

Os grãos de pneus escolhidos para a preparação dos compósitos levaram em consideração a granulometria e a massa específica. A escolha dos pneus 1 e 2 para a preparação dos compósitos foi feita levando-se em consideração os aspectos práticos na preparação do composto, ou seja, facilidade na mistura do composto. Teve-se como principal objetivo levar em consideração especificações utilizadas usualmente na construção civil, no entanto, utilizar materiais mais leves que os usualmente utilizados, ou seja, areia e pedra. Segundo a NBR 7211, os valores de massas específicas obtidas para todos os pneus os classificam como materiais leves.

O cimento utilizado tem como características relativas à finura um resíduo na peneira 200 de, aproximadamente, 1% e uma superfície específica Blaine de, aproximadamente, 400 m²/kg. Os resultados do módulo de finura e da dimensão máxima das amostras de pneu, areia, brita utilizadas para a preparação dos compósitos estão apresentados na Tabela 8. Segundo a NBR 7211 [12] o pneu 1 e a areia podem ser classificados como agregados miúdos, ou seja com diâmetro menor que 4,8 mm, enquanto que os demais agregados, como grãos. Os resultados de dimensão máxima demonstram uma diferença significativa entre as amostras de pneu 1

e areia, bem como pneu 2 e brita. Cabe salientar que neste trabalho não foi levada em consideração a forma da partícula.

Tabela 8 - Média aritmética da dimensão máxima e do módulo de finura das amostras dos agregados utilizados.

	Dimensão Máxima (mm)	Módulo de finura
Pneu 1	1,2	3,5 ± 0,1
Pneu 2	6,3	4,2 ± 0,1
Areia	6,3	1,7 ± 0,1
Brita	10,3	4,5 ± 0,1
Cimento	0,3	0,9 ± 0,1

3.2. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Os resultados encontrados do Teste de Slump estão apresentados na Tabela 9. Os resultados estão de acordo com o esperado.

Tabela 9 – Análise do abatimento do concreto.

Abatimento (a)	Processos
a > 20	Mecânico
20 ≤ a ≤ 60	Manual ou Mecânico
60 ≤ a	Manual

Resistência à compressão:

A Tabela 10 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos utilizando os resíduos de pneu 1, nas quantidades de 5%, 10% e 20%, em massa, com 28 dias de cura úmida.

Tabela 10 – Resultados médios dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos utilizando pneu 1.

Ensaio	Teor de resíduos de pneu 1				
	0%	5%	10%	20%	
Resistência à compressão (MPa)	1	33.067	17.658	17.506	1.999
	2	33.874	17.630	17.568	2.496
	3	33.562	17.789	18.057	1.379
	4	33.749	16.403	18.147	1.917
	5	33.745	17.278	19.154	1.400
	6	33.648	17.757	18.259	1.635
Média	33.607	17.419	18.115	1.804	
Estimativa do desvio-padrão	284	530	596	425	

Os resultados de resistência à compressão, apresentados na Tabela 10, demonstram uma redução média da propriedade de 47%, quando comparado com o concreto sem adição, e

uma similaridade entre os compósitos contendo 5% e 10%, em massa, de pneu 1. Na adição de 20% ocorre uma redução drástica da propriedade.

A Tabela 11 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos utilizando os resíduos de pneu 2, nas quantidades de 5% e 10%, em massa, com 28 dias de cura úmida.

Tabela 11 – Resultados médios dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos utilizando pneu 2.

	Ensaio	Teor de resíduos de pneu 2		
		0 %	5%	10%
Resistência à compressão (MPa)	1	33.067	22.008	15.541
	2	33.874	21.029	15.644
	3	33.562	19.933	15.727
	4	33.749	22.077	15.286
	5	33.745	21.050	15.010
	6	33.648	21.623	15.648
Média		33.607	21.287	15.476
Estimativa do desvio-padrão		284	801	275

Quanto aos resultados das misturas apresentadas na Tabela 11, pode-se observar que há uma redução de 37% e 54% na resistência à compressão, quando são comparadas as amostras sem resíduo com as amostras com 5% e 10% de pneu 2, respectivamente.

Os resultados médios apresentados nas Tabela 10 e 11 demonstram que nos compósitos com menores teores de borracha (5%) as formulações contendo resíduos com maior granulometria (pneu 2) apresentam uma resistência à compressão superior, enquanto que para os compósitos contendo 10% de adição de borracha (pneu 1), ou seja, com menores granulometrias, os valores de resistência à compressão são superiores.

Teste de absorção de água:

A Tabela 12 apresenta os resultados médios da análise de absorção de água realizadas no concreto sem pneu e nos compósitos.

Tabela 12 – Resultados médios de absorção de água do concreto e dos compósitos

	Seco (g)	Molhado (g)	Qtde. de água absorvida (g)	Qtde. (%)
0%	13.409	13.471	62	0,46
5% Grão 1	12.577	12.645	68	0,54
5% Grão 2	12.454	12.702	248	1,99
10% Grão 1	12.771	12.778	7	0,05
10% Grão 2	12.209	12.308	99	0,81
20% Grão 1	10.381	10.773	392	3,78

Tabela 12 mostra que, quando comparadas à mistura de concreto sem adição, a adição de borracha nos teores de 5% e 10% não trouxe variações significativas em relação à absorção de água. O maior valor obtido para a absorção de água foi para a amostra com adição de 20% de borracha (pneu 2). Neste caso, possivelmente, para nesta granulometria há maior quantidade de espaços vazios entre as partículas de resíduo de pneu, o que pode provocar uma maior retenção da água.

Teste de microscopia ótica:

A Figura 7 apresenta as fotomicrografias dos compósitos contendo 5% e 10% utilizando pneu 1.

Pela Figura 7, observa-se que há uma melhor dispersão do resíduo para as formulações contendo o pneu 2. Possivelmente na mistura com adição de borracha com menor granulometria o material se aglutina não proporcionando uma melhor dispersão, isso também foi observado por Rosa e Guedes, quando incorporou uma grande quantidade de resíduo de poliuretano no desenvolvimento de tapete de borracha [13, 14].

4. CONCLUSÕES

A análise do ensaio de índice de consistência mostrou que a adição da borracha de pneu diminui a trabalhabilidade do composto. A absorção de água, também analisada, indica que esta adição, em teores de até 10%, não traz alterações significativas nesta propriedade.

Os ensaios referentes à resistência mecânica apresentaram valores mais baixos com a adição da borracha de pneu na mistura, confirmando o que foi encontrado em literatura. Isso ocorre porque a borracha é um material que permite maiores deformações, atuando como vazios dentro do concreto. As perdas na resistência à compressão foram da ordem de 40% a 55%.

O maior teor de ar incorporado nas misturas contendo borracha também pode ser considerado como fator que influencia na perda de resistência à compressão.

O uso do concreto com borracha na construção civil, através dos resultados obtidos, indicam que seu uso com função estrutural é inviável. Embora seja possível a execução de concretos com resistência de 15MPa e 20MPa, devido à perda de resistência após a adição da borracha, estas resistências são alcançadas às custas de grande incremento no consumo de cimento.

Entretanto, vale observar que o uso destas misturas em elementos pré-moldados como blocos de alvenaria pode ser muito interessante. Para tanto, é imprescindível que sejam feitos ensaios quanto à toxicidade dos gases liberados quando estes elementos são submetidos a temperaturas elevadas.

O uso destas misturas em blocos de pavimentação apresenta-se como boa alternativa para o aproveitamento deste material, visto que a resistência à compressão não é sua principal propriedade. Além disso, os resultados referentes à resistência à abrasão obtidos na literatura indicam que esta pode ser uma boa aplicação para o concreto com borracha.



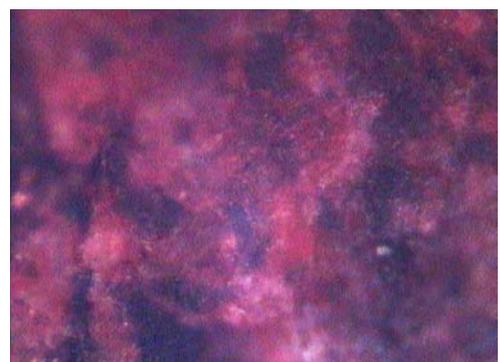
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7 - Fotomicrografias dos compósitos - (a) Pneu 1 com 5%, (b) Pneu 1 com 10%, (c) Pneu 2 com 5% e (d) Pneu 2 com 10%.

AGRADECIMENTOS

À Universidade São Francisco. Derval dos Santos Rosa agradece ao CNPq (processos 304577/2004-9) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS:

1. ROSA, D.S.; ANGELINI, J.M.G.; AGNELLI, J.A.M.; MEI L.H.I., *Polymer Testing* 24 (2005) 1022.
2. COMMITTEE ON ENERGY AND COMMERCE. SUBCOMMITTEE ON TRANSPORTATION AND HAZARDOUS MATERIALS, Development of Recycling Markets, U.S. G.P.O., Supt. of Docs., Congressional Sales Office, (1991) p.657.
3. ELDIN, N.N.; SENOUCHE, A.B., *Cement, Concrete and Aggregates* 15 (1993) 74.
4. ROSTAMI, H.; LEPORE, J.; SILVESTIM, T.; ZANDI, I., *Use of Recycled Rubber Tires in Concrete*. In: Proc. Int. Conf. Concrete 2000: Economic and Durable Construction through Excellence University of Dundee, UK, 1993.
5. HUYNH, H.; RAGHAVAN, D., *Advn Cem. Bas Mat.* 6 (1997) 138.
6. RAGHAVAN, D.; HUYNH, H.; FERRARIS, C. F., *Journal of Materials Science* 33 (1998) 1745.
7. KHATIB, Z.K., BAYOMY, F.M., *J. Mat. in Civ. Engrg.*, 11 (1999) 206.
8. American Society for Testing and Materials – (ASTM- C-136-06) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates Concrete and Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 4.02, (2006) 1.
9. American Society for Testing and Materials (ASTM C138/C138M-01a Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete), Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 4.02, (1998) 1.
10. American Society for Testing and Materials – (ASTM- C-143/C 143M-05a) Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 4.02, (2006) 1.
11. American Society for Testing and Materials – ASTM- C39/C39M-05e1 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 4.2, 1999 1.
12. NBR 7211 – Agregado para concreto, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 01, 2005.
13. ROSA, D.; GUEDES, C.G.F., *Polímeros: Ciência e Tecnologia* 13 (2003) 64.
14. GUEDES, C.G.F.; ROSA, D.S., *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology* 18 (2002) 69.